

# ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI

32.1

2021

*All'Insegna del Giglio*



ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI



CNR – DIPARTIMENTO SCIENZE UMANE E SOCIALI, PATRIMONIO CULTURALE

ISTITUTO DI SCIENZE DEL PATRIMONIO CULTURALE

Rivista annuale open access e peer reviewed  
fondata da Mauro Cristofani e Riccardo Francovich

Comitato Scientifico: Giovanni Azzena, John Boardman, Robin B. Boast, Francisco Burillo Mozota, Alessandra Caravale, Christopher Carr, Martin O.H. Carver, Francesco D'Andria, François Djindjian, James E. Doran, Virginie Fromageot-Laniepce, Salvatore Garraffo, Filippo Giudice, Antonio Gottarelli, Maria Pia Guermandi, Anne-Marie Guimier-Sorbets, Ian Hodder, F. Roy Hodson, Donna C. Kurtz, Adriano Maggiani, Daniele Manacorda, Costanza Miliani, Paola Moscati, Tito Orlandi, Clive R. Orton, Maria Cecilia Parra, Xavier Rodier, Francesco Roncalli, Grazia Semeraro, Paolo Sommella, Gianluca Tagliamonte, Marco Valenti

Direttore responsabile: Paola Moscati

Redazione: Claudio Barchesi, Francesca Buscemi, Letizia Ceccarelli, Sara Di Marcello, Alessandra Piergrossi, Irene Rossi

Policy and Guidelines: <http://www.archcalc.cnr.it/pages/guidelines.php>

Autorizzazione del presidente del Tribunale di Firenze n. 3894 del 6/11/1989

Indirizzo Redazione: Rivista «Archeologia e Calcolatori», CNR – ISPC, Area della Ricerca di Roma 1, Via Salaria Km 29,300, 00015 Monterotondo Stazione (RM)  
Tel. +39.06.90672670 – Fax +39.06.90672818  
E-mail: [redazioneac.ispc@ispc.cnr.it](mailto:redazioneac.ispc@ispc.cnr.it)  
<http://www.archcalc.cnr.it/>

Edizione e distribuzione: Edizioni ALL'INSEGNA DEL GIGLIO s.a.s.,  
Via Arrigo Boito 50-52, 50019 Sesto Fiorentino (FI)  
Tel. +39.055.6142675  
E-mail: [redazione@insegnadelgiglio.it](mailto:redazione@insegnadelgiglio.it) – [ordini@insegnadelgiglio.it](mailto:ordini@insegnadelgiglio.it)  
<https://www.insegnadelgiglio.it/>

# ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI

32.1

2021

*All'Insegna del Giglio*



Realizzazione grafica della sovracoperta di Marcello Bellisario  
Rivista «Archeologia e Calcolatori» (ISSN 1120-6861, e-ISSN 2385-1953)  
ISBN 978-88-9285-056-9, e-ISBN 978-88-9285-057-6  
© 2021 – All’Insegna del Giglio s.a.s. – [www.insegnadelgiglio.it](http://www.insegnadelgiglio.it)  
Sesto Fiorentino (FI), novembre 2021  
Stampa, MDF print

Abbonamento 2021: 2 volumi, 32.1 e 32.2, € 60,00.  
Spedizione: Italia, gratuita; estero, a carico del destinatario.  
<https://www.insegnadelgiglio.it/categoria-prodotto/abbonamenti/>

*in ricordo di Gianni Adamo*

«La dinamicità e la capacità di integrazione che caratterizzano il metodo e gli strumenti dell'informatica costituiscono una via privilegiata attraverso la quale è auspicabile far transitare le conoscenze e i risultati ottenuti anche da prospettive diverse, per alimentare il patrimonio di risorse linguistiche e nozionali al quale ha bisogno di attingere, con immediatezza e in modo unitario, la società multilingue dell'informazione» (G. Adamo, *Tra lessicologia e terminologia*, Lexicon Philosophicum. Quaderni di terminologia filosofica e storia delle idee, 10, 1999, 17).



## INDICE

EMANUELE CANCELLIERI, <i>Morphometric analysis of Middle Stone Age tanged tools from South-Western Libya, Central Sahara. A regional perspective</i>	7
ENRICO LUCCI, <i>Understanding the effect of trampling in a spatial perspective: a case study from a long-lived-in dwelling space of the Bronze Age settlement of Coppa Nevigata (South-Eastern Italy)</i>	25
DAVIDE DELPIANO, <i>Antiche e moderne tecnologie: l'applicazione delle tecniche di rilevamento tridimensionale per la rappresentazione e l'analisi dei manufatti litici</i>	43
KAMAL ALDIN NIKNAMI, HAYYAN JABARZADEH, MAHSA VAHABI, <i>Archaeological survey of the western boundary strip of Iran through using remote sensing techniques</i>	63
ILARIA CACCIARI, GIORGIO F. POCOBELLI, <i>The contribution of artificial intelligence to aerial photointerpretation of archaeological sites: a comparison between traditional and machine learning methods</i>	81
JOSÉ MARÍA GUERRERO VEGA, ANTONIO PIZZO, <i>Análisis arquitectónico y aplicación de metodología BIM en el santuario extraurbano de Tusculum</i>	99
MICHELE ABBALE, MARCO CAVALAZZI, <i>Morphometric analysis for geoarchaeological research: from testing different methods to results verification in the Romagna Plain</i>	117
ALESSANDRO ALESSIO RUCCO, <i>Estensione delle Valli di Comacchio tra 1000 e 1500 d.C.: geoarcheologia, cartografia storica e informatica</i>	137
ELISABETTA GIORGI, LUCA LUPPINO, NICOLA LAPACCIANA, JACOPO SCOZ, <i>Accurata, ma sostenibile: soluzioni operative per la documentazione grafica e fotografica dello scavo sul sito di Vignale</i>	155
LORENZO CALVELLI, LUIGI SPERTI, MYRIAM PILUTTI NAMER, ELEONORA DELPOZZO, <i>Misurazioni digitali non invasive di spolia veneziani: innovazioni di metodo e proposte di applicazione</i>	175
GIULIANO DE FELICE, ADRIANA CAMERINO, REMO PAVONE, <i>Archeologia virtuale del passato contemporaneo. Dal rilievo alla ricostruzione digitale del campo PG 65 di Altamura (BA)</i>	195
FRANCESCO GABELLONE, <i>Principi e metodi dell'archeologia ricostruttiva. Dall'approccio filologico alla ricostruzione tipologica</i>	213
ELISA BRENER, GIORGIA CAFICI, GIULIA DEOTTO, <i>La statua ritrovata. Identificazione, analisi e proposta di ricostruzione virtuale di una scultura conservata presso il Museo Egizio di Torino</i>	233
MARIA DE FALCO, MARIA LAURA NAPPI, ANTONIA AULETTA, CARLA LANGELLA, <i>Dal digitale al materiale: design e tecnologie digitali per la creazione di kit esperienziali per il Museo Archeologico Nazionale di Napoli</i>	251

ALESSIA MORIGI, FILIPPO FONTANA, FRANCESCO GARBASI, <i>ParmAumentata. Ricerca archeologica, augmented reality e user experience nella ricostruzione del paesaggio urbano di Parma</i>	269
ALEXANDRA CHAVARRÍA ARNAU, PAOLO VEDOVETTO, <i>Wiki Loves Churches! La piattaforma WikiCARE per la catalogazione collaborativa delle chiese altomedievali in Italia</i>	291
MATTEO FRASSINE, STEFANIA DE FRANCESCO, ALESSANDRO ZAMBETTI, <i>RAPTOR reloaded. Un geodatabase gestionale per la tutela archeologica: nuovi aggiornamenti per un sistema aperto</i>	307
IRENE ROSSI, NICOLÒ PARACIANI, <i>IT applications to archaeology and the OA diamond journals' challenge. Enhancing access and reuse of textual and visual resources</i>	325

\*  
\*   \*

FROM DIGITALISATION AND VIRTUAL RECONSTRUCTION OF ANCIENT MUSICAL INSTRUMENTS TO SOUND HERITAGE SIMULATION AND PRESERVATION, edited by ANGELA BELLIA

ANGELA BELLIA, <i>Introduction: an overview of how virtual reconstructions and sound simulations can improve our knowledge on ancient musical instruments and sound heritage</i>	351
ANTONIO RODÀ, GIOVANNI DE POLI, SERGIO CANAZZA, ZEZHOU SUN, EMILY WHITING, <i>3D virtual reconstruction and sound simulation of old musical instruments</i>	359
ANGELA BELLIA, DANILLO PAOLO PAVONE, <i>Computed Tomography and handcrafting processes of an ancient musical instrument: the aulos from Poseidonia</i>	375
STEFAN HAGEL, <i>Assessing unknown parameters of instrument finds by writing software</i>	403
GEORGIOS KOUROUPETROGLOU, SPYROS POLYCHRONOPOULOS, KONSTANTINOS BAKOGIANNIS, <i>Augmentation and enrichment of cultural exhibits via digital interactive sound reconstruction of ancient Greek musical instruments</i>	423
PAMELA JORDAN, <i>Searching for ancient sonic experience in present-day landscapes</i>	439
MARIA CRISTINA MANZETTI, NIKOS PAPADOPOULOS, <i>Being a spectator in a Roman theatre: a VR APP</i>	457
SERGIO CANAZZA, GIOVANNI DE POLI, ALVISE VIDOLIN, <i>Not only paper: computer engineering to contrast the eclipse of the audio documents. The case study of a personal archive</i>	469

*Note e Recensioni:*

*Diritto d'autore, copyright e licenze Creative Commons* (A. Caravale), p. 489; A. DEL BIMBO *et al.* (eds.), *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges Virtual Event, January 10-15, 2021, Proceedings, Part VII, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Pattern Recognition for Cultural Heritage* (LNCS, vol. 12667), Springer 2021 (F. Buscemi), p. 492; R. VECCHIATTINI (ed.), *La datazione delle malte in architettura tra archeologia e archeometria*, «Archeologia dell'Architettura», 24, 2019, 1-119 (L. Ceccarelli), p. 497.

## MORPHOMETRIC ANALYSIS OF MIDDLE STONE AGE TANGED TOOLS FROM SOUTH-WESTERN LIBYA, CENTRAL SAHARA. A REGIONAL PERSPECTIVE

### 1. INTRODUCTION

The Aterian is a late Middle Stone Age complex of North Africa widely documented from the Sahara to the Mediterranean and chronologically spanning from around 145 ka to 30 ka (see SCERRI, SPINAPOLICE 2019 for a recent review). In the central Sahara, as the most part of Pleistocene archaeological contexts, Aterian sites are widespread but mostly undated. A notable exception is represented by the cave sites of the Tadrart Acacus mountains, in SW Libya, where geochronological data tethers the Aterian occupation to hyperarid phases of the late Pleistocene dated to ca. 70-60 ka (CREMASCHI *et al.* 1998).

Outside the Acacus caves, and in particular in the lowlands, Aterian sites consist of surface scatters of variable size and density, whose attribution strongly depends on the presence of few classes of artefacts. Among these are characteristic stone tools, either pointed or not pointed forms (for example points, scrapers, end-scrapers, denticulates), characterized by the presence of a tang (see below Fig. 2f), widely accepted as to be related to hafting purposes (e.g. IOVITA 2011; TOMASSO, ROTS 2018; see MASSUSSI, LEMORINI 2004-2005; FALZETTI *et al.* 2017 for alternative views).

The chronological span of the Aterian occupation in the areas outside the Acacus mountain is not known. During the period of occupation of the Acacus caves (Marine Isotope Stage 4), the sand dunes in the surrounding lowlands should have been rather challenging environments characterized by a reduced carrying capacity; to the contrary, the widely recognised potential of mountain areas to retain water reserves also in desert regions (WILLIAMS 2014) possibly allowed the central Saharan massifs to act as a refugium under the environmental stress of the most arid phases of the Late Pleistocene. While one cannot rule out that the successful adaptation to arid environments of the Acacus peoples could have let them to cope and take advantage of the residual resources kept also by the harshest environments in the framework of seasonally organized settlement subsistence patterns (CLARK *et al.* 2008), it is likely that the archaeological record from these ranges also results from earlier Aterian human occupation during wetter phases (CANCELLIERI, DI LERNIA 2013).

As stated, there are currently no absolute age determinations for Aterian archaeological contexts from areas outside the Acacus. Nevertheless,

within the current state of knowledge and field research limitations, it is worth to take advantage of available geospatial and archaeological data archives to continue investigating past human dynamics and suggest likely patterns to be confirmed/confuted as soon as more evidence will be available. Accordingly, this paper aims at investigating morphometric variability of Aterian tanged tools from the SW Fezzan (Libya), both at a regional and an intra-regional scale, to help understanding some major population dynamics. As a large wealth of research proves, comparative analysis relying on stone artefacts' metric and shape attributes is able to shed light on diverse phenomena, like for example the origins of projectile weaponry or the significance of morphological variation across regions and continents (e.g. SHOTT 1997; YELLEN 1998; BROOKS *et al.* 2006; SISK, SHEA 2011). Similarly, it is here considered that the combination of morphometric and environmental variables is capable of revealing some insights on settlement pattern and human dynamics according to fluctuating econiches and variably distributed availability of resources.

## 2. RESEARCH AREA

The study area is located in the SW of the Fezzan region, in Libya, close to the border with Algeria and Niger (Fig. 1). It is approximately framed between 24°-26° N and 10°-13° E. It consists of a range of diversified physiographic features, comprising mountains, sand seas and large fluvial plains. Most of its geomorphological features are fossil and they originated in warm humid phases of the Pleistocene (interglacials) and the Early Holocene. The Acacus and Messak are elongated massifs delimited by abrupt scarps to the W and NW, respectively. The Acacus is characterized by an articulated fossil drainage network and represents the only area with diffuse presence of caves and rock-shelters famous for their Holocene rock art and archaeology (MORI 1965; CREMASCHI, DI LERNIA 1999; DI LERNIA, ZAMPETTI 2008; GALLINARO 2013). The Messak is a cuesta-type relief incised by a complex net of fossil river valleys (ZERBONI *et al.* 2011). It is formed by two main massifs, the Messak Mellet, to the S, and the Messak Settafet, to the N. The landscape is dominated by a vast stone pavement marked by black varnish. The main physiographic units are residual surfaces (hamada and serir) punctuated by endorheic depressions (PEREGO *et al.* 2011; KNIGHT, ZERBONI 2018).

Most of the lowlands surrounding the mountains are covered by the dune-fields of the Erg Tittersin, to the NW of the study area, the Erg Uan Kasa, between the Acacus and the Messak, and the Edeyen of Murzuq to the SE. The lowlands also include some large wadi systems: the Wadi Tanezzuft, W of the Acacus; the Wadi El-Ajal and the Wadi Berjuj respectively N and S of the Messak.

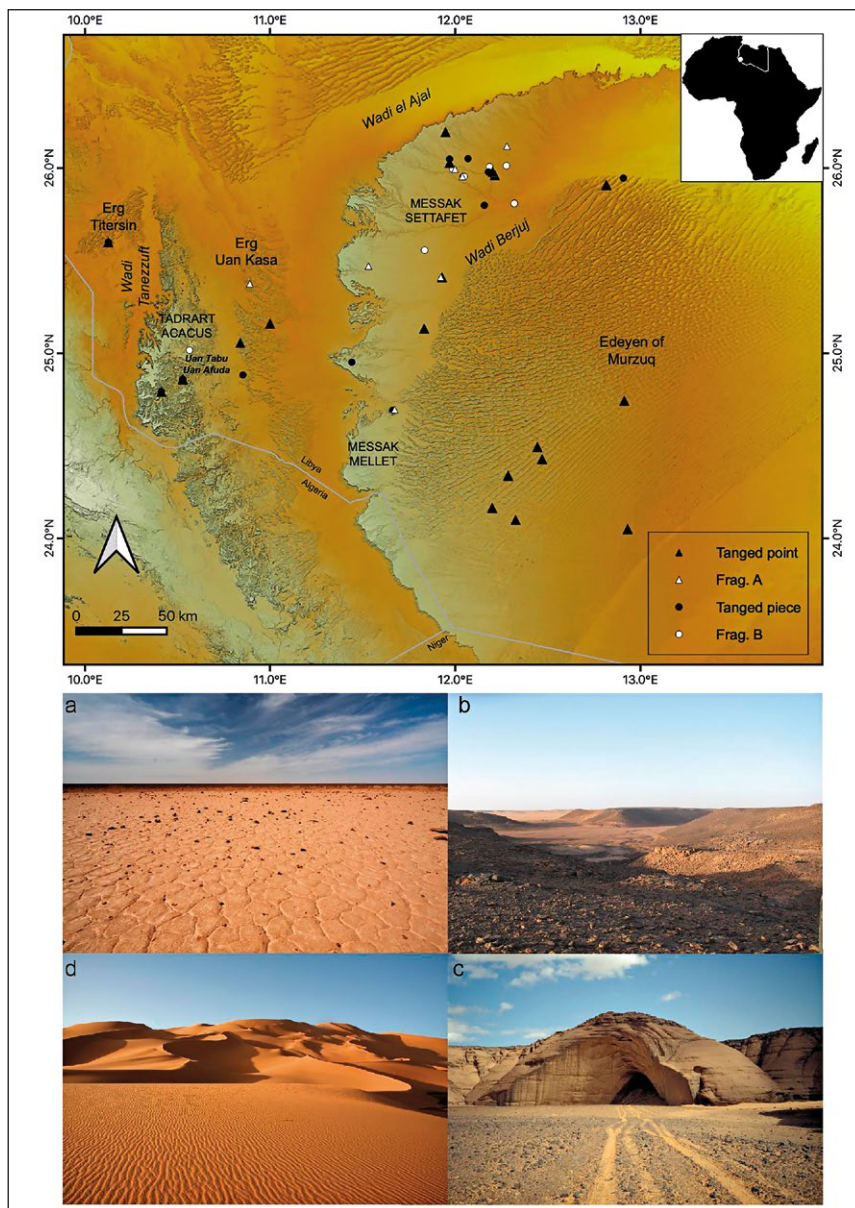


Fig. 1 – Top: map of the study area and localization of the samples comprised in this study (see text and Fig. 2 a-e for details on artefacts classification). Bottom: examples of environmental settings of the study region: a) endorheic depression and b) net of wadis in the Messak; c) the Uan Afuda cave in the Tadrart Acacus; d) a dune-field in the Wadi Tanezzuft (The Archaeological Mission in the Sahara, Sapienza University of Rome).



The Aterian archaeological record mostly consists of surface sites. In the main wadi systems the evidence is scanty and scattered. This is partly due to the early Holocene fluvial activity, which has eroded or buried most of the pre-Holocene evidences. The Erg Tetersin record is made of a single Aterian site. A handful of Aterian artefacts come from northern Wadi Tanezzouft. Aterian occurrences in the edeyen of Murzuq are mostly isolated artefacts found on theserir and on the dune margins (CREMASCHI, DI LERNIA 1998; CREMASCHI *et al.* 1998; ANAG *et al.* 2007; CANCELLIERI *et al.* 2016).

The record from the Acacus includes shelters, caves and open-air sites (CREMASCHI *et al.* 1998; CREMASCHI, DI LERNIA 1998; CANCELLIERI *et al.* 2016). The sites of Uan Tabu and Uan Afuda witnessed the main degree of preservation and investigation (DI LERNIA 1999b; GARCEA 2001b) and represent the only MSA/Aterian chronological reference for the region and the wider central Sahara.

The two meters thick sequence of the Uan Afuda cave includes two levels of fallen blocks, and a reddish paleosol on the top. TL dating of the sand above the upper blocks, whose base included the MSA artefacts, gave  $70 \pm 9.5$  ka and  $73.5 \pm 10$  ka, in quite good agreement with OSL determinations from the same layer, which returned  $69 \pm 7$  ka. Sand above the lower level of blocks gave a further OSL date of  $90 \pm 10$  ka (CREMASCHI *et al.* 1998) and is related to the beginning of dune aggradation inside the cave. At Uan Tabu rock shelter the Pleistocene aeolian sand is less developed than at Uan Afuda, but it includes a larger amount of Aterian artefacts (GARCEA 2001b). It was OSL dated to  $61 \pm 10$  ka (CREMASCHI *et al.* 1998).

The small assemblage of Uan Afuda is made of undifferentiated and Levallois flakes and a few cores, but it lacks Aterian traits, i.e., tangs or foliates (DI LERNIA 1999a). At Uan Tabu the lithic artefacts testify to rather complete reduction sequences (Levallois, Laminar and Discoid) and a quite diversified raw materials inventory (GARCEA 2001a). Retouched tool-kit includes side-scrapers and rare tanged tools. The assemblage might testify to a “residential” character (CREMASCHI *et al.* 1998).

The Messak is incredibly rich in archaeological remains of Holocene age, particularly ceremonial monuments and rock art, attracting researchers since the 19<sup>th</sup> century (see BIAGETTI *et al.* 2013 and references therein). The Messak is also the district with the largest number of Pleistocene findings, identified so far by several international research projects and interventions aimed at the assessment of the impact of oil industry (GARCEA 1997; CREMASCHI, DI LERNIA 1998; ANAG *et al.* 2002; LE QUELLEC 2009; GALLINARO *et al.* 2012; BIAGETTI *et al.* 2013; FOLEY *et al.* 2013; FOLEY, LAHR 2015). Generalized MSA artefacts spread throughout the entire Messak, all are open-air and are far more common than Aterian contexts (CANCELLIERI, DI LERNIA 2013). At least in few cases, Aterian artefacts were found stratified in open-air contexts, but remain undated (CREMASCHI *et al.* 1998).

### 3. MATERIAL AND METHODS

The assessment of metrical and morphological characters of Aterian tanged tools has been carried out collecting data from published pictures and drawings (CREMASCHI *et al.* 1998; GARCEA 2001a; ANAG *et al.* 2007; CANCELLIERI, DI LERNIA 2013; CANCELLIERI *et al.* 2016) and unpublished ones (Archive of the Archaeological Mission in the Sahara, Sapienza University of Rome). The total number of artefacts comprised in this study is 68 from 45 sites distributed through the major macro areas of the study region. The most part of the analysed specimens come from the Edeyen of Murzuq and the Messak. Together they account for 75% of the sample (Tab. 1).

Area	Tanged Piece	Tanged Point	Fragment A	Fragment B	Total	%
Erg Titorsin	1	1	1	-	3	4.4
Tadrart Acacus	3	5	1	-	9	13.2
Erg Uan Kasa	1	3	-	1	5	7.4
Messak	7	6	9	7	29	42.6
Edeyen of Murzuq	1	18	-	3	22	32.4
Total	13	33	11	11	68	100.0

Tab. 1 – Sample composition according to Area and Group.

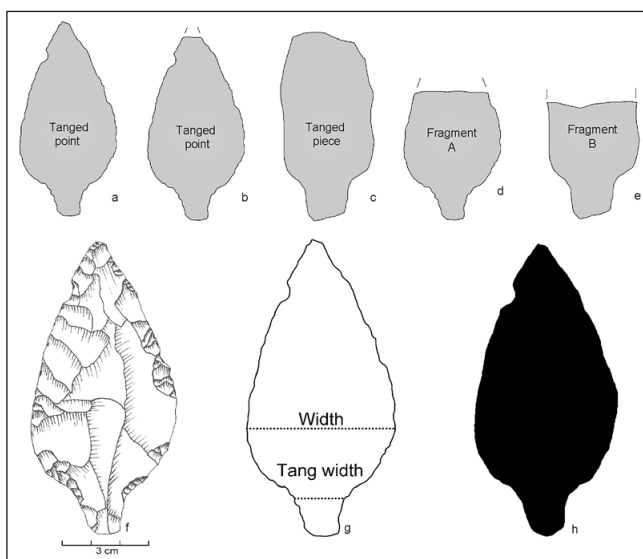


Fig. 2 – a-e) exemplification of the grouping of tanged tools adopted in this study (see text for details); f) tanged point from Uan Tabu (redrawn from GARCEA 2001a); g) exemplification of the measures considered; h) filled outline of the tanged point depicted in f.

The classification of tanged tools is simplified. It can be summarized as: pointed, not pointed, and fragments. It resulted in the establishment of four classes, according to morphology and integrity (Tab. 1; Fig. 2). Tanged point (Fig. 2a, b) includes all the specimens typologically definable as points as well as some broken ones lacking a very small part of the distal end. It should be further stressed that Tanged point encompasses all those artefacts with distally converging sides, regardless of retouch. Tanged piece (Fig. 2c) includes the specimens not typologically definable as points (scrapers, flakes, blades, etc.). Fragment A are broken specimens whose edges are clearly convergent (Fig. 2d) while Fragment B are broken specimens whose edges are not convergent (Fig. 2e). Although basic, this classification introduces a differentiation to speculate further on.

Two analytical approaches are followed: i) one is a metric analysis, ii) one deals with shape and adopts Elliptical Fourier Analysis to discretize continuous data like artefacts outlines. The results are then compared and plotted against geographical and environmental features. The metric analysis consisted in recording two measures with a screen calliper from all the artefacts: maximum artefact width (hereafter W) and maximum tang width (hereafter TW) (Fig. 2g). This because they are not – or scarcely – sensitive to fragmentation and can therefore be recorded from the whole sample. The shape analysis relied on a 2D technique applicable to closed curves, routinely adopted in biological sciences (FERSON *et al.* 1985), more rarely in archaeological research until not too long ago (SARAGUSTI *et al.* 2005).

Current applications, computer assisted and specifically designed for the analysis of stone tools (IOVITA 2010), have proven to be a powerful aid in the understanding of subjects like for example the relation between shape, size and resharpening (IOVITA 2011; IOVITA, MCPHERRON 2011) and of core variables involved in shape and size predetermination in different flaking methods (REZEK *et al.* 2011; PICIN *et al.* 2014), in a better understanding of the relation between shape and tools' function (BOREL *et al.* 2017) or to gain insights from old collections for which context data, especially chronological ones, are lacking (MESFIN *et al.* 2020).

This study aims at investigating morphometric variability following similar protocols. To do this, it has been used the software SHAPE, developed by IWATA, UKAI (2002) for biological shape analyses. This software<sup>1</sup>, automatically generates the contours from digital images that were re-drawn to obtain Black and White Bitmap images with well defined outlines to be best processed by the software (see Fig. 2h for an example), delineates the contour shape with the Elliptic Fourier Descriptors (EFDs), and performs the Principal Component

<sup>1</sup> Available at <http://lbm.ab.a.u-tokyo.ac.jp/~iwata/shape/index.html> (last accessed 06/06/2021).

Analysis (PCA) based on variance/covariance matrix of the coefficients for summarizing the information about shape (IWATA, UKAI 2002).

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

A summary of descriptive statistics for the range of variation of the two measures (W and TW) for each group is presented in Tab. 2, while Fig. 3 shows scatterplots of absolute values for the same measures. Globally, the artefacts show widths between 23 and 67 mm (mean 38.34 mm) and tang widths between 11 and 32 mm (mean 15.29 mm). When considering the morphological groups defined *a priori* on the basis of the criteria specified in §3, a differentiation is observable by looking at the Coefficient of Variation scores

	Tanged Point		Fragment A		Tanged Piece		Fragment B		Whole sample
	W	TW	W	TW	W	TW	W	W	TW
N	33	33	11	11	13	13	11	68	68
Min	23	11	32	12	24	11	28	23	11
Max	57	26	45	20	56	32	67	67	32
Mean	37.24	14.97	38.64	14.91	37.54	16.15	42.27	38.34	15.29
Variance	64.19	14.28	20.25	8.09	106.27	32.97	181.22	83.03	15.49
St. dev	8.01	3.78	4.50	2.84	10.31	5.74	13.46	9.11	3.94
Median	38	14	39	14	33	14	34	38	14
CV	21.5%	25.2%	11.6%	19.1%		35.5%	31.8%	23.8%	25.7%

Tab. 2 – Summary of descriptive statistics. W: max artefact Width; TW: max Tang Width; measures in mm.

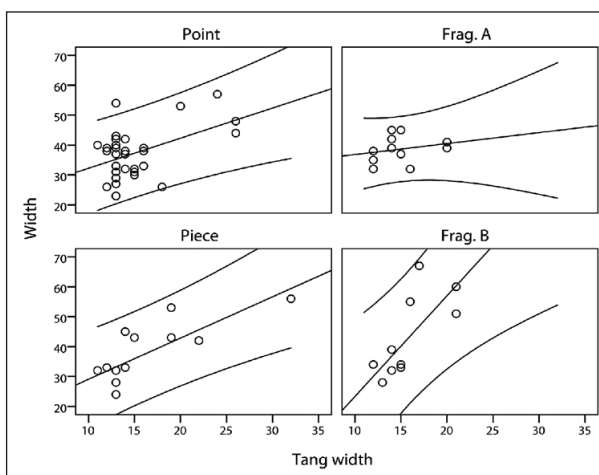


Fig. 3 – Scatter plots of Tang width on Width values (mm) for each group of tanged artefacts. Confidence intervals (95%) around linear regressions are indicated.

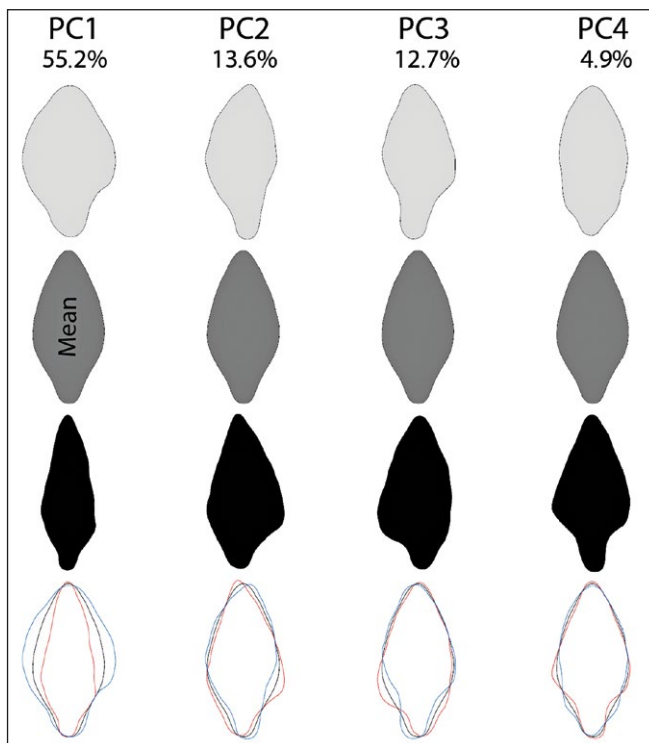


Fig. 4 – Graphic representation of variation of the first four Principal Components.

(Tab. 2), signalling wider and more scattered variations of the two measures in both Tanged piece and Fragment B than in Tanged point and Fragment A.

The extent to which a correlation exists between W and TW has been evaluated by a correlation test (Pearson). Relatively significant correlation is indicated only for Tanged piece ( $r = 0.769$ ,  $p = 0.002$ ) and Fragment B ( $r = 0.744$ ,  $p = 0.009$ ), whereas Tanged point ( $r = 0.475$ ,  $p = 0.005$ ) and Fragment A ( $r = 0.232$ ,  $p = 0.493$ ) testify to a weaker correlation (in the case of Fragment A this is not statistically significant). These figures could indicate that the width of the tang and the maximum morphological width of tanged points and fragments with convergent edges (Fragment A) are almost independent from each other, while a possible functional relation between the size of the two, among Tanged piece and Fragment B, can be tentatively envisaged as they seem to vary less independently from each other.

Shape analysis was performed on 32 whole specimens, the ones comprised in the group Tanged point (except one where most part of the tang

is missing). Parameterization relied on 20 harmonics and resulted in the identification of 8 effective Principal Components. PC1 to PC4 globally account for 86.6% of total variability and describe clearly recognizable shape variations, while the remaining PC5 to PC8 show a lower incidence and denote an unclear nature. PC1 accounts for elongation while PC2 and PC3 for symmetry. PC4 is principally related to tang delineation and protrusion (Fig. 4). Almost half of total variability depends on elongation (PC1, 55.2%). PC2 (13.6%) and PC3 (12.7%) seem referable to respectively left and right asymmetry to the longitudinal morphological axis. While the lowest values of PC2 and PC3 are clearly meaningful, the upper ones are less so. Finally, PC4 (4.9%) is related to the shape and delineation of the tang, but also with the recognisability of a discontinuity between the main body of the artefact and the tang.

Regressions calculated for PC1 to PC4 on both the two metric variables *W* and *TW* are nearly not statistically significant. The only exception is represented by *W* on PC1 ( $R^2 = 0.239$ ,  $p = 0.005$ ) and *W* on PC4 ( $R^2 = 0.311$ ,  $p = 0.001$ ), suggesting that narrower points are likely to be more elongated than wider ones and to have less recognizable tangs.

In order to keep data as much aggregated as possible – given the artefacts' little sample size – while retaining a basic level of regional differentiation, the investigation of the morpho-metric variation in a regional perspective relied on a classification of the study area in only two macro-physiographic contexts. These are: 1) highlands, comprising the mountains of Tadrart Acacus and Messak, and 2) lowlands, encompassing the sand seas of the Erg Titeris, Erg Uan Kasa and Edeyen of Murzuq.

First, tangs carry information about the part of the stone tools supposedly inserted into a haft. This latter is designed in advance and keeps its characteristics over a time span much longer than the life-cycle of the stone tools it holds, and it can be speculated that more than one “spare part” could have been used with the same haft. The size of the tang is closely dependent on the haft properties, to which is adapted by the retouch. This could occur also during a final shaping phase, while the tool is already in the haft and prior to binding, in order to better fit its shape and ultimately improve binding strength (VAN PEER *et al.* 2008). Tang size and morphology are thus strictly related to those of the hafts, which arguably deserved a high degree of craftsmen's curation, and similarly arguably could have also carried a significant part of non-strictly functional value (WIESSNER 1983).

With these expectations in mind, it has been investigated if Tang Width could suggest some meaningful variation at an intra-regional scale. As visible in Fig. 5, Tang width shows some degree of variability according to both the macro-physiographic contexts and to morphological groups. The overall coefficient of variation highlights a more dispersed range in the Highlands (CV

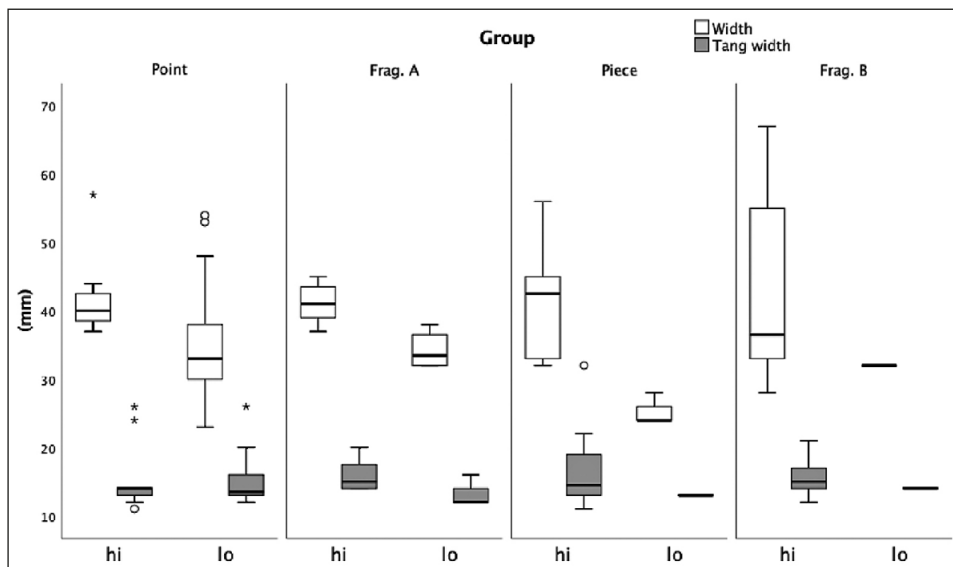


Fig. 5 – Box-plots for Tang width and Width according to group and macro-physiographic context (hi: Highlands; lo: Lowlands).

28.1%) than in the Lowlands (CV 20.1%), which is also observable in the case of morphological groupings, especially in Tanged point (CV Highlands 32.2%; CV Lowlands 21.5%) and Tanged piece (CV Highlands 36.8%; CV Lowlands 0%). One-way ANOVA test results ( $F(1,66) = 3.072, p = 0.084$ ) signal no – or at most, marginally – statistically significant differences between TW of Lowlands and Highlands groups of findings. Therefore, it can be stated that, at least with the present data-set and present degree of resolution of the analysis, Tang width does not indicate significant intra-regional metric variability pattern. Although partially perceptible, differences actually do exist, but they are nevertheless hardly frameable in assumptions of either functional, economic or ecological nature.

The other side of the coin is represented by the part of the tanged tools extending out of the haft, purportedly not ruled by strict hafting constrains. This part ultimately accomplishes the functions the tool was made for. An overgeneralization could discriminate into pointed artefacts as either processing (e.g., piercing, cutting, scraping) and acquiring tools (hunting, fishing), while the not pointed specimens as processing tools only.

The Width of tanged artefacts seem to provide signs of differentiation between macro-physiographic contexts. The group Tanged point is the most complete, and its variability is observable through all the macro-areas. The lag

recognizable in *W* between Acacus and Messak on one side (highlands), and the sand seas (lowlands), is remarkable (Fig. 5), and it can be also observed that tanged points from lowlands are overall narrower than the ones from the highlands. The same contrast between lowlands and highlands is also observable for Fragment A and Tanged piece (Fig. 5), while the variation of *W* in Fragment B is only observable within mountain ranges.

Overall coefficient of variation does not highlight a marked difference between highlands and lowlands (CV highlands 20.6%; CV lowlands 22.6%), whereas it reveals a quite differentiated pattern if morphological groups are considered: Tanged point width shows a less dispersed range of variation in the highlands (CV 13.2%) than in the lowlands (CV 23.4%), while Tanged piece would suggest a somewhat inverse pattern (CV highlands 21.2%; CV lowlands 9.1%). Fragment A has comparable values (CV highlands 7.5%; CV lowlands 8.4%) while Fragment B, available only for highlands, testify to a quite high dispersed range of variation (CV 31.7%).

There were statistically significant differences between overall lowland and highland groups as determined by one-way ANOVA ( $F(1,66) = 16.371$ ,  $p < 0.001$ ). As far as morphological groups are concerned, statistically significant differences between lowland and highland groups are also determined by one-way ANOVA for Fragment A ( $F(1,9) = 13.338$ ,  $p = 0.005$ ), Tanged Piece ( $F(1,11) = 9.205$ ,  $p = 0.011$ ) and Tanged point ( $F(1,31) = 6.268$ ,  $p = 0.018$ ), whereas Fragment B ( $F(1,9) = 0.616$ ,  $p = 0.453$ ) shows no statistically significant differences between groups.

These observable and significant differences of artefacts' width between lowlands and highlands could depend on a number of factors, none of which is solidly affordable. Nevertheless, one could conjecture on different technological traditions and chronology of occupation; on different technological responses to differentiated functional requirements ruled by the type of resources available through different environmental settings; on diverse raw materials constrains, assuming that the large availability of good quality rocks in the mountains, especially in the Messak, could have allowed and favoured the more frequent replacement of tools, whereas the minor availability of raw materials in the lowlands could have induced to rely more on re-sharpening to extend the life time of the stone tool implements.

Variability between lowlands and highlands have been evaluated also according to the results of 2D shape analysis of tanged points, which revealed quite meaningful regional data patterning. Fig. 6a shows a comparison of tanged points PC1 from lowlands and highlands sites. As observable, the range of variation of PC1 of the former fully encompasses the whole range of the latter. It can be also observed that PC1 of tanged points from the highlands are mostly included in the positive range of values, while lowlands tanged points PC1 also extend well into the negative ones. By a morphological point



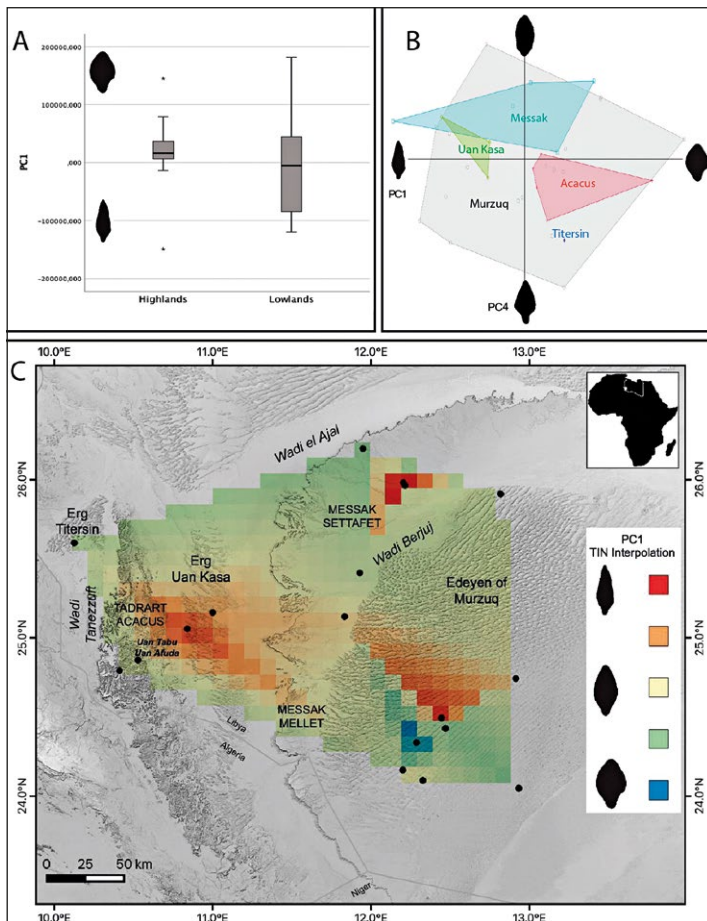


Fig. 6 – a) box-plots for Tanged point PC1 according to macro-physiographic context; b) scatter plot and convex hulls for PC1 and PC4 (tanged points) according to area; c) TIN Interpolation of tanged points PC1 scores; black dots indicate the localization of the tanged points included in the analysis.

of view, these figures can be grossly translated into the recognition that tanged points from the highlands are generally little elongated and rather “stocky”; on the other side, tanged points from the lowlands encompass a wider range of morphological configurations.

Finer insights can be gained by looking at the single areas. The ranges of variation of PC1 of tanged points from Tadrart Acacus and Messak (highlands) and Erg Uan Kasa and Erg Tifersin (lowlands) visible in Fig. 6b draw almost non-overlapping areas, while the variability of the specimens

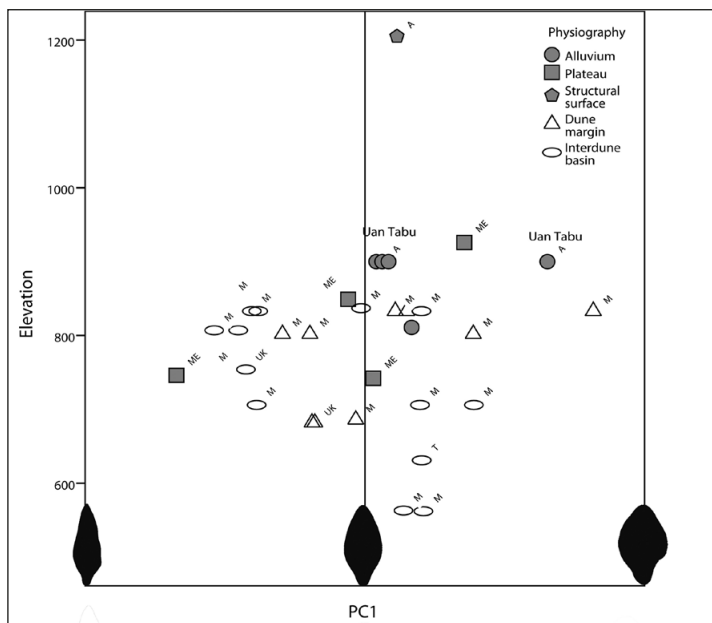


Fig. 7 – Scatter plot of Elevation on PC1 (tanged points), per physiography and area (solid symbol: highland; empty symbol: lowland). A: Acacus; ME: Messak; UK: Uan Kasa; T: Tittersin; M: Murzuq.

from Murzuq nearly encompasses the variability of the whole region. Further examination of the relationship between morphometric variability and environmental characters is done by considering the elevation of the findings and their physiographic contexts (Fig. 7). The sites are globally comprised between ca. 500 and ca. 1200 m asl. The highest elevation is registered at site AT8, located on a structural surface in the Acacus (CREMASCHI *et al.* 1998). The lowest elevations are recorded in the most depressed interdune basins of the Murzuq basin. Most of the findings, though, are at elevations comprised between ca. 700-900 m asl and come from dune margins and interdune basins in the lowlands, alluvia and plateaux in the mountains.

While no obvious connection can be recognized between the environmental and morphometric features above discussed, it can nevertheless be remembered that the most part of shape variation of tanged points from the highlands is limited to the positive values of PC1. Among these are the ones from Uan Tabu, which are the only dated Aterian artefacts in the region and the wider central Sahara. If cautiously keeping them as reference, it can be speculated that specimens with similar features from undated sites could broadly belong to a chronological span comparable to the Aterian of the Acacus. Recalling that the

occupation of the mountain ranges in hyperarid MIS4 is in accordance with their nature of refugia, while in the same time span the sandy lowlands should have been far less productive environments (CANCELLIERI, DI LERNIA 2013), the presence of tanged artefacts of an “Acacus appearance” in the lowest interdune depressions of the sand seas (Figs. 6c, 7) could suggest that the arid survival skills of MIS4 Aterian humans allowed them to take advantage also of residually productive environmental niches within an overall drying environment.

According to this hypothesis, the high morphometric variability exhibited by the Edeyen of Murzuq sample could be the result of multiple dynamics of human occupation within shifting environmental conditions including the cyclically earlier wetter phases recognized in the region in the late Middle Pleistocene and Late Pleistocene (DRAKE *et al.* 2008; GEYH, THIEDIG 2008), during which lowlands could have been capable to fully sustain a complex human settlement-subsistence system. In this scenario, the scarcity of more elongated and narrower tanged points within the mountain ranges could suggest that these areas played a different role in the framework of subsistence-settlement-systems relying more on the resources provided by the lowlands.

An alternative and possibly more parsimonious interpretation is that the tanged points of an “Acacus appearance”, like those of Uan Tabu, pertain to the material culture of a residual Aterian occupation confined to mountain environments deriving from an earlier more variable artifactual base, like i.e. that recognized in the Edeyen of Murzuq.

## 5. CONCLUSIONS

Although based on a relatively small sample, this study further confirms that geospatial analysis of archaeological and environmental data is a fertile approach. The analysis of size and shape of Middle Stone Age tanged tools in a regional perspective, in fact, has highlighted significant data patterning throughout the study area, especially if macro-categorization (like e.g., highlands vs lowlands) is adopted. The morpho-metric variability recognized at an intra-regional scale revealed meaningful connections with specific physiographic settings. However, the weight and role of environmental variables and of cultural dynamics is currently far to be understood.

While acknowledging that shape and size variation are far to be chronological or cultural markers, and being equally aware of the limits and pit-falls of chrono-typological approaches, it has to be admitted that surface sites in highly deflated desert contexts provide few indicators other than artefacts' morphological variability. It is thus suggested, on the basis of the observations carried out in this study, that at least part of the variability encountered depends on different technological traditions carried by human groups through different chrono-environmental settings.

### *Acknowledgements*

I warmly thank Savino di Lernia (Sapienza University of Rome), director of the Archaeological Mission in the Sahara, for the support and for having granted and eased access to the geodatabase of the contexts upon which the paper builds. Research in the Fezzan runs under the aegis of the Italian-Libyan Archaeological Mission in the Acacus and Messak and has been funded by several bodies: Sapienza University of Rome – which holds the permit of survey and excavations in the Acacus and Messak – Ministry of Foreign Affairs, Ministry of University and Research, CNR and University of Milan.

EMANUELE CANCELLIERI

Dipartimento di Scienze dell'Antichità, Sapienza Università di Roma  
Istituto Italiano di Paleontologia Umana  
ema.cancellieri@gmail.com

### REFERENCES

- ANAG G., COSENTINO L., DI LERNIA S. (eds.) 2007, *Edeyen of Murzuq. Archaeological Survey in the Libyan Sahara*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- ANAG G., CREMASCHI M., DI LERNIA S., LIVERANI M. 2002, *Environment, archaeology, and oil: The Messak Settafet rescue operation (Libyan Sahara)*, «African Archaeological Review», 19, 67-73.
- BIAGETTI S., CANCELLIERI E., CREMASCHI M., GAUTHIER C., GAUTHIER Y., ZERBONI A., GALLINARO M. 2013, *The Messak Project: Archaeological research for cultural heritage management in SW Libya*, «Journal of African Archaeology», 11, 55-74.
- BOREL A., CORNETTE R., BAYLAC M. 2017, *Stone tool forms and functions: A morphometric analysis of modern humans' stone tools from Song Terus Cave (Java, Indonesia)*, «Archaeometry», 59, 455-471.
- BROOKS A., NEVELL L., YELLEN J.E., HARTMAN G. 2006, *Projectile technologies of the African MSA. Implications for modern human origins*, in E. HOVERS, S. KUHN (eds.), *Transitions Before the Transition. Evolution and Stability in the Middle Paleolithic and Middle Stone Age*, New York, Springer, 233-255.
- CANCELLIERI E., CREMASCHI M., ZERBONI A., DI LERNIA S. 2016, *Climate, environment, and population dynamics in Pleistocene Sahara*, in C.S. JONES, A.B. STEWART (eds.), *Africa from MIS 6-2: Population Dynamics and Paleoenvironments*, Dordrecht, Springer Netherlands, 123-145.
- CANCELLIERI E., DI LERNIA S. 2013, *Middle Stone Age human occupation and dispersals in the Messak plateau (SW Libya, central Sahara)*, «Quaternary International», 300, 142-152.
- CLARK J.D., SCHULTZ D.U., KROLL E.M., FREEDMAN E.E., GALLOWAY A., BATKIN J., KURASHINA H., GIFFORD-GONZALEZ D. 2008, *Ch. 5: The Aterian of Adrar Bous and the Central Sahara*, in J.D. CLARK, D. GIFFORD-GONZALEZ (eds.), *Adrar Bous: Archaeology of a Central Saharan Granitic Ring Complex in Niger*, Tervuren, Royal Museum for Central Africa, 91-162.
- CREMASCHI M., DI LERNIA S. (eds.) 1998, *Wadi Teshuinat. Palaeoenvironment and Prehistory in South-Western Fezzan (Libyan Sahara)*, Milano-Firenze, CNR-All'Insegna del Giglio.
- CREMASCHI M., DI LERNIA S. 1999, *Holocene climatic changes and cultural dynamics in the Libyan Sahara*, «African Archaeological Review», 16, 211-238.
- CREMASCHI M., DI LERNIA S., GARCEA E.A.A. 1998, *Some insights on the Aterian in the Libyan Sahara: Chronology, environment, and archaeology*, «African Archaeological Review», 15, 261-286.

- DI LERNIA S. 1999a, *The cultural sequence*, in DI LERNIA 1999b, 57-130.
- DI LERNIA S. (ed.) 1999b, *The Uan Afuda Cave. Hunter Gatherer Societies of Central Sahara*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- DI LERNIA S., ZAMPETTI D. (eds.) 2008, *La memoria dell'arte. Le pitture rupestri dell'Acacus tra passato e futuro*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- DRAKE N., EL-HAWAT A.S., TURNER P., ARMITAGE S.J., SALEM M.J., WHITE K.H., McLAREN S. 2008, *Palaeohydrology of the Fazzan Basin and surrounding regions: The last 7 million years*, «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», 263, 131-145.
- FALZETTI S., GARCEA E.A.A., LEMORINI C., DRUDI S., MIRONTI V. 2017, *From Aterian notch to Aterian tang: How to make a technological invention*, «African Archaeological Review», 34, 525-541.
- FERNON S., ROHLF F.J., KOEHN R.K. 1985, *Measuring shape variation of two-dimensional outlines*, «Systematic Zoology», 34, 59-68.
- FOLEY R.A., LAHR M.M. 2015, *Lithic landscapes: Early human impact from stone tool production on the Central Saharan environment*, «PLoS ONE», 10, e0116482.
- FOLEY R.A., MAÍLLO-FERNÁNDEZ J.M., MIRAZÓN LAHR M. 2013, *The Middle Stone Age of the Central Sahara: Biogeographical opportunities and technological strategies in later human evolution*, «Quaternary International», 300, 153-170.
- GALLINARO M. 2013, *Saharan rock art: Local dynamics and wider perspectives*, «Arts», 2, 350-382.
- GALLINARO M., GAUTHIER C., GAUTHIER Y., LE QUELLEC J.L., ABDEL AZIZ S., BIAGETTI S., BOITANI L., CANCELLIERI E., CAVORSI L., MASSAMBA N'SIALA I., MONACO A., VANZETTI A., ZERBONI A., DI LERNIA S. 2012, *The Messak Project. Cultural and natural preservation and sustainable tourism (South-Western Libya)*, «Antiquity», 086, 331.
- GARCEA E.A.A. 1997, *Prehistoric surveys in the Libyan Sahara*, «Complutum», 8, 33-38.
- GARCEA E.A.A. 2001a, *A reconsideration of the Middle Palaeolithic/Middle Stone Age in Northern Africa after the evidence from the Libyan Sahara*, in GARCEA 2001b, 25-49.
- GARCEA E.A.A. (ed.) 2001b, *Uan Tabu in the Settlement History of Libyan Sahara*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- GEYH M.A., THIEDIG F. 2008, *The Middle Pleistocene Al Mabrúqah formation in the Murzuq basin, Northern Sahara, Libya evidence for orbitally-forced humid episodes during the last 500,000 years*, «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», 257, 1-21.
- IOVITA R. 2010, *Quantifying and comparing stone tool resharpening trajectories with the aid of elliptical Fourier analysis*, in S. LYCETT, P. CHAUHAN (eds.), *New Perspectives on Old Stones: Analytical Approaches to Palaeolithic Technologies*, Kluwer, Dordrecht, Springer, 235-253.
- IOVITA R. 2011, *Shape variation in Aterian tanged tools and the origins of projectile technology: A morphometric perspective on stone tool function*, «PLoS ONE», 6, e29029.
- IOVITA R., MCPHERRON S.P. 2011, *The handaxe reloaded: A morphometric reassessment of Acheulian and Middle Paleolithic handaxes*, «Journal of Human Evolution», 61, 61-74.
- IWATA H., UKAI Y. 2002, *SHAPE: A computer program package for quantitative evaluation of biological shapes based on elliptic Fourier descriptors*, «The Journal of Heredity», 93, 384-385.
- KNIGHT J., ZERBONI A. 2018, *Formation of desert pavements and the interpretation of lithic-strewn landscapes of the Central Sahara*, «Journal of Arid Environments», 153, 39-51.
- LE QUELLEC J.L. 2009, *Art rupestre, patrimoine archéologique et industrie pétrolière au Sahara*, in *Actes du colloque international des Eyzies: l'art pariétal, conservation, mise en valeur, communication*, Paris, Société des Amis du Musée national de Préhistoire et de la Recherche archéologique & UNESCO, 23-28.
- MASSUSSI M., LEMORINI C. 2004-2005, *I siti ateriani del Jebel Gharbi: caratterizzazione delle catene di produzione e definizione techno-funzionale dei pedunculati*, «Scienze dell'Antichità», 12, 19-28.

- MESFIN I., LEPLONGEON A., PLEURDEAU D., BOREL A. 2020, *Using morphometrics to reappraise old collections: The study case of the Congo Basin Middle Stone Age bifacial industry*, «Journal of Lithic Studies», 7, 1-38.
- MORI F. 1965, *Tadrart Acacus. Arte rupestre e culture del Sahara preistorico*, Torino, Einaudi.
- PEREGO A., ZERBONI C., CREMASCHI M. 2011, *Geomorphological map of the Messak Settafet and Mellet (Central Sahara, SW Libya)*, «Journal of Maps», 7, 464-475.
- PICIN A., VAQUERO M., WENIGER G.-C., CARBONELL E. 2014, *Flake morphologies and patterns of core configuration at the Abric Romaní rock-shelter: A geometric morphometric approach*, «Quaternary International», 350, 84-93.
- REZEK Z., LIN S., IOVITA R., DIBBLE H.L. 2011, *The relative effects of core surface morphology on flake shape and other attributes*, «Journal of Archaeological Science», 38, 1346-1359.
- SARAGUSTI I., KARASIK A., SHARON I., SMILANSKY U. 2005, *Quantitative analysis of shape attributes based on contours and section profiles in artifact analysis*, «Journal of Archaeological Science», 32, 841-853.
- SCERRI E.M.L., SPINAPOLICE E. 2019, *Lithics of the North African Middle Stone Age: Assumptions, evidence and future directions*, «Journal of Anthropological Sciences», 97, 9-43.
- SHOTT M.J. 1997, *Stones and shafts redux: The metric discrimination of chipped-stone dart and arrow points*, «American Antiquity», 62, 86-101.
- SISK M.L., SHEA J.J. 2011, *The African origin of complex projectile technology: An analysis using tip cross-sectional area and perimeter*, «International Journal of Evolutionary Biology», 968012.
- TOMASSO S., ROOTS V. 2018, *What is the use of shaping a tang? Tool use and hafting of tanged tools in the Aterian of Northern Africa*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 10, 1389-1417.
- VAN PEER P., ROOTS V., VERMEERSCH P.M. 2008, *A wasted effort at the quarry: Wear analysis and interpretation of an MSA lanceolate point from Taramsa-8, Egypt*, «PaleoAnthropology», 234-250.
- WIESSNER P. 1983, *Style and social information in Kalahari San projectile points*, «American Antiquity», 48, 253-276.
- WILLIAMS M. 2014, *Climate Change in Deserts: Past, Present and Future*, Cambridge, Cambridge University Press.
- YELLEN J.E. 1998, *Barbed bone points: Tradition and continuity in Saharan and Sub-Saharan Africa*, «African Archaeological Review», 15, 173-198.
- ZERBONI A., TROMBINO L., CREMASCHI M. 2011, *Micromorphological approach to polycyclic pedogenesis on the Messak Settafet plateau (central Sahara): Formative processes and palaeoenvironmental significance*, «Geomorphology», 125, 319-335.

## ABSTRACT

Morphometric characters of Middle Stone Age stone artefacts from SW Fezzan (Libya, Central Sahara) are investigated. The raw data set is composed of illustrations of tanged pieces from surface scatters and from one stratified and dated site. Both metric and shape analyses are used. The first is carried out on the basis of maximum artefact width and tang width from the whole data set; the second adopts Elliptical Fourier descriptors obtained from 2D contours of tanged points. The geospatial analysis of morphometric variability in a regional perspective shows some meaningful variations between artefacts coming from “highland” and “lowland” physiographic contexts. While the latter encompass most of the regional variability, the former seem to show a narrower range of variation, which could depend on a number of reasons including diverse chronology of occupation, different technological traditions or ecological constraints. The general data patterning is here interpreted in the light of the hypothesis that the water resources kept by the mountainous areas also under environmental stress possibly

allowed them to act as a refugium during the most arid phases of the late Pleistocene. An intense occupation of the lowlands during similar chronological time frames and environmental conditions is less likely because of an inferable lower carrying capacity. The regional artefacts' morphometric variability could thus mirror the population dynamics reconstructed so far for the study area: the record from the mountain ranges testifies for a residual occupation of humans skilled in arid survival, while the lowlands possibly hosted more varied population dynamics especially during cyclically earlier wetter conditions.



UNDERSTANDING THE EFFECT OF TRAMPLING  
IN A SPATIAL PERSPECTIVE: A CASE STUDY  
FROM A LONG-LIVED-IN DWELLING SPACE  
OF THE BRONZE AGE SETTLEMENT OF COPPA NEVIGATA  
(SOUTH-EASTERN ITALY)

1. INTRODUCTION

Since the 1960s, debate on the formation processes of archaeological deposits became a pivotal topic for prehistoric studies (ASCHER 1968; BINFORD, BINFORD 1968; SCHIFFER 1972; BINFORD 1981; ORTON, TYERS 1990; LEONARDI, BALISTA 1992; WILSON 1994; BRANTINGHAM *et al.* 2007; LUCAS 2012; MILEK 2012; KUNA 2015; DRISCOLL *et al.* 2016). The wide range of agents and dynamics that may have intervened during the process of formation of such contexts led researchers to adopt diverse methodological and interdisciplinary approaches: from morpho-dimensional analysis of objects (BALISTA *et al.* 1990; DI LERNIA 1996) or ecofacts (ORÍA *et al.* 2016; BOVY *et al.* 2019) to micromorphological analysis of sediments (MATTHEWS *et al.* 1997; CREMASCHI, PIZZI 2010; DEBANDI *et al.* 2019). Clearly, each investigation is deeply influenced by the cultural and environmental characteristics of the context under scrutiny and by the archaeological questions being posed.

Long-lasting prehistoric settlements can constitute a tough challenge for the comprehension of formation processes of the archaeological record. Indeed, there are few cases in which this is relatively straightforward, such as those contexts affected by sudden destruction events, known in literature as “Pompeii premise” (BINFORD 1981; SCHIFFER 1985). On the other hand, for the vast majority of those characterized by a long-life use of the same physical spaces (MERRILL, READ 2010) and incorporating much rubbish and debris, such as stated in the “flow model” by M. SCHIFFER (1972, 158)<sup>1</sup>, the prolonged interweaving between anthropic and natural alteration agents produces hardly understandable narratives of the archaeological deposits. The unceasing transformations can be reflected in:

- primary deposition alteration, resulting in sub-primary, secondary or tertiary refuse deposits (SCHIFFER 1972; KUNA 2015);
- morpho-physical decay of the objects caused by mechanical and chemical stresses that hamper the possibility to achieve a specific stylistic-typological-functional identification of the archaeological remains (SKIBO 1987; NIELSEN 1991; BOVY *et al.* 2019).

<sup>1</sup> This concept has been expressed by L.R. BINFORD and S.R. BINFORD in 1968.



Intrasite dwelling spaces are often deeply affected by these alterations of the record; indeed, the repeated use of the space for different activities, physically overlapping each other (MERRILL, READ 2010), results in a palimpsest of refuse elements apparently chaotic in their distribution and scarcely preserved. Since the archaeologist is faced by these puzzling conditions, long-life dwelling spaces have been often underused for interpreting social behavioural patterns, especially regarding spatial studies on the microscale. Naturally, those contexts characterized by the so called “Pompeii premise” are preferred (BINFORD 1981; SCHIFFER 1985). Currently, archaeological debate is overcoming this bias: recent studies stress the high potentiality these contexts have to help understand human behaviours, through an interdisciplinary approach that integrates, in different ways, analyses of archaeological deposit formation processes (REVELLES *et al.* 2017; ACHINO, BARCELÓ 2018; LUCCI 2020).

This paper sets out the methodological approach used to analyse the effect of trampling on the archaeological record in a specific context. It is based on comprehending the fragmentation rate of *impasto* shards and the spatial distribution of well-preserved *impasto* vessels. The analysis is part of a wide PhD project (recently ended: LUCCI 2020) aimed at understanding pattern(s) of use of an internal area of the Bronze Age settlement of Coppa Nevigata (South-Eastern Italy) through a GIS-integrated spatial analysis of artefacts and ecofacts. The approach is tailored to the specific case study, where, among the wide spectrum of post-depositional transformation agents, trampling, resulting from movement streams of human and animals (also potentially the use of chariots), is probably the most influential. It produced a high fragmentation of artefacts and ecofacts, resulting in little chances of achieving a stylistic and functional determination, and also in unintentional displacement. Thus, to take up the challenge of exploring the effect of trampling, *impasto* pottery (shards and well-preserved vessels) has been adopted as proxy data. This class of artefact has great potential in analysing a wide range of aspects of prehistoric studies, from chronology to technology, from the social organisation of production to socio-cultural identities. Such analyses are widely performed for the site of Coppa Nevigata (RECCHIA, LEVI 1999; EVANS, RECCHIA 2003; CAZZELLA 2012). However, for this article, *impasto* pottery has been used for a different purpose: to explore trampling effects over the area under scrutiny.

The methodological process is based on the combination of the statistical analysis of shards-fragmentation rate and the spatial analysis of well-preserved vessels. The entire record of the *impasto* shards and all the well-preserved vessels have been considered: i) to understand the dimensional variability range of the shards record in full (avoiding distortions deriving from random sampling), ii) to observe the quantity of pottery remains among the diverse spaces, and iii) to figure out the impact of any trampling effect over a wide space. The results, combined with those produced by the integrated spatial

analysis of artefacts and ecofacts (stylistically and functionally characterised), allow us to critically define pattern(s) of use of the space of an internal area of the Bronze Age settlement of Coppa Nevigata. A further outcome of the analysis is that it identifies a practical method, able to be adapted, for late prehistoric contexts where trampling effects or other types of post-depositional agents introduce a bias in a contextual analysis of finds.

## 2. THE CASE STUDY: A LONG-LIVED-IN DWELLING SPACE OF THE BRONZE AGE SETTLEMENT OF COPPA NEVIGATA (SOUTH-EASTERN ITALY)

The settlement of Coppa Nevigata (South-Eastern Italy) is one of the most extensively excavated Bronze Age sites in Italy. It was located on the shore of an ancient lagoon, which connected the village to the sea. A very long-lasting settlement, its occupation spanned to whole 2<sup>nd</sup> millennium BC, as is testified by the depth of the archaeological sequence (CAZZELLA, RECCHIA, 2012). One of the most significant features of the settlement is the complex defensive system. The spatial organisation of the dwelling underwent significant changes through time, but it always remained in the same physical position.

This study focuses on an internal area of the settlement dated to the late phase of the 12<sup>th</sup> century BC (Late Bronze Age) located on the NE side of the village. The excavation was carried out using a grid composed from units of 25 m<sup>2</sup> (5×5 m); 13 squares frame the area under scrutiny (Fig. 1) but the square F2P has been excluded from the fragmentation analysis due to its low statistical significance (only 17 shards). At the W a domestic building consisting of two adjoined rectangular rooms is present: the western one is provided with a small cobbled patio, while the eastern one includes a cobbled circular structure; an external hearth adjoins the Room East to its E (Fig. 1). Some postholes testify to the presence of a perishable structure in the eastern part of the area.

On the plan (Fig. 1) is shown the broad investigated archaeological deposit dating to the Late Bronze Age (12<sup>th</sup> cent. BC, as witnessed by radiocarbon dates, contextual analysis of structures and stylistic analysis of pottery), disturbed by a destructive intervention in 1979. The archaeological deposit results from the repeated use of the area and structures under scrutiny over a certain span of time, without significant gaps or episodes of collapse. It has built up from the growth of refuse material from diverse activities, numbering thousands of artefacts and ecofacts that can have maintained their position of discard (primary refuse deposit), or can be produced by deliberate dumping (secondary refuse deposit; SCHIFFER 1972, 1983; KUNA 2015).

To investigate the presence of one or both of these conditions (given the extent of the area), it was first decided to investigate the impact trampling had on refusal elements, its effect on the spatial distribution and physical decay of movable remains. Clearly, since various agents of different natures could have

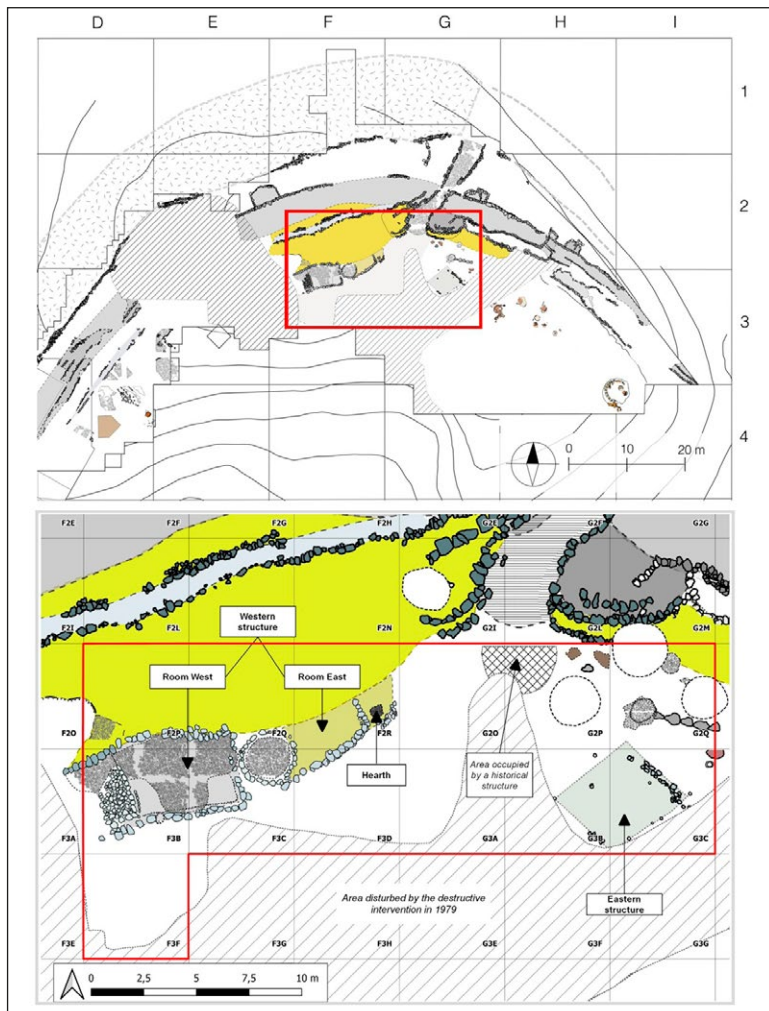


Fig. 1 – Above: map of the Coppa Navigata settlement showing the features pertaining to the Late Bronze Age (12<sup>th</sup> century BC). The red rectangle marks the area under scrutiny. Below: the area under scrutiny with red line marking the grids analysed in detail.

affected the archaeological record, this analysis does not resolve by itself the main question (viz. if the nature of the deposit is primary or secondary). However, the trampling effect here constitutes the most influential agent in bringing the depositional system to a high degree of entropy (fragmentation and repositioning of the elements), as well as hampering the chances of recognising the

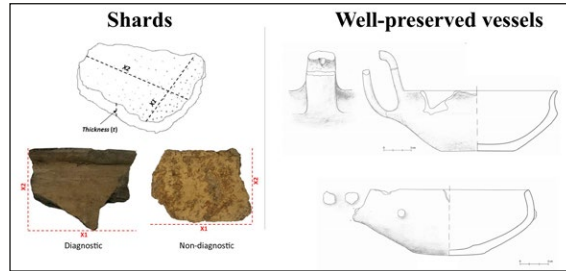


Fig. 2 – Left: *impasto* shards and dimensional parameters used to measure them. Right: two examples of well-preserved *impasto* vessels.

overall shape and functional attributes of the vessels. To deal with this, the effect of trampling on the archaeological record has been explored using a multi-analytical approach, which incorporates diverse data and types of analyses.

### 3. MATERIALS AND METHODS

#### 3.1 *Impasto* pottery as proxy data and introduction to the analytical processes

*Impasto* shards can be considered a valuable proxy for assessing formation processes and post-depositional agents, such as trampling effects, in prehistoric contexts (BALISTA *et al.* 1990; DI LERNIA 1996; MODESTO *et al.* 2020). Here, after searching for joins and repairing the same, the vast majority of pottery elements remained as single diagnostic or non-diagnostic shards (pieces resulting from ancient breakage), though some pottery vessels were totally or partially restorable, so joining the category of well-preserved vessels (artefacts being at least 25% present; Fig. 2). Shards were firstly statistically analysed to understand their fragmentation rate, according to the dimensions of the pieces; secondly, the fragmentation rate across the space studied was assessed and recorded. A pivotal step in this analysis is the data entry process based on fixed size-groups. These size-groups have not been arbitrarily defined, but were tailored to the actual pottery assemblage; a random sample of 125 shards was statistically processed. The fragmentation rate of the entire pottery assemblage was then projected over the area under scrutiny to figure out diverse degrees of alteration over the area. In contrast, the better-preserved vessels were analysed exactly as and where they were found, in order to assess the presence of “respected spaces”, that is to say areas only marginally affected by movement streams inside the settlement. Furthermore, a spatial distribution analysis of the shards of two well-preserved vessels was performed to observe the directions of dispersal encountered by the pieces of rubbish.

### 3.2 *Defining size groups on a sample of shards*

The fragmentation of pottery vessels in a prehistoric settlement is a stochastic process: it derives from an independent combination of factors (e.g., technological, human activities, environmental agents), producing a wide dimensional range of shards, hardly classifiable in a deterministic model. Defining significant variables for data entry is thus closely linked to the archaeological question and contingencies of the research (e.g., quantity of artefacts, aims of research, timeline). For the context under scrutiny, a fragmentation rate analysis was performed that would have produced results over a short period of time, in order to assess the potentialities of the spatial analysis during the initial phase of the process and then to critically understand the distribution of objects under the impact of trampling.

Hence, each shard has been measured using two variables that efficiently quantify the “width”:  $X1$  and  $X2$  (Fig. 2). The use of two variables, instead of the simple quantification of the fragment surface area, allowed to consider the overall fragment shape, which is crucial to understand the interaction between the alterative agent (i.e. trampling) and the object (e.g., a narrow-shape shard, in which  $X1$  is two or three times as much  $X2$  – or vice versa – reacts to mechanical pressure in a quite different way than one with square-shape in which those two variables are equal, even if they share a quite similar surface area). Moreover, a fragmentation rate of pottery cannot be really understood without considering the thickness of shards. It is an important aspect because this directly influences the resistance the shards possess to mechanical pressure. Clearly, thickness has a different nature compared to width: it derives from technological choices and is a static variable over the time<sup>2</sup>. It was measured once (a midpoint thickness) for each fragment (Fig. 2).

Basing on “width” and “thickness” variables, a random sample of 125 shards belonging to the squares F3B, F3C, F3D, G3A and G2O was measured (25 shards for each square, Fig. 1). This was done because the analysis was first carried out in those squares and then progressively expanded, in order to assess the viability of the methodological approach. It is important to specify that the number of fragments from the entire area was still unknown when this analysis began.

Taking into account the high dimensional variability that could have affected the sample, clustering statistical analysis – specifically, K-means analysis (BAXTER 2003) – was applied to figure out size groups of width. However, this clustering operation was not applied without a critical approach for the processed data. The estimation of the number of  $K$  has been obtained through

<sup>2</sup> Excepting cases in which pottery surfaces have broken off, but this was uncommon for the context under scrutiny.

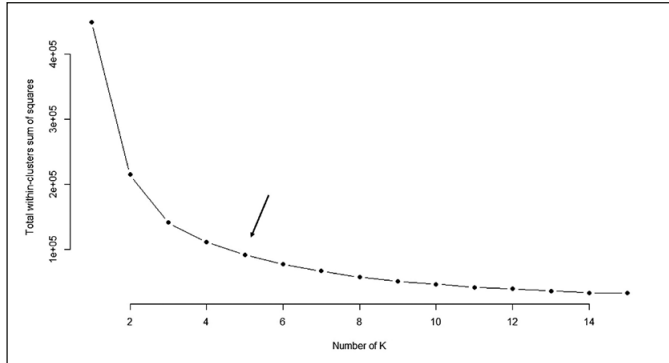


Fig. 3 – Chart produced by processing the dataset of 125 shards with Elbow method, the arrow highlights the number of chosen clusters.

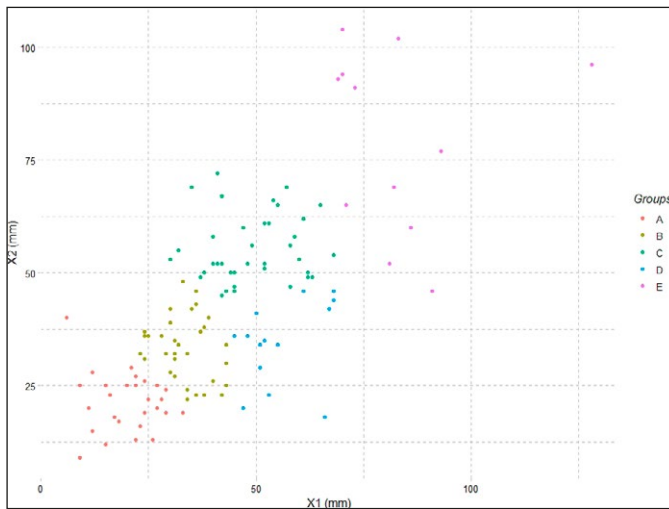


Fig. 4 – Plot of the sample composed by 125 shards; the diverse colours indicate the width groups defined through the K-means analysis.

the Elbow method (by the use of RStudio - Version 1.2.5), in order to return a viable number of partitions (or  $K$ ). On the chart (Fig. 3) it is possible to observe the result of this test: despite the smooth trend of the curve, it is significantly influenced by the dimension variability of the shards (based on  $X1$  and  $X2$ ),  $K=5$  being considered as a significant value. The K-means analysis applied to the sample of 125 shards, according to the number of classes defined by the Elbow method ( $K=5$ ), produced the results visible in the plot (Fig. 4). It

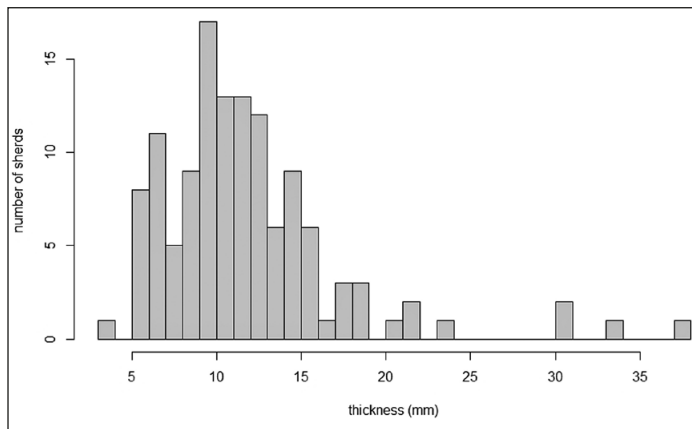


Fig. 5 – Histogram of the sample composed by 125 shards based on the thickness.

shows the distribution of elements indexed by clusters obtained through the K-means analysis. The C and D groups are symmetrically placed with respect to each other, but the difference is simply attributable to the orientation of the shards during measuring (not always definable), so they have been considered as a unique group (CD); furthermore, taking into account the presence of bigger fragments, a further group emerges besides those shown on the chart: Tab. 1 synthesises the width classes.

Width groups	X1 and/or X2 ranging from:
A	0 - 30mm
B	30 - 45 mm
CD	45 - 75 mm
E	75 - 110 mm
F	> 110mm

Tab. 1 – Width groups.

Classes by thickness have been defined according to a single variable ( $t$ ); hence, the analysis presents a lower degree of complexity. The bar-chart (Fig. 5) shows an asymmetric distribution-trend with modal value on 9-10 mm, a consequence of the low-level of standardization and differentiation of *impasto* pottery vessels. However, it is possible to observe two breaks falling at 8 mm and 14 mm, while the presence of additional breaks for the bar chart boundaries (smaller and bigger thicknesses) is harder to define, considering that the low-populated frequency classes have less statistical significance. Starting from those consideration, three thickness classes have been defined, as synthesised in the Tab. 2.

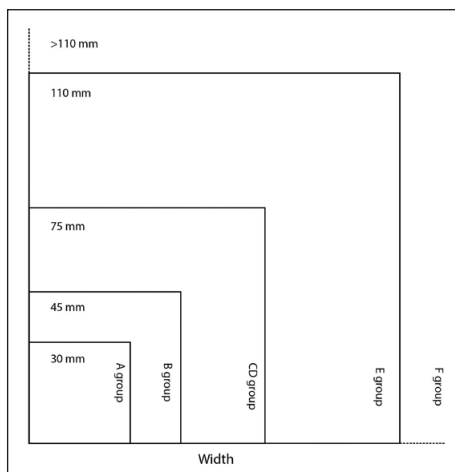


Fig. 6 – Data entry graphic model of width groups.

Thickness classes	Ranging from:
Thin	$t \leq 8\text{mm}$
Medium	$8\text{mm} < t \leq 14\text{mm}$
Thick	$t > 14\text{mm}$

Tab. 2 – Thickness classes.

Width size-groups did not remain abstract, but they have been translated in a graphic model (Fig. 6) and then used to physically measure shards. Thus, each shard was recorded and classified according to the size-groups listed above<sup>3</sup>.

## 4. RESULTS

### 4.1 Spatial analysis of pottery fragmentation rate

Basing on the data-entry model previously exposed, 11,411 *impasto* pottery fragments have been classified from the entire area under scrutiny, divided square by square as shown in the map (Fig. 7). The central squares show the largest numbers of fragments, whereas the marginal ones present a lower quantity of pieces (the square F2Q counts only 62 shards). These differences can be explained both as consequence of the different use of the

<sup>3</sup> Example of width recording: a fragment with  $X1=25\text{ mm}$  and  $X2=38\text{ mm}$  will be included in B group; a fragment with  $X1=70$  and  $X2=42$  will be included in CD group. Recording thicknesses is a simpler process, because it is represented by a single measure taken at a midpoint of the fragment.



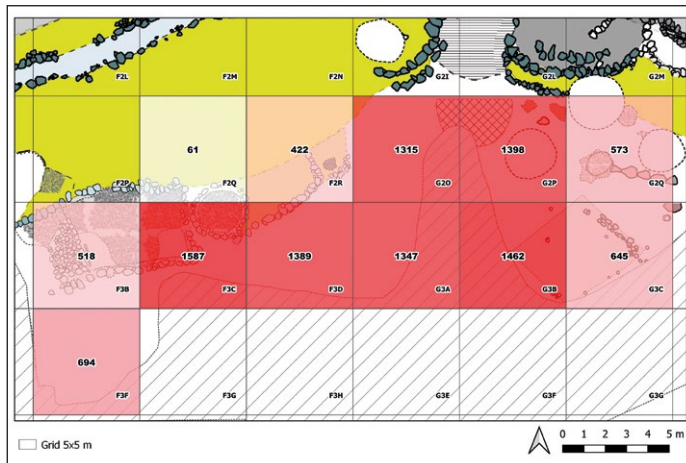


Fig. 7 – Number of shards yielded by the diverse squares under scrutiny.

spaces and related to the volume of preserved archaeological deposit that differs among the squares. These matters apart, the number of shards belonging to each square is statistically significant and comparable. Only the square F2Q needs a careful observation of the data, taking into account the particularly low number of pottery fragments (see above). With this premise, we can observe the results of the analysis performed over the entire record of shards classified according to the width and thickness size-classes.

The chart (Fig. 8a) shows the fragmentation rate combining the thickness classes (Thin, Medium and Thick; represented by the three coloured curves) with the diverse width classes (A, B, CD, E and F; on the horizontal axis). Considering the studied area in its entirety, it is possible to note that:

- the curve trend for the thin potsherds shows a high degree of fragmentation proportionally decreasing as their size increases, with no fragments for the bigger group (F);
- in the same way, the curve trend for the medium thickness shards, that represents the vast majority of the pottery fragments recorded, shows a high percentage of small fragments (A group) and medium-small fragments (B group) with a sudden decrease for the CD group and very low percentages for bigger ones (E and F groups);
- the curve of the thick shards shows a diverse trend from the others, it presents a peak for the medium-small and medium width groups (B and CD) and lower incidence for small (A) and medium-large and large (E and F) size-groups. This is probably linked to a greater resistance of the thick shards to the mechanical stresses they experienced.

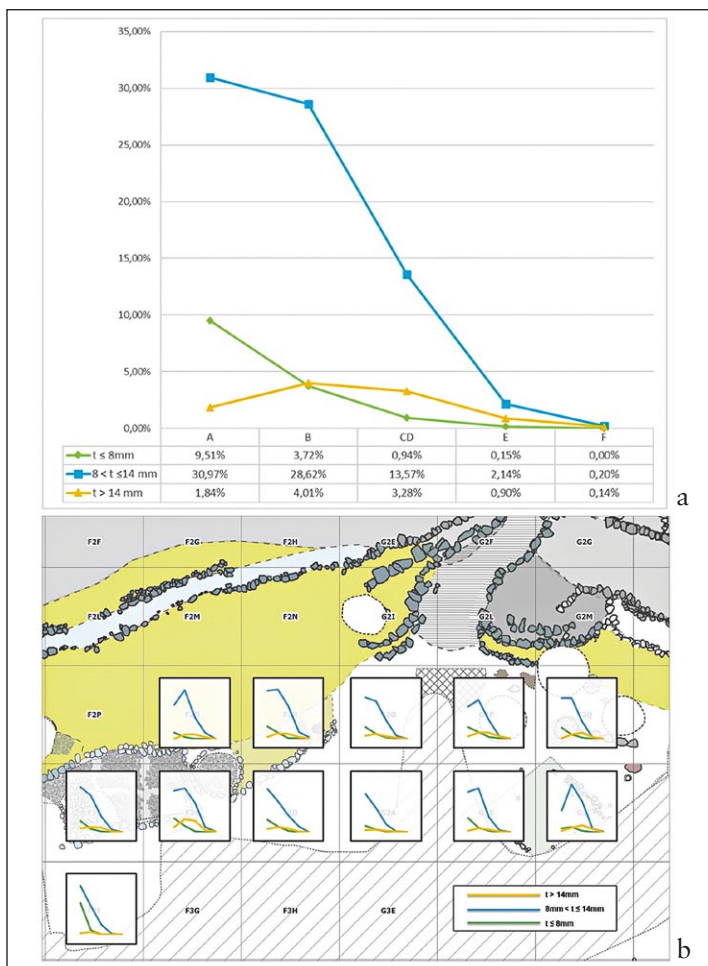


Fig. 8 – a) fragmentation rate of the entire area under scrutiny; b) fragmentation rate for each square.

Thus, it can be firstly observed that trampling effects have affected, proportional to the thickness, the whole record of shards. However, the observed area in its entirety includes various structures and spaces that could be affected by trampling to different degrees. Breaking down the data over the space, by squares, it becomes clear that the trends of shard fragmentation differ. The map (Fig. 8b) shows the charts by single squares, graphically simplified but structured in the same manner as seen in the previous chart (Fig. 8a): medium/small-size shards outnumber small-size fragments in the inner spaces and

areas close to the structure. Conversely, moving away from the structure the small-size shards become the vast majority.

Therefore, it follows that the spaces close to the structures are less affected by trampling effect than the open spaces; moreover, the squares displaying a higher degree of shards fragmentation are placed along the settlement entrance axis, a further evidence that confirms the hypothesis about the presence of a “traffic zone”<sup>4</sup>. An exception is the square F3B, where a high level of small fragments is present. Here the ratio could be influenced by the structural characteristic of this space: the cobblestones on the eastern side of the Room West probably trapped the smaller shards on the top of their surface. Four squares to the E of the entrance show curves like those close to the western structure, so, in this area too the trampling effect affected less the fragmentation of refusal shards, probably as consequence of some structure now perished that was present in this part of the settlement.

Moreover, the distribution of pottery fragmentation (Fig. 8b) allows one to propose some other considerations: firstly, in F3F we can detect a higher incidence of thin pottery fragments, especially of small dimension (A group), than in other squares, this effect can be explained by a higher presence of small vessels on the spot or nearby. Secondly, F3C, which includes part of the stone structure and part of the adjacent open space, counts a high return of thick pottery fragments, with a peak in the B and CD width classes (med-small and medium size). The spatial analysis of functionally classified pottery stressed the presence of big vessels for storing and preparing foodstuffs here, notably at the SE corner of the structure (CAZZELLA *et al.* 2020; LUCCI 2020; RECCHIA *et al.* in press), thus, in the opinion of the author we are observing a palimpsest of objects from a double point of view (morpho-functional and dimensional).

## 5. EXPLORING THE DISTRIBUTION OF WELL-PRESERVED *IMPASTO* VESSELS

The spatial analysis of well-preserved vessels (artefacts preserved at least for 25% of the entire) represents an additional opportunity to better understand formation and alteration processes in the archaeological deposit. Observing the map (Fig. 9), the distribution of these artefacts fits with the shard fragmentation rate distribution: the best-preserved vessels chiefly occur outside the structure, although in its proximity, with a notable cluster close to the hearth. Thus, we can assume that the further the distance from the structure the more trampling intensified. However, this map tells us something more: the distribution of well-preserved vessels follows the direction of the settlement entrance axis, a deduction in accordance with the pottery fragmentation rate (high-level of fragmentation) of the squares situated south of the settlement entrance.

<sup>4</sup> Term already adopted by A.E. NIELSEN (1991).

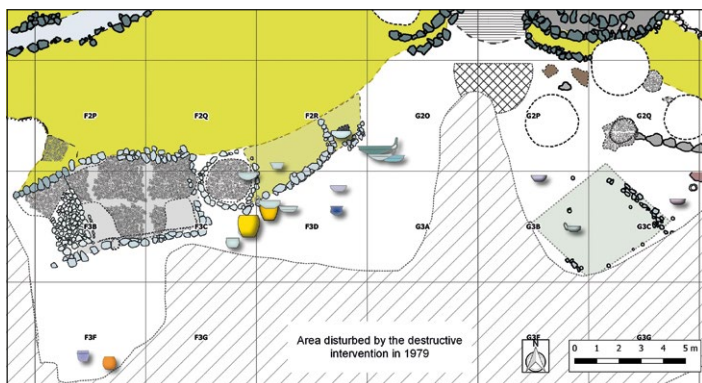


Fig. 9 – Spatial distribution of well-preserved vessels.

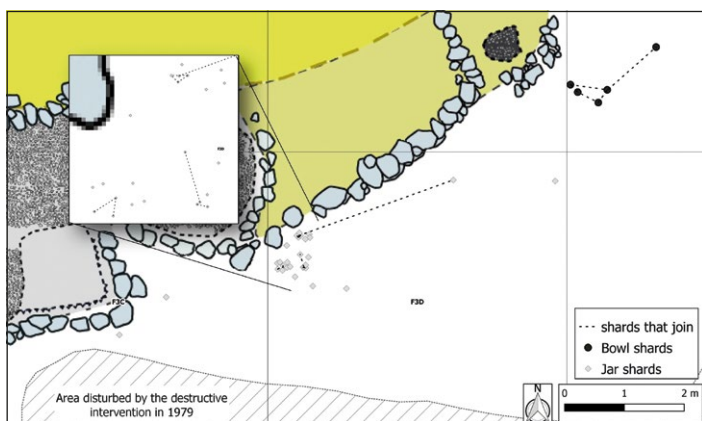


Fig. 10 – Spatial distribution of shards composing a well-preserved bowl and a well-preserved jar, the dotted line marks those shards that join.

This pattern emphasizes on one hand the presence of a more altered palimpsest of refusal elements in the open space, and on the other the direction of the main (or one of the main) “traffic zone” inside the settlement. In this way, the analysis combined the understanding of formation processes of the archaeological deposit and the pattern of use of the space. In an apparent and partial conflict to that is the absence of well-preserved vessels in the eastern area (only few small bowls), where there is low degree of fragmentation, but this is related to a different use of the area detected by the spatial analysis of other classes of finds (notably handcraft activities, e.g., bone artefact production; CAZZELLA *et al.* 2020; LUCCI 2020; LUCCI *et al.* 2020).

Nevertheless, it is important to take into account a further matter regarding the class of “well-preserved vessels”. They were found in fragments, but these could be scattered over a wide space, or they may have been broken in the southern open space (or elsewhere) and then piled up along the south-eastern edge of the structure (the “marginal zone” effect discussed by M. SCHIFFER 1987 and then by A.E. NIELSEN 1991). Thus, the spatial distribution of shards from two of the well-preserved vessels was analysed, in order to investigate about their range and dynamics of dispersion.

The map (Fig. 10) shows the shards related to two well-preserved *impasto* vessels: a bowl (diameter at the mouth of 28 cm and a height of 9 cm) and a small jar (max diameter of 17 cm and an estimated height of 22 cm). The bowl is made up from five big shards laid close to the hearth, which all join. Of the little jar the 30 shards brought to light were close to the south-eastern wall of the Room East: all the shards belong to the same artefact (according to the analysis of their technological characteristics), but not all join. The shards belonging to the bowl are clustered in a small group (within 1 m), excepting one lying about 1 m to the NE of the cluster. The pottery fragments belonging to the jar constitute a cluster close to the Room East (F3D), but two shards have been found close to the corner of the structure (F3C) and one fragment that fits with the others was recovered about 3 m to the NE. In this latter case, the fragments chiefly cluster over a little more than 1 m, with very few pieces scattered further afield (over a range of about 4 m). Both these shard dispersion analyses tell us something more about fragmentation and distribution processes; particularly, basing on the clustered distribution of the fragments, it is possible to rule out any dramatic effect of trampling and dragging on their spatial distribution in the archaeological record.

## 6. FINAL REMARKS

The understanding of the formation and alteration processes of pre-historic archaeological deposits represents a crucial step in exploring social patterns of behaviour through the spatial analysis of artefacts and ecofacts. Notably, the new perspectives afforded by GIS-based intrasite spatial analysis, increasingly focusing on archaeological contexts not affected by “Pompeii premise”, require dynamic methods able to assess the reliability of the depositional set to reconstruct patterns of use of the space. This paper deals with this archaeological issue, showing the methodological approach, based on pottery fragmentation rate, adopted to better understand the effect of trampling on a long-lived dwelling area of the Bronze Age settlement of Coppa Nevigata (South-Eastern Italy). The analysis sought to assess the reliability of that area in figuring out repeated patterns of use of the space, by carrying out a contextual spatial analysis of artefacts and ecofacts.

The core of the methodological approach is the construction of a data entry model able to quickly record dimensional information of shards, exploiting the entire pottery record (diagnostic and non-diagnostic). Clearly, the specificities of the context under scrutiny and the general aims of the research in which this fragmentation analysis was attempted influenced the approach. However, it represents an effort to devise a method that can be easily reused and adapted to other Late Prehistoric contexts, by refining the diverse steps. In our case study, the statistically composed data entry model was sufficient for a rapid acquisition of the measuring of a huge number of *impasto* shards (11,411 pieces). The dimensional parameters constituted by surface width ( $X1$  and  $X2$ ) and thickness ( $t$ ) of each shard, statistically processed, yielded interesting results for understanding the fragmentation rate of pottery overall.

The high-level of small size pieces highlights the important impact of trampling on the archaeological record. However, when observing the fragmentation rate for single squares, the result clearly reveals a duality between spaces that include structures (eastern and western), with a low fragmentation rate, and open spaces, with a large number of small shards. The spatial analysis of the well-preserved vessels, supported by the distribution analysis of two refitted vessels, corroborates the hypothesis of a “traffic zone” oriented on the settlement entrance and the presence of “respected areas” close to the structures. It is important to specify that this traffic cannot be exclusively associated with activities carried out in this specific area but rather reflects movement streams over the wider expanse of the settlement.

These observations lead us back to a pivotal issue, previously mentioned: is the archaeological deposit under scrutiny composed by primary or secondary refuse? To answer this question, it is essential to assess the interplay between what has been previously observed and the results of the functional and spatial analysis of the diverse classes of refusal artefacts and ecofacts performed during the PhD project. Notably, geostatistical analyses (Kernel density estimation and L-function) allowed one to recognise coherent clusters of *impasto* vessels (shards and well-preserved) belonging to related functional classes (e.g., vessels for storing or preparing foods) close to the western structure (even inside the Room W) and to the hearth (CAZZELLA *et al.* 2020; LUCCI 2020; RECCHIA *et al.* in press). On the other hand, the impact of trampling on the open space resulted in a lower number of stylistically-functionally classifiable *impasto* shards, due to their higher fragmentation rate, which is reflected in an absence of coherent clusters spatially distributed.

However, taking into account the diverse physical (e.g., hardness) and morpho-dimensional features of the different classes of refuse, the trampling clearly produced disparate effects on them. For instance, stone and small bone artefacts did not suffer much damage, and they have been mostly morpho-functionally classified. Here, spatial analysis highlighted an important



presence of these classes of finds scattered over the open space south of the entrance and close to the eastern structure, allowing the identification of diverse craft activities (e.g., production of stone and bone artefacts, animal skin processing, etc., LUCCI *et al.* 2020) occurring there. Thus, trampling did not produce dramatic effects on the physical preservation of these refuse elements. Even though it could have contributed to an increase in the trend toward an entropic dispersion, this did not hamper the ability to define a range of human activities carried out in this area. The long-lived-in dwelling area under scrutiny can be thus considered as composed by a primary refuse deposit, although affected by transformations caused by trampling and possible actions of refuse removal<sup>5</sup>. Hence, the artefacts and ecofacts brought to light represent valuable proxies for understanding human activities on a spatial perspective, but to arrive at this conclusion, a multi-analytical approach is the crucial factor in the research.

### *Acknowledgements*

I would like to thank to Alberto Cazzella, Giulia Recchia and Maurizio Moscoloni for the opportunity to work on the Bronze Age site of Coppa Nevigata and for the valuable support provided to me during the PhD research.

ENRICO LUCCI

Department of Antiquities  
Sapienza University of Rome  
enrico.lucci@uniroma1.it

### REFERENCES

- ACHINO K.F., BARCELÓ J.A. 2018, *Spatial prediction: Reconstructing the “spatiality” of social activities at the intra-site scale*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 26, 112-134.
- ASCHER R. 1968, *Time’s arrow and the archaeology of a contemporary community*, in K.C. CHANG (ed.), *Settlement Archaeology*, Palo Alto, National Press, 47-79.
- BALISTA C., LEVI S.T., VANZETTI A., VIDALE M. 1990, *The use of potsherds for interpreting alluvial deposits: A case study in the Adige river basin (Italy)*, «MRS Online Proceedings Library Archive», 185, 561-570.
- BAXTER M.J. 2003, *Statistics in Archaeology*, London, Arnold.
- BINFORD L.R. 1981, *Behavioral archaeology and the “Pompeii Premise”*, «Journal of Anthropological Research», 37, 3, 195-208.
- BINFORD L.R., BINFORD S.R. 1968, *Archaeological perspectives*, in L.R. BINFORD, S.R. BINFORD (eds.), *New Perspectives in Archaeology*, Chicago, Aldine, 5-32.
- BOVY K.M., ETNIER M.A., BUTLER V.L., CAMPBELL S.K., SHAW J.D. 2019, *Using bone fragmentation records to investigate coastal human ecodynamics: A case study from Cixwic̓an (Washington State, USA)*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 23, 1168-1186.
- BRANTINGHAM P.J., SUROVELL T.A., WAGUESPACK N.M. 2007, *Modeling post-depositional mixing of archaeological deposits*, «Journal of Anthropological Archaeology», 26, 4, 517-540.

<sup>5</sup> That would explain the presence of huge number of single shards.

- CAZZELLA A. 2012, *Inquadramento cronologico e culturale della produzione ceramica dai livelli subappenninici di Coppa Nevigata*, in A. CAZZELLA, M. MOSCOLONI, G. RECCHIA (eds.), *Coppa Nevigata e l'area umida alla foce del Candelaro durante l'età del Bronzo*, Foggia, Claudio Grenzi Editore, 173-182.
- CAZZELLA A., RECCHIA G. 2012, *Un trentennio di nuove ricerche a Coppa Nevigata*, in A. CAZZELLA, M. MOSCOLONI, G. RECCHIA (eds.), *Coppa Nevigata e l'area umida alla foce del Candelaro durante l'età del Bronzo*, Foggia, Claudio Grenzi Editore, 247-318.
- CAZZELLA A., RECCHIA G., LUCCI E. 2020, *L'uso dello spazio nei livelli subappenninici di Coppa Nevigata: situazioni a confronto*, in N. NEGRONI CATACCHIO (ed.), *Atti del XIV Incontro di Studi Preistoria e Protostoria in Etruria*, 1, Milano, Centro Studi di Preistoria e Archeologia, 259-270.
- CREMASCHI M., PIZZI C. 2010, *Soil use and hydraulic systems in the Terramara S. Rosa (Poviglio, Northern Italy). The role of micromorphology in decrypting site formation processes*, in *European Geosciences Union General Assembly 2010 (Vienna 2010)*, 12.
- DEBANDI F., CATTANI M., PEINETTI A. 2019, *Focolari e piastre di cottura nell'abitato dell'età del Bronzo di Mursia (Pantelleria, TP)*, «IpoTESI di Preistoria», 12, 111-142.
- DI LERNIA S. 1996, *Studio dei processi formativi del deposito e ricognizione di configurazioni spaziali in insediamenti all'aperto*, «Archeologia e Calcolatori», 7, 337-355 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF7/28\\_Di\\_Lernia.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF7/28_Di_Lernia.pdf)).
- DRISCOLL K., ALCAINA J., ÉGÜEZ N., MANGADO X., FULLOLA J.M., TEJERO J.M. 2016, *Trampled underfoot: A quartz and chert human trampling experiment at the Cova del Parco rock shelter, Spain*, «Quaternary International», 424, 130-142.
- EVANS J., RECCHIA G. 2003, *Pottery function: Trapped residues in Bronze Age pottery from Coppa Nevigata (Southern Italy)*, «Scienze dell'Antichità», 11, 187-201.
- GRAVINA A. 2020 (ed.), *Atti del 40° Convegno Nazionale Preistoria, Protostoria e Storia della Daunia*, San Severo, Archeoclub di San Severo.
- KUNA M. 2015, *Categories of settlement discard*, in K. KRISTIANSEN, S. LADISLAV, J. TUREK (eds.), *Paradigm Found*, Oxford, Oxbow Books, 278-292.
- LEONARDI G., BALISTA C. 1992, *Linee di approccio al deposito archeologico*, in G. LEONARDI (ed.), *Formation Processes and Excavation Methods in Archaeology: Perspectives*, Padova, Università degli studi di Padova, 75-99.
- LUCAS G. 2012, *Understanding the Archaeological Record*, Cambridge, Cambridge University Press.
- LUCCI E. 2020, *La distribuzione dei reperti come base per un'interpretazione dei livelli subappenninici di Coppa Nevigata (Manfredonia, FG) in termini di aree di attività*, PhD Thesis, Sapienza Università di Roma.
- LUCCI E., VILMERCATI M., MIRONTI V. 2020, *Analisi della distribuzione spaziale dei manufatti in litica scheggiata da un'area interna all'abitato di Coppa Nevigata*, in GRAVINA 2020, 183-204.
- MATTHEWS W., FRENCH C.A.I., JONES M.K., LAWRENCE T., CUTLER D.F. 1997, *Microstratigraphic traces of site formation processes and human activities*, «World Archaeology», 29, 2, 281-308.
- MERRILL M., READ D. 2010, *A new method using graph and lattice theory to discover spatially cohesive sets of artifacts and areas of organized activity in archaeological sites*, «American Antiquity», 75, 3, 419-451.
- MILEK K.B. 2012, *Floor formation processes and the interpretation of site activity areas: An ethnoarchaeological study of turf buildings at Thverá, Northeast Iceland*, «Journal of Anthropological Archaeology», 31, 2, 119-137.
- MODESTO R., ERAMO G., MUNTONI I.M., TUNZI A.M. 2020, *Vasi interi o già rotti? Analisi morfometrica dei frammenti ceramici provenienti dagli ipogei dell'età del Bronzo del guardiano e dei fermatreccia di Trinitapoli (BT)*, in GRAVINA 2020, 227-240.
- NIELSEN A.E. 1991, *Trampling the archaeological record: An experimental study*, «American Antiquity», 56, 3, 483-503.



- ORÍA J., SALEMME M., VÁZQUEZ M. 2016, *Site formation processes in relation to surface bone assemblages in the Fuegian steppe (Tierra del Fuego, Argentina)*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 8, 2, 291-304.
- ORTON C.R., TYERS P.A. 1990, *Statistical analysis of ceramic assemblages*, «Archeologia e Calcolatori», 1, 81-110.
- RECCHIA G., LEVI S.T. 1999, *Morfologia funzionale e analisi archeometriche: considerazioni preliminari sulla ceramica dell'età del Bronzo di Coppa Nevigata*, in GRAVINA 2020, 157-176.
- RECCHIA G., LUCCI E., FIORENTINO G., MINNITI C., MIRONTI V., PRIMAVERA M., SIRACUSANO G., VILMERCATI M. in press, *Interpreting long-lived-in dwelling spaces: Integrated spatial analysis of a late Bronze Age area at Coppa Nevigata (South-Eastern Italy)*, in L. JALLOT, A. PEINETTI. (eds), *18<sup>th</sup> UISPP Proceedings Series Places of Life and Domestic Spaces: Functional Organizations and Social Strategies*, Oxford, Archaeopress.
- REVELLES J., BURJACHS F., MORERA N., BARCELÓ J.A., BERROCAL A., LÓPEZ-BULTÓ O., MAICHER C., LE BAILLY M., PIQUÉ R., PALOMO A., TERRADAS X. 2017, *Use of space and site formation processes in a Neolithic lakeside settlement. Pollen and non-pollen palynomorphs spatial analysis in La Draga (Banyoles, NE Iberia)*, «Journal of Archaeological Science», 81, 101-115.
- SCHIFFER M.B. 1972, *Archaeological context and systemic context*, «American Antiquity», 37, 2, 156-165.
- SCHIFFER M.B. 1983, *Toward the identification of formation processes*, «American Antiquity», 48, 4, 675-706.
- SCHIFFER M.B. 1985, *Is there a "Pompeii premise" in archaeology*, «Journal of Anthropological Research», 41, 1, 18-41.
- SCHIFFER M.B. 1987, *Formation Processes of the Archaeological Record*, Albuquerque, N.M. University of New Mexico Press.
- SKIBO J.M. 1987, *Fluvial sherd abrasion and the interpretation of surface remains on southwestern bajadas*, «North American Archaeologist», 8, 2, 125-41.
- WILSON D.C. 1994, *Identification and assessment of secondary refuse aggregates*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 1, 1, 41-68.

## ABSTRACT

Long-lived-in dwelling spaces provide a huge number of valuable data by which to figure out human activities and patterns of space use by prehistoric communities. However, cultural dynamics can intervene during deposit formation processes and transform depositional sets of rubbish involving artefacts and ecofacts. Notably, trampling resulting from human activities represents the most intrusive agent that affects spaces continuously used over a certain timespan. Therefore, comprehending the effect of trampling represents a key-step to assess the distribution of items in the archaeological record and to establish a solid base on which to build valid models of the use of space. This paper proposes a methodological approach to figure out the diverse effects of trampling. The methodology has been tailored on a specific case study, a long-lived-in dwelling area of the Bronze Age settlement of Coppa Nevigata (South-Eastern Italy), dated to the 12th cent. BC. Here, cycles of use and of the discarding of pottery produced a massive number of shards, whose primary deposition has been probably subjected to alteration by trampling. On this premise, the impasto pottery record has been considered as viable proxy to investigate the effects of this cultural agent on the archaeological record. The analysis proceeds by three main steps: a data entry process structured to optimize the recording of shards dimension, fragmentation rate analysis of shards and spatial analysis of well-preserved vessels. This integrated approach allowed an assessment of the reliability of distribution and conservation of the archaeological record in the studied spaces, providing crucial information to better understand use of space patterns through a second analytical step: spatial analysis of artefacts and ecofacts. An aim of this paper is to provide an analytical process replicable for further Late Prehistoric contexts.

## ANTICHE E MODERNE TECNOLOGIE: L'APPLICAZIONE DELLE TECNICHE DI RILEVAMENTO TRIDIMENSIONALE PER LA RAPPRESENTAZIONE E L'ANALISI DEI MANUFATTI LITICI

### 1. INTRODUZIONE

L'utilizzo delle tecnologie digitali in campo archeologico ha registrato uno sviluppo crescente nelle ultime due decadi, conseguenza della maggiore accessibilità di strumenti e applicazioni. L'adozione di queste tecniche offre prospettive stimolanti e ha contribuito a trasformare le metodologie convenzionali del lavoro dell'archeologo che sono diventate componenti talvolta indispensabili, svolte da neo-figure specifiche formatesi nell'archeologia computazionale, digitale e virtuale. L'archeologia preistorica, da sempre attenta agli sviluppi metodologici della ricerca archeologica a causa della estrema parzialità e precarietà delle informazioni ricavabili dai contesti, ha adottato le tecniche digitali all'interno dei protocolli di documentazione degli scavi. Ad esempio, l'integrazione di diverse tecniche di documentazione 3D, con il lavoro condotto sia *in situ* (sulla paleosuperficie) che in laboratorio (sui reperti), può permettere di ricostruire virtualmente la complessità microstratigrafica di contesti "distrutti" dallo scavo archeologico, conservandone intatte le informazioni (ZANGROSSI *et al.* 2019) (Fig. 1).

Di pari passo, il rilevamento tridimensionale è stato applicato con crescente consapevolezza anche ai manufatti litici, resto archeologico tra i più abbondanti per gran parte della storia dell'umanità. I motivi del suo utilizzo sono molteplici e vanno ancora una volta dalla documentazione alla facilità di declinare analisi computazionali e statistiche qualitative e quantitative, fino all'impiego per ragioni di divulgazione e musealizzazione. Diversi laboratori e centri di ricerca in campo accademico stanno adottando queste tecnologie rivolte a diversi obiettivi e finalità scientifiche. Questo articolo vuole rappresentare uno stato dell'arte utile ad orientarsi nella produzione scientifica, una rassegna di quello che è stato finora prodotto che comprenda una riflessione riguardante le prospettive che ci aspettano nel prossimo futuro.

### 2. TECNICHE DI RILEVAMENTO 3D APPLICATE AI MANUFATTI IN PIETRA SCHEGGIATA

#### 2.1 *Registrazione passiva a distanza: fotogrammetria*

Dispositivi di registrazione "a contatto", come digitalizzatori manuali tridimensionali o calibri trasversali collegati talvolta ad hardware, sono utilizzati

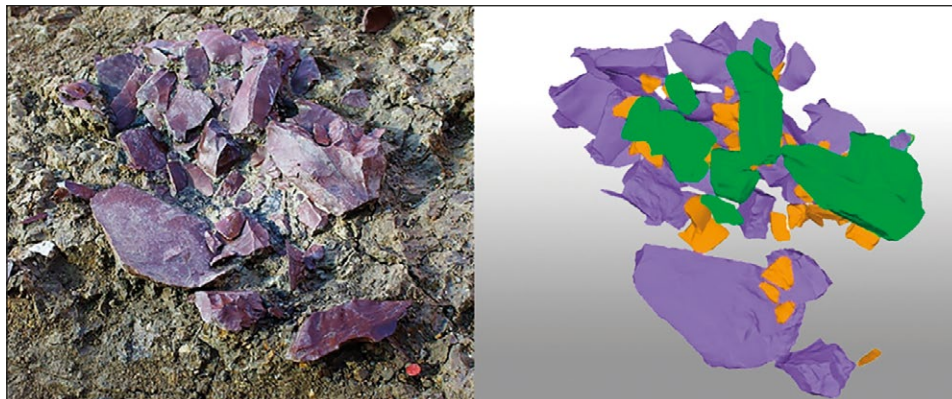


Fig. 1 – Concentrazione di pietre scheggiate ritrovate nel sito di Piovesello. Sulla destra, si evidenziano le fasi microstratigrafiche di formazione dell'accumulo, rese possibili dall'integrazione dei singoli elementi (scansionati in laboratorio) all'interno della documentazione fotogrammetrica della struttura a più livelli (modificato da ZANGROSSI *et al.* 2019).



Fig. 2 – Setup per l'applicazione fotogrammetrica al rilevamento di manufatti litici.

molto raramente per registrare punti isolati in spazi tridimensionali. Per le scansioni di manufatti, infatti, si preferiscono generalmente le metodologie di registrazione a distanza, che consistono in opzioni sia passive che attive (AHMED *et al.* 2014). Quelle passive, come la fotogrammetria, catturano la luce ambientale che viene riflessa da un oggetto, permettendo il calcolo di misure e dati metrici di un oggetto attraverso fotografie e immagini digitali sovrapposte e prese da una varietà di angolature.

La facilità di acquisizione della strumentazione necessaria (un laptop e una fotocamera digitale) ha consentito l'ampia diffusione di questo metodo nel campo della documentazione archeologica, compresa la registrazione di strumenti litici (SUMNER, RIDDLE 2008). Solo negli ultimi anni si è sviluppata una discussione attorno alla creazione di un protocollo standardizzato e ripetibile (MAGNANI *et al.* 2016; PORTER *et al.* 2016). La fotogrammetria è solitamente concepita con l'oggetto stabile al centro della scena e il fotografo che vi gira attorno. Questo meccanismo serve per non variare i rapporti tra l'oggetto e la luce ambientale, ma può influire sulla qualità delle fotografie, specialmente se orientate a registrare piccoli oggetti. Tale problema viene risolto con l'utilizzo di un setup apposito atto ad isolare l'oggetto nel suo ambiente ponendolo su un supporto rotante, mentre la fotocamera, stabilizzata su di un cavalletto, permette scatti di maggiore qualità (Fig. 2). Il numero di foto necessarie per la creazione del modello può variare da poche decine ad oltre un centinaio per manufatto, a seconda della complessità (OLSON *et al.* 2014; PORTER *et al.* 2016).

## *2.2 Registrazione attiva a distanza: dispositivi scanner*

Le opzioni di scansione attive consistono nella proiezione di radiazioni o luce sui modelli al fine di rilevarne il contorno. Questi si dividono in impulsi laser/radar (indicati per usi esterni e manufatti di grandi dimensioni), triangolazione e luce strutturata. La registrazione delle geometrie attraverso triangolazione è una delle tecniche più comuni per la scansione di oggetti: consiste in una emissione di laser e si basa sulla misurazione precisa della distanza tra l'emettitore e un sensore ricevitore attraverso l'oggetto scansionato e dell'angolo tra di essi. Attraverso queste semplici informazioni si calcolano la distanza e la posizione di una serie di punti nello spazio tridimensionale. La tecnologia forse più utilizzata per i manufatti litici è la digitalizzazione attraverso frange di luce strutturata, il cui processo operativo è descritto in diversi lavori dedicati (GROSMAN *et al.* 2008; BARONE *et al.* 2018). La registrazione comincia proiettando pattern di strisce verticali sull'oggetto, la cui deformazione, indotta dall'irregolarità della superficie, viene catturata da fotocamere poste a diverse angolazioni rispetto all'oggetto e alle frange di luce. In questo modo, in pochi secondi viene calcolata una nuvola di punti (Fig. 3). Modelli completi vengono ottenuti allineando le nuvole di punti

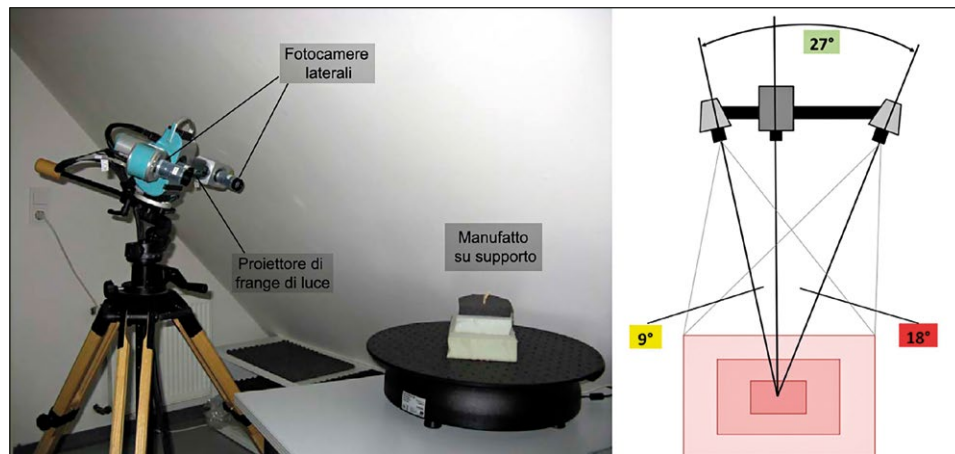


Fig. 3 – Scanner a luce strutturata Breuckmann SmartSCAN. Sulla destra, il funzionamento del dispositivo con le due fotocamere laterali asimmetriche e il proiettore di frange di luce centrale (modificato da DELPIANO *et al.* 2017).

prese ad angolature diverse; la loro fusione in un reticolo tridimensionale si basa su algoritmi come l'Iterative Closest Point (ICP) (BARONE *et al.* 2018).

Un'altra tecnologia utile è la tomografia micro-computerizzata a raggi X (CT ad alta risoluzione), particolarmente utilizzata in campo medico, biologico e antropologico perché capace di registrare la struttura interna degli oggetti e le loro variazioni di densità, utili per segmentare le diverse parti che li compongono. Tale capacità generalmente non occorre nel campo della tecnologia litica, con eccezioni come nei casi di manufatti incorporati in concrezioni (WARD *et al.* 2016).

### 2.3 Scelta della tecnica più adatta

Come confermato da studi comparativi, i manufatti in pietra scheggiata rappresentano una delle tipologie di reperti la cui scansione genera maggiori difficoltà, a causa principalmente della loro superficie riflettiva che tende ad assorbire gran parte della luce proiettata, specialmente in selci vetrose e scure, ossidiane o rocce cristalline (quarzi e quarziti) (SLIZEWSKI, SEMAL 2009). Queste problematiche sono evidenti nella registrazione di elementi di dettaglio, come il ritocco, o nei margini particolarmente sottili. In questi casi, il laser attraversa la superficie creando incomprendimenti nella profondità dell'immagine. Al fine di risolvere questo problema, si tende ad applicare sull'oggetto un sottile strato di polvere o spray volatili.

Il limitato spessore dei bordi causa problemi anche nell'allineamento delle singole scansioni: il già citato ICP non sempre restituisce buoni risultati



Fig. 4 – Modelli 3D di schegge ricavati con fotogrammetria: in alto, le geometrie e la texture sono perfettamente acquisite e gli attributi tecnologici ben visibili. In basso, sono evidenti problemi di allineamento, come il caratteristico “rumore” sulle superfici, aspetto rugoso e granuloso derivato da nuvole di punti irregolari.

perché le due superfici possono essere erroneamente considerate come la stessa. Alcuni scanner manuali con meccanismo di misurazione delle coordinate permettono la scansione all'interno di un sistema calcolato al momento, evitando fraintendimenti nella registrazione e negli algoritmi di fusione (LORIOT *et al.* 2007). La scelta della tecnica di acquisizione deve tenere conto di diversi elementi qualitativi e di logistica. Un grande pregio della fotogrammetria è l'accessibilità degli strumenti richiesti e la semplicità nella realizzazione di un setup come quello descritto in PORTER, ROUSSEL and SORESSI (2016). Software di allineamento sono disponibili anche in versione open source o a costi limitati per licenze educational.

Tecnica generalmente “economica”, la fotogrammetria prevede tempistiche che dipendono notevolmente dalla pratica personale. Per ottenere gli scatti possono bastare tra i 10 e i 15 minuti; il post-processing è più complesso, ma si è notevolmente ridotto nel tempo benché dipenda dall'hardware a disposizione e può durare da 30 minuti a diverse ore. La qualità dei modelli ottenuti è aumentata anch'essa con il progredire dei software di allineamento e della standardizzazione del processo operativo: da tecnica alternativa allo scanner, più versatile ma meno accurata nei piccoli dettagli (SUMNER, RIDDLE 2008), la fotogrammetria è passata a produrre modelli di strumenti litici



aventi qualità geometriche pari a quelle degli scanner di alta qualità (Fig. 4) (MAGNANI *et al.* 2016).

D'altra parte, i dispositivi a scansione comprendono una gamma variegata di prodotti di diverse qualità e fasce di prezzo. I dispositivi più economici (come il Nextengine laser scanner) faticano talvolta nella registrazione di elementi di dettaglio e sono piuttosto lenti nelle fasi di post-processing (SHOTT 2014), ma possono essere perfezionati per analisi orientate anche al ritocco sui manufatti (MALONEY 2020). L'accuratezza del dettaglio e l'alta risoluzione non sono un problema per gli scanner a luce strutturata di gamma più elevata, come i prodotti della Breuckmann e della Polymetric, caratterizzati anche da una buona velocità di acquisizione: in pochi minuti le geometrie vengono registrate e la fabbricazione del modello texturizzato impiega dai 15 ai 30 minuti a seconda della complessità del pezzo (GROSMAN *et al.* 2008; DELPIANO *et al.* 2017). Infine, tra i dispositivi più veloci e versatili, si ricordano gli scanner a mano prodotti della casa di produzione Artec3D, che possono rappresentare un buon compromesso tra costo e comodità di utilizzo, velocità e trasporto, permettendo di produrre un modello finito in 10-15 minuti. Utilizzabili per documentazione di siti e reperti, questi scanner presentano tuttavia evidenti limiti nella registrazione delle caratteristiche di dettaglio dei manufatti litici (DELPIANO *et al.* 2021).

Pertanto, la scelta della tecnica di acquisizione deve essere adeguata agli obiettivi:

- Per scopi di archiviazione e disseminazione virtuale del modello, in cui la restituzione deve essere quanto più realistica, la fotogrammetria si rivela solitamente la tecnica più adeguata. In alternativa, una copertura fotografica può essere applicata a geometrie registrate con scanner ad alta risoluzione.
- Per una documentazione quanto più precisa della geometria tridimensionale finalizzata ad analisi specifiche anche di dettaglio o alla lettura tecnologica virtuale, gli scanner a luce strutturata di gamma elevata rappresentano solitamente lo strumento più adatto.
- Per analisi quantitative specifiche come la morfometria geometrica, laser scanner veloci o poco onerosi, così come la fotogrammetria, possono rappresentare le tecniche più efficienti al fine di registrare grandi quantità di modelli di sufficiente qualità con costi e/o tempistiche limitate.

### 3. FUNZIONALITÀ DEI MODELLI 3D

#### 3.1 Documentazione grafica

I benefici della registrazione tridimensionale dei manufatti litici sono molteplici, a partire dalla capacità di documentare graficamente gli oggetti al fine della rappresentazione in articoli e pubblicazioni (PASTOORS, WENIGER

2011; BARONE *et al.* 2018). Il modello 3D può essere in grado di sostituire il disegno o le fotografie, solitamente usati per veicolare contenuti tecno-morfologici. Le mesh poligonali possiedono elevato valore scientifico essendo una registrazione oggettiva e accurata dell'oggetto senza intermediari e senza perdita di informazioni. La mancanza della lettura e interpretazione tecnologica (prerogativa dei disegni) crea una separazione tra la documentazione e l'analisi scientifica, minimizzando l'impatto individuale (PASTOORS, WENIGER 2011). Se a questo si unisce la proprietà del modello 3D di poter essere veicolato online, è teoricamente possibile svolgere analisi da remoto sui modelli, cosa impossibile con disegni e fotografie.

Le scansioni sono state sfruttate anche per creare documentazioni grafiche semi-automatizzate evitando il notevole impiego di tempo necessario al disegno realistico. A partire dai modelli, è possibile raggruppare in cluster geodesici le curvature delle superfici, coincidenti solitamente con le nervature registrate nelle illustrazioni, sviluppando così rappresentazioni schematiche dei manufatti (BARONE *et al.* 2018).

### *3.2 Processi analitici secondari e analisi quantitative*

Alcuni dei vantaggi più notevoli ed evidenti dell'approccio digitale sono la capacità di estrarre informazioni altrimenti impossibili da registrare manualmente, un facile calcolo di metriche complesse (volumi, superfici, centri di massa), oltre alla possibilità di gestire e analizzare enormi quantità di dati. Per questo i modelli 3D si prestano particolarmente ad analisi quantitative e statistiche; la registrazione tridimensionale dei manufatti può essere così integrata nelle metodologie standard al fine di ampliare gli orizzonti della ricerca (GROSMAN *et al.* 2014).

Le registrazioni dei dati morfometrici, dimensionali e tecno-funzionali dei manufatti possono essere svolte direttamente sui modelli 3D ovviando a problemi di inaccuratezza e fraintendimento di protocolli, grazie al posizionamento manuale o semi-automatico dei modelli lungo gli assi richiesti secondo le convenzioni (GROSMAN *et al.* 2008). Allo stesso modo, è possibile analizzare virtualmente le caratteristiche tecnologiche: le onde di frattura, che indicano la direzionalità della forza, sono evidenti nei modelli di buona qualità, specialmente se analizzati con software che permettono di manovrare le fonti di luce. Il pattern dei negativi che si leggono sulle superfici, particolarmente importante nella tecnologia litica, può essere così ricavato.

Il rilevamento automatico nei negativi appartiene al campo della segmentazione dell'immagine digitale, più in particolare del tipo superficiale; algoritmi costruiti su diversi attributi (curvature della superficie, distanze geodesiche) sono in grado di segmentare la superficie dell'oggetto in "fazzoletti" che, ottimizzati, tendono a corrispondere ai negativi (Fig. 5). Aree, curvature, concavità, forme e altre caratteristiche possono essere gestite e analizzate a



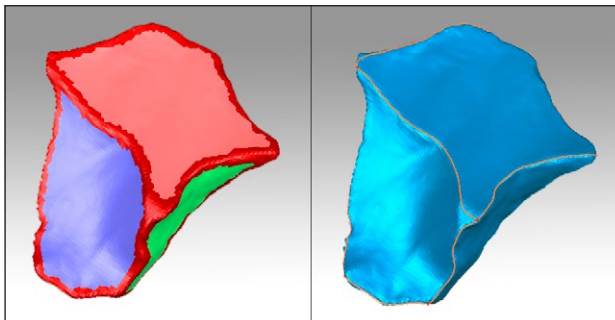


Fig. 5 – Segmentazione superficiale svolta attraverso il calcolo della convessità; si evidenziano negativi e nervature della scheggia.

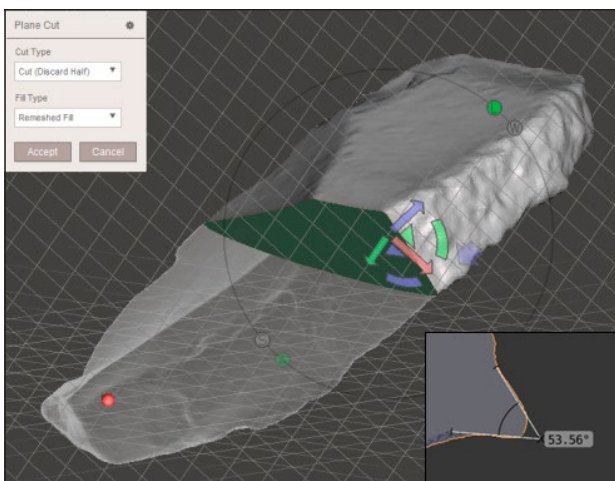


Fig. 6 – Sezionamento virtuale di uno strumento su scheggia e registrazione dell'angolo tagliente e della profondità di taglio.

partire da questa segmentazione (RICHARDSON *et al.* 2014). L'analisi quantitativa dei negativi è stata sfruttata negli ultimi anni per calcolare le riduzioni di nuclei e strumenti, indicatori importanti di mobilità e utilizzo del sito; ad esempio, i negativi possono essere registrati come vettori aventi proprietà di georeferenziazione, inclinazione, direzione, misure, rendendo possibile l'analisi del loro pattern anche in confronto alla volumetria del nucleo, sviluppando indici di riduzione come lo Scar Density Index (SDI), creato per stimare la riduzione di nuclei rapportando i negativi con l'area residua calcolata sul 3D (CLARKSON 2013).

La stima della riduzione degli strumenti ritoccati è invece stata calcolata con l'apporto di metodi statistici, rapportando la massa finale dello strumento con la stimata massa iniziale del supporto prima del ritocco, calcolata attraverso la regressione lineare a partire dall'area 3D del tallone (CLARKSON, HISCOCK 2011). Altri metodi usano i modelli 3D stimando l'estensione originale dei bordi estendendo virtualmente le ultime superfici non ritoccate del bordo stesso (MORALES *et al.* 2015). Attraverso calcoli geometrici viene così quantificata la riduzione del margine. Infine, LIN *et al.* (2010) hanno cercato di stimare la riduzione dell'insieme litico sulla base della quantificazione assoluta del cortice sulle superfici, applicando in maniera quantitativa un metodo che si basa sul calcolo della differenza tra le quantità previste di cortice determinate dalla geometria solida, e quelle invece osservate e misurate nell'insieme litico. L'obiettivo è quello di determinare se la frazione corticale sia sotto o sovrarappresentata nell'insieme, e se pertanto i manufatti venissero introdotti nel sito o da esso esportati.

L'analisi virtuale dei modelli può inoltre adattare lo studio delle volumetrie, svolto nella tecnologia litica classica, ai metodi quantitativi, anche al fine di confermare o confutare concetti e teorie: ad esempio, le conclamate differenze volumetriche tra nuclei Levallois e Discoidi teorizzate da BOËDA (1993) sono state confermate con l'applicazione tridimensionale che ha permesso la costruzione di piani di intersezione e il calcolo preciso di volumi e angoli di distacco (RANHORN *et al.* 2019). Analogamente, differenze volumetriche sono state registrate nei nuclei laminari di due culture di transizione tra Paleolitico Medio e Paleolitico Superiore in Europa, il Castelperroniano e il Protoaurignaziano (PORTER *et al.* 2019).

Allo stesso modo l'angolo dei margini taglienti dei manufatti, indicativo del loro potenziale funzionale, può essere misurato e calcolato con precisione assoluta: diversi software permettono il calcolo a partire dalle sezioni trasversali facilmente ottenibili sui modelli virtuali (Fig. 6) (DELPIANO, UTHMEIER 2020). In più, l'angolo medio dei bordi può essere ricavato con algoritmi sviluppati appositamente, capaci di evidenziare il variare dell'angolo tagliente a seconda dello spostamento sul bordo (WEISS *et al.* 2018; VALLETTA *et al.* 2020)

### 3.3 *Morfometria geometrica*

La crescente disponibilità di modelli digitali ha facilitato lo sviluppo di analisi morfologiche che coinvolgono la statistica multivariata. L'analisi della forma è stata inizialmente sviluppata a partire dal contorno dell'oggetto ("outline method") per quantificare attributi come la simmetria, la standardizzazione o la variabilità morfologica di alcune categorie di manufatti (GROSMAN *et al.* 2011a). La forma, integrata con la tecnologia e la tipologia dei manufatti, può essere infatti indicativa di entità tassonomiche distinte, soprattutto in epoche recenti della preistoria. Lo studio bidimensionale della forma si basa

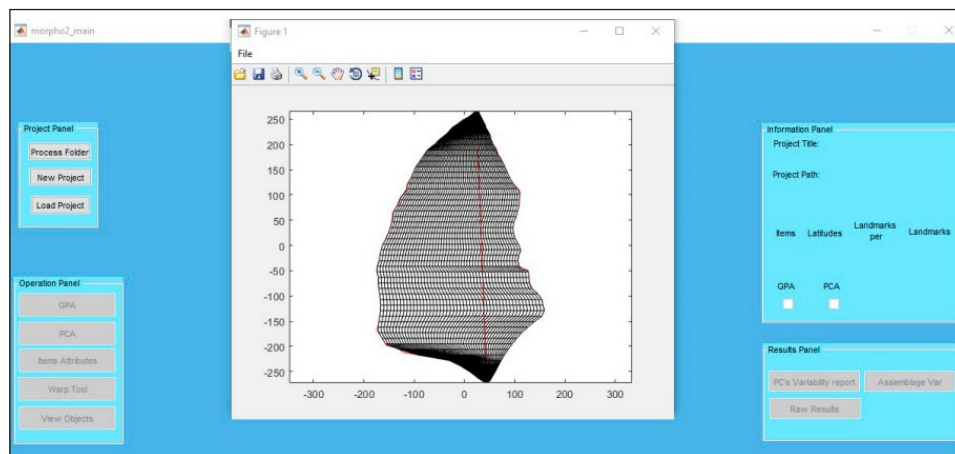


Fig. 7 – Assegnazione semi-automatica dei semi-landmark sulla superficie dei modelli 3D attraverso la griglia di meridiani e paralleli (software AGMT3D).

tendenzialmente sull'analisi di Fourier, che può essere però applicata in diversi modi a modelli tridimensionali: sulle isometrie calcolate sulle superfici di strumenti litici (GINGERICH *et al.* 2014), oppure integrando la terza dimensione direttamente sul contorno del manufatto (CHACÓN *et al.* 2016).

Il metodo principale di morfometria geometrica tridimensionale si basa invece sul posizionamento dei landmark, elemento problematico nel caso dei manufatti litici. Solitamente, sugli oggetti antropici mancano landmark omologhi e identificabili, che sono essenziali per ogni analisi comparativa. Punti individuali che descrivano efficientemente la forma dei manufatti sono di complessa individuazione e la loro omologia intrinseca è difficilmente condivisa da tutti gli oggetti. Per i manufatti si utilizzano solitamente semi-landmark, privi di questa omologia e identificati con diversi protocolli di posizionamento (DRYDEN, MARDIA 1992; LYCETT *et al.* 2006). La lettura e l'interpretazione tecnologica o tecno-funzionale sono essenziali nel caso si scelgano landmark geometricamente omologhi; data la mancanza di protocolli condivisi, le modalità di estrazione sono diverse: manualmente, attraverso i già citati calibri e digitalizzatori a contatto, oppure virtualmente attraverso l'interazione con software di modellazione 3D (SHOLTS *et al.* 2012; ARCHER *et al.* 2018; WEISS *et al.* 2018). Landmark anatomici con valore tecno-funzionale possono essere scelti su punte, diedri, talloni; dalla connessione di questi, semi-landmark formanti curve vengono fabbricati ad esempio lungo i bordi funzionali, mentre toppe di semi-landmark sulle superfici dorsali e ventrali. Nei lavori citati, la scelta dei landmark dipende dalla morfo-tecnica dei manufatti ma anche dalle analisi specifiche a cui gli studi sono indirizzati.

La registrazione più comune di semi-landmark, tuttavia, avviene come già anticipato attraverso procedure semi-automatiche. In particolare, un meccanismo di registrazione è stato recentemente sviluppato attraverso il software AGMT3-D (Fig. 7). Si tratta di un metodo veloce e semplice, basato su una griglia di linee meridiane e parallele equidistanti, al fine di acquisire dati che possono essere gestiti dal punto di vista statistico per descrizioni e analisi quantitative (HERZLINGER, GROSMAN 2018). Una volta registrate le coordinate dei landmark, il metodo standard della morfometria geometrica prevede diversi step (SHOTT, TRAIL 2010), che cominciano con la Generalized Procrustes Analysis (GPA), che rimuove le differenze di scala e orientamento nel campione e focalizza l'attenzione sulla sola dimensione della variazione morfologica. Questa verrà poi interrogata con l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) ed espressa graficamente su un piano cartesiano attraverso le due PC che estrinsecano la variabilità maggiore.

#### *3.4 L'analisi morfometrica applicata alla litica: strumento efficace o ambiguo?*

La forma degli strumenti litici non è che una conseguenza di innumerevoli variabili (funzione, supporti di partenza, metodi di scheggiatura e riduzione, potenziale di ripristino e ritocco), la cui interpretazione è complicata e necessita dell'applicazione di diverse metodologie. Inoltre, c'è la possibilità che la forma possa essere stata concepita a seguito di un modello o schema mentale correlato a un elemento formale simbolico o dal valore culturale. Per questo la morfologia da sola non è in grado di rispondere a questioni archeologiche complesse; il principale beneficio della morfometria 3D è la registrazione oggettiva della variabilità dei manufatti. Pertanto, l'analisi morfologica può concorrere, assieme ad altri approcci (tecnologico, funzionale, sperimentale), al fine di comprendere se tali prodotti variassero a seconda di ragioni ecologico/funzionali o biologico/culturali.

Un modo per rispondere a questioni generali di tale portata può essere quello di confrontare prodotti dalla tecno-funzionalità simile e incrociare dati provenienti da questi diversi approcci, cercando di ricostruire le fonti della variabilità morfologica (WEISS *et al.* 2018; DELPIANO, UTHMEIER 2020). I risultati di alcuni studi confermano il successo del metodo nell'identificazione di diversi attributi come il livello di abilità degli scheggiatori preistorici (HERZLINGER *et al.* 2017) o di distinti obiettivi tecnologici correlati a schemi di funzione (HERZLINGER, GOREN-INBAR 2020). Fonti ricorrenti di variazione morfometrica possono anche essere l'applicazione sistematica di specifiche strategie di riduzione e la disponibilità di materia prima adatta (ARCHER, BRAUN 2010), oppure cluster geografici e dal valore tecno-culturale (ARCHER *et al.* 2016), fino a coinvolgere elementi culturali, simbolici e funzionali nel caso di armi composite (SHOTT, TRAIL 2010). A partire da ciò, è stato possibile arrivare ad identificare gruppi diversi su base etnica (THULMAN 2012).

#### 4. ALTRE ANALISI

##### 4.1 *Tracceologia e applicazioni GIS*

Le prospettive riguardanti l'analisi morfometrica e superficiale applicata al 3D vengono amplificate nel momento in cui si integrano le applicazioni dei sistemi GIS. Procedure sviluppate su questa base sono state presentate in DAVIS *et al.* (2015) con un approccio chiamato GLIMR: il software basato su ArcGIS estrae dati topografici e morfometrici che possono essere gestiti con l'analisi statistica multivariata per elaborazioni su landmark e attributi chiave come modelli digitali di elevazione (DEM). A questo proposito, un'applicazione molto comune di queste analisi, soprattutto negli ultimi anni, riguarda il rilevamento e la quantificazione di tracce superficiali su strumenti litici percussivi o macine, attraverso l'analisi in ambiente GIS di attributi topografici (CARUANA *et al.* 2014; CARICOLA *et al.* 2018).

Il 3D è stato applicato anche per quantificare il danneggiamento subito dai manufatti in eventuali movimenti post-deposizionali, grazie all'integrazione con strumenti sperimentali sottoposti a un processo di simulazione controllata di danneggiamento. La registrazione di modelli allo stato fresco e dopo diverse fasi di usura indotta ha permesso l'applicazione del metodo a insiemi archeologici fino ad inferire sulla possibile età degli stessi (GROSMAN *et al.* 2011b).

##### 4.2 *Il 3D e i rimontaggi litici*

Uno degli elementi più rilevanti dell'analisi degli insiemi litici è rappresentato dai rimontaggi, ovvero dal raccordo di più manufatti che ricostituiscono parte del blocco di materia prima. I rimontaggi più complessi forniscono informazioni puntuali sulle azioni tecniche e concettuali dello scheggiatore, illustrando i metodi di lavorazione e la fabbricazione dei prodotti. Tuttavia, questo potenziale informativo non è sempre sfruttato a causa di limiti di analisi e interazione, che possono essere superati con l'approccio tridimensionale (DELPIANO *et al.* 2017). La difficile manipolazione fisica viene superata rimontando virtualmente i manufatti, evitando inoltre il rischio di danneggiamenti dovuti al contatto tra i diversi elementi o all'applicazione di paste e colle (Fig. 8) (DELPIANO, PERESANI 2017). È in questo modo possibile svolgere analisi volumetriche e interattive altrimenti impossibili con metodi tradizionali, volte persino a indagare la morfometria dei vuoti interni attraverso sezioni e calchi virtuali, inferendo sui possibili obiettivi tecnici e sulla loro funzionalità (ABEL *et al.* 2011; DELPIANO *et al.* 2019). La quantificazione precisa della riduzione e delle sue modalità topologiche è altresì possibile, dato che, se integrata all'analisi dell'insieme litico al completo, è utile per interpretare il comportamento umano associato all'occupazione del sito (DELPIANO *et al.* 2019).

Una problematica comune dei rimontaggi è correlata al fatto che la loro ricerca, all'interno del sito, rappresenta una pratica dispendiosa in termini

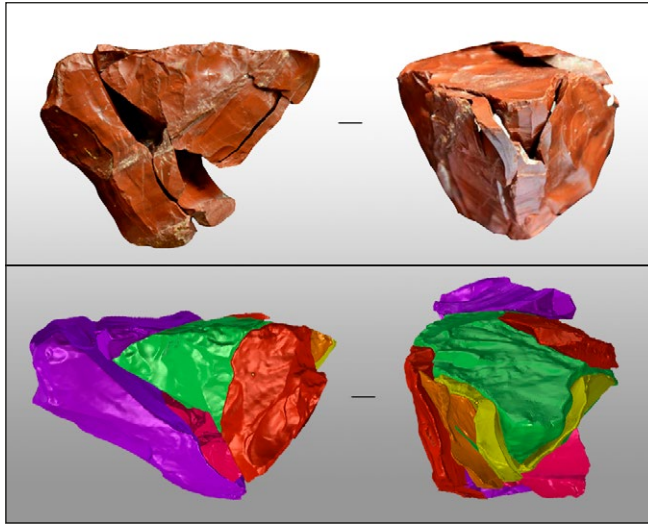


Fig. 8 – Rimontaggio litico di un nucleo con diversi prodotti laminari, anche in uno spazio virtuale 3D (modificato da DELPIANO *et al.* 2019).

di tempo. Fin dal principio dell'utilizzo di tecniche computazionali applicate all'archeologia, ci si è chiesti come sviluppare una metodologia basata sulla ricerca automatizzata di rimontaggi nell'insieme litico (RIEL-SALVATORE *et al.* 2002; SCHURMANS *et al.* 2002). Si è tentato, attraverso la segmentazione delle superfici, lo sviluppo di un processo che ricerca, in un insieme litico sperimentale registrato virtualmente, le superfici di maggiore corrispondenza tra nuclei e prodotti della scheggiatura, arrivando a risultati positivi che fanno sperare per la prossima applicazione a insiemi archeologici (YANG *et al.* 2016).

## 5. ARCHIVIAZIONE E STAMPA DEI MODELLI

Riproduzioni e calchi fedeli ai reperti originali sono sempre stati utilizzati, nell'archeologia, sia per scopi di musealizzazione che al fine di rendere possibili analisi e comparazioni a distanza. Il crescente utilizzo di strumenti digitali e modelli virtuali è stato sfruttato anche per sostituire gradualmente le tecniche tradizionali di riproduzione, il cui difetto era la possibilità di inquinare o danneggiare gli originali durante il procedimento. Il modello 3D offre la possibilità, come già accennato, di svolgere da remoto indipendenti analisi metriche, comparative o quantitative/statistiche. Inoltre, i modelli virtuali permettono un'accessibilità potenzialmente illimitata, che poggia le fondamenta sull'esistenza di database e piattaforme online, da quelle libere (Sketchfab) ad archivi



legati a progetti di ricerca tesi a catalogare imponenti quantità di informazioni e modelli (GRÖNING *et al.* 2007; AHMED *et al.* 2014). La libera diffusione può essere, in questi casi, un motore stesso della discussione, che può portare alla parziale revisione e al miglioramento delle classificazioni “tradizionali”.

In parallelo, i musei archeologici di tutto il mondo hanno cominciato a utilizzare strumenti digitali per registrare e rendere fruibile parte delle proprie collezioni ai visitatori virtuali, processo particolarmente necessario negli anni correnti, in cui anche le istituzioni museali sono coinvolte in sfide inedite e necessità di rivoluzionare la fruizione degli spazi. I modelli virtuali, non da meno quelli di manufatti litici, possono raggiungere qualità comunicative enormi: la creazione di video e animazioni complesse o l'integrazione in ambienti immersivi di realtà aumentata potranno diventare, in un futuro forse non troppo lontano, la prassi di un nuovo linguaggio museografico.

Nel frattempo, anche la riproduzione fisica dei modelli virtuali attraverso la stampa 3D rappresenta una modalità di esposizione comune per numerose finalità, come l'allestimento di percorsi tattili per ipovedenti, la progettazione di laboratori didattici o la creazione di prodotti per il merchandising museale. Per la stampa di manufatti litici sono disponibili diversi materiali (principalmente resine, polimeri plastici e polveri fissate con soluzioni minerali) con differenti gradi di restituzione qualitativa, fragilità e costi (OLSON *et al.* 2014). Solitamente, le stampe in plastica uniscono una qualità non eccelsa (con aspetto stratificato) a un basso peso e a un'ottima resistenza, risultando generalmente versatili e utilizzabili per diversi scopi. I modelli in resina presentano una qualità superiore per dettaglio e proprietà fisiche, dal momento che esistono diverse resine che simulano i diversi tipi di materiali.

## 6. CONCLUSIONI

La presente indagine è stata sviluppata per evidenziare l'utilità e le potenzialità di un approccio di acquisizione tridimensionale per lo studio della tecnologia litica, disciplina che nella sua storia ha saputo mettersi in discussione e reinventarsi più volte. La comunità scientifica si è progressivamente resa conto di queste prospettive: nelle ultime due decadi, i contributi che hanno riguardato l'acquisizione tridimensionale di manufatti litici sono passati da pochi e isolati studi di presentazione ad un ritmo di una decina (e oltre) di pubblicazioni l'anno nelle principali riviste internazionali (Fig. 9a). Per questo, si auspica che la documentazione tridimensionale possa diventare la prassi nel prossimo futuro all'interno dei processi di scavo e di studio del materiale, anche grazie all'accessibilità sempre maggiore di strumenti e tecniche di acquisizione. Tra questi, i dispositivi scanner sono tuttora gli strumenti più utilizzati, con un aumento, negli ultimi anni, di quelli a luce strutturata correlato probabilmente al buon adattamento di questi strumenti a tutti i tipi

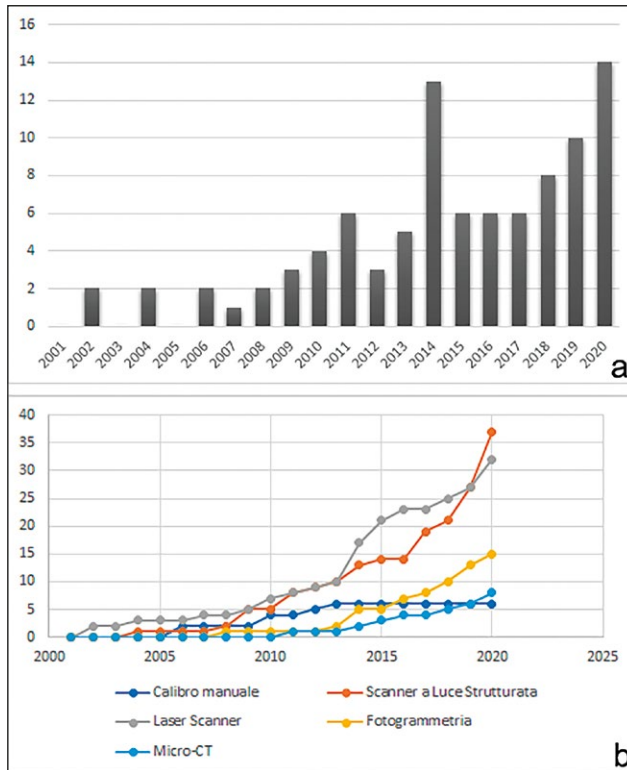


Fig. 9 – a) progressione delle pubblicazioni scientifiche riguardanti l'applicazione di tecniche di rilevamento 3D per la documentazione o lo studio dei manufatti litici dal 2000 ad oggi; b) diagramma cumulativo delle tecniche di acquisizione tridimensionale utilizzate nei suddetti lavori.

di manufatti con ottimi risultati qualitativi (Fig. 9b). Parallelamente, si assiste a una crescita nell'utilizzo della fotogrammetria, dovuta alla definizione di protocolli di acquisizione e al crescente sviluppo dei software di allineamento fotografico, oltre che alla facile accessibilità delle strumentazioni necessarie. Lo sviluppo di protocolli riproducibili è imprescindibile anche nella fase di analisi, per evitare la dispersione di approcci e uniformare la ricca produzione di questi anni: il primo passo in questo senso è stato svolto con la condivisione di codici e pacchetti sviluppati su R (POP 2019). Come abbiamo visto, la larga applicazione di queste tecniche sta progressivamente cambiando l'approccio di studio dei manufatti litici: la registrazione delle geometrie 3D sta diventando la prassi per i manufatti di un certo pregio, mentre in diversi casi, interi insiemi litici vengono sottoposti a documentazioni di questo tipo, mirate ad analisi



quantitative e statistiche. I progressi più evidenti si sono avuti nella geometria morfometrica e nella quantificazione di metriche complesse. In un prossimo futuro altri obiettivi potranno essere raggiunti, come le analisi tecnologiche da remoto e la ricerca automatizzata di rimontaggi, sempre ricordando la valenza complementare e non sostitutiva di questi tipi di approcci.

L'editoria scientifica ha compreso questo incremento di attività nell'uso del 3D e più in generale degli strumenti digitali applicati all'archeologia, replicando con la creazione di riviste scientifiche dedicate entro cui trovano spazio molti dei lavori citati nel presente articolo. La cosiddetta "rivoluzione digitale", difatti, sta coinvolgendo tutti i campi della ricerca archeologica, nessuno escluso. Solo sviluppando una riflessione metodologica ed epistemologica sul proprio valore etico e pratico, tali strumenti innovativi potranno essere integrati pienamente nella ricerca archeologica come è successo a suo tempo con le trasformazioni indotte dall'archeologia processuale e post-processuale.

### *Ringraziamenti*

Si ringraziano il Prof. Marco Peresani e i Dr. Gianpiero Di Maida, Armando Falcucci e Filippo Zangrossi per le proficue discussioni che hanno contribuito a migliorare il presente lavoro; si ringrazia Gloria Cattabriga per la revisione inglese dell'abstract.

DAVIDE DELPIANO

Sezione di Scienze Preistoriche e Antropologiche  
Dipartimento di Studi Umanistici

Università di Ferrara  
davide.delpiano@unife.it

### BIBLIOGRAFIA

- ABEL R.L., PARFITT S., ASHTON N., LEWIS S.G., SCOTT B., STRINGER C. 2011, *Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT*, «Computers and Graphics», 35, 4, 878-884 (<https://doi.org/10.1016/j.cag.2011.03.001>).
- AHMED N., CARTER M., FERRIS N. 2014, *Sustainable archaeology through progressive assembly 3D digitization*, «World Archaeology», 46, 1, 137-154 (<https://doi.org/10.1080/00438243.2014.890911>).
- ARCHER W., BRAUN D.R. 2010, *Variability in bifacial technology at Elandsfontein, Western cape, South Africa: A geometric morphometric approach*, «Journal of Archaeological Science», 37, 1, 201-209 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.09.033>).
- ARCHER W., POP C.M., GUNZ P., MCPHERRON S.P. 2016, *What is Still Bay? Human biogeography and bifacial point variability*, «Journal of Human Evolution», 97, 58-72 (<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2016.05.007>).
- ARCHER W., POP C.M., REZEK Z., SCHLAGER S., LIN S.C., WEISS M., DOGANDŽIĆ T., DESTA D., MCPHERRON S.P. 2018, *A geometric morphometric relationship predicts stone flake shape and size variability*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 10, 8, 1991-2003 (<https://doi.org/10.1007/s12520-017-0517-2>).
- BARONE S., NERI P., PAOLI A., RAZIONALE A.V. 2018, *Automatic technical documentation of lithic artefacts by digital techniques*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 11, e00087 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00087>).

- BOËDA E. 1993, *Le débitage Discoïde et le débitage Levallois récurrent centripète*, «Bulletin de La Société Préhistorique Française», 90, 6, 392-404.
- CARICOLA I., ZUPANCICH A., MOSCONE D., MUTRI G., FALCUCCI A., DUCHES R., PERESANI M., CRISTIANI E. 2018, *An integrated method for understanding the function of macro-lithic tools. Use wear, 3D and spatial analyses of an Early Upper Palaeolithic assemblage from North Eastern Italy*, «PLoS ONE», 13, 12 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207773>).
- CARUANA M.V., CARVALHO S., BRAUN D.R., PRESNYAKOVA D., HASLAM M., ARCHER W., BOBE R., HARRIS J.W.K. 2014, *Quantifying traces of tool use: A novel morphometric analysis of damage patterns on percussive tools*, «PLoS ONE», 9, 11, 1-18 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113856>).
- CHACÓN M.G., DÉTROIT F., COUDENNEAU A., MONCEL M.-H. 2016, *Morphometric assessment of convergent tool technology and function during the Early Middle Palaeolithic: The case of Payre, France*, «PLoS ONE», 11, 5, e0155316 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155316>).
- CLARKSON C. 2013, *Measuring core reduction using 3D flake scar density: A test case of changing core reduction at Klasies River Mouth, South Africa*, «Journal of Archaeological Science», 40, 12, 4348-4357 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.06.007>).
- CLARKSON C., HISCOCK P. 2011, *Estimating original flake mass from 3D scans of platform area*, «Journal of Archaeological Science», 38, 5, 1062-1068 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.12.001>).
- DAVIS L.G., BEAN D.W., NYERS A.J., BRAUNER D.R. 2015, *Glimr: A Gis-based method for the geometric morphometric analysis of artifacts*, «Lithic Technology», 40, 3, 199-217 (<https://doi.org/10.1179/2051618515y.0000000007>).
- DELPIANO D., COCILOVA A., ZANGROSSI F., PERESANI M. 2019, *Potentialities of the virtual analysis of lithic refitting: Case studies from the Middle and Upper Paleolithic*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 11, 4467-4489 (<https://doi.org/10.1007/s12520-019-00779-7>).
- DELPIANO D., GENNAI J., PERESANI M. 2021, *Techno-functional implication on the production of Discoid and Levallois backed implements*, «Lithic Technology», 46, 1, 1-21 (<https://doi.org/10.1080/01977261.2021.1886487>).
- DELPIANO D., PERESANI M. 2017, *Exploring Neanderthal skills and lithic economy. The implication of a refitted Discoid reduction sequence reconstructed using 3D virtual analysis*, «Comptes Rendus Palevol», 16, 8, 865-877 (<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2017.06.008>).
- DELPIANO D., PERESANI M., PASTOORS A. 2017, *The contribution of 3D visual technology to the study of Palaeolithic knapped stones based on refitting*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 4, 28-38 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.02.002>).
- DELPIANO D., UTHMEIER T. 2020, *Techno-functional and 3D shape analysis applied for investigating the variability of backed tools in the Late Middle Paleolithic of Central Europe*, «PLoS ONE», 15, 1-55 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236548>).
- DRYDEN I.L., MARDIA K.V. 1992, *Size and shape analysis of landmark data*, «Biometrika», 79, 1, 57-68 (<https://doi.org/10.1093/biomet/79.1.57>).
- GINGERICH J.A.M., SHOLTS S.B., WÄRMLÄNDER S.K.T.S., STANFORD D. 2014, *Fluted point manufacture in eastern North America: An assessment of form and technology using traditional metrics and 3D digital morphometrics*, «World Archaeology», 46, 1, 101-122 (<https://doi.org/10.1080/00438243.2014.892437>).
- GRÖNING F., KEGLER J.F., WENIGER G.C. 2007, *The digital world of Neanderthals - NESPOS, an online archive for Neanderthal research*, «Archaeologisches Korrespondenzblatt», 37, 3, 321-333.
- GROSMAN L., GOLDSMITH Y., SMILANSKY U. 2011a, *Morphological analysis of Nahal Zihor handaxes: A chronological perspective*, «PaleoAnthropology», 203-215 (<https://doi.org/10.4207/PA.2011.ART53>).

- GROSMAN L., KARASIK A., HARUSH O., SMILANKSY U. 2014, *Archaeology in three dimensions*, «Journal of Eastern Mediterranean Archaeology, Heritage Studies», 2, 1, 48 (<https://doi.org/10.5325/jeasmedarcherstu.2.1.0048>).
- GROSMAN L., SHARON G., GOLDMAN-NEUMAN T., SMIKT O., SMILANSKY U. 2011b, *Studying post depositional damage on Acheulian bifaces using 3-D scanning*, «Journal of Human Evolution», 60, 4, 398-406 (<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.02.004>).
- GROSMAN L., SMIKT O., SMILANSKY U. 2008, *On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts*, «Journal of Archaeological Science», 35, 12, 3101-3110 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.011>).
- HERZLINGER G., GOREN-INBAR N. 2020, *Beyond a Cutting Edge: A morpho-technological analysis of Acheulian handaxes and cleavers from Gesher Benot Ya'aqov, Israel*, «Journal of Paleolithic Archaeology», 3, 1, 33-58 (<https://doi.org/10.1007/s41982-019-00033-5>).
- HERZLINGER G., GOREN-INBAR N., GROSMAN L. 2017, *A new method for 3D geometric morphometric shape analysis: The case study of handaxe knapping skill*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 14, 163-173 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.013>).
- HERZLINGER G., GROSMAN L. 2018, *AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts*, «PLoS ONE», 13, 11, 1-17 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207890>).
- LIN S.C.H., DOUGLASS M.J., HOLDAWAY S.J., FLOYD B. 2010, *The application of 3D laser scanning technology to the assessment of ordinal and mechanical cortex quantification in lithic analysis*, «Journal of Archaeological Science», 37, 4, 694-702 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.030>).
- LORIOU B., FOUGEROLLE Y., SESTIER C., SEULIN R. 2007, *3D acquisition and modeling for flint artefacts analysis*, in C. FOTAKIS, L. PEZZATI, R. SALIMBENI, *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 6618 (<https://doi.org/10.1117/12.746775>).
- LYCETT S.J., VON CRAMON-TAUBADEL N., FOLEY R.A. 2006, *A crossbeam co-ordinate caliper for the morphometric analysis of lithic nuclei: A description, test and empirical examples of application*, «Journal of Archaeological Science», 33, 6, 847-861 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.014>).
- MAGNANI M., DOUGLASS M., PORTER S.T. 2016, *Closing the seams: Resolving frequently encountered issues in photogrammetric modelling*, «Antiquity», 90, 354, 1654-1669 (<https://doi.org/10.15184/aqy.2016.211>).
- MALONEY T.R. 2020, *Experimental and archaeological testing with 3D laser scanning reveals the limits of I/TMC as a reduction index for global scraper and point studies*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 29, 102968 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102068>).
- MORALES J.I., LORENZO C., VERGÈS J.M. 2015, *Measuring retouch intensity in lithic tools: A new proposal using 3D scan data*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 22, 2, 543-558 (<https://doi.org/10.1007/s10816-013-9189-0>).
- OLSON B.R., GORDON J.M., RUNNELS C., CHOMYSZAK S. 2014, *Experimental three-dimensional printing of a Lower Palaeolithic handaxe: An assessment of the technology and analytical value*, «Lithic Technology», 39, 3, 162-172 (<https://doi.org/10.1179/2051618514Y.0000000004>).
- PASTOORS A., WENIGER G. 2011, *Graphical documentation of lithic artefacts: Traditional hand craft versus 3-D mechanical recording*, in R. MACCHIARELLI, G. WENIGER (eds.), *Pleistocene Databases: Acquisition, Storing, Sharing*, Mettmann, Wissenschaftliche Schriften des Neanderthal Museum, 9-17.
- POP C.M. 2019, *Lithics3D*, v0.4.2, A (<https://Github.Com/Cornelmpop/Lithics3D>).
- PORTER S.T., ROUSSEL M., SORESSI M. 2016, *A simple photogrammetry rig for the reliable creation of 3D artifact models in the field. Lithic examples from the Early Upper Paleolithic*, «Advances in Archaeological Practices», 4, 1, 71-86 (<https://doi.org/10.7183/2326-3768.4.1.71>).

- PORTER S.T., ROUSSEL M., SORESSI M. 2019, *A comparison of Châtelperronian and Protoaurignacian core technology using data derived from 3D models*, «Journal of Computer Applications in Archaeology», 2, 1, 41-55 (<https://doi.org/10.5334/jcaa.17>).
- RANHORN K.L., BRAUN D.R., BIERMANN GÜRBÜZ R.E., GREINER E., WAWRZYŃIAK D., BROOKS A.S. 2019, *Evaluating prepared core assemblages with three-dimensional methods: A case study from the Middle Paleolithic at Skhül (Israel)*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 11, 7, 3225-3238 (<https://doi.org/10.1007/s12520-018-0746-z>).
- RICHARDSON E., GROSMAN L., SMILANSKY U., WERMAN M. 2014, *Extracting scar and ridge features from 3D-scanned lithic artifacts*, in *Archaeology in the Digital Era. Papers from the 40<sup>th</sup> Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Amsterdam, Amsterdam University Press, 83-92.
- RIEL-SALVATORE J., BAE M., MCCARTNEY P., RAZDAN A. 2002, *Palaeolithic archaeology and 3D visualization technology: Recent developments*, «Antiquity», 79, 294, 929-930 (<https://doi.org/10.1017/s0003598x00091614>).
- SCHURMANS U., RAZDAN A., SIMON A., MCCARTNEY P., MARZKE M., VAN ALFEN D., JONES G., ROWE J., FARIN G., COLLINS D., ZHU M., LIU D., BAE M. 2002, *Advances in geometric modeling and feature extraction on pots, rocks and bones for representation and query via the Internet*, in *Archaeological Informatics - Pushing the Envelope CAA 2001, Proceedings of the 29<sup>th</sup> Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR Int. Series 1016, Oxford, Archaeopress, 191-204.
- SHOLTS S.B., STANFORD D.J., FLORES L.M., WÄRMLÄNDER S.K.T.S. 2012, *Flake scar patterns of Clovis points analyzed with a new digital morphometrics approach: Evidence for direct transmission of technological knowledge across early North America*, «Journal of Archaeological Science», 39, 9, 3018-3026 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.04.049>).
- SHOTT M. 2014, *Digitizing archaeology: A subtle revolution in analysis*, «World Archaeology», 46, 1, 1-9 (<https://doi.org/10.1080/00438243.2013.879046>).
- SHOTT M.J., TRAIL B.W. 2010, *Exploring new approaches to lithic analysis: Laser scanning and geometric morphometrics*, «Lithic Technology», 35, 2, 195-220 (<https://doi.org/10.1080/01977261.2010.11721090>).
- SLIZEWSKI A., SEMAL P. 2009, *Experiences with low and high cost 3D surface scanner*, «Quartär», 56, 131-138.
- SUMNER T., RIDDLE A. 2008, *Virtual Paleolithic: Assays in photogrammetric three-dimensional artifact modelling*, «PaleoAnthropology», 158-169.
- THULMAN D.K. 2012, *Discriminating Paleoindian point types from Florida using landmark geometric morphometrics*, «Journal of Archaeological Science», 39, 5, 1599-1607 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.01.004>).
- VALLETTA F., SMILANSKY U., GORING-MORRIS A.N., GROSMAN L. 2020, *On measuring the mean edge angle of lithic tools based on 3-D models. A case study from the southern Levantine Epipalaeolithic*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 12, 2 (<https://doi.org/10.1007/s12520-019-00954-w>).
- WARD I., SALVEMINI F., VETH P. 2016, *3D visualisation and dating of an embedded chert artefact from Barrow Island*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 7, 432-436 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.05.023>).
- WEISS M., LAUER T., WIMMER R., POP C.M. 2018, *The variability of the Keilmesser-Concept: A case study from Central Germany*, «Journal of Paleolithic Archaeology», 1, 3, 202-246 (<https://doi.org/10.1007/s41982-018-0013-y>).
- YANG X., MATSUYAMA K., KONNO K. 2016, *A new method of refitting mixture lithic materials by geometric matching of flake surfaces. 1 Introduction*, «The Journal of the Society for Art and Science», 15, 4, 167-176.
- YEZZI-WOODLEY K., CALDER J., OLVER P.J., CODY P., HUFFSTUTLER T., TERWILLIGER A., MELTON A., TAPPEN M., COIL R., TOSTEVIN G. 2020, *The virtual goniometer: A new method for measuring angles on 3D models of fragmentary bone and lithics*, arXiv:2011.04898.

ZANGROSSI F., DELPIANO D., COCILOVA A., FERRARI F., BALZANI M., PERESANI M. 2019, *3D visual technology applied for the reconstruction of a Paleolithic workshop*, «Journal of Archaeological Science Reports», 28, 102045 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102045>).

#### ABSTRACT

In the past few years, the application of digital techniques to archaeology has strongly increased, including 3D recording of lithic artefacts for purposes of documentation and analysis. In this paper, the main acquisition techniques are reviewed focusing on their application to lithics, and on the cost-benefit analysis which largely depends on the research objectives. The introduction of the main functions of the virtual approaches to lithics comes from the new possibilities offered in the area of graphic documentation. In fact, 3D models could gradually replace the archaeological drawing thanks to the data objectivity and to the ability to undergo remote analysis. Indeed, in virtual models complex metric data and technological information are easily recorded. Furthermore, 3D models allow the application of quantitative and statistical analysis for different aims, such as reduction intensity estimation and geometric morphometrics, especially thanks to the landmark-based approach. All these potentials have been already explored in recent years, some of them have produced a considerable number of publications. However, this diversification needs the sharing of Open Data protocols in order to evaluate the methods, as well as the application of integrated approaches. Some examples of integration between traditional and 3D analyses derive from traceology and refitting studies, where the virtual tool is not considered as replacing but complementary. Finally, the options in the fields of data storage and cataloguing have been addressed, besides the free circulation of 3D models for academic and museological purposes, including 3D printing.

## ARCHAEOLOGICAL SURVEY OF THE WESTERN BOUNDARY STRIP OF IRAN THROUGH USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

### 1. INTRODUCTION

Remote sensing has a long history in archaeology (LUO *et al.* 2019; DAVIS, DOUGLASS 2020). In the last 20 years, along with big data and information and communication technologies, remote sensing has radically changed the current cultural heritage perspectives and future prospects (LASAPONARA, MASINI 2020). Remote sensing offers an effective mean to increase survey areas and discovery of new cultural deposits (DAVIS *et al.* 2019; TRIER *et al.* 2019). Many studies (DAVIS, DOUGLASS 2020) illustrate the great potential of this approach to expand our understanding of the archaeological record at the landscape scale and, consequently, the different social, economic and political processes.

Paying less attention to make use of aerial and spaceborne technologies makes it more likely that Iran's archaeological sites and cultural landscapes will be soon permanently lost. With today's impending critical threatening crisis, it is imperative to learn all that we can from these sites before they disappear.

The widespread use of such methods would allow Iranian archaeologists to investigate settlement distributional patterns and landscape use in multiple temporal contexts at extraordinary speeds. Remote sensing instruments provide the ability to survey large geographic areas much faster than traditional approaches, as has been demonstrated by many studies throughout the world (see e.g. ZANNI, ROSA 2019).

We argue that these latest trends in remote sensing can offer a cost-effective solution for addressing the issue of systematic broad scale survey in Iran by reducing the amount of time required to investigate landscapes, thereby improving our overall understanding of landscape level phenomena throughout the region's history.

The study area is located in the western border line of Iran on the Zagros Mountains which is one of the longest and widest mountain ranges in the country; the significant part of Iran's water is being supplied from the Zagros Area. By conducting the 360-kilometer construction project for water transfer as well as the creation of several dams, canals, gigantic tunnels for the irrigation of the central part of the Zagros Mountains, it was required a thorough archaeological study aiming to document and record the monuments along with locating the settlement sites on the way to the project path. The security condition of the area for the implementation of the project, war



remains as well as minefields in the border area between Iran and Iraq resulted in a great deal of hard challenges in the process of comprehensive pedestrian surveys. Due to the difficulty in the project implementation conditions, it was necessary to apply remote sensing methods in the area. The main target of the satellite survey is to identify the settlement sites without a large presence of archaeologists in the area.

Analysis of satellite imagery, along with predictive modeling, appears a promising way to bypass these issues, further capturing sites that may have been otherwise difficult to detect (KLEHM *et al.* 2019).

In this study, the detection of ancient sites is based on the identification of their internal and external characteristics. Some internal characteristics are site dependent and are directly linked to archaeological features. They include: the differences in soil moisture; soil color; the texture and density of ancient soil; regular geometric shapes; the difference of plants covers; soil chemistry; thermal anomalies of ancient soil; the differences in soil conductivity; composition; magnetic fields; organic materials; subsurface anomalies; shadow signs; stone signs; soil signs; topography; plowing signs; the difference in special plant species related to ancient sites; the density of some elements in ancient soils; signs of human and animal destruction of ancient sites' surface. Some others are site independent, namely, linked to environmental or social characteristics, and are termed here as external characteristics such as slope, direction of slope; distance from other sites; distance from ancient routes; relief; aspect; the geomorphology processes; soil type; altitude above sea level; vegetable coverage of the region; distance to water; proximity to food source; average of wind speed and so on. Knowledge of the environmental variables influencing activities of original inhabitants is used to produce GIS layers representing the spatial distribution of those variables. The GIS layers are then analyzed to identify locations where combinations of environmental variables match patterns observed at known sites.

The Central Zagros Archaeological Project (CZAP) was started to achieve a series of best practices to detect ancient sites without the physical presence of the archaeologists in the survey area and this approach has been completed in succeeding research steps. We look to contribute to a new methodological approach to this research paradigm, especially for recognition of small hinterland sites located in challenging environments, and to identify new questions that this approach helps to raise. As traditional pedestrian surveys favor sites with easy access, reduced vegetation cover and conspicuous above-ground features, archaeologists can use remote sensing methods to improve archaeological surveys. The focus of the present study is the observation of the earth through sensors installed on the satellites since many minefields are still existing in the area and make impossible the routine pedestrian surveying.

The identification of settlement sites through the predictive model as well as the observation and process of digital images have been conducted by using

ENVI GIS software. However, until now the visual interpretation is still the main technique in analyzing changes from these images (KRAUB, TIAN 2020).

## 2. THE STUDY AREA AND THE SEGMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL LANDSCAPE

The long history of Zagros region of western Iran, which is a key area in the human life development, has long been a focus in the archaeological research. It is of great importance for archaeologists, who since the beginning of the 19<sup>th</sup> century have been seeking to find the major development of human history from the beginning of plant and animal husbandry to the formation of early states which have been followed by the great political changes to evolve local powers (see HOLE 1987 and references therein). In the Zagros region, even if a large number of archaeological researches especially in the course of site identification were carried out, the present research using remote sensing techniques represents the first challenge to deal with the site detection procedures.

The first aerial archaeological studies in Iran were conducted by Erich Schmidt in 1935, when aerial archaeology was not yet so widespread (SCHMIDT 1940). Schmidt's photos were extremely significant in the history of photography; moreover, his aerial and historical photography was a very important action to detect most of the unknown sites in Iran. The use of historical aerial photographs in recording archaeological sites worldwide has continued to the present day (STOTT *et al.* 2018). Unfortunately, although aerial archaeology has a long history in Iran, it has not remarkably advanced recently due to lack of support of research plans and archaeologists' training in the fields of remote sensing and GIS, and aerial projects have not continued. Archaeological prospection through remote sensing offers a practical and economical mean to detect and characterize different types of archaeological sites, over traditional field walking survey methods (THABENG *et al.* 2019). Concerning the history of archaeological field surveys of the Zagros Region, which goes back to the activities of Professor Robert John Braidwood (BRAIDWOOD 1960), the present study can be considered the first satellite remote sensing-based archaeological project of the region in dealing with detecting ancient sites.

The study area is located in the central part of the Zagros Mountain Range, within the boundary strip between Iran and Iraq with geographical longitude and latitude 34°49'55.36"N, 45°50'31.91"E (Fig. 1). The region receives precipitation from westerly disturbances and is mainly affected by the Mediterranean climate (MOSTOFI 1965). In the central Zagros, precipitation usually falls over a period of 8 months, from October to May, whereas there is no effective precipitation in other months. The tree stands are generally open with crown coverage of ca. 10 m, such that the possible effects of competition among trees are very low. The dominant species are oaks, intermixed



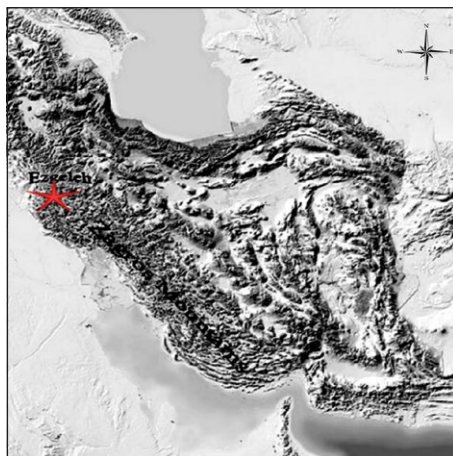


Fig. 1 – Map of Iran and location of the area under study.

with other species such as *Crataegus*, *Pistacia* and *Amygdalus* (ARSALANI *et al.* 2014). Growing season begins in April and the late wood of the trees completes in September. Due to the Zagros geological formations, the soils of the region are generally shallow and very rocky (MOGHIMI 2010). Since there are different geological structures in mountainous areas, it is difficult to detect ancient sites thanks to aerial survey.

Analyzing is a hard task in mountainous areas due to the fact that the abundance of minerals causes satellite images to show different reflections of the electromagnetic spectrum.

There are also other problems in identifying the ancient sites in mountainous areas, including surface topography, erosion, fault, avalanche, and landslide, which can disrupt/disturb ancient sites. In addition to environmental problems in the area, the identification of ancient sites from the space completely depends on the understanding of processes that affected and changed the landscape characteristics to be differentiated from modern ones. The existence of trenches, canals, areas evacuated from mines, levees and desert garrisons has caused such disturbances during the war between Iran and Iraq and the distinction between ancient mountainous routes and communication networks in the time of war has been impossible. Moreover, agricultural exploitation in this area has spoiled most of ancient sites' characteristics.

Therefore, the identification of settlement sites in satellite survey depends on image type, size of buried remnants and conditions of ancient sites' surface, land characteristics, lighting conditions (LASAPONARA, MASINI 2012), as well as environmental and human conditions in the area.

### 3. METHODS

The choice of the techniques to be used depends on the aims of the investigation and on what the archaeologist expects from remote sensing images (MASINI, LASAPONARA 2017). In this study, all characteristics of the ancient sites were investigated. Anomalies on the surface of settlement sites as the internal characteristics and their spatial (environmental and social) features as the external characteristics were also explored.

At the first stage of this project, as for regular aerial survey, a grid was superimposed on the survey path in the very high-resolution satellite image (Fig. 2).

Due to the different nature of ancient sites characteristics as well as the mountainous landscape of the area under study, in addition to the use of images with extremely high resolution, hyperspectral, thermal, infrared and radar images were required to be applied (Tab. 1). Also, ArcGIS and ENVI software were used to identify spectrally unique surface features that discriminate sites from surrounding areas (KLEHM *et al.* 2019). The data of each satellite image were recorded in separate layers and images which contained information of internal characteristics overlapped, while locations which had at least three internal characteristics were selected.

In the second research stage, the predictive model (see below) was determined on effective parameters (environmental and cultural), and locations that had a strong possibility for the presence of ancient sites were selected (MASINI, LASAPONARA 2017). Finally, identified locations on the satellite images were integrated with identified locations in the predictive model. As a result, locations that had a series of internal and external characteristics were assumed to have been archaeological sites regardless of their chronologies. Finally, to assess the validity of the identified points in the aerial survey, the shortest distance was chosen to visit the points.

Spatial resolution is another key consideration in the detection of small buried structures. TerraSAR-X dependably acquires high-resolution and wide-area radar images, regardless of the climatic conditions. The satellite provides a unique geometric accuracy that is unmatched by any other spaceborne sensor

CHARACTERISTICS	SATELLITE	
(PAN+8MS+8SWIR.12 CAVIS Bands.0.31m)	WorldView-3	1
(3MS+6SWIR+5TIR.10m)	ASTER	2
(X-band wavelength 31 mm, frequency 9.6 GHz 0.25 m)	TERRASAR-X	3
(13MS+3SWIR.10m)	Sentinel-2A	4
(PAN+6MS+3SWIR.30m)	Hyperion/EO-1	5
(PAN+6MS+2SWIR+2TIR.15m)	LANDSAT 8	6
(PAN= 10m)	CORONA	7
(PAN+4MS+SWIR.1.5m)	Spot-6	8

Tab. 1 – Satellite images used in the project.

(X-band wavelength 31 mm, frequency 9.6 GHz 0.25 m). The subsurface imaging potential of SAR has been exploited for archaeological prospection in multiple desert environments in Africa, Asia, North and South America (STEWART *et al.* 2018). Given that there is a greater choice of VHR sensors operating at shorter wavelengths, some attempts have been made to use short wave (X-band) spaceborne SAR for archaeological prospection in mountainous regions. However, prospection was conducted less through surface penetration, and more through exploitation of the SAR sensitivity to subtle surface roughness variations caused by traces of archaeological structures.

The image of SAR was also used for detecting conductive differences as well as the magnetic field of ancient sites' soil. WorldView-3 is the first multi-payload, super-spectral, high-resolution commercial satellite sensor operating at an altitude of 617 km. WorldView-3 satellite provides 31 cm panchromatic resolution, 1.24 m multispectral resolution, 3.7 m short wave infrared resolution (SWIR) and 30 m CAVIS (Clouds, Aerosols, Vapors, Ice, and Snow) resolution. The satellite has an average revisit time of <1 day and is capable of covering up to 680,000 km<sup>2</sup> per day. The data of the WorldView images were considered as the basis for detecting most of subtle characteristics of ancient sites in this survey. SPOT-6 is an optical imaging satellite capable of imaging the Earth with a resolution of 1.5 m panchromatic and 6 m multispectral (blue, green, red, near-IR). The SPOT-6 images were used in the regions where it was not necessary to use the WorldView costly images.

The ASTER satellite images, which have high spectral power, are extensively used, especially in geology and in separating alterations which are considered as the most important characteristics of mineralization in different ways. Two visible bands, a near infrared band, six short infrared bands and five thermal bands of ASTER images provide the possibility of distinguishing epithermal clays, iron oxides, silica, carbonates, mafic rocks and prophyllactic alterations in mountainous areas. The data of ASTER are effective for detecting thermal anomaly and identifying ancient soils. The Hyperion hyperspectral sensor collects 220 unique spectral channels ranging from 0.357 to 2.576  $\mu\text{m}$  with a 10 nm bandwidth. The instrument operates in a push broom fashion, with a spatial resolution of 30 m for all bands. The significant advantage of this sensor over multispectral instruments is its narrow contiguous bands, which provide detailed spectra to distinguish different target materials and quantify their constituents (KHURSHID *et al.* 2006).

For this purpose, data from this sensor have been applied in the areas of agriculture, archaeology, forestry, geology, and environmental monitoring to extract an enhanced level of information. Integrating the images of ASTER and Hyperion allows identifying difference in the color of ancient soils. With the significant improvement in spectral resolution comes the need to have accurate image processing.

#### 4. PROXY INDICATORS: GENERALITIES

##### 4.1 *Internal characteristics of ancient sites*

The proxy indicators are the result of physical and chemical interaction between archaeological remains and their surroundings that can produce changes in moisture content, soil nutrients and vegetation growth visible from above (MASINI, LASAPONARA 2017), in such a way the soil over ancient sites results different from the surrounding soils in terms of various characteristics. The presence of structures, buried holes and ancient remnants disrupts the natural physical order of the soil and creates disassociations in sub-surface that affect the surface visible soils. The most important differences which we could observe and record (as shown in Figs. 2-4) match with those experienced by some scholars. For example, the differences in soil moisture (KEMPF 2019), soil color (MASINI, LASAPONARA 2017), texture and density, soil chemistry (TILTON *et al.* 2013), and so on. In this study, to detect the archaeological sites of the Zagros Region, each of these characteristics was traced on the satellite images. To better understand the different nature of sites' internal anomalies, Figs. 2-4 show the recorded examples of sites internal characteristics of the Zagros Region in various kinds of satellite images.

##### 4.2 *External characteristics of archaeological sites*

In addition to the internal characteristics mentioned above, there are important regulations and signs which can help to investigate ancient sites concerning their surrounding environment. Prediction models aim at identifying the presence of archaeological sites on the basis of observed patterns and on the assumptions about human behaviors that have functioned within the environmental and geographical contexts. These models assume that individuals settled areas with the best overall suitability (with regards to available resources) and that, as population density and resource consumption increase, settlements shift to areas with lower resource suitability (DAVIS, DOUGLASS *et al.* 2020). Such modeling approaches have proven useful in exploring the rationale behind observed phenomena in anthropology, including archaeological evidence of behavior and choice (ROBINSON *et al.* 2019). In this section, spatial characteristics (environmental and cultural) of ancient sites were used as external characteristics influencing the location of the sites (KLEHM *et al.* 2019) in the predictive model databases.

There is a handful of relevant literature that defines prerequisite conditions for human occupational locations. In the same way, the maps provided show manipulation standards for the preferences of places where the inhabitants set up their lives. Most of the ancient sites in the Zagros areas have been formed in close proximity to current settlements and are located in the closest distance



Fig. 2 – Difference in soil color. Image: 2019 Hyperion/EO-SWIR 10m.



Fig. 3 – Difference in the texture and density of ancient soil Image: WorldView-3. SWIR.



Fig. 4 – Difference in soil chemistry. Image: TERRA-SAR X, 0.25 m.

from communication routes. Human settlements are mostly located in slopes ranging from 5 to 10 percent. Most of the sites have a northern aspect to catch directly the sun light. Other maps also show the factors contributing to the human decisions for the selection of suitable locations, i.e. wind direction, land elevation, water sources, vegetal coverage of the area. There have been also variables that seem to affect human decisions in the selection of settlement locations, for instance vegetation diversity, index of productivity of agricultural lands, variation in climatic conditions, irrigation system and water canals environmental anomalies and many others (BRANDON, BURGETT 2005; PARCAK 2009; GIARDINO 2012; STEWART *et al.* 2018).

All these variables were taken into account as factors affecting settlement selection processes which can be used in the development of prediction modeling.

## 5. RESULTS AND DISCUSSION

Challenges related to finding, access, or physical conditions of the environment often make extensive surveys impractical. Photography often allows buried archaeological remains to be detected through small changes in relief or discoloration of overlying soils or crops and allows large areas to be surveyed within short time scales (LUO *et al.* 2019). Reducing labor, time, and, ultimately, money spent on investigating a study area makes remote sensing a particularly attractive complement to traditional field work (KLEHM *et al.* 2019). According to the results, all settlements have general internal and external characteristics acting as proxy indicators for the identification of archaeological sites in this study. The detection of a series of these characteristics within a designated area will lead to the discovery of settlement sites. Hence, three methods were applied to identify their location.

### 5.1 *Identification with satellite images*

Due to the different nature and features of settlement sites characteristics, the interpretation of distinct anomalies could be improved exploiting radiometric, spectral and temporal resolutions of images acquired from airborne and spaceborne platforms (LUO *et al.* 2019). Hyperspectral remote sensing could detect and identify weak spectrum differences of ground objects (KELONG *et al.* 2008; YU *et al.* 2018; KEMPF 2019). This research demonstrates that hyperspectral remote sensing is effective for archaeology even when no ground remnants or other traces are found. These differences influence light absorption and reflection as well as thermal shine and radiance and they can be detected in the satellite images, whereas archaeologists are visually unable to detect them on the earth (GUPTA *et al.* 2019). This feature allows archaeologists to detect subtle environmental changes in such a way that they can even discover subsurface remnants (OSICKI 2000).



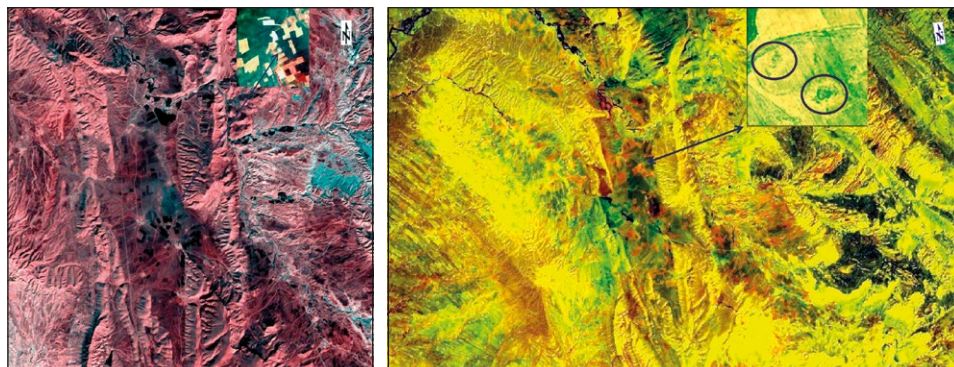


Fig. 5 – a) ASTER, Hyperion/EO-1; identification of points based on the differences in soil color in the integration of images; b) WorldView-3 SWIR, identification of positive and negative signs of vegetal coverage.

Overall, 773 locations were identified based on each one of the internal characteristics (Fig. 5). Despite the extensive application of remote sensing in archaeological research, there are still some issues limiting the more accurate and effective detection of archaeological targets (YU *et al.* 2018). There were two main challenges in this satellite survey. First, weakness of satellite images data; therefore, in the ASTER image of the thermal band only larger settlement sites could be identified. Moreover, hyperspectral images with very high spatial resolution are required to identify the characteristics of ancient sites, but there is not such a possibility in the latest images WorldView-4.

The second challenge concerns the issue that ancient sites show different characteristics in satellite equal images. For example, in infrared WorldView-3 images, some sites show differences in vegetal growth. Moreover, there is a similarity between environmental features and ancient characteristics; for example, it is very difficult to distinguish between the color of ancient soil and mineral soils. In addition, when the physical interaction between anthropic transformations of cultural interest (buried walls, ditches, pits, etc.) is not evident through vegetation and moisture content changes, one cannot rely only on optical remote sensing for detecting archaeological features. In such cases, passive data should be integrated with other kinds of earth observation technologies including the active ones, such as LiDAR and SAR, especially where the microtopography is a valuable archaeological proxy indicator. Further opportunities to improve the knowledge could be provided by integrating remote sensing with geophysics (MASINI, LASAPONARA 2017).

Therefore, in the satellite survey, it is not possible to trust one feature of satellite images (such as very high resolution, hyperspectral, or thermal)



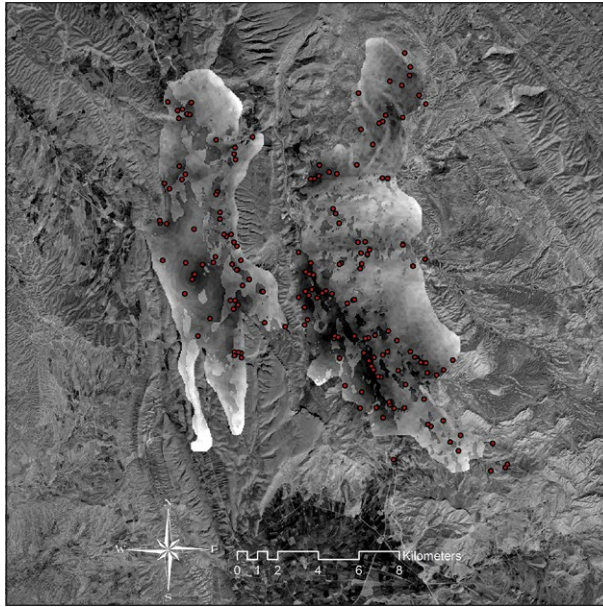


Fig. 6 – Overlapping at least three internal signs and selecting 159 locations seeming to be archaeological sites.

or a particular characteristic of the archaeological site (such as soil signs, vegetation, or soil color).

Data fusion can further enhance the weak marks linked to archaeological deposits. As a result, the data of each satellite image, overlapped to increase the possibility of settlement site presence and locations, which incorporated at least three internal characteristics were selected. Therefore, from among 773 identified locations, 159 points with three internal signs remained (Fig. 6).

### 5.2 Identification with the predictive model

Spatial approaches have a deep history in archaeology where researchers have long been concerned with the location and measurement of artifacts, sites, and cultural and natural features, as well as the relations between them (KLEHM, GOKEE 2020). We presented a methodology to create an Archaeological Predictive Model that can indicate areas with high potential for hosting archaeological sites. In this study, the Archaeological Predictive Model was used to predict archaeological site locations, based on the observed patterns and assumptions about the human behavior and it was constructed through the combination of GIS tools, remote sensing data, and archaeological data (NSANZIYERA *et al.* 2018). The selection of parameters depends on many

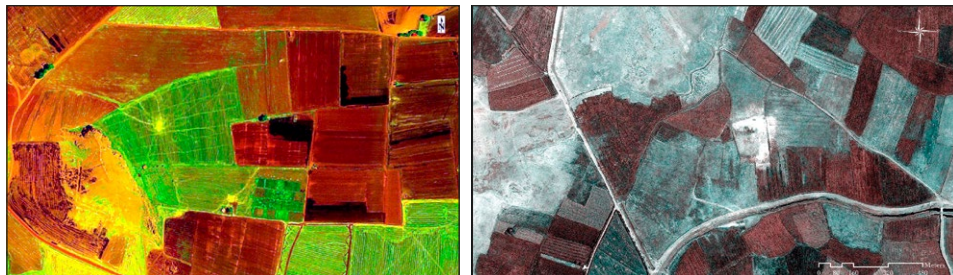


Fig. 7 – a) CORONA, WorldView-3 + 2019; NIR images, the routes for commuting the ancient site; b) CORONA, WorldView-3 + 2019; SWIR images of the ancient river route.

factors; of course, different cultures, locations, and historical periods require different approaches. Studies of settlement sites' location have mostly investigated environmental factors in locating ancient sites, but most of them emphasized the importance of cultural landscape.

Most modeling studies have examined environmental patterning exhibited by archaeological site locations (BRANDT *et al.* 1992), but many have also emphasized the importance of a cultural landscape (TILTON *et al.* 2013). It is a crucial question for anthropologists and archaeologists how humans interacted with the landscape around them in the past. To answer this question, the satellites provide a very different landscape of such interactions (PARCAK 2009).

Today, predictive models are generally regarded as useful tools for archaeological research. They can constitute an important decision support system providing useful information for defining survey priority and facilitating new site discovery, saving time and money, especially in the large areas (MASINI, LASAPONARA 2017).

Archaeological predictive modeling is a remote sensing analytical technique in which the locations of archaeological sites are predicted either through observed or deduced patterns (KLEHM *et al.* 2019, 69). The premise behind modeling is that prehistoric and historic peoples were closely tied to their natural and cultural environment and that these environments were a significant determinant in their choice of site location (NSANZIYERA *et al.* 2018). Our survey showed that the points incorporating settlement sites exhibited non-random trends, in such a way that there were similar trends and patterns between the location of ancient sites and external characteristics. External characteristics of settlements were entered in the GIS program as base information for the predictive modelling. A problem in the location of ancient sites is that not all data of external characteristics of an ancient site are available. For example, some of the characteristics (rivers and routes of ancient travels have disappeared

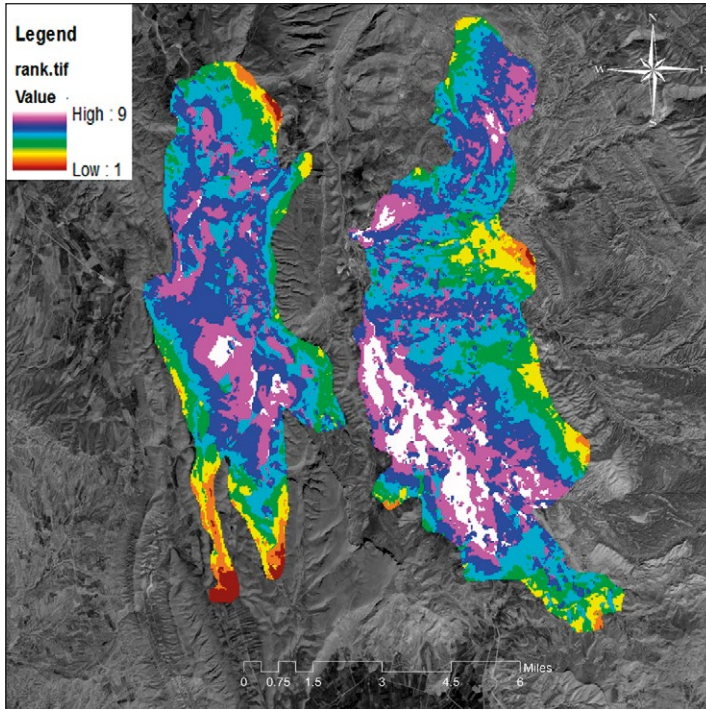


Fig. 8 – Ranking of external characteristics overlapping and identification of 186 points with the possibility of settlement site presence.

due to climatic changes and human modern activities. Accordingly, it is not possible to use all of the external data in the predictive model; therefore, the results of the predictive model may not be accurate.

The time series analysis of multi temporal aerial and satellite images has been shown to be useful and valuable in detecting changes in archaeological sites and discovering previously unknown archaeological features (YU *et al.* 2018).

Some characteristics of the archaeological sites could not be tracked in the new satellite images. Therefore, in this investigation, the time series analysis of the old images was performed, they were overlapped with the new ones, and a portion of the archaeological walking routes and rivers of the region was identified (Fig. 7).

Therefore, the relationship of these kinds of characteristics with the identified points was visually investigated with the satellite images. Based on the analysis of external characteristics of ancient sites, 186 locations with the most possibility of sites presence were predicted (Fig. 8).

### 5.3 Integration of satellite images data with the predictive model

In the identification of ancient sites' location, there are extra patterns which cannot be observed on the satellite images. Only the combined use of remote sensing techniques and GIS provides the possibility of full and effective utilization of data related to an ancient site.

159 points regarding their internal characteristic were identified as the archaeological sites in the satellite images, while on the basis of the external characteristic 186 points were identified by the prediction model applied. Points from both approaches were then overlapped in the GIS environment. As a result, 67 points that presented a series of internal and external characteristics were chosen to be the most likely archaeological sites. In order to validate the accuracy of the technique applied, a field walking project was made to see how and where physically the sites were exactly located. Through this project we found about 57 points on the ground matching with those identified before by satellite survey (Tab. 2). The 10 remaining sites may have been demolished after they were abandoned.

Name	Longitude	Latitude	Name	Longitude	Latitude
1	45.828275	34.69479722	31	45.83262689	34.68353825
2	45.72798333	34.74116111	32	45.81655833	34.75489167
3	45.84515	34.82901389	33	45.74435556	34.75883889
4	45.72038611	34.81074167	34	45.7403	34.77671944
5	45.72480556	34.8127	35	45.74232222	34.76868889
6	45.79173611	34.78325833	36	45.749175	34.72566944
7	45.842575	34.839075	37	45.74951389	34.70483333
8	45.75300556	34.70591944	38	45.75322778	34.70391944
9	45.75008705	34.72933402	39	45.79320833	34.78333889
10	45.78837222	34.74201389	40	45.8329	34.78328889
11	45.74553784	34.75791152	41	45.78798056	34.73322778
12	45.76013056	34.80217778	42	45.83076209	34.70563371
13	45.85375556	34.81625278	43	45.72374308	34.78580171
14	45.89605833	34.65538333	44	45.7408	34.77767222
15	45.70969167	34.76526667	45	45.78748056	34.71821389
16	45.74819167	34.75884444	46	45.89493333	34.65390833
17	45.72353611	34.74631944	47	45.88712548	34.65077521
18	45.73963889	34.74893056	48	45.83475833	34.65789444
19	45.83089578	34.75039576	49	45.85271944	34.74708611
20	45.76487222	34.733025	50	45.75181111	34.76230833
21	45.82976389	34.80949167	51	45.74966389	34.75530556
22	45.8033	34.76988611	52	45.75132778	34.75359167
23	45.80365556	34.71323333	53	45.71121667	34.74748333
24	45.80545002	34.7125893	54	45.75335278	34.74721111
25	45.79229506	34.74054671	55	45.72291111	34.73252778
26	45.72185407	34.7835022	56	45.76586389	34.71934444
27	45.78995556	34.73148333	57	45.87088333	34.66847778
30	45.74958889	34.70636944			

Tab. 2 – Identification of 57 archaeological site locations found by field walking project.

The result of this study shows that the integration of satellite images data kinds with the predictive model is effective on the identification of settlement sites which have no remnants and/or visible surface impacts. A challenge in the integration of satellite images data with the predictive model is that some identified points on the satellite images of an ancient site may not be identified in the predictive model. In contrast, there are some identified locations in the predictive model of ancient sites which were not shown in the satellite images. In further projects, we will try to find techniques of remote sensing so that in addition to the compensation of budget and time limitation of field surveys, archaeologists can accurately explore settlement sites without regional and border restrictions in a wide cultural environment.

## 6. CONCLUSIONS

In this work we present a methodology to detect sites susceptible of containing buried archaeological remains using remote sensing data. Three methods used in this study – comprising (1) identification of ancient site's location using satellite images; (2) identification of ancient site's location using predictive model and (3) integrating satellite images data with the prediction model – were successfully applied to identify ancient sites in the Zagros Mountain Range. By combining all methods of remote sensing (satellite, aerial, airborne geophysics), it is expected that ancient sites would be accurately detected, surveyed and protected without the presence of archaeologists in the field. These techniques offer great potential to increase our knowledge of the human past and help to record and protect cultural heritage that is at risk from anthropogenic and natural forces.

In most countries of the Middle East, looting and site destruction are evident. In Iran alone, if looting or other destructive processes will continue at the current rate, by 2040 many of the archaeological and historic sites will be affected. Other countries likely have similar challenges. It is interesting to note that projected 2040 forecast matches the known “tipping point” for global environmental destruction as well. Archaeologists have a primary responsibility to protect and preserve our shared heritage for future generations, but they cannot do it without using state-of-the-art technologies in an equally responsible way. With hundreds of thousands, if not millions, of undocumented archaeological sites across the globe, archaeologists now have sufficient tools and technologies available to detect and protect these sites, but not enough is being done. While the Iranian archaeology has a long history using aerial surveys, the most recent advances in aerial and spaceborne technology have been slow to break into research practices in the country. It is therefore necessary to increase the rate at which researchers document the archaeological record as many archaeological deposits in Iran are rapidly disappearing.



Archaeologists need to adopt remote sensing methods that can quickly and accurately record the increasingly threatened archaeological heritage in different parts of the country. The speed and accuracy attainable through remote sensing survey methods are essential for future archaeological research, as datasets continue to expand. However, it is also essential that training in remote sensing techniques become a featured component of archaeology programs throughout Iran and Iranian departments more broadly. Rigorous training is especially critical for the use of techniques involving machine learning and automated analysis. By incorporating remote sensing datasets into future studies, Iranian contributions will be enhanced with more complete datasets and greater geographic coverage of the diversity of Iran's human past. What we hope to achieve via remote sensing archaeology will be influenced by both the possibility of new technologies and the threats to archaeological sites.

The hope is that we can work fast enough to map and protect our ancient heritage and treasures before they disappear. Such an approach in archaeology can be considered as a revolution in current archaeological surveys. In the future, more specialized technologies will be applied in remote sensing; therefore, in addition to the identification and protection of ancient sites, the oldness of a site will be detected from the space.

### *Acknowledgements*

This research has been possible due to the grant (962141/00/1151) provided by Iranian Centre for Archaeological Research (ICAR). We would also like to express our gratitude to some officials and colleagues from ICAR; Mr. M. Beheshti has been exceptionally supportive, Mr. S. Sarlak and Dr. K. Roustaei whose interest and support have been very encouraging and helpful in the process of our research.

KAMAL ALDIN NIKNAMI\*  
HAYYAN JABARZADEH, MAHSA VAHABI

Department of Archaeology  
University of Tehran

kniknami@ut.ac.ir, hjabbarzadeh@ut.ac.ir, m.vahabi@ut.ac.ir

\* Corresponding author

### REFERENCES

- ARSALANI M., AZIZIA G., BRÄUNING A. 2014, *Dendroclimatic reconstruction of May-June maximum temperatures in the central Zagros Mountains, Western Iran*, «International Journal of Climatology», 35, 408-416.
- BRAIDWOOD R.J. 1960, *Seeking the world's first farmers in Persian Kurdistan: A full-scale investigation of prehistoric sites near Kermanshah*, «Illustrated London News», 237, 695-697.
- BRANDON T.C.R., BURGETT G.R. 2005, *GIS applications in archaeology: Method in search of theory*, in K.L. WESCOTT, J.R. BRANDON (eds.), *Practical applications of GIS for Archaeologists*, London, Taylor&Francis, 144-166.

- BRANDT R., GROENEWOUDT B.J., KVAMME K.L. 1992, *An experiment in archaeological site location: Modeling in the Netherlands using GIS techniques*, «World Archaeology», 24, 2, 261-282.
- DAVIS D.S., DOUGLASS K. 2020, *Aerial and spaceborne remote sensing in African archaeology: A review of current research and potential future avenues*, «African Archaeological Review», 37 (<https://doi.org/10.1007/s10437-020-09373-y>).
- DAVIS D.S., LIPO C.P., SANGER M.C. 2019, *A comparison of automated object extraction methods for mound and shell-ring identification in coastal South Carolina*, «Journal of Archaeological Science Reports», 23, 166-177.
- GIARDINO M.J. 2012, *NASA remote sensing and archaeology*, in R. LASAPONARA, N. MASINI (eds.), *Satellite Remote Sensing. A New Tool for Archaeology*, Berlin-Heidelberg, Springer, 157-176.
- GUPTA E., RAJANI M., MENON S. 2019, *Remote sensing investigation of the Buddhist archaeological landscape around Sannati, India*, «Journal of Archaeological Science Reports», 25, 294-307.
- HOLE F. 1987 (ed.), *Archaeology of Western Iran. Settlement and Society from Prehistory to the Islamic Conquest*, Smithsonian Institution Press.
- KELONG T., YUQING W., LIN Y., RIPING Z., WEI C., YAobao M. 2008, *A new archaeological remote sensing technology*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 37, 221-224.
- KEMPF M. 2019, *The application of GIS and satellite imagery in archaeological land-use reconstruction: A predictive model?*, «Journal of Archaeological Science Reports», 25, 116-128.
- KHURSHID K.S., STAENZ K., SUN L., NEVILLE R., WHITE H.P., BANNARI A., CHAMPAGNE C., HITCHCOCK R. 2006, *Preprocessing of EO-1 Hyperion data*, «Journal of Remote Sensing», 32, 2, 84-97.
- KLEHM C., BARNES A., FOLLETT F., SIMON K., KIAHTIPES C., MOTHULATSHIPI S. 2019, *Toward archaeological predictive modeling in the Bosutswe region of Botswana: Utilizing multispectral satellite imagery to conceptualize ancient landscapes*, «Journal of Anthropological Archaeology», 54, 68-83.
- KLEHM C., GOKEE C. 2020, *Geospatial analysis in African archaeology: Current theories, topics, and methods*, «African Archaeological Review», 37, 1-7.
- KRAUB T., TIAN J. 2020, *Automatic change detection from high-resolution satellite imagery*, in D.G. HADJIMITSIS *et al.* (eds.), *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Landscapes*, Cham, Springer, 47-58 ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-10979-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10979-0_4)).
- LASAPONARA R., MASINI N. 2012, *Remote sensing in archaeology: From visual data interpretation to digital data manipulation*, in R. LASAPONARA, N. MASINI (eds.), *Satellite Remote Sensing. A New Tool for Archaeology*, Berlin-Heidelberg, Springer, 1-16.
- LASAPONARA R., MASINI N. 2020, *Big earth data for cultural heritage in the Copernicus era*, in D.G. HADJIMITSIS *et al.* (eds.), *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Landscapes*, Cham, Springer, 31-46 ([https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-10979-0\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-10979-0_3)).
- LUO L., WANG X., GUO H., LASAPONARA R., ZONG X., MASINI N., WANG G., SHI P., KHATELI H., CHEN F., TARIQ S., SHAO J., BACHAGHA N., YANG R., YAO Y. 2019, *Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications: A review of the century (1907-2017)*, «Journal of Remote Sensing of Environment», 232 (<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111280>).
- MASINI N., LASAPONARA R. 2017, *Sensing the past from space: Approaches to site detection*, in N. MASINI, F. SOLDVIERI (eds.), *Sensing the Past from Artifact to Historical Site*, Springer, 23-60.
- MOGHIMI E. 2010, *Geomorphology of Iran*, Tehran, University of Tehran Press.
- MOSTOFI A. 1965, *Climatic Atlas of Iran*, Tehran, University of Tehran, Institute of Geography.



- NSANZIYERA A., LECHGAR H., FAL S., MAANAN M., SADDIQUI O., OUJAA A., RHINANE H. 2018, *Remote sensing data-based archaeological predictive model (APM) for archaeological site mapping in desert area, South Morocco*, «Comptes Rendus Geoscience», 350, 6 (<https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.06.010>).
- PARCAK S.H. 2009, *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, London, Taylor&Francis.
- ROBINSON E., ZAHID H.J., CODDING B.F., HAAS R., KELLY R.L. 2019, *Spatiotemporal dynamics of prehistoric human population growth: Radiocarbon dates as data and population ecology models*, «Journal of Archaeological Science», 101, 63-71 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.11.006>).
- OSICKI A. 2000, *A Review of Remote Sensing Application in Archaeological Research. Report for Geography Course*.
- SCHMIDT E.F. 1940, *Flights over Ancient Cities of Iran*, Chicago, University of Chicago Press.
- STEWART C., OREN E., COHEN-SASSON E. 2018, *Satellite remote sensing analysis of the Qasrawet archaeological site in North Sinai*, «Remote Sensing», 10, 1090 (<https://doi.org/10.3390/rs10071090>).
- STOTT D., KRISTIANSENA S., LICHTENBERGER A., RAJAC R. 2018, *Mapping an ancient city with a century of remotely sensed data*, «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», 115(24), E5450-E5458 (<https://www.pnas.org/content/115/24/E5450>).
- THABENG O.L., MERLO S., ADAM E. 2019, *High-resolution remote sensing and advanced classification techniques for the prospection of archaeological sites' markers: The case of dung deposits in the Shashi-Limpopo Confluence area (southern Africa)*, «Journal of Archaeological Science», 102, 48-60.
- TILTON J.C., COMER D.C., PRIDE C.E., SUSSMAN D., CHEN L. 2013, *Refinement of a method for identifying probable archaeological sites from remotely sensed data*, in D.C. COMER, M.J. HARROWER (eds.), *Mapping Archaeological Landscapes from Space*, Springer, 251-258.
- TRIER Ø.D., COWLEY D.C., WALDELAND A.U. 2019, *Using deep neural networks on airborne laser scanning data: Results from a case study of semi-automatic mapping of archaeological topography on Arran, Scotland*, «Archaeological Prospection», 26, 2, 165-175.
- YU L., ZHANG Y., NIE Y., ZHANG W., GAO H., BAI X., LIU F., HATEGKIMANA Y., ZHU J. 2018, *Improved detection of archaeological features using multi-source data in geographically diverse capital city sites*, «Journal of Cultural Heritage», 33, 145-158.

## ABSTRACT

A huge irrigation project is being conducted in the Iranian western border and satellite investigation of the area was initially performed in order to identify archaeological settlement sites before they were threatened by the so-called Garmsiri water project. Because of the diverse geography and the inherited critical war conditions such as mined lands, the investigation of ancient sites in this region is not easy; therefore, satellite-based methods can play an important role in the detection and documentation of archaeological sites. The main hypothesis of this study is that all settlements have internal and external characteristics allowing to detect the presence of archaeological sites. The identification of a series of these characteristics in a spatial area will lead to the discovery of archaeological sites. Three general methods which this study utilizes to identify the location of the site include: 1) Identification using satellite images; 2) Identification using the predictive model based on GIS; 3) Integration of satellite images data applying the prediction model. Thereby, those points having a series of internal and external characteristics related to settlement sites were introduced as potential ancient sites. In the field survey, 57 points were confirmed as settlement sites. The perspective of this study helps archaeologists to explore the surface and subsurface remnants of ancient sites without conventional field-walking survey.

## THE CONTRIBUTION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO AERIAL PHOTOINTERPRETATION OF ARCHAEOLOGICAL SITES: A COMPARISON BETWEEN TRADITIONAL AND MACHINE LEARNING METHODS

### 1. INTRODUCTION

It is well known that aerial photographs are a useful working tool for specialists in various scientific fields (town planners, landscape architects, geographers, geologists, agronomists); in fact, they are vital for archaeologists specializing in the study of historical topography and ancient cities. The advantage provided by aerial photography is demonstrated by the possibility of detecting buried archaeological features through the “marks” showing up on the photograms, so to define with precision the geometric outline of buildings and burials or the course of underground road paths. Among the different types of tracks (damp-marks, crop-marks, soil-sites, shadow-sites) this research focuses mainly on crop-marks as they are characterized by a deep colour contrast. In fact, archaeological structures interact with the vegetation’s rooting apparatus deeply influencing its growth so that it can be either reduced or enhanced. In aerial photographs, this difference clearly appears in the chromatic contrast.

For example, in case of graves dug in the ground or defensive ditches, the vegetation will be taller and thicker, resulting in a dark green colour; on the contrary, plants over masonry structures or roads will be lower and thinner resulting in light green or yellow. Summing up the accurate methodology applied to the study of aerial photographs and to the restitution of archaeological traces (PICCARRETA 1987; ALVISI 1989; PICCARRETA, CERAUDDO 2000; GUAITOLI 2003; MUSSON, PALMER, CAMPANA 2005), once the photointerpretation activity has been completed, the specialist draws the archaeological evidence on a topographical map in order to locate it on the ground ahead of stratigraphic excavations or of more ordinary activities of protection, land management and development. This operation, which in view of its purposes requires a high degree of precision, can essentially be carried out in two ways: with the technical instrumentation used to produce topographical maps (analytical or digital photorestituturs), or using a professional software for georeferencing and orthorectifying the images and then CAD digitizing of the marks.

Only the first case involves real “photorestitution”. It requires an operator highly qualified in cartographic techniques and an archaeologist expert in aerial photointerpretation (archaeologists-cartographers trained

in both skills being unfortunately rare); the degree of precision achieved is centimetric or sub-centimetric depending on the scale at which the zenithal frames are taken. In the second case, instead, it is more correct to use the word “vectorisation” or “digitalisation” of the marks. This is a less accurate mapping method, however sub-metric. Regardless of the method employed and specialisation of the archaeologist, both for the photointerpretation phase of the traces and for the mapping on paper, many days of work are necessary to complete the research.

Starting from the experience gained in the ARCHEO 3.0 project “Integration of key enabling technologies for the efficiency of preventive archaeological excavations”<sup>1</sup>, where automatic systems were applied for the automatic or semi-automatic tracing of the contours of archaeological layers detected in excavations through the use of photographic images (CACCIARI, POCOBELLI, SIANO 2017; CACCIARI *et al.* 2018), here we aim at verifying the feasibility of artificial intelligence systems for marks recognition in aerial imagery and at assessing its practical use in order to speed up the graphic recording time (CACCIARI, POCOBELLI *in press*).

The use of artificial intelligence is currently explored by other researchers, although in different contexts. In this respect, the advanced stage achieved by the experimentation of artificial intelligence systems on World War II historical aerial photographs in the field of civil security, for the recognition of traces from exploded and unexploded ordnance must be mentioned (OZDEMIR, REMONDINO 2019; SHEPHERD *et al.* 2019).

In this article we present a summary of the procedure adopted and the results obtained. Issues deriving from image geo-referencing will be dealt with in a further work.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 *Data-set and acquisition methods*

The present research availed itself of aerial images of Vulci, one of the most important cities of ancient Etruria from which, according to epigraphic and archaeological documents, Servius Tullius, the legendary sixth king of Rome, came from. In my PhD in Ancient Topography I carried out a research on Vulci with the prevalent use of aerial photographs, in order to map the archaeological marks visible in the urban area and the surrounding necropolis

<sup>1</sup> Two Institutes of the Italian National Research Council – the Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” (IFAC) and the Istituto per la Conservazione e Valorizzazione dei Beni Culturali (ICVBC), now Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC) – have been actively involved in the project ARCHEO 3.0, co-funded by the Tuscany Region (POR-CReO/FESR 2014-2020). The wide-ranging competences of the CNR Institutes has allowed to exploit ICT solutions in order to develop automatic methods of acquisition and graphic rendering of archaeological layers.



Fig. 1 – Vulci. Top: the 1975 perspective photograph showing the marks of the city's urban plan as seen from the S. Clearly visible are the main NS road (1) and the secondary roads that delimit the blocks (2-9). Around the large dark area of the “Foro Occidentale” are the “Tempio Grande” (12), the “Edificio Absidato” (13), the “Edificio in Laterizio” (14), on the right, the “Domus del Criptoportico” (11) and the so-called “Cardine Massimo” (10). Bottom: detail of the 1975 perspective photo with traces of the Etruscan temple in *opus quadratum* at the so-called “Foro Orientale” (POCOBELLI 2011).





Fig. 2 – Vulci. The 1975 low-altitude photo with marks visible in the so-called “Foro Occidentale” area (POCOBELLI 2004).

(POCOBELLI 2006). Using the traditional methods of archaeological photo-interpretation and cartographic restitution my research achieved significant results. For example, the ancient town plan of the city was reconstructed, with the road network (Fig. 1) and the perimeter of the Western Forum in front of the famous “Tempio Grande” (Fig. 2), apparently overlooked by a small theatre (POCOBELLI 2003, 150-151; 2004, 131-133).

Moreover, in the city’s NE area, at the foot of the acropolis, marks of an Etruscan temple have been identified (Fig. 1, bottom), located along the eastern side of a further area with a public function, the so-called “Foro Orientale”, previously unknown (POCOBELLI 2003, 151-154; 2004, 133-136; 2011, 120). Excavations carried out after this discovery has confirmed the existence of a sacred building in *opus quadratum* (MORETTI SGUBINI, RICCIARDI 2011, 79-80). The traces found in the necropolis area are also interesting (POCOBELLI 2007, 170-183). For instance, to the N of the ancient city, in the Poggio Mengarelli area, aerial imagery has clearly shown the crop-marks determined by features excavated in the tufaceous bank (Figs. 3, 7). The rectangular marks are simple pit graves used at the end of the 8<sup>th</sup> century BC, while the architecturally more complex chamber tombs (i.e. the T-shape to be seen in the photographs), with a long ramp (*dromos*) and a rectangular *atrium* leading to the funerary hypogea, were built by aristocratic families from the 7<sup>th</sup> BC c. onwards (POCOBELLI 2003, 154-156; 2007, 173-174). In

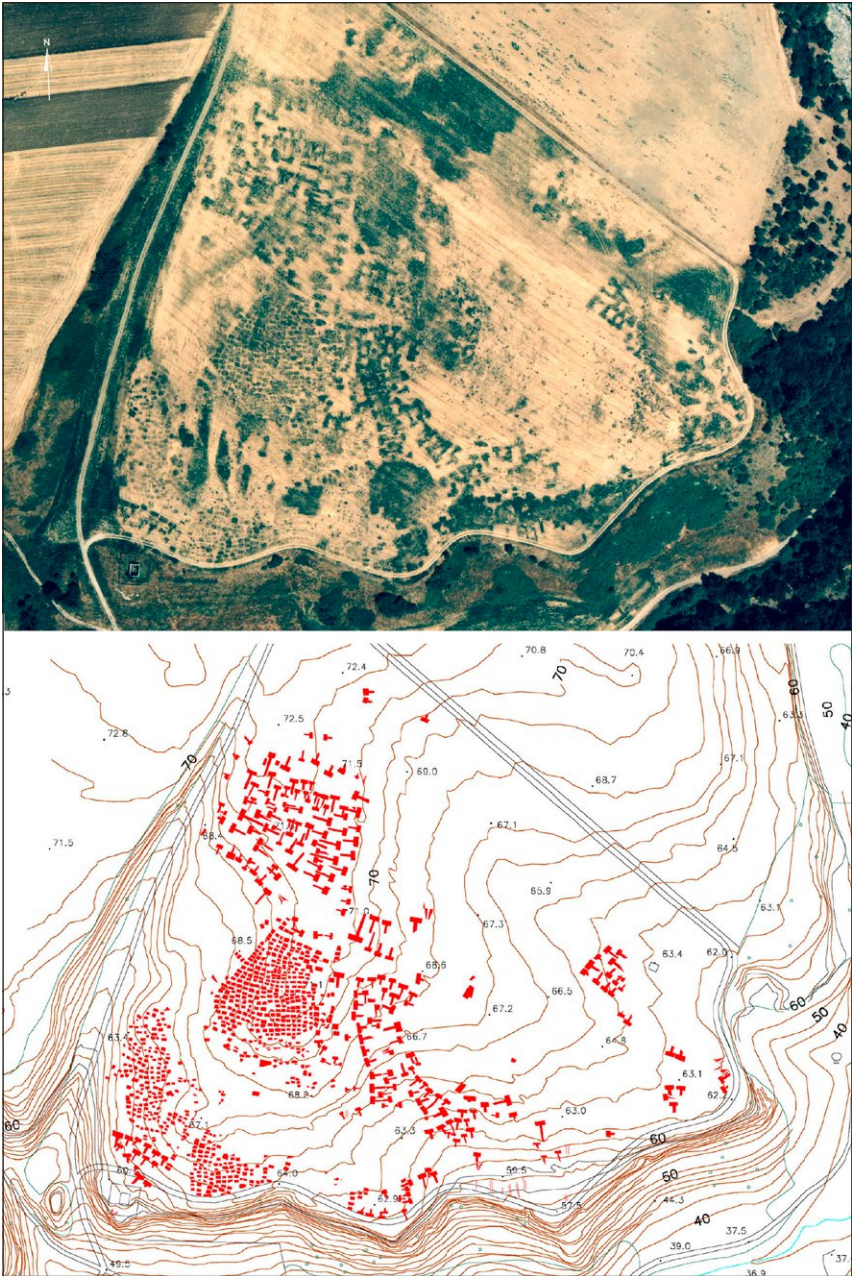


Fig. 3 – Vulci, Poggio Mengarelli. The 1997 aerial photograph and the photogrammetric restitution of the marks of the pit and chamber tombs (POCOBELLI 2007).

whole, this research allowed the mapping of more than 1600 pit graves and 1275 chamber graves.

The analytical data from this previous study are here used as a comparative basis in order to evaluate qualitatively and quantitatively the results obtained. The tests were carried out on colour and B/W aerial photographs of both the urban area and the surrounding necropolis, by selecting images with a high number of marks and with different characteristics (damp-marks, crop-marks, soil-sites, shadow-sites), in order to verify the system's response to different types of archaeological anomalies. Each single image was digitized in uncompressed format (\*.tiff) with a flatbed scanner, in colour mode (24 bit depth), at different resolutions (150, 300, 600 dpi) in order to assess the impact on the detection ability of the individual traces.

In detail, the tests were carried out on some zenithal images of the urban area, where the marks of roads delimiting the residential blocks are easily identifiable (SIAT 1986 and CGRA 1997 flights), and on other perspective images taken at lower altitudes (Lisandrelli 1975 flight) with a higher mark definition (POCOBELLI 2004, 130-140) (Fig. 2). In the case of the necropolises, instead, images from the Poggio Mengarelli area were chosen, where some 1997 aerial zenithal images and oblique photographs taken at lower altitudes clearly show the planimetric development of the pit tombs, identified by their rectangular crop-marks, and of the chamber tombs, easily recognisable by the T-shape of the *dromos* with vestibule, all of which were photo-restituted (POCOBELLI 2007, 172-174) (Fig. 3). The images used in this research, with the exception of the perspective photographs of the necropolis taken by the author, belong to the collection of ICCD-Aerofototeca Nazionale.

G.F.P.

## 2.2 Image enhancement

The images considered in this work are affected by background intensity variations. For this reason, some areas of the captured scene result brighter than others. This has suggested the need of a specific filtering operation in order to improve the image reading before any further operation. Images undesirably affected by background intensity variations can be corrected by flat-field techniques. In general, this is accomplished with the following operation performed to each pixel in the image:

$$I_c = (I_o - o) \times g \quad (1)$$

where  $I_c$  and  $I_o$  represent the intensity of the corrected and original pixel, respectively,  $o$  and  $g$  represent an offset and gain values that are different for each pixel. A calibration procedure is required in order to estimate both the offset and gain values. This is accomplished computing pixel data from the



dark and the flat image. The dark image is captured by covering the sensor, the flat by using a uniform object covering the whole field of view. Several dark and flat images are then acquired and the corresponding average considered for flat field calculation. The intensity of a pixel in the dark image represents the offset coefficient. The intensity of the corrected pixel is defined as the value to be corrected for the flat image:

$$A_f - D_d = (f - d) \times g \quad (2)$$

where  $A_f$  and  $D_d$  represent the average field and dark images respectively, and  $f$  and  $d$  the pixel intensity of the flat and dark images respectively, and  $g$  the gain. Once the gain values have been computed from inverting eq. (2), a specific correction for each pixel of the image can be performed. This general procedure allows achieving an accurate representation of the background intensity as well as removing sensor noise.

Unfortunately, it is not possible to perform neither dark nor field images, and it is not also possible to create multiple images. For these reasons, in this work the flat field cannot be directly measured but only estimated. The flat field estimation has been performed by fitting the surface with a 2D polynomial mathematical model on the image intensity. A sampled grid of pixels has been chosen in order to fit the model. The higher is the grid size (or the polynomial model), the higher is the accuracy achieved.

Prior to applying colour clustering, all the original images have been considered as RGB coloured. The flat field estimation has been performed individually on the three colour planes and the results combined back into an RGB image to be subtracted to the original image. An example of the improvement obtained with flat field correction is shown in Fig. 4. The original image (Fig. 4a) shows a dark zone in the upper right part, the flat field estimated considering a grid size of 32×32 pixels and a third degree polynomial model shows a non-uniform background (Fig. 4b). In the final image (Fig. 4c), after flat field correction the background appears more uniform and the shadows in the upper right part of the images seem to be reduced.

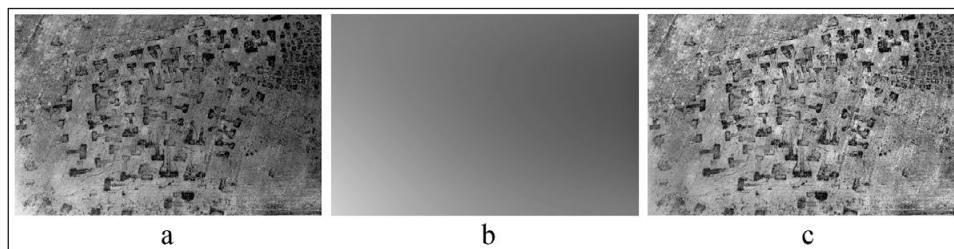


Fig. 4 – a) original image; b) estimated flat field; c) flat field corrected image.

### 2.3 Machine Learning unsupervised algorithm for colour clustering

The range of applications involving Machine Learning (ML) techniques spans virtually all sectors: from product recommendations (PORTUGAL, ALENCAR, COWAN 2018) to medical diagnoses (BAKATOR, RADOSAV 2018; XU, XUE, ZHANG 2019) to financial analysis (GU, KELLY, XIU 2020).

It is interesting to observe that this also involves disciplines that, for a long time, have been considered distant from this technology. It is then not surprising that archaeology has also benefited from ML. In particular, what sounds appealing in the archaeological community is the capability of unsupervised ML techniques to identify groups in a data set according to specific features (named as clusters). This task is commonly referred to as unsupervised learning. Since in the archaeological context, the features to be identified are often partial or completely unknown, the unsupervised clustering may provide the earliest grouping of the available datasets involving minimal human intervention and a limited initial input data set. This appears even more intriguing in all the cases in which archaeology works with images. In fact, from a preliminary division of an image provided by unsupervised clustering, unexpected things may appear. This could help the archaeologist in the identification of similar features that otherwise could not be easily observable with naked eye.

Among the numerous unsupervised ML algorithms for clustering, in this work we have considered k-means clustering (REILLY, RAHTZ 1992). The widespread diffusion of k-means algorithm is essentially due to its easy implementation and robustness. K-means image clustering is used with unlabelled data (i.e. data without defined categories). The aim is to partition the sample data sets (image pixels) into a pre-specified number of clusters (k) based on some kind of similarity in the data within the k clusters.

The algorithm we have implemented for this work starts with the number of clusters (k) and the type of colour coordinates (RGB, HSL, etc.), both established *a priori* by a human operator. At this stage, the human can also change some image parameters such as “brightness”, “contrast”, and “gamma”, in order to enhance details in the coloured image. Moreover, the human operator can also apply a low pass filtering operator in order to smooth the image. The resulting image is fed to the algorithm for colour clustering. K pixels in the image are picked in a random fashion. These pixels represent the first guess of the clusters centers (barycenters). Then a distance measurement (e.g. Euclidean distance) is calculated between each data point and the first guess of the barycenters. This calculation allows assigning each point to the closer cluster by reducing the in-cluster distance between all pixels. The cluster barycenters are then recalculated and new assignment made. The iteration is repeated until no further change occurs in the barycenters. A schematic representation is depicted in Fig. 5.

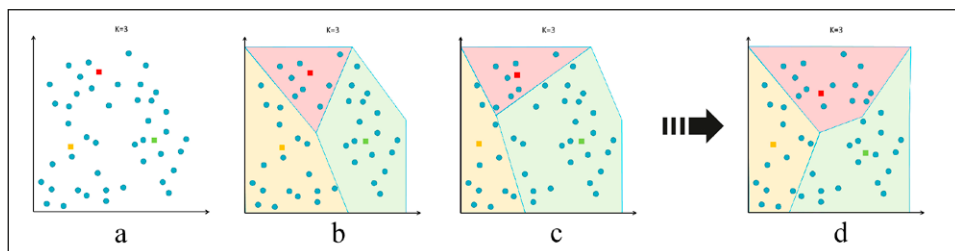


Fig. 5 – K means clustering: a) original dataset including the first guess of the barycenters; b) first grouping of the original dataset in three clusters; c) and d) update of the barycenters locations and new clusters development; d) end of the algorithm with the identification of final clusters and corresponding barycenters.

At the end the algorithm has assigned each pixel in the original image to a specific cluster. As output, the original image is separated into  $k$  images, in which all the non-zero pixels belong to a specific cluster. An 8-bit number is then associated to all the non-zero pixels in one of the  $k$  images. This assignment is then repeated with different 8 bit numbers for the remaining  $k$  images. The resulting  $k$  images are combined into a composite image that is finally used with standard edge detection technique to highlight the clusters contours.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Although in the proposed algorithm the human intervention could be considered limited, it could affect the results in terms of marks identification. As described above, the number of clusters and the type of colour coordinates are both established *a priori* by the human operator. In this work, the entire colour clustering analysis has been performed considering only two clusters. This heuristic choice has been motivated by the interest in separating the tomb contours from the background, as if there were only two elements (clusters) to be identified.

On the contrary, the colour coordinates choice deserves a thorough discussion, and cannot be defined with heuristic motivations. As preliminary tests, some images have been colour clustered making use of RGB, HIS, HSV, CieLab and CieXYZ colour coordinates. The reader unfamiliar with the colour coordinates if interested could benefit from the available literature on this topic (MEYER, GREENBERG 1980; IBRAHEEM *et al.* 2012; KAHU, RAUT, BHURCHANDI 2019). As an example in Fig. 6 is reported the contour obtained with clustering using different colour coordinates. The images in Fig. 6 evidence that some colour space can bring out certain details better than others. Although in the presented example the CieXYZ coordinates seem to offer the

best results, it should not lead us to claim that it is of general validity. What could be confidently stated is that any case should be preliminarily discussed in order to determine the best results.

Since in this work we are just interested in comparing the human results with the machine ones, we have focused the analysis only on RGB coordinates, exploring instead the effect of image resolution as well as the difference among coloured and black and white images.

I.C.

The results obtained through ML algorithms, in the case of aerial photographs of the urban area, have evidenced low definition in terms of contour recognition. This can be explained considering that the large amount of information and the variability of the traces generate a background noise that does not allow a correct distinction of the shapes. This outcome is found both in images taken by airplane (high altitude flights) and proximity photographs (drone or low altitude flights), regardless of the image resolution. This is mainly due to the intrinsic characteristics of the linear tracks (mostly structures and roads), which are not uniform in colour over their entire extension and are therefore difficult for the algorithm to recognise. In this area, what is intelligible to the human eye, at the current state of experimentation, is not fully answered by the system's processing.

On the 1997 aerial photographs, the ML system was able to detect the outline of the marks in more detail than in the urban area, although it showed severe limitations in tracing individual graves due to the reciprocal proximity of the burials and the advanced growth of the vegetation (Fig. 7). However, areas with the presence of burials are well defined. Better results were obtained with low altitude photographs of the necropolis. The test also demonstrated the impact of image resolution on the final result. At a low resolution (150 dpi) the system succeeded in defining the macro-areas affected by the burials and roughly the contours of 15 graves (Fig. 8a); at 300 dpi, although the background noise is still evident, the details of the traces appear improved and 27 graves can be recognised (Fig. 8b). At medium-high resolution (600 dpi) the shapes of 34 chamber tombs can be seen; the presence of more burials helps in further delimiting the area (Fig. 8c).

Of even higher interest is the result obtained in this area with panchromatic images. In order to compare data, the same photographs were printed in bichromatic mode (see e.g. the image in Fig. 8) and scanned with the same parameters (Fig. 9). The differences are evident: already at 150 dpi the algorithm is able to distinguish, with good approximation, the geometry of most (52) of the recognizable chamber tombs (Fig. 9a) and at 300 dpi the tombs outlined are 68. At 600 dpi the definition of the contours is optimal (Fig. 9c), with 96 well-defined chamber tombs which, although results are in part

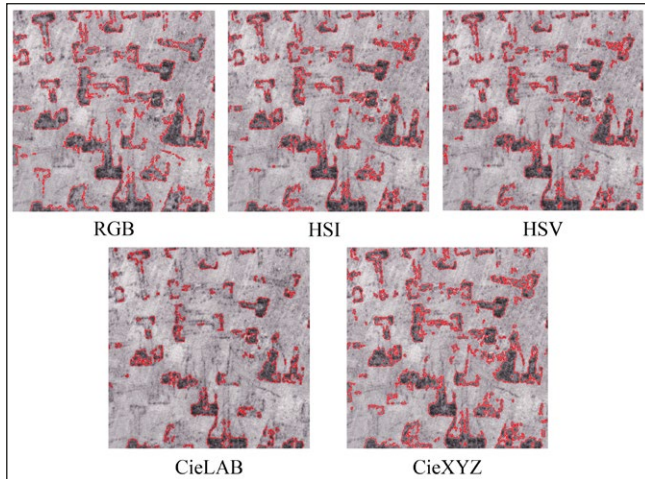


Fig. 6 – Contours obtained after colour clustering with different colour coordinates.

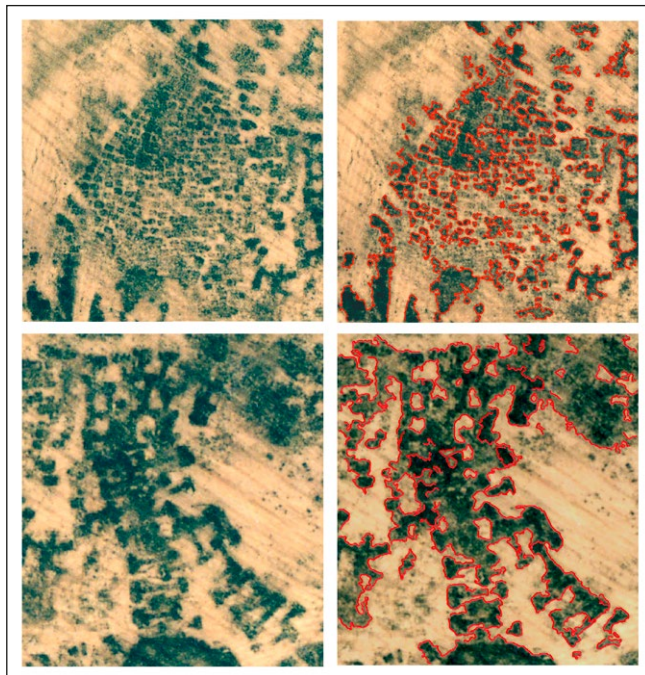


Fig. 7 – Vulci, Poggio Mengarelli. Aerial original image: details of crop marks of pit tombs and chamber tombs (left); with ML outlines (right).



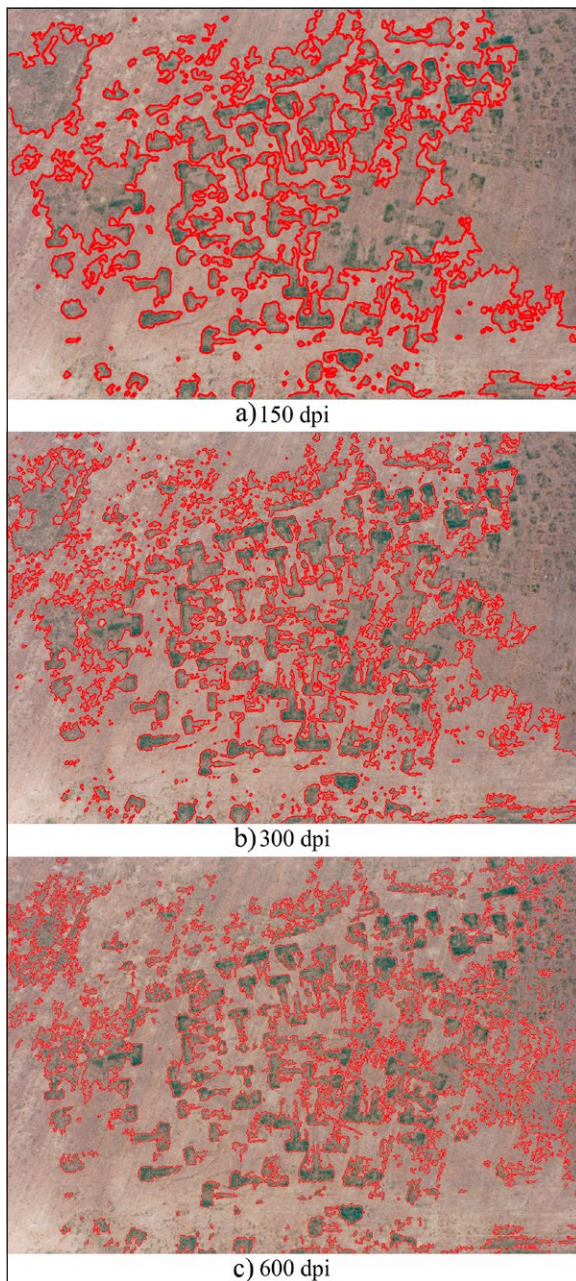


Fig. 8 – Contours obtained performing RGB colour clustering on coloured images of different resolution.

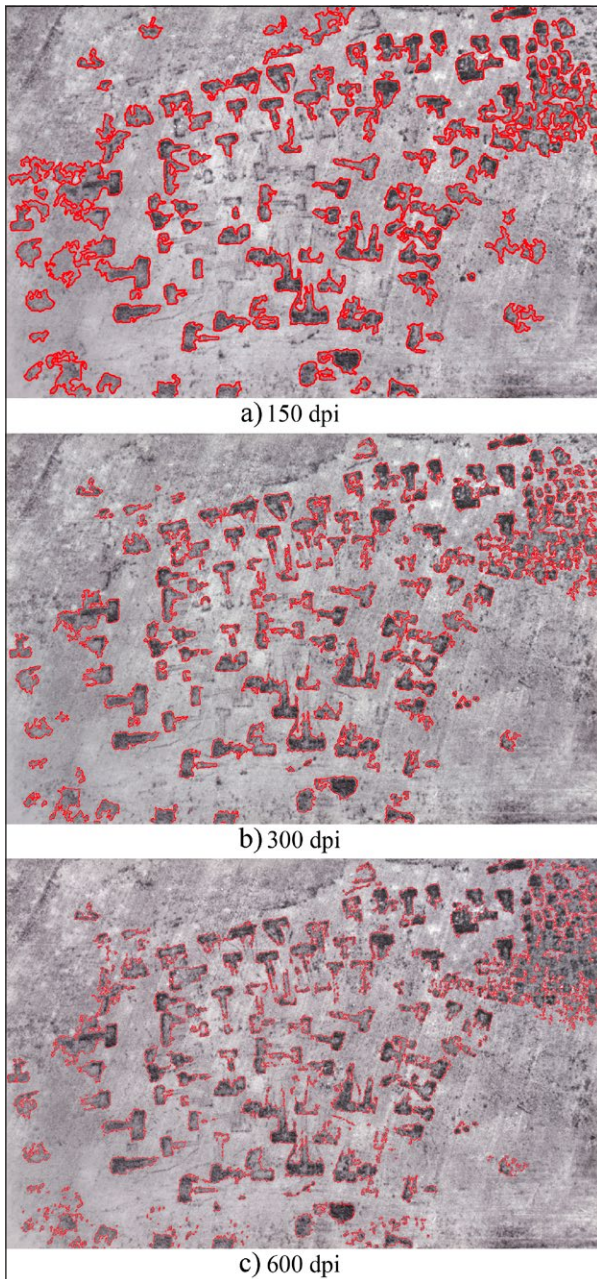


Fig. 9 – Contours obtained performing RGB colour clustering on B/W images of different resolution.



indecisive, especially in the definition of the *dromoi*, correspond to a percentage of 81.3 compared to what was mapped with the traditional method.

G.F.P.

#### 4. CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES

Research has demonstrated that ML developed in the framework of the ARCHEO 3.0 project for the identification of archaeological strata under excavation, with appropriate calibrations and corrections can also be applied to aerial photographs for the recognition of archaeological traces, with interesting development prospects.

An in-depth analysis, however, shows that the response of the system is highly variable. The first consideration concerns the characteristics of the tracks. As expected, the system works well with crop-marks. In the area of the necropolis, where the graves show a well-defined contrast with the surrounding area, ML image processing produces individual traces with good results.

Conversely, where the vegetation colour is rather uniform or the marks are not clearly defined, the system is unable to distinguish individual elements but defines a contour area. In other cases, as in the urban area, where the human eye recognizes the regular forms of structures and road, the proposed automatic system is not able to detect marks.

Best results are achieved with low altitude photographs in the necropolis area, where the algorithm correctly distinguishes and highlights the profiles of the individual chamber tombs, with little loss of information.

The difference with the 1997 aerial photos depends on the different degree of detail in the image. In addition to the altitude at which the images were taken, the type and condition of the vegetation influence the possibility of reading the marks: in the field sown with alfalfa, the low altitude photos were taken in the first days of June, with vegetation in its initial state of growth, while the others were taken at the end of July. However, in aerial images, the areas with higher vegetation, where the photointerpreter distinguishes numerous tracks, are well defined.

The difference in system processing between colour and B/W photographs is also very interesting. Fig. 10 clearly shows the graphical result of the marks within the two types of photos: the wider range of chromatic shades leads to greater noise, resulting in confusion in the drawing of shapes. Instead, the smaller amount of grey tones allows for greater detail and a better ability of the algorithm to precisely define the contour of the track.

Comparison with the traditional mapping method suggests that the ML system needs further improvements. With regard to the amount of information useful for the graphic detection of graves, for example, tests on the colour image at 600 dpi (Fig. 8c) indicate that the algorithm defines 34 chamber graves,

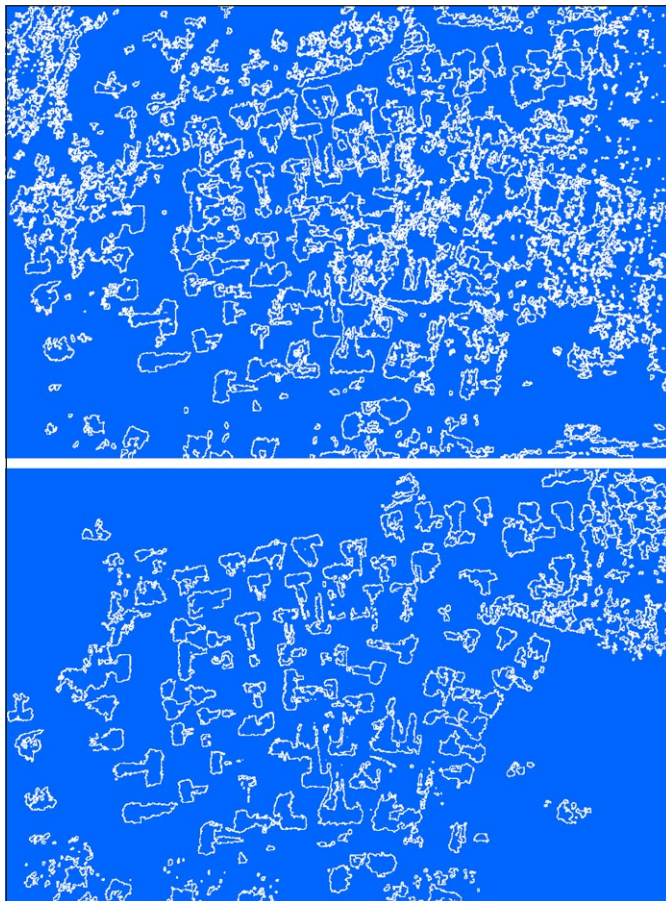


Fig. 10 – Outlines obtained with 600 dpi photo (see Figs. 8 and 9): colour (top) and B/W (bottom).

28.8% of the burials mapped by the traditional method (118), while in the B/W photo the marks – drawn with good shape definition (Fig. 9c) – are 96 (81.3%).

The cartographic comparison is also good: contours processed with ML show great realism and have a substantial correspondence with the marks mapped with the traditional restitution method. The small differences that can be found are due to the orthorectification of oblique images, which is not necessary for zenithal photographs. The error found is only a few tens of centimetres, comparable to the deformations that occur with CAD vectorisation of the tracks. Human intervention, however, is still necessary to integrate what is not detected by the algorithm.

The failure to identify traces recognisable by the human eye – one of the limitations shown by the system – could be overcome by processing the same image several times with different parameters and filters, to create different layers of reading that, overlapping, can integrate the information gaps.

Image definition is perhaps another element to be considered in order to obtain better results, although increasing resolution up to 1200 dpi and the colour depth to 48 bit (now 600 dpi at 24 bit colour) makes the data to be processed heavier.

On the basis of the current experience, future elaborations will be carried out considering also the preliminary transformation of images from colour to B/W and also comparing the use of further algorithms and possibly exploring neural networks.

For the overall evaluation of the achieved results, the amount of time necessary to map the tracks is crucial. With the traditional method and the expensive technical equipment for cartographic restitution, certainly more precise and complete, it takes two or three days of work, while the proposed ML system and a standard computer require only a few tens of seconds.

However, despite the limitations highlighted in this experimentation, it is plausible that, with suitable improvements, ML systems will be valuable tools for significantly accelerating the time spent in graphical restitution. This in turn will help the archaeologist not specialised in cartographic restitution to map buried archaeological remains with decimetric approximation, in order to plan excavations and promote their enhancement and protection.

I.C., G.F.P.

ILARIA CACCIARI

Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” – CNR  
i.cacciari@ifac.cnr.it

GIORGIO F. POCOBELLI

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale – CNR  
giorgiofranco.pocobelli@cnr.it

## REFERENCES

- ALVISI G. 1989, *La fotografia aerea nell'indagine archeologica*, Roma, La Nuova Italia Scientifica.
- BAKATOR M., RADOSAV D. 2018, *Deep learning and medical diagnosis: A review of literature*, «Multimodal Technologies and Interaction», 2, 47, 1-12.
- CACCIARI I., POCOBELLI G.F. in press, *Machine Learning: A novel tool for archaeology*, in S. D'AMICO, V. VENUTI (eds.), *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, Springer International Publishing.
- CACCIARI I., POCOBELLI G.F., CICOLA S., SIANO S. 2018, *Discrimination of soil texture and contour recognitions during archaeological excavation using Machine Learning*, «Institute of Physics Conference Series: Materials Science and Engineering», 364, 012042, 1-8.

- CACCIARI I., POCOBELLI G.F., SIANO S. 2017, *Machine Learning: A toolkit for speeding up archaeological stratigraphic identification*, in 3<sup>rd</sup> IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage. MetroArchaeo 2017 (Lecce 2017), 109-115 (<https://www.imeko.org/publications/tc4-Archaeo-2017/IMEKO-TC4-ARCHAEO-2017-023.pdf>).
- GU S., KELLY B., XIU D. 2020, *Empirical asset pricing via Machine Learning*, «The Review of Financial Studies», 33, 2223-2273.
- GUAITOLI M. (ed.) 2003, *Lo sguardo di Icaro. Le collezioni dell'Aerofototeca Nazionale per la conoscenza del territorio*, Catalogo della mostra, Roma, Campisano Editore.
- IBRAHEEM N.A., HASAN M.M., KHAN R.Z., MISHRA P.K. 2012, *Understanding color models: A review*, «ARPN Journal of Science and Technology», 2, 265-275.
- KAHU S.Y., RAUT R.B., BHURCHANDI K.M. 2019, *Review and evaluation of color spaces for image/video compression*, «Color Res Application», 44, 8-33.
- MEYER G.W., GREENBERG D.P. 1980, *Perceptual color spaces for computer graphics*, «Computer Graphics, ACM», 14, 254-261.
- MORETTI SGUBINI A.M., RICCIARDI L. 2011, *Considerazioni sulle testimonianze di Tuscania e di Vulci*, in *Tetti di terracotta. La decorazione architettonica fittile tra Etruria e Lazio in età arcaica. Atti delle Giornate di Studio (Roma 2010)*, Roma, Officina Edizioni, 75-86.
- MUSSON C., PALMER R., CAMPANA S. 2005, *In volo nel passato. Aerofotografia e cartografia archeologica*, Firenze, All'insegna del Giglio.
- OZDEMIR E., REMONDINO F. 2019, *Machine learning methods applied to WWII aerial images*, in *Geoprocessing and Archiving of Historical Aerial Images Workshop (Saint-Mandé, Paris 2019)* ([http://www.eurosd.net/sites/default/files/images/inline/07\\_ozdemir\\_et al.pdf](http://www.eurosd.net/sites/default/files/images/inline/07_ozdemir_et al.pdf)).
- PICCARRETA F. 1987, *Manuale di fotografia aerea. Uso archeologico*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- PICCARRETA F., CERAUDO G. 2000, *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologie, tecniche e applicazioni*, Bari, Edipuglia.
- POCOBELLI G.F. 2003, *Ortofotopiano storico del territorio di Vulci*, in GUAITOLI 2003, 147-156.
- POCOBELLI G.F. 2004, *Vulci: il contributo della fotografia aerea alla conoscenza dell'area urbana*, «Archeologia Aerea», 1, 127-143.
- POCOBELLI G.F. 2006, *La carta archeologica dell'area urbana di Vulci. Cartografia archeologica e fotogrammetria finalizzata*, Tesi di Dottorato in Topografia Antica (Università di Salerno, Roma La Sapienza, UniTuscia, UniSalento).
- POCOBELLI G.F. 2007, *Il territorio suburbano di Vulci attraverso le evidenze aerofotografiche. Viabilità e necropoli*, «Archeologia Aerea», 2, 167-185.
- POCOBELLI G.F. 2011, *Vulci e il suo territorio: area urbana, necropoli e viabilità. Applicazioni di cartografia archeologica e fotogrammetria finalizzata*, in G. CERAUDO (ed.), *100 anni di archeologia aerea in Italia. Atti del I Convegno Internazionale (Roma 2009)*, Foggia, Claudio Grenzi Editore, 117-126.
- PORTUGAL I., ALENCAR P., COWAN D. 2018, *The use of machine learning algorithms in recommender systems: A systematic review*, «Expert Systems with Applications», 97, 205-227.
- REILLY P., RAHTZ S. (eds.) 1992, *Archaeology and the Information Age: A Global Perspective*, London-New York, Routledge.
- SHEPHERD E.J., CERAUDO S., SALERNO G., REMONDINO F. 2019, *Analog/digital image processing of historical aerial imagery in the Italian National Photographic Aerial Archive (AFN-ICCD)*, in *Geoprocessing and Archiving of Historical Aerial Images Workshop (Saint-Mandé, Paris 2019)* ([http://www.eurosd.net/sites/default/files/images/inline/04\\_shepherd\\_et al\\_italy.pdf](http://www.eurosd.net/sites/default/files/images/inline/04_shepherd_et al_italy.pdf)).
- XU J., XUE K., ZHANG K. 2019, *Current status and future trends of clinical diagnoses via image-based deep learning*, «Theranostics», 9, 7556-7565.

ABSTRACT

On the basis of the research activity carried out as part of the Archeo 3.0 project 'Integration of key enabling technologies for the efficiency of preventive archaeological excavations', the authors explore the feasibility and limits of the automated approach for the recognition of archaeological marks. This approach is mainly motivated by the relevance that aerial photographs play in the reconstruction of ancient topography of human settlements. For this aim, a collection of historical aerial photographs of both the city and the necropolis of Vulci has been considered. These photographs, in colour and B/W, have been previously used in a PhD thesis in Ancient Topography in which the traditional methodology (photointerpretation and cartographic restitution) has been fully exploited. In this work, a systematic study is presented in order to compare the results obtained with Machine Learning techniques vs traditional ones. This comparison allows us to discuss the strengths and limits of both methodologies.

## ANÁLISIS ARQUITECTÓNICO Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍA BIM EN EL SANTUARIO EXTRAURBANO DE *TUSCULUM*

### 1. INTRODUCCIÓN

La Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma (EEHAR-CSIC) realiza desde hace más de 25 años excavaciones arqueológicas e investigación en el yacimiento de *Tusculum* y su territorio. En estos años, los resultados científicos obtenidos por diversos grupos de trabajo han permitido la recuperación de una imagen extraordinaria de la ciudad, descubriéndose una serie de complejos monumentales (foro, teatro, acrópolis, iglesia) que ilustran arqueológicamente la complejidad urbana del lugar con grandes posibilidades de desarrollo para la investigación (Fig. 1).

Desde el comienzo de los trabajos en el año 1994 la investigación ha desarrollado varias fases marcadas por una estrategia institucional coherente, que ha facilitado la continuidad del proyecto<sup>1</sup>. En estos años han sido muchas las publicaciones que, sistemáticamente han dado a conocer los datos provenientes de las campañas de excavación desarrolladas en numerosas áreas de la ciudad y otras zonas extraurbanas. Recordamos, en este sentido, las excavaciones estratigráficas en el teatro, que se publicarán íntegramente dando a conocer además las intervenciones realizadas en las distintas zonas del foro, en la basílica con sus distintas transformaciones desde la época republicana, la documentación de las fases de la ocupación más antigua del foro reconocidas en el llamado podio arcaico, junto a los edificios sagrados evidenciados en la parte occidental o las investigaciones en la zona de la fuente arcaica y en el lado oriental del foro cerca del teatro.

El “santuario extraurbano” es conocido desde hace mucho tiempo, aunque solo al final de los años noventa del siglo pasado se realizaron las primeras excavaciones con metodología estratigráfica. Esta área no ha sido tradicionalmente objeto de las investigaciones desarrolladas por la EEHAR, aunque en 1997, en el ámbito de un proyecto general de limpieza, consolidación y restauración en la zona del santuario, se llevaron a cabo dos campañas de excavación, dirigidas por Xavier Dupré, y la Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio. Esta intervención estaba orientada principalmente a la comprensión y restauración de algunos espacios situados en la terraza sobre las grandes subestructuras del santuario. El proyecto comprendía la limpieza

<sup>1</sup> Los trabajos se han efectuado en relación con las instituciones locales representadas por la Soprintendenza dei Beni Archeologici del Lazio y la XI Comunità Montana dei Castelli Romani e Prenestini. Para el parque arqueológico de *Tusculum* cfr. QUILICI, QUILICI GIGLI 1991.



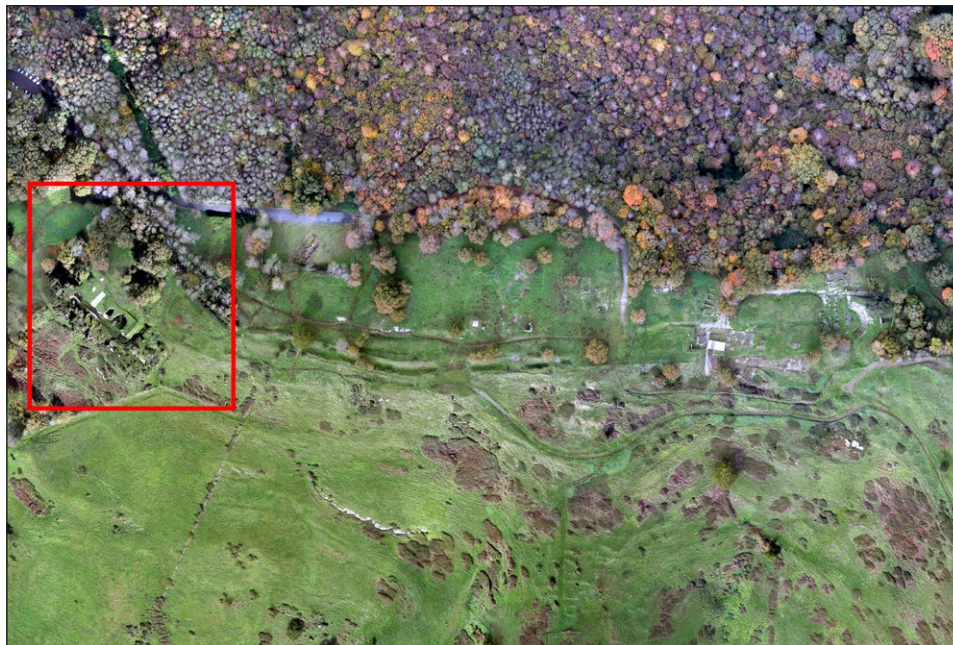


Fig. 1 – Ortofotografía del conjunto arqueológico de *Tusculum*, en rojo se señala la posición del santuario (EEHAR-CSIC).

de las bóvedas situadas en los espacios bajo el santuario y la excavación del área que antecede al podio del templo, con el objetivo fundamental de comprender la relación y las transformaciones entre el edificio principal de culto y el espacio de la plaza (DUPRÉ RAVENTÓS, RIBALDI 2004).

Estos datos representan la única base para la comprensión de las diversas fases del templo objeto de estudio y, en este sentido, una de las novedades que presenta esta contribución ha sido posible gracias al acceso y consulta de la documentación original de las excavaciones de Dupré custodiada en el archivo de la EEHAR. Esta documentación es fundamental para reconstruir una hipótesis coherente y fiable sobre las transformaciones de la plaza de este complejo monumental, los sistemas constructivos de la escalinata del templo y las relaciones urbanísticas entre el templo y la plaza.

El complejo del santuario de *Tusculum*, de hecho, representa uno de los edificios mejor conservados de la ciudad y, sin embargo, menos conocido y estudiado (Fig. 2). Se ha llevado a cabo un primer análisis sobre el templo del santuario en el marco de una nueva fase de la investigación sobre el yacimiento arqueológico, comenzada en 2017, y que prevé nuevas investigaciones en el área monumental en función de la reestructuración de



Fig. 2 – Panorámica aérea del santuario extraurbano en 1997 (EEHAR Tus-Fot-T1638).

itinerarios de visita y de un estudio territorial más amplio en relación con las dinámicas productivas y económicas. El santuario en su totalidad será objeto, además, de un programa de investigación que contempla un análisis arquitectónico y estratigráfico vertical sobre los restos conservados, con el objetivo de reconstruir un palimpsesto estratigráfico de gran complejidad, junto con el estudio de las técnicas edilicias y una valoración de los riesgos estructurales con especial atención al estudio de las lesiones/daños y del estado de conservación del edificio.

## 2. EL SANTUARIO EXTRAURBANO DE *TUSCULUM*: BREVE HISTORIA DE LA INVESTIGACIÓN Y CUESTIONES ARQUEOLÓGICAS

En correspondencia con la ladera occidental de la colina sobre la que surge la ciudad de *Tusculum*, se encuentran los restos de un imponente complejo cultural. En ellos se pueden apreciar todavía en determinados sectores, los restos de un sistema constructivo apoyado sobre la base geológica, que en parte sostenía una amplia plaza al centro de la cual se levantó un templo. Desde esta posición sobre elevada el santuario dominaba al NO el valle atravesado por la Vía Latina, desde la que se abría un camino que se

recorría el lado nororiental para después entrar en la ciudad y desembocar en el foro; al SO, sin embargo, se dirigía hacia el Monte Albano y hacia la llanura inferior.

En virtud de esta escenográfica ubicación y de la imponencia de sus restos, el monumento ha suscitado el interés precoz de estudiosos y humanistas. Desde el siglo XVI sus vestigios han sido indistintamente identificados con algunas de las tantas villas de ocio mencionadas en las fuentes antiguas en el territorio de *Tusculum*, y especialmente con la más celebre de ellas, el *Tusculanum* de Cicerón<sup>2</sup>. Incluso después de la identificación de esta última con los restos subterráneos de la villa della Rufinella, situada algo más al O, el conjunto mantuvo en el ambiente erudito naturaleza residencial y fue atribuido al primer cónsul Gabinio, propietario de una vivienda adyacente a la de Cicerón; y después a Tiberio, que también poseía una residencia en esta zona<sup>3</sup>. La identificación del complejo con la villa imperial mencionada, entre ellos, por Dión Casio, fue propuesta por L. Biondi en 1826 (CANINA 1841, 79-80; 128-129), después de las investigaciones desarrolladas en el área septentrional. La hipótesis resultó confirmada por el hallazgo de una estatua marmórea acéfala, de tamaño mayor del natural, que representaba una figura sentada y vestida únicamente con un manto que le cubría la parte izquierda de la espalda y la pierna (CANINA 1841, 79-80; BORDA 1943, 31-32; SALCEDO 2000). La estatua, que con toda posibilidad representa a un miembro de la familia Julio-Claudia, ha sido atribuida a Tiberio en función de su documentado vínculo con *Tusculum* y ha sido arbitrariamente integrada con la cabeza de este emperador, una obra moderna realizada sobre la base de los tipos escultóricos más difundidos. En función de este descubrimiento, la interpretación del gran complejo tusculano como “Villa de Tiberio” fue puesta en valor por Canina, que fue el primero en dirigir excavaciones en el yacimiento y publicó una obra vistosamente editada con ilustraciones de sus trabajos (CANINA 1841, 79-80, 128-129).

La identificación de la naturaleza religiosa del monumento se tuvo únicamente con Thomas Ashby, quien reconoció, en los dos núcleos de hormigón visibles en la plataforma artificial, los restos de un templo. El autor señaló además la correspondencia con la fundación de la cella y del pronao dentro del complejo monumental en el que existía un santuario del tipo aterrazado

<sup>2</sup> Sobre el tema, cfr. COARELLI 1981, 116-120. La identificación con la villa de Cicerón se sitúa en la mitad del siglo XVI en la obra del alemán G. Fabricius.

<sup>3</sup> La identificación de la *Tusculum* de Cicerón con los restos estructurales existentes bajo la villa renacentista della Rufinella es corroborada por la correspondencia de este sitio respecto a las pocas informaciones y coordenadas topográficas deducidas de la obra del orador respecto a su lujosa residencia, así como por el descubrimiento in situ, durante las excavaciones realizadas a mitad del siglo XVIII, de un bollo laterizio con la inscripción *M. Tuli* (COARELLI 1981, 118-119). Sobre la villa de Tiberio, JOS. ANTIQ., 16, 6, 6; DIO CASSIUS, 58, 24.

(ASHBY 1910, 342-345; 1927, 168-169). La primera hipótesis de Ashby tuvo una fría acogida entre estudiosos y eruditos, ya que difería abiertamente con la lectura tradicional ya consolidada del mismo contexto, interpretado sin embargo en clave residencial; idea que continuó a ser planteada en estudios sucesivos<sup>4</sup>.

Una segunda etapa fundamental para la mejor comprensión del sitio y de su arquitectura viene constituida del estudio realizado a mitad de los años noventa del siglo pasado por Lorenzo Quilici y Stefania Quilici Gigli. A ellos se debe la primera edición de un detallado levantamiento del complejo (Fig. 3) y un análisis técnico de sus restos estructurales, bases necesarias para la formulación de una propuesta de periodización para la pluriestratificada trayectoria arquitectónica del monumento (QUILICI, QUILICI GIGLI 1995, 509-534).

Finalmente, en 1997 el yacimiento ha sido objeto, por primera vez, de un programa de investigación estratigráfico. En el ámbito de un proyecto de consolidación y restauración de los restos del complejo cultural y en particular de la terraza situada sobre las subestructuras monumentales, la Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio en colaboración con la Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma-CSIC y con la XI Comunità Montana han realizado una campaña de investigación orientada a la documentación del depósito arqueológico de las bóvedas sobre las que se levantaba el área del santuario. El año siguiente, se procedió a la limpieza de la zona del templo; en esta ocasión fue posible además ampliar la investigación hacia el lado SO permitiendo la adquisición de informaciones fundamentales sobre la ejecución del monumento (GHINI 2002, 195-202).

Estas dos campañas de excavación han permitido una focalización sobre el estado y las connotaciones de diversos sectores del complejo monumental. En particular, el estudio de L. Quilici y S. Quilici Gigli aporta por primera vez un levantamiento extremadamente detallado del complejo organismo de las subestructuras que caracterizan la morfología del santuario, para el cual ha sido incluso formulada una propuesta de periodización basada en las diferentes técnicas edilicias utilizadas sobre las divisiones estructurales. Las intervenciones desarrolladas por la Soprintendenza y la Escuela Española, sin embargo, se han concentrado en particular en el templo y el área del santuario más próxima, permitiendo la adquisición de informaciones fundamentales sobre la ejecución del monumento (DE STEFANO, PIZZO 2020).

<sup>4</sup> La identificación del espacio como santuario fue planteada por Giuseppe TOMASSETTI (1926, 374, tav. III) y posteriormente por G.E. MCCracken (1934, 273; 1939, 133-134), mientras que la interpretación tradicional como villa la encontramos de nuevo en dos trabajos de F. GROSSI GONDI (1904, 139-140; 1908, 151-153). Para un análisis más profundo sobre esta cuestión con bibliografía específica, cfr. QUILICI, QUILICI GIGLI 1995, 509, nota 2-4; DUPRÉ RAVENTÓS, RIBALDI 2004, 213-223.



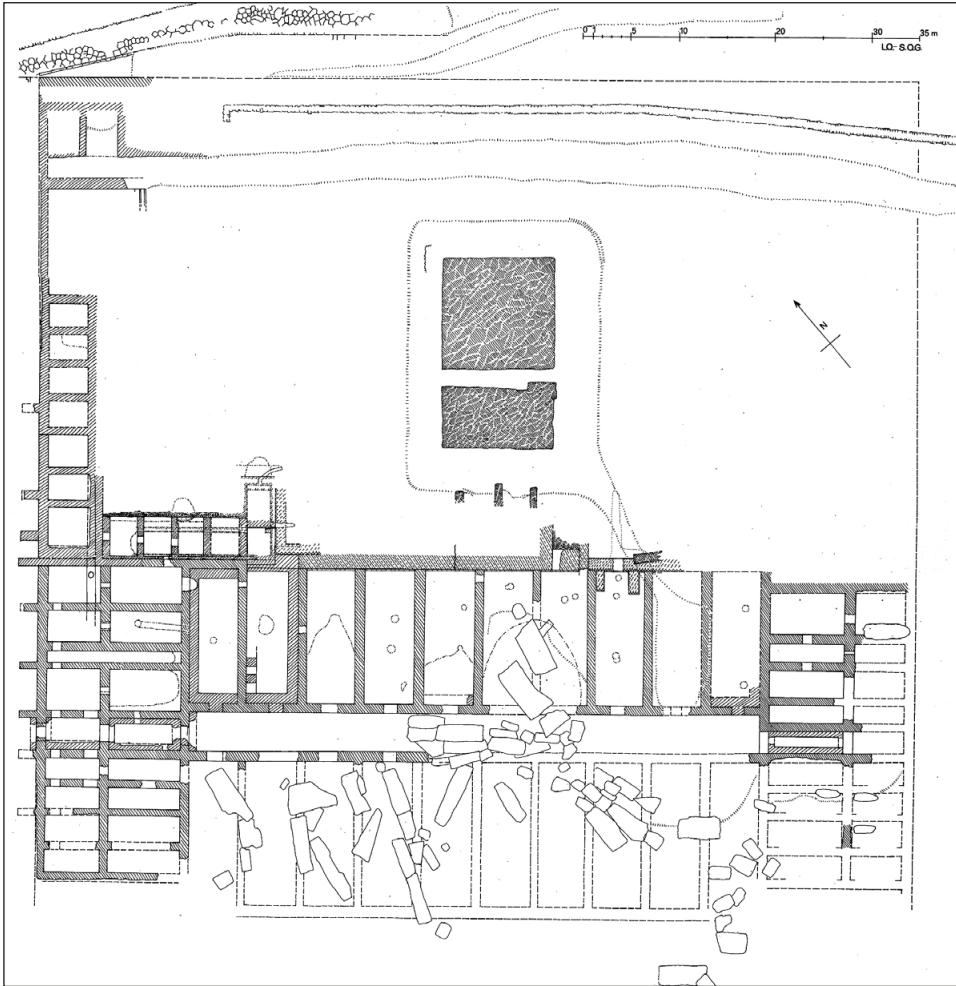


Fig. 3 – Levantamiento gráfico de la planta del santuario extraurbano (QUILICI, QUILICI GIGLI 1995).

En el marco del proyecto *Tusculum* se ha planteado organizar los datos arqueológicos, históricos y la documentación a disposición en un sistema coherente de gestión que sirva de contenedor de la investigación efectuada. Además de la existencia de un GIS sobre el yacimiento se propone en este artículo la aplicación de la metodología BIM a un caso de estudio complejo como el de santuario extraurbano con la idea que se pueda convertir en modelo para el desarrollo futuro de un una gestión coordinada y sistemática del conjunto arqueológico.

### 3. LA METODOLOGÍA BIM APLICADA AL SANTUARIO EXTRAURBANO DE *TUSCULUM*

Desde hace años, el empleo del Modelado de Información de la Edificación (Building Information Modelling-BIM) ha experimentado un gran desarrollo en los campos del diseño, construcción y mantenimiento de inmuebles, logrando una mayor optimización de los recursos y los tiempos necesarios en las diferentes etapas, gracias a la mejora de los flujos de información y el trabajo en equipo (EASTMAN *et al.* 2011). De forma general, este tipo de modelos digitales se caracterizan por incluir información de distinta naturaleza, que incluyen, además de la geometría del edificio, datos geográficos, relaciones espaciales, así como propiedades cuantitativas y cualitativas de sus componentes. Con estos modelos es posible gestionar las distintas etapas del ciclo de vida del edificio, desde los diseños preliminares, proyecto, construcción, uso, e incluso, llegado el caso, su demolición, pudiendo ser aprovechados por distintos agentes implicados en estos procesos.

La metodología BIM aplicada a la tutela de bienes muebles e inmuebles del Patrimonio Cultural ofrece, de forma análoga, una mayor eficiencia en el ámbito de los proyectos de intervención, fomentando la comunicación y gestión de la información en los equipos interdisciplinarios involucrados en este tipo de trabajo (ORENI *et al.* 2014; LOGOTHETIS *et al.* 2015; BRUNO, RONCELLA 2018). Pero, además, también puede constituir una herramienta con interesantes posibilidades en los campos del conocimiento, la gestión y la difusión (DORE, MURPHY 2017). Comprendidas bajo el concepto de HBIM (Heritage BIM), son numerosas las experiencias que han explorado la aplicación de esta metodología para la documentación y conservación de inmuebles históricos, siendo significativo el conjunto de aportaciones en el campo de la arqueología con características muy diferentes en cuanto a su escala y finalidad (SIMEONE *et al.* 2009; ANGULO FORNOS 2012; SCIANNA *et al.* 2014; GARAGNANI, GAUCCI, GOVI 2016; LICHERI 2016; CERA 2017; GARAGNANI 2017). Cabría destacar el desarrollo de procesos de trabajo y metodologías específicas para responder a las particularidades de la disciplina arqueológica. En este sentido se han desarrollado propuestas bajo términos como ABIM (BOSCO *et al.* 2018), abordando la creación del modelo mediante una estructura semántica que incluiría diferentes categorías de objetos paramétricos y sub-sistemas, o ArcheoBIM (GARAGNANI, GAUCCI 2020), adaptando la metodología general al campo particular de la reconstrucción arqueológica. En ambos casos se entiende la construcción del modelo sobre todo como un proceso cognitivo y un entorno interactivo donde se sintetizan la investigación, la conservación y la difusión.

Se puede establecer que, de forma general, un modelo representa algo en el mundo de forma simplificada, de manera que nos permite razonar sobre el



modelo y luego aplicar las conclusiones a la realidad modelada. En su propia definición se encuentra implícito un interés previo que establece un objetivo para el modelo, de forma que su creación parte de una intención determinada (GONZÁLEZ-PÉREZ 2018). La finalidad del modelo, por tanto, condicionará su naturaleza y su propio proceso de construcción, el cual también vendrá determinado por la tecnología disponible. En este sentido, las herramientas digitales han producido un giro sustancial en la forma de entender, generar y acceder a la información para producir conocimiento, modificando los procesos tradicionales de gestión y comunicación.

El objetivo del presente trabajo ha sido elaborar un modelo digital del santuario extraurbano de *Tusculum*, tanto en su estado original como en algunas de las fases principales de su historia, que por lo tanto incluya los restos conservados, así como aquellos otros elementos que son fruto de una propuesta de reconstrucción del conjunto. Se trata de un trabajo experimental que trata de explorar las posibilidades de este tipo de modelos como repositorios de la información actual del conjunto. Pero además pretende servir para el análisis y generación de conocimiento a partir del propio edificio.

Conviene apuntar que la construcción del modelo se ha realizado con la documentación planimétrica disponible en la actualidad. Por esto, y por los objetivos marcados inicialmente, se ha optado por alto grado de simplificación respecto a los elementos conservados, en la línea de otros trabajos desarrollados en los que la precisión geométrica queda en un segundo plano, priorizando una aproximación global al conjunto a modelar (RUA, GIL 2014; CASTELLANO ROMÁN, PINTO PUERTO 2019a). Es oportuno, quizás, señalar aquí la distinción entre precisión geométrica y nivel de conocimiento, puesto una toma de datos dimensionales muy precisa no equivaldría de forma automática a un alto nivel de conocimiento contenido en el modelo. Así, podríamos disponer de una nube de puntos a partir de un escáner laser terrestre de todo el conjunto y, sin embargo, no tener mucha más información de fases, materiales, técnicas constructivas, etc. (CASTELLANO ROMÁN, PINTO PUERTO 2019b).

Se persigue, en esta primera etapa, construir un modelo que recoja el conocimiento disponible en este momento y que tenga un carácter abierto y flexible, de forma que futuras investigaciones puedan enriquecerlo, complementarlo o corregirlo. Esto último constituye una de las ventajas esenciales de los modelos digitales frente a las herramientas de documentación tradicional. Pero, además, los modelos BIM permiten asociar la geometría de los distintos elementos a determinadas reglas y relaciones de forma que al modificar la posición de los niveles en altura la geometría se adapta paramétricamente a la nueva posición (por ejemplo, un nivel situado en el pavimento no conocido puede ser situado a su cota real cuando se documente a través de una campaña de excavaciones, modificándose de forma automática aquellos elementos relacionados con este nivel). Otra de las ventajas es la posibilidad de configurar

múltiples vistas y consultas a partir de la información contenida, de manera que se puedan obtener imágenes representativas con vistas a la difusión.

#### 4. PROCESO DE TRABAJO

El punto de partida para la construcción del modelo ha sido la planimetría elaborada por el Dr. Francesco De Stefano, a partir de la planta y secciones del santuario publicadas con anterioridad (QUILICI, QUILICI GIGLI 1995). Además, se ha revisado y compilado toda la iconografía y planimetría conocida: primeras hipótesis de su estado original (CANINA 1841), los dibujos de campo de las últimas excavaciones llevadas a cabo en el santuario (DUPRÉ RAVENTÓS, RIBALDI 2004), así como otros levantamientos históricos de los restos conservados, entre los que destacan los que realizara Tony Garnier durante su estancia en Roma a principios del siglo XX (PINON, DUPRÉ RAVENTÓS 2002).

Antes de comenzar el modelado, se georreferenciaron los dibujos base, de acuerdo con el mismo sistema de coordenadas utilizado por el SIG de *Tusculum* que se encuentra en fase de desarrollo en la Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma (EEHAR-CSIC). A partir de la información disponible en 2D se comenzaron a modelar los diferentes elementos que componían el modelo tridimensional (muros, contrafuertes, bóvedas, suelos, escaleras, etc.), siendo posible la asignación de distintas propiedades a cada uno de ellos. Se estableció un sistema de referencia en base a una serie de niveles en altura, que marcaban el comienzo y fin de alguno de los elementos constructivos, las alineaciones de sus muros, y los diferentes espacios (Fig. 4). Para estos últimos se siguió la numeración ya establecida anteriormente (QUILICI, QUILICI GIGLI 1995). A partir de este sistema de referencia se asignó un identificador unívoco a cada uno de los diferentes componentes del modelo, tanto espacios como elementos constructivos.

El muro M04/A-O, que formaliza el límite por el SO de la plataforma del santuario en las primeras fases, fue el elegido para llevar a cabo un análisis más detallado. En este se aprecian las discontinuidades, cambios de material y técnicas constructivas que evidencian las distintas fases de ampliación de la terraza primitiva. La identificación de las estas se ha realizado a través de una lectura estratigráfica-constructiva de la cara visible del muro (Fig. 5).

Con objeto de completar la información planimétrica disponible se llevó a cabo una serie de levantamientos mediante fotogrametría digital convergente en las estancias 33 a la 39. A partir de estos se obtuvieron una serie de ortofotografías del alzado del muro, lo que permitió ubicar las discontinuidades y elementos singulares de la fábrica. A raíz del análisis arquitectónico y el estudio de las técnicas edilicias (PIZZO 2010), en relación con las transformaciones del conjunto, se ha podido reconocer la existencia de 5 fases que modifican las hipótesis conocidas en favor de una mayor actividad constructiva. Esta

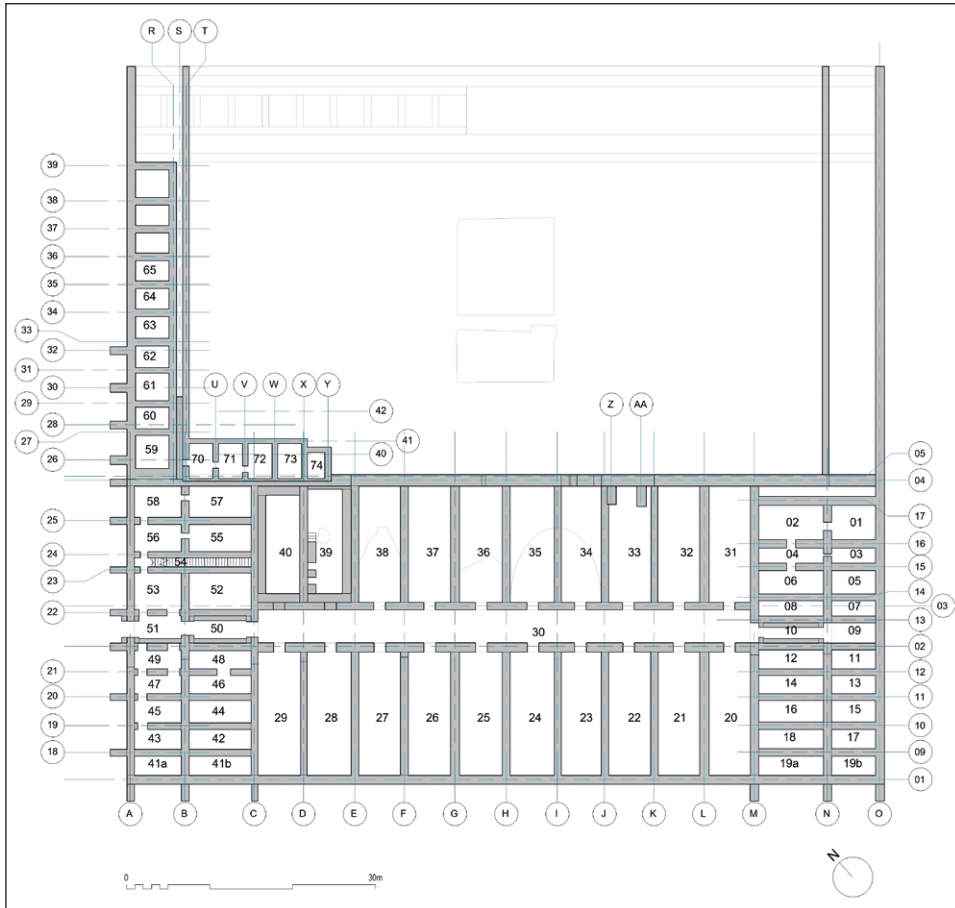


Fig. 4 – Planta del santuario. Sistema de referencia utilizado para los elementos constructivos y espacios.

cronología ha sido tenida en cuenta a la hora de construir el modelo, de forma que, además de representar el estado actual, se ha modelado el edificio en las dos últimas fases de su construcción y reforma (fase 4 y 5), de las cuales se dispone de más información (Fig. 6). El escaso número de elementos visibles de las etapas anteriores no permitirían hoy en día proponer una hipótesis consistente de reconstrucción. No obstante, esta división en fases de la historia del edificio podría modificarse agrupando algunas de ellas o introduciendo fases intermedias.

El modelo ha sido desarrollado mediante Autodesk Revit 2020, a partir de un proceso de simplificación y abstracción de la realidad construida,

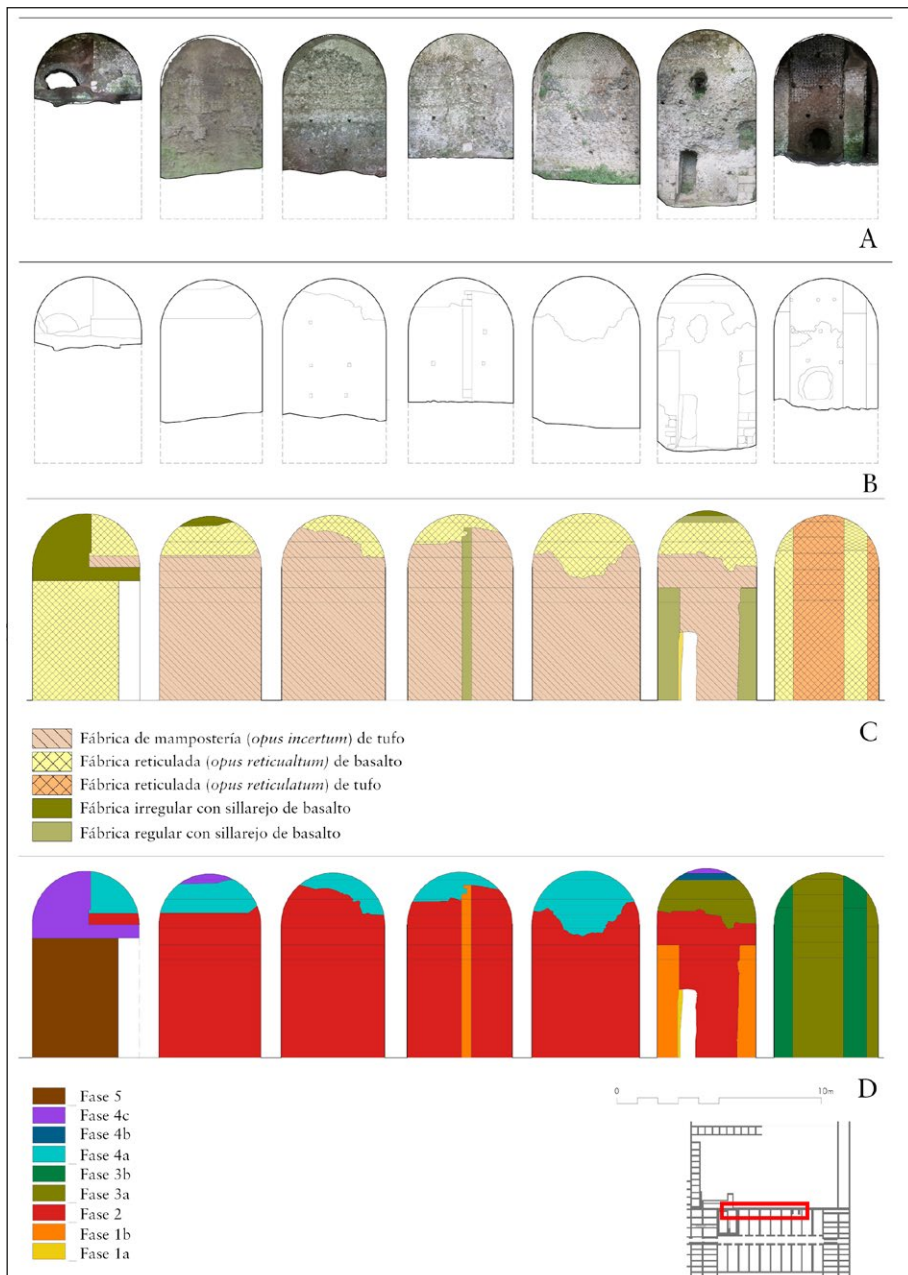


Fig. 5 – Análisis del alzado del muro M04/A-O: a) orto-fotografías; b) discontinuidades en la fábrica; c) identificación de técnicas constructivas; d) identificación de fases cronológicas.



Fig. 6 – Vistas axonómicas del santuario en su estado actual (izquierda) y en la fase 5 (derecha).

ELEMENTOS	ENTIDADES REVIT	PROPIEDADES	TIPO PARAMETRO	EJEMPLO	OBSERVACIONES
ESPACIOS	Habitación	<b>Accesible en la actualidad</b>	SI / NO	SI / NO	
		<b>Nomenclatura</b>	Texto	E01; E02; E03...	Según Quilici+Quilici (1995)
		<b>Uso</b>	Texto	Ninfeo; ...	
		<b>Observaciones</b>	Texto líneas múltiples		
<hr/>					
ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	Suelos Muros Contrafuertes Bóvedas Arcos Techos Escaleras Cimentaciones Piezas (*) Escaleras Columna Cubierta Entablamento	<b>Nomenclatura</b>	Texto	M04/E-F; C20/A; B33....	
		<b>Ubicación</b>	Texto	Templo / Plataforma / Ninfeo	
		<b>Fase constructiva (*)</b>	FASE	FASE 1: (150-100 a.C.)	Estructuras iniciales
			Construcción	Fase 1a	Tramo de muro perpendicular
			Uso	Fase 1b	Dos contrafuertes
			Derribo )	FASE 2: (100-50 a.C.)	Primera plataforma
				FASE 3: (< 54 d.C.)	Ninfeo y ampliación
				Fase 3a	Ampliación de terraza
				Fase 3b	Contrafuertes de refuerzo
				FASE 4: (>54 d.C.)	Sostrucciones
				Fase 4a	Ampliación en altura principal
				Fase 4b	Ampliación
				Fase 4c	Ampliación y sostrucciones
				FASE 5: (??)	Modificaciones cisterna y refuerzo de muros
		...	...	<b>Cronología (*)</b>	Texto
		<b>Tipo técnica constructiva (*)</b>	Texto	Opus reticulatum ...	Codificación técnicas constructivas
		<b>Subtipo técnica constructiva (*)</b>	Texto	Piezas tufo 5x5 cm mortero gr	Dimensiones de elementos individuales, tipo de mortero...
		<b>Grado de fiabilidad (*)</b>	Texto	Existente Alta Media Baja	Existente Documentado (fotografías, planimetría) Hipótesis (simetría, continuidad) Hipótesis (referentes)
		<b>Observaciones (*)</b>	Texto líneas múltiples		

Fig. 7 – Tabla resumen de las propiedades asociadas a los elementos constructivos y espacios del modelo.

estableciendo una clasificación básica en base a la funcionalidad de los elementos constructivos. Como otras herramientas BIM, el programa permite insertar un gran número de elementos predefinidos procedentes de diferentes bibliotecas; sin embargo, este tipo de elementos suelen estar concebidos para la edificación de nueva planta. Salvo algunas experiencias que tratan de suplir estas carencias en la arquitectura histórica (AUBIN 2013; BAIK *et al.* 2014), se evidencian todavía las limitaciones a la hora de aplicar las “familias” por defecto que ofrecen las aplicaciones BIM a la arquitectura histórica, caracterizada por la falta de regularidad geométrica o estandarización, y donde

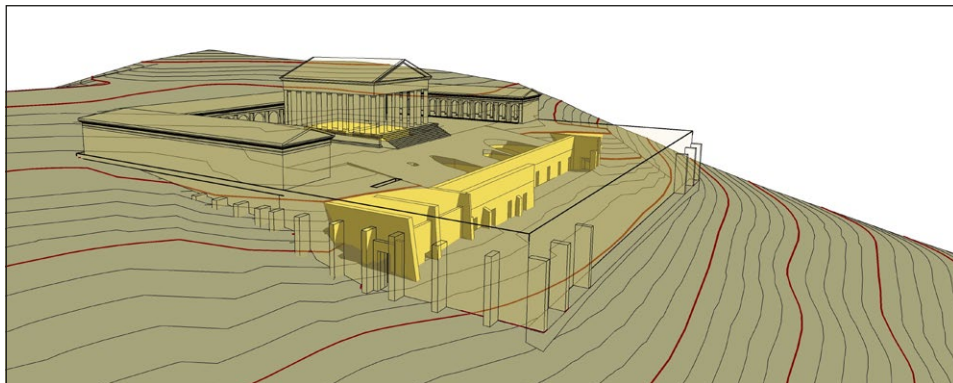


Fig. 8 – Perspectiva donde se superpone el estado actual y la hipótesis de reconstrucción de la fase 5.

prima la singularidad de cada elemento constructivo. El uso de elementos paramétricos se enfrenta, en este sentido, a diversas dificultades al tratar de modelar convenientemente geometrías irregulares, más aún cuando, como ocurre normalmente en el campo de la arqueología, el paso del tiempo da como resultado fragmentos de los elementos originales (SCIANNA *et al.* 2015; SCIANNA 2020).

En este caso, dada la sencillez de los elementos considerados se ha optado por modelar de forma individualizada cada uno de ellos mediante componentes “modelados *in situ*”. A estos elementos se les asignó una de las categorías, o entidades, en las que el programa clasifica los elementos, y en base a estas se les incorporó una serie de parámetros personalizados, tanto a los elementos constructivos como a los espacios (Fig. 7). Dentro de las distintas propiedades de los elementos, una fundamental es la asignación de una fase de construcción, o creación, y otra de derribo, o desaparición, lo que permite reflejar el carácter diacrónico del edificio. Otra de las posibilidades que ofrece Revit es modelar tanto elementos completos como hacer una subdivisión de estos en “piezas”, pudiendo asignar a estas propiedades y valores que pueden ser diferentes de los del elemento completo original. En las distintas vistas se puede configurar la visualización del modelo en elementos completos, piezas, o ambos a la vez. En el modelo del santuario esta funcionalidad ha sido empleada en dos sentidos complementarios. Por una parte, se ha utilizado para distinguir, dentro de un mismo elemento, aquellas partes se han conservado y aquellas que han desaparecido (Fig. 8). Por otro lado, ha permitido en el muro analizado con mayor detalle distinguir distintas unidades en base a sus técnicas constructivas y cronología.

En un futuro, además de los elementos físicos y espaciales modelados sería interesante explorar la posibilidad de modelar elementos resultado de



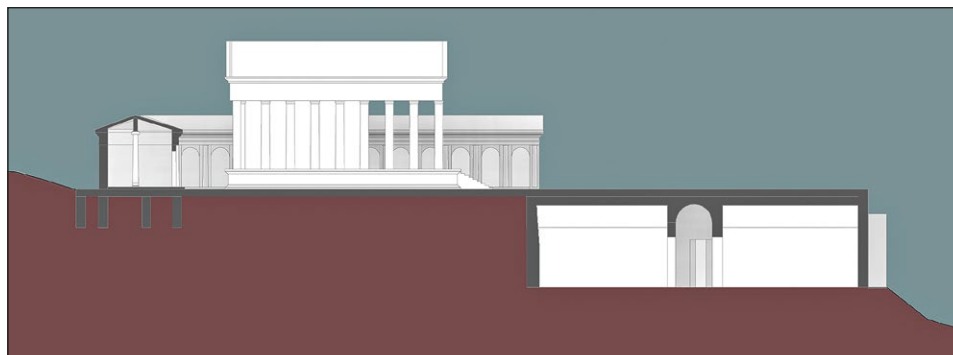


Fig. 9 – Sección longitudinal del santuario generada a partir del modelo tridimensional.

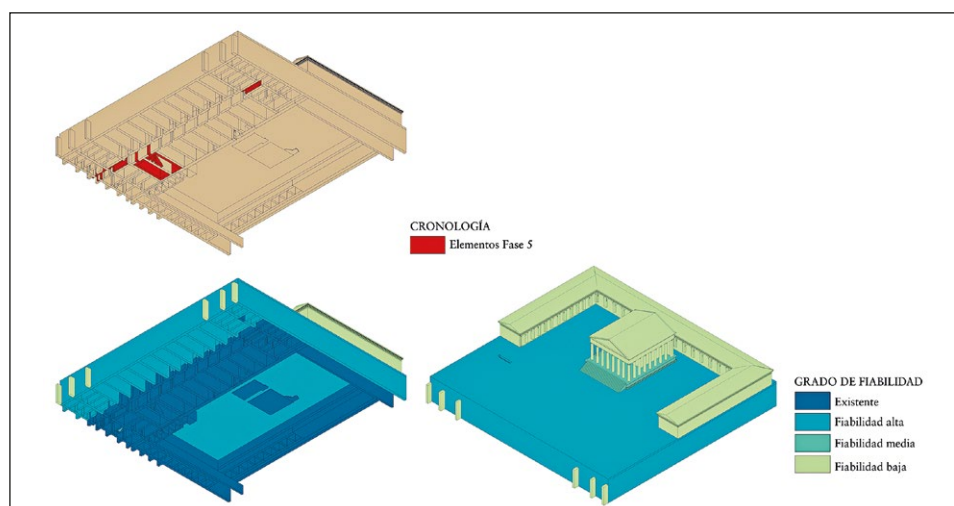


Fig. 10 – Representación axonométrica inferior del modelo: elementos constructivos pertenecientes a la fase 5 / grado de fiabilidad.

un análisis, por ejemplo, patológico, donde se puedan ubicar en el modelo lesiones de distintas características, asignando diferentes atributos de gravedad (ANGULO FORNOS 2012).

## 5. RESULTADOS

A partir del modelo tridimensional, se pueden obtener, mediante vistas fácilmente configurables distintas proyecciones diédricas convencionales

– plantas, secciones y alzados – así como axonometrías y perspectivas (Fig. 9). La versatilidad de este tipo de herramientas en la personalización de estas vistas permite obtener diversas consultas gráficas interrogando al modelo según las propiedades otorgadas a los distintos elementos. En este sentido se puede resaltar la ventaja que constituye el poder visualizar el modelo en cualquiera de las fases evolutivas consideradas y siempre teniendo la certeza de que será dimensionalmente consistente en todas las vistas. De esta forma se pueden obtener imágenes que describan la diferente cronología de la construcción, con un claro potencial comunicativo, o individualizar determinados elementos según los valores de algunas de sus propiedades (Fig. 10).

Para caracterizar el grado de fiabilidad de aquellos componentes que no se conservan y que por lo tanto corresponden a una hipótesis gráfica de un estado pasado del edificio se ha incluido una propiedad en base a la información disponible. En este sentido, además de los elementos conservados, se han modelado otros que se han podido documentar mediante planimetría histórica o fotografías, se basan en relaciones de funcionalidad, contigüidad o simetría, o se han planteado a partir de otros referentes tipológicos. No todos los elementos restituidos se basan en un mismo nivel de conocimiento, por lo que parece pertinente documentar, siempre que sea posible, los distintos niveles de certeza del proceso de restitución gráfica.

## 6. CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada parte de la premisa de que los modelos digitales pueden suponer un lugar de convergencia de los distintos campos de conocimiento que inciden en el Patrimonio Cultural arquitectónico y arqueológico, pudiendo servir de apoyo para la toma de decisiones en relación con su conocimiento, gestión y difusión. Es por esto que los objetivos que se propongan, así como los recursos disponibles en cada caso van a determinar las estrategias en la construcción del modelo. En este sentido, parece imprescindible que la lectura diacrónica del edificio esté presente desde el primer momento, haciendo necesario un análisis profundo de forma previa y paralela a la construcción del modelo.

El modelo del santuario de *Tusculum* se ha planteado como la primera etapa de un trabajo colaborativo entre distintas disciplinas abierto a futuras modificaciones, transformaciones e incluso conexiones con otros modelos de escala territorial como los sistemas de información geográfica (SIG). En definitiva, se plantea en este caso un modelo que acompañe a los avances en el conocimiento del edificio, de forma que los resultados de futuras campañas de excavación, o tomas de datos para su documentación puedan ir alimentando el resultado aquí presentado.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto I+D+i del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España “TUTSOSMOD. Tutela Sostenible del Patrimonio Cultural a través de Modelos Digitales BIM y SIG. Contribución al conocimiento e innovación social” (HAR2016-78113-R) y del proyecto *Tusculum* de la Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma (EEHAR-CSIC). Nos gustaría agradecer por su ayuda en este trabajo a Francesco De Stefano y a José Carlos Alemán Izquierdo.

JOSÉ MARÍA GUERRERO VEGA

Universidad de Sevilla

jmgv@us.es

ANTONIO PIZZO

Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma (EEHAR-CSIC)

antonio.pizzo@eehar.csic.es

### BIBLIOGRAFIA

- ANGULO FORNOS R. 2012, *Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas*, «Arqueología de la Arquitectura», 9, 11-25.
- ASHBY T. 1910, *The Classical Topography of the Roman Campagna. III (The Via Latina), Section II*, «Papers of the British School at Rome», 5, 214-425.
- ASHBY T. 1927, *The Roman Campagna in Classical Times*, London, Ernest Benn.
- AUBIN P.F. 2013, *Renaissance Revit: Creating Classical Architecture with Modern Software*, Oak Lawn, G3B Press.
- BAIK A., ALITANY A., BOEHM J., ROBSON S. 2014, *Jeddah Historical Building Information Modelling “JHBIM” - Object Library*, «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5, 41-47.
- BORDA M. 1943, *Monumenti archeologici tuscolani nel Castello di Agliè*, Roma, Libreria dello Stato.
- BOSCO A. et al. 2018, *A virtual reconstruction of the Sun Temple of Niuserra: From scans to ABIM*, in M. MATSUMOTO, E. ULEBERG (eds.), *CAA2016: Oceans of Data. Proceedings of the 44<sup>th</sup> Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Oslo 2016)*, Oxford, Archaeopress, 377-388.
- BRUNO N., RONCELLA R. 2018, *A restoration oriented HBIM system for cultural heritage documentation: The case study of Parma Cathedral*, «ISPRS, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2, 171-178.
- CANINA L. 1841, *Descrizione dell'antico Tusculo*, Roma.
- CASTELLANO ROMÁN M., PINTO PUERTO F. 2019a, *HBIM oriented towards the master plan of the Charterhouse of Jerez (Cádiz, Spain)*, «ISPRS, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W15, 285-290.
- CASTELLANO ROMÁN M., PINTO PUERTO F. 2019b, *Dimensions and levels of knowledge in Heritage Building Information Modelling, HBIM: The model of the Charterhouse of Jerez (Cádiz, Spain)*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 14, e00110.

- CERA V. 2017, *Knowledge and valorization of historical sites through low-cost, gaming sensors and H-BIM models. The case study of Litternum*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 497-506 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.40>).
- COARELLI F. 1981, *Dintorni di Roma*, Roma, Laterza.
- DE STEFANO F., PIZZO A. 2020, *Nuove osservazioni sul tempio del santuario extraurbano di Tusculum*, «Journal of Roman Archaeology», 33, 73-92.
- DORE C., MURPHY M. 2017, *Current state of the art historic building information modelling*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives», 42, 2W5, 185-192.
- DUPRÉ RAVENTÓS X., RIBALDI R. 2004, *Il santuario extraurbano di Tusculum: a proposito dell'intervento di scavo del 1997*, in Religio. *Santuari ed ex voto nel Lazio meridionale, Atti della giornata di studi (Terracina 2020)*, Terracina, Comune di Terracina, 213-223.
- EASTMAN C., TEICHOLZ P., SACKS R., LISTON K. 2011, *BIM Handbook. A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2ª ed., Hoboken, John Wiley & Sons.
- GARAGNANI S. 2017, *Archaeological Building Information Modeling: Beyond scalable representation of architecture and archaeology*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 141-149 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.09>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A. 2017, *Knowledge, Analysis and Innovative Methods for the Study and the Dissemination of Ancient Urban Areas, Proceedings of the KAINUA 2017 International Conference in Honour of Professor Giuseppe Sassatelli's 70<sup>th</sup> Birthday (Bologna 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28.2.
- GARAGNANI S., GAUCCI A. 2020, *The ArchaeoBIM method and the role of digital models in archaeology*, in A. CARVALE, P. MOSCATI (eds.), *Logic and Computing. The Underlying Basis of Digital Archaeology. Proceedings of the MetroArchaeo 2019 Special Session, 2019 IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (Florence 2019)*, «Archeologia e Calcolatori», 31.2, 181-188 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.2.2020.17>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GOVI E. 2016, *ArchaeoBIM: dallo scavo al Building Information Modeling di una struttura sepolta. Il caso del tempio tuscanico di Uni a Marzabotto*, «Archeologia e Calcolatori», 27, 251-270 (<https://doi.org/10.19282/AC.27.2016.13>).
- GHINI G. 2002, *Il santuario extraurbano di Tusculum*, in G. CAPELLI, S. PASQUALI (eds.), *L. Canina e la riscoperta di un'antica città*, Roma, Campisano, 195-202.
- GONZÁLEZ-PÉREZ C. 2018, *Information Modelling for Archaeology and Anthropology: Software Engineering Principles for Cultural Heritage*, Cham, Springer.
- GROSSI GONDI F. 1904, *Di due ville imperiali nel Tuscolano*, «Bullettino della Commissione Archeologica di Roma», 32, 111-146.
- GROSSI GONDI F. 1908, *Il Tuscolano nell'età classica*, Roma, Loescher.
- LICHERI A. 2016, *Prospettive sull'utilizzo del Building Information Modelling (BIM) in archeologia*, in P. BASSO, A. CARVALE, P. GROSSI (eds.), *ARCHEOFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica. Atti del IX Workshop (Verona 2014)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 8, 197-202 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_8/25\\_Licheri.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_8/25_Licheri.pdf)).
- LOGOTHETIS S., DELINASIOU A., STYLIANIDIS E. 2015, *Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review*, «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W3, 5W3, 177-183.
- MCCRACKEN G.E. 1934, *A History of Ancient Tusculum*, Princeton, Princeton University.
- MCCRACKEN G.E. 1939, *A History of Ancient Tusculum*, Washington D.C., American Documentation Institute.

- ORENI D., BRUMANA R., DELLA TORRE S., BANFI F., BARAZZETTI L., PREVITALI M. 2014, *Survey turned into HBIM: The restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila)*, «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 2, 5, 267-273.
- PINON P., DUPRÉ RAVENTÓS X. 2002, *Tusculum, la città antica*, in *Italia antiqua. Envois degli architetti francesi (1811-1950), Italia e area mediterranea*, Catalogo della mostra (Parigi, Roma 2002), Paris, École Nationale Supérieure des Beaux-Arts, 154-176.
- PIZZO A. 2010, *Propuesta para la documentación y clasificación de las técnicas constructivas romanas*, «Arqueologia de la Arquitectura», 7, 277-286.
- QUILICI L., QUILICI GIGLI S. 1991, *Tusculum ed il parco archeologico*, Roma, XI Comunità Montana del Lazio “Castelli romani e prenestini”.
- QUILICI L., QUILICI GIGLI S. 1995, *Un grande santuario fuori della porta occidentale di Tusculum*, in S. QUILICI GIGLI (ed.), *Archeologia laziale XII: dodicesimo incontro di studio del Comitato per l'Archeologia laziale*, Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 509-534.
- RUA H., GIL A. 2014, *Automation in heritage. Parametric and associative design strategies to model inaccessible monuments: The case-study of Eighteenth-century Lisbon Aguas Livres Aqueduct*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 1, 3-4, 82-91.
- SALCEDO F. 2000, “Tiberio” eroizzato, in X. DUPRÉ RAVENTÓS (ed.), *Scavi archeologici di Tusculum. Rapporti preliminari delle campagne 1994-1999*, Roma, XI Comunità Montana del Lazio Castelli romani e prenestini, EEHAR, 516-517.
- SCIANNA A., GAGLIO G.F., LA GUARDIA M. 2020, *HBIM data management in historical and archaeological buildings*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 231-252 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.11>).
- SCIANNA A., GRISTINA S., PALIAGA S. 2014, *Experimental BIM applications in archaeology: A work-flow*, «Lecture Notes in Computer Science», 8740, 490-498.
- SCIANNA A., SERLORENZI M., GRISTINA S., FILIPPI M., PALIAGA S. 2015, *Sperimentazione di tecniche BIM sull'archeologia romana: il caso delle strutture rinvenute all'interno della cripta della chiesa dei SS. Sergio e Bacco in Roma*, in *Il SITAR nella Rete della ricerca italiana. Verso la conoscenza archeologica condivisa. Atti del III Convegno (Roma 2013)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 7, 199-212 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_7/22\\_Scianna\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_7/22_Scianna_et_al.pdf)).
- SIMEONE D., CURSI S., TOLDO I., CARRARA G. 2009, *B(H)IM - Built Heritage Information Modelling. Extending BIM approach to historical and archaeological heritage representation*, «eCAADe», 1, August, 613-622.
- TOMASSETTI G. 1926, *La Campagna Romana. Antica, medievale e moderna. IV, Via Latina*, Roma, Loescher.

## ABSTRACT

Building Information Models (BIM) are presented as a tool with interesting possibilities in the fields of knowledge, management and dissemination of architectural and archaeological Cultural Heritage. This study describes the work process and the results of the development of such a digital model for the extra-urban sanctuary of the city of *Tusculum*, one of the best-preserved buildings of the site, yet less known and studied. Within the framework of a new phase of research on the archaeological site, the stratigraphic and constructive analysis of the wall that delimited the original terrace of the complex has been carried out. This has allowed to determine a chronological sequence and to establish the bases for the modelling of both the current state and some of its evolution phases, thus enabling a proposal for restitution of some of the previous states of the complex. The aim was to build a model that synthesizes the current knowledge and that has open and flexible characteristics, so that future research can enhance, complement or correct it.

MORPHOMETRIC ANALYSIS  
FOR GEOARCHAEOLOGICAL RESEARCH: FROM TESTING  
DIFFERENT METHODS TO RESULTS VERIFICATION  
IN THE ROMAGNA PLAIN<sup>1</sup>

1. INTRODUCTION

Geomorphological factors always had a relevant role in determining pre-historic and historic settlement choices. This is particularly true within alluvial plains, where flooding risk has always been a major factor in determining their suitability for human exploitation. In these types of environments, ancient human communities often looked for areas raised above the surrounding landscape, like fluvial ridges. These phenomena driving settlement choices have been studied for different periods and different areas within the Po Valley in Italy, especially for its southern part (e.g. for Bronze Age: BALISTA 1997; CREMASCHI 1997; CATTANI 2008; for the Roman period: FRANCESCHELLI, MARABINI 2004; for the Middle Ages: FICARA 2006; MANCASSOLA 2012; BRANDOLINI, CARRER 2020).

On the other hand, since the 60s-80s geomorphology was recognized as a fundamental variable in landscape archaeology, which deeply influences the research results (e.g. VITA-FINZI 1969; AMMERMAN, BONARDI 1981; for the area of interest: CAVALAZZI 2020). The most common reaction to this awareness was to increase the intensity of the research, while the attention was less frequently focused on the quantification and correction of this kind of bias (NANCE 1983; TERRENATO 2000; VAN LEUSEN 2002; CASAROTTO *et al.* 2018).

One of the possible approaches to gather geomorphological insights is through the use of morphometric analyses on Digital Elevation Models (DEMs), which were developed since the second half of the 20<sup>th</sup> century. During the last twenty years, more and more archaeological studies are implementing these methods within their tools to reach a deeper understanding of historical phenomena, but also to better assess existing geopedological

<sup>1</sup> Michele Abballe contributed to sections 2, 3, 4.4, 4.5, 5, 6.1, 6.2, and 7, while Marco Cavalazzi contributed to sections 1, 4.1, 4.2, 4.3, and 6.2. Figures 4, 5, 7, and 8 were created by the first author, 1 and 9 by the second author, while both authors realized images 2, 3, and 6. The first author was funded through a Doctoral Scholarship by the Special Research Fund of Ghent University (BOF) and a Grant for a long stay abroad by the Research Foundation – Flanders (FWO). The second author received a post-doc research grant at Bologna University funded by the Comitato per i Beni Culturali del Comune di Lugo, Cotignola and Lugo communes, and a Climate-Kic Action Grant (European Institute of Innovation & Technology, 2015).



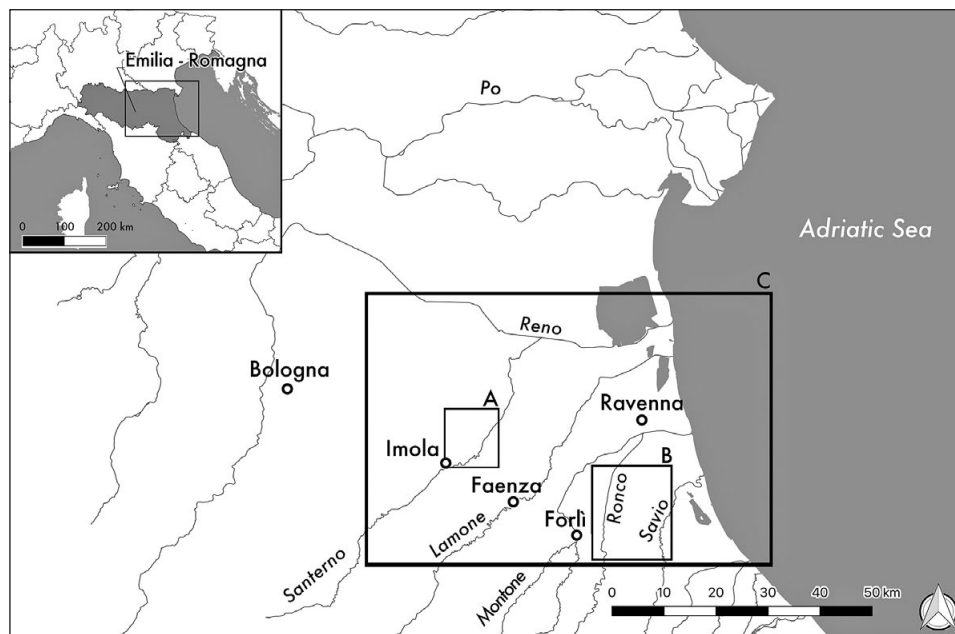


Fig. 1 – Area of interest with major cities, rivers, two case studies (A-B), and the extension of the processed DEMs (C).

biases. Among the methods used, we find the Topographic Wetness Index or TWI (ANDRESEN 2008; CITTER, PATACCHINI 2017; SCHMIDT, WERTHER, ZIELHOFFER 2018; MERTEL, ONDREJKA, ŠABATOVÁ 2018), but also the Topographic Position Index or TPI, often used together with the Deviation from mean Elevation or DEV (DE REU *et al.* 2013; ARGYRIOU, TEEUW, SARRIS 2017; MERTEL, ONDREJKA, ŠABATOVÁ 2018). Recently, a new algorithm has been developed by Hector ORENGO and Cameron PETRIE (2018) for the visual interpretation of landforms using DEMs.

The Multi-Scale Relief Model or MSRM is based on the same approach of pyramidal representations used in computer graphics. The algorithm creates multiple images using different low pass filters and then compares the results, to highlight features as ridges, bluff lines and dune fields. According to the authors, «MSRM aims to extend microrelief detection applications to multiscale features and by incorporating the use of multiscale DTMs, including those of global scope, to the interpretation of geomorphological features» (ORENGO, PETRIE 2018, 1362). However, despite the use of morphometric algorithms for archaeological purposes is increasing, this is rarely followed by on-field evaluations.

Therefore, the first aim of this paper is to compare the performance of the novel MSRM algorithm to the most used methods in the literature, that are TWI, TPI and DEV (section 5). The study area to test these methods is the Romagna plain (Italy), the south-eastern part of the Po Valley (Fig. 1, C). The second aim is to compare the application of these methods to a global DEM such as the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and a local DEM based on Ground Control Points (GCP) (section 5). While the first represents one of the free and ready-to-use global dataset available, the second was created interpolating thousands of GCPs, in a time-consuming procedure. However, the second dataset offers the advantage that modern artificial features have been already removed. Finally, since all results depend on the algorithm or sampling strategy used (PIKE, EVANS, HENGL 2009), we selected two smaller case studies for geoarchaeological verification of the most graphically-clear results (Fig. 1, A-B). We consider this step essential to evaluate the significance of the results and check if they can contribute to geomorphological and archaeological questions (sections 6.1 and 6.2).

## 2. CASE STUDY: THE ROMAGNA PLAIN

The study area chosen to test these different morphometric algorithms is the Romagna plain, which covers a large part of the eastern half of the Emilia-Romagna region, in Italy (Fig. 1). The area stretches from the Apennines mountain range to the S, the Reno river to the N and the Adriatic Sea to the E. It is crossed by several rivers and major streams, respectively from W to E: Sillaro, Santerno, Senio, Lamone, Montone, Ronco, Bevano, and Savio. Naturally, these watercourses tend to build up levees raised over the landscape. Furthermore, natural and anthropic induced avulsions created palaeochannels that can have preserved their microrelief also in later periods.

The transformations of the local river network have been intensively studied since the last century, initially using mainly geological data, historical cartography and written sources analysis. A precocious example is the work of Pietro ZANGHERI (1927) on the river Montone near Forlì or the more complete study by Lucio GAMBÌ (1949) on the whole Romagna, followed by several more localized researches (RONCUZZI, VEGGI 1968; VEGGIANI 1973, 1975, 1976, 1990, 1995). In the last decades, other scholars have re-studied the area with a geomorphological approach, based on the interpretation of contour lines (CREMONINI 1994, 2003; FRANCESCHELLI, MARABINI 2007; MARABINI, VAI 2020). In general, the palaeohydrography has been reconstructed satisfactorily for the Modern period and the Late Middle Ages, thanks to the abundance of written and cartographic sources, while it is less clear for earlier periods due to decreasing data availability (ABBALLE 2021).

### 3. DATA ACQUISITION AND PREPROCESSING

For the morphometric analysis, two different elevation datasets have been used. The first one is represented by the SRTM 1 Arc-Second Global, at 30 m resolution<sup>2</sup>. The second dataset was created interpolating GCP manually recorded by the Emilia-Romagna region<sup>3</sup>. The downloaded dataset, composed of almost 400,000 points, still included modern artefacts such as artificial fluvial banks as well as the highway, streets and railroads. Therefore, all elevation points not classified as “isolato al suolo” (i.e. recorded on the bare soil) were removed. The resulting 160,000 points dataset was then interpolated using the Inverse Distance Weighting method (MITAS, MITASOVA 2005), to create a local DEM at 10 m resolution devoid of modern interferences. This DEM should represent the most precise reconstruction of the original topographic surface of the study area and it will be used to make comparisons with the results of the SRTM, which still contains modern artificial features.

### 4. METHODS

The first three methods were performed using SAGA, a Free Open Source Software (FOSS) GIS, that can produce a large set of DEM-derived variables (CONRAD *et al.* 2015)<sup>4</sup>. To apply the novel MSRM algorithm, we used Google Earth Engine (or GEE), a web-based geospatial computing platform created by Google (GORELICK *et al.* 2017)<sup>5</sup>.

#### 4.1 Topographic Wetness Index (TWI)

TWI quantifies the potential soil humidity and it is calculated using the logarithm of the ratio between the Catchment Area (CA) and the tangent of Slope (BEVEN, KIRKBY 1979). Anyhow, we chose the method proposed in HJERDT *et al.* (2004) to compute it, i.e. the Specific Catchment Area (SCA), instead of the CA, and the Downslope Distance Gradient (DDG), instead of the Slope<sup>6</sup>. We used the Flow width and Specific Catchment Area (GRUBER, PECKHAM 2009) and the Downslope Distance Gradient (HJERDT *et al.* 2004)

<sup>2</sup> Tiles “n44\_e011” and “n44\_e12” were downloaded on 24<sup>th</sup> April 2018, from the website <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed on 27<sup>th</sup> December 2020).

<sup>3</sup> These data were retrieved on 21<sup>st</sup> December 2018, from <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/download-data> (accessed on 27<sup>th</sup> December 2020).

<sup>4</sup> The official site of the project is available at <http://www.saga-gis.org/en/> (accessed on 27<sup>th</sup> December 2020).

<sup>5</sup> The platform is available upon registration at <https://earthengine.google.com/> (accessed on 27<sup>th</sup> December 2020).

<sup>6</sup> In SCA we chose the Multiple Flow Direction (MDF) method, while in DDG module we set the vertical distance to 5.

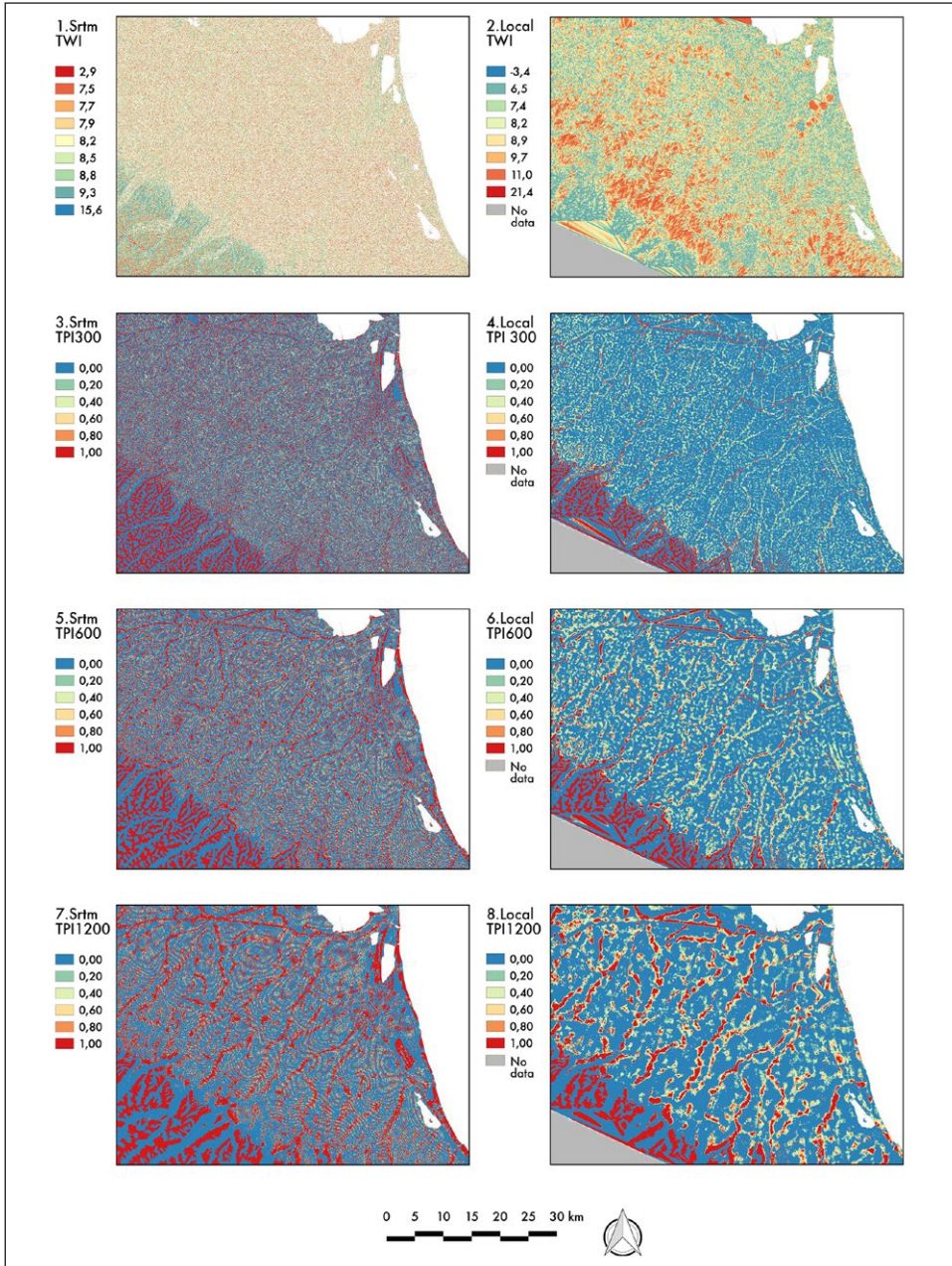


Fig. 2 – Elaborations of TWI (nos. 1-2) and TPI (nos. 3-8) at 300 m (TPI300), 600 m (TPI600), and 1200 m (TPI1200) for both SRTM (left) and Local DEMs (right).

modules to obtain the SCA and the DDG. Finally, we computed the TWI for both SRTM and Local DEMs (Fig. 2, 1-2).

#### 4.2 *Topographic Position Index (TPI)*

The TPI algorithm compares the cell value of a DEM with the mean of its neighbours (GUISAN *et al.* 1999; WEISS 2001). The neighbourhood is settled by the user, choosing the inner and outer radius ( $R$ ) of an annulus area of research (Scale Factor). If the TPI value is major than 0, the point elevation is higher than the mean elevation of the neighbourhood (a ridge); vice versa it happens when the TPI value is minor than 0 (a valley). Values near 0 identify flat areas or with a constant slope (WEISS 2001, fig. 2a). The TPI depends by the scale of analysis: what it is flat at a fine-scale could be different at a smaller scale (WEISS 2001), and big  $R$  values identify only major landscape units, while a lower  $R$  value detects also smaller geomorphological elements, like ridges and valleys (GROHMANN, RICCOMINI 2009; DE REU *et al.* 2013, 42). We present here the results of the TPI application to the SRTM and the Local DEMs (Fig. 2, 3-8), using no distance weighting and three different annuli (inner and outer  $R$ ): 150-300 m (TPI 300); 300-600 m (TPI 600); 600-1200 m (TPI 1200).

#### 4.3 *Deviation from mean Elevation (DEV)*

DEV measures the relative topographic position of the central point within a predetermined neighbourhood, based on the TPI divided by the standard deviation (SD) of elevation (WILSON, GALLANT 2000, 74-75). If the results from DEV are positive, the central point is situated higher than its average neighbourhood, while they are negative when the central point is situated lower than its average neighbourhood. To compute SD we chose three windows with an annulus shape; the inner and outer radii were: 150-300 m; 300-600 m; 600-1200 m. Each TPI raster has been divided with the related SD raster, by pairing the same radius measure (e.g. SD 150-300 m with TPI 150-300 m). We present here the results of the DEV application to the SRTM and the Local DEMs, with these three different scales (Fig. 3, 1-6): 150-300 m (DEV 300); 300-600 m (DEV 600); 600-1200 m (DEV 1200).

#### 4.4 *Multi-scale relief model (MSRM)*

The MSRM algorithm was the last method being tested using the original code made available by the authors (ORENGO, PETRIE 2018, Supporting Information), which was slightly changed to focus on the Romagna region. Other options that need to be defined are the maximum and minimum filters values ( $f_{\max}$  or  $f_{\min}$ ). For both DEMs the use of a  $f_{\min}$ , close to the resolution of the raster has been chosen to include the smallest features of the landscape,



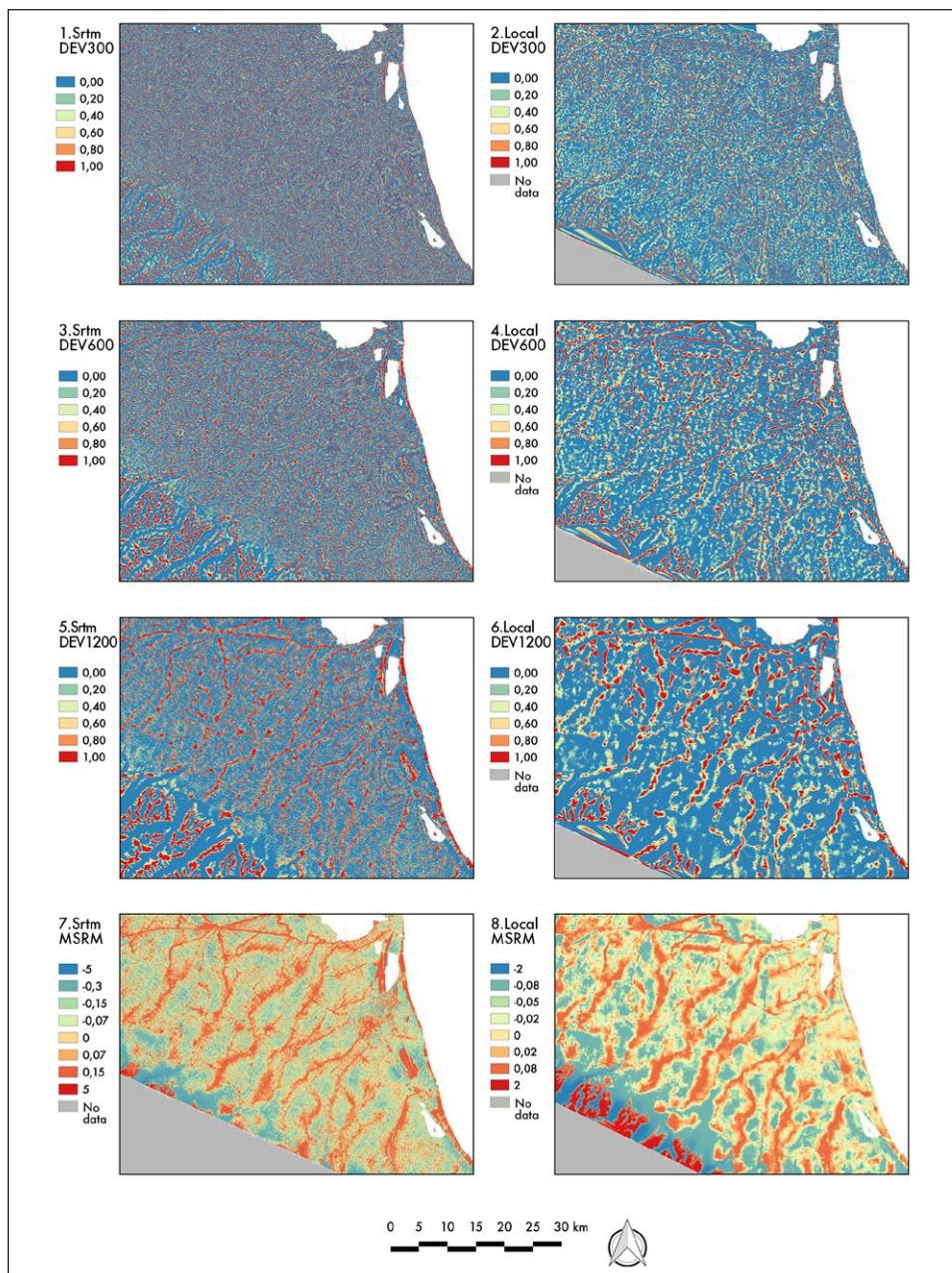


Fig. 3 – Elaborations of DEV (nos. 1-6) at 300 m (DEV300), 600 m (DEV600), and 1200 m (DEV1200) and MSRM (nos. 7-8) for both SRTM (left) and Local DEMs (right).



while the  $f_{\max}$  was set to at least 5000 m, to include also large rivers, and possibly palaeochannels. Here, we present the two most significant results of the application of the MSRM algorithm applied to the SRTM DEM with the settings  $f_{\min}$  31,  $f_{\max}$  6000, rr 31m, and to the Local DEM using the settings  $f_{\min}$  12,  $f_{\max}$  5000, rr 12 m (Fig. 3, 7-8).

#### 4.5 Geoarchaeological methods

To evaluate the meaningfulness of the results produced, two specific areas have been chosen for targeted research (Fig. 1, A-B), mostly relying on a desktop-based analysis of freely available aerial and satellite images<sup>7</sup>. The aim was to confirm if these landforms were indeed created by rivers, considering that their traces are often recognizable as crop and soil marks in the agricultural fields. Furthermore, due to the lack of pre-existing historical and archaeological data, targeted fieldwork was required for one of the two areas (Fig. 1, A). We specifically focused around Cavassona (Imola, BO) where several crop and soil marks were identified, likely to be interpreted as a moated settlement. The method used was a non-systematic artefact survey, walking at 1 m distance between surveyors and recording the finds with a manual GPS.

### 5. COMPARING DIFFERENT MORPHOMETRIC METHODS

Among the four methods used, the TWI analysis gave back the poorest results (Fig. 2, 1-2), not being able to show realistic fluvial ridges within the study area. Comparing the SRTM and Local TWIs, the increased resolution of the latter assured a better result. This is not surprising since this method has been often applied to LiDAR-derived DEMs which have even a finer resolution (CITTER, PATAcCHINI 2017).

Regarding the DEVs, since they are computed including the TPis, the respective results are quite comparable, with just minor differences (Fig. 2, 3-8; Fig. 3, 1-6). Both methods managed to highlight tens of possible fluvial landforms in the hinterland and beach ridges near the coast, proving to be suitable for geomorphological analysis also in areas with low variability like the Romagna plain. In particular, DEV is more capable to differentiate minor changes within a single landform. This is very clear in the southern parts, where the edges of the Appennine are more characterized and this could turn out to be very useful for further analyses, like to model human settlement choices in hilly areas. Another necessary remark regards the benefits of using

<sup>7</sup> Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare or MATTM (1988, 1994, 2000, 2006, 2012); Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura or AGEA (2008, 2011); Consorzio Telerilevamento Agricoltura or TeA (2014, 2017); Microsoft Bing (2018-2019); Google Earth 2003-2020; Esri satellite 2017-2018.

the Local DEM at a finer resolution, which assured good results even using the minimum radius. On the other hand, landforms start to be recognizable for SRTM elaborations only from a radius of 300-600 m.

The last results to be discussed derive from the application of the novel MSRM algorithm (Fig. 3, 7-8), which proved to be very successful in showing up both fluvial ridges and palaeodunes. Also in this case, the result produced from the processing of the Local DEM is clearer than the one obtained using the SRTM. Additional limitations of the latter are the presence of small linear features within the depressed areas, likely connected to artificial streets and channels, and higher values for urbanized areas such as small towns. On the other hand, the SRTM MSRM shows better the ancient coastlines northern and southern of Ravenna, but this is likely due to the existing pinewoods, which were not completely filtered out in the original DEM.

In our opinion, the best result in terms of readability was given by the Local MSRM (Fig. 3, 8), since it creates large continuous landforms that can facilitate their interpretation. Indeed, the MSRM algorithm seems more effective in homogeneous landscapes, like our study area, while showing more limits in more heterogeneous ones (ORENGO, PETRIE 2018). However, all these comparisons show how the results are very dependable on the starting DEMs, the methods used and their settings, clearly indicating the need for verification.

## 6. ASSESSING THE RESULTS THROUGH TARGETED GEOARCHAEOLOGICAL RESEARCH

Based on the results of the Local MSRM (Fig. 3, 8), we chose two smaller study areas for targeted research. The first is located NW of the city of Imola and western of the Santerno river (Fig. 1, A; section 6.1), while the second is located NW of the city of Forlì and eastern of the river Ronco (Fig. 1, B; section 6.2). For these two areas, previous studies had left a series of open questions that our researches have helped to answer.

### 6.1 *A pre-historical course of the Santerno river*

In the plain NE of Imola, the MSRM algorithm clearly shows a possible fluvial ridge departing from the actual course of the river Santerno around San Prospero (Fig. 1, A; Fig. 4). This ridge crosses the plain moving northwards and can be followed with confidence for 5 km, up to Fluno, where a ridge created by the Sillaro makes the interpretation more difficult. The existence of this older ridge of the Santerno has been recently hypothesized also by S. MARABINI and G.B. VAI (2020, 60, 68-69) based only on differences in elevation nearby Chiusura. Available archaeological data could suggest a Bronze Age date for this ridge (CRA-CI, nos. 133 and 248) or even a Neolithic one (CRA-CI, no. 155.), but more data are necessary.

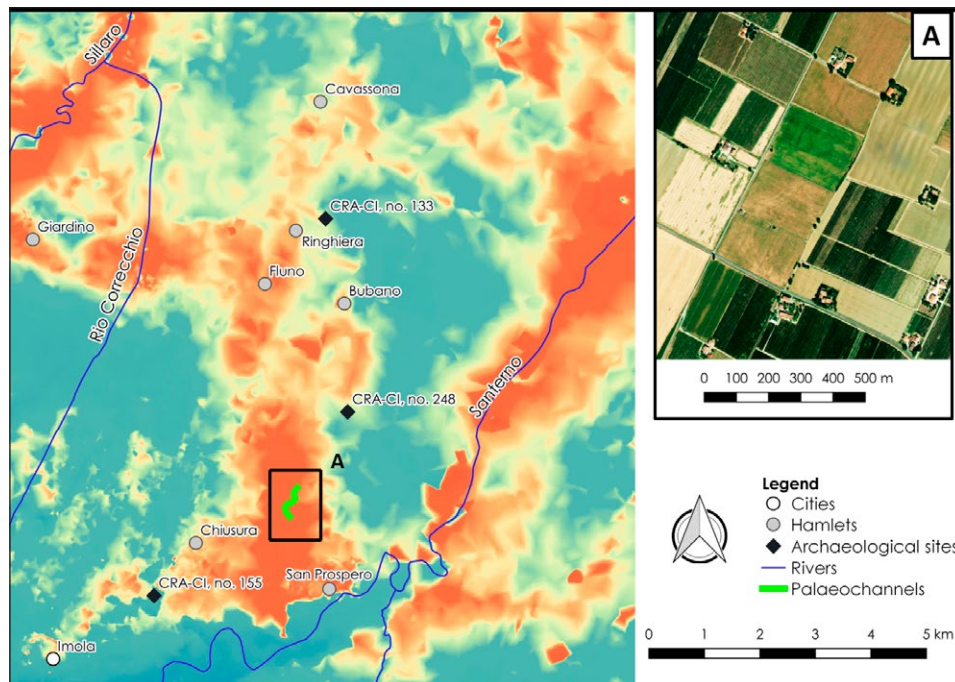


Fig. 4 – Santerno case study: MSRM result with palaeochannel (A).

The first proof that we present in favour of this hypothesis is the possible palaeochannel that could have created this ridge, considering that this evidence lies within the landform highlighted by the MSRM algorithm (Fig. 4, A). Indeed, a large crop mark has been identified in an Esri satellite image from August 2017. This measures between 35-50 m and has a sinuous shape, and it could testify the existence of an older meandric channel of the Santerno river, W of its present course.

The second set of evidence instead had been collected further N, around Cavassona. Here, G. CHOUQUER (2015, 134-135) already identified several crop marks visible in a Google satellite image from 2003. The main feature is represented by a large rectangular shape (Fig. 5, A), measuring around 85×50 m, which is interpretable as a nucleated settlement of around 0,4 ha. Visible in many other images, this feature is always characterized by a darker colour compared to the rest of the field, as result of a higher content of organic matter in the soil due to human activities. Another important crop mark is instead a possible defensive feature circa 8 m wide, interpretable as an embankment, levelled by now (Fig. 5, B). From the same image, two ditches seem to be



Fig. 5 – Moated site in Cavassona (from CHOUQUER 2015, 134-135): images modified to highlight the main features (A-D).

present on both sides of the embankment, making this structure c. 18 m wide in total. This element surrounds almost half of the possible settlement, towards the northern side. Prior literature was silent about this possible site, mentioning only “Roman” bricks discovered in the 19<sup>th</sup> century (CRA-CI, no. 355). A targeted artefact survey carried out in September 2020 has made it possible to document an important medieval settlement likely abandoned around the 12<sup>th</sup>/13<sup>th</sup> centuries CE, with the finds mostly concentrated within the rectangular feature (ABBALLE, under review)<sup>8</sup>.

However, in this paper we want to focus on a small number of “residual” finds that could testify the occupation of the site also in protohistoric times. Some flints were indeed recorded together with sherds of impasto and grey pottery (Fig. 6) that could be related to an earlier occupation of the area, dating at least to the Early Bronze Age. Post-depositional processes could have played a role in the discovery of such old finds, although another possible explanation could be the presence of a ridge. Indeed, the site is located along the continuation of the landform highlighted by the MSRM algorithm and, in the 2003 satellite image, a possible palaeochannel around 20 m wide can be seen just flowing eastern of the modern building (Fig. 5, C).

The discovery of so old traces of human occupation questions the current view of this area being poor of archaeological data as the result of intense alluvial sedimentation occurred during the last millennia. Indeed, these findings

<sup>8</sup> The authorisation for the fieldwork was granted by the Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la città metropolitana di Bologna e le province di Modena, Reggio Emilia e Ferrara (no. 14787-A).

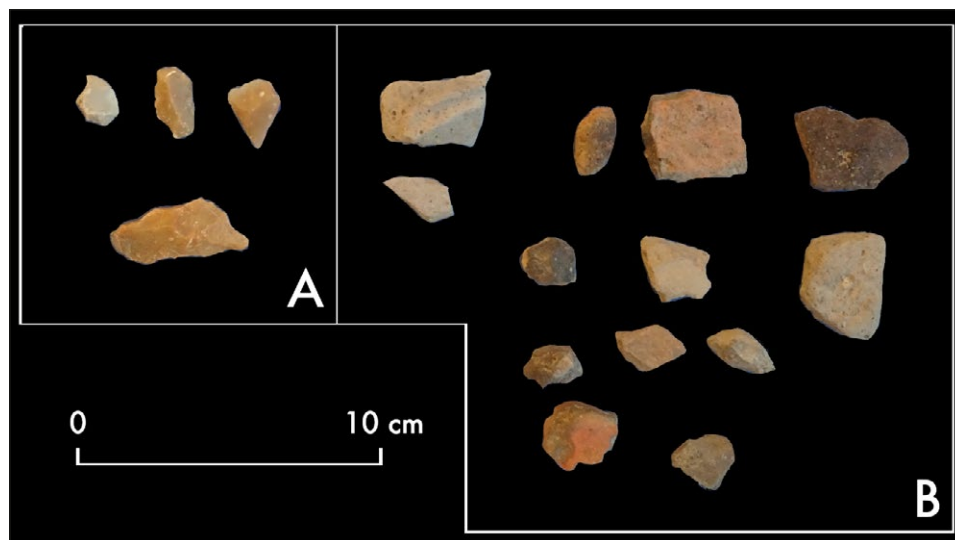


Fig. 6 – Protohistoric finds from Cavassona: a) flint and b) pottery.

open new questions as well as the presence of a possible smaller channel (Fig. 5, D), which seems to connect the palaeochannel of Cavassona to the external ditch of the embankment. Clearly, only further investigations would prove if the ditch-and-embankment feature is older than the medieval site identified through artefact survey or if the palaeochannel deactivated only in the Late Middle Ages or later.

## 6.2 *The evolution of the Ronco river*

The second area chosen for verification analysis is located at the border between Forlì and Ravenna (Fig. 1, B). The main river of the area is the Ronco, which changed course around the beginning of the 12<sup>th</sup> century, after leaving the preexisting one between Carpinello-Castellaccio-Massa-San Pietro in Vincoli (VEGGIANI 1980; BOTTAZZI 1993). The precise chronology of the latter and possible previous courses have not been identified (ABBALLE 2021).

Analysing the result of the MSRM algorithm, two different landforms can be recognized E of the present course of the river Ronco and N of the town of Forlimpopoli (Fig. 7). Several crop and soil marks were identified systematically analyzing all aerial and satellite images, to confirm the fluvial origin of these possible ridges. Thanks to the identification of various palaeochannels, we can at least recognize two meandering courses that fit within the two ridges highlighted by the algorithm: an eastern one (Fig. 7, A-C) and a western one (Fig. 7, D-F).



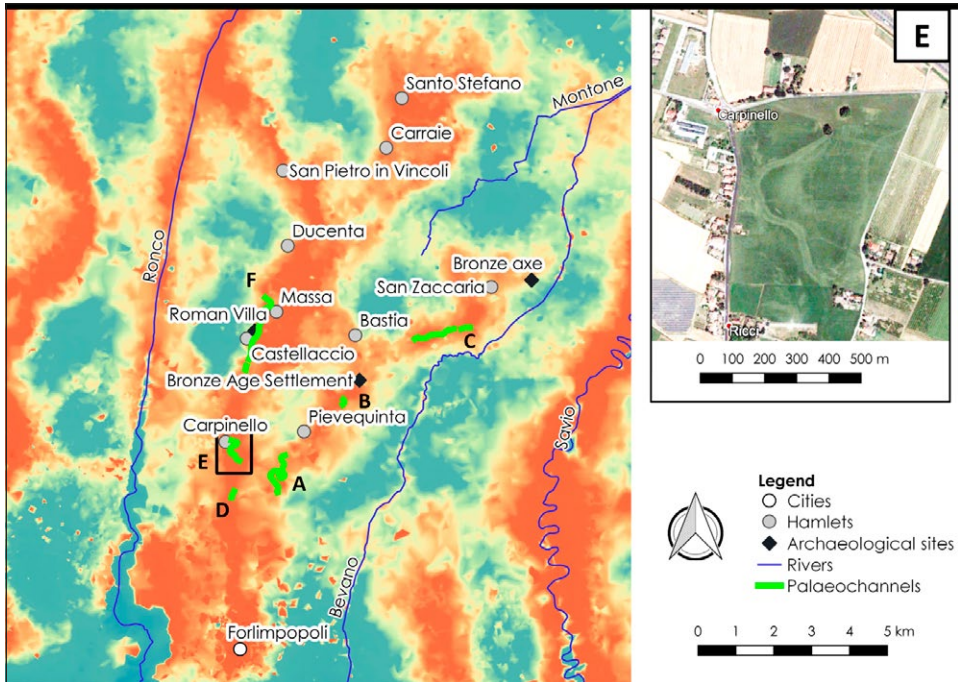


Fig. 7 – Ronco case study: MSRM result visualization with palaeochannels (A-F).

In particular for the eastern one, the oldest archaeological evidence available in the area date to the Bronze Age. The first finding is a single bronze axe with median wings discovered near San Zaccaria, Ravenna (BERMOND MONTANARI, 1990, 36). A more consistent discovery comes from the excavation in 1984 of the Canale Emiliano Romagnolo (CER) in via Petrosa, Bastia, Ravenna (BERMOND MONTANARI 1990, 36). Although the stratigraphy was heavily destroyed by later agricultural activities, the richness in finds of some preserved archaeological layers allowed the interpretation of this site as a Bronze Age settlement. During the analysis of aerial/satellite data, we discovered large crop marks visible in Google Earth on the 8<sup>th</sup> of July 2017, located between via Petrosa and via Acquara Superiore, Ravenna (Fig. 8).

Although no fieldwork has been carried out yet to confirm the nature of these marks, these are likely connected to the Bronze Age settlement discovered in the 80s in Bastia. The main features recognized are two palaeochannels, ca. 20 m wide (Figs. 8, A and 8, B) that seem to define a square area of about 10 ha. The western palaeochannel is associated with a likely palaeomeander (Fig. 8, C), which attests to the antiquity and stability of this watercourse. If



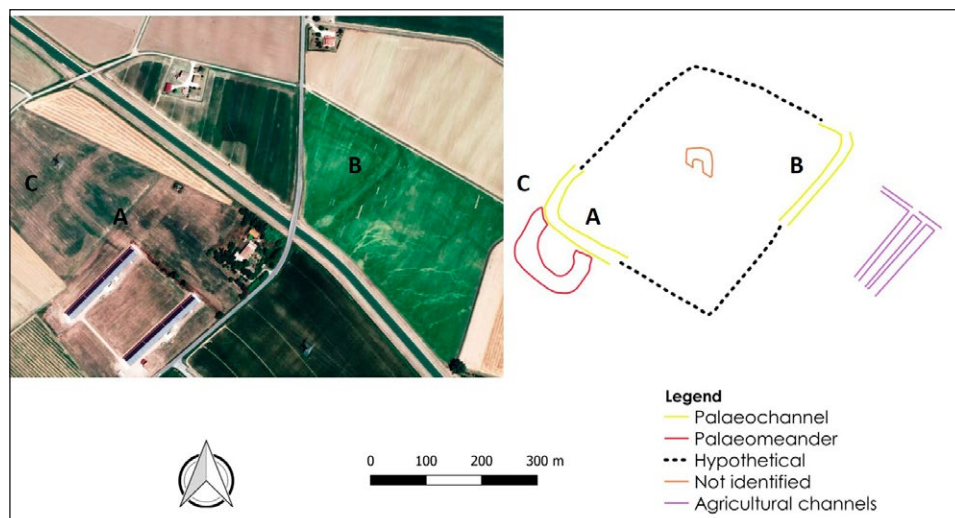


Fig. 8 – Crop marks visible around a Bronze Age village in Bastia, likely interpretable as contemporary fluvial traces (A-C).

this is true, the eastern paleochannel may have been excavated to surround the village (Fig. 8, B). Settlements bordered on all sides by a combination of natural and artificial channels are quite common in Emilia for this period within the Terramare culture (e.g. Terramara of Santa Rosa di Poviglio (RE), CREMASCHI *et al.* 2005; Terramara of Podere Pradella (MO), CATTANI 2009). However, no comparable sites were surely recognized in the Romagna plain, so further field research is definitely needed, including on this site. However, we believe that the data presented here are sufficient to link the formation of the Pievequinta-San Zaccaria ridge (or Paleodosso di Pievequinta-San Zaccaria) to the Bronze Age course of the river Ronco.

Later on, between the Bronze Age and the Roman period, the Ronco must have changed its course since a new ridge developed W of the previous one, between Carpinello and Ducenta. Indeed, the excavation of a Roman villa and adjacent necropolis in Castellaccio di Massa Forese, during the construction of the CER in 1984, seems to suggest the formation of this ridge at least before the 1<sup>st</sup> century BCE (MAIOLI 1990, 263-265; MONTEVECCHI 2003, 107). Furthermore, western of this possible course, remnants of centuriation of the town of *Forum Livii* (Forlì) were already recognized (BOTTAZZI 1993), strengthening the dating of this ridge before the Roman period.

Northern of Ducenta, the MSR algorithm shows a likely bifurcation: an eastern one towards Carraie-Santo Stefano and a western one towards San Pietro in Vincoli. The scarce archaeological data do not allow us to suggest



Fig. 9 – The archaeological site of Castellaccio di Massa: original and interpreted images.

which one could have formed before or later, so this is an area where future research should focus. In addition, here our analysis brought to light evidence of another possible archaeological site. Just in front of the Church of Santa Maria in Castellaccio (or in Traversara), a Google Earth image of the 8<sup>th</sup> of July 2017 shows the presence of several crop marks (Fig. 9), many referring to an ancient meandric course of the Ronco river, oriented N-S (Fig. 7, F). However, a rectangular trace between the church and the palaeochannel is more likely anthropic: it is ca. 3-4 m wide and measures 80×40 m in total. It seems to be related to a buried structure or an embankment. Other linear traces could also have an anthropic origin, probably roads or paths. This site has to be referred to the castle of Traversara, the main centre of the homonymous county since the 10<sup>th</sup> century, later destroyed in the 13<sup>th</sup> century (VASINA 1970, 117). Archaeologically, the site was never clearly identified (AUGENTI, FICARA, RAVAIOLI 2012, 174), but these evidences can be crucial to direct future research.

## 7. CONCLUSIONS

In conclusion, both TPI/DEV and the novel MSRM algorithm proved to be useful tools for the morphometric analysis of an alluvial landscape like the Romagna plain, while TWI showed limitations due to the resolution of the DEMs used. These could be potentially overcome using models with finer resolution, like LiDAR-derived DEMs, which are not available at the moment for the study area. At the same time, the comparison of sixteen different DEM-derived products showed how these results can be validated only with targeted (field) research. Firstly, this approach allowed us to map several palaeochannels likely responsible for the formation of the selected ridges, that can direct future investigations. Secondly, the analysis of existing archaeological data allowed us to propose possible chronological ranges to date these ridges. Thirdly, during this research new archaeological evidence has been identified that will be the object of future verification.

More in general, our work provides further evidence for the importance of geomorphology within geoarchaeological and landscape research, especially considering the strict relationship that ancient settlements had with the river network. Obviously, in floodplains like the Po Valley, changes in the topography have been quite significant during the last millennia and approaches that aim towards the modelling of palaeotopography are essential (for a review, SCHMIDT, WERTHER, ZIELHOFER 2018; an example for the study area is in ABBALLE 2020). Thankfully, this line of research has been growing more and more in the last decade, decisively contributing to a better comprehension of the evolution of alluvial landscapes and their historical phenomena.

MICHELE ABBALLE

Department of Archaeology  
Ghent University  
michele.abballe@ugent.be

MARCO CAVALAZZI

Dipartimento di Storia Culture Civiltà  
Università di Bologna  
marco.cavalazzi3@unibo.it

## REFERENCES

- ABBALLE M. 2020, *From scattered data to palaeolandscape reconstruction: A case study from the Romagna plain, Italy*, in M. TAGLIANI, V. CANCIANI, F. TOMMASI (eds.), *Humanities: Approaches, Contaminations and Perspectives. Conference Proceedings (Verona 2019)*, Verona, Cierre Edizioni, 73-85.
- ABBALLE M. 2021, *Fiumi, valli e litorali tra Lamone e Savio dal periodo romano all'età medievale*, in P. GALETTI (ed.), *Una terra antica. Paesaggi e insediamenti nella Romania dei secoli V-XI*, *Storie di Paesaggi Medievali* 4, Firenze, All'Insegna del Giglio, 35-48.

- ABBALLE M. under review, *Deserted medieval villages in Romagna: A view from the sky*, «Medieval Archaeology».
- AMMERMANN A.J., BONARDI S. 1981, *Recent developments in the study of Neolithic settlements in Calabria*, in G.W.W. BARKER, R. HODGES (eds.), *Archaeology and Italian Society*, BAR International Serie 102, Oxford, 335-342.
- ANDRESEN J.B.R. 2008, *Topographic wetness index and prehistoric land use*, in A. POSLUSCHNY, I. HERZOG, K. LAMBERS (eds.), *Proceedings of the 35<sup>th</sup> International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Bonn, Habelt, 405-410.
- ARGYRIOU A.V., TEEUW R.M., SARRIS A. 2017, *GIS-based landform classification of Bronze Age archaeological sites on Crete Island*, «PLOS ONE», 12.2, e0170727 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170727>).
- AUGENTI A., FICARA M., RAVAIOLI E. (eds.) 2012, *Atlante dei beni archeologici della provincia di Ravenna, I, Il paesaggio monumentale del Medioevo*, Bologna, Ante Quem.
- BALISTA C. 1997, *Fossati, canali e paleovalvei: connessioni nevralgiche per l'impianto e la sopravvivenza dei grandi siti terramaricoli di bassa pianura*, in M. BERNABÒ BREA, A. CARDARELLI, M. CREMASCHI (eds.), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, Electa, 126-136.
- BERMOND MONTANARI G. 1990, *Demografia del territorio nella pre-protostoria e la prima fase insediativa di Ravenna*, in G. SUSINI (ed.), *Storia di Ravenna, 1, L'Evo antico*, Venezia, Marsilio Editori, 31-48.
- BEVEN K.J., KIRKBY M.J. 1979, *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant*, «Hydrological Sciences Bulletin», 24, 1, 43-69.
- BOTTAZZI G. 1993, *Le centuriazioni romagnole ed i Solonates Saltusque Galliani*, «Atti e Memorie della Regia Deputazione di Storia Patria per le provincie di Romagna», 43, 169-232.
- BRANDOLINI F., CARRER F. 2020, *Terra, silva et paludes. Assessing the role of alluvial geomorphology for late-holocene settlement strategies (Po Plain-N Italy) through Point Pattern Analysis*, «Environmental Archaeology», 26, 5, 511-525.
- CASAROTTO A., STEK T.D., PELGROM J., VAN OTTERLOO R.H., SEVINK J. 2018, *Assessing visibility and geomorphological biases in regional field surveys: The case of Roman Aesernia*, «Geoarchaeology», 33, 2, 177-192.
- CATTANI M. 2008, *La Media età del Bronzo nell'area tra Panaro e Reno (province di Modena e Bologna). Progetto per una ricostruzione del paesaggio*, «IpoTESI di Preistoria», 1, 1, 211-250.
- CATTANI M. 2009, *CE 31. Fondo Asmara, Casa S. Vincenzo, Podere Pradella (XIX secolo)*, in A. CARDARELLI, L. MALNATI (eds.), *Atlante dei beni archeologici della provincia di Modena, III, 2. Collina e alta pianura*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 33-35.
- CAVALAZZI M. 2020, «Looking through the keyhole»: *Problems and research strategies for landscape archaeology in an alluvial plain with a high rate of vertical growth. The case of Bassa Romagna and south-eastern Po Valley*, «Groma. Documenting Archaeology», 5 (<https://groma.unibo.it/cavalazzi-looking-through-the-keyhole>).
- CHOUQUER G. 2015, *Les parcelles médiévales en Émilie et en Romagne. Centuriations et trames coaxiales. Morphologie et droit agraires*, Paris, FIEF.
- CITTER C., PATACCHINI A. 2017, *Il territorio della città di Este attraverso lo studio del palinsesto dei catasti storici*, in G.P. BROGIOLO (ed.), *Este, l'Adige e i Colli. Storie di paesaggi*, Mantova, SAP, 41-68.
- CONRAD O., BECHTEL B., BOCK M., DIETRICH H., FISCHER E., GERLITZ L., WEHBERG J., WICHMANN V., BÖHNER J. 2015, *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4*, «Geoscientific Model Development», 8, 7, 1991-2007.
- CRA-CI = Carta del Rischio Archeologico - Comprensorio Imolese (<https://www.nuovocircondarioimolese.it/psc/psc-rue-ca/quadro-conoscitivo/volume-3>).

- CREMASCHI M. 1997, *Terramare e paesaggio padano*, in M. BERNABÒ BREA, A. CARDARELLI, M. CREMASCHI (eds.), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, Electa, 107-125.
- CREMASCHI M., PIZZI C., FERRARO F., PUTZOLU C. 2005, *Spatial intra-site analyses at the Terramara of Poviglio S. Rosa (Reggio Emilia, Italy): The enclosure vs. the hydraulic system*, in M. FORTE (ed.), *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Italy-United States Workshop (Rome 2003)*, Berkeley-Oxford, Archaeopress, 23-33.
- CREMONINI S. 1994, *Lineamenti evolutivi del paesaggio fisico del territorio di Bagnacavallo nel contesto paleoidrografico romagnolo*, in A. CALBI, G. SUSINI (eds.), *Storia di Bagnacavallo*, Bologna, Banca Popolare dell'Adriatico, 1-40.
- CREMONINI S. 2003, *Tra Idice e Santerno: problemi paleoidrografici*, in A.R. BAMBI, L. GAMBI (eds.), *Castel Guelfo di Bologna, un caso di studio: geologia, archeologia e storia dell'insediamento tra Idice e Sillaro*, Bologna, Costa, 19-55.
- DE REU J., BOURGEOIS J., BATS M., ZWERTVAEGHER A., GELORINI V., DE SMEDT P., CHU W., ANTROP M., DE MAEYER P., FINKE P., VAN MEIRVENNE M., VERNIERS J., CROMBÉ P. 2013, *Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes*, «Geomorphology», 186, 39-49.
- FICARA M. 2006, *L'occupazione dei dossi fluviali nel territorio di Reggio Emilia: il caso di Canolo di Mezzo*, in N. MANCASSOLA, F. SAGGIORO (eds.), *Medioevo, paesaggi e metodi*, Mantova, SAP, 147-168.
- FRANCESCHELLI C., MARABINI S. 2004, *Assetto paleidografico e centuriazione romana nella pianura faentina*, «Agri centuriati: an International Journal of Landscape Archaeology», 1, 2004, 87-107.
- FRANCESCHELLI C., MARABINI S. 2007, *Lettura di un territorio sepolto: la pianura lughese in età romana*, Bologna, Ante Quem.
- GAMBI L. 1949, *L'insediamento umano nella regione della bonifica romagnola*, Roma.
- GORELICK N., HANCHER M., DIXON M., ILYUSHCHENKO S., THAU D., MOORE R. 2017, *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*, «Remote Sensing of Environment», 202, 18-27.
- GROHMANN C., RICCOMINI C. 2009, *Comparison of roving-window and search-window techniques for characterising landscape morphometry*, «Computers&Geosciences», 35, 2164-2169.
- GRUBER S., PECKHAM S. 2009, *Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology*, in T. HENGL, H.I. REUTER (eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science 33*, Amsterdam, Elsevier, 171-194.
- GUISAN A., WEISS S.B., WEISS A.D. 1999, *GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution*, «Plant Ecology», 143, 1, 107-122.
- HJERDT K.N., MCDONNELL J.J., SEIBERT J., RODHE A. 2004, *A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage*, «Water Resources Research», 40, 5, W056021-W056026.
- MAIOLI M.G. 1990, *Aggiornamento della situazione conoscitiva delle ville rustiche di epoca romana a Ravenna e in Romagna*, «Corsi di Cultura sull'Arte Ravennate e Bizantina», 37, 249-279.
- MANCASSOLA N. 2012, *Uomini e acque nella pianura reggiana durante il Medioevo (secoli IX-XIV)*, in D. CANZIAN, R. SIMONETTI (eds.), *Acque e territorio nel Veneto medievale*, Roma, Viella, 115-132.
- MARABINI S., VAI G.B. 2020, *Carta geologica della pianura tra Imola e Ravenna: guida alla lettura*, Imola, Il Théodolite Editore.
- MERTEL A., ONDREJKA P., ŠABATOVÁ K. 2018, *Spatial predictive modeling of prehistoric sites in the Bohemian-Moravian Highlands based on graph similarity analysis*, «Open Geosciences», 10, 1, 261-274.
- MITAS L., MITASOVA H. 2005, *Spatial interpolation*, in P. LONGLEY, M.F. GOODCHILD, D.J. MAGUIRE, D.W. RHIND (eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, Hoboken, N.J., Wiley, 481-492.



- MONTEVECCHI G. 2003, *Viaggio nei siti archeologici della provincia di Ravenna*, Ravenna, Longo Editore.
- NANCE J.D. 1983, *Regional sampling in archaeological survey: The statistical perspective*, «Advances in Archaeological Method and Theory», 6, 289-356.
- ORENGO H.A., PETRIE C.A. 2018, *Multi-scale relief model (MSRM): A new algorithm for the visualization of subtle topographic change of variable size in digital elevation models*, «Earth Surface Processes and Landforms», 43,6, 1361-1369.
- PIKE R.J., EVANS I.S., HENGL T. 2009, *Chapter 1 Geomorphometry: A brief guide*, in T. HENGL, H.I. REUTER (eds.), *Developments in Soil Science*, Elsevier, 3-30.
- RONCUZZI A., VEGGI L. 1968, *Nuovi studi sull'antica topografia del territorio ravennate*, «Bollettino economico della Camera di Commercio di Ravenna», 23, 193-201.
- SCHMIDT J., WERTHER L., ZIELHOFFER C. 2018, *Shaping pre-modern digital terrain models: The former topography at Charlemagne's canal construction site*, «PLOS ONE», 13, 7: e0200167 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200167>).
- TERRENATO N. 2000, *The visibility of sites and the interpretation of field survey results: Towards an analysis of incomplete distributions*, in R. FRANCOVICH, H. PATTERSON, G. BARKER (eds.), *Extracting Meaning from Ploughsoil Assemblages*, Oxford, Oxbow Books, 60-71.
- VAN LEUSEN P.M. 2002, *Pattern to Process: Methodological Investigations into the Formation and Interpretation of Spatial Patterns in Archaeological Landscapes*, Groningen, Rijksuniversiteit Groningen.
- VASINA A. 1970, *Romagna Medievale*, Ravenna, Edizioni A. Longo.
- VEGGIANI A. 1973, *Le trasformazioni dell'ambiente naturale del ravennate negli ultimi millenni*, «Studi Romagnoli», 24, 3-23.
- VEGGIANI A. 1975, *Le vicende idrografiche del Santerno da Imola al mare nell'antichità*, «Studi Romagnoli», 26, 3-21.
- VEGGIANI A. 1976, *Le variazioni della linea di costa del Ravennate dall'età preromana al Medioevo*, «Corsi di Cultura sull'Arte Ravennate e Bizantina», 23, 2-24.
- VEGGIANI A. 1980, *Considerazioni geologiche sulla captazione e sul tracciato dell'acquedotto romano di Ravenna*, «Studi Romagnoli», 31, 3-19.
- VEGGIANI A. 1990, *Fluttuazioni climatiche e trasformazioni ambientali nel territorio imolese dall'alto medioevo all'età moderna*, in F. MANCINI, M. GIBERTI, A. VEGGIANI (eds.), *Imola nel Medioevo*, Imola, Grafiche Galeati, 41-102.
- VEGGIANI A. 1995, *Storia geologica ed evoluzione ambientale nel territorio di Lugo di Romagna*, in L. MASCANZONI, A. VASINA (eds.), *Storia di Lugo, I, Dalla preistoria all'età moderna*, Forlì, Cassa di Risparmio di Lugo, 9-54.
- VITA-FINZI C. 1969, *The Mediterranean Valleys: Geological Changes in Historical Times*, Cambridge, Cambridge University Press.
- WEISS A.D. 2001, *Topographic Position and Landforms Analysis*, Poster Presentation, San Diego, CA.
- WILSON J.P., GALLANT J.C. 2000, *Terrain Analysis: Principles and Applications*, New York, Wiley.
- ZANGHERI P. 1927, *Il corso del Montone e del Rabbi dalle epoche geologiche ai tempi attuali*, «Forum Livii», 2, 4, 29-35; 2, 5, 33-36; 2, 6, 26-33.

## ABSTRACT

The Multi-Scale Relief Model (MSRM) is a novel algorithm developed for the visual interpretation of landforms. This was tested within the Romagna plain, the south-eastern part of the Po Valley (Italy), to establish whether it was able to detect fluvial ridges within this alluvial landscape. Since the MSRM is not the only method to carry out morphometric analysis, it was compared with other techniques previously used in landscape archaeology, such as the



Topographic Wetness Index (TWI), the Topographic Position Index (TPI), and the Deviation from mean Elevation (DEV). At the same time, the SRTM 1 Arc-Second Global was compared with a Local DEM based on ground control points. Subsequently, the result of the MSR algorithm was tested through targeted desktop- and field-based research. This validation phase proved essential to test the accuracy of the DEM-derived products. Furthermore, it allowed us to verify the existence of the detected fluvial ridges, to propose a chronological range for some of them, and, finally, to collect new archaeological evidence.

## ESTENSIONE DELLE VALLI DI COMACCHIO TRA 1000 E 1500 D.C.: GEOARCHEOLOGIA, CARTOGRAFIA STORICA E INFORMATICA

### 1. INTRODUZIONE

Le lagune antiche rappresentano un tema di forte interesse a livello internazionale. Il quadro europeo e mediterraneo conta ormai numerosi studi<sup>1</sup> in cui all'importanza della ricostruzione in sé si affianca quella del metodo utilizzato, ormai piuttosto standardizzato, che fa dell'approccio geoarcheologico la chiave di volta della ricerca. Lo studio di contesti lagunari è un filone di ricerca ben sviluppato anche in Italia, con riferimento sia al bacino tirrenico che a quello adriatico<sup>2</sup>.

Per quanto riguarda le Valli di Comacchio, non esistono ad oggi rappresentazioni grafiche precedenti il 1580, anno cui risale la realizzazione della cosiddetta Carta Pasi<sup>3</sup> (Fig. 1). L'unico tentativo che ci risulti essere stato fatto in questo senso risale al 2015, quando lo scrivente ha pubblicato una carta (Fig. 2) in cui si ipotizzava l'estensione degli spazi acquei comacchiesi tra VII e X secolo d.C. (Rucco 2015a, 2015b). La carta teneva conto non solo del tasso di subsidenza media calcolato per l'arco adriatico settentrionale<sup>4</sup> (ANTONIOLI *et al.* 2008), ma anche di una serie di aspetti topografici desunti da fonti scritte, risalenti alle cronologie in questione, in cui si menzionavano campi, boschi, paludi, ovvero elementi che potevano essere facilmente ricondotti a terraferma o spazi umidi. Quella rappresentazione, tuttavia, risentiva di due problemi. Il primo di natura cronologica: essa restituiva, cioè, un'immagine piuttosto vaga se rapportata al grado di alterazione che i paesaggi deltizi possono subire anche nell'arco di pochissimo tempo. In secondo luogo, essa risentiva di una mancanza di carattere tecnico: il modello digitale del terreno (da ora DTM) utilizzato per calcolare l'estensione degli spazi acquei risultava

<sup>1</sup> Cfr. ad es. OOST, DE BOER 1994; BEHRE 2004; FOUACHE *et al.* 2010; VESPREMEANU-STROE *et al.* 2013; GHILARDI *et al.* 2014; GIAIME *et al.* 2017; EMMANOULIDIS *et al.* 2018; FAÏSSE *et al.* 2018; HANSSON *et al.* 2018; ÜNER 2018; GIAIME, MARRINER, MORHANGE 2019; RUIZ-PEREZ, CARMONA 2019.

<sup>2</sup> Cfr. ad es. GOETHALS, DE DAPPER, VERMEULEN 2009; GOIRAN *et al.* 2010, 2014; BERNASCONI, STANLEY 2011; CITTER, ARNOLDUS-HUYZENDEVELD 2012; MADRICARDO, DONNICI 2014; SACCHI *et al.* 2014; VITTORI *et al.* 2015; BELLOTTI *et al.* 2016; DELILE *et al.* 2016; FONTANA *et al.* 2017; SALOMON *et al.* 2018.

<sup>3</sup> M.A. PASI, *Carta degli Stati Estensi*, 1580, Biblioteca Estense Universitaria di Modena, C. G. A. 4. Disegno a penna e colori, 3120x1760 mm (8 fogli); la carta è descritta in RUCCO 2015a, 54 ss.

<sup>4</sup> Si rimanda alla bibliografia dei contributi citati per un chiarimento sulle modalità di costruzione di questa carta.

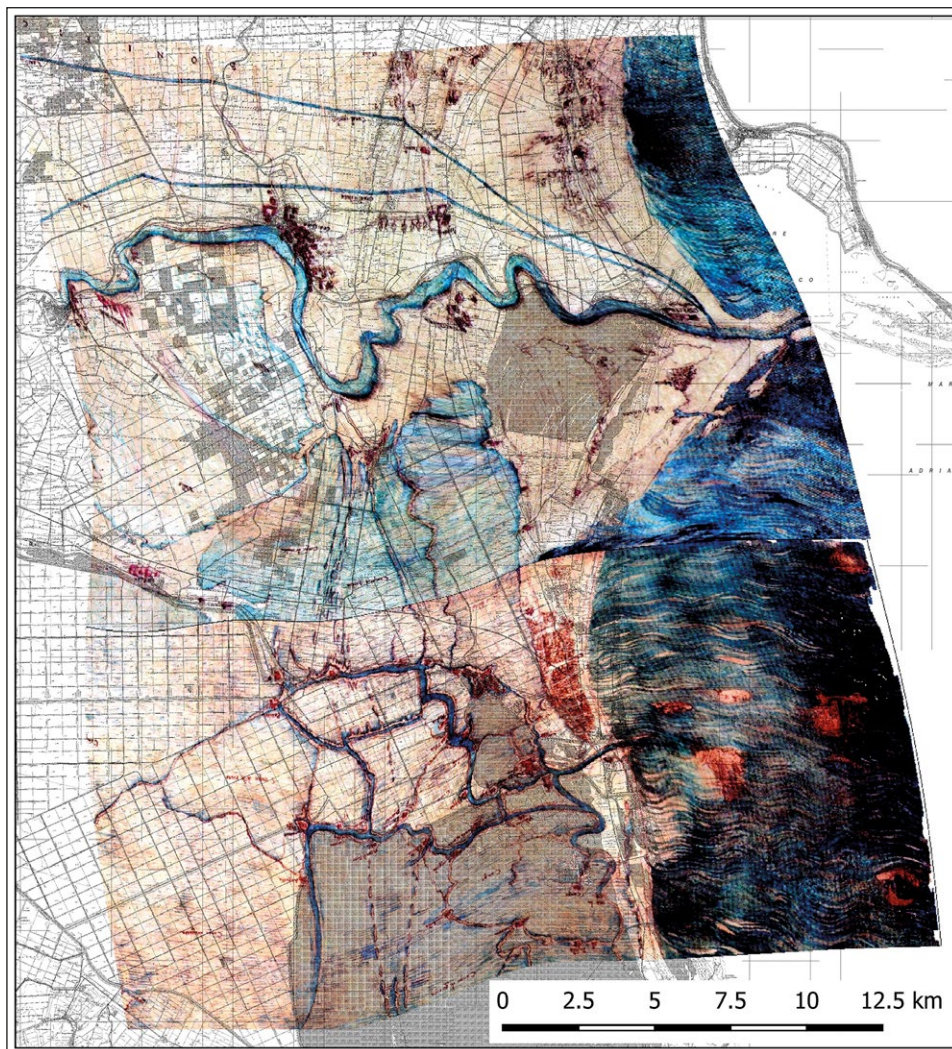


Fig. 1 – Carta Pasi georeferenziata tramite TPS (Thin Plate Spline).

disturbato dalle opere antropiche che hanno interessato il paesaggio comacchiese dalla fine delle bonifiche a oggi, vale a dire nell'ultimo secolo circa.

In questa sede si vuole proporre, invece, una scansione cronologica più serrata, e provare a restituire, sempre tramite metodi informatici ma con l'ausilio di fonti in parte diverse e più aggiornate rispetto a quelle utilizzate nel 2015, l'aspetto delle Valli di Comacchio in un lasso di tempo compreso

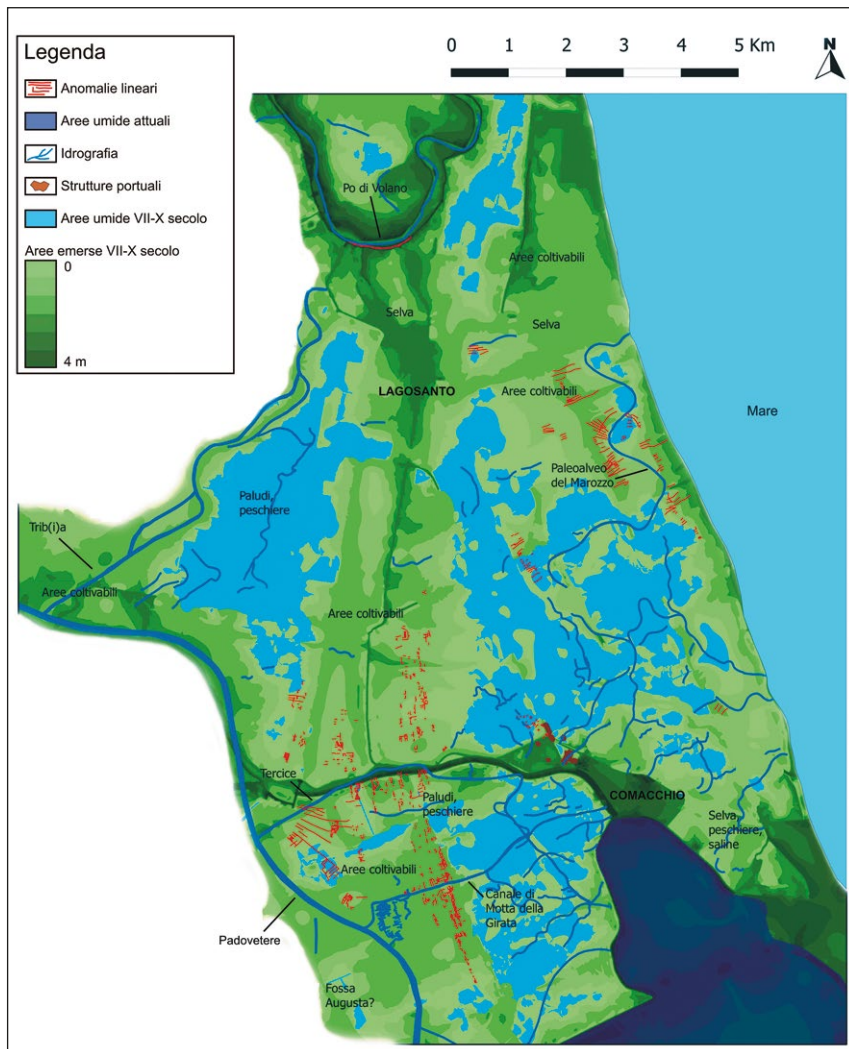


Fig. 2 – Ricostruzione degli spazi umidi del paesaggio comacchiese (da Rucco 2015a).

generalmente tra il 1000 e il 1500 d.C. Si proporranno delle carte per ogni singolo secolo, fino ad avanzare un confronto tra la Carta Pasi del 1580 e la restituzione informatica relativa alla stessa cronologia. Tutto questo, non soltanto per dare conferma della validità del metodo utilizzato, ma anche per discutere dell'effettiva evoluzione di questo settore deltizio nel corso del pieno medioevo e della primissima età moderna. In conclusione, si offriranno



degli spunti di riflessione riguardo all'utilizzo dei dati prodotti per ricostruire segmenti di storia e valutare le evidenze archeologiche nello spazio alla luce di nuovi dati di paesaggio.

## 2. MATERIALI

I materiali utilizzati per raggiungere l'obiettivo proposto sono di tre nature: stratigrafica, cartografica e informatica.

1) La valutazione dell'estensione delle Valli di Comacchio in ragione del livello medio-mare relativo alle diverse cronologie è stata effettuata sulla base di un dato ottenuto attraverso alcuni carotaggi geoarcheologici eseguiti dallo scrivente in collaborazione con il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova nel quartiere di Villaggio San Francesco, all'estrema periferia settentrionale di Comacchio. In quell'occasione, sondando i livelli antropizzati relativi alle fasi di occupazione altomedievali del contesto, si è potuto inferire che il livello medio-mare relativo nel momento in cui il quartiere di villaggio San Francesco venne "colonizzato" e utilizzato a scopo portuale si attestava intorno ai -3 m rispetto al livello medio-mare attuale (MOZZI, RUCCO, ABBÀ 2021).

Tale dato, risalente circa all'VIII secolo d.C., è stato considerato come il *terminus post quem* per il calcolo ipotetico dei livelli medio-mare corrispondenti alle cronologie considerate in questo articolo. Il dato dedotto su base stratigrafica trova conferma – e conferma a sua volta, caratterizzando l'area in esame come SLIP (Sea Level Index Point) – in quanto emerso dall'esame di numerosi siti in area deltizia. Com'è noto, la zona del delta padano risulta caratterizzata da tassi di subsidenza media oscillanti tra -0,6 e -1,4 mm/anno (LAMBECK *et al.* 2004; ANTONIOLI *et al.* 2009; LAMBECK *et al.* 2011; VACCHI *et al.* 2016; BENJAMIN *et al.* 2017). Uno studio recentissimo relativo all'area di Pinarella di Cervia (FC) ha permesso di stimare, coerentemente con quanto detto, un rlm di  $-2,8 \pm 0,10$  m per i secoli compresi tra il II a.C. e il VI d.C. (CREMONINI 2019, 34).

2) Come anticipato, si è fatto riferimento alla Carta Pasi del 1580, una realizzazione non solo di particolare pregio estetico, ma anche di grandissima accuratezza. La georeferenziazione di questa mappa, effettuata tramite TPS (Thin Plate Spline) attraverso il programma QGIS, ha consentito di notare come il posizionamento dei confini tra le Valli, corrispondenti agli alti morfologici offerti dai cordoni litoranei fossili, coincidessero pressoché esattamente con le realizzazioni di fine '800 ad opera dell'IGM (Fig. 3). Uno strumento cartografico di primario interesse, quindi, proprio per la sua accuratezza in un'operazione come quella che si presenta in questa sede. L'estensione delle Valli nella Carta Pasi ha rappresentato il *terminus ante quem* per la valutazione delle caratteristiche della laguna di Comacchio tra il 1000 e il 1500 d.C.





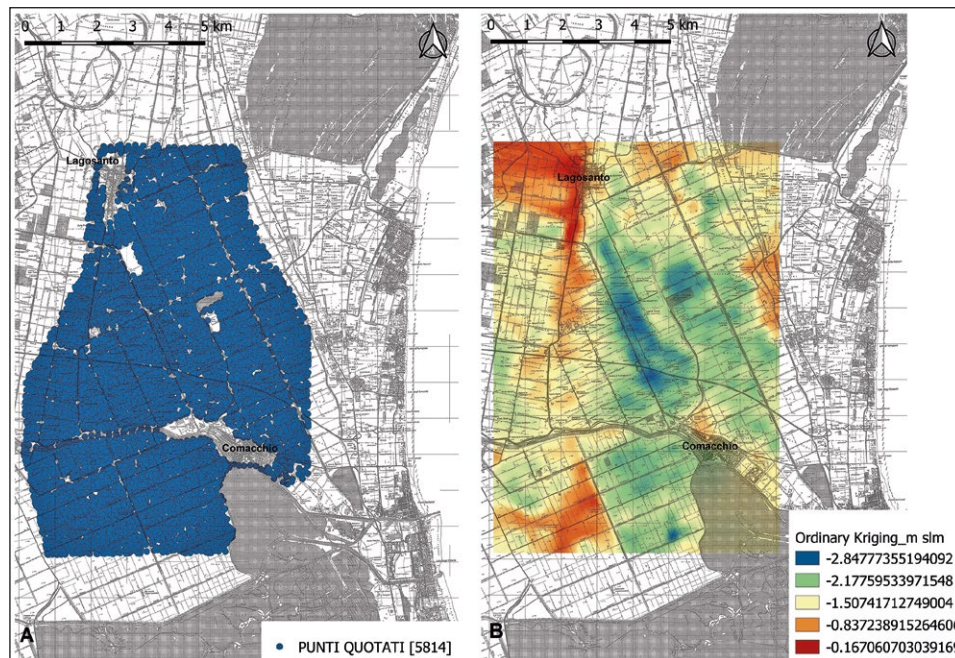


Fig. 4 – Fasi di costruzione del DTM.

Vale la pena descrivere ora come è stato costruito il DTM che ha rappresentato la base per i nostri calcoli. Come anticipato nell’introduzione, il DTM utilizzato nel 2015 risentiva di problemi formali dovuti al fatto che non era stato possibile, allora, ripulire il modello dai condizionamenti antropogenici. In questa sede, invece, il problema è stato ovviato operando alla radice: si è costruito cioè un DTM nuovo tramite la digitalizzazione di 5814 punti di quota (Fig. 4) desunti dalle carte tecniche regionali alla scala 1: 5000. I punti sono stati inseriti in uno shapefile e successivamente interpolati attraverso un Ordinary Kriging<sup>5</sup>. Il risultato offre un DTM più affidabile proprio perché tutte le quote corrispondenti a terrapieni e/o a eventuali opere di escavazione sono state espunte direttamente in sede di costruzione del dataset. Tale operazione, naturalmente, è stata condotta con riferimento ad interventi visibili; come valutare, tuttavia, l’impatto areale, quindi non direttamente individuabile, delle bonifiche e stabilire se il DTM attuale conserva, al netto delle differenze di quota, la morfologia pre-bonifica? Questo esame è stato

<sup>5</sup> Per una discussione sui criteri di scelta degli algoritmi si rimanda a RUCCO, VIANELLO, VITELLI 2017 e relativa bibliografia.

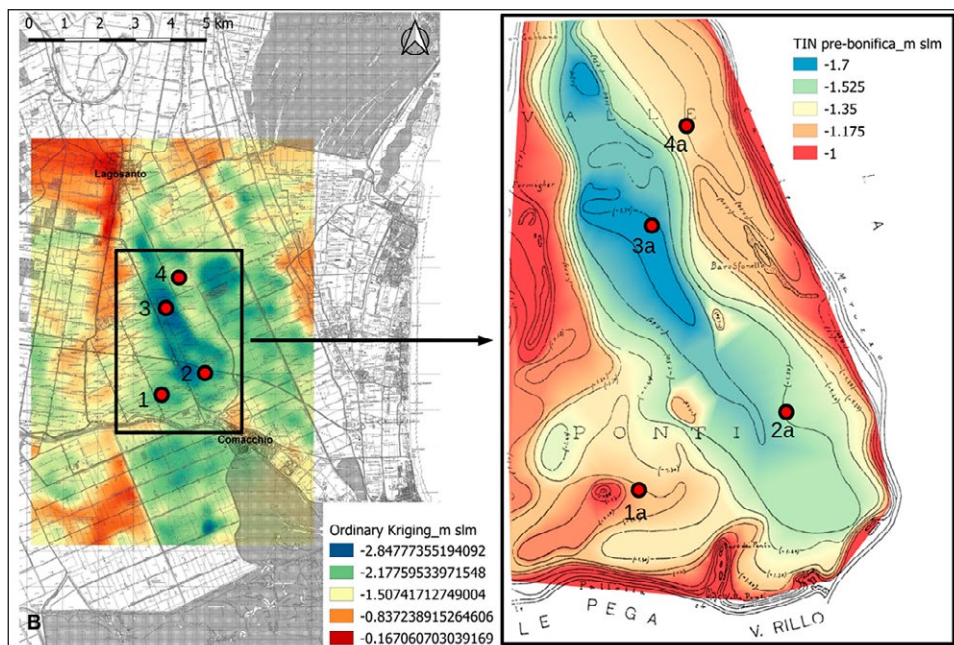


Fig. 5 – Confronto tra DTM costruito sulla base delle quote attuali (a sinistra) e di una carta batimetrica pre-bonifica (a destra).

effettuato confrontando il DTM attuale con un TIN realizzato a partire da una carta batimetrica pubblicata nel 1932 (BARATTA 1932) e relativa al momento immediatamente precedente le operazioni di drenaggio di Valle Ponti (Fig. 5).

Come facilmente percepibile al primo colpo d'occhio, la morfologia generale del territorio comacchiese non è mutata nell'arco dell'ultimo secolo. Lo stesso discorso non vale, però, per le altimetrie di dettaglio, che come dimostrato dalla tabella sottostante (Tab. 1), hanno registrato un decremento medio di circa 80 cm, soltanto 15-20 dei quali possono essere imputati alla subsidenza.

2021	1932	Differenza
Punto 1: -1,7 m slm	Punto 1a: -1 m slm	70 cm
Punto 2: -2,7 m slm	Punto 2a: -1,7 m slm	100 cm
Punto 3: -2,1 m slm	Punto 3a: -1,3 m slm	80 cm
Punto 4: - 2 m slm	Punto 4a: -1,2 m slm	80 cm

Tab. 1 – Confronto tra le altimetrie nei punti di controllo.

Con particolare riferimento alla zona di Valle Ponti, quindi, dobbiamo tenere in considerazione come le quote slm della superficie topografica attuale

siano state abbassate in media di 60-65 cm ca. (al netto della subsidenza, come anticipato); ciò, comunque, non ha comportato variazioni della morfologia complessiva e non altera, dunque, se non al livello del micro-dettaglio, la percezione che si vuole proporre in queste pagine.

### 3. METODI

Il calcolo del livello medio-mare cui far corrispondere le diverse condizioni di allagamento del DTM è stato eseguito secondo il processo descritto di seguito:

a) Il presupposto per tutta l'operazione è rappresentato dal valore ricostruito per l'VIII secolo d.C., corrispondente a -3 m ca. rispetto al livello medio-mare attuale.

b) Il passaggio successivo è stato quello di ricostruire a posteriori il livello medio-mare nel 1580 (Carta Pasi). Per fare questo, la Carta Pasi è stata sovrapposta al DTM e si è quindi proceduto ad allagare quest'ultimo progressivamente, fino a far coincidere l'estensione delle aree allagate con quelle presenti nella carta. Il dato ottenuto attraverso questa operazione del tutto empirica è il seguente: alla fine del XVI secolo d.C., il livello medio-mare registrabile nelle Valli di Comacchio corrispondeva al valore di -1,3 m ca. rispetto all'attuale; nell'arco di otto secoli circa, quindi, il livello medio-mare aveva subito una variazione di 1,7 m ca.

c) A questo punto, per inferire i livelli medio-mare ipotetici – va ribadito – per i singoli secoli, si sarebbe potuto dividere il valore di 1,7 per il numero di secoli da ricostruire; in questo modo si sarebbe ottenuto un delta da aggiungere al livello medio-mare di partenza (-3) per poter allagare sempre di più il DTM; questa via è stata scartata per cercare di individuare, almeno in fase progettuale, degli appigli attraverso cui corroborare, anche soltanto in un punto medio tra VIII e XVI secolo, valori di volta in volta inferiti.

d) Questa operazione è stata effettuata congiungendo due ordini di dati: il primo, ancora una volta, di natura geomorfologica; il secondo di natura schiettamente archeologica:

1) il dato di natura geomorfologico cui si fa riferimento è il tasso di subsidenza stimato per gli ultimi 2000 anni nell'Adriatico settentrionale: si suppone che in questo lasso di tempo, il tasso sia stato corrispondente a 2 mm ca. l'anno; ne consegue che, intorno all'anno 1000, il livello medio-mare delle Valli di Comacchio sarebbe stato più basso di 2 m ca. rispetto all'attuale;

2) il secondo elemento è costituito da una serie di anomalie canaliformi rintracciate nel palinsesto comacchiese attraverso aerofotointerpretazione e corrispondenti, con ogni probabilità, a elementi di suddivisione

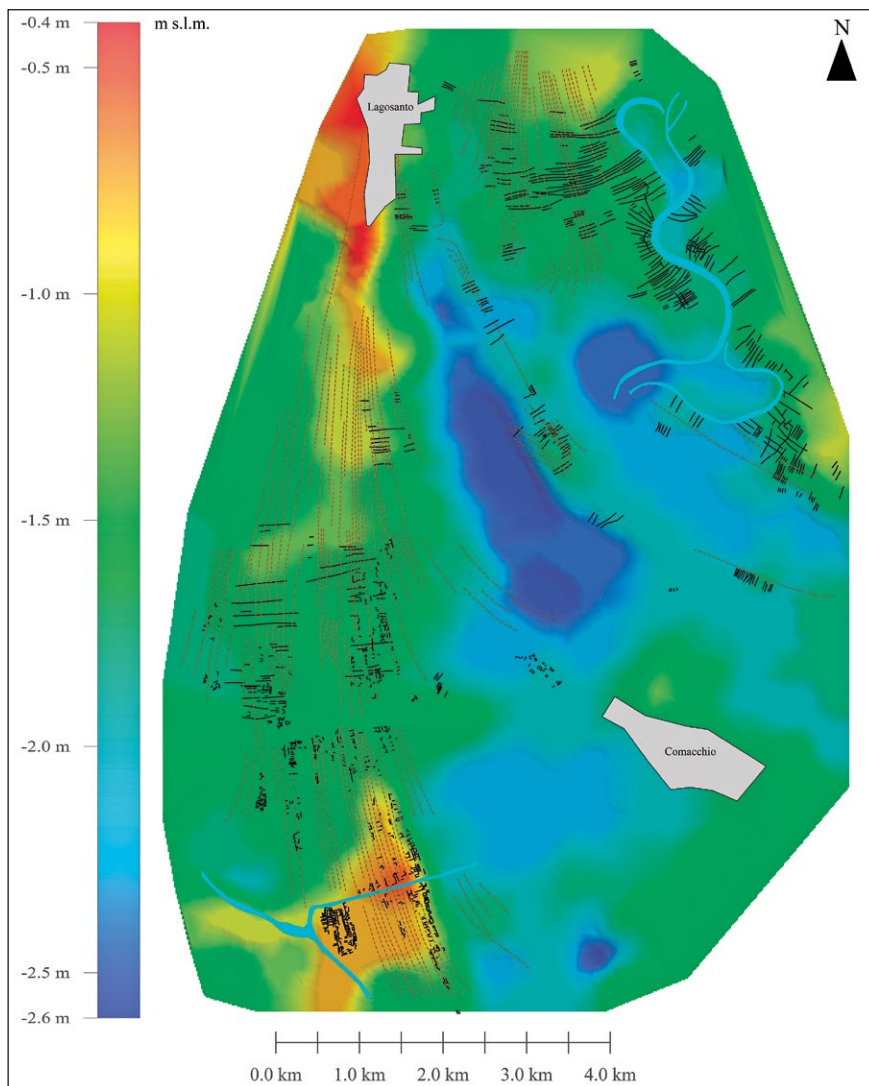


Fig. 6 – Anomalie canaliformi diffuse nel territorio comacchiese.

podereale, vale a dire a scoline di separazione tra appezzamenti agricoli (RUCCO 2015a-b). Tali anomalie, diffuse in tutto il territorio comacchiese e in parte già pubblicate da G. SCHMIEDT (1984), si estendono fino al territorio di Lagosanto e vanno a occupare la sommità di cordoni litoranei fossili la cui formazione risale almeno alla fine della tarda antichità (Fig.



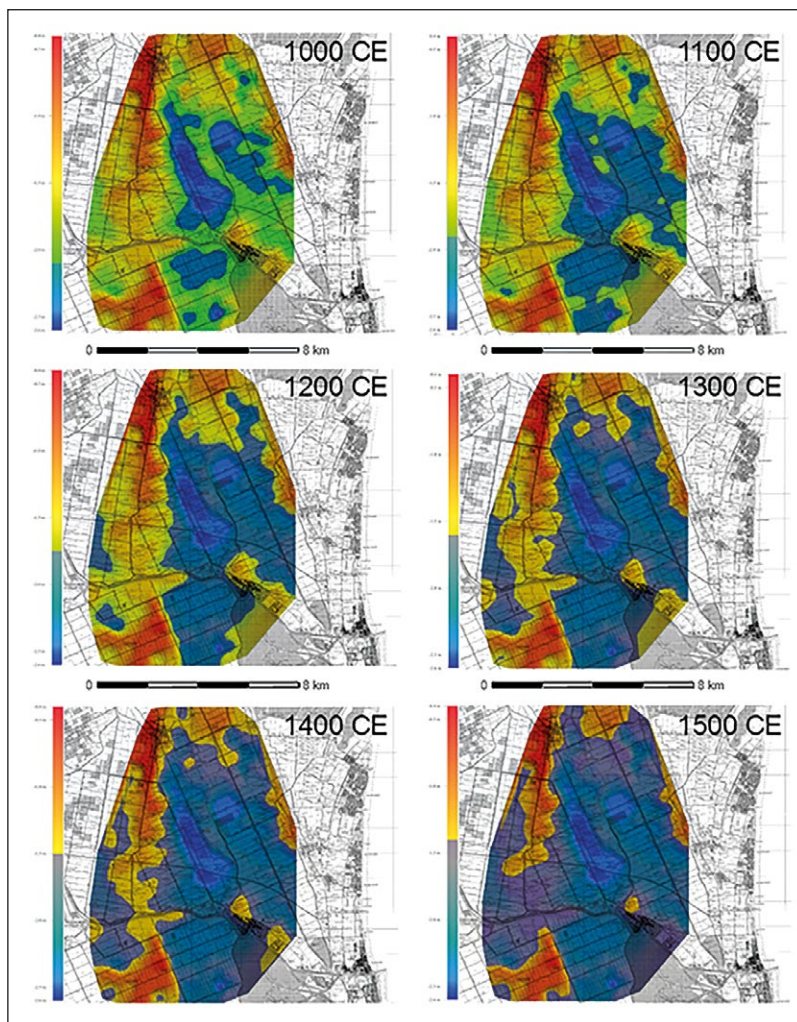


Fig. 7 – Estensione degli spazi umidi nel corso dei secoli.

6). Si tratta dunque di tracce corrispondenti ad attività databili almeno a partire dal VII secolo d.C. Ora, se ci rivolgiamo alle fonti documentarie e consultiamo le carte comacchiesi dal X al XIV secolo d.C. (DONDARINI, SAMARITANI 1993; BOZZINI, GHINATO 1995) ci accorgiamo che la zona di Lagosanto diventa particolarmente “calda” proprio tra l’XI e il XIII secolo, quando vengono menzionati sempre più appezzamenti di terreno localizzabili su base toponomastica precisamente tra Lagosanto e il Po di

Volano, vale a dire in quella zona dove si collocano le tracce canaliformi più recenti. Si tratta ancora una volta di un dato non del tutto stringente, ma che messo nel complesso delle informazioni disponibili offre un appiglio non da poco. Se infatti sovrapponiamo le anomalie suddette al DTM e lo allaghiamo secondo un valore compreso tra -2 m e -1,8 m, ci accorgiamo che soltanto in questo intervallo gli spazi sommersi rispettano e risultano conformi alla localizzazione e alla estensione delle zone appoderate: qualunque valore più alto ne comporterebbe la sommersione. Da tutto ciò consegue che il valore di -2 m per l'anno 1000 può essere considerato affidabile.

e) Gli appigli utilizzabili per la nostra ricostruzione sono diventati tre: il primo, di natura stratigrafica, corrispondente ai -3 m ca. dell'VIII secolo d.C.; il secondo, di natura informatico-cartografica, corrispondente ai -1,3 m ca. della fine del XVI secolo d.C.; il terzo, di natura archeologica-geomorfologica-documentaria, corrispondente al -1,9 ca. del XII secolo d.C. (valori medi sia per allagamento che per cronologia). A questo punto, si è proceduto a calcolare i tassi di incremento del livello medio-mare nei singoli secoli verificando di rimanere all'interno delle forbici ottenute: il delta di incremento è stato calcolato su base congetturale, assegnando a ciascun secolo un tasso costante, (Tab. 2). I risultati sono proposti in Fig. 7.

Secolo	Livello medio-mare
XI	-2 m slm
XII	-1,88 m slm
XIII	-1,76 m slm
XIV	-1,64 m slm
XV	-1,52 m slm
XVI	-1,40 m slm
Fine XVI	-1,28 m slm

Tab. 2 – rlm ipotizzati.

#### 4. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI

Si indicano qui di seguito i principali risultati delle indagini, seguendo un criterio cronologico.

Nell'XI secolo d.C., gli spazi acquei comacchiesi sembrano distribuirsi in parte nella zona più orientale di Valle Pega, in Valle Trebba e in una piccola porzione di Valle Isola. Come marcatamente emerse si caratterizzavano le zone corrispondenti all'affioramento dei cordoni litoranei tra Valle Ponti, Valle Trebba e Valle Isola, con particolare riferimento all'area immediatamente a SE di Lagosanto e ai cordoni databili tra l'età del Bronzo e la primissima età romana tra Valle Ponti e Valle Pega. Anche l'area



di Comacchio si doveva presentare tutto sommato emersa, con ampi spazi calpestabili a NE del centro.

Nel XII secolo d.C., gli spazi acquei nella zona di Valle Pega paiono subire una variazione minima, mentre sembrano estendersi decisamente a N di Comacchio. In effetti, stando al modello, Valle Ponti e Valle Isola risultano divise ormai da due modesti isolotti, mentre le tracce dei cordoni litoranei che appena un secolo prima contribuivano a suddividere marcatamente le due valli sono andate ormai scomparendo. La zona a E e a SE di Lagosanto continua a restare emersa stabilmente; lo stesso dicasi per l'ampia fascia di cordoni che separa Valle Ponti da Valle Trebba fino a Santa Maria in Padovetere. Durante il XIII secolo d.C., la situazione sembra rimanere grosso modo simile a quella del secolo precedente; si segnala una pressoché totale connessione, ormai, tra le acque di Valle Ponti e di Valle Pega, e la comparsa di zone umide anche a O dei cordoni di separazione tra Valle Ponti e Valle Trebba; l'area a SE di Lagosanto continua a rimanere all'asciutto.

Nel 1300 si potrebbe avvertire un passaggio importante perché se la zona di Valle Pega e di Valle Isola resta sostanzialmente inalterata malgrado un'ulteriore trasgressione delle acque lagunari verso O, la zona che sembra più risentire di allagamenti è proprio quella a E di Lagosanto, dove permangono dei lembi di aree ancora asciutte che man mano vanno assottigliandosi verso il mare. La situazione descritta per il secolo precedente non pare subire particolari alterazioni nel corso del XV secolo d.C.; occorre notare semplicemente la progressiva restrizione delle aree emerse tra Valle Trebba e Valle Ponti. Nel 1500 le acque di Valle Ponti e di Valle Trebba si congiungono definitivamente: i cordoni che dividevano in precedenza le due valli restano emersi soltanto fino all'altezza di Volania, mentre in Valle Pega rimane emerso soltanto un isolotto in corrispondenza dell'area di Motta della Girata.

## 5. DISCUSSIONE

Un dato da considerare, anzitutto, è il seguente: tra il 1000 e il 1600, il tasso di subsidenza dei 2 mm l'anno potrebbe dover essere leggermente rivisto in favore di un tasso più vicino evidentemente agli 1,2 mm. Se consideriamo, in effetti, le differenze tra il 1600 e la fine del 1800, cioè se confrontiamo l'estensione dei bacini acquei della Carta Pasi con quelli riportati sull'IGM del 1893, notiamo come il livello medio-mare ricostruibile per la fine del XIX secolo si attesti grosso modo intorno a -1 m; ne consegue dunque che tra il 1600 e la fine dell'Ottocento, cioè nell'arco di tre secoli, il livello medio-mare sarebbe variato di 30 cm ca., il che conferma un tasso di subsidenza più prossimo a 1 che a 2 mm l'anno. Fatta questa precisazione, la discussione che si propone di qui in avanti non riguarda tanto le caratteristiche formali del risultato raggiunto quanto piuttosto le sue implicazioni euristiche.

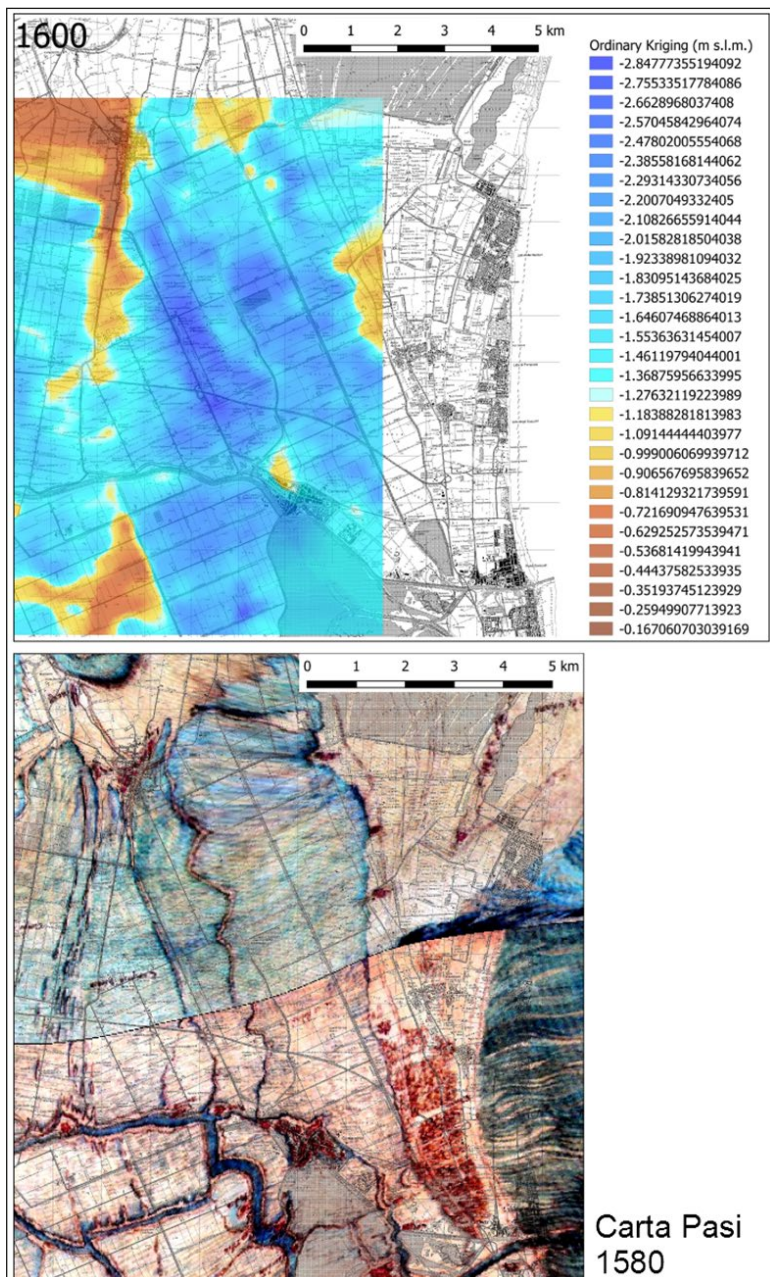


Fig. 8 – Estensione delle valli comacchiesi alla fine del XVI secolo: modello e realtà cartografica a confronto.

La costruzione di un DTM ha permesso di constatare come tutto il territorio comacchiese, almeno nella zona compresa tra il canale Pallotta e Lagosanto, si sia conservato piuttosto bene, nelle sue linee generali, negli ultimi quattro secoli (Fig. 8). Le zone in cui possiamo individuare potenzialmente le maggiori attività antropiche sono proprio quelle degli alti morfologici, e le ricostruzioni proposte ci permettono di notare come anche in queste zone l'attività antropica non si manifesti con caratteri particolarmente spiccati.

Tale conservatività è molto interessante perché ha ripercussioni dirette sulla valutazione del potenziale informativo del nostro territorio. Prima di tutto, ci offre la possibilità di costruire delle zonizzazioni di potenziale con una precisione areale molto alta. In altre parole, si possono isolare con un certo grado di precisione le zone interessate dalla presenza di acqua e le zone sempre emerse nel corso del tempo. Il che si ripercuote non soltanto sulle caratteristiche generali, ma anche su aspetti molto particolari di conservazione del record (si pensi, ad es., a ciò che si conserva bene in ambiente anossico e a ciò che invece si preserva maggiormente in ambiente sub-aereo). In secondo luogo, la conservatività del paesaggio ci mette in condizione di suddividere il territorio in zone a potenziale differenziato a seconda delle varie epoche di riferimento, cosicché il pieno medioevo risulti ben distinto dall'età moderna non su basi congetturali, ma a partire da precise caratteristiche morfologiche, cui corrispondono altrettanto precise condizioni di giacitura.

In terzo luogo, si delinea la possibilità di cartografare il potenziale categorizzandolo sulla base della tipologia delle evidenze. Se la nostra ricerca si vorrà indirizzare verso lo studio delle infrastrutture da pesca, considereremo ad alto potenziale le zone interessate dalla presenza di acqua nel corso dei secoli; se la nostra ricerca vorrà invece focalizzarsi su infrastrutture di natura portuale, ci si potrà concentrare sulle zone intertidali; se infine ci si vorrà dedicare a studiare sistemazioni agricole, necropoli e le aree latamente insediative, ci si potrà rivolgere alle zone che nel corso dei secoli si sono mantenute costantemente asciutte.

## 6. PROSPETTIVE

Si è proposto un metodo per ricostruire le caratteristiche delle Valli di Comacchio tra 1000 e 1500 d.C. La combinazione di diversi tipi di fonti – stratigrafiche, geomorfologiche, cartografiche e storiche – e la loro elaborazione attraverso uno strumento informatico hanno portato non solo ad ottenere un risultato visivo, benché schematico, ma anche a definire alcune questioni di natura teorica, che riguardano il tema della valutazione del potenziale e con quello della programmazione della ricerca. Risulta evidente come la possibilità

di studiare un paesaggio nella diacronia attraverso la ricostruzione areale delle sue caratteristiche morfologiche consente di aprire nuove possibilità di lettura di vari tipi di dati. Le ricostruzioni che abbiamo proposto, infatti, possono essere valide nella considerazione di aspetti di natura stratigrafica, topografica, cartografica e documentaria.

Naturalmente, da tutto ciò discende l'importanza rivestita da simili approcci nella pianificazione della ricerca. Lo abbiamo già accennato, ma, con tutta evidenza, la possibilità di conoscere, seppure per via di modelli, le caratteristiche di un territorio nel corso dei secoli fornisce ovviamente delle possibilità di riflessione cronologicamente, tipologicamente e arealmente indirizzate nei confronti di ciò che ci interessa, e rende quindi decisamente più semplice – ma anche più oneroso sul piano delle responsabilità deontologiche – il lavoro del ricercatore nel momento in cui decide di pianificare la propria attività d'indagine.

ALESSANDRO ALESSIO RUCCO  
Dipartimento di Studi Umanistici  
Università Ca' Foscari Venezia  
alessandro.rucco@unive.it

#### BIBLIOGRAFIA

- ANTONIOLI F., FERRANTI L., FONTANA A., AMOROSI A., BONDESAN A., BRAITENBERG C., DUTTON A., FONTOLAN G., FURLANI S., LAMBECK K., MASTRONUZZI G., MONACO C., SPADA G., STOCCHI P. 2009, *Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines*, «Quaternary International», 1-32.
- ANTONIOLI F., FURLANI S., LAMBECK K., STRAVISI F., AURIEMMA R., GADDI D., GASPARI A., KARINJA S., KOVAČIĆ V. 2008, *Archaeological and geomorphological data to deduce sea level changes during the late Holocene in the Northeastern Adriatic*, in R. AURIEMMA, S. KARINJA (eds.), *Terre di mare. L'archeologia dei paesaggi costieri e le variazioni climatiche. Atti del Convegno Internazionale di Studi (Trieste 2007)*, Udine, Università degli Studi di Trieste, 221-234.
- BARATTA M. 1932, *Il Sito di Spina. Con due tavole*, «Athenaeum», n.s., 10, 3, 217-246.
- BEHRE K.-E. 2004, *Coastal development, sea-level change and settlement history during the later Holocene in the Clay District of Lower Saxony (Niedersachsen), northern Germany*, «Quaternary International», 112, 1, 37-53.
- BELLOTTI P., CALDERONI G., DALL'AGLIO P.L., D'AMICO C., DAVOLI L., DI BELLA L., D'OREFICE M., ESU D., FERRARI K., BANDINI MAZZANTI M., MERCURI A.M., TARRAGONI C., TORRI P. 2016, *Middle-to late-Holocene environmental changes in the Garigliano delta plain (Central Italy): Which landscape witnessed the development of the Minturnae Roman colony?*, «The Holocene», 26, 9, 1457-1471.
- BENJAMIN J., ROVERE A., FONTANA A., FURLANI S., VACCHI M., INGLIS R.H., GALILI E., ANTONIOLI F., SIVAN D., MIKO S., MOURTZAS N., FELJA I., MEREDITH-WILLIAMS M., GOODMAN-TCHERNOV B., KOLAITI E., ANZIDEI M., GEHRELS R. 2017, *Late Quaternary sea-level changes and early human societies in the central and eastern Mediterranean Basin: An interdisciplinary review*, «Quaternary International», 449, 29-57.
- BERNASCONI M.P., STANLEY J.-D. 2011, *Coastal margin evolution and postulated "basin-shipyard" area at ancient Locri-Epizephiri, Calabria, Italy*, «Geoarchaeology», 26, 1, 33-60.

- BOZZINI P., GHINATO A. 1995 (eds.), *Comacchio nelle antiche carte. Volume I. Per un Codice Diplomatico Comacchiese (715-1399)*, Bologna, Nuova Alfa Editoriale.
- CITTER C., ARNOLUD-HUYZENDEVELD A. 2012, *New approaches to old issues: The application of predictive maps in archaeology. A Case study: Modelling the location the Grosseto's salt work from 700 BC to AD 1200*, «Medieval Settlement Research», 27, 1-11.
- CREMONINI S. 2019, *Il territorio di Cervia tra mare e terra. Geomorfologia ed evidenze stratigrafiche dallo scavo della Rotatoria di Cervia*, in C. GUARNIERI (ed.), *La salina romana e il territorio di Cervia. Aspetti ambientali e infrastrutture storiche*, Bologna, AnteQuem, 27-56.
- DELILE H., GOIRAN J.-P., BLICHER-TOFT J., ARNAUD-GODET F., ROMANO P., BRAVARD J.-P. 2016, *A geochemical and sedimentological perspective of the life cycle of Neapolis harbour (Naples, Souther Italy)*, «Quaternary Science Reviews», 150, 84-97.
- DONDARINI R., SAMARITANI A. 1993 (eds.), *Guida alle fonti archivistiche per la storia di Comacchio*, Casalecchio di Reno, Grafis Edizioni.
- EMMANOULIDIS A., KATRANTSIOTIS C., NORSTROM E., RISBERG J., KYLANDER M., SHEIK T.A., ILIOPOULOS G., AVRAMIDIS P. 2018, *Middle to late Holocene palaeoenvironmental study of Gialova Lagoon, SW Peloponnese, Greece*, «Quaternary International», 476, 46-62.
- FÀISSE C., MATHE V., BRUNIAUX G., LABUSSIERE J., CAVERO J., JEZEGOU M.-P., LEFEVRE D., SANCHEZ C. 2018, *Palaeoenvironmental and archaeological records for the reconstruction of the ancient landscape of the Roman harbour of Narbonne (Aude, France)*, «Quaternary International», 463, 124-139.
- FONTANA A., VINCI G., TASCA G., MOZZI P., VACCHI M., BIVI G., SALVADOR S., ROSSATO S., ANTONIOLI F., ASIOLI A., BRESOLIN M., DI MARIO F., HAJDAS I. 2017, *Lagoonal settlements and relative sea level during Bronze Age in Northern Adriatic: Geoarchaeological evidence and paleogeographic constraints*, «Quaternary International», 439, 17-36.
- FOUACHE E., VELLA C., DIMO L., GRUDA G., MUGNIER J.-L., DENELE M., MONNIER O., HOTYAT M., HUTH E. 2010, *Shoreline reconstruction since the Middle Holocene in the vicinity of the ancient city of Apollonia (Albania, Seman and Vjosa deltas)*, «Quaternary International», 216, 118-128.
- GHILARDI M., PSOMIADIS D., PAVLOPOULOS K., MÜLLER ÇELKA S., FACHARD S., THEURILLAT T., VERDAN S., KNOELL A.R., THEODOROPOULOU T., BICKET A., BONNEAU A., DELANGHE-SABATIER D. 2014, *Mid- to Late Holocene shoreline reconstruction and human occupation in Ancient Eretria (South Central Euboea, Greece)*, «Geomorphology», 208, 225-237.
- GIAIME M., MARRINER N., MORHANGE C. 2019, *Evolution of ancient harbours in deltaic contexts: A geoarchaeological typology*, «Earth-Science Reviews», 191, 141-167.
- GIAIME M., MORHANGE C., CAU ONTIVEROS M.Á., FORNÓS J.J., VACCHI M., MARRINER N. 2017, *In search of Pollentia's southern harbour: Geoarchaeological evidence from the Bay of Alcúdia (Mallorca, Spain)*, «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», 466, 184-201.
- GOETHALS T., DE DAPPER M., VERMEULEN F. 2009, *Geo-archaeological implications of river and coastal dynamics at the Potenza river mouth (The Marches, Italy)*, in M. DE DAPPER, F. VERMEULEN, S. DEPPEZ, D. TAELEMAN (eds.), *Ol' Man River. Geo-archaeological Aspects of Rivers and River Plains*, Ghent, Academia Pr Scientific Pub, 407-438.
- GOIRAN J.-P., SALOMON F., MAZZINI I., BRAVARD J.-P., PLEUGER E., VITTORI C., BOETTO G., CHRISTIANSEN J., ARNAUD P., PELLEGRINO A., PEPE C., SADORI L. 2014, *Geoarchaeology confirms location of the ancient harbour basin of Ostia (Italy)*, «Journal of Archaeological Science», 41, 389-398.
- GOIRAN J.-P., TRONCHÈRE H., SALOMON F., CARBONEL P., DJERBI H., OGNARD C. 2010, *Palaeoenvironmental reconstruction of the ancient harbors of Rome: Claudius and Trajan's marine harbors on the Tiber delta*, «Quaternary International», 216, 3-13.
- HANSSON A., NILSSON B., SJOSTROM A., BJORCK S., HOLMGREN S., LINDERSON H., MAGNELL O., RUNDGREN M., HAMMARLUND D. 2018, *A submerged Mesolithic lagoonal landscape*



- in the Baltic Sea, southeastern Sweden - Early Holocene environmental reconstruction and shore-level displacement based on a multiproxy approach*, «Quaternary International», 463, 110-123.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., ANZIDEI M., FERRANTI L., LEONI G., SCICCHITANO G., SILENZI S. 2011, *Sea-level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future*, «Quaternary International», 232, 250-257.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., PURCELL A., SILENZI S. 2004, *Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 yr*, «Quaternary Science Reviews», 23, 1567-1598.
- MADRICARDO F., DONNICI S. 2014, *Mapping past and recent landscape modifications in the Lagoon of Venice through geophysical surveys and historical maps*, «Anthropocene», 6, 86-96.
- MOZZI P., RUCCO A.A., ABBA T. 2021, *Indagini geoarcheologiche nel sito altomedievale di Villaggio San Francesco*, in S. GELICHI (ed.), *Un emporio e la sua cattedrale. Gli scavi di piazza XX Settembre e Villaggio San Francesco a Comacchio*, Sesto Fiorentino (FI), All'Insegna del Giglio, 187-197.
- OOST A.P., DE BOER P.L. 1994, *Sedimentology and development of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and backbarrier areas of the Dutch Wadden Sea*, «Senckenbergiana Maritima», 24, 65-115.
- RUCCO A.A. 2015a, *Comacchio nell'alto medioevo. Il passaggio tra topografia e geoarcheologia*, Sesto Fiorentino (FI), All'Insegna del Giglio.
- RUCCO A.A. 2015b, *Dalle "carte" alla terra. Il paesaggio comacchiese nell'alto medioevo*, «Reti Medievali Rivista», 16, 2, 197-229 (<https://doi.org/10.6092/1593-2214/475>).
- RUCCO A.A., VIANELLO M., VITELLI D. 2017, *Geostatistical and deterministic predictive methods for a 3D reconstruction of the ancient morphology and the anthropic remains of the early medieval port of Comacchio (Ferrara - Italy)*, «Archeologia e Calcolatori», 28.1, 239-255 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.1.2017.14>).
- RUIZ-PEREZ J.-M., CARMONA P. 2019, *Turia river delta and coastal barrier-lagoon of Valencia (Mediterranean coast of Spain): Geomorphological processes and global climate fluctuations since Iberian-Roman times*, «Quaternary Science Reviews», 219, 84-101.
- SACCHI M., MOLISSO F., PACIFICO A., VIGLIOTTI M., SABBARESE C., RUBERTI D. 2014, *Late-Holocene to recent evolution of Lake Patria, South Italy: An example of a coastal lagoon within a Mediterranean delta system*, «Global and Planetary Change», 117, 9-27.
- SALOMON F., GOIRAN J.-P., NOIROT B., PLEUGER E., BUKOWIECKI E., MAZZINI I., CARBONEL P., GADHOUM A., ARNAUD P., KEAY S., ZAMPINI S., KAY S., RADDI M., GHELLI A., PELLEGRINO A., MORELLI C., GERMONI P. 2018, *Geoarchaeology of the Roman port-city of Ostia: Fuvio-coastal mobility, urban development and resilience*, «Earth-Science Reviews», 177, 265-283.
- SCHMIEDT G. 1984, *Cosa si vede dal cielo*, in M. MARINI (ed.), *I Pollia alla ricerca di Spina I*, Ravenna, Edizioni del Girasole, 195-232.
- ÜNER S. 2018, *Evolution of Çolpan barrier and lagoon complex (Lake Van-Turkey): Sedimentological and hydrological approach*, «Quaternary International», 486, 73-82.
- VACCHI M., MARRINER N., MORHANGE C., SPADA G., FONTANA A., ROVERE A. 2016, *Multiproxy assessment of Holocene sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of the isostatic signal*, «Earth-Science Reviews», 155, 172-197.
- VESPREAMEANU-STROE A., PREOTEASA L., HANGANU D., BROWN A.G., BÎRZESCU I., TOMS P., TIMAR-GABOR A. 2013, *The impact of the Late Holocene coastal changes on the rise and decay of the ancient city of Histria (southern Danube delta)*, «Quaternary International», 293, 245-256.
- VITTORI C., MAZZINI I., SALOMON F., GOIRAN J.-P., PANNUZI S., ROSA C., PELLEGRINO A. 2015, *Palaeoenvironmental evolution of the ancient lagoon of Ostia Antica (Tiber delta, Italy)*, «Journal of Archaeological Science», 54, 374-384.

ABSTRACT

The paper proposes the representation of the evolution of the Comacchio Valleys between the 11<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup> centuries CE. The bases for this representation are provided by stratigraphic, topographical, cartographic and historical-documentary data; the frame is offered by information technology. The possibility of reconstructing the physical characteristics of a landscape in a diachronic perspective with a certain degree of detail offers valuable insights not only in order to refine our knowledge on the given topic but also in view of the evaluation of the archaeological potential and planning of research.

## ACCURATA, MA SOSTENIBILE: SOLUZIONI OPERATIVE PER LA DOCUMENTAZIONE GRAFICA E FOTOGRAFICA DELLO SCAVO SUL SITO DI VIGNALE

### 1. INTRODUZIONE

Le riflessioni qui proposte derivano dall'esperienza di coordinamento del progetto "Uomini e Cose a Vignale", che condivido con Enrico Zanini per conto del Dipartimento di Scienze Storiche e Beni Culturali dell'Università di Siena (ZANINI, GIORGI 2014) su concessione del Ministero della Cultura. I caratteri del sito, la composizione del gruppo di lavoro e l'integrazione della ricerca in un progetto di archeologia partecipata hanno stimolato una serie di riflessioni sul processo di documentazione, in particolare sulla sostenibilità delle procedure di documentazione grafica e fotografica e sulla ricerca di possibili soluzioni alternative.

È opinione condivisa che la produzione della conoscenza archeologica si concretizzi nel passaggio cruciale della documentazione delle evidenze materiali, che in molti contesti di ricerca "pura" è regolato ancora da norme rigide che si sono consolidate con l'affermazione dell'archeologia stratigrafica di stampo harrisiano. Se da un lato non è in discussione un patrimonio di metodologie condivise che permette di concordare su che cosa vada documentato, dall'altro appare evidente come il tradizionale processo di documentazione debba misurarsi con alcune condizioni attuali che sono oggettivamente diverse da quelle in cui esso si è strutturato: un'idea di cantiere archeologico più complessa che in passato, un uso diffuso della tecnologia, una formazione degli archeologi sensibilmente diversa da quella di quaranta anni fa.

Il moltiplicarsi delle ricerche in ambiti culturali, geografici, sociali ed economici diversi fra loro ha permesso di sviluppare una riflessione sulla concreta applicabilità a qualsiasi contesto archeologico del sistema harrisiano. Nella percezione attuale di una realtà complessa, è infatti impensabile che una stessa procedura possa essere applicata in qualunque contesto ci troviamo a operare. La natura del sito, la tecnologia disponibile, la composizione del gruppo di lavoro, il contesto economico e il tempo a disposizione sono variabili che interferiscono inevitabilmente con un approccio rigidamente normativo, che spesso finisce per assumere il carattere di un "dogma" (CARVER 2011, 42-47) che di fatto rallenta il nostro lavoro anziché semplificarlo.

D'altro canto, la "rivoluzione informatica permanente" in cui viviamo si traduce spesso, per i gruppi di ricerca universitari, in una affannosa e per lo più

improduttiva ricerca delle risorse economiche necessarie per l'aggiornamento e la manutenzione degli strumenti o per l'acquisto delle licenze software. A questo si lega anche il tema della formazione universitaria, dove, per una serie di ragioni complesse, si sperimenta una crescente difficoltà nell'inserire corsi di contenuto tecnico in un'offerta formativa che deve adattarsi alle richieste di una preparazione sempre più multidisciplinare. Ne consegue che sono sempre meno presenti quegli insegnamenti tecnici che sono stati protagonisti di una stagione oramai conclusa della formazione universitaria in archeologia, in cui gli aspetti tecnico-operativi hanno talvolta prevalso sull'educazione all'analisi e alla sintesi storica. Inoltre, quando presenti, tali corsi sono spesso focalizzati su una tecnologia di ultima generazione, che è disponibile per gli studenti finché rimangono all'interno dell'università, ma che diviene per lo più inattuabile una volta entrati nel mondo del lavoro. Si pone di conseguenza il problema di costruire una serie di abilità più generali che permettano di individuare, scegliere e utilizzare gli strumenti tecnologici economicamente più sostenibili.

Una seconda questione ha a che fare con le caratteristiche proprie degli strumenti che oggi tutti utilizziamo e con gli "effetti collaterali" del loro uso spesso acritico, che li ha fatti diventare una *conditio sine qua non* per la produzione di una documentazione secondo standard condivisibili.

Al momento della loro adozione, le stazioni totali e i programmi di disegno assistito, così come quelli di fotoraddrizzamento, hanno esercitato un forte appeal essenzialmente per tre motivi: la riduzione dei tempi in fase di registrazione, la garanzia di precisione assoluta della rilevazione (ZANINI, COSTA 2006, 244) e la possibilità di realizzare basi conoscitive più attendibili e versatili rispetto a quelle prodotte manualmente.

Oggi, a tanti anni dall'ingresso di tali strumenti nella quotidianità del nostro lavoro, appare però lecito porci qualche domanda sulla sostenibilità reale di questo sistema: vale la pena impiegare molto tempo per ottenere un prodotto accurato quasi fino al "delirio di precisione"? L'accuratezza produce un reale aumento di conoscenza o migliora la nostra comunicazione? La qualità del prodotto è davvero migliore rispetto a quella che deriva da una procedura più speditiva o uno strumento meno sofisticato? Da qui nasce l'idea di esplorare pragmaticamente altre vie che permettano di conseguire risultati di qualità comparabile, lavorando con strumenti tecnologici a basso costo e con software open-source, di semplice utilizzo e che non richiedano quindi una specifica formazione: un terreno di sperimentazione interessante, perché si tratta di tecnologie che nascono spesso con un processo bottom-up, ispirato a pragmatismo e sostenibilità nel tempo, la cui acquisizione non richiede investimenti importanti e per le quali la formazione all'uso può avvenire in un contesto anche diverso da quello universitario, rappresentato dalle risorse di rete e quindi meno fossilizzato e sempre aggiornato.

## 2. IL CONTESTO DELLA SPERIMENTAZIONE

Il sito archeologico di Vignale presenta una serie di caratteristiche che lo rendono un contesto ideale per lo sviluppo di alcune sperimentazioni. Dal 2004 ad oggi sono stati individuati i resti di un insediamento con una lunga continuità di occupazione dal III secolo a.C. all'XI d.C. e articolato in una villa, due edifici termali, un impianto per la produzione di anfore e laterizi e un'area sepolcrale (ZANINI, GIORGI 2014, 2018, 2019). Tutte queste evidenze si presentano in uno stato di conservazione compromesso, per cui sono necessarie molte ore di paziente lavoro di pulizia e di meticolosa analisi di frammenti di stratificazione prima di procedere con la documentazione. Al tempo stesso, però, un sito così grande e articolato propone una grande varietà di problemi legati al rilievo di evidenze archeologiche tra loro molto diverse, costituendosi come un'interessante palestra adatta alle sperimentazioni.

Il sito è inoltre lo scenario di un progetto di archeologia pubblica che si concretizza in una serie di esperienze condivise con la comunità locale (ZANINI 2018; ZANINI *et al.* 2019; ZANINI, GIORGI 2020) e che ci ha spinti a fare alcune scelte che hanno condizionato il nostro modo di lavorare; per rendere lo scavo più comprensibile, abbiamo ritenuto opportuno infatti tenere sempre aperta e visibile un'area molto estesa caratterizzata da un più alto potenziale narrativo (COSTA, RIPANTI 2013). Anche da questo punto di vista, le attività di pulizia assorbono un tempo non irrilevante nell'economia generale del cantiere. Poiché la nostra è una archeologia condivisa non solo rispetto ai risultati, ma soprattutto nelle sue fasi di elaborazione, abbiamo inoltre bisogno di avere rapidamente a disposizione materiali spendibili nel sistema della comunicazione multimediale (ZANINI, RIPANTI 2012). In questo contesto il sistema tradizionale di rilievo-stazione totale-AutoCad-GIS si è rivelato per noi insostenibile per tempi di esecuzione, competenze specifiche richieste e difficile spendibilità del prodotto finale in un ambiente comunicativo (blog, canali social).

La strada che stiamo esplorando è quella dell'applicazione estensiva, giorno per giorno, alle attività quotidiane di documentazione e scavo di un processo basato sull'uso di droni a basso costo e di software di fotomodellazione (al momento proprietari, ma disponibili in versione educational, in prospettiva open-source), per produrre in una volta sola i materiali destinati alla documentazione grafica gestita in ambiente GIS e quelli destinati alla comunicazione. Non si tratta evidentemente di soluzioni in sé innovative e non intendiamo proporle come tali, quanto piuttosto intendiamo testarne la sostenibilità nel tempo ed esplorarne i limiti, per capire se possano concretamente bypassare alcuni veri e propri "colli di bottiglia" che le tecnologie hanno creato nella gestione del flusso di lavoro nella documentazione quotidiana dello scavo. L'idea è, per esempio, di evitare l'uso esclusivo di una stazione totale per ogni unità di ricerca, riducendone l'impiego alla sola acquisizione



periodica di punti di riferimento, e assicurandone quindi la condivisione con altri gruppi, ottimizzando i tempi di lavoro di pochi operatori specializzati, tagliando i costi di ammortamento, manutenzione e aggiornamento che divengono sempre meno sostenibili.

I risultati ottenuti fin qui sono incoraggianti, perché il prodotto finale è di accuratezza totalmente comparabile con quella di un rilievo tradizionale e contiene una densità di informazioni, per esempio relativamente alle quote, impensabili con quella procedura e specialmente utili nelle fasi di rielaborazione post-scavo. Una procedura speditiva e di facile apprendimento ottimizza inoltre notevolmente la gestione del cantiere, perché riduce al minimo gli errori dovuti all'inesperienza nell'uso di strumenti complessi come una stazione totale e perché il tempo recuperato può essere più utilmente speso per lo scavo, la formazione degli studenti e le attività di archeologia pubblica.

Come in tutte le procedure, a maggior ragione in quelle in fase sperimentale, non mancano le criticità, ma anche in questo caso un approccio meno dogmatico, più riflessivo e diversificato in base ai problemi concreti da risolvere appare una strada sempre percorribile, come cercheremo di dimostrare nelle pagine seguenti.

E.G.

### 3. ESPERIENZE DI USO SISTEMATICO DELLA FOTOMODELLAZIONE NELLA DOCUMENTAZIONE DELLO SCAVO

Le procedure di documentazione grafica in uso sul sito di Vignale fino alla campagna del 2019 prevedevano il rilievo di tutte le Unità Stratigrafiche tramite stazione totale, cui, nel caso delle strutture (fondazioni, muri, pavimenti, etc.), veniva affiancato un rilievo indiretto con fotoraddrizzamento digitale di immagini nadirali, secondo un procedimento testato da molto tempo su altri siti su cui opera lo stesso gruppo di ricerca (VATTIMO 2006), con l'uso di un semplice software di raddrizzamento e il successivo inserimento dell'immagine in un CAD.

Questo procedimento, messo a punto in un'altra era informatica, presentava tuttavia evidenti problemi in termini di tempo, forza lavoro necessaria e sicurezza. Nel caso delle fotografie zenitali, infatti, si rendeva necessario ricorrere al lavoro di almeno tre operatori, impiegati per sorreggere un palo telescopico sul quale veniva agganciata la macchina fotografica. L'assenza di un controllo remoto del dispositivo comportava inoltre numerose prove di scatto e non assicurava delle fotografie ottimali, prolungando così i tempi di fermo delle attività di scavo. La necessità di sopperire alla presenza solo saltuaria di operatori esperti nell'uso della stazione totale e del CAD, la durata limitata nel tempo delle campagne di scavo e il conseguente bisogno di velocizzare le procedure di rilievo hanno imposto la sperimentazione di nuove tecniche, tanto per il rilievo grafico che per quello fotografico.

La disponibilità di un drone DJI Spark e la sperimentazione del software di fotomodellazione 3DF Zephyr 5, utilizzato in una prima fase grazie a licenze di prova per studenti e in seguito acquistato, hanno permesso di velocizzare e semplificare le operazioni di rilievo sul campo e documentazione in laboratorio, fino a raggiungere l'obiettivo di farla diventare la procedura standard non solo per il rilievo generale di fine scavo o di parti molto significative dell'area, ma in generale per la documentazione quotidiana di tutte le Unità Stratigrafiche individuate (KORUMAZ *et al.* 2014).

### 3.1 *La procedura generale*

La prima attività, da eseguire con speciale attenzione giacché determinerà l'accuratezza dei rilievi di un'intera campagna, è il posizionamento di mire numerate di grandi dimensioni che saranno collocate in modo da non essere di intralcio agli archeologi.

Dopo aver rilevato le mire con la stazione totale, si procede con il rilievo fotografico da drone: vengono realizzate una serie di fotografie zenitali con almeno il 50% di sovrapposizione tra un fotogramma e il successivo e alcune fotografie oblique, con un'inclinazione dell'obiettivo di circa 45°, intorno all'area da rilevare, regolando l'altezza del volo in base al dettaglio necessario e in base all'ampiezza dell'area interessata. Le immagini ricavate e le coordinate delle mire vengono poi elaborate con software 3DF Zephyr 5 per creare modelli 3D, ortofoto, sezioni e modelli di elevazione digitale. La procedura messa a punto nel 2019 è stata testata estensivamente nel corso della campagna 2020, quando, in occasione di attività di manutenzione e documentazione, si è proceduto al nuovo rilievo integrale della parte centrale e settentrionale della principale area di scavo, al fine di operare un confronto di qualità e affidabilità del rilievo rispetto a quello già eseguito con procedura tradizionale negli anni scorsi, cogliendo nel contempo l'occasione di sperimentare specifici casi particolari di rilievo a diversi gradi di difficoltà.

### 3.2 *Gli esperimenti*

La sperimentazione si è quindi orientata su tre punti potenzialmente critici: 1) valutazione complessiva, in termini di tempi, costi e accuratezza della nuova procedura rispetto a quella precedentemente in uso per la documentazione di aree relativamente grandi; 2) possibilità di applicare la stessa procedura a una scala di dettaglio molto maggiore con specifiche necessità di accuratezza nel rilievo; 3) possibilità di far interagire queste due scale all'interno di un unico prodotto finale (DONEUS *et al.* 2011).

Per quanto riguarda il punto 1, la sperimentazione si è attuata su un'area relativamente vasta (ca. 35×21 m), ripetendo le operazioni in due momenti e con due modalità diverse: nel primo "volo" è stata eseguita una battuta fotografica con il drone alla quota di 4 m, utilizzando le mire "generalì" come punti

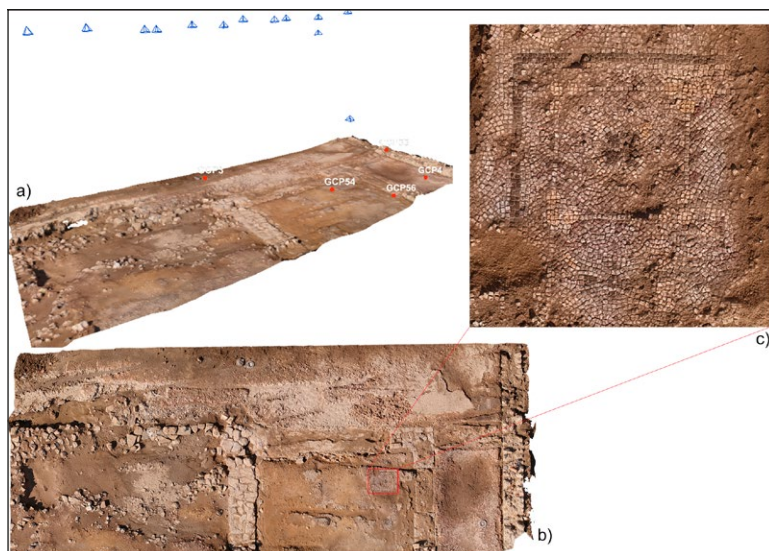


Fig. 1 – a) modello 3D dell'area; b) ortofoto esportato dal modello 3D; c) dettaglio del mosaico.

di controllo a terra; nel secondo, concentrato in un'area più piccola (ca. 19×21 m), limitata da due ambienti della villa romana in corso di scavo (un cortile scoperto e un portico ad esso adiacente), la quota di volo è stata più bassa (dai 2 ai 3 m) e il numero delle mire al suolo è stato ulteriormente incrementato per garantire una migliore copertura dei fotogrammi. Entrambi gli esperimenti hanno avuto esito positivo, giacché il rilievo fotogrammetrico ottenuto ribatte con accuratezza il rilievo tradizionale eseguito negli anni precedenti.

Per quanto riguarda il punto 2, l'esperimento è stato condotto su alcuni lacerti di un mosaico policromo tardoantico, rinvenuti in condizioni molto precarie e il cui rilievo accurato si rendeva necessario in vista del recupero del tessellato stesso per consentire le opportune attività di conservazione. È stato effettuato un volo con drone a bassa quota (3,5 m per le foto di contesto, 1 m per i dettagli del mosaico): in aggiunta alle tre mire del rilievo generale che ricadevano nell'area di ripresa, sono stati posizionati e opportunamente battuti con la stazione totale due ulteriori punti di controllo al suolo e sono stati eseguiti numerosi scatti (19) per compensare il basso numero di punti di riferimento. Anche in questo caso, l'esperimento ha avuto un esito positivo, perché la bassa quota di volo ha permesso la realizzazione di foto di buona definizione e il prodotto finale appare del tutto analogo, in termini di accuratezza, al rilievo a contatto eseguito a scopo di verifica, con la possibilità di restituire posizione, forma e dimensione di ogni singola tessera (Fig. 1).

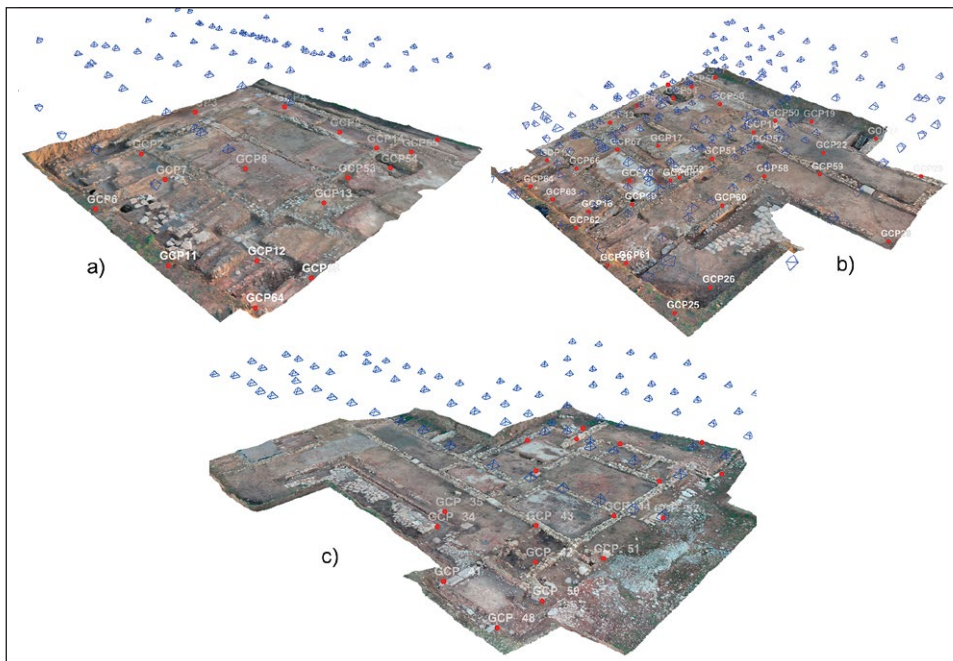


Fig. 2 – Modelli 3D delle aree rilevate in tre momenti diversi: a) Area N; b) Area centrale; c) Area S.

Per quanto riguarda infine il punto 3, l'esperienza è consistita nella riunificazione in un unico prodotto finale di tre rilievi condotti in tempi diversi: il primo relativo alla porzione settentrionale dell'area centrale di scavo, già indagata nel 2016, le cui strutture sono state riscoperte, ripulite e documentate nella campagna del 2020; il secondo relativo alla zona centrale, la cui documentazione fotografica è stata effettuata al termine della campagna del 2020; il terzo relativo all'area più a S, indagata e rilevata nel 2019 (Fig. 2). Per ciascuna di queste aree è stato prodotto un modello tridimensionale autonomo e i tre modelli sono stati quindi uniti in un unico spazio di lavoro grazie al comune sistema di riferimento geografico, apportando manualmente poche correzioni per evitare le imperfezioni causate dalla sovrapposizione di porzioni di scavo indagate in momenti differenti e quindi fotografate in stato di conservazione e pulizia diversi.

Dopo la realizzazione di un'unica mesh è stato possibile realizzare una mesh con texture. Sempre grazie al software 3DF Zephyr, è stata poi elaborata una ortofoto sia per ognuno dei tre settori dello scavo, sia per l'intera area. Oltre a una ortofoto, è stato esportato anche un modello digitale della superficie (DSM) dell'area di scavo, interrogabile tramite lo stesso software

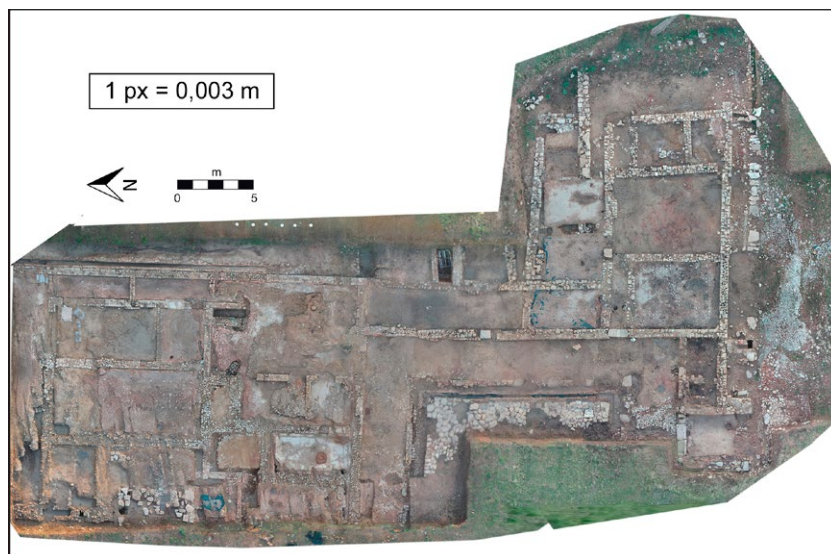


Fig. 3 – Ortofoto generale realizzato dall'unione dei tre differenti rilievi fotogrammetrici.

o importabile all'interno di un GIS. L'unione dei tre modelli ha permesso di avere una visione d'insieme del sito, scavato e ripulito, nella sua interezza: un risultato difficilmente conseguibile in un'unica campagna di indagini, vista la mole di lavoro e di tempo necessaria per intervenire su un'area così vasta (Fig. 3) (SORDINI *et al.* 2015).

In sintesi, l'insieme delle sperimentazioni ha confermato che le procedure sopra descritte permettono di realizzare, con strumenti dai costi limitati e in tempi rapidi, modelli tridimensionali dell'oggetto interessato da cui è possibile estrapolare diversi prodotti utili alla documentazione e allo studio del sito (SFACTERIA 2016). I risultati di queste procedure dipendono in parte dalla precisione con cui vengono gestite e il loro uso da parte di personale adeguatamente formato comporta certamente incrementi significativi di qualità, ma la loro semplicità operativa le rende ben adatte anche ai tempi e alle modalità di indagine di uno scavo archeologico didattico universitario. L'integrazione di strumenti di non difficile utilizzo, almeno a un livello basilare (stazione totale, drone, software di fotomodellazione), permette di ottenere, per esempio, in un'unica soluzione ortofoto di alta qualità che possono costituire la base per il disegno digitale di strutture, US e porzioni di scavo, DSM facilmente interrogabili e sezioni digitali piuttosto accurate, oltre ad un prodotto efficace per la comunicazione dei contenuti, qual è il modello tridimensionale stesso.

L.L.



#### 4. LA FOTOGRAMMETRIA D'ARCHIVIO NELLA DOCUMENTAZIONE ARCHEOLOGICA

Questa sperimentazione, condotta nel corso del seminario invernale 2019-2020, è stata innescata da un'impasse procedurale verificatasi nel corso della campagna 2018, quando, per una serie di problemi diversi, la documentazione di due aree di scavo – la parte più settentrionale della principale area di indagine (ambiente 26) e il grande sondaggio aperto in corrispondenza di un impianto termale (sondaggio 37) che sorge isolato a S della stessa area – è risultata insufficiente per mettere in atto la consueta e consolidata procedura di fotoraddrizzamento. Nello specifico, le fotografie nadirali scattate non avevano coperto l'interezza delle aree scavate e solo in un caso sono state predisposte delle mire a terra in posizione corretta.

La necessità di utilizzare comunque le immagini disponibili ha condotto a studiare una modalità per ottenere nuove informazioni dai dati presenti negli archivi fotografici del nostro scavo, utilizzando quindi fotografie prese in momenti diversi, con le evidenze appena pulite e quindi non offuscate dal trascorrere del tempo, per costruire un modello tridimensionale su cui si potessero condurre analisi metriche e computazionali (KATSIANIS *et al.* 2015; DISCAMPS *et al.* 2016; BEVILACQUA *et al.* 2019). Le ricostruzioni tridimensionali sono state realizzate utilizzando il software 3DF Zephyr Aerial 4.0 con licenza di prova per studenti; la fotomodellazione di ciascuna area è stata operata adottando specifici accorgimenti a seconda delle caratteristiche della documentazione disponibile e delle emergenze da ricostruire.

Il sondaggio 37, aperto nel 2017 e ampliato nel corso della campagna 2018 su un'area totale di ca. 170 m<sup>2</sup>, ha visto tornare alla luce diversi ambienti conservati al di sotto dei livelli pavimentali, probabilmente appartenenti ad un edificio termale di epoca imperiale romana, successivamente spoliati e riempiti da butti e impianti di attività artigianali (ZANINI, GIORGI 2019, 499-502). Le fotografie della campagna 2018, eseguite dal suolo, non avevano inquadrato l'edificio nella sua integrità, ma solo porzioni di ambienti o dettagli. Nella penultima giornata di lavoro era stato possibile riprendere lo scavo con l'ausilio di droni, in quell'occasione pilotati dagli studenti dell'Istituto Tecnico Carducci-Volta-Pacinotti di Piombino, coordinati dal professor Michele Collavitti, nel quadro di una collaborazione interistituzionale di lunga data. Gli scatti, non finalizzati alla modellazione tridimensionale, consistevano in visioni zenitali d'insieme e nel filmato di un passaggio dell'apparecchio con ripresa obliqua a bassa quota sopra il sondaggio. Queste sono rimaste le ultime immagini disponibili per quest'area, che non fu oggetto di manutenzione specifica nel 2019 e che è stata infine reinterrata per motivi conservativi e di sicurezza.

L'esperimento si è avviato con la selezione delle più adatte tra le molte fotografie disponibili (in totale 73 tra generali da terra o da scala, nadirali

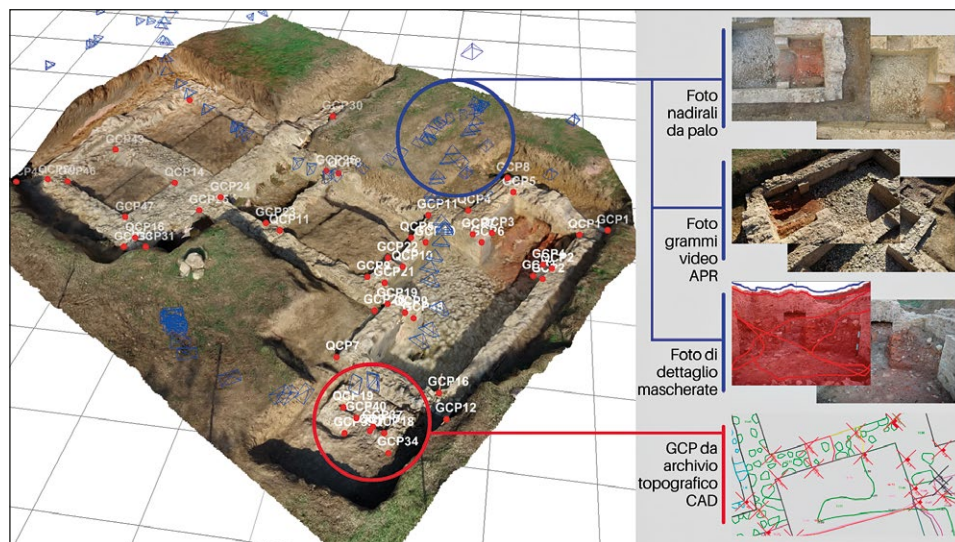


Fig. 4 – Materiale d'archivio impiegato per la fotomodellazione del Sondaggio 37.

da palo telescopico a copertura parziale e di dettaglio) sulla base della loro nitidezza e della sovrapponibilità ad altre della serie, scartando gli inquadramenti ripetitivi e utilizzando, con opportune schermature, anche quelle in cui comparivano particolari indesiderati come attrezzi o porzioni di scavo ancora da ultimare: quest'ultima operazione è stata eseguita utilizzando lo strumento 3DF Masquerade (WALLACE 2017).

3DF Zephyr ha consentito di estrarre e integrare nel processo fotogrammetrico 123 fotogrammi dal video girato dal drone (CONDORELLI, RINAUDO, 2018): le immagini sono state calibrate automaticamente; il programma ne ha allineate 147 delle 196 di partenza, incontrando difficoltà soprattutto con scatti di dettaglio che non avevano sufficiente sovrapposizione con gli altri. Nel corso dello scavo non erano state posizionate mire, ma i contorni delle Unità Stratigrafiche e in particolare dei muri erano stati rilevati con stazione totale. Pertanto, per georeferire e scalare metricamente il modello sono stati selezionati dall'archivio topografico 48 punti di vincolo e 20 di controllo, individuabili univocamente negli scatti. Alla fine del processamento, l'errore medio finale risultante, ovvero lo scarto medio tra la posizione nella nuvola sparsa di ogni punto di controllo e le sue coordinate è pari a 0.0614 m (Fig. 4).

L'elaborazione ha risentito di qualche disturbo di rumore, probabilmente dovuto all'impiego di immagini eterogenee. Alcuni dettagli della texture sono chiaramente distinguibili, mentre altre parti sono approssimate. La definizione dipende dall'accuratezza della documentazione fotografica riferita alle diverse

porzioni della struttura. È stata generata una ortofoto utilizzando tutti gli scatti allineati, con dimensione del pixel a terra di 0,006 m. Anche qui, i dettagli inquadrati insufficientemente non sono distinguibili nettamente, mentre altri particolari sono poco nitidi a causa dell'eccessivo rumore di fondo. Una seconda ortofoto generata con i soli scatti ravvicinati del drone è sicuramente più nitida, ma intere aree non risultano caratterizzate.

Alcuni accorgimenti potrebbero migliorare il risultato del processo fotogrammetrico: dove possibile, potrebbero essere utilizzate serie di scatti omogenee per device in uso, illuminazione e soggetto ripreso; porzioni limitate di scavo potrebbero essere modellate separatamente; inoltre, i punti di controllo potrebbero essere ridotti a quelli individuabili con maggior precisione sulle fotografie.

L'ambiente 26 è stato scavato tra 2017 e 2018 in due parti distinte e con procedure di documentazione non sufficientemente omogenee, anche in ragione della diversa qualità dei resti conservati: più cospicui nella porzione meridionale (lacerti di mosaico e di *opus sectile*, purtroppo fortemente danneggiati dalle arature), più modesti nella parte settentrionale. Dopo una selezione preliminare, le fotografie disponibili per questo grande ambiente sono state raggruppate in quattro dataset, in base alla data di scatto e all'area inquadrata, per procedere ad altrettante fotomodellazioni.

Il processo fotogrammetrico dell'area indagata nel 2017 ha impiegato dati d'archivio acquisiti per il fotoraddrizzamento, ovvero 7 fotografie zenitali, 3 di dettagli di brandelli di mosaico e 16 mire come punti di controllo. Il modello 3D e l'ortofoto risultanti sono precisi e nitidi, anche se il primo presenta qualche difetto nella restituzione delle parti sviluppate in altezza a causa dell'inquadratura zenitale. Una sepoltura è l'unica evidenza della campagna 2018 per cui sono disponibili numerose fotografie, zenitali e oblique, e il rilievo di sei mire per il fotoraddrizzamento. La ricchezza dei dati di partenza ha prodotto un'elaborazione fotogrammetrica ben definita. Le riprese da drone, anche in questo caso non effettuate direttamente dall'équipe archeologica, hanno una copertura sufficiente solo da alta quota: si è tentata ugualmente la modellazione di 32 immagini, in parte fotografie, in parte fotogrammi di video, ma i prodotti ottenuti hanno bassa risoluzione e scarsa precisione, a causa della difficoltà di individuare univocamente punti di controllo dalle coordinate note sui margini delle Unità Stratigrafiche. Un'ulteriore modellazione ha impiegato undici fotografie ravvicinate, nadirali e oblique. Anche in questo caso, il prodotto è risultato nitido, ma poco preciso, a causa della difficile individuazione dei punti di controllo (Fig. 5).

Da una valutazione complessiva dei risultati delle diverse sperimentazioni condotte si può concludere che le modellazioni tridimensionali realizzate su fotografie d'archivio risentono ovviamente della parzialità e disomogeneità del dataset e non possono quindi raggiungere definizione, nitidezza o precisione di scala paragonabile a quelle effettuate secondo procedure controllate. La

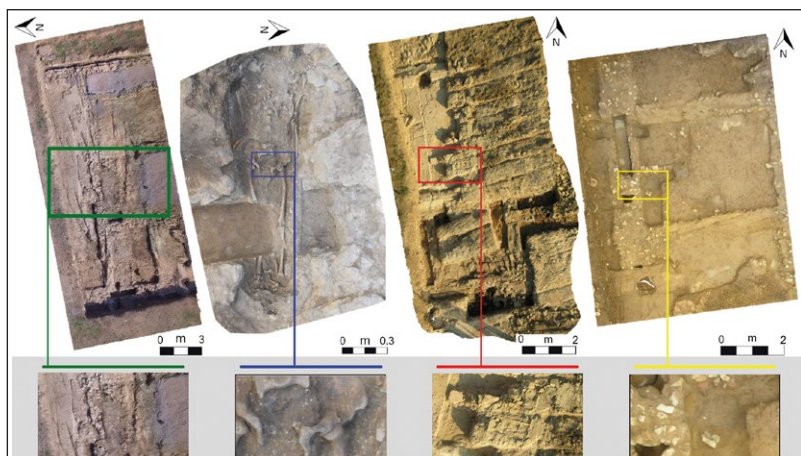


Fig. 5 – Ortofoto dell’Ambiente 26 con ingrandimento al 100%. Da sinistra a destra, area indagata nel 2017, sepoltura, dati APR, fotografie varie.

ricostruzione tridimensionale è risultata più accurata laddove le immagini erano sovrapponibili, scattate da diverse angolazioni, e singole inquadrature non erano replicate. I disturbi da rumore sono stati contenuti selezionando fotografie scattate in condizioni di luce e pulizia dello scavo omogenee (WALLACE 2017).

Impiegando un dataset di rilievo comunque finalizzato al fotoraddrizzamento, ancorché pensato ed eseguito secondo metodi tradizionali, la fotomodellazione è risultata più fluida e precisa, grazie alla presenza di fotogrammi sovrapposti e di punti di controllo individuabili univocamente sulle mire. In questo senso, la procedura sperimentata ha dimostrato come sia possibile elaborare tramite fotomodellazione archivi di documentazione di scavi che hanno impiegato il fotoraddrizzamento per il rilievo delle evidenze, ottenendo modelli tridimensionali di qualità accettabile (ZANINI *et al.* 2006; HUGGET 2018).

Le sperimentazioni hanno restituito ortofotopiani delle aree di scavo sufficientemente definiti per il disegno vettoriale delle evidenze. Anche l’errore di calibrazione dei modelli da cui sono stati prodotti risulta del tutto accettabile rispetto alla scala a cui la documentazione grafica di Vignale viene elaborata e rappresentata. Una volta inseriti in ambiente GIS, i fotopiani hanno consentito di migliorare il dettaglio e la caratterizzazione dei disegni digitali dello scavo, rappresentando chiaramente le relazioni stratigrafiche e funzionali tra le evidenze. In questo senso, la procedura ha permesso di rivedere a posteriori la documentazione grafica, migliorandone sia la precisione, sia l’aspetto interpretativo. Infatti, la caratterizzazione del disegno archeologico consente di rappresentare la conoscenza che gli scavatori acquisiscono di un’area (Fig. 6) (TAYLOR *et al.* 2018; BIANCONI, FILIPPUCI 2019).

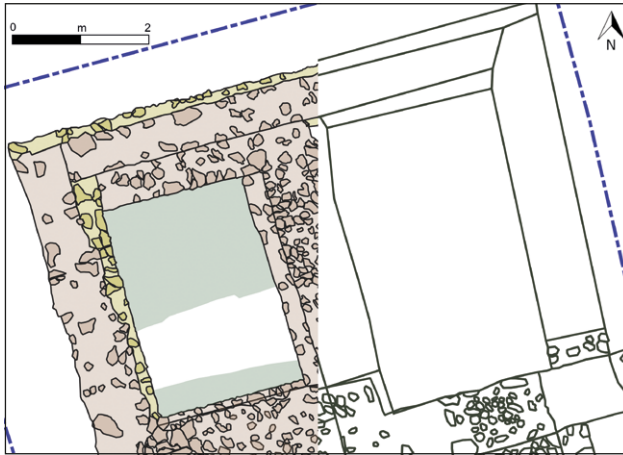


Fig. 6 – Sondaggio 37, disegno vettoriale delle evidenze basato su rilievo con stazione totale (destra) e su ortofoto (sinistra).

I casi studio proposti evidenziano come la fotomodellazione di uno scavo archeologico può integrare con un sufficiente livello di efficacia anche dati multimediali acquisiti per altri scopi. I modelli tridimensionali ottenuti al termine della procedura aprono nuove possibilità di effettuare ricerche ed elaborazioni in contesti scavati nel passato e ora ricoperti o danneggiati: i modelli infatti potrebbero essere uniti in un unico spazio virtuale, come è stato fatto per i dati delle campagne 2019 e 2020, giustapponendo strutture scavate in diversi momenti con strutture rilevate tridimensionalmente nel corso di nuove campagne per avere una visione d'insieme (KATSIANIS *et al.* 2021).

J.S.

## 5. UN FOTOPIANO... FATTO A MANO

La realizzazione di una ortofoto di un grande mosaico pavimentale di epoca tardoantica (ca. 9×3 m) rinvenuto sul sito di Vignale ha richiesto l'utilizzo di tecniche differenti da quelle più comuni nella realizzazione di rilievi architettonici e archeologici. In attesa di poter allestire una copertura stabile che consentirà l'avvio del restauro del manufatto e delle connesse operazioni di documentazione analitica ci si è cimentati nel comporre un fotopiano provvisorio che rispondesse alle esigenze di studio del mosaico e a quelle di comunicazione proprie del progetto di archeologia pubblica e condivisa "Uomini e Cose a Vignale" (ZANINI 2018; ZANINI, GIORGI 2018), basandosi sull'ampia documentazione fotografica prodotta nel corso di tre campagne (2014, 2015, 2016).



Le immagini in questione testimoniano bene le varie fasi del lavoro archeologico fin qui condotto sul mosaico (rinvenimento, pulizia e consolidamento preliminare), ma la loro qualità è necessariamente eterogenea, com'è proprio di fotografie non realizzate per una futura restituzione ad alta definizione, ma destinate invece alla necessaria documentazione degli interventi compiuti e allo studio iconografico. Le immagini disponibili sono principalmente di due tipi: quelle prodotte con una fotocamera Nikon D3300 con obiettivo 18-55 mm, f3.5-5.6, scattate da altezza uomo o con l'ausilio di una scala, e quelle ottenute con una Nikon Coolpix 8400, una fotocamera compatta piuttosto datata, ma funzionale all'esecuzione di riprese nadirali, applicata alla sommità di un'asta telescopica della lunghezza di ca. 7 m per mezzo di una testa snodata a sfera.

L'idea di compiere una sperimentazione estemporanea a partire da materiale così eterogeneo è nata per rispondere a necessità diverse. Per un insieme di ragioni, il mosaico di Vignale è stato reinterrato al termine della campagna 2017 e non se ne prevede una nuova accessibilità diretta in tempi brevi: nel frattempo, però, era necessario disporre di un'immagine ad alta risoluzione per poter studiare un manufatto che pone molte questioni di iconografia, tecnica esecutiva e complessità stratigrafica. Per i diversi fini comunicativi che sono poi specifici di un progetto come quello di Vignale, era altresì necessario disporre di un prodotto che non fosse solo sufficientemente corretto in termini metrici, ma che fosse anche gradevole nella sua percezione complessiva. Questa considerazione ha indotto a valutare come accettabile un compromesso che sacrificasse consapevolmente l'assoluta correttezza metrica e l'aderenza alle reali proporzioni in virtù di una maggiore leggibilità del prodotto finale (MONTI, MAINO 2018, 67). Per questo motivo alcune zone non sono state raddrizzate in fase di correzione della distorsione, in modo da mantenere accettabile la nitidezza dei dettagli marginali spesso ripresi solo in inquadrature generali. Queste discrepanze nel complesso sono impercettibili ad una semplice osservazione, grazie anche all'alto livello di omogeneità complessiva ottenuta con le correzioni finali.

Un'approfondita valutazione del materiale fotografico a disposizione ha evidenziato l'impossibilità di procedere all'utilizzo di software di ricostruzione grafica e modellazione 3D, secondo le procedure sopra discusse. Programmi di fotogrammetria come Agisoft PhotoScan e 3DF Zephyr richiedono una elevata quantità di foto e un procedimento di ripresa standardizzato. Software di questo tipo scompongono l'immagine prima per generare una nuvola di punti e poi per generare una texture che riempie l'oggetto 3D; tale procedimento comporta una sensibile perdita di nitidezza. Nel nostro caso, nonostante il materiale fotografico raccolto fosse teoricamente sufficiente alla realizzazione di un fotopiano, agli effetti pratici la copertura del tappeto musivo non si è rivelata abbastanza omogenea, perché le riprese, dettate essenzialmente da

esigenze di studio e conservazione, si erano concentrate sui dettagli più importanti da un punto di vista iconografico e/o sulle parti in stato più critico.

Il primo tentativo di realizzazione di un fotopiano con procedura standard ha prodotto un'immagine a bassa risoluzione che rendeva poco apprezzabile il mosaico su grande scala. Questa prima ricostruzione, seppur carente da un punto di vista estetico, conserva però la correttezza metrica propria dei software utilizzati e questo ha permesso di immaginarla come una "base di appoggio" per il lavoro successivo. Sull'ortofoto ottenuta sono state infatti progressivamente aggiunte manualmente le singole foto di dettaglio, utilizzando come guida per il raddrizzamento delle altre immagini: le stesse foto sfruttate per la prima ricostruzione auto-generata sono state riposizionate sul fotopiano per poi essere corrette manualmente (Fig. 7).

Il software utilizzato in questa fase è stato Adobe Photoshop: il documento .psd originale è stato impostato su 12.000×5000 pixel, a 300 dpi. Queste generose dimensioni sono state adottate per rendere il documento adatto a una stampa in grande formato (100×40 cm). I passi successivi sono consistiti in un vero e proprio collage delle migliori immagini in nostro possesso, inserite tutte con la medesima procedura. Il primo problema da affrontare è stato rappresentato dalla correzione della distorsione causata dagli obiettivi, senza ricorrere a software per il raddrizzamento automatico che per loro natura sono particolarmente inadatti a restituire immagini con particolari molto piccoli, com'è appunto il caso di un mosaico e del suo fitto reticolo di tessere.

Procedendo empiricamente per tentativi ed errori è stato individuato un metodo che ha dato risultati soddisfacenti. Per prima cosa ogni immagine è stata corretta attraverso una funzione di Lightroom per attenuare la distorsione propria di ogni immagine in base all'obiettivo utilizzato (VERHOEVEN *et al.* 2013). Laddove la distorsione era ancora percepibile un secondo raddrizzamento è stato effettuato su Photoshop avvalendosi dello strumento di trasformazione manuale "Altera". Con questa procedura, sono state per prime posizionate sulla base generale fotoraddrizzata automaticamente tre foto a media scala, in ciascuna delle quali compariva per intero uno dei tre riquadri in cui è articolato il mosaico. L'operazione è stata notevolmente facilitata dalla presenza nel tappeto musivo di cornici di contorno, che hanno guidato la correzione delle diverse distorsioni presenti in ciascuna immagine.

Una strategia analoga è risultata poco o nulla applicabile al set successivo di foto, quelle a maggior dettaglio, in pochissime delle quali si registra la presenza di linee rette utilizzabili come riferimento. In questo caso si è proceduto con gli altri strumenti di trasformazione presenti in Photoshop ("Trasformazione Libera", "Alterazione Prospettica" e "Alterazione Marionetta" per citare i più utilizzati). Questa procedura ha permesso di adattare ogni nuova immagine di dettaglio allo sfondo, in modo da ottenere la migliore sovrapposizione possibile tra le diverse foto utilizzate. Nello specifico,

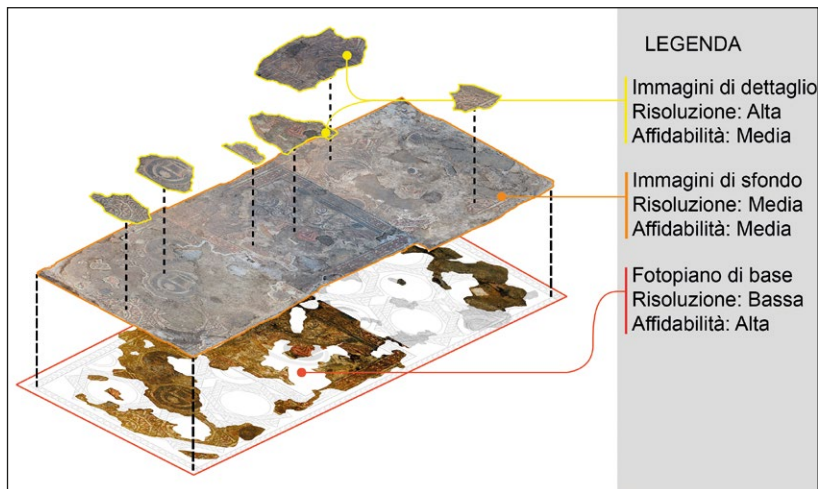


Fig. 7 – Scomposizione in visuale isometrica dei livelli di lavoro sovrapposti.



Fig. 8 – Confronto e verifica dello scostamento dei livelli sovrapposti (opacità 50%) prima e dopo l'applicazione delle correzioni.

attraverso l'Alterazione Marionetta è stato possibile limitare le modifiche a porzioni minime delle immagini, applicando le correzioni in maniera puntuale qualora necessarie (Fig. 8).

Laddove la sovrapposizione di immagini comprende più foto, queste sono state posizionate in primo piano in base al risultato migliore ottenuto,

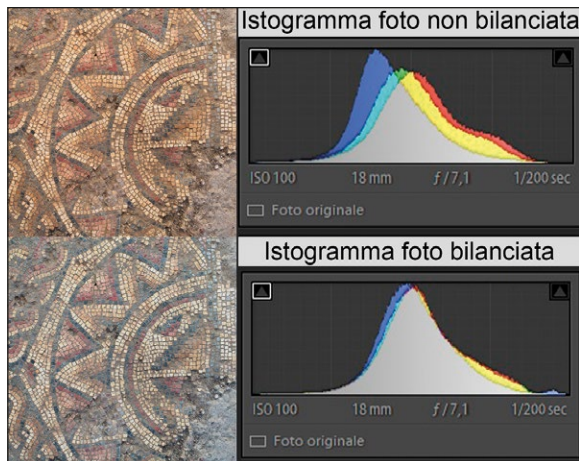


Fig. 9 – Confronto del bilanciamento tra “come scattato” e dopo la correzione.



Fig. 10 – Risultato finale dell’elaborazione.

in alternativa è stato sufficiente utilizzare lo strumento gomma cancellando le parti indesiderate. Quest’ultimo procedimento ha richiesto la trasformazione delle foto in raster, il che rende irreversibili le correzioni applicate in precedenza; pertanto è stato necessario assicurarsi di aver terminato nel modo migliore il lavoro a monte su tutte le foto.

Una caratteristica evidente delle varie immagini è la disomogeneità di esposizione, contrasto, bilanciamento del bianco, etc., dovuta all’eterogeneità delle condizioni di luce al momento della ripresa e alle diverse fotocamere utilizzate. Per rendere meno visibile tale disomogeneità, dopo il completamento

delle operazioni di collage, il file originale di ogni foto è stato processato in Adobe Lightroom secondo uno standard comune (Fig. 9). Questa è sicuramente la parte più arbitraria di tutta l'operazione poiché basata sulla soggettività di chi realizza la correzione e non di una colorimetria oggettiva. Per garantire un risultato più fededegno, la correzione è stata svolta attraverso un monitor Dell U2410 con profilo colore sRGB al 102% e AdobeRGB 96% capace di restituire fedelmente al meglio la firma colore della macchina fotografica utilizzata. La modifica si è basata principalmente sull'osservazione delle curve dell'istogramma di Adobe Lightroom in modo da attestare ogni immagine sulla medesima curva. Completata questa prima correzione colore, i nuovi file modificati sono stati importati nel progetto in Adobe Photoshop, in modo da sostituire le foto non modificate.

L'ultimo passaggio è stato svolto ancora in Adobe Lightroom. Il file è stato esportato a massima risoluzione e ripassato attraverso il programma di correzione come un'unica grande immagine; in tal modo è stato possibile appianare i contrasti ancora evidenti tra le varie aree e garantire maggior profondità e leggibilità. Un valido alleato è stato lo strumento Pennello di regolazione che ha permesso di correggere in maniera selettiva e puntuale le zone che presentavano una forte discromia. Alla fine del processo, l'immagine è risultata piuttosto omogenea per tutta la sua estensione. Sulla immagine riunita e corretta con le procedure fin qui descritte è stato quindi possibile mappare le aree in cui il mosaico non si è conservato, creando così un livello riempito con un colore neutro che può essere cambiato a seconda dell'utilizzo finale dell'immagine (NENCINI, MAINO 2011, 703).

L'ultima operazione riguarda il ritaglio e l'esportazione del file. La dimensione di 12.000×5000 pixel impostata come spazio di lavoro è stata modificata in 11.811×4724 pixel per la stampa in grande formato per corrispondere alle misure esatte di 100×40 cm a 300 dpi (Fig. 10).

N.L.

ELISABETTA GIORGI, LUCA LUPPINO, NICOLA LAPACCIANA, JACOPO SCOZ  
Dipartimento di Scienze Storiche e Beni Culturali  
Università degli Studi di Siena  
giorgi.elisabetta@gmail.com, lucalupp@gmail.com, nico.lapacciana@gmail.com  
scoz.jacopo@gmail.com

## BIBLIOGRAFIA

- BEVILACQUA M., CAROTI G., PIEMONTE A., ULIVIERI D. 2019, *Reconstruction of lost architectural volumes by integration of photogrammetry from archive imagery with 3-D models of the status quo*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences», XLII-2/W9, 119-125.
- BIANCONI F., FILIPPUCI M. 2019, *La fotomodellazione per il rilievo archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 205-228 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.13>).



- CARVER M.O.H. 2011, *Making Archaeology Happen: Design Versus Dogma*, London, Routledge.
- CONDORELLI F., RINAUDO F. 2018, *Cultural heritage reconstruction from historical photographs and videos*, «ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42-2, 259-265.
- COSTA S., RIPANTI F. 2013, *Excava(c)tion in Vignale. Archaeology on stage, archaeology on the web*, «AP: Online Journal in Public Archaeology», 3, 97-109 (<https://doi.org/10.23914/ap.v3i0.31>).
- DISCAMPS E., MUTH X., GRAVINA B., LACRAMPE-CUYAUBÈRE F., CHADELLE J.-P., FAIVRE J.-P., MAUREILLE B. 2016, *Photogrammetry as a tool for integrating archival data in archaeological fieldwork: Examples from the Middle Palaeolithic sites of Combe-Grenal, Le Moustier, and Regourdou*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 8, 268-276.
- DONEUS M., VERHOEVEN G., FERA M., BRIESE CH., KUCERA M., NEUBAUER W. 2011, *From deposit to point cloud – A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations*, «Geoinformatics FCE CTU», 6, 81-88.
- HUGGETT J. 2018, *Reuse remix recycle: Repurposing archaeological digital data*, «Advances in Archaeological Practice», 6, 93-104.
- KATSIANIS M., KOTSAKIS K., STEFANO F. 2021, *Reconfiguring the 3D excavation archive. Technological shift and data remix in the archaeological project of Paliambela Kolindros, Greece*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 36 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102857>).
- KATSIANIS M., TSIPIDIS S., KALISPERAKIS I. 2015, *Enhancing excavation archives using 3D spatial technologies*, in C. PAPADOPOULOS, E. PALIOU, A. CHRYSANTHI, E. KOTOULA, A. SARRIS (eds.), *Archaeological Research in the Digital Age. 1<sup>st</sup> Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Greek Chapter - CAA-GR (Rethymno, Crete, 2014)*, Rethymno, IMS-FORTH, 46-54.
- KORUMAZ A.G., KORUMAZ M., TUCCI G., BONORA V., NIEMEIER W., RIEDL B. 2014, *UAV systems for documentation of cultural heritage*, in *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress ICONARCH “Architecture and Technology” (Konya, Turkey, 2012)*, Konia, Selçuk University Department of Architecture & Selçuklu Municipality of Konia, 419-430.
- MONTI M., MAINO G. 2018, *Non-metric digital reconstruction of Roman mosaics excavated in the city of Ravenna (Italy)*, «Virtual Archaeology Review», 9, 66-75.
- NENCINI E., MAINO G. 2011, *From the physical restoration for preserving to the virtual restoration for enhancing*, in G. MAINO, G.L. FORESTI (eds.), *image analysis and processing – iciap 2011. Lecture Notes in Computer Science*, 6979, Berlin-Heidelberg, Springer, 700-709.
- PARIS L. 2012, *Fotogrammetria e/o fotomodellazione*, in A. CASALE (ed.), *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*, II, Roma, Kappa, 55-62.
- SFACTERIA M. 2016, *Fotomodellazione 3D e rilievo speditivo di scavo: l’esperienza del Philosophiana Project*, «Archeologia e Calcolatori», 27, 271-289 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF27/14\\_Sfacteria.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF27/14_Sfacteria.pdf)).
- SORDINI M., BROGI F., CAMPANA S. 2015, *3D recording of archaeological excavation: The case of study of Santa Marta, Tuscany, Italy*, in S. CAMPANA, R. SCOPIGNO, G. CARPENTIERO, M. CIRILLO (eds.), *CAA2015 - Keep the Revolution Going. Proceedings of the 43<sup>rd</sup> Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Oxford, Archaeopress, 282-392.
- TAYLOR J.S., ISSAVI J., BERGGREN Å., LUKAS D., MAZZUCATO C., TUNG B., DELL’UNTO N. 2018, *“The Rise of the Machine”: The impact of digital tablet recording in the field at Catalhöyük*, «Internet Archaeology», 47 (<https://intarch.ac.uk/journal/issue47/1/index.html>).
- VATTIMO E. 2006, *Appendice 2: il fotoraddrizzamento digitale nella documentazione grafica dello scavo*, in ZANINI, GIORGI, VATTIMO, 2006, 907-912.

- VERHOEVEN G., SEVARA C., KAREL W., RESSL C., DONEUS M., BRIESE C. 2013, *Undistorting the past: New techniques for orthorectification of archaeological aerial frame imagery*, in C. CORSI, B. SLAPŠAK, F. VERMEULEN (eds.), *Good Practice in Archaeological Diagnostics. Natural Science in Archaeology*, Cham, Springer, 31-67.
- WALLACE C.A.B. 2017, *Retrospective photogrammetry in Greek archaeology*, «Studies in Digital Heritage», 1, 607-626.
- ZANINI E. 2018, *Archeologia pubblica: dalla pratica della condivisione alla ricerca della sostenibilità*, in D. MALFITANA (ed.), *Archeologia: quo vadis? Riflessioni metodologiche sul futuro di una disciplina. Atti del workshop internazionale (Catania 2018)*, Roma, CNR, 47-59.
- ZANINI E., COSTA S. 2006, *Organizzare il processo conoscitivo nell'indagine archeologica: riflessioni metodologiche ed esperimenti digitali*, «Archeologia e Calcolatori», 17, 241-264 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF17/13\\_Zanini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF17/13_Zanini.pdf)).
- ZANINI E., GIORGI E. 2014, *Dieci anni di ricerche archeologiche sulla mansio romana e tardoantica di Vignale: valutazioni, questioni aperte, prospettive*, «Rassegna di Archeologia», 24b, 23-42.
- ZANINI E., GIORGI E. 2018, *Una residenza aristocratica nella Tuscia tardoantica e un mosaico pavimentale di complessa interpretazione*, in I. BALDINI, C. SFAMENI (eds.), *Abitare nel Mediterraneo tardoantico, Atti del II Convegno internazionale del Centro Interuniversitario di Studi sull'edilizia abitativa tardoantica nel Mediterraneo (Bologna 2016)*, Bari, Edipuglia, 365-374.
- ZANINI E., GIORGI E. 2019, *Vignale (Piombino). Le terme di una villa/mansio nel tempo, tra antichità e alto medioevo (?)*, in M. MEDRI, A. PIZZO (eds.), *Le terme pubbliche nell'Italia romana (II secolo a.C.-fine IV secolo d.C.). Architettura, tecnologia e società*, Roma, Roma TrE-Press, 492-509.
- ZANINI E., GIORGI E. 2020, *Uomini e Cose a Vignale: un progetto di archeologia pubblica*, «Gradus», 14, 1, 21-34.
- ZANINI E., GIORGI E., MAROTTA N., MARIOTTI S., RIPANTI F. 2019, *Uomini e cose a Vignale: bilancio di un decennio di archeologia pubblica, condivisa e (forse) sostenibile*, «Il Capitale Culturale. Studies on the Value of Cultural Heritage», Suppl. 9, 473-525 (<http://dx.doi.org/10.13138/2039-2362/2201>).
- ZANINI E., GIORGI E., VATTIMO E. 2006, *Indagini nell'area del Quartiere Bizantino del Pythion di Gortyna: quarta relazione preliminare (campagne 2005-2006)*, «Annuario della Scuola Archeologica di Atene e delle Missioni Italiane in Oriente», 84, 889-914.
- ZANINI E., RIPANTI F. 2012, *Pubblicare uno scavo all'epoca di YouTube: comunicazione archeologica, narritività e video*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 7-30 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/01\\_Zanini\\_Ripanti.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/01_Zanini_Ripanti.pdf)).

## ABSTRACT

In the last couple of years, as part of the archaeological project 'Uomini e Cose a Vignale' several tests were conducted, focused on fast and effective methods for the graphic and photographic documentation of the archaeological excavation. This paper presents three case studies, which have produced promising results. All of these were conceived and carried on in order to be based on cost-effective and straightforward procedures, which can be further experimented by other research groups. The final outputs are both sufficiently precise and adequate for the online sharing. The first case study focuses on developing an effective pipeline, based on UAV and 3D modeling, and easy enough to allow every member of the excavation team to carry on autonomously the documentation of its excavation area. The second case study has been aimed at 3D modeling of archival data in order to increase their informational potential. The third case study consisted in the elaboration of a high-definition photoplan of a wide (9×3 m) late antique mosaic. The proposed case studies show that the use of sustainable and low-cost procedures and tools leads to the production of graphic and photographic documentation maintaining good quality standards and suitable for communication purposes.

## MISURAZIONI DIGITALI NON INVASIVE DI *SPOLIA* VENEZIANI: INNOVAZIONI DI METODO E PROPOSTE DI APPLICAZIONE

### 1. INTRODUZIONE

Venezia è senza dubbio la principale città italiana il cui insediamento non sorga in continuità rispetto a un centro urbano di fondazione antica. Ciononostante, la massiccia presenza di manufatti risalenti all'epoca greco-romana (*spolia*) caratterizza tuttora il tessuto cittadino, nonché i numerosi contesti insulari della laguna circostante. Se le pietre di Venezia costituiscono un tema di approfondimento sin dalla determinante riflessione romantica di J. RUSKIN (1851-1853), a oggi non è stata ancora realizzata una mappatura esaustiva dei reperti antichi reimpiegati in ambito veneziano, che comprendono elementi scultorei e architettonici, monumenti iscritti, nonché semplice materiale edilizio, come pietre squadrate e mattoni.

Il saggio che qui si presenta illustra i risultati del progetto-pilota “The Stones of Venice. A Digital Landscape”, che è stato sviluppato grazie a due distinti finanziamenti ottenuti dal Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università Ca' Foscari Venezia: la Coordination & Support Action (CSA) promossa dal consorzio Time Machine (<https://www.timemachine.eu/csa-information>) e il fondo ministeriale per i Dipartimenti di Eccellenza, che ha consentito di creare il Venice Centre for Digital and Public Humanities (<https://www.unive.it/vedph>).

Scopo del progetto è stata l'applicazione per la prima volta nella storia degli studi di uno strumento digitale innovativo e non invasivo per la misurazione estensiva degli *spolia* presenti a Venezia e nelle isole della laguna, sia in contesti architettonici, che come elementi strutturali autonomi, ovvero *freestanding* (CALVELLI 2016, 462-475). La campagna metrologica è stata finalizzata in primo luogo a ottenere dati precisi relativi a un campione di reperti significativo dal punto di vista archeologico ed epigrafico. Nella maggior parte dei casi le misure sono state prese per la prima volta; è stato inoltre possibile testare l'applicazione dello strumento su distanze significative, anche superiori a 50 m, ottenendo così la misurazione di reperti scarsamente raggiungibili. Infine, la disponibilità di un dataset molto dettagliato ha consentito di impostare una riflessione più ampia, seppur ancora embrionale, sul tema delle proporzioni dei manufatti antichi.

Si tratta di un ambito di ricerca di grande importanza che, seppur già oggetto della riflessione occasionale di archeologi, storici dell'arte e dell'architettura ed epigrafisti (GROPPA, SARTORI, VAI 1996), può trarre dalle innovazioni

tecnologiche qui descritte una rinnovata e decisiva spinta. Le sperimentazioni condotte nell'ambito del progetto inducono infatti a ipotizzare nuove direzioni per ricerche ulteriori, che riconoscano alle analisi metrologiche un ruolo di maggior rilievo negli studi di archeologia ed epigrafia.

L.C.

## 2. *SPOLIA* VENEZIANI: STATO DELL'ARTE

La testimonianza di una anonima cronaca quattrocentesca, in cui si narra, in riferimento alla costruzione della basilica di S. Marco nel corso dell'XI secolo, come «... molti zentilomini et popolari mandono a tuor marmori in Aquilegia et Ravenna, et molti mandono a Costantinopoli...» (SPERTI 1996, 122; FORTINI BROWN 1996, 29), colloca l'acquisizione, il trasporto e il riuso di marmi alle origini della storia monumentale della città e al contempo ne delinea i principali ambiti geografici di rifornimento: da un lato le città romane della terraferma, dall'altro il Mediterraneo orientale. Rilievi, statue a tutto tondo, elementi architettonici di età classica e medievale divengono l'ingrediente caratterizzante dell'arredo monumentale veneziano: suscitano la curiosità dei viaggiatori (SPERTI, ZINATO 2017) o suggeriscono, in piena temperie umanistica, i primi tentativi di dare corpo ai nomi dei grandi artisti greci noti dalle fonti (BESCHI 1986).

Incrementato nel corso dei secoli, il *corpus* delle pietre di Venezia diviene oggetto di indagine scientifica soprattutto a partire dal secondo dopoguerra: si riconosce nella statua del Todaro un assemblaggio di sculture antiche (SARTORIO 1947), si definiscono tipologia e cronologia dell'eterogeneo *corpus* dei capitelli di S. Marco (DEICHMANN 1981), si tentano le prime sintesi complessive sugli *spolia* lagunari e sui rapporti tra questi e la cultura architettonica proto-rinascimentale (POLACCO 1972-1973; SPERTI 1996).

Il tema del reimpiego veneziano di scultura antica conosce nell'ultimo decennio particolare fortuna (per un quadro generale aggiornato SPERTI 2018, 2019). La Procuratoria di S. Marco dedica ai Tetrarchi un convegno in cui il noto gruppo viene da un lato contestualizzato nel complesso monumentale marciano, dall'altro ricondotto alle sue origini costantinopolitane (CONCINA, FAVARETTO, SCHREINER 2013). L'incontro su *Le pietre di Venezia: spolia in se, spolia in re* intende già dal titolo affrontare nella duplice prospettiva i casi più diversi dei reimpieghi veneziani – non solo scultura, ma anche iscrizioni, elementi architettonici, materiale da costruzione – e in parallelo le suggestioni archeologiche testimoniate nell'arte coeva (CENTANNI, SPERTI 2015). Il Centro Tedesco di Studi Veneziani organizza nel marzo del 2015 una giornata dedicata al tondo con imperatore bizantino reimpiegato in campiello Angaran e all'esemplare quasi gemello del Dumbarton Oaks Museum di Washington.

A prescindere dai risultati, interessanti e ricchi di spunti (BERGER, ZORZI, LAZZARINI 2019), va sottolineata l'istanza non certo secondaria che sta all'origine di questa iniziativa, esplicitata dai curatori nella presentazione degli Atti: la necessità di salvaguardare il manufatto, esposto da molto tempo all'inquinamento atmosferico e in uno stato di conservazione tale da consigliarne un urgente ricovero. Trovo importante sottolineare questo punto perché il caso in esame non è certo isolato e la tutela dell'arredo lapideo veneziano è divenuta in questi ultimi decenni una priorità inderogabile (a tutt'oggi, peraltro, il tondo bizantino è ancora al suo posto).

Per ragioni su cui non occorre insistere il contesto marciano costituisce il nucleo urbanistico che ospita gli *spolia* più antichi e rappresentativi. La basilica di S. Marco offre l'esempio più eclatante di un organismo architettonico in cui gli elementi di riporto contribuiscono in modo decisivo a definire decorazione e struttura. La bibliografia sul monumento e sull'entità, tipologia, cronologia, provenienza e funzione ideologica dei reimpieghi è immensa: mi limito pertanto a rimandare alla recente pubblicazione in tre volumi (VIO 2019) con bibliografia aggiornata e saggi che spaziano – per rimanere nell'ambito che ci riguarda – dal ruolo politico delle colonne protobizantine del ciborio (Th. Weigel) ad una revisione cronologica dell'arrivo in laguna dei trofei della Quarta Crociata (G. Tigler), dal restauro dei cavalli della facciata (M. Marabelli) al valore simbolico del gruppo dei Tetrarchi (P. Schreiner). Mentre le indagini sulla quadriga bronzea sono ferme sostanzialmente alla mostra veneziana di fine anni '70 del secolo scorso (in cui si confermava l'ipotesi, già proposta in precedenza, di una datazione nell'avanzata età imperiale: JACOFF 1977) e allo studio di M. JACOFF (1993) sull'interpretazione del gruppo come *quadriga domini*, il convegno ora ricordato e qualche altro contributo apparso nello stesso periodo hanno apportato diverse novità sul gruppo dei Tetrarchi.

L'identificazione dei protagonisti, condotta più sull'analisi tipologica di vesti e attributi che sugli aspetti fisionomici, rimanda all'ambito della prima Tetrarchia (GEHN 2012). Accenno appena alle complesse vicende del gruppo in terra microasiatica: per ragioni storiche gli studiosi ipotizzano una originaria collocazione in una residenza imperiale, probabilmente Nicomedia, e un successivo trasferimento a Bisanzio sotto Costantino, o comunque nel corso del IV secolo, in un luogo da identificare, secondo fonti più tarde, nell'area del Philadelphion. La scoperta nel corso di scavi del 1966 presso la chiesa del Myrelaion di un frammento della base con parte del piede di una delle statue ha dimostrato che all'epoca del dominio veneziano il monumento era già compromesso. Ma sulle vicende costantinopolitane del monumento le opinioni degli studiosi divergono. Ignota rimane la modalità di esposizione nel Philadelphion (per alcuni ad altezza d'uomo, per altri collocato in posizione elevata), incerti il luogo esatto in cui il monumento si trovava quando i Veneziani ne decisero il trasloco in laguna e il suo stato di conservazione (per



un quadro delle principali ipotesi NIEWÖHNER PESCHLOW 2012; CONCINA, FAVARETTO, SCHREINER 2013; EFFENBERGER 2013; VIO 2019, II).

Le colonne di Marco e Todaro, erette nel corso del XIII secolo nei pressi del Molo, marciano l'ingresso monumentale alla città e costituiscono al contempo un esempio mirabile di come elementi antichi eterogenei per materiale, tipologia, datazione e funzione possano combinarsi in un monumento unitario, ispirato con ogni probabilità a precedenti eretti sul Bosforo. Un'origine costantinopolitana è stata ipotizzata, senza nessun fondamento, anche per i due colossali fusti, quello di Marco in granito della Troade, l'altro in Sienite, alti entrambi 40 piedi romani. La provenienza del fusto in granito egiziano è ignota, ma il monolito marciano, per una serie di motivazioni sia archeologiche che storiche, potrebbe provenire dalle stesse cave di *marmor troadense* o dal vicino sito di *Alexandria Troas*, nei pressi dell'isola di Tenedo, lungo una rotta assiduamente frequentata dai convogli veneziani: sia nelle cave che nel porto di *Alexandria* vi sono tuttora numerosi fusti analoghi per dimensioni e caratteristiche tecniche (SPERTI, ZINATO 2017; SPERTI 2018).

Ben più note e studiate sono le statue collocate sulla sommità delle colonne. Origine e datazione del leone bronzeo della colonna orientale è stato oggetto delle più diverse e fantasiose ipotesi, che coprono un arco cronologico esteso dalla protostoria orientale sino al Medioevo nostrano e un'area geografica altrettanto vasta. Molti sono ancora gli aspetti oscuri di questo problematico ed eclettico monumento; tuttavia possiamo ritenere se non altro plausibile l'ipotesi di una provenienza da qualche area del Mediterraneo orientale (la Cilicia?) e una datazione tra l'età tardoclassica e il primo Ellenismo (SCARFÌ 1990). La statua del Todaro sulla colonna gemella è un *pastiche* che un anonimo scultore gotico ha ricavato da un torso di statua loricata in marmo di epoca adrianea e da una testa antica a lungo identificata con il ritratto di un qualche sovrano ellenistico: si tratta in realtà, come dimostra la corona di quercia, unico elemento superstite della scultura originaria, di un ritratto di età costantiniana – forse di Costantino stesso – proveniente probabilmente da Bisanzio, e ampiamente rilavorato in occasione del reimpiego veneziano (SPERTI 2015).

Inutile dire che per valenza ideologica, impatto monumentale e valore autorappresentativo gli *spolia* marciano non hanno confronto con nessun altro nucleo analogo in città: unica parziale e tardiva eccezione, la sistemazione tardoseicentesca dell'ingresso monumentale all'Arsenale con i leoni che Francesco Morosini, di ritorno dall'effimera conquista di Atene, volle collocare ai lati della porta rinascimentale (SACCONI 1991), peraltro connotata dal reimpiego, non casuale, di una coppia di capitelli bizantini.

Al di fuori di questi due nodi monumentali, la presenza di *spolia* nel tessuto urbanistico veneziano è comunque pervasiva e importante e caratterizza edifici pubblici, chiese, dimore aristocratiche, contesti popolari. L'angolo del cinquecentesco Palazzo dei Dieci Savi che incombe sul Ponte di Rialto



Fig. 1 – Processo di misurazione con Leica Disto S910 dell'altezza della statuetta composta ellenistico-romana riutilizzata come “Giustizia” in età moderna, Venezia, Rialto, Palazzo dei Dieci Savi (E. Delpozzi, M. Pilutti Namer).

esibisce in una mensola una statuetta composta di età ellenistica e romana, reinterpretata, in accordo con la funzione dei magistrati ospitati nell'edificio, come “Giustizia” (TRAVERSARI 1991) (Fig. 1). Nel non lontano campo S. Polo, in un contesto religioso, l'omonima chiesa conserva un'immagine in marmo di S. Paolo ricavata dall'integrazione quattrocentesca di una statua antica che una recente indagine riporta alla produzione cipriota di età ellenistica (LAZZARINI, PILUTTI NAMER 2020): come il Todaro, essa testimonia un fenomeno attestato con una certa frequenza, la trasformazione di statue antiche in immagini di santi. Sempre nell'ambito degli edifici ecclesiastici

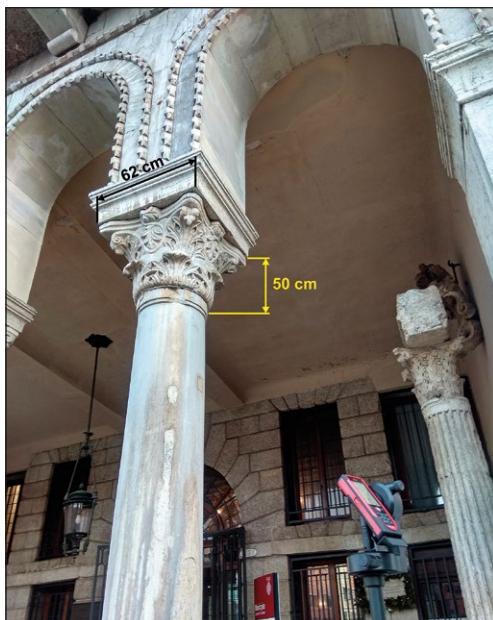


Fig. 2 – Processo di misurazione a campione di un capitello romano di età tardo-antica in opera nel portico di riva di Ca' Loredan, Canal Grande, Venezia (E. Delpozzo, M. Pilutti Namer).



Fig. 3 – Processo di misurazione a campione di alcuni capitelli e colonne di età romana, medievale e ottocentesca in opera nel portico di riva, nel loggiato e nella torretta laterale destra del cosiddetto “Fondaco dei Turchi”, Canal Grande, Venezia (E. Delpozzo, M. Pilutti Namer).



Fig. 4 – Processo di misurazione dell'ara di età ellenistica e del rilievo con cammello del XIV secolo in opera nella facciata di Palazzo Mastelli, Cannaregio, Venezia (E. Delpozzi, M. Pilutti Namer).

colpisce la presenza, rilevata di recente, di capitelli bizantini riutilizzati con funzione strutturale in fabbriche gotiche: è il caso degli esemplari protobizantini inseriti nelle edicole della basilica di S. Maria Assunta dei Frari (PILUTTI NAMER 2008-2009), ma soprattutto del sorprendente reimpiego a metà della navata centrale della basilica dei SS. Giovanni e Paolo di un nucleo di sei capitelli riferibili alla chiesa costantinopolitana di S. Polieucto, la stessa da cui provengono i cd. Pilastrini Acritani reimpiegati lungo il lato S della basilica di S. Marco (BARSANTI, PILUTTI NAMER 2009).

Capitelli bizantini e imitazioni locali di epoche diverse caratterizzano alcune delle più antiche dimore nobiliari sul Canal Grande (BARSANTI 2002) (Fig. 2), ma anche chiese di età romanica (PILUTTI NAMER 2015) ed edifici a funzione commerciale, come il Fondaco dei Turchi, peraltro ampiamente manomesso da restauri ottocenteschi (PILUTTI NAMER 2016) (Fig. 3). Una sorta di narrazione tramite reimpieghi, volta a glorificare le imprese commerciali di una famiglia di mercanti, si svolge nel campo dei Mori e nel vicino Palazzo Mastelli, detto del Cammello, nel sestiere di Cannaregio (Fig. 4):



qui una teoria di statue di mercanti caratterizzati come orientali da turbanti marmorei prelevati da stele funerarie musulmane, un bassorilievo gotico raffigurante un mercante che conduce un cammello (da cui il nome del palazzo), l'inserimento in una bifora angolare dello stesso palazzo di un altare cilindrico a ghirlande di età medioellenistica proveniente dalle Cicladi e l'enfasi data alla linea d'acqua tramite una serie di cornici bizantine a girali concorrono a celebrare tramite manufatti esotici, e perciò rari e preziosi, la ricchezza della famiglia e l'estensione dei suoi traffici (SPERTI 1996, 2018).

Va sottolineato infine che, a fronte dei reimpieghi immediatamente riconoscibili come tali di cui si è data ora sintetica notizia, Venezia è letteralmente gremita di patere, colonne, elementi architettonici risultanti dalla rilavorazione di manufatti antichi e nei quali la forma originaria è scomparsa: per limitarci ad un singolo caso, si veda l'entità impressionante del riuso di colonne in marmo proconnesio, presenti a centinaia, nell'architettura veneto-bizantina, gotica, rinascimentale e barocca, in tutte le principali tipologie architettoniche presenti in città (LAZZARINI 2015).

L.S.

### 2.1 Misurazione digitale e spolia veneziani: l'applicazione in ambito architettonico

Nel vasto panorama di studi sugli *spolia* veneziani sinora descritto, le ricerche sono state condotte nei secoli e sino a oggi con metodo tradizionale, pertanto le campagne di misurazione sono state realizzate manualmente e soltanto nel caso in cui, considerate le caratteristiche complesse dell'insediamento lagunare, fosse effettivamente possibile portarle a termine. I vantaggi che le misurazioni effettuate con distanziometro digitale (Leica Disto S910, d'ora innanzi LD) hanno comportato sono quindi evidenti, sia per la non invasività dello strumento, che permette di ridurre al minimo i rischi connessi alle manipolazioni dei manufatti antichi, sia per il risparmio di tempo e di spesa: basti pensare che per la misurazione dei diametri delle dieci colonne reimpiegate nella chiesa della Madonna dell'Orto sono stati sufficienti 12 minuti (Fig. 5).

La possibilità di effettuare numerose misurazioni in poco tempo permette di innovare il metodo di studio della scultura architettonica, di reimpiego e non solo, in particolare quando ci si proponga come oggetto di indagine studi su serie di elementi da confrontare (capitelli e colonne anzitutto, ma anche fregi, cornici, etc.) e qualora ci si interessi più in generale di composizione architettonica. Lo studio di caso del Fondaco dei Turchi (Fig. 3), le cui misurazioni sono state effettuate dall'altro lato del canale, da campo S. Marcuola, a 58 m di distanza, è in questo senso un esempio emblematico: le misurazioni a campione dimostrano efficacemente il potenziale per studi futuri sulle fasi progettuali e i processi di edificazione di architetture semi-



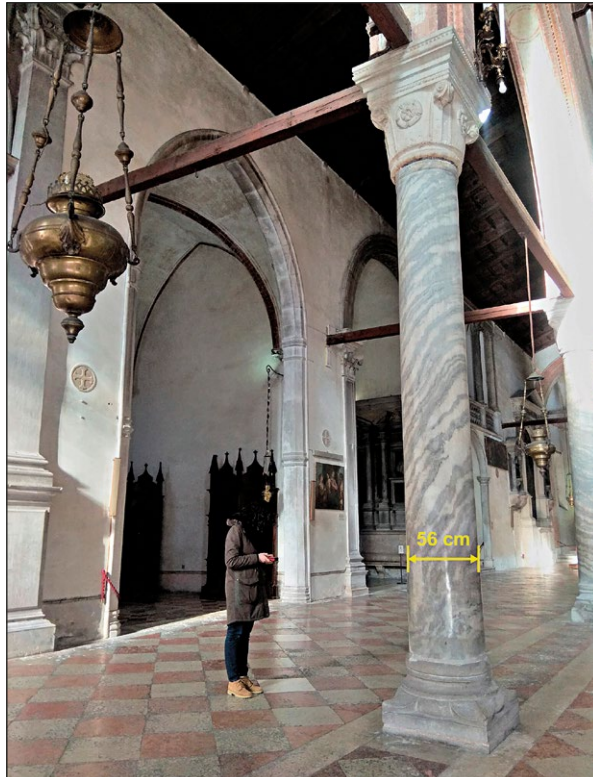


Fig. 5 – Processo di misurazione delle colonne in opera nelle due navate della chiesa della Madonna dell'Orto, Cannaregio, Venezia (E. Delpozzi, M. Pilutti Namer). Si ringraziano il Parroco della Madonna dell'Orto e la Comunità dei Sacerdoti Giuseppini del Murialdo per la gentile concessione e l'amichevole collaborazione.

del tutto inaccessibili quali i palazzi che si affacciano sul Canal Grande (Fig. 2) o su altri canali della città (Fig. 4).

Il medesimo discorso di economia di tempo e di spesa, con aumentato valore conoscitivo per la possibilità di accedere a informazioni su di una porzione di patrimonio archeologico altrimenti noto dalle sole (difficoltose) riproduzioni, vale per la scultura (di reimpiego e non) che sia collocata in posizione semi- o del tutto inaccessibile, o ancora in luoghi dove l'alta frequentazione impedisca di lavorare in condizioni agevoli, qual è il caso della già citata Giustizia di Rialto (Fig. 1).

Per la complessità e la vastità dell'argomento, non è in questa sede possibile approfondire l'indagine metrologica su singoli elementi architettonici:

si è preferito pertanto concentrare l'attenzione su due studi di caso epigrafici particolarmente interessanti sia per testare il potenziale di LD, sia per l'integrazione tra le funzioni dello strumento e la tecnica del rilievo fotogrammetrico.

M.P.N.

### 3. LEICA DISTO S910: CARATTERISTICHE, FUNZIONI, INTEGRAZIONE CON LA TECNICA DEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

LD presenta alcune caratteristiche interessanti rispetto ad altri prodotti in commercio poiché si tratta di un distanziometro tradizionale implementato con un sensore di inclinazione utile per la misurazione degli angoli; tramite la combinazione di queste due tecnologie; lo strumento è dunque in grado di misurare la distanza da punto a punto (tecnologia P2P). Il dispositivo permette anche l'acquisizione dati nel formato di interscambio AutoCAD DXF; in questa modalità, le misure effettuate vengono salvate nel dispositivo in un file DXF, che può contenere un massimo di 30 punti collocati nello spazio tridimensionale, in un sistema di riferimento locale, e associati alle rispettive, eventuali, fotografie.

Un'altra caratteristica rilevante di LD consiste nella possibilità di connettere lo strumento a dispositivi come tablet o laptop tramite connessione Bluetooth o wi-fi. Il collegamento Bluetooth consente, per quanto più in dettaglio ci interessa, l'interfaccia, tramite la modalità "App", con applicazioni sviluppate specificatamente per il prodotto, come Leica DISTO Plan, che permette di visualizzare planimetrie in tempo reale mentre si effettuano le relative misurazioni. Di grande utilità è anche la funzione di connessione WLAN, tramite la quale lo strumento funge da hotspot per il collegamento wi-fi con altri dispositivi. Il collegamento è stato testato tramite il software per PC Disto Transfer e il relativo plugin in AutoCAD: è così possibile restituire sullo schermo del computer, in tempo reale, il disegno tridimensionale dell'oggetto che si sta rilevando, compreso di eventuali fotografie. È importante notare che con questa implementazione è supportato il cambio stazione: in contesti complessi si può pertanto spostare lo strumento e continuare il lavoro utilizzando come appoggio punti già noti.

Nell'ambito del progetto si è anche sperimentata l'integrazione tra le funzioni di LD e la tecnica del rilievo fotogrammetrico (RUSSO, REMONDINO, GUIDI 2011 e, da ultimo, D'EREDITÀ 2020, con bibl. precedente); lo strumento, infatti, permette di creare facilmente una rete d'appoggio locale che consente di ottenere modelli tridimensionali metricamente corretti. Il test in questione è stato effettuato sui due reimpieghi epigrafici menzionati *infra*. In entrambi i casi, tramite la funzione di acquisizione dati in DXF, sono stati registrati 4 marker posti esternamente all'oggetto della ripresa; dopodiché si è proceduto a effettuare le fotografie con una Canon EOS 100D, seguendo prevalentemente

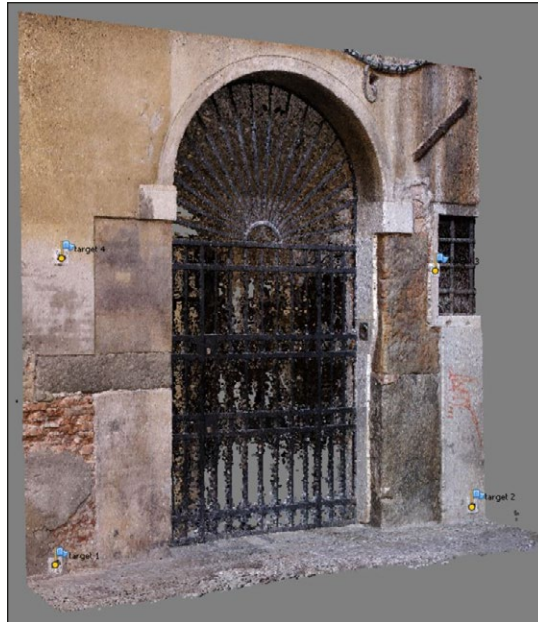


Fig. 6 – Nuvola di punti densa del portale in Corte dei Pali già Testori, Cannaregio 3837, Venezia, e target acquisiti tramite Leica Disto S910 (E. Delpozzi).

uno schema di presa a strisciate, integrato in alcuni punti per ottenere una geometria completa dei contesti. Le fotografie sono state processate con Agisoft Photoscan ed è stata prodotta la nuvola di punti densa, scalata grazie agli appositi target acquisiti con LD, con un errore compreso tra 2 a 6 mm (Fig. 6).

Dalle nuvole di punti sono poi stati elaborati i modelli 3D poligonali e texturizzati dei due contesti e gli ortomosaici relativi. Sia il modello tridimensionale che l'ortomosaico si configurano come efficaci supporti sui quali è possibile effettuare tutte le misure necessarie per lo studio delle iscrizioni e dell'architettura di reimpiego in cui sono inseriti, accorciando così i tempi del lavoro *in situ* (Fig. 7). Vi sono inoltre sia la possibilità di migliorare, tramite filtri applicabili sul modello geometrico, la lettura dei dettagli decorativi o delle lettere incise (come nel nostro caso), sia di modificare le condizioni di luce (Fig. 8). La creazione di modelli tridimensionali consente, infine, di preservare una copia digitale, e metricamente corretta, di ciascun reperto, documentandone la geometria e lo stato di conservazione, caratteristiche che possono variare sensibilmente nel corso degli anni, soprattutto nel caso di reperti e monumenti esposti ad agenti esterni.

E.D.

#### 4. MISURAZIONE DIGITALE E *SPOLIA* EPIGRAFICI VENEZIANI: DUE CASI DI STUDIO

Nell'ambito del fenomeno del reimpiego veneziano le attestazioni di *spolia* epigrafici risultano particolarmente numerose e significative (CALVELLI 2012, 179-181; 2015, 88-90; 2018, 87-89). Ciò è dovuto non tanto al fatto che nelle dinamiche del riutilizzo si prediligessero le iscrizioni ad altre tipologie monumentali, quanto piuttosto alla possibilità di individuare con maggior facilità le epigrafi che figurano in contesti di giacitura secondaria. La presenza della componente testuale (la cosiddetta "scrittura esposta") costituisce infatti un elemento macroscopico di chiara riconoscibilità, che fu spesso sfruttato anche dagli stessi promotori dei reimpieghi per valorizzarne l'impatto visivo (CALVELLI 2016): gli occhi degli osservatori passati e presenti hanno notato e notano maggiormente gli *spolia* epigrafici rispetto ai manufatti anepigrafici, perché il testo attrae quasi automaticamente l'attenzione.

Elementi linguistici e paleografici caratterizzanti, come ad esempio il latino e le lettere in capitale quadrata, generalmente utilizzata nelle officine lapidarie romane, costituiscono inoltre marcatori di antichità sostanzialmente univoci, che non richiedono competenze specifiche per essere identificati. In altre parole, un'iscrizione di epoca romana può essere individuata in quanto tale grazie alle sue caratteristiche estrinseche, anche se chi la osserva non è in grado di leggerla o di comprenderne il significato. Tale considerazione è stata funzionale anche a individuare i due casi di studio su cui ci si è soffermati nell'ambito del progetto; si è infatti scelto di analizzare nel dettaglio due reimpieghi epigrafici che presentano caratteristiche omogenee, sebbene afferiscano a contesti storici e geografici non affini e siano stati riutilizzati a distanza in edifici assai diversi fra loro.

Il primo caso preso in esame è quello dell'iscrizione funeraria di *Cnaeus Numerius Fronto*, sezionata in due frammenti inseriti nel basamento del campanile di S. Vidal, non lontano dal ponte dell'Accademia (CIL V 2162 = EDR099162; CALVELLI 2015, 97-100):

*Cn(aeus) Numerius Cn(aei) f(ilius)*  
*Vol(tinia) Fronto*  
*veter(anus) eq(ues) leg(ionis) VIII Aug(ustae)*  
*IIII vir i(ure) d(icundo) t(estamento) f(ieri) i(ussit) sibi,*  
5 *Cn(aeo) Numerio Cn(aei) l(iberto) Felici*  
*IIIIII vir(o),*  
*Crescenti l(iberto), Tuendo l(iberto),*  
----- ?

L'epigrafe sepolcrale, le cui caratteristiche monumentali non sono perspicue, anche a causa del reimpiego, che non consente di conoscere la profondità del manufatto, fu allestita per disposizione testamentaria da parte di *Cnaeus*

*Numerius Fronto*, cittadino romano di stato libero, iscritto alla tribù *Voltinia*. Il dedicante fu un veterano della legione VIII Augusta, nella quale aveva militato fra i cavalieri, e raggiunse il quattuorvirato giurisdicente in un centro amministrativo non precisato, verosimilmente quello in cui fu sepolto. Oltre che per se stesso, *Fronto* allestì il proprio monumento funerario per i suoi tre liberti *Felix*, *Crescens* e *Tuendus*, il primo dei quali ricoprì il sevirato, con tutta probabilità sempre nella stessa località. Non è possibile indicare con certezza se il testo epigrafico proseguisse dopo la menzione dei tre schiavi emancipati.

Il documento presenta diversi elementi degni di interesse. In primo luogo si segnala la difficoltà di individuarne la provenienza. Poiché *Fronto* afferiva alla tribù *Voltinia* è probabile che egli non fosse originario di Altino, i cui abitanti erano prevalentemente registrati nella tribù *Scaptia* (LUCIANI, PISTELLATO 2010, 259-260). Tale considerazione non esclude che egli avesse comunque intrapreso la carriera politica nel municipio lagunare, anche se è altrettanto possibile che ciò fosse avvenuto in altri centri amministrativi della *X regio* orientale o della regione illirico-dalmatica: è questo, infatti, il principale areale di approvvigionamento delle iscrizioni latine reimpiegate a Venezia. A tal proposito, è anche opportuno segnalare come alla fine del XVI secolo F. Sansovino, uno dei primi testimoni del reperto nella sua collocazione attuale suddivisa in due frammenti, ne ipotizzasse l'origine da Pola (SANSOVINO 1581, f. 45v: «A piè del suo campanile sono due iscrizioni antiche di un Caio Numerio: portate credo io da Puola»). Lo studio degli acquartieramenti e spostamenti della legione VIII Augusta, pur presentando ancora aspetti da indagare, ne indica un'indubbia presenza nel territorio dell'Illirico verso la tarda età augustea: a tale cronologia o agli anni immediatamente successivi è dunque ascrivibile anche il *titulus* in questione.

L'esame dell'epigrafe condotto con la strumentazione digitale ha consentito innanzitutto di comprovare la sua appartenenza al basamento originale della torre campanaria (Fig. 7). L'analisi metrologica del frammento reimpiegato sul lato prospiciente Campo S. Vidal ne evidenzia infatti l'inquadramento proporzionale nella seconda fila di conci attualmente visibile partendo dal basso, rispetto alla quale esso si colloca in maniera armonica, pur distinguendosi per il diverso litotipo (verosimilmente calcare di Aurisina rispetto a pietra d'Istria, anche se su tale fronte si rende necessario uno studio petrografico accurato).

Per quanto attiene all'impaginazione del testo epigrafico (Fig. 9b), la misurazione dell'altezza delle lettere in ciascuna delle cinque ultime righe superstiti del frammento (rr. 3-6: cm 7; r. 7: cm 6 rest.) e delle rispettive interlinee (cm 3) dimostra un impianto verticale ben proporzionato. Tale omogeneità risulta ben confermata anche se si rapportano tali misure alle unità metriche romane: tenendo presenti le variabili che si potevano riscontrare nelle sagome e strumenti in uso presso le diverse officine lapidarie, è possibile ipotizzare che l'interlinea voluta dal lapicida corrispondesse a un pollice o *uncia*





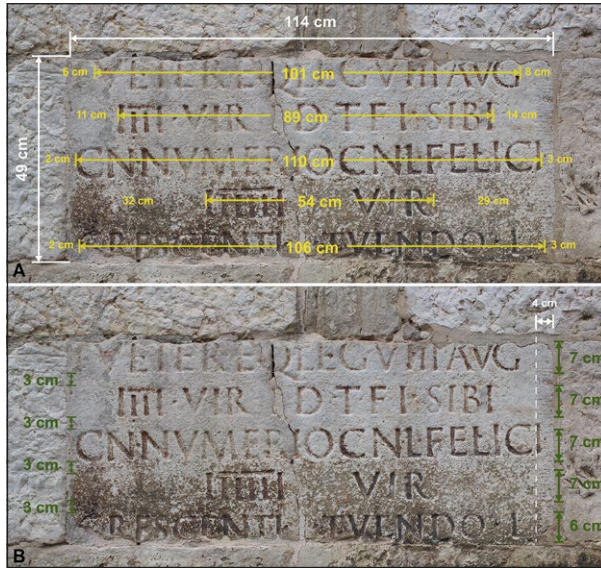


Fig. 9 – Ortomosaico dell’iscrizione reimpiegata nel basamento del campanile di San Vidal, San Marco, Venezia, con notazione delle misure relative all’impaginazione testuale (*ordinatio*) (E. Delpozzo, M. Pilutti Namer).

(2,47 cm) e che l’altezza delle lettere fosse di tre pollici o *unciae* (7,41 cm). Lo studio dello sviluppo orizzontale dell’iscrizione (Fig. 9a) indica come anch’esso rispecchi una concezione armonica. In questo caso l’elaborazione dei dati si dimostra particolarmente importante: considerando infatti le misure complessive restanti del reperto e il rispetto della proporzionalità dei margini, è possibile ipotizzare che il lato sinistro risulti mancante di una piccola porzione di spazio originariamente presente nel manufatto, la cui larghezza iniziale corrispondeva verosimilmente a quattro piedi romani (118,56 cm).

La disamina condotta grazie allo strumento digitale consente dunque di concludere come l’iscrizione reimpiegata a S. Vidal sia frutto di un ottimo lavoro di *ordinatio*, che la rese un monumento pregevole e ben distinguibile, sia per il contesto per il quale fu originariamente prodotto (sebbene oggi ignoto), che nell’ambito della fase ultima del suo “ciclo di vita”, quella in cui fu inserito almeno dal Cinquecento e in cui figura ancor oggi. A tal proposito, risultano significativi alcuni documenti d’archivio risalenti al 1690 e segnalati da M. Favilla e R. Rugolo, nei quale l’epigrafe di *Cnaeus Numerius Fronto*, definita «pietra bianca», è utilizzata come punto di riferimento per la misurazione dell’estensione di alcuni terreni attigui, di pertinenza della parrocchia di S. Vidal (FAVILLA, RUGOLO 2004-2005, 110-113).

Il secondo caso di studio epigrafico esaminato nell'ambito del progetto ha riguardato l'iscrizione funeraria di *Sextus Valerius Alcides*, reimpiegata come stipite del portale d'ingresso di un'abitazione privata in Corte dei Pali già Testori (Cannaregio 3837; Figs. 8, 10), una piccola traversa laterale di Strada Nuova in parrocchia di S. Felice (CIL V 2180 = EDR099180):

*D(is) M(anibus) s(acrum).*  
*Sex(tus) Valerius*  
*Alcides V̄vir*  
*v(ivus) f(ecit) sib[is] et Auceiae*  
5 *Psyche coniug[is],*  
*Valerio Hermeti,*  
*Calidio Hermeti,*  
*Pontio Apollona[is]*  
*amicis*  
10 *Sotericho et Gamicae [et]*  
*Taliae delic(at)is lib(ert)is.*  
*L(ocus) m(onumenti) i(n) f(ronte) p(edes) XVI, i(n) a(gro) (scil. pedes) XL.*

Il testo fu fatto incidere su una stele in calcare di Aurisina da un individuo di nome *Sextus Valerius Alcides*, il cui stato libertino, seppur non dichiarato esplicitamente dalla formula di patronato, è suggerito sia dal *cognomen* greco, che dal raggiungimento del sevirato, solitamente riservato agli schiavi emancipati. Allo stesso rango sociale appartenevano del resto con tutta probabilità anche gli altri personaggi menzionati nell'iscrizione, tutti legati da rapporti personali con il dedicante: la moglie *Auceia Psyche*, i tre amici *Valerius Hermes*, *Calidius Hermes* e *Pontius Apollona(s?)*, nonché i tre *delicati* di stato libertino *Soterichus*, *Gamice* e *Talia*, che dovevano essere di giovane età e portavano evidentemente lo stesso gentilizio del patrono *Sextus Valerius Alcides*.

L'epigrafe si apre con l'*adprecatio* agli dei Mani e si conclude con l'indicazione delle dimensioni del recinto sepolcrale, che misurava sedici piedi lungo il lato frontale (solitamente in contiguità di un asse stradale) e si sviluppava per quaranta piedi verso la campagna. La presenza della formula *in agro*, attestata con frequenza eccezionalmente più elevata ad Aquileia rispetto che ad Altino, e la larghezza della *frons*, corrispondente al modulo base dei lotti sepolcrali aquileiesi (mentre ad Altino lo standard prevalente erano venti piedi: MAZZER 2005), sono elementi che, seppur solo in via indiziaria, suggeriscono un'origine del manufatto dalla necropoli di Aquileia. La paleografia del monumento, i dati onomastici e il formulario ne indicano infine una datazione ai primi due secoli dell'età imperiale.

Come nel caso dell'iscrizione funeraria di *Cnaeus Numerius Fronto*, anche in questo l'applicazione dello strumento digitale alla misurazione del reperto ha consentito di ottenere dati preziosi e di procedere con un avanzamento della ricerca (Figg. 8, 10). L'aspetto macroscopico più evidente, confermato dalla





## 5. CONCLUSIONI

Le numerose misurazioni digitali non invasive che sono state effettuate a campione nell'ambito di questo progetto, grazie alle diverse funzioni di LD, mostrano un potenziale altamente innovativo per gli studi sul mondo antico. In futuro, l'efficacia dello strumento potrà essere ulteriormente testata mediante ricerche di taglio propriamente metrologico, che consentano in tempi brevi di avanzare ipotesi, ad esempio sulla provenienza di un nucleo omogeneo di epigrafi, colonne o capitelli, e che, grazie alla tecnologia qui descritta, risulteranno certamente semplificate. In ambito archeologico le analisi metrologiche digitali condotte potranno rivelarsi di particolare importanza per gli studi di architettura, scultura, pittura conservata *in situ*, e più in generale, per tutti i reperti di dimensioni medie e grandi che siano conservati in condizioni semi- o del tutto inaccessibili o per i quali, per motivi di conservazione, siano fortemente scoraggiate le tecniche di misurazione manuale.

Inoltre, si può affermare che il potenziale di informazioni desumibile dall'applicazione di LD in ambito epigrafico per la misurazione di reperti rifunzionalizzati in contesti di reimpiego sia notevole. Ulteriori sviluppi potranno provenire da un lato dalla realizzazione di un meccanismo di conversione automatica fra il sistema metrico decimale e le unità di misura utilizzate nel mondo romano, dall'altro dall'estensione delle misurazioni anche ai manufatti contigui agli *spolia*, compresi i blocchi lapidei anepigrafi, dei quali si potrà così verificare mediante un'analisi metrologica ad ampio spettro l'eventualità che anch'essi siano da attribuire al mondo antico.

L.C., M.P.N.

LORENZO CALVELLI, LUIGI SPERTI, MYRIAM PILUTTI NAMER,  
ELEONORA DELPOZZO

Università Ca' Foscari Venezia

lorenzoc@unive.it, sperti@unive.it, myriam.piluttinamer@unive.it,  
eleonora.delpozzo@unive.it

## BIBLIOGRAFIA

- BARSANTI C. 2002, *Venezia e Costantinopoli: capitelli di reimpiego nelle dimore lagunari del Duecento*, in E. CONCINA, G. TROVABENE, M. AGAZZI (eds.), *Hadriatica: attorno a Venezia e al Medioevo tra arti, storia e storiografia. Scritti in onore di Wladimiro Dorigo*, Padova, Il Poligrafo, 59-69.
- BARSANTI C., PILUTTI NAMER M. 2009, *Da Costantinopoli a Venezia. Nuove spoglie della chiesa di S. Polieucto. Nota preliminare*, «Nea Rhome», 6, 133-156.
- BERGER A., ZORZI N., LAZZARINI L. (eds.) 2019, *I tondi di Venezia e Dumbarton Oaks. Arte e ideologia imperiale tra Bisanzio e Venezia. The Tondi in Venice and Dumbarton Oaks. Art and Imperial Ideology between Byzantium and Venice, Atti del Convegno (Venezia 2015)*, Roma, Viella.



- BESCHI L. 1986, *La scoperta dell'arte greca*, in S. SETTIS (ed.), *Memoria dell'antico nell'arte italiana, III. Dalla tradizione all'archeologia*, Torino, Einaudi, 293-372.
- CALVELLI L. 2012, *Il reimpiego epigrafico a Venezia: i materiali provenienti dal campanile di San Marco*, in G. CUSCITO (ed.), *Riuso di monumenti e reimpiego di materiali antichi in età postclassica: il caso della Venetia*, «Antichità Altoadriatiche», 74, 179-202.
- CALVELLI L. 2015, *A New Legionary Epitaph from Venice*, «Sylloge Epigraphica Barcinonensis», 13, 87-100.
- CALVELLI L. 2016, *Iscrizioni esposte in contesti di reimpiego: l'esempio veneziano*, in A. DONATI (ed.), *L'iscrizione esposta, Atti del Convegno Borghesi 2015 (Bertinoro 2015)*, Faenza, Fratelli Lega editori, 457-490.
- CALVELLI L. 2018, «*Li marmi segatti che incrostatto havevano li muri della chiesa vecchia*». *Il reimpiego di epigrafi di epoca romana nella cattedrale di San Pietro di Castello*, in G. GUIDARELLI (ed.), *La chiesa di San Pietro di Castello e la nascita del patriarcato di Venezia*, Venezia, Marcianum Press, 87-109.
- CENTANNI M., SPERTI L. (eds.) 2015, *Pietre di Venezia: spolia in se, spolia in re, Atti del Convegno internazionale (Venezia 2013)*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- CONCINA E., FAVARETTO I., SCHREINER P. (eds.) 2013, *L'enigma dei Tetrarchi, Atti del Convegno (Venezia 2012)*, Venezia, Marsilio.
- DEICHMANN F.W. 1981, *Corpus der Kapitelle der Kirche von San Marco zu Venedig* (con la collaborazione di J. Kramer, U. Peschlow), Wiesbaden, F.W. Deichmann.
- D'EREDITÀ A. 2020, *Il rilievo fotogrammetrico di Doclea*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 213-230 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.10>).
- EFFENBERGER A. 2013, *Zur Wiederverwendung der venezianischen Tetrarchengruppen in Konstantinopel*, «Millennium», 10, 215-274.
- FAVILLA M., RUGOLO R. 2004-2005, *Frammenti dalla Venezia barocca*, «Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti. Classe di Scienze Morali, Lettere ed Arti», 163, 47-138.
- FORTINI BROWN P. 1996, *Venice & Antiquity. The Venetian Sense of the Past*, New Haven-London, Yale University Press.
- GEHN U. 2012, *Ehrenstatuen in der Spätantike: Chlamydati und Togati*, Wiesbaden, Reichert.
- GROPPA E., SARTORI A., VAI C. 1996, *Schemi compositivi delle iscrizioni latine: le giustificazioni metodologiche*, in P. MOSCATI (ed.), *III International Symposium on Computing and Archaeology (Roma 1995)*, «Archeologia e Calcolatori», 7, 771-785 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF7/61\\_Grosso\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF7/61_Grosso_et_al.pdf)).
- JACOFF M. (ed.) 1977, *I cavalli di S. Marco*, Catalogo della mostra, Venezia, Procuratoria di S. Marco.
- JACOFF M. 1993, *The Horses of San Marco and the Quadriga of the Lord*, Princeton, Princeton University Press.
- LAZZARINI L. 2015, *Il reimpiego del marmo proconnesio a Venezia*, in CENTANNI, SPERTI 2015, 135-157.
- LAZZARINI L., PILUTTI NAMER M. 2020, *Sugli spolia a Venezia. Una scultura enigmatica di San Paolo nella chiesa di San Polo*, in G. MATINO, D. RAINES (eds.), *La chiesa di San Polo tra devozione, arte e feste popolari*, Roma, Viella, 45-59.
- LUCIANI F., PISTELLATO A. 2010, *Regio X (Venetia et Histria) - parte centro-settentrionale: Iulia Concordia, Opiterngium, Bellunum, Feltria, Acelum, Tarvisium, Altinum*, in M. SILVESTRINI (ed.), *Le tribù romane. Atti della XVI<sup>e</sup> Rencontre sur l'épigraphie (Bari 2009)*, Bari, Edipuglia, 253-264.
- MAZZER A. 2005, *I recinti funerari in area altinate. Le iscrizioni con indicazione di pedatura*, Portogruaro (VE), Fondazione Antonio Colluto.
- NIEWÖHNER PH., PESCHLOW U. 2012, *Neues zu den Tetrarchenfiguren in Venedig und ihrer Aufstellung in Konstantinopel*, «Istanbuler Mitteilungen», 62, 341-367.
- PILUTTI NAMER M. 2008-2009, *Su alcuni spolia veneziani d'eccezione di età paleobizantina: i capitelli delle edicole dei Frari*, «Venezia Arti», 22-23, 69-78.

- PILUTTI NAMER M. 2015, *Il corpus di capitelli della chiesa di San Giacomo di Rialto a Venezia*, «Rivista dell'Istituto Nazionale d'Archeologia e Storia dell'Arte», 66, 253-261.
- PILUTTI NAMER M. 2016, *Spolia e imitazioni. Il Fondaco dei Turchi tra archeologia e cultura del restauro*, Venezia, IVSLA.
- POLACCO L. 1972-1973, *Venezia e l'arte antica*, «Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti. Classe di Scienze Morali, Lettere ed Arti», 131, 597-616.
- RIZZI A. 2014, *Scultura esterna a Venezia: corpus delle sculture erratiche all'aperto di Venezia e della sua laguna*, 2ª ed., Venezia, Stamperia di Venezia (ed. or. Venezia 1987).
- RUSKIN J. 1851-1853, *The Stones of Venice*, 3 voll., London, Smith, Elder and Co.
- RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G. 2011, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 169-198 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF22/AC\\_22\\_Russo\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF22/AC_22_Russo_et_al.pdf)).
- SACCONI A. 1991, *L'avventura archeologica di Francesco Morosini ad Atene, 1687-1688*, «Rivista di Archeologia», Suppl. 10.
- SANSOVINO F. 1581, *Venetia città nobilissima et singolare*, Venezia, appresso Iacomo Sansovino.
- SARTORIO L. 1947, *San Teodoro, statua composita*, «Arte Veneta», 1, 132-134.
- SCARFÌ B.M. (ed.) 1990, *Il leone di Venezia: studi e ricerche sulla statua di bronzo della Piazzetta*, Venezia, Albrizzi Editore.
- SPERTI L. 1996, *Sul reimpiego di scultura antica a Venezia: l'altare di Palazzo Mastelli*, «Rivista di Archeologia», 20, 119-138.
- SPERTI L. 2015, *La testa del Todaro: un palinsesto in marmo tra età costantiniana e tardo Medioevo*, in CENTANNI, SPERTI 2015, 173-193.
- SPERTI L. 2018, *I viaggi dei marmi*, in M. BASSANI, M. MOLIN, F. VERONESE (eds.), *Lezioni Marciane 2015-2016. Venezia prima di Venezia, dalle "regine" dell'Adriatico alla Serenissima*, Roma, L'Erma di Bretschneider, 53-98.
- SPERTI L. 2019, *Reimpiego di scultura antica a Venezia: proposte e ipotesi recenti*, in BERGER, ZORZI, LAZZARINI 2019, 161-188.
- SPERTI L., ZINATO A. 2017, *Pero Tafur (ca 1410-ca 1487): un viaggiatore castigliano di fronte alle antichità di Venezia*, «Rivista di Archeologia», 41, 157-172.
- TRAVERSARI G. 1991, *La "giustizia" di Venezia, a Rialto: statuetta greco-romana raffigurante in antico la dea Iside assimilata a Kore*, «Rivista di Archeologia», 15, 80-88.
- VIO E. (ed.) 2019, *La basilica di Venezia. San Marco, arte, storia, conservazione*, Venezia, Marsilio.

## ABSTRACT

For the first time in the history of Venetian archaeology, this paper presents the innovative potential of the application of a non-invasive digital technique for the extensive measurement of reused sculpture (spolia) preserved in Venice and its lagoon, both in architectural contexts and as freestanding structural elements. The sample measurements were carried out to get precise digital representations of archaeologically and epigraphically meaningful items, such as ancient columns, capitals or inscriptions, which are reused in the facades of palaces on the Grand Canal, as well as inside and outside Venetian churches and bell-towers. In most cases, measurements were taken for the first time; it was also possible to test the functions of the device over considerable distances, even greater than 50 m, thus obtaining the measurement of artefacts that are difficult to access. Finally, the provision of a very detailed dataset made it possible to set up a broader, albeit still embryonic, study of the proportions of ancient artefacts, especially inscriptions.

## ARCHEOLOGIA VIRTUALE DEL PASSATO CONTEMPORANEO. DAL RILIEVO ALLA RICOSTRUZIONE DIGITALE DEL CAMPO PG 65 DI ALTAMURA (BA)

### 1. LO SCENARIO

L'archeologia è una disciplina in costante evoluzione, dotata di una spiccata capacità di riflettere continuamente sulle tecniche, di sperimentare contaminazioni e aggiornare i propri metodi. Emblematico di questo rapporto di assimilazione dinamica è quanto è avvenuto negli anni grazie al continuo confronto con il mondo del digitale, che ha portato alla nascita di una branca fortemente innovativa quale l'archeologia digitale (EVANS, DALY 2006), a sua volta divenuta un contenitore vasto, in cui sono confluiti negli anni numerosi filoni di sperimentazione, non senza problemi, sopravvalutazioni, occasioni perse (VALENTI 2014). Uno dei temi più fortunati e di lunga tradizione in questa pur breve storia è senza dubbio l'applicazione della computer grafica, con la quale l'archeologia ha da subito tessuto un legame profondo.

D'altra parte l'innovazione in archeologia non si limita solo alla ricerca di soluzioni sperimentali esterne al proprio orizzonte di ricerca, ma anche all'ampliamento di questo stesso orizzonte, ad esempio in senso cronologico. In questa prospettiva è da considerare una delle novità più interessanti affacciate recentemente in campo archeologico. Il riferimento è all'interesse crescente, anche in Italia, nei confronti dei periodi più recenti del passato, che ha portato nei primi anni del nuovo millennio a coniare il termine di archeologia del passato contemporaneo (BUCHLI, LUCAS 2001; HARRISON, SCHOFIELD 2010; GONZÁLEZ-RUIBAL 2019), per indicare la sperimentazione di una lettura archeologica anche del passato tanto vicino a noi da essere considerato "relativo".

L'esperimento che qui si presenta è un tentativo di far reagire queste due componenti d'avanguardia, provando l'applicazione delle tecniche e dei metodi dell'archeologia virtuale ad un contesto cronologicamente molto recente, interamente racchiuso nei confini del Novecento e osservando come la pratica tecnica e metodologica dell'archeologia virtuale risponda quando viene chiamata a descrivere un'archeologia particolare come quella dell'epoca contemporanea.

G.D.F., A.C., R.P.

### 2. IL CAMPO 65. ARCHEOLOGIA DI UN CONTESTO CONTEMPORANEO

L'entroterra pugliese, dominato dal vasto altopiano delle Murge, costituisce un paesaggio di grande fascino. Sospeso fra campi di mandorli e di



Fig. 1 – L'edificio di comando del campo 65 (ottobre 2019) (G. De Felice).

ulivi, la sua cifra più caratteristica è sicuramente la scarsa antropizzazione che sembra ricondurlo ad un'epoca storica indefinita. Una desolazione affascinante, che aumenta man mano che ci si sposta nell'entroterra, verso l'Alta Murgia dei pascoli e dei latifondi, dei campi pietrosi, intramezzati da ricoveri per pastori (jazzi) e piccoli boschi. In un paesaggio così intatto, gli elementi antropici costituiscono quasi un fattore di disturbo, sotto forma di edifici dispersi senza alcun motivo apparente, ma che invece sono tracce di un paesaggio stratificato. Molte di queste tracce sono attribuibili a fasi storiche molto recenti, connesse con i conflitti del Novecento: le due guerre mondiali e la guerra fredda (DE FELICE 2020).

Lungo la strada statale 96, a metà fra Altamura e Gravina, si distingue il rudere pericolante di un palazzo a 3 piani, che domina dall'alto un ampio pianoro, in cui spuntano una manciata di altri edifici in rovina, sparsi su oltre 30 ettari di superficie. Sono i resti del "campo prigionieri di guerra n. 65" (Fig. 1): un grande campo di prigionia della seconda guerra mondiale, costruito nel 1940. Era il più grande fra quelli realizzati in Puglia (CHIAFFARATA 2016), composto da oltre 100 edifici, per una capienza massima prevista di 12.000 prigionieri (Fig. 2).

Circa 40 edifici dedicati al funzionamento del campo stesso erano collocati nell'avancampo, posto sul lato settentrionale, in posizione altimetricamente



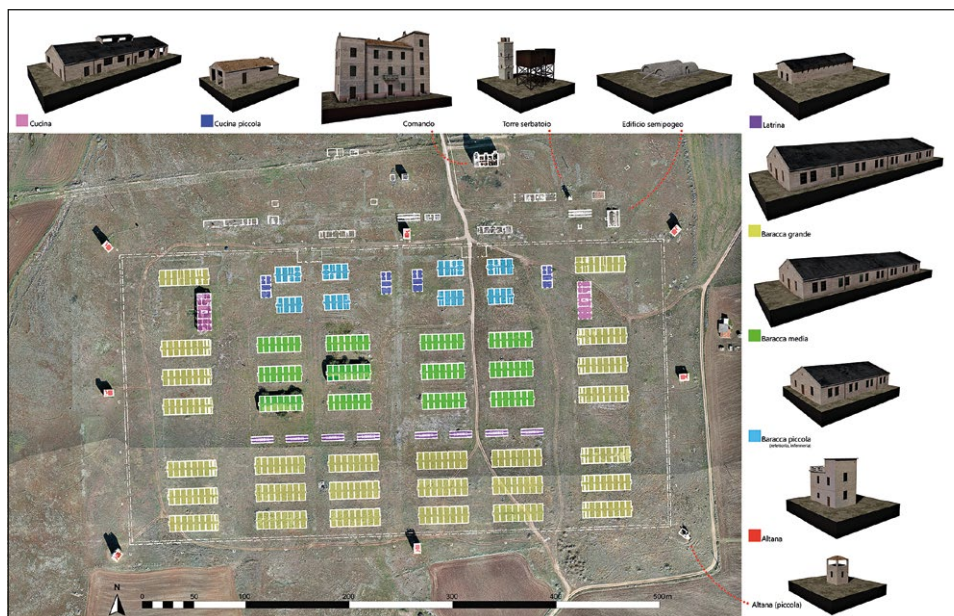


Fig. 2 – Il campo 65: sovrapposizione all'ortofoto delle piante dei singoli edifici con indicazione della loro funzione (G. De Felice).

dominante. L'area di detenzione, chiusa da una doppia cortina di filo spinato, era a sua volta suddivisa in 6 settori e ospitava 60 grandi baraccamenti. Come è facile aspettarsi, tutti gli edifici erano realizzati in maniera molto essenziale: murature in tufo, solai in calcestruzzo, pavimenti in cemento.

Dopo l'8 settembre 1943, il campo fu trasformato in un "campo di addestramento e inquadramento militare per gli antifascisti jugoslavi", in cui, nel corso di circa un anno, ex prigionieri, soldati provenienti da oltre Adriatico e volontari della resistenza serba furono addestrati per essere inviati in territorio jugoslavo contro i tedeschi e le forze collaborazioniste (LEUZZI, ESPOSITO 2000; CHIAFFARATA 2016, 145). A fine conflitto, nel 1951, le baracche furono nuovamente riutilizzate, questa volta come centro di raccolta dei profughi che convergevano in Italia a seguito delle intricate questioni internazionali esplose alla fine del secondo conflitto mondiale e protrattesi nei decenni successivi (GERVASIO 2006).

Successivamente alla chiusura del campo profughi nel 1962, il luogo fu usato per esercitazioni e manovre militari almeno fino agli anni '80 del '900, prima di essere sistematicamente raso al suolo. Di tutte queste fasi rimangono pochi resti: di oltre 100 edifici realizzati, se ne conservano oggi una dozzina, in cui si concentra un vero palinsesto di segni (murature, tamponature, graffiti,



dipinti murali) e di tracce archeologiche di un'intensa frequentazione durata poco più di 50 anni.

G.D.F.

### 3. IL RILIEVO DEL CAMPO

Il rilievo dell'intera estensione del campo 65 si è reso necessario a causa della parzialità e approssimazione della documentazione grafica d'archivio e per la programmazione delle future strategie di indagine nel sito. L'attività sul campo è stata anticipata da una fase di pianificazione, che si è posta come obiettivo lo studio della geometria dei manufatti e della morfologia dell'area in cui sono inseriti, al fine di elaborare una metodologia di acquisizione dei dati e di un metodo che risultasse snello ma preciso. La scelta degli strumenti da utilizzare è fin da subito stata ristretta all'utilizzo del laser scanner e della fotogrammetria: delle due metodologie sono stati analizzati sia i processi operativi in fase di campagna che le successive operazioni di gestione ed elaborazioni dei dati in laboratorio, comparando le risorse necessarie e le possibili tempistiche.

Da un lato gli strumenti dotati di tecnologia LiDAR hanno da tempo dimostrato, in fase di acquisizione dati, il vantaggio di necessitare di un solo operatore per le operazioni di accensione, inquadramento dell'area e scansione della stessa. In queste operazioni tuttavia risulta mancare completamente il controllo da parte dell'operatore circa i punti acquisiti e la precisione degli stessi, a causa non solo della portata di battitura dallo strumento, ma anche del fisiologico diradamento dei dati che si presenta progressivamente all'allontanarsi della stazione. L'applicazione di questo metodo ad aree così vaste a carattere pianeggiante e con un numero di elevati architettonici così ridotto, ha dimostrato sin da subito la sua inadeguatezza, in considerazione dell'alto numero di stazioni necessarie (oltre 100 solo per il rilievo planimetrico dell'intera area) e da un altrettanto alto numero di marker 3D da collocare al suolo per la successiva interpolazione delle singole stazioni in fase di elaborazione.

D'altro canto, la recente affermazione della fotogrammetria digitale, intesa come restituzione multi-stereoscopica da immagini digitali fino all'elaborazione legata al modello tridimensionale, ha già mostrato la sua utilità in diversi settori del rilievo, in particolare nella sua declinazione applicata all'ambito aereo, in cui essa mostra molteplici vantaggi. Se a confronto con la tecnologia LiDAR essa condivide l'impiego di un numero ridotto di operatori specializzati nelle preliminari fasi di programmazione e nella successiva esecuzione delle battiture di rilievo, la fotogrammetria si dimostra molto più conveniente sia dal punto di vista economico che nelle tempistiche (GUERRA *et al.* 2004). Nelle battiture aeree, ad esempio, il controllo dei punti a terra che nell'utilizzo dei laser scanner è affidato a costosi marker 3D, nella fotogrammetria aerea è sostituito dai Ground Control Point (GCP), marker di

dimensioni variabili in funzione dell'altimetria di ripresa, dal prezzo accessibile, che stampati su teli di PVC hanno la funzione di controllo e di verifica dei dati, supportati dall'utilizzo di una stazione totale (RONZINO *et al.* 2010). Anche la fase di elaborazione dei dati avviene in maniera quasi completamente automatica, necessitando di un tecnico solo nelle fasi finali di calibrazione ed eventuale correzione degli stessi.

In considerazione di queste premesse, e con l'obiettivo di seguire un approccio pragmatico, finalizzato a ottenere in maniera rapida ed economica gli elaborati tradizionali riferiti allo stato dei luoghi, la scelta è ricaduta sulla fotogrammetria aerea. Le operazioni sono state eseguite con un sistema a pilotaggio remoto (APR) DJI Mavic 2 Pro equipaggiato con fotocamera Hasselblad L1D-20c da 35 mm, equivalente 28 mm ad apertura variabile f/2.8-f/11, campo visivo di 77°, sensore CMOS da 1 pollice da 20 megapixel e sistema integrato GPS+GLONASS con intervallo di accuratezza verticale compreso di +/- 0,1 m e orizzontale di +/- 0,3 m.

In prima istanza si è proceduto con operazioni mirate alla redazione di una ortofotocarta di insieme. Attraverso l'applicazione Pix 4D sono stati programmati 4 piani di volo che hanno permesso di sorvolare l'area eseguendo un percorso atto a creare una maglia regolare di scansione ad una quota di 50 m di altezza con orientamento di camera nadirale, che hanno restituito complessivamente 1233 fotografie (Fig. 3).

Gli edifici presenti, invece, sono stati trattati singolarmente, dedicando ad ogni manufatto tre piani di volo manuale, il primo con rotta lineare nadirale, gli altri due con rotte a 360° a quote proporzionate alle altezze dei soggetti. Il piano di volo, quello a quota maggiore, ha eseguito la battitura lineare, in maniera analoga a quella eseguita per la redazione dell'ortofotocarta d'insieme, concentrandosi a reperire dati dei piani di copertura. Il secondo volo, ad una quota intermedia, ha effettuato scatti con orientamento di camera compreso tra i 60° e 45° rilevando gli agganci tra coperture e fronti in maniera scorciata, mentre il terzo e ultimo, a quota inferiore, ha realizzato scatti con orientamento di camera parallela ai prospetti, al fine di ottenere dati il meno possibile soggetti ad aberrazioni ottiche. Nello specifico sono stati rilevati tutti gli edifici. Solo per le altane di sorveglianza, caratterizzate da una geometria architettonica identica, si è deciso di rilevare un solo edificio, quello di NE, che conserva il miglior stato di conservazione. Sono stati utilizzati 25 GCP in formato A1 (59,4×84,1 cm) posizionati al suolo, al fine di creare una rete di punti di controllo al quale è stato agganciato un unico sistema di riferimento utilizzando la stazione totale.

Terminata la campagna di rilievo si è proceduto con le elaborazioni dei dati. In queste fasi si è operato con il software Photoscan, dapprima dedicandosi alla redazione dei dati cartografici d'insieme e successivamente ai modelli degli edifici. Nelle fasi di costruzione dell'ortofotocarta, a causa della

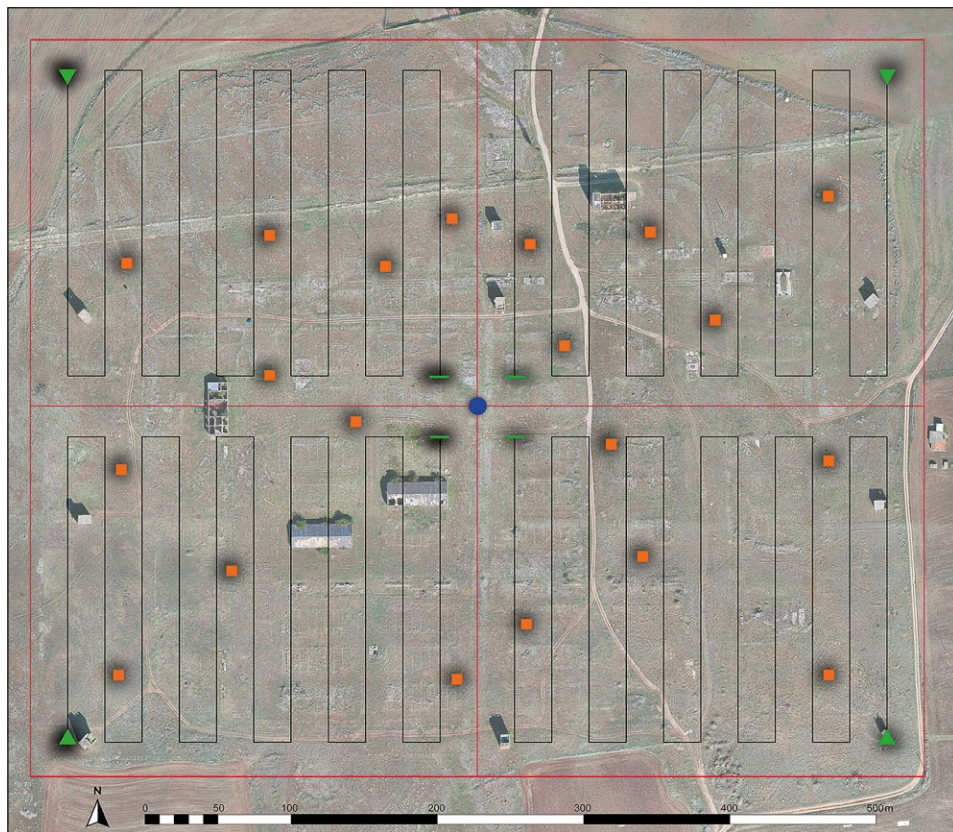


Fig. 3 – Piani di volo per la redazione dell’ortofotocarta. Con il triangolo e la linea verde sono indicati inizio e fine del piano di volo programmato, con il cerchio blu il punto di decollo e atterraggio dell’APR, con i quadrati arancioni i Ground Control Point (GCP) (R. Pavone).

mole di dati, sono stati elaborati singolarmente i piani di volo, restituendo nuvole di punti e mesh texturizzate che successivamente sono state unite al fine di redigere un unico file georeferenziato composto da una nuvola densa di 413.608.941 punti, un’ortofotocarta con GSD (Ground Simple Distance) di 1,21 cm/px, e il modello tridimensionale del terreno (DEM) costituito da 13.470.932 poligoni.

Analogamente per le operazioni a larga scala, si è proceduto ad elaborare i medesimi dati dei singoli edifici, dai quali è stato possibile produrre gli ortofotopiani dei prospetti e del piano di copertura oltre che il modello georeferenziato tridimensionale dei manufatti. Nello specifico, l’edificio di comando è stato rilevato attraverso 53 fotografie che hanno restituito una



Fig. 4 – Ortofotocarta e prospetti, piani di copertura e assonometria degli edifici rilevati (R. Pavone).

nuvola densa di 4.270.374 punti e un modello texturizzato costituito da 200.614 poligoni. L'altana di sorveglianza è stata rilevata da 33 scatti che hanno restituito una nuvola densa di 2.656.516 punti e un modello texturizzato da 121.576 poligoni. I due capannoni sono stati rilevati da circa 31 fotografie, che hanno restituito una nuvola densa di circa 5.664.787 punti e modelli texturizzati composti da circa 235.393 poligoni. La torre dell'acquedotto è stata rilevata con 29 fotografie, che hanno restituito una nuvola densa di 934.209 punti e modello texturizzato composto da 60.000 poligoni (Fig. 4).

R.P.

#### 4. IL MODELLO RICOSTRUTTIVO DELLA PALAZZINA COMANDO

Lo studio delle fonti e del contesto archeologico e il confronto con il rilievo fotogrammetrico tridimensionale hanno costituito il punto di partenza per sviluppare il modello ricostruttivo dei singoli edifici e dell'intero campo, attraverso l'elaborazione di diversi modelli di corrispondenza del dato (LIMONCELLI 2012, 190-196). Il primo edificio che si è preso in esame è la "palazzina comando", l'edificio più rappresentativo e meglio conservato dell'intero contesto (Fig. 1). Dalle elaborazioni ottenute dalla fotogrammetria è stato possibile estrapolare sia un rilievo tridimensionale dello stato di conservazione attuale, sia una texture ad alta risoluzione dell'intera superficie.

Questi dati sono stati fondamentali per ottenere una lettura analitica omogenea di un edificio che raggiunge i 10 m di altezza e che risulta inaccessibile per motivi di sicurezza, ma anche per comprendere i rapporti fra i diversi elementi del corpo di fabbrica e sull'organizzazione delle coperture.



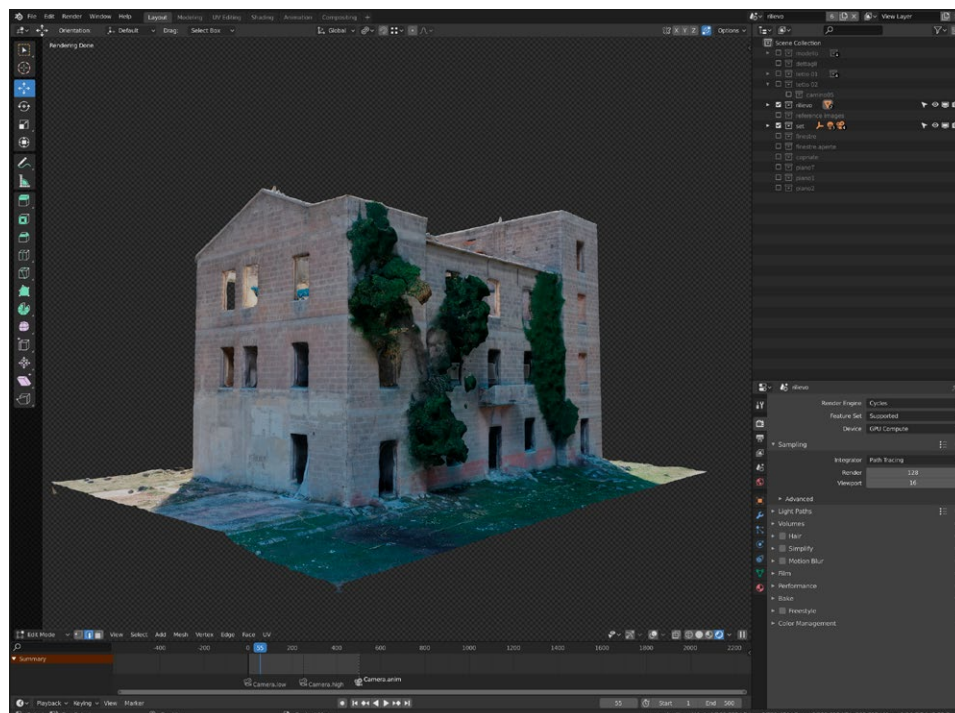


Fig. 5 – Il rilievo 3D, completo di texture, importato in Blender (A. Camerino).

Quel che ci interessa in questa sede è però soprattutto il loro utilizzo per ricavare gli asset necessari a realizzare un modello virtuale ricostruttivo preciso e affidabile.

Il rilievo tridimensionale, elaborato con Photoscan, è stato innanzitutto esportato in formato .obj in modo da preservare sia la geometria che le texture ad alta risoluzione, e infine importato in Blender (Fig. 5). Il modello (“modello dello stato di fatto”) è stato utilizzato come reference per ricavare le misure e i dettagli architettonici anche delle parti inaccessibili, mentre è stato necessario retopologizzare manualmente l’intera mesh, in quanto le geometrie e le texture generate automaticamente dai software di fotomodellazione non sono mai direttamente ed efficacemente utilizzabili nell’elaborazione di un modello ricostruttivo (“modello di reintegrazione”).

Il dato geometrico ha permesso la modellazione fedele all’originale delle parti conservate dell’intero edificio. Le pareti esterne sono state ricostruite allineandole alle geometrie contenute nel rilievo, mentre i tetti sono stati realizzati da zero, attraverso un sistema di coperture descritto dalle fonti documentarie





Fig. 6 – Il modello finito dell'esterno della palazzina comando (A. Camerino).

e visibili in alcune fotografie d'epoca: capriate lignee e rivestimento in tegole. Anche altri dettagli, come i camini e gli infissi, oggi non più esistenti, sono stati ricostruiti in base alla documentazione d'archivio.

Per l'elaborazione delle texture sono stati utilizzati gli ortofotopiani delle singole facciate, estrapolati dal rilievo tridimensionale ritoccando le deformazioni dell'immagine fotografica derivate dalla presenza di vegetazione che durante l'elaborazione fotogrammetrica ha creato delle imprecisioni dei dati dal punto di vista grafico. Il ritocco, effettuato per mezzo di diversi strumenti di Photoshop (clone stamp, content-aware fill) ha permesso l'eliminazione di tutti gli elementi di disturbo: oltre alla vegetazione sono state corrette le tamponature delle finestre, le parti pericolanti e gli aggetti che impedivano la vista di alcune parti della superficie, come ad esempio il balcone posto al primo piano.

I singoli fotopiani ricostruttivi elaborati sono stati utilizzati anche per la realizzazione di altrettante normal maps da utilizzare nello shading del modello ricostruttivo. Infine, tramite la funzione di "image assets generation", le singole immagini sono state automaticamente esportate in textures, utilizzate in appositi shader. Per le parti ricostruite integralmente, come gli infissi, i tetti e altri dettagli, sono stati invece utilizzati shader PBR di materiali generici (ferro, legno, vetro, cemento). Tutte le operazioni descritte sinora hanno riguardato le superfici esterne della palazzina comando (Fig. 6): per

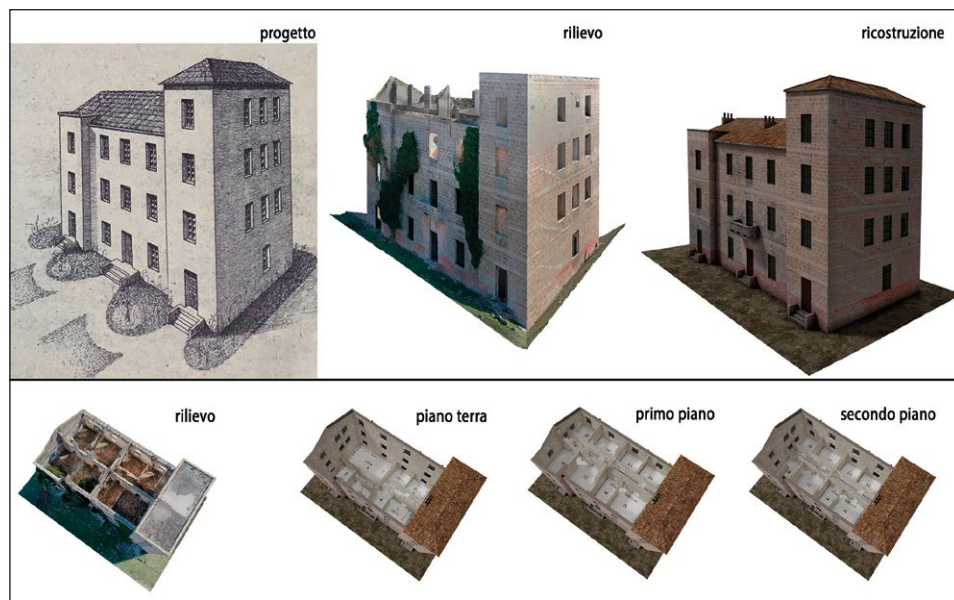


Fig. 7 – Fonti a confronto. Disegno di progetto (Archivio del 15° reparto infrastrutture, Bari); rilievo 3D da drone (arch. R. Pavone); modello ricostruttivo e vista degli interni (A. Camerino, G. De Felice).

la modellazione dell'interno si è utilizzata esclusivamente la documentazione d'archivio, ricavando dai disegni tecnici originali sia le forme dei setti murari dei 3 piani dell'edificio che le texture dei pavimenti stessi.

L'intero processo descritto ha portato alla realizzazione di un “modello di edizione”, ovvero un modello conclusivo dell'intera operazione di restauro virtuale (Fig. 7). Come spesso avviene nella resa grafica finale di un lungo e complesso lavoro di modellazione digitale, la scelta di uno o più punti di vista per la realizzazione dei rendering rappresenta un'evidente limitazione: per valorizzare adeguatamente il lavoro svolto e il processo seguito è stato realizzato un breve filmato che descrive rapidamente le diverse fasi di lavorazione (<https://youtu.be/WhtBc8gdqqM>).

A.C.

## 5. IL MODELLO GENERALE DEL CAMPO

La modellazione ricostruttiva della palazzina comando è stato il primo step verso la realizzazione di un modello dell'intero campo. Lo studio analitico di questo edificio ben documentato e dei suoi imponenti resti ha permesso di raggiungere una ricostruzione precisa dell'elevato e dell'articolazione interna

degli ambienti, mentre il rilievo da drone ha fornito un'immagine ad alta risoluzione dell'intera estensione del campo, che ha costituito la base per la realizzazione di un modello complessivo. Il rilievo infatti ha permesso di creare un modello digitale del terreno che riproducesse con precisione l'altimetria dell'intera area, ma anche la base di una texture ad alta risoluzione utilizzabile per il modello ricostruttivo.

Dopo la rimozione digitale di una serie di dettagli non pertinenti (impronte e ombre degli edifici, cumuli di rifiuti, tracce di viabilità e altri elementi anacronistici), si è ottenuto un fotopiano ad alta risoluzione, coerente con l'aspetto del piano di calpestio del campo deducibile dalle fotografie d'epoca. Il pianoro e l'avvallamento su cui si sviluppano rispettivamente avancampo e campo di prigionia sono infatti sostanzialmente identici alla situazione del 1940. Nel corso dei decenni non c'è stato alcun apporto di inerti e nessun aumento sensibile di quota come dimostrano chiaramente le tracce degli edifici, ben visibili sul terreno.

Sull'ortofoto del campo sono stati sovrapposti gli scatti storici IGM e le diverse piante, in modo tale da poter allineare gli elementi deducibili da più tipi di fonte. La sovrapposizione è per forza di cose solo parziale, a causa dei diversi livelli di precisione delle fotografie storiche IGM e delle planimetrie d'archivio rispetto all'ortofoto da drone. Il modello 3D del terreno è stato quindi composto dall'immagine ritoccata, applicata a una mesh piana. Il rilievo è stato ottenuto tramite displacement, utilizzando il DTM in formato

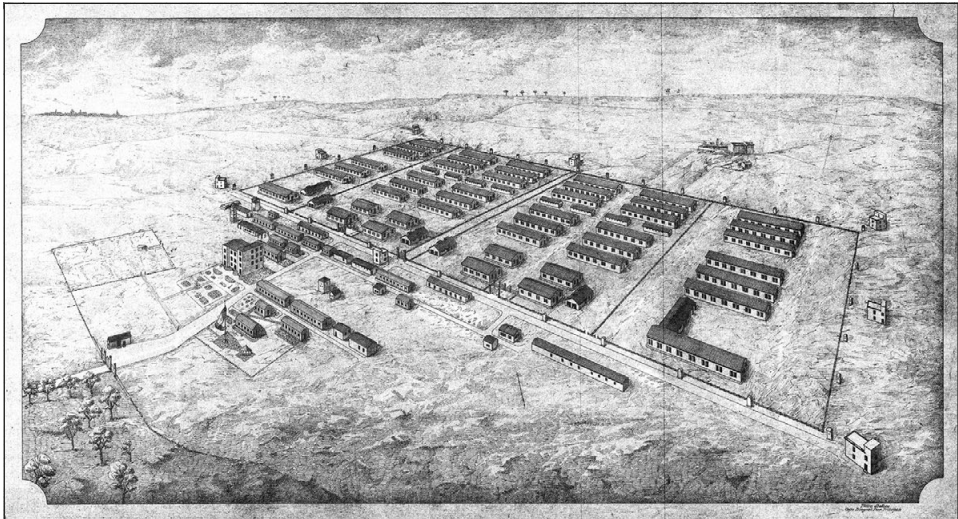


Fig. 8 – Veduta prospettica del campo (ca. 1940, disegno di Pietro Stallone, Archivio del 15° reparto infrastrutture, Bari).





raster per deformare il piano lungo l'asse Z. Dall'immagine è stata inoltre ricavata una normal map, utilizzata nello shader per rendere l'effetto di rugosità e irregolarità della superficie.

Per ogni edificio è stata realizzata una scena in un file a parte, in modo da tenerli separati dal modello del campo e gestire in modo dinamico gli assets. Un altro file è stato invece dedicato a realizzare tutti gli shader, per facilitare il controllo dell'intero modello. I modelli degli edifici del campo di prigionia, originariamente realizzati come tema d'anno dagli studenti del corso di Archeologia Digitale (Università degli Studi di Bari, a.a. 2018-2019) sono stati uniformati e ottimizzati per l'inserimento nel modello generale, anche grazie al rinvenimento di alcune planimetrie e altra documentazione relativa al progetto originale del campo, recuperate in un momento successivo allo svolgimento del corso, presso l'archivio del Genio Militare di Bari (Fig. 8).

La modellazione dei singoli edifici è avvenuta con procedure diverse a seconda della documentazione disponibile. Per le baracche prigionieri, che costituiscono la tipologia di edificio più diffusa, e per le cucine del campo è stato possibile lavorare a partire dalla documentazione di progetto, incrociando i dati con quanto riscontrabile sul terreno ancora oggi. Per quanto riguarda questi edifici, è stato possibile procedere alla ricostruzione anche

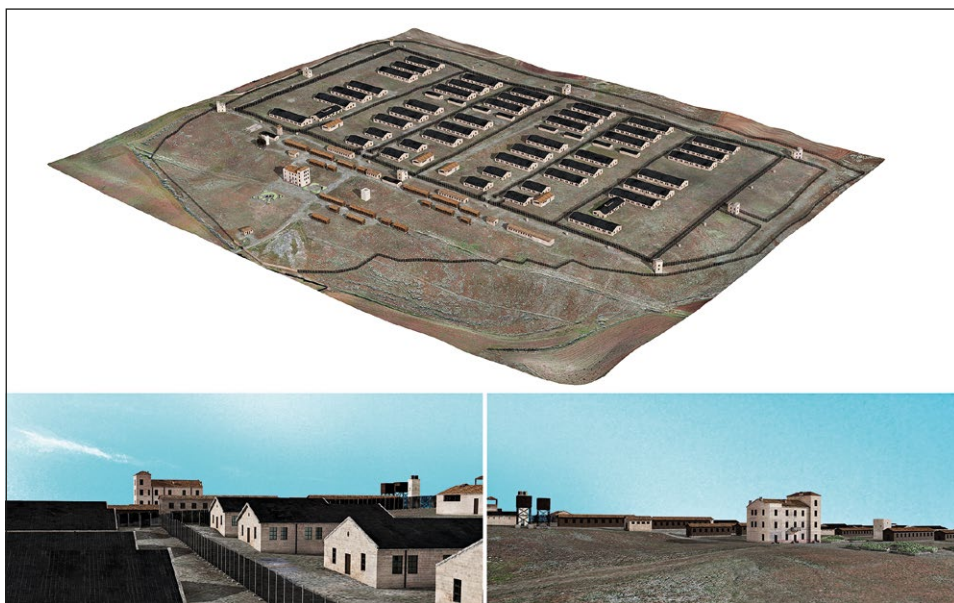


Fig. 10 – Alcuni rendering della ricostruzione del campo 65 (A. Camerino, G. De Felice).



della parte interna, utilizzando le piante di archivio per descrivere la funzione dei diversi vani (Fig. 9).

Gli altri edifici sono stati ben più difficili da ricostruire. Si sono utilizzate fotografie d'archivio e rilievi fatti sul campo e in questo modo si sono realizzati i modelli delle cucine piccole, delle latrine, delle torri di sorveglianza (altane). Ancora più problematici sono stati gli edifici dell'avancampo, gran parte dei quali era realizzato in legno, ma di cui non abbiamo alcuna traccia a parte le fondazioni visibili sul campo e poche immagini di repertorio. Infine è stato aggiunto il sistema di recinzione, modellato in modo da adattarsi al terreno, e la viabilità di massima, recuperata dalle tracce visibili nelle fotografie aeree.

Nella realizzazione delle texture è stato usato il materiale elaborato per la palazzina comando, procedendo alla creazione di una texture generica utilizzabile per tutti gli edifici che avevano la stessa tecnica costruttiva. Nella costruzione degli shader dei muri e dei tetti è stato aggiunto un parametro di randomizzazione delle coordinate delle texture, in modo tale da ottenere in modo automatico uno shift della texture stessa ed evitare la presenza di tetti e muri che risultassero sempre identici fra loro.

Il modello (Fig. 10) costituisce la base di partenza per la realizzazione di ricostruzioni delle diverse fasi di vita del campo, che al momento risulta problematico distinguere. Pur nell'abbondanza di fonti, non abbiamo elementi sufficienti ad esempio a comprendere la suddivisione interna del campo partigiani o la rifunzionalizzazione di alcuni edifici durante la fase del Centro profughi: le continue trasformazioni della storia di questo contesto sono in definitiva poco visibili nella dimensione esteriore del campo. Le trasformazioni interne, i cambi d'uso, ma anche la rimozione della recinzione e le modifiche dei percorsi abituali degli abitanti sono elementi che sfuggono e che contrastano fortemente con l'abbondanza di informazioni sull'aspetto materiale del campo, sulle tecniche costruttive e sull'organizzazione prevista dal progetto o riscontrabile dalla cospicua documentazione d'archivio.

G.D.F.

## 6. ARCHEOLOGIA VIRTUALE DEL PASSATO CONTEMPORANEO

L'archeologia del passato contemporaneo è ancora in attesa di dotarsi di propri strumenti di analisi (MANACORDA 2017) e soprattutto di considerare l'applicabilità di quegli strumenti di indagine che ormai costituiscono parte integrante della metodologia della moderna archeologia: tipologia, stratigrafia e tutto quel ventaglio di metodi che compongono il protocollo universale dell'archeologia moderna, fra cui trovano posto anche le soluzioni digitali. Per quanto le leggi della stratigrafia e della cronologia siano valide per qualunque

periodo storico, il repentino abbreviarsi della distanza fra osservatore e caso di studio porta ad una profonda deformazione della validità e della significatività dei dati archeologici, tale da richiedere, con tutta probabilità, una messa a punto di processi e protocolli diversi.

L'archeologia virtuale da questo punto di vista sembrerebbe rappresentare un'eccezione, nella sua accezione di replica di una realtà non più esistente e non più fruibile, dai contesti stratigrafici (REILLY 1990; BARCELÓ *et al.* 2003) ai modelli ricostruttivi (FORTE, BELTRAMI 2000), dalla gestione del dubbio e delle ipotesi (BARCELÓ 2000, 2001) all'intera sequenza cronologica delle diverse fasi (BARCELÓ 2009; DE FELICE 2012). A volte tuttavia il campo della computer grafica applicata all'archeologia si è mosso alla ricerca di interazioni fra documentazione e ricostruzione in grado di garantire la precisione e l'accuratezza del rilievo e della registrazione dei dati puntando ad un'agognata esattezza ricostruttiva o pretendendo di divenire accessorio di un processo formale e semiautomatico in grado di produrre risultati più precisi o più attendibili.

Ma più che nei molti tentativi di formalizzazione del processo ricostruttivo, l'archeologia virtuale mantiene intatto il proprio potenziale evocativo, e se vogliamo anche emozionale, nella sua capacità di rappresentare il processo interpretativo archeologico in modo coinvolgente, producendo contenuti visivi densi e significativi. La ricostruzione, fortunatamente, continua a rimanere un'operazione profondamente umana, coraggiosa e inesatta, ma allo stesso tempo un passaggio imprescindibile di qualunque progetto di archeologia, in cui al digitale non è chiesto tanto di formalizzare quanto piuttosto di supportare il pensiero scientifico.

In questa luce non stupisce allora che proporre la ricostruzione di un contesto cronologicamente vicino si riveli un'operazione molto più complessa di quanto ci si possa immaginare. Da un qualunque archeologo, infatti, ad una prima valutazione, essa potrebbe essere considerata come un caso di studio ideale, data la straordinaria ricchezza di fonti e l'accessibilità del sito e dei suoi resti. Eppure, questo tipo di lavoro pone degli interrogativi che giungono fino al cuore dell'archeologia della ricostruzione e soprattutto della "presentazione", se, come è giusto fare, ci impadroniamo del vocabolario proposto dalla Convenzione di Faro (MONTELLA *et al.* 2016).

D'altronde, di fronte al patrimonio archeologico contemporaneo, non sono solo le istanze della presentazione a perdere gran parte della loro efficacia e della loro validità; a vacillare sembrano essere anche, per esempio, quelle di restauro e conservazione, che pur si giurerebbe siano ben codificate per ogni contesto materiale, ma che sembrano dover essere riconsiderate. Cosa conserviamo? Cosa restauriamo? Cosa presentiamo? Questi interrogativi nascono soprattutto perché, come ancora una volta ci ricorda la Convenzione di Faro, il patrimonio archeologico contemporaneo soffre in tutti gli anelli

della catena dell'indagine, che sono fortemente connessi fra loro tanto da non poter essere disgiunti: identificazione, studio, interpretazione, protezione, conservazione e presentazione.

Diventa quindi molto difficile capire come presentare (ma anche come studiare, interpretare, proteggere e conservare) un patrimonio labile ed evanescente già nella sua identificazione, perché ci si chiede in definitiva se, in luoghi in cui la rovina è parte integrante del paesaggio stratificato e come tale ha un significato, abbia ancora senso la sua rimozione, anche solo virtuale.

Ancora una volta, fare archeologia virtuale significa sperimentare i limiti dell'archeologia e confrontarsi con una nutrita serie di stereotipi e di luoghi comuni che emergono fortemente quando si parla di presentare il patrimonio archeologico. Essi vogliono ad esempio che l'archeologia si identifichi solo con ciò che è antico, o usano preconetti che tendono a dare ai contesti un'accezione estetica, inseguendo un'ipotetica bellezza o strizzando l'occhio a elementi identitari, suscitando in modo apodittico un'identificazione fra noi e il nostro patrimonio. Se invece è vero che le tecnologie di comunicazione ci dovrebbero sempre spingere a considerare criticamente lo scopo cui tendiamo (VALENTI 2014, 135), dobbiamo allora sforzarci di trovare un possibile significato da attribuire al messaggio che trasmettiamo attraverso una ricostruzione tridimensionale di un contesto di archeologia del passato contemporaneo.

Nel nostro caso, ad essere in agguato non sono tanto le istanze estetiche, tutto sommato poco applicabili a contesti "brutti", né le sfumature identitarie, che prendono il sopravvento in una rivendicazione di patrimoni "nostri" a diverso titolo, che rischiano di emergere in ogni progetto di archeologia virtuale. Non sembra che un campo di prigionia possa essere raccontato come faremmo con un sito di età classica o medievale, perché pur basando la narrazione sempre e comunque su dati archeologici, sono i significati a essere profondamente differenti. Questo patrimonio archeologico soffre in definitiva degli stessi problemi che riguardano il patrimonio "antico", con l'aggravante di non essere spesso nemmeno considerato unanimemente degno di essere studiato, interpretato, conservato e protetto.

Azzerando le distanze cronologiche fra ricercatore e contesto di studio, l'archeologia del passato contemporaneo sviluppa un senso di appartenenza inimmaginabile in contesti più antichi (HARRISON, SCHOFIELD 2010), che rende più difficile la presentazione dei risultati. In quest'ultima si condensa un fortissimo senso etico, che sarebbe interessante estendere al patrimonio archeologico di ogni epoca, come superamento degli stereotipi identitari ed estetici che, ancora nel ventunesimo secolo, caratterizzano fortemente il racconto dell'archeologia.

G.D.F.

### Ringraziamenti

Il lavoro che si presenta è parte di un più ampio progetto di ricerca di archeologia del passato contemporaneo dedicato alla ricostruzione dei contesti legati ai conflitti del Novecento in Puglia. Il lavoro sul campo 65 è stato effettuato come tema d'anno del corso di archeologia digitale (corso di laurea magistrale in Archeologia, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro"). Il rilievo dell'intera area del campo e degli edifici superstiti è frutto di una collaborazione con il prof. Paolo Perfido del Politecnico di Bari ed è stato svolto sul campo da Remo Pavone. Il modello ricostruttivo dell'intero campo infine è stato realizzato nell'ambito della tesi di laurea magistrale in archeologia della dott.ssa Adriana Camerino.

GIULIANO DE FELICE

Università degli Studi di Bari  
giuliano.defelice@uniba.it

ADRIANA CAMERINO

Università degli Studi di Bari  
adriana.camerino94@gmail.com

REMO PAVONE

Politecnico di Bari  
arch.remopavone@gmail.com

### BIBLIOGRAFIA

- BARCELÓ J.A. 2000, *Visualizing what might be. An introduction to Virtual Reality techniques in archaeology*, in J.A. BARCELÓ, M. FORTE, D.H. SANDERS (eds.), *Virtual Reality in Archaeology*, Oxford, Archeopress, 9-35.
- BARCELÓ J.A. 2001, *Virtual reality for archaeological explanation. Beyond picturesque reconstruction*, «Archeologia e Calcolatori», 12, 221-244 (<http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF12/12Barcelo.pdf>).
- BARCELÓ J.A. 2009, *Computational Intelligence in Archaeology*, Hershey, IGI Global.
- BARCELÓ J.A., CASTRO O., TRAVET D., VICENTE O. 2003, *A 3D Model of an archaeological excavation*, in M. DOERR, A. SARRIS (eds.), *The Digital Heritage of Archaeology, CAA 2002. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 30<sup>th</sup> Conference (Heraklion, Crete, 2002)*, Athens, Hellenic Ministry of Culture, 85-89.
- BUCHLI V., LUCAS G. (eds.) 2001, *Archaeologies of the Contemporary Past*, London-New York, Routledge.
- CHIAFFARATA S. 2016, *La Murgia sconosciuta. Dalla Prima guerra mondiale alla Guerra fredda*, in M. TRIGGIANI, L. DEROSA (eds.), *Rotte Murgiane*, Bari, Edipuglia, 139-154.
- DE FELICE G. 2012, *Una macchina del tempo per l'archeologia. Metodologie e tecnologie per la ricerca e la fruizione virtuale del sito di Faragola*, Bari, Edipuglia.
- DE FELICE G. 2020, *Archeologia di un paesaggio contemporaneo. Le guerre del Novecento nella Murgia pugliese*, Bari, Edipuglia.
- DEQUAL S., LINGUA A., RINAUDO F. 2001, *Ortofoto digitale di precisione*, «Supplemento Speciale Bollettino SIFET», 2, 119-131.
- EVANS T.L., DALY P. (eds.) 2006, *Digital Archaeology. Bridging Method and Theory*, London, Routledge.

- FORTE M., BELTRAMI R. 2000, *A proposito di Virtual Archaeology: disordini, interazioni cognitive e virtualità*, «Archeologia e Calcolatori», 11, 273-300 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF11/1.17\\_Forte.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF11/1.17_Forte.pdf)).
- GERVASIO A. 2006, *Il centro raccolto profughi di Altamura (1951-1962)*, in V.A. LEUZZI, G. ESPOSITO (eds.), *La Puglia dell'accoglienza. Profughi, rifugiati e rimpatriati nel Novecento*, Bari, Progedit, 192-214.
- GONZÁLEZ-RUIBAL A. 2019, *An Archaeology of the Contemporary Era*, London, New York, Routledge.
- GUERRA F., PILOT L., VERNIER P. 2004, *Fotogrammetria e laser scanning: alternativa?*, Venezia, Università IUAV, CIRCE.
- HARRISON R., SCHOFIELD J. 2010, *After Modernity. Archaeological Approaches to the Contemporary Past*, I, 3, Oxford, OUP.
- KRAUS K. 1997, *Photogrammetry*, II, Bonn, Dümmlers Verlag.
- LEUZZI V.A., ESPOSITO G. (eds.) 2000, *Terra di frontiera. Profughi ed ex internati in Puglia (1943-1954)*, Bari, Progedit.
- LIMONCELLI M. 2012, *Il restauro virtuale in archeologia*, Roma, Carocci.
- MANACORDA D. 2008, *Lezioni di archeologia*, Roma-Bari, Laterza.
- MANACORDA D. 2017, *A proposito dei 40 anni di "Archeologia medievale" in Italia*, «Reti Medievali», 18, 3-12.
- MIGLIARI R. 2001, *Frontiere del rilievo, dalla matita alle scansioni 3D*, Roma, Gangemi.
- MONTELLA M., PETRAROIA P., MANACORDA D., DI MACCO M. 2016, *La "Convenzione di Faro" e la tradizione culturale italiana*, in P. FELICIATI (ed.), *La valorizzazione dell'eredità culturale in Italia. Atti del Convegno di Studi in occasione del V anno della rivista (Macerata 2015)*, «Il Capitale Culturale», Suppl. 5, 13-17.
- REILLY P. 1990, *Towards a virtual archaeology*, in K. LOCKYEAR, S. RAHTZ (eds.), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*, BAR International Series 565, Oxford, Tempus Reparatum, 133-139.
- RONZINO P., AMICO N., GABRIELLI R., ANGELINI A. 2010, *Fotogrammetria aerea automatica per il rilievo dei beni culturali*, «Bollettino della Società italiana di Fotogrammetria e Topografia».
- VALENTI M. 2014, *L'archeologia come servizio (attraverso l'impiego degli strumenti tecnologici)*, «Archeologia Medievale», 41, 127-140.
- VOLPE G., DE FELICE G. 2014, *Comunicazione e progetto culturale, archeologia e società*, «European Journal of Post-Classical Archaeologies», 4, 405-424.
- VOLPE G. 2020, *Archeologia pubblica. Metodi, tecniche, esperienze*, Roma, Carocci.

## ABSTRACT

In the last decades, archaeologists have learnt to overcome the chronological limits, arriving to conceive the application of archaeological methods to contemporary objects and sites. But what happens when we try to apply the rules and methods of virtual archaeology to a context of the contemporary past? While the same tools can be used, some very important differences warn us to be careful: sometimes the contemporary archaeological heritage cannot be reconstructed in the usual way, despite the huge amount of data and sources available. The example of the virtual reconstruction of POW no. 65 in Central Apulia gives some elements to envisage possible applications of computer graphics techniques to very recent cultural heritage assets, moving a step forward towards a new paradigm of digital presentation of archaeological heritage.



PRINCIPI E METODI DELL'ARCHEOLOGIA RICOSTRUTTIVA.  
DALL'APPROCCIO FILOLOGICO  
ALLA RICOSTRUZIONE TIPOLOGICA

1. RICOSTRUZIONE ARCHEOLOGICA E RESTAURO

Una delle principali problematiche connesse allo studio ricostruttivo di un monumento antico, tra le più dibattute e controverse, è sicuramente riferibile all'attendibilità dei risultati e alla loro genesi. Molti specialisti hanno spesso esibito ricostruzioni più o meno fantasiose, spingendosi ben oltre i rigori dello studio filologico, solo in risposta alla crescente domanda di spettacolarizzazione imposta dall'indubbio fascino esercitato dalle rappresentazioni virtuali su alcune fasce di pubblico. Sul lato opposto, molti specialisti hanno rinunciato del tutto alla tentazione di proporre soluzioni plausibili, per mancanza di dati certi ed esaustivi. Se provassimo quindi a tracciare una linea di demarcazione tra i diversi orientamenti metodologici che guidano una ricostruzione, avremmo serie difficoltà, in quanto ci troveremmo a discutere su quali e quante soluzioni siano direttamente legittimate dalle evidenze archeologiche e quante siano invece ascrivibili a deduzioni, più o meno condivisibili o quantomeno non oggettivabili. Ci troveremmo quindi di fronte ad una casistica con molte sfumature di grigio, in cui le soluzioni sono plausibili in ragione di una percentuale di attendibilità. Ma procediamo con ordine.

In generale si identifica con "ricostruzione archeologica" quel processo razionale e rigoroso che, partendo da una mole di dati eterogenea, comprendente dati di scavo, fonti storiche, fotografie e disegni, giunge alla produzione di una concreta rappresentazione, sia essa un disegno, una maquette, un modello 3D o altro<sup>1</sup>. Questa rappresenta un manufatto, un elemento architettonico o un contesto più ampio, sotto forma di sintesi dei dati raccolti e come risultato finale di una rilettura critica delle informazioni raccolte. Tale momento metodologico, legato all'interpretazione dei dati e alla loro rappresentazione all'interno della ricostruzione, costituisce l'anello debole della catena perché, analogamente a quanto accaduto nella storia del restauro, molte posizioni assunte per un certo periodo di tempo sono risultate poi inaccettabili in periodi successivi. Ciò significa che la rilettura critica delle informazioni non conduce sempre alla stessa soluzione e non può quasi mai definirsi in maniera univoca. Le posizioni teoriche sono spesso mutevoli,

<sup>1</sup> Per una recente trattazione di carattere teorico-metodologico sul rilievo archeologico e sulle nuove tecniche di acquisizione dei dati, cfr. in questa rivista PUCHE 2015, con il ricco apparato bibliografico.

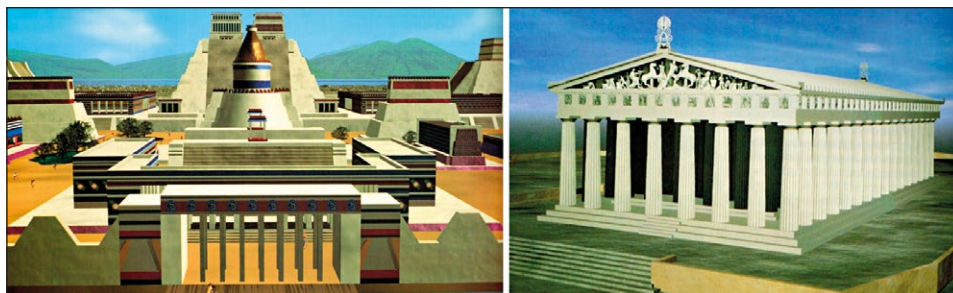


Fig. 1 – Esempio di ricostruzioni realizzate negli anni Novanta del secolo scorso (da *Archeologia, percorsi virtuali nelle civiltà scomparse*, Milano, Mondadori 1996).

per cui ciò che può essere accettato in un momento storico risulta del tutto inaccettabile in un altro.

Alcune ricostruzioni degli anni Novanta del secolo scorso, per esempio, proponevano ambienti con forme semplificate, senza nessuna attenzione alla resa o alle problematiche connesse alla rievocazione e suggestione degli spazi, non in ragione di una rinuncia derivante dall'assenza di dati, ma piuttosto in conseguenza di un evidente deficit tecnologico che non consentiva agli specialisti di padroneggiare efficacemente gli strumenti informatici allora disponibili. Ne risultavano ricostruzioni “fredde” e dalle forme squadrate, ben lontane dal rappresentare con realismo la ricchezza e le cromie degli spazi antichi. Paradossalmente risultavano più interessanti i disegni tradizionali, che restituivano con più efficacia e maggiore “calore” gli stessi ambienti riprodotti al computer. In quel periodo la moda imperante era il tecnicismo (FORTE 2008; GABELLONE *et al.* 2011) (Fig. 1).

In tempi più recenti, le tecnologie si sono progressivamente spinte in una direzione precisa: trasparenza (cioè tecnologie non visibili affatto, ma presenti), facilità d'uso e fotorealismo. La disponibilità di strumenti informatici più avanzati e più facili da usare ha perciò spostato l'attenzione su problemi di metodo, trasferendo l'accento sulla comunicazione, sulle nuove modalità di apprendimento nel VR, sulla fruizione condivisa, fino all'attuale universo della Extended Reality (XR), che tutto comprende (GOWNDER *et al.* 2016). L'esigenza di “imbrigliare” una ricostruzione all'interno di confini rigorosi è quindi diventata ancora più prepotente, perché molto alte sono le aspettative e molto potenti gli strumenti a disposizione.

Analogamente, nella storia del restauro si assiste ad una evoluzione teorica che attraversa le culture dei diversi periodi storici. Gli approcci si snodano dal restauro stilistico, mimetico e fantasioso, al restauro critico moderno, basato sul metodo filologico (CASIELLO 2005; SERAFINI 2018). In stretta analogia con il restauro, le ricostruzioni archeologiche dell'Ottocento risultavano

propositive e spesso estremamente fantasiose, più recentemente tecnicistiche e infine oggi realistiche, coinvolgenti, emozionali e persuasive. Ciò che più interessa in questa discussione rimane però il livello di attendibilità finale, che deve sempre occupare il centro di ogni processo ricostruttivo e formalizzare con rigore scientifico ogni soluzione interpretativa. Ma come può essere meglio chiarito il livello di attendibilità dei risultati quando, come nella grande maggioranza dei casi, le informazioni di base non sono complete ed esaustive?

## 2. IL LIVELLO DI INCERTEZZA

In tutti i progetti di archeologia ricostruttiva esiste sempre un certo livello di incertezza, perché uno degli obiettivi di questa disciplina è proprio quello di proporre soluzioni plausibili. Nessuno studio ricostruttivo sarebbe tale se si conoscessero tutti i particolari costruttivi e decorativi originali. Non si tratterebbe più di ricostruzione, ma di restituzione o solo di rappresentazione. La differenza sostanziale tra ricostruzione e restituzione si evince in effetti dall'etimologia stessa dei termini. Il primo presuppone un processo teso a costruire in forma teorica o grafica ciò che non è più visibile o che si presenta in maniera incompleta o compromessa, il secondo si riferisce invece al rilievo, cioè alla rappresentazione di ciò che esiste. La ricostruzione è quindi l'atto critico del "costruire di nuovo" e presuppone l'adozione di criteri rigorosi basati su dati desunti oppure, in assenza di questi, su congetture.

Un approccio rigoroso dovrebbe limitare al massimo ogni congettura e fondarsi sempre su uno studio della documentazione esistente che, al pari del risultato finale, dovrà essere anch'essa disponibile per studi ulteriori. Per garantire un alto rigore scientifico in progetti di archeologia virtuale è essenziale quindi raccogliere le basi documentarie e presentare in modo trasparente l'intero processo di lavoro: obiettivi, metodologia, ragionamenti, origini e caratteristiche delle fonti di ricerca, risultati e conclusioni. Una piena trasparenza dei metodi, delle tecniche e della documentazione a corredo di un progetto di archeologia virtuale è necessaria al fine di definire standard di qualità che innalzino il valore scientifico di una disciplina che promette di informare, stupire e affascinare con sempre maggiore efficacia e rigore (GABELLONE 2019).

I metodi di analisi, le tecniche di rilevamento e le interpretazioni devono essere tutti dichiarati, comprensibili e riutilizzabili. Solo l'analisi dei dati preliminari potrà validare gli esiti di uno studio ricostruttivo e garantire alle nuove generazioni una revisione dei risultati senza necessariamente ricominciare il lavoro dall'inizio. In questo processo di studio l'apporto dato dai software di modellazione 3D è stato storicamente determinante; esso non è affatto confinato nella pura generazione e manipolazione di poligoni nello spazio, ma si evidenzia nella sua capacità di agevolare i processi interpretativi.

Molte riflessioni sull'equilibrio delle proporzioni, sulla giustapposizione dei volumi, sull'applicazione delle leggi della statica non sarebbero certamente possibili nei tempi ridotti imposti da molti progetti, né sarebbe cosa semplice affrontare tali problemi su vasta scala con i metodi del disegno tradizionale.

È quindi fondamentale riconoscere il contributo notevole dato dai software di modellazione 3D allo studio dei monumenti antichi e alla loro ricostruzione. La maggiore consapevolezza tridimensionale dell'organismo architettonico, fornita dall'ambiente di modellazione, consente di approfondire e controllare in modo efficiente le diverse fasi di ricostruzione, con notevoli incrementi sulla precisione, sulla produttività e sulla capacità di rispondere a problemi specifici imposti dall'osservazione e studio dei monumenti nello spazio.

Sarebbe sbagliato e riduttivo confinare la modellazione 3D tra i nuovi strumenti per la rappresentazione che semplicemente sostituiscono il tecnigrafo o la matita. Il ruolo dello specialista in archeologia virtuale è strettamente connesso al rapporto dialettico tra i saperi umanistici e le possibilità offerte da questi strumenti per la modellazione e simulazione. Solo da una continua verifica in 3D degli aspetti tecnico-costruttivi, dimensionali e spaziali è possibile validare alcune ipotesi che prendono vita dallo studio filologico delle fonti, dai dati archeologici, dai confronti coevi. Molti risultati originali conseguiti da équipes eterogenee di umanisti e specialisti di archeologia virtuale sono resi possibili grazie a questo momento di verifica e studio dei monumenti nell'ambiente 3D, perché tale osservazione rivela spesso che solo una minima parte delle ipotesi ricostruttive risulta plausibile e compatibile con la logica funzionale e i principi costruttivi e stilistici in uso da una determinata civiltà, in un preciso periodo storico.

In un quadro generale dominato dalla generale necessità di dover fissare degli standard qualitativi e dei metodi di lettura trasparente dei dati analitici e interpretativi, esiste però un aspetto critico sul quale vale la pena soffermarsi. La ricostruzione virtuale, come detto in precedenza, si avvale dell'apporto congiunto dei risultati emergenti dalle diverse discipline, ma qual è l'atteggiamento da seguire quando si è in presenza di dati carenti? Capita molto spesso di trovarsi di fronte a siti che restituiscono solo informazioni frammentarie e lacunose, che possono essere estremamente importanti e preziose sul piano scientifico, ma spesso sono insufficienti a formulare delle ipotesi ricostruttive verosimili. È pur vero che la ricostruzione deve sempre confrontarsi, a diversi livelli, con dati mancanti, perché la circostanza più rara è proprio quella in cui i dati disponibili sono abbondanti e sufficienti a definire con sicurezza una proposta scientificamente inattaccabile e univoca. L'ipotesi descritta in apertura, che associa la ricostruzione ad un atto critico rigoroso che limita al massimo ogni congettura per fondarsi esclusivamente su uno studio della documentazione esistente, è quindi una condizione che non si verifica quasi mai nella realtà.

Nonostante questo, è innegabile il fascino legato al tentativo di “immaginare” soluzioni possibili, utili ad alimentare un dibattito costruttivo sull'aspetto degli edifici nel passato. Così lo studio ricostruttivo procede senza rinunce, mettendo a fattor comune molti dati apparentemente trascurabili, ma tuttavia indispensabili quando in numero così ridotto. L'analisi li soppesa continuamente sul piano tecnologico-funzionale, sforzandosi di trovarne una ragion d'essere plausibile, cioè accettabile sul piano logico, perché si confronta con metodi e tecniche costruttive ben conosciute, con soluzioni simili adottate su edifici coevi e, in sintesi, trova spiegazione in una coerenza stilistica, formale e tecnologica nel contesto socio-culturale di riferimento.

Questo atteggiamento è sempre stato alla base dei processi ricostruttivi in ogni periodo storico, ma la novità apportata dalle immagini di sintesi conferisce forza comunicativa e verosimiglianza alle ricostruzioni tale da aumentare notevolmente lo sforzo da compiere, sicuramente più arduo di quanto avvenuto in passato. Il rendering rappresenta la realtà come mai prima d'ora e questo è in verità il suo punto debole. La rappresentazione di un modello 3D deve infatti risolvere ogni particolare con realismo, anche nell'accezione di questo termine legata al possibile, al verosimile, a qualcosa che può esistere. Il disegno tradizionale al tratto, al contrario, fornisce in genere solo informazioni di forma, delineando i contorni degli oggetti o al massimo delle ombreggiature.

Questi possono dare spazio alla fantasia interpretativa di chi li osserva e assumere connotazioni anche diverse tra loro. Così la ricostruzione virtuale, con la sua capacità di presentare contesti antichi fotorealistici, diventa “fotografica” e inevitabilmente si spinge oltre il possibile, oltre quelle risposte che il rigore scientifico imporrebbe di non formulare. Possiamo però affermare con sicurezza che ciò che viene rappresentato è attendibile in rapporto ad una percentuale, per cui, per fare solo un esempio, potrebbe essere verosimile la ricostruzione dell'apparato strutturale, ma potrebbe non esserlo la soluzione adottata per i paramenti e per le finiture. Alcune soluzioni saranno quindi molto attendibili e altre meno. Ad ogni proposta di ricostruzione sarebbe perciò necessario affiancare un grafico che misura l'attendibilità percentuale di una ricostruzione. Questo renderebbe onesta la rappresentazione, aiuterebbe ad allontanare gli equivoci e soprattutto permetterebbe agli altri studiosi di affinare la ricerca su quegli elementi ancora poco chiari.

### 3. APPROCCI METODOLOGICI APPLICATI A UN CASO DI STUDIO

Abbiamo appena detto che i diversi metodi che permettono di pervenire ad una ipotesi ricostruttiva dipendono principalmente dalla quantità e qualità dei dati disponibili. Si potrebbe perciò tentare una definizione delle principali categorie di intervento partendo da quella più semplice: l'anastilosi



digitale (TOMASELLO 2002). In base alle raccomandazioni dettate dalla carta di Venezia del 1964 (art. 15), nel restauro «è da escludersi a priori qualsiasi lavoro di ricostruzione, mentre è da considerarsi accettabile solo l'anastilosi, cioè la ricomposizione di parti esistenti ma smembrate. Gli elementi di integrazione dovranno sempre essere riconoscibili, e limitati a quel minimo che sarà necessario a garantire la conservazione del monumento e ristabilire la continuità delle sue forme».

La discussione sul tema della ricostruzione è stata affrontata anche in altri ambiti, perché è stata spesso considerata un vero e proprio tabù se associata alla conservazione del patrimonio fisico. In tempi recenti, le Linee Guida Operative della Convenzione del Patrimonio Mondiale affermano che la ricostruzione sarebbe giustificabile solo in “circostanze eccezionali” (ICOMOS 2019). Il dibattito sulla ricostruzione, se riferito al patrimonio fisico, si è generalmente svolto all'interno del concetto di autenticità. Tradizionalmente, l'attenzione dell'ICOMOS è posta quindi sugli aspetti materiali, mentre altri aspetti, per esempio le rappresentazioni virtuali di una ricostruzione, possono essere presi in considerazione in rapporto allo loro attendibilità.

In analogia con la definizione usata nell'ambito del restauro, l'anastilosi (BRANDI 1963, 38-39) digitale consiste nel ricomporre le parti di un monumento servendosi di un software in cui gli elementi rilevati, preferibilmente in 3D, devono essere riposizionati nella loro originaria collocazione. L'anastilosi digitale permette di assemblare gli elementi costitutivi di un contesto archeologico e pone le basi per ogni riflessione successiva sull'interpretazione degli elementi mancanti, costituendo pertanto il momento iniziale di ogni ricostruzione. Proseguendo nella nostra riflessione, la prima conseguente operazione ricostruttiva, successiva all'anastilosi digitale, consiste nell'integrare le parti mancanti.

Ancora una volta, in analogia con il restauro, l'integrazione è quel processo assimilabile al risarcimento della lacuna, che permette di ricollegare due elementi distanti tra loro attraverso una “interpolazione”. Per fare un esempio, si potrebbe far rientrare in questa categoria la ricostruzione di una colonna della quale si conservano la base, una parte del fusto e il capitello. Poiché l'*entasis* della colonna, se presente, suggerisce anche la sua altezza, che è inoltre spesso rapportata a proporzioni canoniche o a colonne conservate per intero, l'integrazione di una parte costituisce un'operazione lecita e abbastanza attendibile. Lo stesso esempio si potrebbe estendere alla trabeazione che, a meno di parti decorative singolari, come le metope di un tempio greco, è generalmente sviluppata in modo lineare, quindi facilmente reintegrabile.

Nel caso-studio riferito al sito di Monte Sannace, qui riportato a titolo di esempio (CIANCIO 1989, 2017; CIANCIO, PALMENTOLA 2019), questi due momenti iniziali del processo ricostruttivo si ritrovano nella ricostruzione



Fig. 2 – Parco archeologico di Monte Sannace, ubicazione dei templi nell'area dell'acropoli.

del tetto dei templi presenti nell'acropoli<sup>2</sup>. L'abitato antico sorse a circa 5 km a NE da Gioia del Colle, al centro delle Murge orientali, su un altipiano terrazzato, posto a 382 m sul livello del mare. Nell'area dell'acropoli, un complesso emerso nel 1979 è costituito da due grandi edifici di culto affiancati ed aperti, uno sul lato lungo settentrionale, l'altro su quello breve orientale (Fig. 2). Il primo dei due edifici era dotato di una ricca decorazione architettonica, realizzata in argilla e dipinta a vivaci colori. Nell'angolo N del tetto una Nike fungeva probabilmente da acroterio, rappresentata nella sua forma più conosciuta nell'atto di spiccare il volo. Dell'altro edificio, dotato di due colonne lignee centrali che sorreggono il tetto, resta solo un'antefissa a testa di Gorgone vivacemente decorata.

Le antefisse e i resti delle terrecotte architettoniche (Fig. 3a) costituiscono il punto di partenza per la ricostruzione del tetto peuceta, del quale sono visibili e conservati fino all'altezza di circa 50 cm i muri perimetrali. La prima operazione ricostruttiva è consistita nel restauro digitale dei colori originari

<sup>2</sup> Le ricostruzioni virtuali qui presentate sono a cura del Polo Museale della Puglia - Parco Archeologico di Monte Sannace, technology consultant: Francesco Gabellone.



Fig. 3 – a) elementi fittili da Monte Sannace (Museo Archeologico Nazionale di Gioia del Colle); b) antefisse ricostruite sulla base del restauro virtuale.

dell'antefissa e delle terrecotte (Fig. 3b). Il confronto tra la dimensione di coppi e tegole provenienti dallo stesso sito, in particolare nell'area dell'acropoli, con le dimensioni dell'antefissa ha permesso di stabilire il passo orizzontale delle stesse, cioè la distanza tra una antefissa e l'altra. Dal punto di vista metodologico, possiamo fin qui evidenziare un approccio ricostruttivo per





Fig. 4 – Rappresentazione in sezione del Tempio di Apollo a Siracusa. La ricostruzione permette di cogliere gli aspetti costruttivi in maniera diretta e sintetica.

integrazione attraverso le regole del restauro digitale; i colori sono campionati dai residui originali e ottimizzati su software di editing bitmap per eliminare dominanti di colore e patine.

Il risarcimento avviene per clonazione del colore originario, eventualmente ripetuto sugli elementi per i quali si sia riconosciuta una ripetizione seriale. La soluzione complessiva del tetto fa poi riferimento ad un secondo approccio, che cerca di desumere le lacune informative attingendo da confronti

stilistici-compositivi coevi. Questo terzo criterio può essere definito analogico, cioè basato sull'analogia, perché cerca dei riscontri per affinità tra gli elementi attestati e documentati, proponendo un apparato coerente, sul piano del linguaggio architettonico e stilistico, con l'oggetto studiato. Le debolezze di questo approccio comportano inevitabili semplificazioni, che si scontrerebbero con il puro metodo filologico e con l'assoluto rigore.

L'adozione di questo criterio, però, va incontro ad un'altra esigenza, molto sentita e utile, che riporta la ricostruzione su un piano puramente didattico, valido ai fini di una lettura semantica dell'apparato decorativo. I confronti stilistici ben documentati, usati in questo caso per risolvere un problema ricostruttivo, costituiscono un modo efficace per trasmettere informazioni su elementi architettonici che rimarcano la loro funzione peculiare ed il loro rapporto con l'organismo architettonico nel suo insieme. Lo studente o il non specialista possono comprendere come gli elementi costitutivi di un edificio siano da intendere come parti funzionali che dialogano tra di loro e trovano nella rappresentazione virtuale un'efficace modalità di rappresentazione. Il valore didattico della rappresentazione virtuale, come immagine fissa o modello 3D esplorabile, è fortemente comprensibile negli spaccati architettonici o nelle modalità di fruizione interattiva dei diversi elementi della costruzione (Fig. 4).

Il senso della ricostruzione è, in questo caso, quello associato al processo di comunicazione con cui si vogliono evidenziare e raccontare i caratteri morfologici e i rapporti sintattici tra gli elementi costitutivi, in un sistema di relazioni tra le parti che risulti riferibile a prototipi o archetipi conosciuti e documentati. In sostanza, il fine ultimo è quello di completare le macro lacune riferendosi a soluzioni canoniche, possibili, attestate in altri contesti ma non documentate nel caso specifico. In questo caso il livello di attendibilità scende sicuramente, ma rimane nell'alveo delle ipotesi possibili. Pur non considerando eventuali eccezioni, che non possiamo in nessun caso ipotizzare, l'integrazione per analogia completa l'apparato compositivo con quegli elementi architettonici che si riscontrano frequentemente nella tipologia di edificio studiato, nel tentativo di restituirne un'immagine il più possibile completa (Fig. 5a).

Il metodo analogico, nel caso di studio qui illustrato, è stato applicato alla ricostruzione ipotetica delle sfingi acroteriali, delle quali è attestato un frammento di ala. Stessa classificazione è stata assegnata alle protomi leonine e all'acroterio centrale, di cui non sono stati trovati frammenti superstiti a Monte Sannace, ma che si ritrovano nei tetti di altri contesti archeologici coevi e qui riproposti per analogia (Fig. 5b). Un esempio ricostruttivo valido è stato usato per le statue acroteriali del tempio di Athena a Siracusa, sicuramente appartenenti ad un contesto culturale diverso, ma riconducibili alla stessa tipologia di elemento decorativo.



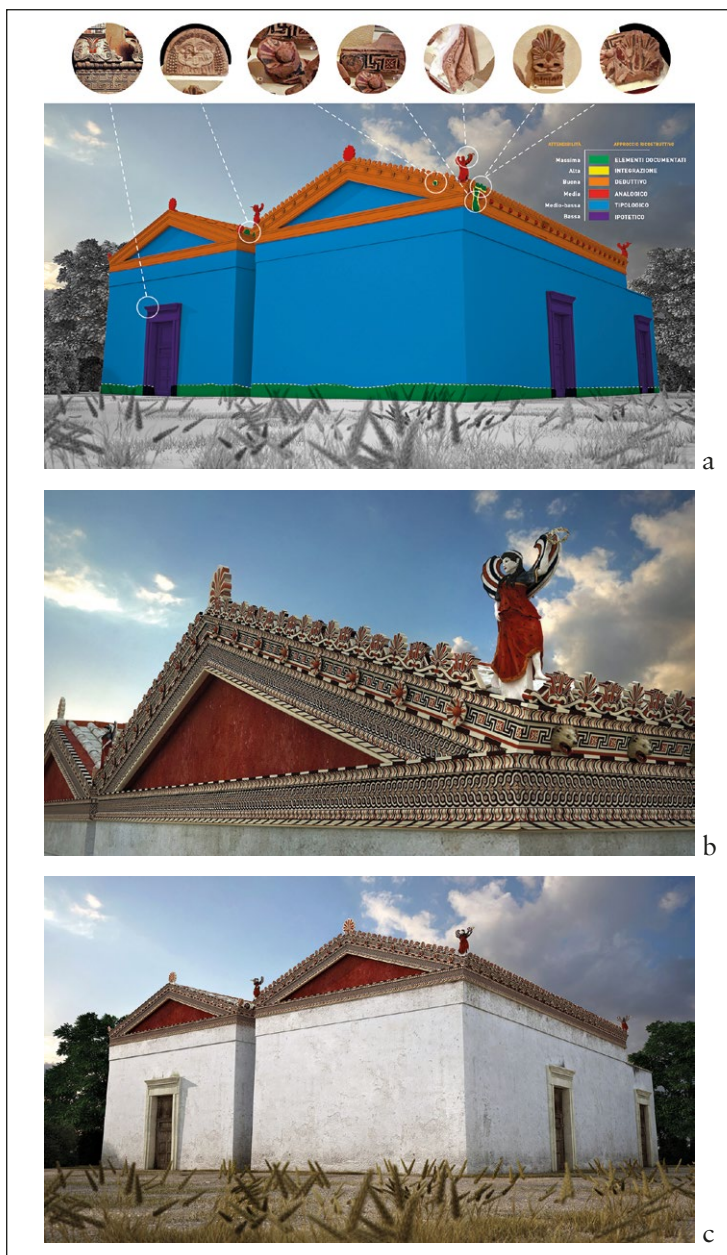


Fig. 5 – a) esempio di classificazione del livello di attendibilità in rapporto ai diversi metodi ricostruttivi; b) ricostruzione delle terrecotte con ricorso al metodo deduttivo; c) ricostruzione completa dei templi di Monte Sannace.

Il ricorso al metodo analogico risulta tra i più usati in archeologia virtuale in ragione della sua alta plausibilità, perché si fonda su una analisi critica e comparativa che è poi alla base del metodo filologico. Accanto a questo metodo possiamo annoverare poi il metodo deduttivo, che trae delle conclusioni in rapporto ai principi costruttivi, ad alcune regole compositive e alle leggi della statica.

Il continuo confronto tra il metodo analogico e quello deduttivo porta ad un rapporto dialettico in cui gli aspetti tecnici vengono soppesati anche in relazione agli aspetti storici, stilistici e formali. Per fare un esempio concreto, sarebbe impensabile coprire una luce di 50 m con una trave singola oppure voltare spazi in cui la spinta non ricada nel terzo medio del piede. Questi riscontri tecnico-costruttivi restringono il raggio d'azione dell'aleatorietà, riportando i ragionamenti su un piano razionale plausibile, puramente tecnico, che impone competenze di livello specialistico, possibilmente multidisciplinare.

Un esempio concreto di applicazione del metodo deduttivo può essere ben esplicitato in relazione a quelle parti che vengono ripetute serialmente. Nelle terrecotte architettoniche, in particolare, il ritrovamento di un frammento di *geison* si può considerare, con buona approssimazione, come elemento ripetibile fino alle estremità angolari del tempio. Per lo stesso motivo, i frammenti di *geison* obliquo e di *anthemia* si possono estendere per ripetizione per tutta la lunghezza della trabeazione (Fig. 5c). Saperi umanistici e saperi tecnico-costruttivi dialogano continuamente in questo processo, che per sua natura si muove nell'alveo del metodo filologico, dove l'insieme delle discipline si propone la conoscenza, la ricostruzione con "documenti alla mano" e la corretta trattazione degli aspetti peculiari di un contesto archeologico o storico.

Il metodo filologico presuppone un complesso di indagini che mirano a riportare un contesto o un oggetto giunto fino a noi in forma non più integra, alla sua forma originaria, liberandolo da errori e rimaneggiamenti, a interpretarlo, a precisarne lo stile, il periodo e l'ambiente culturale, ma con riscontri documentali che ne attestino puntualmente la scientificità dei risultati, l'autenticità e la mancanza di rielaborazioni fantasiose. Il metodo filologico, se usato nei limiti di un approccio rigoroso, garantirebbe la piena attendibilità della ricostruzione ma, come più volte sottolineato, nella realtà questo è difficilmente perseguibile, soprattutto per la frammentarietà o mancata disponibilità dei dati di base. Nella grande maggioranza dei casi ci troveremo invece in possesso di frammenti o informazioni molto limitate che non permettono l'adozione dei criteri appena enunciati; in questo caso l'unica soluzione possibile, oltre alla rinuncia, è ricorrere al cosiddetto approccio tipologico. Tra tutti è questo il criterio che offre minori garanzie di attendibilità, perché è orientato a proporre delle soluzioni che riportano la ricostruzione sui riferimenti generici dei "tipi edilizi", cioè dei complessi architettonici dei quali possiamo ricostruire solo gli elementi costitutivi canonici, le parti nelle quali agganciare un frammento.

Il tipo edilizio, o la tipologia architettonica, è in sostanza uno schema morfologico spesso rappresentato come disegno sintetico, in cui vengono riportate le nomenclature delle parti costituenti l'edificio, lo schema distributivo e altre informazioni utili a comprenderne le peculiarità costruttive e funzionali. Nel ricorrere all'approccio tipologico ci troveremmo per esempio a operare con frammenti da rapportare agli elementi costitutivi di edifici antichi che, in qualche modo, possiamo definire come ricorrenti e ben codificati, documentati in un preciso periodo storico e sedimentati nel linguaggio architettonico come appunto "tipi edilizi". Tra questi potremmo annoverare per esempio il teatro, l'anfiteatro, i complessi termali, le basiliche, le *domus*, i templi, etc., tutti riconducibili a modelli costruttivi ben conosciuti e codificati in un preciso arco cronologico.

In queste tipologie di edifici abbiamo imparato a riconoscere e denominare gli elementi architettonici, abbiamo compreso la loro funzione, la loro genesi, li abbiamo individuati come archetipi. Insomma siamo in grado di distinguerne le parti e quindi ricollocare dei frammenti sulla scorta di queste codificazioni. Pur nelle infinite varianti date dalla specificità del monumento in esame, per ovvie ragioni non ripetibile e unico, è a volte possibile proporre la contestualizzazione di un frammento o di una parte di un tutto riferendoci appunto ad una ricostruzione tipologica, che permette di associare il frammento ad un insieme coerente (il tipo) e ben riconoscibile. Analizzando ancora una volta l'esempio dei templi peuceti di Monte Sannace, riportati in queste pagine, troveremo che la ricostruzione prende in esame quasi tutti i criteri sin qui esposti (Fig. 5a).

L'integrazione di metodi, dal metodo filologico, al metodo analogico ed infine a quello tipologico, fornisce una soluzione che contiene diversi livelli di attendibilità. Questo tipo di analisi costituisce un riferimento chiaro per ogni studio ulteriore sul monumento e chiarisce soprattutto quali siano gli elementi attestati, le parti ricostruite in modo attendibile e quelle semplicemente ipotizzate. È questo un esempio di trasparenza scientifica dei risultati di una ricerca ed uno strumento efficace per evitare che ricostruzioni fantasiose siano diffuse come ricostruzioni filologiche. Si riconosce in questo un'analogia con i metodi del restauro moderno che, come detto in apertura, impongono la trasparenza dei risultati, la distinguibilità degli interventi e la produzione della documentazione a corredo di ogni intervento.

Naturalmente la ricostruzione è un processo che ricade al di fuori delle finalità del restauro, perché come afferma la Carta di Venezia «il restauro deve fermarsi dove comincia l'ipotesi». Potremmo invece affermare che la ricostruzione virtuale inizia dove finisce il restauro e che tutte e due le fasi fanno parte di un unico processo di valorizzazione del bene, con alcune differenze. Il restauro si rivolge esclusivamente alla materia dell'opera d'arte e ha finalità principalmente conservative; la ricostruzione virtuale ha per oggetto la





a



b

Fig. 6 – a) resti visibili della porta a *propugnaculum* a Monte Sannace; b) ricostruzione della porta a *propugnaculum*.

rappresentazione digitale di quell'opera, nelle fasi del suo utilizzo, con finalità di valorizzazione, divulgazione e comunicazione. Molto è dovuto alle tecniche di archeologia virtuale per ciò che concerne la presentazione al pubblico dei risultati di campagne di scavo e per tutte le operazioni di veicolazione della conoscenza e valorizzazione. Le immagini qui riportate mostrano i risultati di studi interdisciplinari, coordinati dal Segretariato Regionale della Puglia,

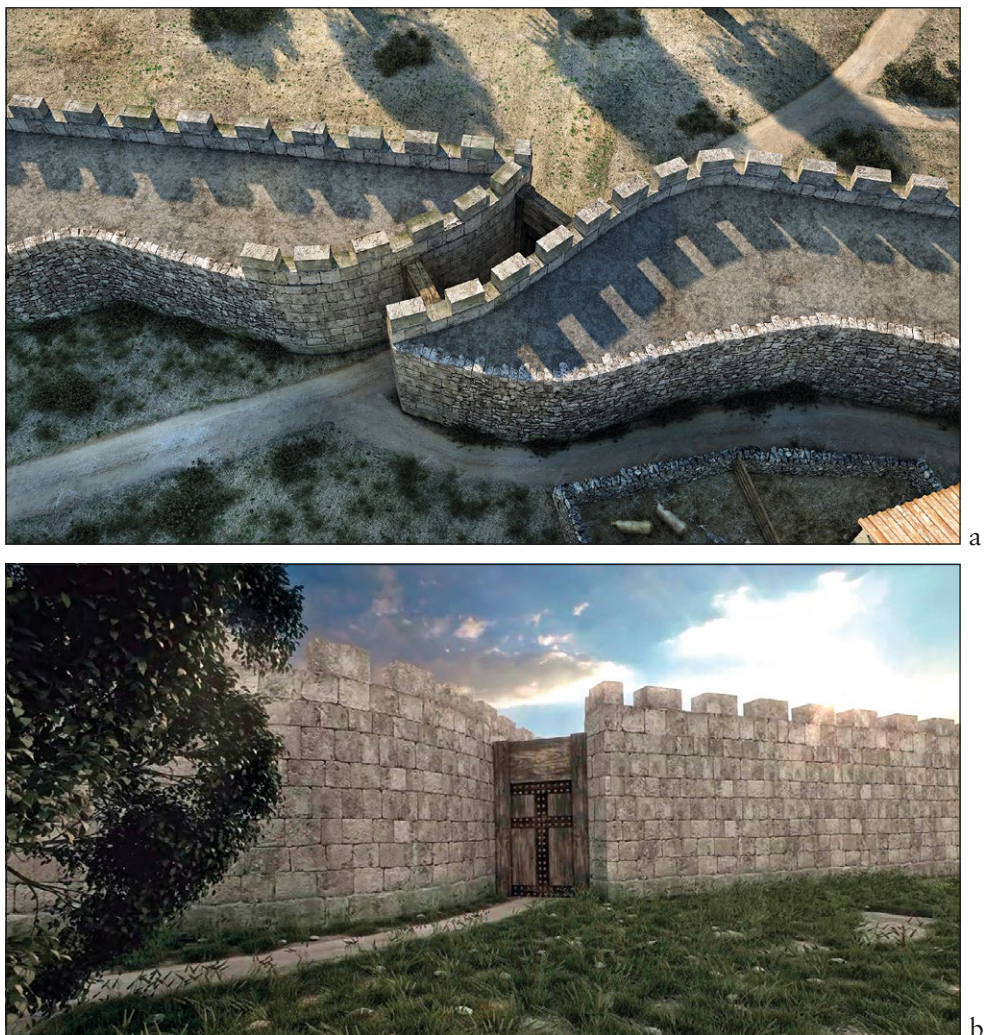


Fig. 7 – a) ricostruzione di un tratto delle mura con le scale di accesso al camminamento; b) la porta a *propugnaculum* dall'interno della città.

MIBACT, Bari (dott.ssa Angela Ciancio e dott. Fabio Galeandro) e dalla Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la città metropolitana di Bari (dott. Luigi La Rocca), finalizzati a promuovere in forma dinamica il patrimonio archeologico di Monte Sannace.

Grazie a questi contributi i visitatori del parco potranno comprendere l'andamento del circuito murario, con una porta del tipo a *propugnaculum*,



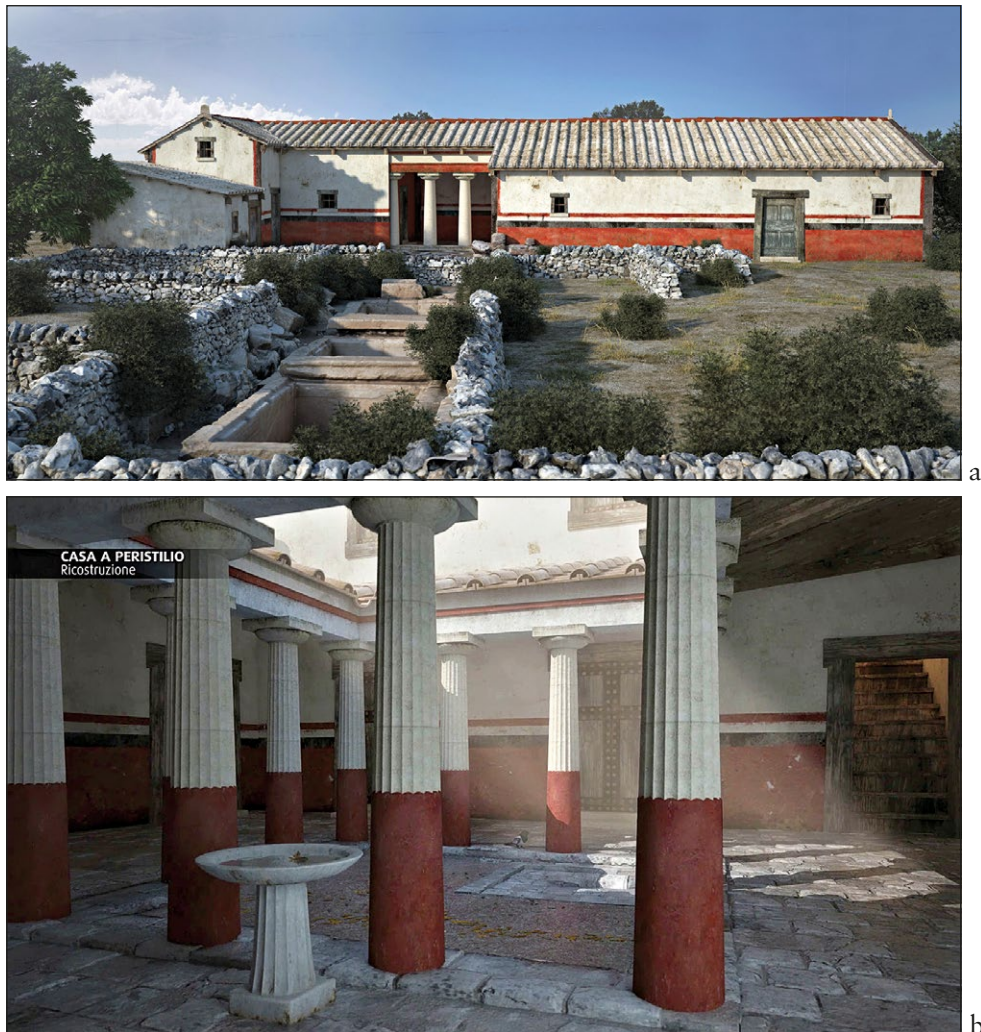


Fig. 8 – a) ricostruzione della Casa Ellenistica, con ricorso al metodo tipologico e analogico; b) ricostruzione della Casa a Peristilio.

obliqua rispetto all'andamento delle mura entro il cui spessore è ricavata, con doppia chiusura e vano intermedio scoperto (Figg. 6-7). Oppure ancora il sistema di scale che permette di raggiungere la sommità del percorso di ronda sulle mura (Fig. 6b). Le due ricostruzioni si potrebbero riferire al metodo deduttivo, poiché i resti visibili permettono di formulare un'ipotesi plausibile, basata sul prolungamento delle rampe esistenti. L'elemento di incertezza è

invece nell'altezza complessiva delle mura, delle quali sono conservati molti filari, ma non fino all'altezza finale.

Un approccio diverso è stato usato nella ricostruzione della Casa Ellenistica e nella Casa a Peristilio (Fig. 8), dove i ritrovamenti permettono solo di ipotizzare forme semplificate (approccio tipologico) con soluzioni ipotetiche basate su colori e repertorio stilistico diffuso in ambiente peuceta e più in generale nella Magna Grecia, a Taranto soprattutto. Nella Casa a Peristilio (Fig. 8b) i resti dell'atrio e di alcuni frammenti di colonna forniscono un indizio per una ricostruzione che tiene conto delle problematiche connesse alla copertura degli spazi e alle particolari condizioni d'illuminazione, con un risultato che restituisce la spazialità dell'insieme e i giochi di luci e ombre. Non si conservano in questi spazi elementi utili per una proposta più completa. Qui l'integrazione dei metodi, dall'approccio deduttivo a quello analogico e tipologico, fornisce solo spunti per una ricostruzione che permette di rievocare la suggestione ipotetica di un ambiente domestico, illuminato dall'alto, ma che conserva tracce interessanti della pavimentazione dell'atrio e della cisterna, posta in posizione decentrata.

Altra informazione interessante, data dall'apporto dell'archeologia ricostruttiva, è fornito dal sistema costruttivo delle case. Anche qui la ricostruzione si fonda sui dati scientifici emersi dallo scavo e dal rilievo, ma si sviluppa in considerazione di una coerenza tecnologico-funzionale rapportata al periodo di costruzione e a regole riferibili al "buon costruire" valide in tutti i tempi e in tutte le parti del mondo. Fondamentale è procedere con elementi certi, attendibili, che a catena producano delle riflessioni conseguenti, in un processo, come detto in precedenza, "logico e analogico". Logico perché è appunto riferito a regole e principi universali del buon costruire, analogico perché procede con il confronto, con l'analogo.

Seguendo questi principi, la ricostruzione del sistema costruttivo delle case di Monte Sannace non differisce affatto da prototipi e soluzioni "tecnologiche" ampiamente documentate sia in Messapia (Salento) che in altre parti del mondo. I resti delle murature suggeriscono l'adozione di un sistema costruttivo in cui uno spiccato in pietrame, inadatto per il suo spessore a proseguire fino all'altezza del tetto, è irrigidito da una sovrastruttura in mattoni crudi, coadiuvati da una struttura lignea. L'uso della terra come materiale da costruzione ha origini remote. Essa è stata ampiamente utilizzata da numerose culture antiche e in zone climatiche molto diverse, a partire dalle civiltà mesopotamiche fino a quelle egiziane. Nel Salento, a Muro Leccese in particolare, furono trovate abitazioni con tracce molto evidenti di mattoni crudi usati per l'elevato (GIARDINO, MEO 2011), collocati su uno spiccato in pietrame posato a secco. In Europa, in Africa e nel Medio Oriente, la tecnologia dell'architettura in terra si è presto diffusa; essa è documentata anche in Asia presso le civiltà dell'Indo e dell'antico impero cinese.



Fig. 9 – Particolare della tecnica costruttiva in mattoni crudi e spiccato in pietra a secco.



Fig. 10 – Ricostruzione ipotetica dell'abitato di Monte Sannace nell'età del Ferro.

Il sistema era molto usato anche nei paesi a clima secco, dove si costruivano con grossi pani o mattoni crudi anche palazzi di notevole mole. Questo sistema, costituito da spiccato in pietra e sovrastruttura in mattoni crudi intelaiati, doveva fungere da struttura portante dell'edificio. Un sistema



costruttivo analogo alle moderne costruzioni in telaio di cemento armato o al *fachwerk*, tipico della Germania settentrionale (Fig. 9).

#### 4. CONCLUSIONI

Pur non garantendo sempre un rigore scientifico assoluto, ma rimanendo in gran parte nell'ambito del metodo analogico-deduttivo, i risultati dello studio ricostruttivo qui esposti permettono ai visitatori del Parco di Monte Sannace di comprendere elementi costruttivi, stilistici e compositivi difficilmente rappresentabili in altra forma (<https://parcomontesannace.it/il-parco>). Anche quando le soluzioni sono puramente ipotetiche (Fig. 10), la presentazione animata conferisce grande dinamismo, proiettando gran parte degli obiettivi di questa ricerca sul piano didattico, comunicativo ed emozionale. La distinzione dei diversi metodi qui esposti permette di rispondere ad un'esigenza molto sentita in questo settore, vale a dire la possibilità di denunciare il livello di attendibilità di una ricostruzione in rapporto a fattori qualitativi non sempre facili da soppesare, ma importanti ai fini del rispetto del Principio n. 7 della carta di Siviglia: la trasparenza delle informazioni e del metodo usato nella ricostruzione.

#### *Ringraziamenti*

La ricostruzione del sito di Monte Sannace si inserisce tra le attività previste nei lavori di recupero e valorizzazione del Parco Archeologico di Monte Sannace, Segretariato Regionale della Puglia, MIBACT, Bari. Responsabili scientifici: dott.ssa Angela Ciancio e dott. Fabio Galeandro. Un sentito ringraziamento al dott. Luigi La Rocca, Soprintendente Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la città metropolitana di Bari per il continuo supporto nelle fasi ricostruttive.

FRANCESCO GABELLONE  
Istituto di Nanotecnologia (NANOTEC)  
CNR - Lecce  
[francesco.gabellone@cnr.it](mailto:francesco.gabellone@cnr.it)

#### BIBLIOGRAFIA

- BRANDI C. 1963, *Teoria del restauro*, Roma, Edizioni di Storia e Letteratura.  
CARBONARA G. 1997, *Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti*, Napoli, Liguori Editore.  
CASIELLO S. 2005, *La cultura del restauro. Teorie e fondatori*, Venezia, Marsilio.  
CIANCIO A. 1989, *Monte Sannace: gli scavi dell'acropoli (1978-1983)*, Galatina (LE), Congedo Editore.  
CIANCIO A. 2017, *Monte Sannace. Parco archeologico*, Bari, Quorum Edizioni.  
CIANCIO A., PALMENTOLA P. 2019, *Monte Sannace. Thuriae. Nuove ricerche e studi*, con CD-ROM, Bari, Edipuglia.  
ERDEM C. 1977, *The Venice Charter under Review*, Ankara (<http://www.international.icomos.org>).

- GABELLONE F. 2019, *Archeologia Virtuale. Teoria, tecniche e casi di studio*, Lecce, Edizioni Gri.
- GABELLONE F., FERRARI I., GIURI F., LIMONCELLI M. 2011, *Virtual Hierapolis: tra tecnicismo e realismo*, «Virtual Archaeology Review», 2, 3, 131-136 (<https://doi.org/10.4995/var.2011.4646>).
- FORTE M. (ed.) 2008, *La villa di Livia: un percorso di ricerca di archeologia virtuale*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- GIARDINO L., MEO F. 2011, *Prima di Muro, dal villaggio iapigio alla città messapica*, Lecce, Edizioni Grifo.
- GOWNDER J.P., VOCE C., MAI M., LYNCH D. 2016, *Breakout Vendors: Virtual and Augmented, Report Reality* (<https://www.forrester.com/report/Breakout+Vendors+Virtual+And+Augmented+Reality/-/E-RES134187>).
- ICOMOS 2019, *Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention* ([https://5129c385-3847-464f-90f1-46e3571d8ee3.filesusr.com/ugd/57365b\\_8afd1ec7d6e245ca86d35fe483bf0c8a.pdf](https://5129c385-3847-464f-90f1-46e3571d8ee3.filesusr.com/ugd/57365b_8afd1ec7d6e245ca86d35fe483bf0c8a.pdf)).
- PUCHE J. 2015, *Al di là della morte del disegno archeologico. I Massive Data Acquisition Systems (MDAS) in archeologia*, «Archeologia e Calcolatori», 16, 189-208 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF26/25\\_Puche.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF26/25_Puche.pdf)).
- SERAFINI L. 2018, *Il restauro filologico alla prova della ricostruzione postbellica. Il caso abruzzese*, Roma, Gangemi Editore.
- TOMASELLO F. 2002, *Restauro e conservazione. L'anastilosi*, in *Il Mondo dell'Archeologia*, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, Roma ([https://www.treccani.it/enciclopedia/restauro-e-conservazione-il-sito-archeologico\\_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/restauro-e-conservazione-il-sito-archeologico_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/)).

## ABSTRACT

In a virtual archaeology project, a full transparency in methods, techniques and documentation is necessary in order to define quality standards that are crucial for a discipline that promises to inform, amaze and fascinate with increasing effectiveness and accuracy. However, documentation is often insufficient to guarantee a level of reliability. Comparisons, deductions and methods that allow experts to retrace the reconstructive process in all its parts are always needed. Based on the results of a case study carried out on the Monte Sannace site, several methods are described in order to evaluate the level of reliability of the 3D reconstruction. This process is related to qualitative factors not always easy to weigh up, but highly important in compliance with Principle no. 7 of the Seville Charter: transparency of information and specification of the methods applied. From a theoretical point of view, analogies and differences in modern restoration methods are analysed, and the results are described in relation to the communicative and emotional objectives of the project. The reconstruction of the Monte Sannace site represents a significant step towards the full appreciation of a little-known area with important archaeological and naturalistic features.



## LA STATUA RITROVATA. IDENTIFICAZIONE, ANALISI E PROPOSTA DI RICOSTRUZIONE VIRTUALE DI UNA SCULTURA CONSERVATA PRESSO IL MUSEO EGIZIO DI TORINO

Il presente contributo intende rendere noti alcuni risultati preliminari di un progetto di ricerca incentrato sulla disamina dettagliata ed esaustiva delle statue e dei frammenti scultorei portati alla luce a Tebtynis negli anni Trenta del secolo scorso dall'archeologo Carlo Anti (Villafranca di Verona, 1889 - Padova, 1961) e oggi conservati prevalentemente presso il Museo Egizio di Torino. L'indagine, frutto della collaborazione tra l'Università degli Studi di Padova, la Scuola Normale Superiore di Pisa e il Museo Egizio, è condotta attraverso un approccio multidisciplinare che combina lo studio dei documenti d'archivio con l'analisi stilistica delle sculture e la ricostruzione virtuale degli oggetti. Tale metodologia composita permette infatti di ricostruire la "biografia" delle statue stesse, dal rinvenimento all'arrivo a Torino, di restituire l'aspetto che queste dovevano avere al momento della scoperta e di condurre un'analisi stilistica e archeologica puntuale dei reperti.

In questa sede verrà presentato un caso di studio del progetto e nello specifico il lavoro effettuato su una statua non regale rinvenuta a Tebtynis durante la campagna di scavo del 1931 e recentemente identificata con i frammenti Torino, Museo Egizio S. 19400+Torino, Museo Egizio S. 19400/01. Si ringraziano tutti gli enti coinvolti nella ricerca.

### 1. IL CONTESTO DI PROVENIENZA E L'ANALISI DEI DOCUMENTI D'ARCHIVIO

La scultura (Fig. 1a) fu rintracciata da Carlo Anti durante gli scavi al sito archeologico di Tebtynis, l'odierna Umm el-Breighât, in Egitto. Tebtynis, villaggio collocato ai margini meridionali dell'oasi del Fayum, fu edificato probabilmente a partire dal Medio Regno (1800 a.C. circa), epoca a cui si ascrivono le più antiche testimonianze, provenienti per lo più dalle necropoli collocate ad O e a S dell'area abitata (GRENFELL, HUNT 1902, 1903, 1933). Il sito fiorì durante l'epoca tolemaica e romana, momenti nei quali fu edificato un grande santuario dedicato al dio Soknebtynis e vennero realizzati ampi quartieri residenziali che ruotavano attorno al lungo *dromos*, che dall'oasi portava al tempio. La vita nella cittadina continuò nei periodi bizantino e arabo, fino all'XI secolo d.C., quando, a seguito dell'avanzare del deserto, l'abitato venne via via abbandonato (GALLAZZI 2000).

Anti condusse scavi a Tebtynis dal 1930 in qualità di direttore della Missione Archeologica Italiana in Egitto (M.A.I.), ruolo che aveva ereditato da Ernesto Schiaparelli nel 1928 e che gli era stato conferito dal Ministero



Fig. 1 – a) Torino, Museo Egizio S. 19400+S. 19400/01-Fondo Anti, No. 184. Photo n. 10; b) le due sculture regali e la statua non regale nel vestibolo del tempio. MSA-Fondo Anti, Box1Sparsa126, No. 184. Photo n. 14 (MSA).

per gli Affari Esteri e dal Comitato per le Missioni Archeologiche all'Estero (ZANOVELLO, DEOTTO 2013). I fondi a disposizione della missione, forniti dal Ministero e dal Comitato appena ricordato e legati a una collaborazione con l'Istituto Papirologico Fiorentino, erano stati da lui impiegati nel corso delle diverse campagne per comperare materiale utile alla documentazione dello scavo archeologico, per pagare i tecnici italiani che lo accompagnavano, archeologi, fotografi e architetti da lui personalmente scelti. I fondi furono impiegati anche per retribuire gli operai egiziani che lavoravano sul campo e per svolgere viaggi e missioni sul territorio, così da inquadrare il sito che stava indagando in un'area più vasta e nel quadro delle missioni internazionali che stavano operando nel Fayum e in Egitto (DEOTTO, BEGG, TONINELLO 2017, 49-56).

I tecnici, in particolare, furono importanti per la realizzazione della dettagliata documentazione che è conservata in un archivio, voluto da Anti stesso, oggi diviso tra le tre sedi della Biblioteca Civica (ZAMPIERI 2009, 2011), dell'Università di Padova (presso il Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università, da qui in poi MSA, sono conservati molti dei documenti relativi a Tebtynis, cfr. GALLAZZI 1989, 179-191; RONDOT 2004; ZANOVELLO, MENEGAZZI 2014 e bibl. ivi contenuta) e dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti (da qui in poi IVSLA), il cui fondo è stato solo recentemente riscoperto e indagato da chi scrive nell'ambito del suo progetto di dottorato (DEOTTO 2015). Grazie alla presenza di diverse professionalità e competenze, si realizzarono piante, fotografie d'insieme e di dettaglio delle strutture rinvenute e

filmati; si redassero diari e appunti di scavo, si realizzò una documentazione che ancora oggi a distanza di tempo permette di ricostruire puntualmente lo svolgersi delle indagini e la scoperta di strutture e reperti.

La prima fase di questa indagine è stata incentrata sull'analisi della documentazione di scavo, che ha permesso di identificare la scultura oggetto del presente studio, tra le altre portate alla luce, di individuarne le località di rinvenimento sul campo, di analizzarne lo stato di conservazione iniziale grazie all'analisi dei documenti d'archivio e delle fotografie rintracciate. Le testimonianze relative alla scultura qui presentata sono costituite da:

– Alcuni scritti, conservati tra l'IVSLA e il MSA, comprensivi di diari di scavo relativi alla campagna del 1931, appunti, elenchi di materiali per la richiesta al Service des Antiquités egiziano in duplice copia, corrispondenza in cui la scultura è menzionata e annotazioni relative a una mostra effettuata a Roma.

– Cinque fotografie conservate prevalentemente al MSA, in più copie anche successive all'epoca di formazione dell'archivio e della documentazione. Esse raffigurano in un primo caso l'opera frontalmente nel suo insieme (MSA, fondo Anti, Egitto, n. 260 foto 018), due sono relative ai profili destro complessivo (MSA, fondo Anti, Egitto, n. 186 foto 013, n. 260 foto 012) e sinistro di dettaglio (il volto - MSA, fondo Anti, Egitto, n. 186 foto 009, n. 260 foto 011), una è frontale di dettaglio del volto (MSA, fondo Anti, Egitto, n. 186 foto 008, n. 260 foto 012) e una d'insieme con altre due sculture portate alla luce nell'area del vestibolo, presente in più copie al MSA (Fig. 1b, fondo Anti, Egitto, n. 186 foto 012, Box1Sparsa foto 126) e IVSLA (fondo Anti, Egitto, busta 8, fascicolo 2, n. 4).

– Un filmato, realizzato nel 1931 dall'Istituto Luce, in cui le tre sculture sono presenti insieme nell'area del vestibolo, conservato in varie copie, di cui una è depositata presso il MSA.

L'analisi della documentazione e delle carte redatte *in situ* si è rivelata fondamentale perché ha permesso di rintracciare informazioni sull'originale provenienza dei singoli frammenti, visibili nelle fotografie d'epoca già ricomposti. Dall'analisi dei documenti si evince che la statua fu rintracciata in tre frammenti e che essi erano tutti provenienti dall'interno del vestibolo di accesso al santuario di Soknebtynis (CAFICI, DEOTTO 2017, 6, 16, 22, nn. 34-35).

Le prime riprese alla scultura sono invece relative alla documentazione immediatamente successiva allo scavo: l'opera fu isolata dalle altre rintracciate, restaurata e fotografata nell'insieme e nei suoi dettagli, impiegando un telo nero per porre in risalto la qualità del calcare e i dettagli relativi alla sua lavorazione. Le immagini sembrano essere state pensate per mostrare fronte e profili destro e sinistro dell'opera, dandone una visione quanto più possibile frontale, di modo da evitare le distorsioni dovute a una documentazione laterale o diagonale dell'oggetto. L'analisi delle immagini permette di

ricontrare come la luce impiegata fosse naturale, avendo scelto il momento della giornata in cui realizzare le riprese così da evidenziare e accentuare i dettagli stilistici dell'opera (DEOTTO 2015).

Per il 1931, anno della scoperta della statua, la strumentazione scelta da Anti per la documentazione sul campo era costituita da tre macchine fotografiche, munite di treppiede relativo, due Benzin, acquistate negli anni precedenti, e una Etui. In particolare proprio per quell'anno era stata comperata la Etui, con sei telai doppi, un telaio film peck e un treppiede per il sostegno (a questa fanno riferimento i documenti conservati nell'archivio IVSLA, fondo Anti, Egitto, busta 6, fascicolo IX, nn. 80-89), che doveva garantire la stabilità all'operatore mentre si dedicava alla ripresa della statua. I negativi, su lastra, furono conservati in archivio e il loro sviluppo avvenne in due momenti, in Egitto e in Italia, come dimostrano le buste delle stampe ancora conservate in archivio (DEOTTO 2015). Sullo scavo fu presente anche l'équipe dell'Istituto Luce che realizzò il filmato citato in cui le sculture venivano rapidamente mostrate tutte e tre nel vestibolo, come compaiono anche nella foto d'insieme in archivio (Fig. 1b). Sono questi forse gli ultimi momenti in cui l'opera si vide nel suo sito di origine, perché poi insieme a una delle due statue regali fu inviata in Italia, come si evince da un elenco che servì per richiedere il *partage* al Service des Antiquités egiziano (CAFICI, DEOTTO 2017, 6).

G.D.

## 2. "BIOGRAFIA" DELLA SCULTURA DOPO IL RINVENIMENTO

La disamina dei documenti conservati presso l'archivio Anti ha permesso di ricostruire gli avvenimenti che coinvolgono la scultura dopo il suo arrivo in Italia. Dalla corrispondenza intrattenuta da Anti con i suoi collaboratori apprendiamo che la statua viene esposta a Roma in occasione della *Mostra d'arte antica* tenutasi alla Galleria Nazionale di Valle Giulia nell'aprile-giugno 1932 (CAFICI, DEOTTO 2017, 7-8).

Nei decenni che seguono la mostra romana la scultura sembra essere dimenticata: essa non viene infatti menzionata in documenti o pubblicazioni e non risulta essere più esposta. Indagini più ampie sulla storia dei reperti provenienti da Tebtynis e inviati da Anti in Italia secondo le regole allora vigenti del *partage* permettono di ipotizzare un trasferimento della statua da Roma a Torino nel 1972 (VALTZ 1992, 626). Tale congettura, seppur plausibile, rimane tuttavia ipotetica e nel 2004, anno della pubblicazione del volume *Tebtynis II: le Temple de Soknebtynis et son dromos* di V. Rondot, la collocazione della statua risulta essere ignota (RONDOT 2004, 139), sebbene lo studioso francese dichiarò di aver visto nei magazzini del Museo Egizio di Torino una testa priva di numero di inventario che potrebbe coincidere proprio con la testa di questa statua (RONDOT 2004, 139 n. 112).



Fig. 2 – a) Torino, Museo Egizio S. 19400. MSA-Fondo Anti No. 184. Photo n. 08 (MSA); b) Torino, Museo Egizio S. 19400 (foto N. Dell’Aquila/Museo Egizio).

Sulla base di tale indizio prende avvio, nel febbraio 2016, la ricerca della scultura tra i reperti di Tebtynis conservati presso il Museo Egizio di Torino. L’indagine comincia attraverso la consultazione del database interno del Museo. Ricerche incrociate avallate dal materiale fotografico disponibile permettono a chi scrive di individuare nel reperto Torino, Museo Egizio S. 19400, portato alla luce durante le campagne di scavo di Anti a Tebtynis e trasferito al Museo Egizio di Torino dal Museo Nazionale Romano, la testa della statua non regale scoperta a Tebtynis nel 1931. Il riscontro autoptico conferma ulteriormente tale ipotesi: nonostante il cattivo stato di conservazione, infatti, alcuni elementi peculiari della scultura sono ancora chiaramente visibili, quali la corona di foglie tripartite ogivali, la capigliatura disposta ordinatamente sulla fronte, la forma degli occhi, delle narici e delle labbra (Fig. 2).

Le ricerche all’interno del database rivelano inoltre la presenza, con il medesimo numero di inventario integrato da /01, di un secondo frammento anch’esso portato alla luce da Anti a Tebtynis e trasportato dal Museo Nazionale Romano al Museo Egizio di Torino. Il precario stato di conservazione del reperto impedisce purtroppo in un primo momento il riscontro autoptico dell’oggetto ma la documentazione disponibile relativa al frammento permette già in questa prima fase di avvalorare l’ipotesi di una sua identificazione con il corpo della statua qui esaminata. Le foto allegate al rapporto di restauro di Torino, Museo Egizio S. 19400/01 redatto nel 2009 da Nicola Restauri (CAFICI, DEOTTO 2017, 9, fig. 13) mostrano il reperto, interamente avvolto in bende protettive ad eccezione dei piedi, all’interno di una cassa di legno





Fig. 3 – Torino, Museo Egizio S. 19400/01 (foto N. Dell’Aquila, F. Taverni/Museo Egizio).

al cui esterno, sul lato destro, è affissa una riproduzione della foto d’archivio che ritrae il volto della scultura non regale portata alla luce da Anti nel 1931 (Fig. 2a). La presenza di tale dettaglio permette pertanto di apprendere che al momento dell’arrivo a Torino da Roma i due frammenti sono riconosciuti come afferenti alla stessa scultura e che questa viene ancora identificata con la statua qui esaminata.

L’ipotesi di identificazione del frammento Torino, Museo Egizio S. 19400/01 con il corpo della statua non regale di Tebtynis, viene comprovata scientificamente il 23 marzo 2017 attraverso l’apertura della cassa. Essa contiene una statua acefala completamente fasciata ad eccezione dei piedi. La riproduzione della fotografia scattata da Anti è collocata sul lato interno destro della cassa.

La rimozione delle garze e il conseguente riscontro autoptico confermano con assoluta certezza l’identificazione del reperto con il corpo della statua in esame. Ancora visibili, nonostante il cattivo stato di conservazione, sono infatti i suoi elementi distintivi quali il bordo superiore, le pieghe e le frange dello scialle, le pieghe e il bordo della gonna e i piedi massicci con dita lunghe e unghie squadrate incise (Fig. 3).

G.C.

### 3. RICOSTRUIRE IL PASSATO: DALLE FOTO AL MODELLO IN TRE DIMENSIONI

Il cattivo stato di conservazione dell'opera e, per contro, l'ottima documentazione fotografica prodotta in scavo hanno indotto l'équipe coinvolta nella riscoperta della statua a proporre una ricostruzione virtuale del reperto danneggiato, al fine di restituire l'immagine della scultura al momento della sua scoperta, attraverso una tecnica presa in prestito dalla computer grafica. Nel caso specifico, la statua presenta numerose lacune e la mancanza fisica di alcune parti del volto: la mesh ottenuta tramite le tecniche di acquisizione con laser scanner o fotogrammetria sarebbe risultata pertanto altrettanto lacunosa e difficilmente utilizzabile come punto di partenza per una ricostruzione virtuale esaustiva (Fig. 2b). Per questo motivo – e grazie allo studio della documentazione riguardante il reperto (cfr. *supra*), che ha evidenziato che le fotografie realizzate da Carlo Anti negli anni '30 sono state ben eseguite e ritraggono l'opera nella sua completezza, sebbene evidenzino lo stato conservativo precario del calcare impiegato per la sua realizzazione – chi scrive ha deciso di sperimentare e applicare una tecnica impiegata soprattutto nel campo cinematografico, del design e del gaming: la realizzazione di un modello 3D avendo come riferimento una o più immagini bidimensionali. Per contro, purtroppo, il filmato dell'Istituto Luce precedentemente menzionato non ha potuto fornire elementi rilevanti al fine della ricostruzione, poiché le statue sono state immortalate da un punto di ripresa distante e sopraelevato.

In una pipeline standard di produzione è prassi usuale imbattersi nella creazione di elementi partoriti dalle menti creative dei “concept artists”, elementi che abitualmente sono rappresentazioni 2D e che poi vengono trasformati in elementi 3D da modellatori e texture artists. Per avere un modello 3D che rispecchi il concept disegnato, il concept artist propone abitualmente varie viste dell'elemento da lui creato (frontale, laterale e posteriore), che vengono poi proiettate su diversi piani nelle tre dimensioni per aiutare gli operatori a ricreare un modello che rispecchi l'idea del progetto grafico originale (3D TOTAL PUBLISHING 2013). Quando il modello è completo dei suoi volumi generali viene rifinito tramite il processo di digital sculpting e texturing: questa fase risulta decisiva per dare l'aspetto e la consistenza del materiale che si vuole riprodurre. La pipeline prosegue poi con la creazione di uno scheletro virtuale che ne permetterà i movimenti e l'animazione, passando poi per il comparto dei visual effects, del lighting e del rendering, fino ad approdare nella fase della post-produzione, dove gli elementi vengono compostati, viene introdotta la motion graphic e viene attuata la color correction per giungere poi all'output finale<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Per un esempio di un workflow di produzione cfr: <http://www.upcomingvfxmovies.com/2014/03/3d-production-pipeline-pixar-vs-dreamworks/>.

Lo stato di conservazione precario della statua ha fornito l'occasione di sperimentare questa pipeline in campo archeologico, soprattutto per quanto concerne la fase di produzione: utilizzando le fotografie di archivio come concept è stato possibile creare un modello 3D fedele al reperto.

Gli studi condotti finora sull'elaborazione grafica di modelli 3D in campo archeologico per la riproposizione di siti e reperti prendono avvio principalmente dalla fotogrammetria (BARREAU *et al.* 2014) e dai rilievi effettuati tramite laser scanner (ANTLEJ *et al.* 2011), che in alcuni casi vengono ottimizzati per la stampa 3D dell'oggetto (URCIA, VAZZANA 2018). In campo egittologico, l'équipe dell'Epigraphic Survey, Oriental Institute, University of Chicago ha utilizzato le immagini di archivio dell'egittologo francese Alexandre Moret per la ricostruzione del muro orientale della Sala delle Offerte del Tempio di Luxor. Le immagini storiche non permettevano però la realizzazione di un fotomosaico esaustivo e pertanto sono state integrate con le produzioni fotografiche moderne adeguatamente trattate in un programma di fotoritocco per omogeneizzare il prodotto finale (MURRAY 2020).

L'elaborato ricostruttivo proposto, invece, si è potuto realizzare grazie alla combinazione dello studio archeologico dei materiali e della modellazione 3D, prendendo ispirazione dalle procedure applicate dalle maggiori case cinematografiche (vedasi i diversi "The Art Of": FALCONER, WETA DIGITAL 2012; JULIUS, HALL, WILLIAMS 2014; LUCASFILM DISNEY PIXAR 2020 LTD 2015) che hanno utilizzato metodologie innovative di digital sculpting per la ricostruzione grafica di personaggi reali o immaginari a partire da disegni, fotografie, filmati, in maniera analoga a quanto qui realizzato.

L'abituale workflow di produzione è stato scientificamente testato con l'obiettivo di verificare se questo tipo di approccio avrebbe potuto trasformare e arricchire il settore del restauro, della valorizzazione e della divulgazione di opere e reperti ora scomparsi e dei quali esiste solo una documentazione fotografica. I limiti di questa metodologia risiedono anzitutto nella qualità della fotografia usata come concept: peggiore è la definizione dell'immagine e maggiore sarà il margine d'errore nei particolari. Il modello 3D creato, inoltre, non può avere valore scientifico sotto l'aspetto delle misure e dello spessore degli elementi, in quanto sta alla sensibilità di chi lo realizza gestire gli aspetti dimensionali, cercando di avvicinarsi il più possibile alla realtà rappresentata nelle fotografie.

Da un punto di vista tecnico, ci si è affidati a software della suite Autodesk: 3DStudio Max per quanto riguarda la fase di modellazione e Mudbox per la scultura e la pittura digitale, anche se è possibile applicare la stessa metodologia utilizzando software diversi (Autodesk Maya, Blender, Cinema 4D, Modo per la modellazione, e Zbrush per la scultura digitale). La scelta è stata dettata unicamente dalla buona conoscenza pregressa degli strumenti utilizzati. Nella prima fase del lavoro si è verificata l'affidabilità del metodo,



Fig. 4 – Dalla foto d’archivio originale alla manipolazione dell’immagine per la creazione di stencil.

proiettando una foto storica in scala di grigi, debitamente trattata, su una mesh piana all’interno del programma di digital sculpting, in modo tale da conferirle le proprietà dell’immagine impiegata. La foto trattata con il software Photoshop ha consentito di attenuare le imperfezioni sulla superficie del materiale e, in un secondo momento, di evidenziare i dettagli, grazie a strumenti come i pennelli a punta arrotondata e sfumata, con opacità e forza al 30%, che hanno permesso di mantenere integra e leggibile la fotografia originale.

Successivamente, tramite vari strumenti, come diversi tipi di contrasti su tonalità, luminanza, luminosità, è stato possibile ricreare un’immagine utilizzabile al meglio dal programma di scultura digitale e che mantenesse i requisiti originali (Fig. 4). In questa maniera, si è creata un’immagine utilizzabile come uno stencil da Mudbox: il software lavora lasciando in piano ciò che è bianco, mentre va a scolpire ciò che è scuro, lavorando in base alla scala di grigi; in questo senso, le foto storiche sono un’ottima base di partenza.

Il risultato, ancora grezzo, ha visto la proiezione dell’immagine trattata su diversi livelli di suddivisione della mesh: infatti, maggiore è la suddivisione, maggiore sarà il grado di definizione dei particolari. La seconda fase ha visto la pulizia della mesh dagli artefatti che si sono creati, nonostante l’elaborazione dell’immagine di partenza, tramite strumenti come lo smoothing, il flattening e il relaxing, con i quali è stato possibile evidenziare i lineamenti e quei dettagli della capigliatura che prima erano poco visibili (Fig. 5). Successivamente, è stata proiettata la texture del calcare di cui è composto il reperto: in questa maniera si sono conferite alla mesh quelle proprietà come la consistenza, la porosità e la rugosità che in qualche maniera erano andate perse nelle prime



Fig. 5 – Fasi della scultura digitale su una mesh piana: proiezione della foto storica debitamente trattata sui diversi livelli di suddivisione.

fasi di scultura digitale. Per conferire al piano un aspetto realistico, si è passati al digital painting, impiegando sempre una texture dello stesso tipo di materiale e proiettandolo sulla mesh (Fig. 6).

Dato l'esito positivo del metodo, si è passati alla modellazione, intesa nelle tre dimensioni. Le fotografie storiche sono state proiettate su dei piani perpendicolari tra loro in Autodesk 3DStudio Max: così facendo, sono stati creati i punti di riferimento per una modellazione poligonale che rispecchia i volumi originari del reperto (Fig. 7). Con 3DStudio Max si sono modellati i volumi generali del volto, prestando una particolare attenzione alla topologia della mesh creata, in modo da non creare successivamente artefatti nei livelli di suddivisione e di smooth; una volta rifinito il tutto, la mesh è stata importata in Mudbox per poterle conferire i dettagli organici con il metodo



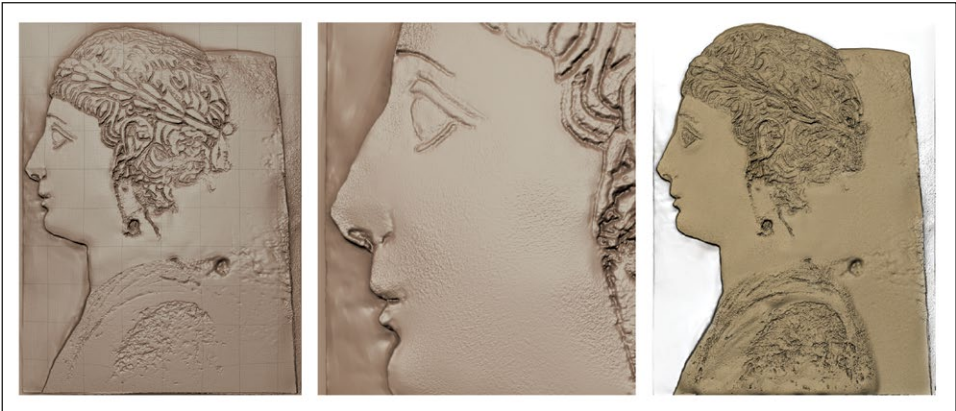


Fig. 6 – Pulizia della mesh degli artefatti provenienti dalla foto, aggiunta del bump del materiale e digital painting.

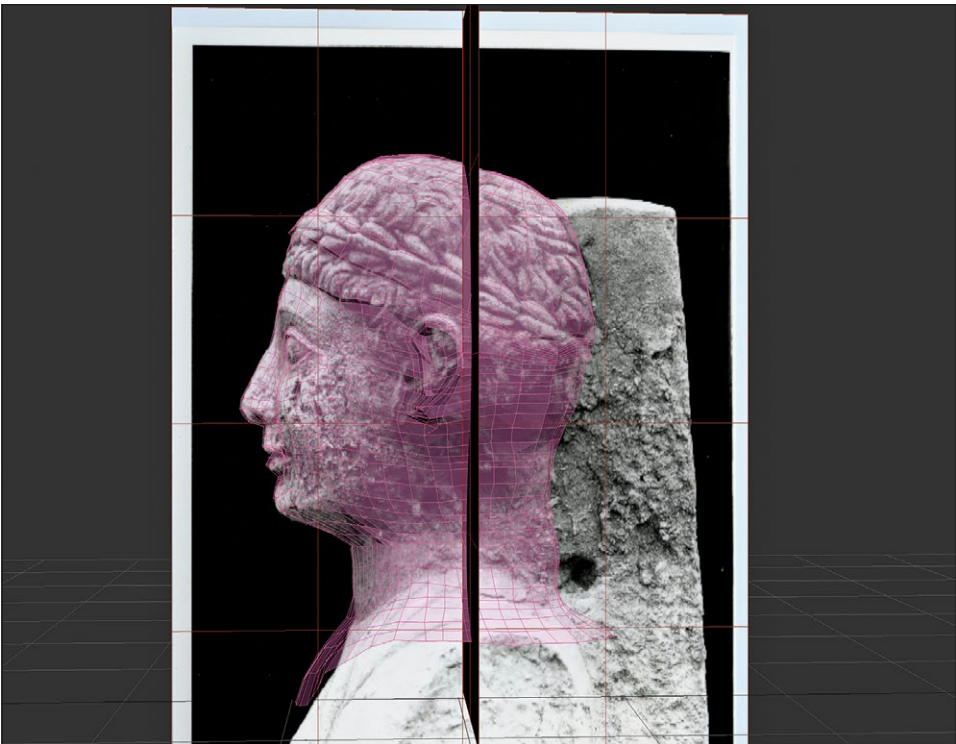


Fig. 7 – Modellazione poligonale per definire i volumi generali della testa partendo dalla foto storica frontale e laterale.

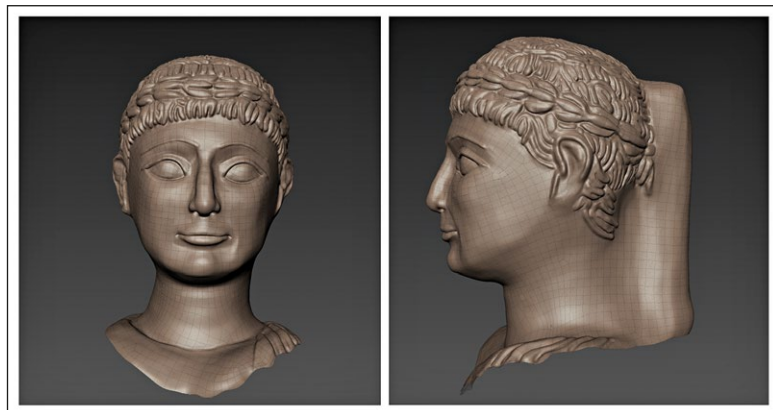


Fig. 8 – Digital sculpting aiutato dagli stencil creati dalle foto storiche.

sopra descritto della proiezione delle foto storiche trattate sulla mesh stessa tramite diversi livelli di suddivisione.

Con il procedere del lavoro, è apparso necessario uno studio approfondito dei diversi elementi stilistici, possibile grazie alla continua collaborazione e al confronto con l'équipe: per conferire alla scultura digitale le stesse forme dell'originale, si sono studiate le tecniche scultoree applicate e si è cercato di riprodurle in digitale (un esempio sono i fori di trapano ai lati della bocca). Problematica è stata la realizzazione del naso: mettendo a confronto la mesh ottenuta grazie alla foto frontale e a quella laterale, infatti, si nota una discrepanza causata dalla mancanza di parte del naso (Fig. 8). Con l'équipe è stata presa la decisione di trovare un compromesso e avvicinarsi maggiormente alla visione laterale che restituisce in modo migliore le linee di forma. Si è proseguito successivamente alla rifinitura delle superfici (si è deciso infatti di lasciare la mesh "pulita" dalle incrostazioni e dal degrado della pietra), prima dell'applicazione del materiale (Fig. 9).

Il modello così creato non vuole sostituirsi al rilievo fatto con laser scanner o fotogrammetria: è da considerarsi come un'opportunità di studio per migliorare la comprensione del reperto e ben si presta ad offrire una percezione visiva di quelle opere che sono andate danneggiate o perse e delle quali esiste solo una documentazione fotografica e d'archivio, integrando una metodologia consolidata nel campo della computer grafica con un approccio di studio scientifico di tipo tradizionale. Le finalità di un modello tridimensionale di questo genere sono molteplici, in quanto esso può aiutare nella disamina stilistica evidenziando tutti quegli aspetti (come ad esempio la capigliatura) che sono di difficile comprensione dalle foto d'epoca e può dare una visione di insieme del reperto ora danneggiato o perduto: è possibile



Fig. 9 – Render finali del modello 3D realizzato.

esportare, infatti, il modello così creato in diversi formati leggibili da numerosi software e applicazioni (anche su smartphone o tablet) che ogni utente può facilmente consultare.

E.B.

#### 4. ANALISI STILISTICA DELLA SCULTURA

Lo stato di conservazione attuale della scultura, lacunoso e frammentario, ne impedisce purtroppo una precisa ed esaustiva analisi stilistica. Tale disamina è stata però possibile grazie alla combinazione dell'analisi autoptica del reperto con lo studio delle fotografie d'archivio – che ritraggono la statua al momento della sua scoperta e in uno stato di conservazione migliore rispetto a quello odierno – e dei dettagli del volto e della capigliatura emersi dalla ricostruzione virtuale.

La statua poggia su una spessa base e raffigura una figura maschile incedente con gamba sinistra avanzata e sostegno dorsale anepigrafe. Il personaggio indossa una corona di foglie e il completo drappeggiato tolemaico. Gli arti superiori sono modellati in posizioni differenti: il braccio destro è adiacente al fianco e la mano corrispondente serrata, il braccio sinistro, invece, è piegato all'altezza del gomito e attraversa l'addome, la mano sinistra afferra l'abito all'altezza dell'ombelico. La testa della scultura è larga e squadrata. La capigliatura è costituita da corte ciocche lavorate plasticamente: nella parte posteriore della testa, esse sono curvate a virgola e disposte in modo non ordinato, quelle che contornano la fronte, invece, sono rettilinee e disposte accuratamente. Sembra, inoltre, possibile riscontrare la presenza di tre ciocche disposte a tenaglia, rispettivamente due sopra il sopracciglio destro e

una sopra il sinistro. Le ciocche sulla fronte sono visivamente separate dalle restanti per mezzo di una corona di foglie ogivali tripartite, chiusa mediante un nodo le cui estremità sono scolpite sul sostegno dorsale.

Il volto è pieno e privo di qualsiasi dettaglio che possa rendere identificabile nella realtà il personaggio raffigurato. La fronte, non troppo alta, non è segnata da alcuna ruga e le sopracciglia sono sottili, arcuate e lavorate plasticamente. Gli occhi, grandi, a mandorla e con angolo esterno prolungato, sono contornati da palpebre superiori ben modellate e palpebre inferiori incavate. Le orecchie sono grandi, sporgenti e rese sommariamente nel dettaglio. Il naso è lungo e stretto e le guance sono tonde e piene. La bocca è grande e caratterizzata da un labbro superiore meno pronunciato rispetto a quello inferiore. Il mento sembra appena indicato e il collo è robusto, ma, apparentemente, non caratterizzato da alcun dettaglio anatomico.

Un completo drappeggiato tolemaico, qui costituito da una tunica, una gonna e uno scialle, riveste il corpo (per una più dettagliata analisi stilistica del corpo cfr. CAFICI, DEOTTO 2017, 16-20). Le caviglie sono larghe e robuste e i grandi piedi sono caratterizzati da dita modellate nelle quali sono ancora visibili i dettagli delle unghie. Il sostegno dorsale, privo di iscrizioni e decorazioni, si sviluppa in corrispondenza di tutta la lunghezza della scultura, dalla sommità del capo ai piedi, e la sua estremità superiore ha forma trapezoidale. La base sulla quale poggia la statua è rettangolare e spessa. La forma smussata del lato anteriore visibile nelle fotografie d'archivio è probabilmente dovuta al cattivo stato di conservazione ed è oggi stata completamente restaurata.

La disamina della scultura che emerge dalla documentazione in nostro possesso permette di constatare che essa condivide alcune caratteristiche stilistiche delle statue regali portate alla luce durante la medesima campagna di scavo (Fig. 1b, Alessandria, Museo Greco-Romano inv. 22979 e Torino, Museo Egizio S. 18176). Le tre statue, tutte in calcare locale, sono, infatti, caratterizzate dalla medesima lavorazione dei polpacci, tozzi e massicci, dei piedi, larghi e pieni, connotati da dita lunghe rese tramite incisione e da unghie squadrate. Alcuni tratti del viso del personaggio raffigurato nella scultura non regale, inoltre, sono strettamente assimilabili a quelli della statua colossale conservata ad Alessandria: entrambe presentano, infatti, pur nella diversa lavorazione stilistica (la statua regale alessandrina sembra infatti ritrarre i tratti individuali del sovrano raffigurato, mentre la scultura non regale non appare caratterizzata da tratti peculiari del viso) il volto pieno e squadrato e analoga lavorazione di sopracciglia, occhi e naso.

Dall'analisi stilistica delle caratteristiche principali delle tre sculture rinvenute da Anti nel 1931 nel tempio del dio Soknebtynis a Tebtynis è quindi possibile sostenere che esse siano state prodotte, con ogni probabilità, durante il medesimo arco cronologico (per approfondimenti cfr. CAFICI, DEOTTO 2017, 10-13). Nessuna delle statue riporta purtroppo alcuna iscrizione e qualsiasi

datazione rimane conseguentemente ipotetica. A fornire qualche appiglio cronologico è, comunque, la statua oggi conservata ad Alessandria. Essa presenta, infatti, peculiari tratti del volto che gli studiosi hanno concordemente identificato, tramite confronti iconografici e numismatici, con quelli di Tolomeo XII (STANWICK 1992, 138-139 e 2002, 123, 203, figs. 157-159; ASHTON 2001, 86-87; CAFICI, DEOTTO 2017, 12) e permette pertanto di attribuire le tre sculture ai decenni finali dell'epoca tolemaica (CAFICI, DEOTTO 2017).

G.C.

## 5. CONCLUSIONI

Il lavoro effettuato sulla statua qui presentata ha permesso di verificare la validità dell'approccio multidisciplinare proposto per la disamina della statuaria portata alla luce da Carlo Anti a Tebtynis. Combinando infatti lo studio dei documenti d'archivio con l'analisi stilistica della statua e la ricostruzione virtuale del suo volto è stato possibile effettuare un'esauritiva disamina del reperto ricostruendone la "biografia", dal rinvenimento all'arrivo a Torino, restituendone l'aspetto al momento della scoperta e conducendo un'analisi stilistica e archeologica puntuale. Il processo che ha portato alla riproduzione tridimensionale del volto della statua ha fatto emergere due aspetti imprescindibili per l'ottenimento di un'accurata ricostruzione virtuale: la buona qualità delle foto storiche di partenza e la necessità di collaborazione tra figure specializzate in diversi campi di competenza.

L'importanza delle foto storiche ben eseguite riveste un ruolo di primo piano per la buona riuscita di una proposta di ricostruzione virtuale: le foto realizzate da Anti qui prese in considerazione sono un buon esempio in quanto riprendono il soggetto, la statua nel nostro caso, sia frontalmente sia lateralmente (aspetto fondamentale per la creazione di un modello 3D che rispecchi i volumi e le proporzioni proprie del soggetto). La tecnica fotografica impiegata, inoltre, sottolinea la meticolosità nella scelta del momento della giornata in cui sono state scattate le foto: la luce risulta essere soffusa e uniforme, senza troppo contrasto nelle ombre, permettendo una lettura accurata e la comprensione di ogni singolo particolare scultoreo. La creazione del modello tridimensionale ha inoltre permesso di individuare alcune caratteristiche tecniche delle foto storiche non immediatamente identificabili: è emerso infatti che le foto frontali e laterali non riprendono il soggetto in modo perfettamente perpendicolare rispetto al mezzo di ripresa. Tale dettaglio comporta una leggera distorsione ottica che ha influito su alcuni aspetti del modello stesso come il naso, le orecchie e l'occhio sinistro che risultano leggermente spostati rispetto alla foto.

Per ovviare a questo errore, si è cercato di dare forma alla statua ruotando leggermente il modello, di modo che le sovrapposizioni con le foto storiche



risultassero coerenti con la modellazione. Il risultato, quindi, deve essere inteso come la riproposizione della statua così come Anti doveva averla vista e non come appare oggi attraverso le foto. La modellazione tridimensionale ha portato alla creazione, inoltre, di una ricostruzione della statua nella sua integrità fisica e di conseguenza priva del degrado del materiale visibile, soprattutto nella zona delle guance, nelle fotografie storiche.

Il continuo confronto con l'équipe di lavoro, reso possibile tramite l'esportazione del modello creato in una piattaforma interattiva comune (Autodesk 360°), ha consentito un'attenta analisi stilistica della statua. La diversa formazione professionale di ogni componente ha permesso, inoltre, di indagare le tecniche impiegate dagli antichi e quelle di documentazione adoperate dall'autore del ritrovamento per poterle replicare nel modello 3D: nel caso della modellazione di statue, o comunque di oggetti non prettamente architettonici, sta alla sensibilità e alla consapevolezza del modellatore riproporre in virtuale quel che è reale. Per far ciò è emersa la necessità di un confronto costante con una figura specializzata in ambito storico-artistico che potesse guidare e verificare la resa effettiva di ogni singolo elemento dell'oggetto riprodotto. L'analisi della scultura post-modellazione è stata a sua volta ulteriormente perfezionata soprattutto nella individuazione e definizione delle diverse ciocche della capigliatura.

Una ricostruzione accurata di un manufatto archeologico appare di conseguenza possibile attraverso l'integrazione di branche tradizionali di studio (quali la disamina archivistica e l'analisi storico-artistica di un reperto) e moderne tecniche di ricostruzione grafica. Con le nuove tecnologie, inoltre, è possibile impiegare il modello 3D "virtuale" in diversi settori, che vanno dalla fruizione in museo tramite stampa 3D, alla creazione di esposizioni virtuali on-line e di video descrittivi dell'opera che possano sottolineare il metodo scientifico-artistico con cui è stata realizzata la ricostruzione, rendendo in tal modo fruibile l'opera ricostruita anche se fortemente danneggiata o scomparsa.

ELISA BRENER

Dipartimento Beni Culturali  
Università degli Studi di Padova  
elisa.brener3d@gmail.com

GIORGIA CAFICI

Centro Italiano di Egittologia "Giuseppe Botti" - CIEB  
Scuola Normale Superiore  
giorgia.cafici@sns.it

GIULIA DEOTTO

Progetto EgittoVeneto  
Università degli Studi di Padova - Università Ca' Foscari di Venezia  
giulia.deotto@gmail.com

## BIBLIOGRAFIA

- 3D TOTAL PUBLISHING 2013, *The Swordmaster in 3ds Max and Zbrush. The Ultimate Guide to Creating a Low Poly Game Character*, London.
- ANTLEJ K., ERIC M., ŠAVNIK M., ŽUPANEK B., SLABE J., BATTISTIN B. 2011, *Combining 3D technologies in the field of cultural heritage: Three case studies*, in F. NICCOLUCCI et al. (eds.), *Proceedings of the Conference VAST: The 12<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage – Short and Project Papers (Prato 2011)*, Goslar, The Eurographics Association, 1-4.
- ASHTON S.A. 2001, *Ptolemaic Royal Sculpture from Egypt: The Interaction between Greek and Egyptian Traditions*, Oxford, Archaeopress.
- BARREAU J.B., NICOLAS T., BRUNIAUX G., PETIT E., PETIT Q., BERNARD Y., GAUGNE R., GOURATON V. 2014, *Ceramics fragments digitalization by photogrammetry, reconstructions and applications*, in M. IOANNIDES et al. (eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference, EuroMed 2014 (Limassol, Cyprus, 2014)*, Hockley, Multi-Science Publishing, 1-8.
- BIANCHI R.S. 1977, *The Striding Draped Male Figure of Ptolemaic Egypt*, New York, PhD Dissertation, New York University.
- CAFICI G., DEOTTO G. 2017, *Rediscovering sculptures from Tebtynis at the Museo Egizio in Turin*, «Rivista del Museo Egizio», 1, 1-25.
- DEOTTO G. 2015, *L'Università di Padova in Egitto. Analisi e ricostruzione dello scavo a Tebtynis attraverso la documentazione inedita*, PhD Dissertation, Padova, Università degli Studi di Padova.
- DEOTTO G., BEGG I., TONINELLO L. 2017, *Tebtynis: A first view*, in G. DEOTTO et al. (eds.), *Progetto Horus. Visioni dall'alto dello spazio archeologico*, Padova, Padova University Press, 49-57.
- DISNEY PIXAR 2020, *The Complete Colorscrips from 25 Years of Feature Films*, Revised and Expanded Edition, San Francisco.
- FALCONER D., WETA DIGITAL 2012, *The Hobbit - An Unexpected Journey. Chronicles - Art & Design*, London.
- GALLAZZI C. 1989, *Fouilles anciennes et nouvelles sur le site de Tebtynis*, «BIFAO», 89, 179-191 (<https://www.ifao.egnet.net/bifao/089/11/>).
- GALLAZZI C. 2000, *Tebtynis I. La reprise des fouilles et le quartier de la chapelle d'Isis-Thermouthis*, Le Caire, Institut français d'archéologie orientale.
- GRENFELL B.P., HUNT A.S. 1902, *The Tebtunis Papyri*, London.
- GRENFELL B.P., HUNT A.S. 1903, *The Tebtunis Papyri. Part II*, London.
- GRENFELL B.P., HUNT A.S. 1933, *The Tebtunis Papyri. Part III*, London.
- JULIUS J., HALL D., WILLIAMS C. 2014, *The Art of Big Hero 6*, San Francisco.
- LUCASFILM LTD 2015, *The Art of Star Wars: The Force Awakens*, San Francisco.
- MINISTERO DELL'EDUCAZIONE NAZIONALE (ed.) 1932, *Mostra d'arte antica: Roma, Galleria Nazionale a Valle Giulia, aprile-giugno 1932 (Catalogue of the exhibition, Galleria Nazionale a Valle Giulia)*, Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.
- MURRAY O. 2020, *Modeling the Past: Creating 3D Models from Archival Imagery* (<https://www.digital-epigraphy.com/projects/modeling-the-past-creating-3d-models-from-archival-imagery/>).
- RONDOT V. 2004, *Tebtynis II: le Temple de Soknebtynis et son dromos*, Le Caire, Institut français d'archéologie orientale.
- STANWICK P.E. 1992, *A Royal Ptolemaic Bust in Alexandria*, «Journal of the American Research Center in Egypt», 29, 131-141.
- STANWICK P.E. 2002, *Portraits of the Ptolemies: Greek Kings as Egyptian Pharaohs*, Austin, University of Texas Press.

- URCIA A., VAZZANA A. 2018, *Prototyping an Egyptian Revival. Laser Scanning, 3D Prints and Sculpture to Support the Echoes of Egypt Exhibition*, «Archeologia e Calcolatori», 29, 317-332 (<https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.24>).
- VALTZ E. 1992, *Italian excavations at Tebtynis 1930-1935: The objects at Egyptian Museum, Torino*, in *Sesto Congresso internazionale di Egittologia: Atti*, Torino, International Association of Egyptologists, 625-628.
- WARDA A. 2012, *Egyptian Draped Male Figures, Inscriptions and Context: 1<sup>st</sup> Century BC-1<sup>st</sup> Century AD*, Oxford, PhD Dissertation, University of Oxford.
- ZAMPIERI G. 2009, *Diari ed altri scritti di Carlo Anti*, I-II, Verona, Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere.
- ZAMPIERI G. 2011, *I diari di Carlo Anti, rettore dell'Università di Padova e direttore generale delle arti della Repubblica Sociale Italiana*, Verona, Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere.
- ZANOVELLO P., DEOTTO G. 2013, *Carlo Anti e Tebtynis*, in P. ZANOVELLO, E.M. CIAMPINI (eds.), *L'Egitto in Veneto*, Catalogo della mostra, Padova, C.L.E.U.P., 39-47.
- ZANOVELLO P., MENEGAZZI A. 2014, *Dalle ricerche di Carlo Anti al Progetto Egitto Veneto*, in E.M. CIAMPINI, P. ZANOVELLO (eds.), *Antichità Egizie e Italia, Atti del III Convegno Nazionale Veneto di Egittologia (Venezia 2012)*, Venezia, Ca' Foscari University Press, 95-99.

#### ABSTRACT

This article illustrates a case study from an ongoing research project on the statues and sculptural fragments from Tebtynis, discovered by Carlo Anti during the 1930-1936 excavation campaigns, in the temple dedicated to the god Soknebtynis. Specifically, it examines a non-royal statue which one of the authors has recently identified as Turin, Museo Egizio S. 19400+S. 19400/1. The authors combine a study of relevant archival records currently kept in Padua and Venice, Italy, with the virtual reconstruction of the fragment of the head and the stylistic analysis of the statue in order to shed light on the sculpture and retrace its post-excavation history.

## DAL DIGITALE AL MATERIALE: DESIGN E TECNOLOGIE DIGITALI PER LA CREAZIONE DI KIT ESPERIENZIALI PER IL MUSEO ARCHEOLOGICO NAZIONALE DI NAPOLI

### 1. INTRODUZIONE

Nella definizione promossa dall'International Council of Museums (ICOM) e ampliata lo scorso 2019 dalla commissione Museum Definition, Prospects and Potentials (MDPP), i musei sono partecipativi e trasparenti e lavorano in partnership attiva con e per le comunità al fine di raccogliere, preservare, ricercare, interpretare, esibire e migliorare la comprensione del mondo. Oltre ad ampliare l'accesso alle collezioni attraverso, ad esempio, iniziative di digitalizzazione, le istituzioni museali stanno introducendo sempre più spesso nuove modalità di interazione con il pubblico all'interno degli spazi espositivi attraverso la sperimentazione di nuovi approcci comunicativi e rappresentativi, l'implementazione di nuove tecnologie e l'ideazione di strategie fruttive diversificate, estendendo l'esperienza oltre la visita e coinvolgendo vari target di visitatori (FALK, DIERKING 2018; VERMEEREN *et al.* 2018).

In quest'ottica, risulta indubbiamente prezioso il contributo che le nuove tecnologie possono offrire per migliorare e rafforzare il rapporto tra museo e visitatore (PARRY 2013), per il quale le esperienze da progettare si trasformano da «*experiencing the encounter with an object*» a «*experiencing interactive exhibits*», con la creazione di contenuti multiutente, attività collaborative e pratiche di apprendimento sociale (VERMEER *et al.* 2018). La progettazione di nuovi approcci comunicativi è orientata ad amplificare l'esperienza museale, associando ai contenuti didascalici ed educativi fattori emozionali, relazionali e di creatività diffusa.

Il presente contributo si focalizzerà su come il digitale possa essere di supporto alla visita e all'esperienza museale – in particolar modo di bambini e ragazzi – come strumento di creazione di contenuti ed elementi materiali, analogici e multimediali che hanno lo scopo di favorire la relazione tra i visitatori e l'esposizione museale. Le tecnologie vengono impiegate, in questo caso, per restituire a una generazione “digitale” l'interesse per i dettagli e per stimolare domande diverse, ad esempio sulle tecnologie che gli artigiani del passato utilizzavano per produrre oggetti dall'alto valore sociale e simbolico, sulle tecniche pittoriche, sui particolari iconografici, sulle connessioni con la contemporaneità.

Tale approccio è stato adottato negli ultimi anni da diverse istituzioni museali, italiane e internazionali, che propongono laboratori e attività didattiche dedicate ai bambini e ai ragazzi, sia in museo sia in spazi online, attraverso

materiali e strumenti analogici e multimediali, al fine di accompagnarli nella conoscenza delle loro collezioni. Kit online ispirati alle collezioni, piattaforme dedicate e video di approfondimento – con il supporto di tecniche di storytelling digitale – caratterizzano le strategie dei musei, avvicinando bambini e ragazzi alla conoscenza delle opere attraverso processi creativi. Un innovativo esempio italiano è rappresentato dal Laboratorio di artigianato digitale del Museo Archeologico di Taranto (MArTa), spazio creativo che consente costanti interazioni tra la “fabbricazione digitale” e l’esposizione museale, sia a fini didattici che di valorizzazione e conservazione.

Seguendo questo filone, le potenzialità del digitale per la didattica museale risiedono nell’affiancare l’uso di tecnologie a una serie di attività creative e manuali che meglio rispondono a un utilizzo prolungato nel tempo e nello spazio (anche dopo la visita; ovunque nel mondo). Nei musei archeologici, nello specifico, tecnologie e strumenti interattivi sono utilizzati per incrementare la conoscenza dei reperti, la loro funzione in antico e la loro relazione con il contesto (di chi li ha prodotti, utilizzati, scoperti, custoditi, etc.). Le tecnologie, dunque, sono utilizzate per la produzione di contenuti (analogici e multimediali) con lo scopo di creare supporti didattici da utilizzare on site, al fine di favorire la comprensione delle collezioni archeologiche e di aspetti spesso nascosti.

In questa prospettiva, il contributo illustra alcuni dei risultati del progetto di ricerca commissionato dal Museo Archeologico Nazionale di Napoli (MANN) al Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale dell’Università degli Studi della Campania “Luigi Vanvitelli”, nell’ambito del progetto “Out of Boundaries Viral Art Dissemination” (OBVIA), che ha visto la collaborazione di Mnemosyne3D per le operazioni di digitalizzazione di reperti dalla Sezione Magna Grecia del MANN (GIULIERINI, GIACCO 2019).

OBVIA è un progetto di comunicazione e promozione nato nel 2015 volto a promuovere l’immagine e i valori del Museo ai fini dell’audience development, mediante la produzione e disseminazione di opere di artisti e designer che forniscono interpretazioni di “frammenti” e reperti del MANN con linguaggi contemporanei, anche in luoghi esterni al museo e non convenzionali. Nel progetto OBVIA il design viene interpretato nella sua accezione più ampia e internazionale di design thinking, dunque come atteggiamento mentale interdisciplinare orientato al progetto di sistemi, servizi, processi ed esperienze, che vede il suo fondamento nello human-centred design, cioè nel centrare il progetto sui desideri, sulle attitudini, sui gusti e sulle esigenze delle persone alle quali si rivolge (BROWN 2008).

L’impiego di questo approccio progettuale ai beni culturali consente di apportare innovazione al modo in cui viene concepita l’esperienza fruitiva, interpretata come complessa realtà sistemica fondata su un intreccio di relazioni tra persone, tempi, luoghi e valori. Nel progetto OBVIA il design agisce





Fig. 1 – Brochure realizzate per i laboratori MANN for KIDS nell'ambito del Progetto OBVIA.

in questo senso, osservando il modo in cui le persone vivono e percepiscono l'esperienza culturale per avvicinare i musei ai linguaggi e ai gusti contemporanei, anche dei più giovani, attraverso interpretazioni dei beni filtrate in modo creativo e restituite mediante diverse forme espressive (MACLEOD *et al.* 2015).

Tra gli obiettivi principali del progetto OBVIA vi è quello di “aprire” ulteriormente il museo al territorio accentuandone il ruolo di punto di riferimento per i cittadini, con particolare attenzione all'accoglienza dei bambini oggetto della specifica linea di azione MANN for kids. Quest'ultimo è un programma di laboratori didattici (Fig. 1) gratuiti realizzati allo scopo di far scoprire ai più piccoli le collezioni e le grandi esposizioni permanenti del Museo Archeologico Nazionale di Napoli, ma anche uno spazio di confronto attraverso il quale indagare il loro punto di vista sul museo e raccogliere spunti su ulteriori argomenti da sviluppare o approfondire (GIULIERINI, SOLIMA 2020).

## 2. AMPLIFICARE L'ESPERIENZA MUSEALE DEI BAMBINI

Lo studio di strategie e soluzioni di design dell'esperienza per la fruizione museale è confluito nella progettazione di kit dedicati alle collezioni Magna

Grecia, Egitto, Collezione Farnese e Oggetti della vita quotidiana, da impiegare nei laboratori didattici del museo. La prima fase dello studio ha avuto come oggetto una ricerca sullo stato dell'arte internazionale e sui casi studio di kit, laboratori, exhibit e installazioni dedicati ai visitatori più piccoli dei musei, con un focus sulle esperienze orientate a veicolare contenuti storici e artistici impiegando diverse strategie di coinvolgimento, interazione e comunicazione. Gli esempi di musei che utilizzano kit manuali sono numerosi: il circuito museale Umbria Terre&Musei ha sviluppato un kit "Fai da te" per esplorare in modo creativo i sedici musei affiliati; il British Museum di Londra utilizza strategie sia analogiche che digitali con kit da archeologo e visori virtuali per manipolare i reperti nel loro contesto originale; il Museum of Richmond (UK) fornisce "discovery boxes" ricche di manufatti di diversi periodi per indagare le collezioni.

La fase successiva ha previsto un'indagine sul target dei visitatori individuato, compreso nella fascia di età tra i 6 e gli 11 anni. L'indagine è stata effettuata in sessioni di osservazione diretta, realizzate durante la permanenza dei bambini all'interno delle sezioni del MANN, al fine di individuare aspetti riguardanti l'interazione con l'esposizione, le domande più frequenti in presenza o meno di una guida, le reazioni a storie e informazioni relative ai reperti. Dall'indagine sono emersi spunti di riflessione relativi ad atteggiamenti e modalità di interazione comuni nei bambini durante la visita, tra i quali la tendenza a osservare gli oggetti in modo fugace, focalizzando l'attenzione sulle statue più grandi o su reperti collocati al centro delle sale e sulla difficoltà ad orientarsi in assenza di riferimenti tridimensionali.

In relazione a quest'ultimo aspetto, in particolare, gli appunti raccolti durante l'indagine sono stati rielaborati e confrontati con i risultati dei più recenti studi sulla percezione dello spazio, sull'orientamento e sulla capacità di costruire gerarchie cognitive da parte dei bambini (JACOBSEN 2018; LEE 2019). Dall'analisi è emerso come l'utilizzo di mappe dimensionali, lenti di ingrandimento, matite per eseguire sketch dal vivo dei dettagli e giochi creativi rappresentino validi elementi per la costruzione di esperienze analogiche partecipative e multisensoriali.

Partendo dallo studio preliminare e dall'indagine esplorativa del target di riferimento, le macro-strategie che hanno orientato il progetto – e che costituiscono un filo conduttore tra i diversi kit – sono state:

- stimolare la creatività dei bambini;
- rendere percepibile l'impercepibile o il nascosto;
- stimolare l'attenzione ai dettagli e la percezione materiale dei reperti;
- superare il limite dell'istantaneità dell'esperienza per estendere il tempo e lo spazio della conoscenza oltre il momento della visita;
- impiegare il digitale in misura limitata e con l'intento di rafforzare la componente materiale dell'informazione (KAMENETZ 2018);

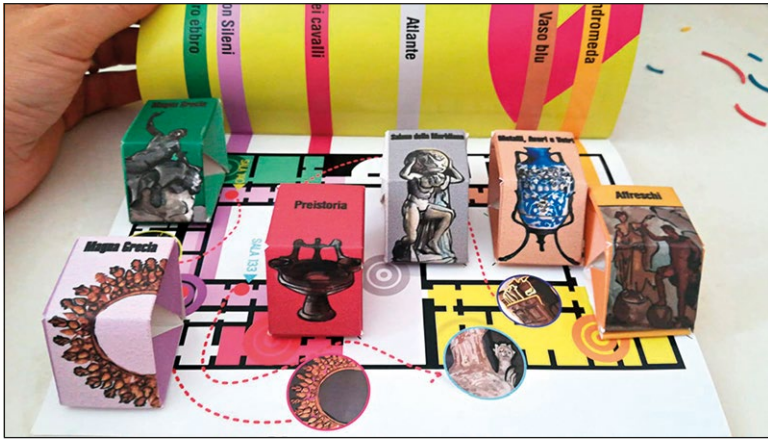


Fig. 2 – Taccuino con planimetria di uno dei piani del museo con elementi pop-up che identificano gli oggetti visivamente più evidenti per i bambini in ogni sezione.

– favorire l’instaurarsi di relazioni tra i piccoli visitatori che, attraverso i laboratori, vengono sollecitati a percepire la presenza degli altri, a osservarsi e a interagire tra loro oltre che con il museo.

La progettazione dei kit esperienziali parte, inoltre, dalla consapevolezza che i destinatari fanno parte di una generazione “digitale”. L’uso diffuso e prolungato delle tecnologie digitali sottopone le persone, e in particolare i bambini, a una quantità molto ampia di stimoli visivi – immagini, foto, video – con ritmi veloci e incalzanti. Ciò può portare a una riduzione della capacità di attenzione (STIGLIC, VINER 2019) e alla difficoltà a soffermare lo sguardo sui particolari per apprezzarne i dettagli e i significati.

I kit contengono due strumenti comuni, brandizzati con i caratteri identitari MANNforKIDS e OBVIA, che possono essere acquistati anche singolarmente e utilizzati indipendentemente dai laboratori. Il primo strumento è un taccuino che, nelle prime pagine, include le planimetrie dei diversi piani del museo, poste su pagine separate, in cui sono localizzati, con elementi pop-up, gli oggetti visivamente più evidenti per i bambini che possono essere facilmente individuabili come riferimenti nello spazio (Fig. 2). Le planimetrie sono tradotte in mappe infografiche che aiutano, come una sorta di caccia al tesoro, a individuare la collocazione dei dettagli. Il secondo strumento impiegato in tutti i kit è una lente di ingrandimento, utile a osservare i particolari delle opere esposte nel museo in modo dettagliato e che ingloba nel manico una matita per disegnare dal vivo.

Come accennato, il progetto si basa su strategie elaborate in funzione dei principi di percezione neurocognitiva, specificamente studiati per i bambini per

coadiuvare l'orientamento e il riconoscimento. I bambini hanno più facilità a costruire analogie tra lo spazio reale tridimensionale e un modello rappresentativo altrettanto tridimensionale (VURPILLOT 2017), come il sistema dei pop-up, piuttosto che astrarre le informazioni spaziali tridimensionali per rimodellarle mentalmente in uno schema bidimensionale. L'effetto pop-up, inoltre, è dinamico poiché gli oggetti si elevano quando le pagine vengono aperte, determinando una sorta di interattività analogica che sorprende il bambino e lo spinge a relazionarsi con la mappa, con una modalità tattile che aumenta l'efficacia della rappresentazione visiva (KIRSCH 2017). In questo modo si genera un ordine gerarchico basato su grafica bidimensionale, testi, colori e pop-up tridimensionali che facilita l'orientamento istintivo e naturale senza richiedere il processo di duplice decodifica da tridimensionale a bidimensionale e viceversa, che l'uso di una mappa convenzionale prevede (FINKELSTEIN *et al.* 2016).

I diversi kit e laboratori progettati mirano a far leva su diversi aspetti della fruizione museale e a coinvolgere i bambini in esperienze diversificate. Il kit laboratoriale "Archeological clones" propone di portare nelle vite quotidiane e nelle case delle persone frammenti di memoria dei reperti custoditi al MANN, attraverso riproduzioni di oggetti della vita quotidiana come gioielli, accessori per la cura del corpo e per la casa usati in antico. I bambini, guidati attraverso la mappa tridimensionale nella Collezione Egitizia, osservano nel dettaglio alcuni reperti da "clonare" in chiave interpretativa contemporanea, utilizzando strumenti da decorazione o stampi con materiali modellabili e, nel caso siano disponibili, tecnologie di stampa 3D.

Il kit "Oggetti misteriosi" ha, invece, l'obiettivo di incuriosire i bambini, inducendoli ad indagare gli utensili dell'antichità più strani e misteriosi tra le sale della Collezione Oggetti della vita quotidiana, cercando di comprenderne l'uso e il legame con la dimensione di vita dell'epoca. Nel laboratorio "Empatie" i bambini sono accompagnati dalle guide nella visita della Collezione Magna Grecia e, con l'aiuto del taccuino/mappa tridimensionale, si soffermano su alcuni accessori indossabili. Giunti nel laboratorio didattico, vengono invitati a scegliere alcune repliche da indossare e personalizzare con l'aiuto di colori, pietre e altri materiali con i quali completano le parti lasciate appositamente vuote nella grafica del disegno degli accessori.

Il laboratorio "Ri-conoscere" coinvolge i bambini emotivamente nella visita a lasciare un "segno" dell'esperienza vissuta anche al di fuori del museo. I bambini, durante la visita della Collezione Farnese, con l'aiuto delle mappe contenute nel taccuino sono invitati a soffermarsi davanti a statue e busti, cercando di rintracciare elementi di somiglianza fisica tra alcune statue e le persone che conoscono.

Tra i laboratori sperimentati dal progetto OBVIA, in questo contributo si approfondisce il laboratorio "Museum Details", che combina design, tecnologie

digitali e archeologia al fine di guidare i bambini nell'osservazione dei dettagli di oggetti e reperti delle collezioni del MANN. Nelle fasi di ideazione e creazione del kit "Museum Details", le tecnologie di acquisizione tridimensionale sono state utilizzate al fine di creare contenuti, progettare strumenti e realizzare oggetti partendo da modelli 3D ad alta risoluzione dei reperti selezionati. In questo processo, l'acquisizione tridimensionale e la stampa 3D hanno permesso di rimaterializzare il reperto in un prodotto prima digitale e poi materico, modulabile e adattabile alla realizzazione di kit esperienziali ma che ben si presta a diversi e sempre nuovi utilizzi, nello spazio fisico e digitale del museo.

## 2.1 *Museum Details*

Il laboratorio "Museum Details" propone un kit per l'osservazione e la riproduzione di dettagli di reperti archeologici esposti nel museo MANN. In un mondo sempre più digitale le giovani generazioni sviluppano la capacità di seguire con lo sguardo oggetti in veloce movimento con una spiccata abilità alla visione di insieme, perdendo l'abitudine a fermare lo sguardo per osservare i dettagli delle cose che li circondano (HEYMSFIELD *et al.* 2018). Il kit intende sensibilizzare bambini e adulti che visitano i musei sull'importanza di osservare i dettagli dei reperti archeologici, per una più profonda comprensione della loro materialità. Il kit può essere usato autonomamente dai bambini o in percorsi didattici accompagnati da guide, orientati all'osservazione e alla comprensione dei dettagli come frammenti da raccordare tra loro per costruire storie. Attraverso il kit, i visitatori vengono indotti ad apprezzare la tridimensionalità e la corporeità di ciò che li circonda, acquisendo nuove consapevolezza sui reperti e sulla loro forma concreta e materica.

Il kit, sviluppato per un target di bambini e ragazzi, ma fruibile anche dagli adulti, è stato realizzato in una versione dedicata al laboratorio MANN for kids e in un'altra, più composita e ampia, destinata ad essere venduta nel bookshop del museo, nelle librerie per bambini e in altri musei. Il kit è stato prodotto in una prima edizione per la sezione Magna Grecia del MANN, a cui si aggiungeranno un'edizione per la sezione Preistoria e, successivamente, altre versioni con l'obiettivo di proporlo come collana da collezionare.

Il kit contiene (Fig. 3): il taccuino con le mappe dei piani con i riferimenti pop-up; la matita/lente di ingrandimento; un set di cinque calchi realizzati mediante tecniche di acquisizione tridimensionale e stampa 3D di alcuni dettagli di reperti della collezione archeologica, selezionati secondo un filo conduttore tematico, individuato con l'aiuto della sezione educativa e degli archeologi del museo, che costituisce uno dei possibili racconti della collezione; e pasta modellabile auto-indurente, che può essere compressa nei calchi riutilizzabili per produrre modelli tridimensionali dei dettagli osservati.

Nella versione laboratorio i bambini vengono accompagnati nella visita al museo da una guida, ma si servono della mappa per orientarsi nello





Fig. 3 – Elementi del kit Museum Details: taccuino pop-up, lente d’ingrandimento con matita e set di calchi con pasta modellabile.

spazio e individuare i dettagli da osservare con la lente d’ingrandimento. La guida li invita a prendere appunti visivi sui dettagli e a disegnarli. Giunti in laboratorio, i bambini devono riconoscere e scegliere il calco corrispondente al dettaglio che li ha colpiti maggiormente e riprodurlo con la pasta modellabile, per poi portarlo a casa come ricordo dell’esperienza. Per sviluppare il kit sono state condotte diverse visite al museo, allo scopo di individuare i reperti più adeguati a essere osservati nel dettaglio. Dopo aver selezionato i reperti si è proceduto alla produzione di calchi e stampi a matrice mediante la rielaborazione di modelli 3D di reperti dalle collezioni del MANN. Parte dei modelli 3D utilizzati per la realizzazione dei calchi è stata acquisita nell’ambito del progetto Museo Accessibile: Nuovi Percorsi di Inclusione al MANN.

Per i reperti della Collezione Magna Grecia, dei quali non si disponeva di modelli 3D, sono state effettuate sessioni di acquisizione con tecniche di fotogrammetria e attrezzature specialistiche messe a disposizione da Mnemosyne3D, in seguito rielaborate per la riproduzione dei dettagli attraverso stampa 3D e per la realizzazione degli stampi a matrice. L’attività di acquisizione dei modelli 3D dei reperti è descritta nel paragrafo che segue.

Un primo laboratorio “Museum Details” con un ottimo riscontro in numero di bambini è stato realizzato il 15 dicembre 2019. Purtroppo, a causa dell’emergenza sanitaria da Covid-19, non è stato possibile procedere con i successivi che riprenderanno auspicabilmente nel 2021.

## 2.2 *L’utilizzo di tecnologie digitali per l’acquisizione ed elaborazione dei dettagli*

L’acquisizione di modelli tridimensionali di reperti archeologici di ridotte dimensioni e caratterizzati da un alto grado di dettaglio ha richiesto particolare attenzione nelle modalità di acquisizione e post-produzione dei modelli 3D,

per consentirne l'utilizzo nella creazione dei kit esperienziali. La tecnica di acquisizione scelta è stata la fotogrammetria SfM (Structure from Motion). La fotogrammetria è stata preferita all'utilizzo di scanner ad alta risoluzione (Artec Spider a luce strutturata), data la variabilità di oggetti selezionati e la presenza di superfici riflettenti che potevano generare un errore maggiore soprattutto con strumenti che utilizzano la luce e la sua riflessione per determinare la posizione dei punti nello spazio (MANFERDINI, GARAGNANI 2011; NICOLAE *et al.* 2014).

Come è noto, la fotogrammetria è ampiamente utilizzata nella documentazione archeologica (ad es. REMONDINO 2011; FIORINI 2012, 2013 e, per una recente revisione, MAGNANI *et al.* 2020) in particolar modo per quanto riguarda il rilievo di strutture e ambienti ma, con più recenti approfondimenti, anche per la restituzione ad alta definizione di reperti di dimensioni ridotte (BITELLI *et al.* 2007; GALLO *et al.* 2014; CLINI *et al.* 2016; PORTER *et al.* 2016a). L'acquisizione fotogrammetrica è stata effettuata su cinque reperti provenienti dalla collezione Magna Grecia del MANN: una collana in oro da Ruvo (inv. 24883, Fig. 4), un anello con castone a *gorgoneion* da Cuma (inv. 126408, Fig. 4), un vaso configurato a forma di tartaruga (inv. 82500), un *prometopidion* (frontale per cavallo, inv. 5712) in bronzo e una statuetta fittile di *Hera*. Tra i reperti acquisiti, per questi primi laboratori è stata selezionata la collana in oro proveniente da Ruvo, datata al VI-V sec. a.C. e probabilmente realizzata in una officina etrusca in Campania, in quanto caratterizzata da



Fig. 4 – Reperti della Sezione Magna Grecia del Museo Archeologico Nazionale di Napoli, oggetto di acquisizione 3D: a sinistra collana in oro da Ruvo (inv. 24883); a destra anello con castone a *gorgoneion* da Cuma (inv. 126408).

dettagli particolarmente minuziosi e simbolici. La collana è costituita da un nastro a maglia piatta al quale sono collegati attraverso catenelle quattro tipi di pendenti che si ripetono a dimensioni diverse in più moduli decorativi; i pendenti sono realizzati in lamina d'oro e decorati a pulviscolo con dimensioni medie di 1,5 cm di lunghezza per 0,8 cm di larghezza.

Nel presente caso studio l'esigenza principale era quella di ottenere modelli 3D affidabili per una corretta visualizzazione e un ingrandimento dei dettagli presenti sui reperti, in modo da poterne assicurare la riproduzione in calchi. Non essendo necessaria in questa fase un'estrema accuratezza metrica, si è scelto di utilizzare una strumentazione accessibile, quale una fotocamera digitale reflex a obiettivo singolo (DSLR) Nikon D3200 con obiettivo zoom AF-S Dx Nikkor 18-55 mm VR II. L'acquisizione delle immagini è stata effettuata presso i laboratori fotografici del MANN, oscurando la luce naturale dell'ambiente e utilizzando un'illuminazione direzionata con due lampade led a luce diffusa e con il reperto posizionato su fondo nero. La battuta fotografica è stata effettuata con l'ausilio di un treppiede e un cavo di scatto per evitare effetti di mosso e micromosso con tempi di esposizione lunghi. L'utilizzo di un metrino fotografico ha permesso in seguito il corretto ridimensionamento del modello 3D. I parametri di esposizione sono stati impostati manualmente a 1/3 sec, f/13 con una sensibilità di 200 ISO. Le immagini sono state acquisite assicurando un'alta percentuale di sovrapposizione tra gli scatti, adottando una ripresa fotografica ad assi convergenti distribuita su diverse altezze.

In una prima fase la collana è stata posizionata all'interno di una softbox (Fig. 5), al fine di diffondere omogeneamente la luce delle lampade, ma, dopo un primo test di acquisizione, la presenza di dettagli in bassorilievo ha fatto optare per il posizionamento delle lampade in alcuni casi a luce radente, con

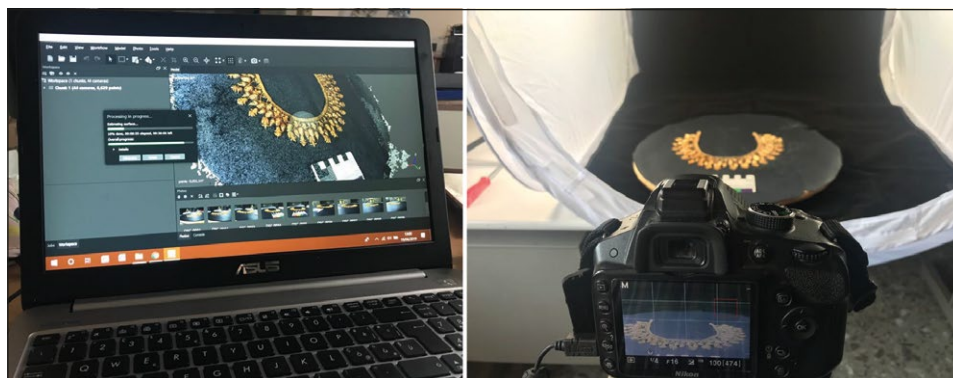


Fig. 5 – Acquisizione del modello 3D della collana in oro da Ruvo attraverso fotogrammetria ed elaborazione preliminare del modello 3D in sede con software Agisoft Metashape per la verifica della qualità del modello.

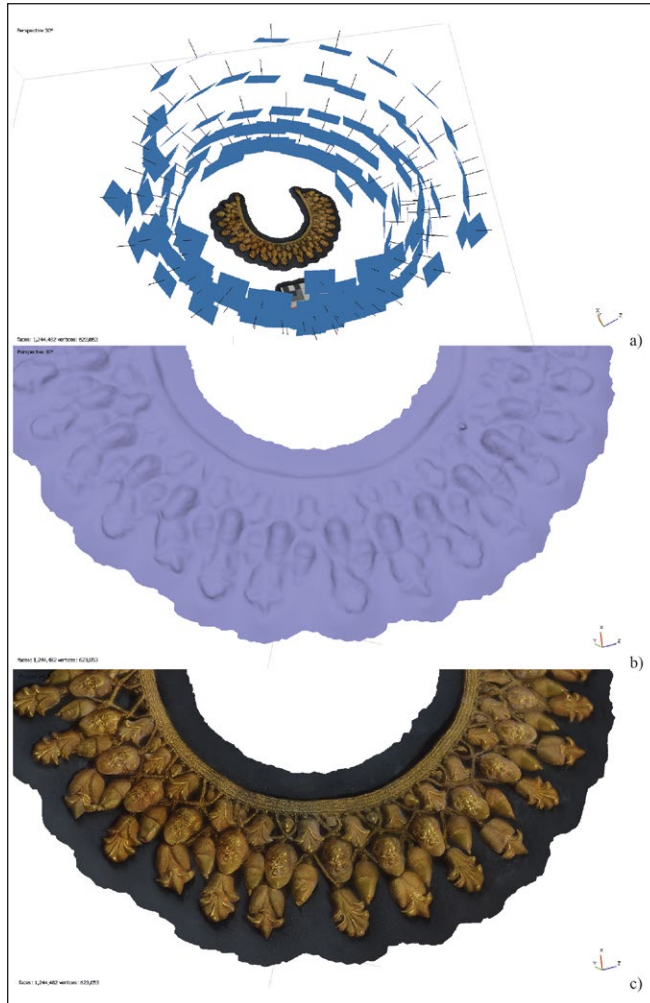


Fig. 6 – Alcune fasi di elaborazione del modello 3D intero della collana in oro da Ruvo: a) localizzazione dei punti di presa fotografica; b) mesh; c) mesh texturizzata.

diffusori incorporati, per accentuare la morfologia dell'oggetto, seppur evitando un'eccessiva riflettenza o chiaroscuro. Le immagini sono state acquisite in formato RAW, trasformate in JPEG con il software Adobe Photoshop ed elaborate con Agisoft Metashape Professional (versione 1.5.1).

L'acquisizione delle immagini ad alta risoluzione della collana è stata effettuata in due battute fotografiche: la prima ha interessato l'intera collana

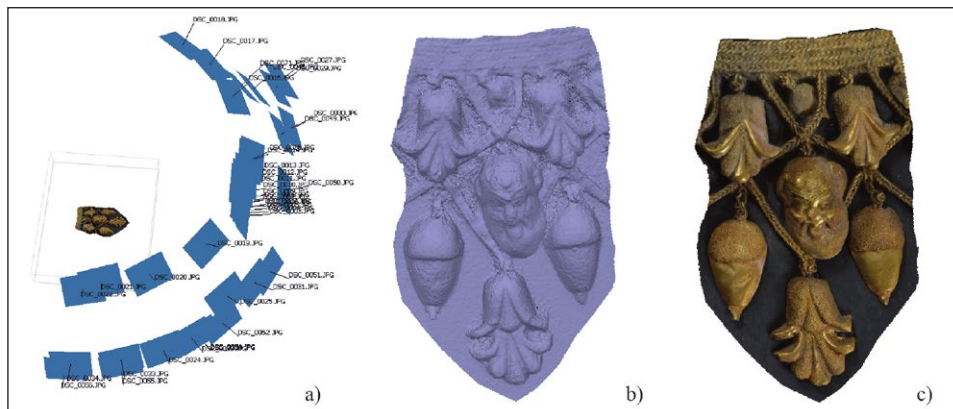


Fig. 7 – Alcune fasi di elaborazione del modello 3D di un modulo decorativo della collana in oro da Ruvo: a) localizzazione dei punti di presa fotografica; b) mesh; c) mesh texturizzata.



Fig. 8 – A sinistra il dettaglio del pendente a protome di sileno dopo la post produzione in Blender; a destra lo stampo a matrice del pendente, collana in oro da Ruvo.

per ottenere un modello 3D d'insieme (con una focale di 18 mm); la seconda si è concentrata sulla porzione frontale della collana ad uno zoom maggiore (55 mm) in modo da generare modelli 3D dettagliati dei pendenti, inquadrando un modulo decorativo completo. Per l'elaborazione del modello 3D sono state utilizzate 144 foto per la collana intera e 43 foto per i pendenti.

L'elaborazione di entrambi i modelli ha rivelato, come atteso, un diverso grado di dettaglio. Il modello 3D dell'intera collana, pur presentando una buona resa d'insieme, non ha catturato le geometrie di dettaglio dei singoli



pendenti, ma unicamente le silhouette (Fig. 6). Il modello 3D del modulo decorativo ha invece permesso di raggiungere una buona definizione dei pendenti dalle geometrie più semplici quali le palmette e le ghiande, mostrando una minore precisione solo nel caso del pendente a protome di sileno caratterizzato da dettagli molto fini e submillimetrici (Fig. 7).

Una componente di errore nell'acquisizione delle immagini e del modello 3D è in ogni caso dovuta alla scansione di una superficie riflettente come l'oro, caratteristica di norma problematica nella gestione dell'acquisizione tridimensionale (SCHAICH 2013; NICOLAE *et al.* 2014). Di conseguenza, le superfici del modello 3D non si presentano perfettamente lisce e definite come nell'originale, ma disturbate dal rumore causato dalla superficie riflettente, soprattutto nelle porzioni a lamina liscia rispetto a quelle decorate a pulviscolo, caratterizzate da un effetto più opaco. La natura e il pregio dei reperti non hanno consentito l'applicazione di patine che ne riducessero l'effetto riflettente. Un possibile metodo per ridurre tale problema in future acquisizioni potrebbe essere l'utilizzo, con le dovute correzioni, di un filtro polarizzato per evitare il bagliore (NICOLAE *et al.* 2014) e l'utilizzo di maschere per eliminare lo sfondo in fase di elaborazione del modello 3D (PORTER *et al.* 2016).

Data la complessità delle superfici acquisite e i dettagli minuti, si è optato per una post-produzione del modello 3D attraverso il software di scultura digitale open source Blender (versione 2.8) piuttosto che l'utilizzo di strumenti di smoothing automatico della mesh, in modo da non perdere dettagli significativi. Per i pendenti a palmette e ghiande è stato necessario solo smussare le aree dell'oggetto realizzate a lamina liscia (e dunque più riflettente). Nel caso della protome di sileno, invece, si è dovuto procedere con una più accurata operazione di scultura digitale, per accentuare la fisionomia del volto e renderla così idonea alla realizzazione del calco e del relativo stampo a matrice in negativo (Fig. 8). Le due scansioni 3D, caratterizzate da un diverso grado di dettaglio, potranno essere utilizzate anche ai fini di documentazione e valorizzazione.

In conclusione, seppure sia stata necessaria una laboriosa post-produzione delle scansioni 3D ottenute con fotogrammetria, il metodo si è rivelato piuttosto efficace nella restituzione degli elementi minuti e submillimetrici dei reperti. Un ulteriore esempio è rappresentato dalla scansione 3D dell'anello con *gorgoneion*, per il quale, nonostante la superficie riflettente e le ridotte dimensioni, è stato possibile ottenere un modello 3D in grado di acquisire anche le incisioni più fini.

### 3. CONCLUSIONI

Nel caso studio proposto, la progettazione dei kit esperienziali pone l'accento sull'utilizzo di tecnologie digitali e del design per la creazione di nuovi contenuti, analogici e digitali, riutilizzabili nel tempo per attività,

allestimenti, esperienze diversificate all'interno del museo e in spazi online dedicati. I modelli 3D, oltre che copie dei reperti conservati in museo – utili, dunque, alla documentazione, alla ricerca e alla condivisione della conoscenza – diventano prodotti digitali da rielaborare, costruire e decostruire, riutilizzare sia nello spazio fisico sia nello spazio virtuale, favorendo la creazione di nuovi contenuti anche diverse volte.

I prodotti digitali ottenuti sono stati finalizzati alla creazione di oggetti fisici, da utilizzare all'interno dello spazio museale nella relazione tra il bambino e il reperto archeologico, favorendo stimoli percettivi e processi creativi. L'acquisizione digitale del reperto permette di "rimaterializzarlo" con forme e scopi diversi, trasformandolo in un prodotto allo stesso tempo uguale e diverso e, in questo senso, manipolabile dai fruitori.

Tale processo è stato messo in campo anche in altri progetti museali. Si accenna in questa sede al progetto *Transmitting Contentious Cultural Heritages with the Arts: From Intervention to Co Production (TRACES)*, per il quale *Mnemosyne3D* ha collaborato nella realizzazione di un'installazione artistica che esplorava le connessioni tra collezioni museali, archivi e raccolte familiari. Il progetto ha coinvolto un patrimonio controverso e invisibile che raccoglie maschere facciali e calchi di volti umani realizzati in gesso durante le missioni in Libia condotte da antropologi italiani tra gli anni Venti e Trenta del Novecento, ora dislocato tra il Museo delle Civiltà e altri luoghi di Roma.

Di questi oggetti sono state effettuate riproduzioni attraverso l'acquisizione tridimensionale e la stampa 3D per la mostra *Bel Suol d'Amore - The Scattered Colonial Body*. Le maschere facciali sono state esposte in nuovi prodotti materici grazie alla stampa 3D, mentre durante l'apertura della mostra *Mnemosyne3D* ha curato una 3D performance dal vivo con scanner 3D e monitor per la visualizzazione dell'acquisizione. L'obiettivo è stato quello di utilizzare il digitale – e, in particolare, la stampa 3D – per filtrare i contenuti e indurre ad una riflessione sulla collezione, smaterializzando e ricostruendo gli oggetti dal digitale alla materia e dalla materia al digitale.

Ritornando al caso studio analizzato, in un'ottica di rifunzionalizzazione dei prodotti digitali, la disponibilità di modelli 3D a diverse risoluzioni per reperti di pregio, come la collana d'oro da Ruvo, ha permesso l'individuazione di ulteriori percorsi di sperimentazione all'interno della Collezione Magna Grecia. L'esplorazione del dettaglio archeologico e della sua produzione ha avuto come esito la progettazione di un pannello espositivo avente come fulcro la collana (Fig. 9). Il pannello, progettato in modo da essere accessibile a un ampio pubblico di visitatori, punta alla comprensione dei diversi elementi decorativi e delle tecniche produttive che hanno portato alla realizzazione di un elemento così pregiato e di fattura elaborata come quello custodito al MANN.

A tal fine, è prevista la collocazione di una riproduzione della collana realizzata in stampa 3D ad alta risoluzione, che sfrutterebbe il modello

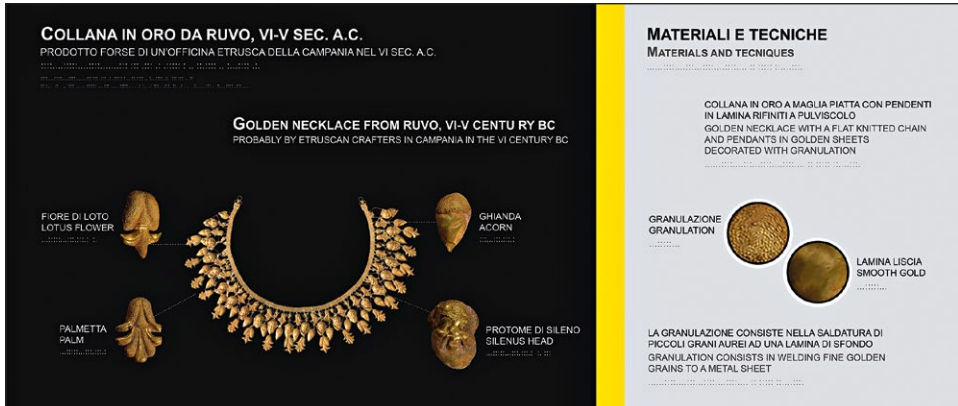


Fig. 9 – Prototipo di un pannello espositivo per la Sezione Magna Grecia del MANN avente come oggetto la collana in oro da Ruvo (inv. 24883), le scritte in braille sono simulazioni.

realizzato per l'intera collana, e un ingrandimento dei dettagli dei pendenti stampati in 3D (utilizzando la scansione di dettaglio) con l'indicazione delle figure rappresentate. Le stampe 3D dei pendenti andranno rifinite attraverso l'utilizzo di tecniche di post-produzione, al fine di ottenere una resa realistica non solo nella forma ma anche alla vista e al tatto. In una sezione apposita del pannello si sviluppa un approfondimento sulle tecniche produttive antiche e sul materiale di pregio utilizzato per la creazione della collana anche mediante ingrandimenti materici e tridimensionali, che consentono di apprezzare i dettagli più minuti. L'obiettivo è ampliare la conoscenza della materialità del reperto in tutte le sue accezioni: simbolica, morfologica e tecnologica.

Grazie alla collaborazione con Sin&dea, società specializzata nella progettazione e realizzazione di mappe e percorsi tattili, il pannello include il testo in braille ed è configurato in modo da garantire il rispetto della normativa in materia di barriere senso-percettive. Il pannello, per ora in forma progettuale, esemplifica l'ampio spazio di utilizzo di modelli 3D nella creazione di contenuti sia fisici che digitali. Un'ulteriore applicazione in fase di progettazione è l'utilizzo dei modelli 3D della collana, dell'anello e del frontale, ricchi di dettagli figurativi, all'interno di un'installazione multimediale e multisensoriale che sarà oggetto delle prossime sperimentazioni in accordo con il MANN. Le prospettive di ricerca sono ampie e ricche di potenziale.

### *Ringraziamenti*

Si ringrazia il direttore del Museo Archeologico Nazionale di Napoli Paolo Giulierini, il Servizio educativo, Daniela Savy e Annamaria Di Noia. Il progetto OBVIA è stato avviato sotto la direzione del direttore Paolo Giulierini ed è coordinato da Daniela Savy, ricercatrice presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II". I kit

dedicati alle collezioni Magna Grecia, Egizia, Collezione Farnese e Oggetti della vita quotidiana sono stati progettati da Antonia Auletta e Carla Langella con il supporto del servizio educativo del MANN coordinato da Lucia Emilio, con il contributo di Annamaria Di Noia, Angela Vocciante, Immacolata Simeone e Marialucia Giacco. Il progetto Museo Accessibile: Nuovi Percorsi di Inclusione al MANN è stato curato da Ludovico Solima dell'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli" con acquisizioni 3D eseguite da Medaarch-Mediterranean FabLab. Le acquisizioni 3D e le operazioni di post-produzione dei modelli 3D descritte nel presente contributo sono state effettuate da Maria De Falco (Mnemosyne3D). Le strategie d'impiego di tecnologie digitali in musei archeologici per la produzione di contenuti digitali e analogici sono state approfondite da Maria Laura Nappi (Mnemosyne3D). Il progetto del pannello è stato realizzato da Maria De Falco, Maria Laura Nappi e Carla Langella con il supporto di Carla Cuomo, direttore tecnico di Sin&dea S.r.l.s. Il progetto TRACES, finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, è stato coordinato da Arnd Schneider, professore presso il Department of Social Anthropology, University of Oslo; la mostra *Bel Suol d'Amore – The Scattered Colonial Body* è stata curata da Leone Contini e Arnd Schneider.

MARIA DE FALCO

Department of Archaeology  
Durham University, UK  
maria.de-falco@durham.ac.uk  
Mnemosyne3D – info.mnemo3d@gmail.com

MARIA LAURA NAPPI

Dipartimento di Ingegneria  
Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"  
marialaura.nappi@unicampania.it  
Mnemosyne3D – info.mnemo3d@gmail.com

ANTONIA AULETTA, CARLA LANGELLA

Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale  
Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"  
auletta.antonina@gmail.com, carla.langella@unicampania.it

## BIBLIOGRAFIA

- BITELLI G., GIRELLI V.A., REMONDINO F., VITTUARI L. 2007, *The potential of 3D techniques for cultural heritage object documentation*, «Videometrics», 9, 6491 (<https://doi.org/10.1117/12.705012>).
- BROWN T. 2008, *Design thinking*, «Harvard Business Review», 86, 6, 84.
- CLINI P., FRAPICINI N., MENGONI M., NESPECA R., RUGGERI L. 2016, *SFM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives», 41, 229-236 (<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-229-2016>).
- FALK J.H., DIERKING L.D. 2018, *Learning from Museums: Visitor Experiences and the Making of Meaning*, Rowman&Littlefield.

- FINKELSTEIN A., LAS L., ULANOVSKY N. 2016, *3-D maps and compasses in the brain*, «Annual Review of Neuroscience», 39, 171-196.
- FIORINI A. 2012, *Tablet PC, fotogrammetria e PDF 3D: strumenti per documentare l'archeologia*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 2.0, Atti del Workshop (Bologna 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 213-228 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/13\\_Fiorini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/13_Fiorini.pdf)).
- FIORINI A. 2013, *Nuove possibilità della fotogrammetria: la documentazione archeologica del nuraghe di Tanca Manna (Nuoro)*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 3.0, Atti del Workshop (Bologna 2013)*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 341-354 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18\\_Fiorini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18_Fiorini.pdf)).
- GALLO A., MUZZUPAPPA M., BRUNO F. 2014, *3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images*, «Journal of Cultural Heritage», 15, 2, 173-182 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.04.009>).
- GIULIERINI P., GIACCO M. 2019, *Museo Archeologico Nazionale di Napoli. La collezione Magna Grecia*, Napoli, Electa.
- GIULIERINI P., SOLIMA L. 2020, *Piano Strategico 2020-2023, Museo Archeologico Nazionale di Napoli*, Napoli, Electa.
- HEYMSFIELD S.B., BOURGEOIS B., NG B.K., SOMMER M.J., LI X., SHEPHERD J.A. 2018, *Digital anthropometry: A critical review*, «European Journal of Clinical Nutrition», 72, 5, 680.
- JACOBSEN T. 2018, *Neuroaesthetics and the psychology of aesthetics*, «Neuroaesthetics», 27-42.
- KAMENETZ A. 2018, *The Art of Screen Time: How Your Family Can Balance Digital Media and Real Life*, London, Hachette, UK.
- KIRSCH A. 2017, *Explain to whom? Putting the user in the center of explainable AI*, in *Proceedings of the First International Workshop on Comprehensibility and Explanation in AI and ML 2017 co-located with 16<sup>th</sup> International Conference of the Italian Association for Artificial Intelligence - AI\*IA (Bari 2017)* ([http://ceur-ws.org/Vol-2071/CExAIIA\\_2017\\_keynote\\_1.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2071/CExAIIA_2017_keynote_1.pdf)).
- KIRSCH L.P., KRAHÉ C., BLOM N., CRUCIANELLI L., MORO V., JENKINSON P.M., FOTOPOULOU A. 2018, *Reading the mind in the touch: Neurophysiological specificity in the communication of emotions by touch*, «Neuropsychologia», 116, 136-149.
- LASTILLA L., RAVANELLI R., FERRARA S. 2019, *3D high-quality modeling of small and complex archaeological inscribed objects: Relevant issues and proposed methodology*, «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42(2/W11), 699-706 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-699-2019>).
- LEE C.D. 2019, *Practice that supports learning and development: A commentary*, «Applied Developmental Science», 24, 2, 1-5.
- MACLEOD S., DODD J., DUNCAN T. 2015, *New museum design cultures: Harnessing the potential of design and 'design thinking' in museums*, «Museum Management and Curatorship», 30, 4, 314-341.
- MAGNANI M., DOUGLASS M., SCHRODER, W., REEVES J., BRAUN D.R. 2020, *The digital revolution to come: Photogrammetry in archaeological practice*, «American Antiquity», 85, 4, 737-760.
- MANFARDINI A.M., GARAGNANI S. 2011, *Fruizione digitale di reperti archeologici. L'esperienza del Museo Civico Archeologico di Bologna*, «Disegnare con...», 4, 8, 80-89.
- NICOLAE C., NOCERINO E., MENNA F., REMONDINO F. 2014, *Photogrammetry applied to problematic artefacts*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives», 40, 5, 451-456 (<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014>).
- PARRY R. 2013, *Museums in a Digital Age*, Abingdon-on-Thames, Routledge.
- PORTER S.T., HUBER N., HOYER C., FLOSS H. 2016, *Portable and low-cost solutions to the imaging of Paleolithic art objects: A comparison of photogrammetry and reflectance transformation imaging*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 10, 859-863 (<http://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.07.013>).



- REMONDINO F. 2011, *Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning*, «Remote Sensing», 3, 6, 1104-1138 (<https://doi.org/10.3390/rs3061104>).
- RONGA I. 2014, *Multimodalità del sistema nervoso*, «AlphaEx», 10 ([https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/30350/1/APhEx\\_10\\_2014\\_Ronga.pdf](https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/30350/1/APhEx_10_2014_Ronga.pdf)).
- SCHAICH M. 2013, *Combined 3D scanning and photogrammetry surveys with 3D database support for archaeology & cultural heritage*, in D. FRITSCH (ed.), *Photogrammetric Week '13*, Berlin, Herbert Wichmann Verlag, 233-246.
- STIGLIC N., VINER R.M. 2019, *Effects of screentime on the health and well-being of children and adolescents: A systematic review of reviews*, «BMJ open», 9, 1, e023191.
- VERMEEREN A.P., CALVI L., SABIESCU A., TROCCHIANESI R., STUEDAHL D., GIACCARDI E., RADICE S. 2018, *Future museum experience design: Crowds, ecosystems and novel technologies*, in A. VERMEEREN, L. CALVI, A. SABIESCU (eds.), *Museum Experience Design*, Cham, Springer, 1-16.
- VURPILOT E. 2017, *The Visual World of the Child*, London, Routledge.

## ABSTRACT

The aim of this paper is to explore the interaction between design and archaeology in building Museum engagement experiences. In particular, a case study from the Museo Archeologico Nazionale di Napoli (MANN) will be presented. This study was carried out as part of OBVIA - Out Of Boundaries Viral Art Dissemination, a joint public engagement project sponsored by the Museum and partners such as the Università degli Studi di Napoli "Federico II" and the Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli". The target of the project was to stimulate innovative communication and promotion actions. Specific research activities carried out by the Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale dell'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", were dedicated to the development of Experience Design strategies for museum engagement and audience development. This study resulted in the creation of kits to be used during hands-on laboratories for children. The kit 'Museum Details' focused on the observation and reproduction of details of archaeological artifacts exhibited in the Museum. These kits included a map, instruments for detailed observation, moulding clay and casts to create 3D reproductions of original archaeological details. The necessity of a high detailed reproduction of small features of archaeological findings was an opportunity to experiment with the acquisition of accurate 3D models. In particular, the work carried out by Mnemosyne3D focused on five findings from the Magna Graecia collection. The main challenge was to detect sub-millimetric details on a reflecting surface. Photogrammetry was chosen as method for 3D scanning, a structure from motion acquisition technique. The post processing, through 3D sculpting and CAD 3D software, aimed to enhance the features of the models in order to make them suitable for casting and plastic reproductions.

PARMAUMENTATA. RICERCA ARCHEOLOGICA,  
AUGMENTED REALITY E USER EXPERIENCE  
NELLA RICOSTRUZIONE DEL PAESAGGIO URBANO DI PARMA

1. IL PROGETTO *PARMA CITTAMENTATA*

Le ricerche archeologiche sull'Emilia Romagna trovano da ormai più di un decennio il loro serbatoio naturale nel Programma *S.F.E.R.A. Spazi e Forme dell'Emilia Romagna Antica*, che promuove azioni di ricerca, didattica e terza missione rivolte ad ampio spettro al patrimonio archeologico della regione nella prospettiva di stabilire e consolidare un filo diretto tra ricerca sul campo, archeologia sostenibile, cultura d'impresa archeologica e sviluppo del territorio. La progressiva sedimentazione e successiva sistematizzazione anche digitale dei dati sta facendo affiorare con precisione crescente la fisionomia insediativa delle città e dei territori lungo la via Emilia e nell'entroterra appenninico, indagati alternativamente con gli strumenti dello scavo, del survey, del rilievo e della cartografia urbana e territoriale, delle nuove tecnologie applicate all'archeologia.

In questa cornice, il Progetto *ParmAumentata* nasce all'interno del più ampio Progetto *Inter Amnes*<sup>1</sup> come proposta di individuazione di modalità innovative di fruizione diffusa dei beni culturali, coniugando le necessità di raccolta analitica dei dataset 3D con l'alta divulgazione dei risultati della ricerca previo coinvolgimento di cittadinanza e stakeholder<sup>2</sup>. Il progetto è stato realizzato nella cornice istituzionale di *Parma Capitale Italiana della Cultura 2020+21* nella prospettiva di un contributo esplicito dell'archeologia alla ricca offerta del Comune di Parma, nel solco della collaborazione già avviata per le celebrazioni dei 2220 anni dalla fondazione della colonia di

<sup>1</sup> *Parma CittAumentata* (bando ThinkBig! 2019 LUD e Fondazione Cariparma) nasce su scala urbana in correlazione con il più esteso progetto *Inter Amnes: Archeologia e Reti di valorizzazione fra Parma e l'Appennino (Valli di Parma, Enza, Baganza)* (bando Reti d'Arte 2017 Fondazione Cariparma) ed è coordinato operativamente da Filippo Fontana e Francesco Garbasi e diretto da Alessia Morigi nell'ambito del *Programma S.F.E.R.A. Spazi e Forme dell'Emilia Romagna Antica*, con sede presso il Dipartimento di Discipline Umanistiche, Sociali e delle Imprese culturali dell'Università degli Studi di Parma.

<sup>2</sup> La realizzazione del progetto ha coinvolto un team multidisciplinare composto dagli archeologi dell'Università di Parma impegnati nel programma di ricerca S.F.E.R.A. e responsabili dell'elaborazione del progetto, del coordinamento scientifico e operativo, della ricerca documentale e della produzione dei contenuti. La gestione degli aspetti digitali è stata curata da Alessandro Gallo per Arternative, che ha seguito la programmazione e l'interfaccia grafica. La modellazione 3D è stata affidata, per la loro esperienza in ambito archeologico in collaborazione con CNR-ITABC (oggi ISPC), agli arch. Fabiana Carboni e Maria Claudia Piccioli. Il marchio *CittAumentata* è stato registrato dalla start-up ArcheoVea Impresa Culturale.

Parma e per l'inaugurazione del nuovo allestimento del ponte antico (MORIGI, QUINTELLI 2018).

Le potenzialità dell'Augmented Reality (AR) applicata all'archeologia sono ampiamente note e oggetto di diverse sperimentazioni atte a verificarne le modalità di interazione con l'utente. Tra le principali esperienze caratterizzate da una fruizione outdoor, PugliaReality+, con contenuti di taglio archeologico; Liguria Heritage, incentrata sulla fruizione in AR di racconti e strumenti a corredo di siti di interesse monumentale; Humarker, rivolta all'integrazione di contenuti ad inquadramento di opere d'arte<sup>3</sup>. In questo panorama *CittAumentata* offre un esempio delle possibilità espressive, comunicative e di ausilio alla ricerca offerte dalla tecnologia AR applicata ai beni archeologici e alle ipotesi di ricostruzione dei paesaggi urbani antichi. Nello specifico, sulla scia delle esperienze maturate nello scorso decennio che hanno interessato diversi progetti di ricerca (DE PAOLIS 2012, 121-132; COMMUNICATION STRATEGIES LAB 2012; LA VALLE 2017; i contesti applicativi in STRICKER *et al.* 2002, 52-59; BONACINI 2014), sono evidenti gli elementi di innovazione che segnano l'esperienza di *CittAumentata* soprattutto nei termini della user experience, della scalabilità e della fruibilità in contesti anche periferici, al di fuori delle aree maggiormente servite in termini di copertura dati.

Tra i contributi innovativi si segnala l'elaborazione di un protocollo per la creazione dei contenuti 3D, che individua nell'interfaccia utente le modalità di accesso ai diversi livelli di approfondimento degli stessi, strutturato secondo questa sequenza: acquisizione di materiale grafico e fotografico relativo ai materiali impiegati e, dove disponibile, al rapporto spaziale degli edifici con il tessuto insediativo; creazione delle texture, preferenzialmente sulla base del rilievo dei materiali antichi; individuazione della fase da selezionare per la ricostruzione in base ai dati disponibili; georeferenziazione con adattamento dei livelli, per i quali si segnalano le quote corrette, ma che vengono normalizzati al piano attuale, con potenziamento della compatibilità con la cortina edilizia contemporanea attraverso l'individuazione di prospettive idonee. Standardizzare processi di immissione e fruizione dei dati, calibrati per essere installati sulla gamma più ampia possibile di device e spendibili in differenti condizioni ambientali, permette inoltre di garantire la scalabilità dello strumento su contesti vari ed eterogenei e di declinarne le potenzialità anche in termini di terza missione.

Lo strumento digitale, un'applicazione disponibile per IOS e Android, concentra le sue funzionalità sull'aspetto didattico e immersivo della user

<sup>3</sup> Cfr., rispettivamente, <https://www.carraro-lab.com/portfolio-item/puglia-reality> del 2011; <http://www.liguriaheritage.it/heritage/it/app.do> del 2014, non più disponibile sugli store; <http://humarker.com/> del 2018.

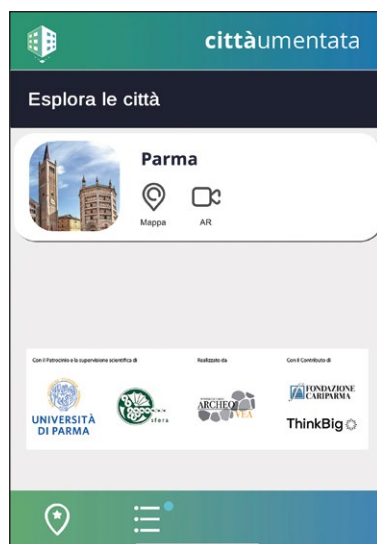


Fig. 1 – L'interfaccia grafica dell'app *CittAumentata*.

experience coniugandola con la gamification (GEROIMENKO 2019) e la presenza di molteplici livelli di approfondimento dei contenuti. A questo si associa la parte di back end dove sono raccolti e organizzati i dati relativi ai modelli 3D che si prestano ad essere ordinati su cloud e resi disponibili in open data. La scalabilità dell'applicazione configura inoltre la possibilità di individuare una semplice modalità di traduzione e disseminazione dei risultati delle molteplici campagne di scavo archeologico che prevedono un'elaborazione dei risultati in 3D e che potrebbero essere diffusi ad un vasto pubblico attraverso uno strumento semplice e immediatamente disponibile nonché slegato da un contesto territoriale specifico.

Il funzionamento dell'applicazione si basa su un'interfaccia grafica strutturata per essere funzionale all'esigenza di scalabilità del progetto: modulare e organizzata in blocchi implementabili (Fig. 1). La pagina iniziale presenta in maniera sintetica, schematica e immediatamente riconoscibile l'elenco dei contesti per i quali sono, attualmente, disponibili i contenuti in AR di libera fruizione. Per ogni scheda si è scelto di sottolineare, sia graficamente sia nelle modalità di accesso ai contenuti, i due aspetti cardine dell'operazione, ovvero la georeferenziazione e l'attivazione della modalità di visione tramite AR. Questa duplice modalità permette agevolmente un accesso mediato ai singoli modelli che si vogliono richiamare tramite il pulsante AR e quindi l'accesso automatico alla fotocamera del device, ovvero attraverso un'esplorazione

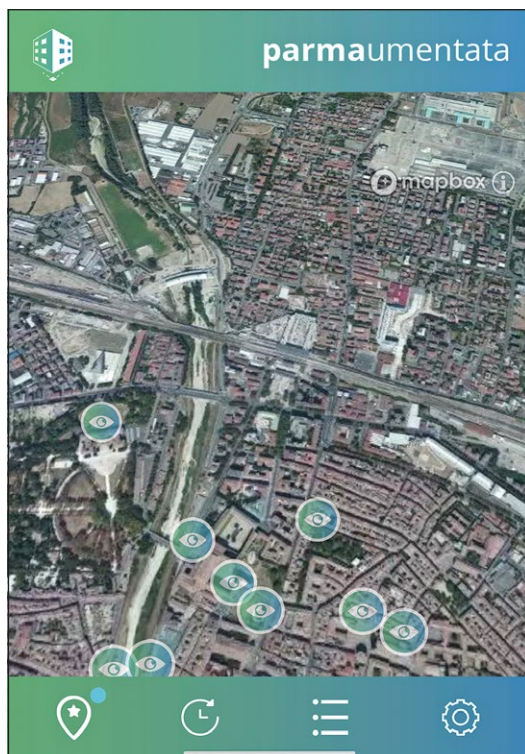


Fig. 2 – I modelli georeferenziati sulla base cartografica compongono gli itinerari tipologizzati su base cronologica e accessibili tramite il cursore temporale.

guidata del contesto a mezzo di itinerari, tipologizzati per categoria cronologica, che conducono l'utente lungo una survey segnalando, tramite il GPS del dispositivo, i punti di interesse. Gli aspetti di georeferenziazione sono centrali non solo per quanto riguarda l'impostazione del lavoro e le modalità di ordinamento dei dati, ma anche per configurare una user experience che comunichi l'effettiva stratificazione del contesto di riferimento, nel caso in esame il centro urbano della città di Parma, con un cursore all'interno della barra di navigazione (Fig. 2) che categorizza cronologicamente i contenuti.

L'interfaccia, volutamente semplice e minimale, permette la gestione della base cartografica, sviluppata a partire da OpenStreetMaps nelle modalità, ad ora, di ortofotocarta, cartografia schematica stradale e un livello di combinazione delle due visualizzazioni. Su tale funzionalità si prevede inoltre l'implementazione di basi cartografiche specifiche raccolte durante la fase di ricerca e fruibili attraverso WMS quali, ad esempio, quelle inerenti la cartografia



storica e tematica<sup>4</sup>. La fruizione, infine, può avvenire accedendo direttamente alla libreria dove scorrere le schede relative a singoli modelli e monumenti ricostruiti; da ogni scheda è possibile interfacciarsi alla georeferenziazione del dato sul livello cartografico, al relativo contenuto AR o all'esplorazione del semplice modello 3D. Un ulteriore livello consente l'accesso, per ogni monumento, a informazioni specifiche che permettono l'approfondimento e la contestualizzazione dei dati attraverso un corredo iconografico e bibliografico valorizzato dalla possibilità di speakeraggio dei testi.

A.M.

## 2. CONTESTO ARCHEOLOGICO E USER EXPERIENCE

Dal punto di vista metodologico è stato elaborato un processo con diretta corrispondenza fra l'attività di ricerca, l'ordinamento dei dati e la ricaduta di alta divulgazione che rappresenta una delle finalità dello strumento app. I contenuti che sono stati predisposti per inaugurare l'app *CittAumentata* rappresentano la sintesi delle survey urbane programmate all'interno del progetto *Inter Amnes* a documentazione e rappresentazione degli aspetti che hanno maggiormente caratterizzato le stratificazioni del tessuto urbano della città di Parma (BANZOLA 1978; DA MARETO 1978; CONFORTI 1979; GUZZON 1995; BERTINI, BIANCHI 2003; MAMBRIANI 2006; ADORNI 2008; CATARSI 2009; MORIGI 2009; MARINI CALVANI 2012; GELICHI, GRECI 2013; MORIGI 2016). Lo spoglio della documentazione, ad integrazione del lavoro di raccolta dati sul campo, ha permesso di isolare contesti monumentali significativi e iconici adatti a sintetizzare gli elementi di continuità insediativa del centro storico (MORIGI 2014), dalla fondazione della colonia romana nel 183 a.C. fino alle distruzioni intervenute durante l'ultimo conflitto mondiale, passando attraverso le tappe della città medievale e ducale.

La potente stratificazione urbana che caratterizza la città di Parma ha, nel corso dei secoli di continuità di vita dell'abitato, fortemente obliterato le testimonianze architettoniche e urbanistiche antiche, apprezzabili solo attraverso l'analisi topografica anche a causa degli importanti livelli alluvionali attestati dai dati archeologici (DALL'AGLIO 2000; 2009, 566; CATARSI 2004, 34; CATARSI *et al.* 2013, 27; LOCATELLI *et al.* 2013). La ricostruzione dei cinque edifici antichi accolti all'interno dell'applicazione ha richiesto il superamento degli ostacoli più significativi richiedendo non solo la preventiva raccolta e sistematizzazione dei dati stratigrafici noti, ma anche un riesame critico del loro inquadramento tipologico e urbanistico nella fisionomia di Parma romana

<sup>4</sup> Di riferimento i fondi documentali usati per l'estrazione della cartografia poi georeferenzata. Fonti: ASPr, Archivio di Stato di Parma: fondo Catasto Cessato-1814; cartografia storica-“Mappe e disegni” ASPr, Carta Topografica del Ducato-1828.

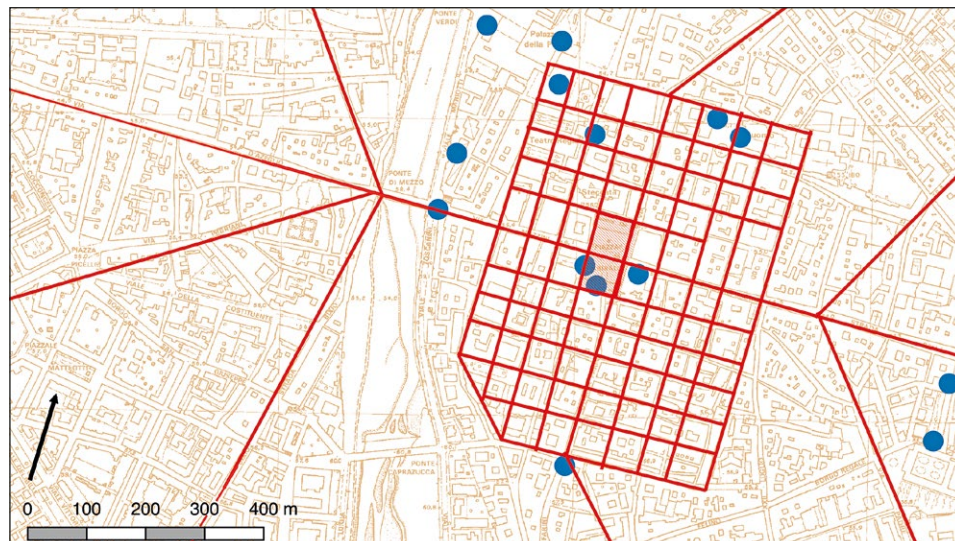


Fig. 3 – Distribuzione dei contesti monumentali oggetto di ricostruzione e fruizione in AR rispetto all'assetto urbano antico (in rosso).

e post-classica (CAPOFERRO CENCETTI 1994; ORTALI 1994; CATARSI 2009; MORIGI 2009, 2016; MARINI CALVANI 2012; GELICHI, GRECI 2013) (Fig. 3).

Si propone a seguire il percorso critico che ha istruito le modellazioni poi rifluite nella app.

## 2.1 *Capitolium*

La lettura topografica (DALL'AGLIO 2000; MARINI CALVANI 2012, 12) della forma urbana suggerisce una continuità fra il *forum* della colonia di Parma e l'attuale piazza Garibaldi. I dati archeologici e i rinvenimenti, effettuati fra il 1920 e il 1953, confortano questa ipotesi. I primi ritrovamenti (CATARSI 2009) che hanno messo in luce il mosaico pavimentale c.d. del Centauro, interpretato come parte della decorazione pavimentale della Basilica, insieme al ritrovamento, nel 1924, del tratto di pavimentazione stradale pertinente al *cardo maximus* lungo il lato orientale di piazza Garibaldi, hanno fornito gli elementi per proporre uno sviluppo planimetrico dell'area forense concorde con le proporzioni teorizzate dalle prescrizioni antiche (VITR., *De Arch.* V, 1, 2). Nello stesso anno, inoltre, il rinvenimento di un edificio porticato nelle immediate adiacenze del tratto di pavimentazione ha fatto ipotizzare un suo sviluppo lungo il lato S del Foro.

Nel settore sud-occidentale, dove ora sorgono gli edifici della chiesa di San Pietro e della sede della Cassa di Risparmio, un primo ritrovamento del



Fig. 4 – Modello sviluppato in AR del *Capitolium* rapportato alla cortina edilizia della piazza.

1953 aveva evidenziato, a -4,30 m dal piano attuale, i resti di un imponente podio di quattro corsi di blocchi lapidei riquadrati con una modanatura a *cyma reversa* (MONACO 1957, 231-240). La datazione su base stilistica, orientata al II sec. a.C., è stata confermata dai dati stratigrafici raccolti in occasione dei lavori presso la Cassa di Risparmio (MARINI CALVANI 2012) fra il 1988 e il 1992. Sono infatti stati individuati elementi di decorazione architettonica, fra i quali un frammento di sima fittile insieme a contrappesi da telaio, *thymiateria* e *loutheria*; l'insieme di questi elementi delinea la presenza di un'area dedicata al culto (di Minerva stando a MARINI CALVANI 2012, 55) caratterizzata, a partire dal II secolo, da una struttura templare di impianto etrusco-italico. Gli elementi di decorazione architettonica, i frammenti di lastre di rivestimento, di antefisse e il frammento di sima, dialogano direttamente con i rivestimenti fittili dei templi lunensi (MARINI



Fig. 5 – Modellazione 3D texturizzata del peristilio della *domus* c.d. degli Stucchi.

CALVANI 2012); il dato permette di ipotizzare un coinvolgimento diretto nella committenza di Marco Emilio Lepido, in qualità di membro della commissione triumvirale, così come a Luni. Nel medesimo scavo presso la Cassa di Risparmio affiorano le fondazioni, in muri di sesquipedali, di un podio in una posizione affiancata al *Capitolium* e pertinente una fase più tarda, dell'ultimo quarto del I sec. a.C., che coincide con la rifondazione e la monumentalizzazione augustea della colonia *Iulia Augusta Parmensis* (MARINI CALVANI 2012, 132).

La qualità dei dati disponibili, la possibilità di identificare diverse classi di materiali per l'elaborazione della texture, la compatibilità del modello georeferenziato con gli edifici contemporanei, hanno candidato il *Capitolium* alla ricostruzione in realtà aumentata (Fig. 4).

F.F.

## 2.2 *Domus*

I lavori del 1982 all'interno della Cattedrale (BIANCHI, CATARSI 2004, 34-39) hanno individuato a circa 4 m di profondità dal pavimento un reticolato di strutture di fondazione in ciottoli; di fronte si imposta una vasca costituita da basoli, disposti a semicerchio sul fondo, con la relativa sponda in frammenti di laterizio. Dalla struttura, un probabile bacino di raccolta di acque piovane collocato in un *hortus* o un peristilio, è visibile l'uscita di un canale scolmatore a coppi rovesciati con copertura in laterizi; a questo



contesto si associano i frammenti di arredi marmorei rinvenuti nella medesima zona. L'evidenza degli interventi di ripristino del canale scolmatore attesta una continuità di vita dell'edificio. Accanto allo spazio indentificato come *hortus* è stato rinvenuto un portico dal pavimento in battuto bianco di scaglie litiche e malta; più a N, invece, si collocano i resti di un vano affiancato da un corridoio. La documentazione stratigrafica permette di datare la *domus* al I sec. a.C. con uno schema planimetrico tipico della “*domus ad atrio e peristilio*”.

Su queste strutture una pesante coltre alluvionale, depositata sul finire del II sec. d.C. da una delle tracimazioni del torrente Parma, determina la fine dell'edificio sul quale si imposta, sovrapponendosi al deposito, una seconda *domus* riferibile alla tarda età imperiale che sfrutta parzialmente le precedenti fondazioni. Un'area, individuata come porticata, ha restituito una colonna rivestita in stucco posata su un doppio basamento lapideo, parte di un peristilio il cui paramento murario di fondo, pervenuto in stato di crollo, risulta costituito da ciottoli e laterizi applicati su grossi strati di malta e da un'ossatura in legno a travi verticali. Il tutto era rivestito da intonaco decorato a pannelli dipinti a marmo *trompe l'oeil*, con cornici realizzate in stucco. Le analisi archeometriche hanno rivelato l'impiego di pigmenti diversi quali calcite, ematite, terra verde, quarzo, goethite e blu egiziano (BIANCHI, CATARSI 2004). Sono state inoltre prelevate tracce esigue e frammentarie di un pavimento a tessere musive bianche di una certa grandezza, probabilmente intercalate da lastre marmoree ritrovate nelle macerie. Grossi pilastri in mattoni, collocati alle spalle dell'area porticata, fanno supporre la sopraelevazione dell'edificio.

La fase di II-III sec. d.C. della *domus* offre, nella documentazione di scavo, una grande quantità di dati materici che hanno permesso di ricostruire in maniera estremamente suggestiva il peristilio anche nei suoi termini spaziali. La qualità del materiale e le caratteristiche della deposizione inducono a supporre che l'abitazione, *domus* c.d. degli Stucchi, fosse già in parziale stato di abbandono al momento della sua distruzione per la quale si ipotizza il concorso di un evento tellurico con conseguente esondazione del torrente. Gli scavi hanno inoltre messo in luce un tesoretto monetale che fornisce un interessante *terminus ante quem* per la datazione dell'evento catastrofico non oltre gli inizi del V sec.

Dal punto di vista della user experience è stata qui sperimentata una visione che pone il fruitore all'interno dell'edificio stesso (Fig. 5), prediligendola rispetto alla visione dall'esterno abitualmente proposta nelle tradizionali esperienze di AR, in ragione di un più elevato grado di compatibilità con il complesso della Cattedrale e al fine di valorizzare i dati disponibili con un focus sull'impianto decorativo.

F.G.



### 2.3 Anfiteatro

I resti dell'anfiteatro emersero nel 1846 durante i lavori, seguiti da Michele Lopez, di ampliamento del Collegio Maria Luigia e, più tardi, nel 1933, in occasione della realizzazione di un tronco di fognatura, fino agli ultimi scavi condotti in Palazzo del Campo. Vennero scoperti quattro tratti di un muro ad andamento curvilineo, interpretato come l'anello perimetrale dell'anfiteatro. Parallelamente a questo muro, alla distanza di 3 m, venne individuato un altro muro da cui dipartivano verso l'interno setti murari disposti a raggiera; i setti erano realizzati in pietrame intervallato da corsi di mattoni. I dati raccolti hanno permesso di ipotizzare le misure dell'asse maggiore (135,6 m) e di quello minore (105,2 m), con una capienza di circa 20.000 spettatori (CAPOFERRO CENCETTI 1994, 327). I materiali utilizzati sono pietrame e mattoni e dovevano essere rivestiti di lastre marmoree rinvenute assieme al frammento di una piccola statua decorativa in marmo interpretata come Afrodite.

Si segnala, inoltre, l'epigrafe di II sec. d.C. ritrovata nelle adiacenze dell'area nel 1734 riferita al reziario Vitale, di origine batava, ricordato da un compagno di *ludus gladiatorius* (GREGORI 1984, 340). Le dimensioni occupano l'area dove oggi sorgono Palazzo Marchi a N, borgo Lalatta e l'imbocco di strada Nuova a E, il Collegio Maria Luigia a S e via Fra Salimbene a O, a ricostruire un edificio che si distingue per dimensioni dagli altri esemplari noti in Emilia Romagna. La tipologia edilizia lo qualifica come un'arena "fuori terra" costruita da setti radiali dove un sistema di scale, non documentate, doveva permettere l'accesso dal peribolo, largo 3 m, alle quote superiori dell'edificio. La cavea, invece, si presenta impostata su quattro anelli murari, due dei quali interni a garantire il raccordo con i setti radiali e spessi 1,54 m. I rilievi, condotti nelle due operazioni di scavo, hanno documentato a una quota di -3,5 m una tecnica edilizia caratterizzata da strati di pietre squadrate e legate con calce alternate a file di laterizi di 16 cm di spessore, con forti affinità con quella documentata per il teatro.

Come quest'ultimo, l'anfiteatro doveva rientrare nella progettazione urbanistica di età augustea (CATARSI 2009, 454) volta alla monumentalizzazione della città con edifici per lo spettacolo: con la loro mole e i ricchi apparati figurativi, teatro e anfiteatro contribuivano infatti a dare un effetto fortemente scenografico alla città sottolineata, nel caso dell'anfiteatro, dal vicino arco trionfale. Il suo aspetto monumentale e imponente lo identifica, fra il VI e il VII secolo, come un luogo di potere e, con ogni probabilità, con la residenza dei duchi e dei gastaldi longobardi (GIUSTESCHI CONTI 1962, 209). Il noto passo di Agazia (DALL'AGLIO 1987, 57), riferito all'agguato teso, nel 552, dai Franchi agli Eruli di Fulcari, testimonia la conservazione ancora nel VI secolo dell'imponente struttura in un'area periurbana caratterizzata dalla presenza di sepolture e sufficientemente lontana dal limite urbano da non

essere integrata, sia fisicamente che per il riuso di materiali, negli interventi di manutenzione della cerchia muraria, così come il teatro.

Tra il 1158 e il 1162 l'imperatore Federico I occupò l'area adattando la struttura a una sede palaziale richiamata nelle fonti diplomatiche come *palacium de arena* (AFFÒ 1793, 214). Oggetto di disposizione e prescrizioni manutentive in epoca comunale, l'edificio incontra il più totale degrado a partire dal XIV secolo per arrivare a una totale dispersione degli elementi identificativi nel pieno Cinquecento (CAPOFERRO CENCETTI 1994, 326).

Sono attualmente in corso, a seguito delle perlustrazioni urbane istruttorie alla ricostruzione in RA, rilievi strumentali presso le fondazioni di Palazzo Marchi che hanno messo in luce, oltre a diversi materiali laterizi romani di reimpiego, anche murature a quote coerenti con quelle che hanno restituito i resti dell'edificio e con andamenti ellissoidali in potenziale connessione con le strutture antiche. I dati emersi hanno permesso di rivedere le ipotesi ricostruttive correnti con una proposta che tenga conto della qualità e texture dei materiali individuati.

F.F.

## 2.4 Teatro

I resti del teatro romano affiorarono in una serie di rinvenimenti. Nel 1844 lungo l'attuale via Farini, durante i lavori per la realizzazione della Galleria delle Fontane, il nuovo acquedotto, diretti da Michele Lopez; nel 1937 in un tratto dell'attiguo borgo Felino, durante i lavori fognari diretti da Giorgio Monaco (CATARSI 2009, 415); nel 1972 nel piazzale Sforza di Santafiora in occasione di alcuni saggi funzionali alla costruzione della palestra della scuola Sanvitale. Da questi numerosi interventi è stato possibile trarre una documentazione che identifica, alla profondità di circa 4 m, la presenza di sostruzioni radiali e concentriche ad arcate, realizzate in conglomerato di malta e ciottoli e con tracce di cocchiopesto e *crustae* marmoree assieme a una tecnica in sesquipedali e malta riferita alle sostruzioni del *pulpitum* (ORTALLI 1994, 298).

Le dimensioni della cavea dovevano essere di 88 m di larghezza sul perimetrale esterno e 23 m all'interno sull'orchestra, con una capienza di circa 10.000 spettatori. Era pertanto un teatro destinato ad accogliere non solo gli abitanti di Parma, ma anche tutti coloro che abitavano nel suburbio. Un piano in cocchiopesto con inserti marmorei caratterizza anche la pavimentazione dell'orchestra, mentre è ipotizzabile il legno per il piano del palcoscenico. Un tratto di fondazione lineare, riferita alla *scenae frons*, permetteva l'impostazione architettonica dell'alzato per la quale è intuibile una ricca articolazione stando ai materiali decorativi rinvenuti. Maschere teatrali, frammenti statuari iconici e ornamentali, *oscilla* marmorei assieme all'epigrafe con dedica a *L. Mummius* in associazione a una nutrita serie di frammenti di marmo, in prevalenza lunense, permettono di ricostruire un *pulpitum* scandito da piccole

colonne e capitelli e una *scenae frons* con colonne lisce e scanalate, capitelli corinzi con trabeazioni e finti lacunari (SANTORO 2009, 527). Le caratteristiche architettoniche, urbanistiche e materiche permettono di ricondurre, al pari dell'anfiteatro, la costruzione del teatro all'opera rifondativa di Augusto (ORTALLI 1994, 291) successivamente agli episodi che, durante la guerra civile, interessarono la città e, in particolare la classe dirigente filo-senatoria gravemente colpita da Lucio Antonio.

Una revisione dell'edito, incrociata con il rilievo dei numerosi elementi decorativi noti ha permesso di rimodulare l'ipotesi ricostruttiva dell'edificio. Anche in questo caso si è proceduto, come per la *domus* c.d. degli Stucchi, a individuare un punto di fruizione interno all'orchestra del teatro, utile a valorizzare gli apparati decorativi e la struttura che, dalla più tradizionale prospettiva esterna, si presentava invece schiacciata e appiattita sull'attuale cortina edilizia di via Farini.

F.G.

## 2.5 Ponte

Il ponte lungo il tratto urbano della via Emilia, unico monumento antico ancora in parte visibile a Parma, sopravvive ora con due arcate, inglobate nella nuova sistemazione del sottopasso di via Mazzini-piazza Ghiaia<sup>5</sup>, individuate già nel 1858 dall'ingegnere comunale Martelli durante la demolizione dell'edificio medievale del c.d. Torriazzo. Ulteriori lavori edili nelle immediate adiacenze portarono nel 1966 allo splatemento del tratto stradale e alla messa in luce delle imponenti arcate rilevate in numero di 10, larghe tra i 9 e gli 11 m ciascuna e realizzate con grossi blocchi di pietra di spessore e lunghezza compresi tra 50-90 cm. In precedenza, il monumento, inglobato nella stratificazione urbana della città a partire dal XIII secolo, era stato defunzionalizzato a seguito di una grande alluvione, datata al 1177, che aveva causato lo spostamento del corso del torrente Parma verso O liberando così il vecchio greto, un grande spazio invaso dalla ghiaia sul quale si innestò l'attuale polo mercatale di piazza Ghiaia (MORIGI 2020).

Gli eterogenei materiali, alcuni di riutilizzo, così come i leganti che compongono pile e arcate suggeriscono l'intervento di numerosi rimaneggiamenti

<sup>5</sup> Lo spazio è stato recuperato, dopo anni d'incuria, grazie al protocollo promosso da Comune di Parma, MiBACT e Università di Parma *Aemilia 187 a.C.*, poi ParmaUniverCity quale hub universitario aperto alla comunicazione al pubblico della ricerca dell'Università di Parma. Il settore è stato inaugurato nel 2018 con una settimana di manifestazioni, che hanno interessato l'area archeologica e lo spazio espositivo, racchiuse nella rassegna "Ponte romano. Un ponte tra Università e città. Manifestazioni per l'inaugurazione dello spazio Aemilia 187 a.C." (Parma, 7-14 ottobre 2018), a cura di Alessia Morigi, in collaborazione con Filippo Fontana e Francesco Garbasi nell'ambito della Rassegna "S.F.E.R.A. Pubblica. Archeologia, Comunità, Contemporaneità" entro il programma "S.F.E.R.A. Spazi e Forme dell'Emilia-Romagna Antica" (MORIGI 2018).

e restauri nel corso del tempo. La tradizione erudita locale, a partire da padre Ireneo Affò, assegna la costruzione del ponte in epoca augustea alla fine del I sec. a.C., per poi segnalare un rimaneggiamento all'epoca di Teodorico all'inizio del VI sec. d.C. sebbene nelle fonti siano attestati solo suoi interventi al rifacimento delle cloache e delle canalizzazioni (CASSIOD., *Var*, VIII, 29). Gli scavi realizzati fra 2009 e 2010 (LOCATELLI *et al.* 2013) hanno apportato nuovi dati: sono infatti emerse le strutture in pali lignei che componevano un attracco e un argine di difesa in prossimità dell'attraversamento del torrente, per una datazione intorno al 211 a.C. Nell'area a S dello scavo, adiacente a via Mazzini, è quindi affiorato un pilone di ponte in mattoni risalente alla prima età imperiale, che i dati archeologici permettono di riferire ad una struttura di attraversamento, crollata durante l'alluvione nello scorcio del II sec. d.C. e precedente a quella attualmente in vista. In questa cornice, l'attuale ponte in pietra, con i suoi elementi di riutilizzo, potrebbe rappresentare il rifacimento della più antica struttura per l'attraversamento del torrente.

In epoca medievale il ponte venne sostituito da un altro manufatto in muratura, il *pons Solariorum* o *Mocum*, costruito nel 1287 poco più a monte. Le arcate vennero usate come cave di materiale da costruzione oppure tamponate da edifici più recenti, con l'eccezione di una sola rimasta aperta a garantire il passaggio. Nel 1547 il duca Pier Luigi Farnese fece abbattere le case sorte sul ponte di pietra e lo fece prolungare, ripristinando così l'originario percorso della via Emilia. Dal punto di vista strutturale, i rilievi elaborati negli anni Sessanta evidenziano una successione di dieci arcate, una delle quali, la settima da E, risulta distrutta durante l'ultimo conflitto mondiale. Il profilo a schiena d'asino suggerito dal graduale innalzamento del piano stradale da E a O e la localizzazione del nodo di irraggiamento del sistema itinerario occidentale al centro dell'attuale alveo del torrente Parma inducono all'ipotesi che il ponte proseguisse ancora verso ponente.

Sotto il profilo morfologico, le arcate sono a tutto sesto, fatta eccezione per l'ottava che ha probabilmente subito rimaneggiamenti, e restituiscono ciascuna un'ampiezza compresa tra i 9 e gli 11 m. La tecnica edilizia prevede la messa in opera di grossi blocchi di pietra di spessore e lunghezza variabili (50-90 cm) intercalati da pietrame di pezzatura minore con inzeppature di ciottoli. Per quanto concerne le pile, la documentazione pervenuta inquadra solo le due più orientali e quella visibile nel sottopassaggio di strada Mazzini. Tutte le tre arcate sono caratterizzate da un rostro frangiflutti posto verso monte. Le prime due sono realizzate con un nucleo interno in conglomerato cementizio rivestito da grossi ciottoli con blocchi di pietra squadrati, la maggior parte di riutilizzo, inseriti nei punti di maggior usura, in particolare nel rostro frontale. La terza pila, più occidentale, presenta un nucleo interno rivestito di grossi blocchi di pietra squadrati. La sede stradale in corrispondenza della prima arcata misura 4,6 m per poi stringersi progressivamente a 3,8 m.

Gli studi in corso hanno permesso il rilievo puntuale del paramento con acquisizione di numerosi dati sulla texture del modello la cui visione è stata traslata, alla quota corretta, di circa 70 m verso O lungo l'allineamento fornito dalle pile rinvenute. Questa soluzione non solo ha consentito l'ottimizzazione del rapporto ottico tra il ponte e la stratificazione urbana contemporanea, ma ha anche fatto emergere la natura molto articolata della struttura, proiettata a raccordo con gli assi viari in uscita verso Luni e verso Cremona. Le informazioni raccolte potranno utilmente interfacciarsi con quelle attese dall'edizione dello scavo della Ghiaia, che consentirà di fare ulteriore luce sulle fasi di occupazione dell'area e sulla sequenza insediativa dei ponti che si sono avvicendati a scavalco del torrente.

A.M.

### 3. GEOREFERENZIAZIONE DEI MODELLI

I dati acquisiti dall'indagine sui documenti e sui monumenti, messi a sistema secondo il protocollo, hanno permesso di ricomporre la pianta e lo sviluppo volumetrico degli edifici coniugando le fonti documentali (fondi "Mappe e Disegni", "Chiese e Conventi", "Fabbriche Ducali" - ASPr), quelle archeologiche e le numerose attestazioni iconografiche disponibili per gli edifici medievali e post-medievali (CATARSI 2004, 2009; MORIGI 2009, 2016; MARINI CALVANI 2012). Una campagna di rilievo topografico e fotogrammetrico è stata finalizzata alla costruzione della piattaforma di dati necessari per la georeferenziazione dei modelli e la loro corretta restituzione in scala in base ai punti di vista determinati lungo il percorso. Questa fase del processo di implementazione delle informazioni ha rappresentato un momento particolarmente sensibile non solo per il necessario posizionamento assoluto delle ricostruzioni, ma anche per l'individuazione di punti-tappa utili alla user experience. Tutti i dati usati per la georeferenziazione, raccolti con l'utilizzo di un GPS topografico, sono stati inseriti all'interno dell'ambiente GIS utilizzato per la loro sistematizzazione entro il progetto *Inter Amnes* (Fig. 6).

A queste informazioni si sono sovrapposte, ove disponibili, quelle relative alle piante e agli ingombri degli edifici, georeferenziando la documentazione d'archivio e sovrapponendola alla CTR 1:5000, così da ottenere un posizionamento e un orientamento preciso dei corpi di fabbrica nonché una precisa indicazione delle fonti a supporto dell'ubicazione (Fig. 7). Il rilievo fotogrammetrico ha inoltre permesso l'elaborazione di modelli 3D degli spazi fisici, dei contesti e degli edifici attualmente esistenti nei siti identificati per il posizionamento dei contenuti AR. La conseguente elaborazione dei dettagli degli elementi del paesaggio esistente predispone l'applicazione per il funzionamento tramite l'immagine target, migliorando così la user experience. La survey urbana è stata presupposto fondamentale anche per la raccolta



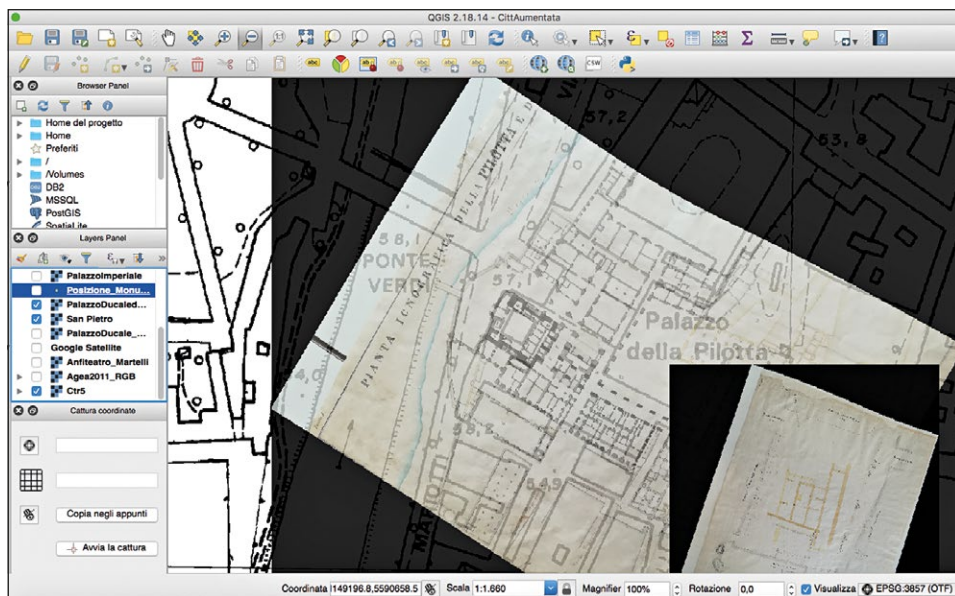


Fig. 6 – La sovrapposizione dei diversi layer georeferenziati con il software QGIS.

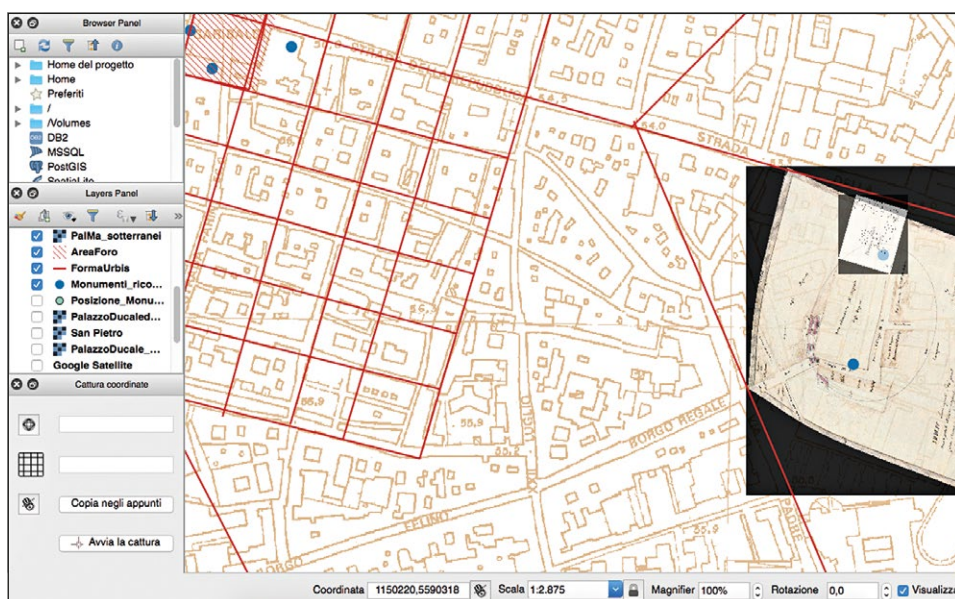


Fig. 7 – Georeferenziazione dei dati in rapporto alla maglia urbana antica (ambiente QGIS).

delle informazioni necessarie all'elaborazione delle texture usate per i modelli ricostruiti. Al fine di rendere i modelli realistici, rispondenti ai dati scientifici e quindi anche di efficace impatto visivo, si è proceduto a raccogliere tramite rilievi fotografici in HD le immagini dei paramenti antichi pertinenti edifici romani, ricavandoli dai lacerti di decorazione e rivestimento (ad es. del teatro, dell'anfiteatro e della *domus* c.d. degli Stucchi) ovvero dalle strutture ancora *in situ* (ponte, *Capitolium*). Nella medesima prospettiva sono state mappate le strutture ancora visibili e stratificate nel tessuto urbano, che sono parte degli edifici in via di ricostruzione in 3D (ad es. della Rocchetta viscontea, del Palazzo Imperiale, di quello del Vescovo Grazia e di quello del Torello). Negli altri casi nei quali questa soluzione non è stata applicabile si è lavorato sulla riproduzione della morfologia dell'edificio, così come testimoniata dalle fonti iconografiche.

Dare evidenza, nella restituzione grafica del modello 3D, alle fonti e ai confronti che hanno orientato all'ipotesi ricostruttiva proposta rappresenta un *modus operandi* che è parte integrante del processo di elaborazione del protocollo di creazione dei modelli. Partendo dalla raccolta dei dati fino alla loro georeferenziazione sul campo, non si può prescindere dall'esibizione dei presupposti che hanno consentito l'elaborazione della restituzione 3D come ipotesi ricostruttiva (FERDANI *et al.* 2019, 23).

I modelli degli edifici romani, realizzati in occasione delle celebrazioni per i 2200 anni dalla fondazione della città di Parma<sup>6</sup>, sono stati reinterpretati coerentemente con il protocollo elaborato, al quale si aggiunge il processo di ottimizzazione dei poligoni. Nel complesso per i 15 modelli realizzati (*Capitolium*, teatro, anfiteatro, ponte, *domus* c.d. degli Stucchi, per l'età romana, Palazzo Imperiale dell'Arena, Palazzo Vescovile, Palazzo del Torello, Chiesa di San Pietro Martire, Rocchetta viscontea per l'ambito medioevale e Torre Civica, Beccherie della Ghiaia, Palazzo Ducale, Palazzo del Giardino, Cavalcavia del Teatro Regio per la città moderna e ducale) in relazione all'output previsto e al tipo di software utilizzato per realizzare l'applicazione, la scelta è stata quella di un approccio essenziale utilizzando una modellazione di tipo low poly. La soluzione è tecnicamente finalizzata alla creazione di asset leggeri dal punto di vista poligonale spendibili all'interno dell'applicativo finale senza generare problemi di calcolo. In questo modo l'app potrà essere fruita dall'utente in modo ottimale, anche in assenza di device particolarmente prestanti e potrà, quindi, essere accessibile a tutti.

F.F.

<sup>6</sup> Nell'ambito delle celebrazioni per Parma 2200-2200 anni dalla fondazione della colonia romana di Parma, in occasione della Mostra "Archeologia e Alimentazione nell'eredità di Parma romana" (Parma, Galleria San Ludovico, 2 Giugno-16 Luglio, 9 Settembre-22 Ottobre 2017), promossa dal Comune di Parma in collaborazione con l'Università di Parma su progetto di Filippo Fontana e Francesco Garbasi e con supervisione scientifica di Alessia Morigi.

#### 4. MODELLAZIONE 3D E SVILUPPO SOFTWARE

Il lavoro di modellazione e sviluppo software si è composto di tre step che hanno scandito la definizione del protocollo per la creazione dei modelli 3D. Dapprima lo studio del materiale raccolto in fase di ricerca ha rappresentato un momento fondamentale per il coordinamento fra le diverse professionalità coinvolte così da permettere l'estrazione e valutazione critica dei dati per la ricostruzione bidimensionale degli elaborati tecnici utili alla modellazione 3D. Questo momento ha previsto la realizzazione *ex novo* delle planimetrie e dei prospetti degli edifici da riprodurre in scala nella prospettiva della successiva elaborazione dei modelli 3D. La predisposizione delle tavole grafiche è stata realizzata in AutoCAD, mentre per quanto riguarda la modellazione 3D ci si è serviti del software 3DStudioMax (Fig. 8). I modelli già esistenti sono stati sottoposti ad un intervento di ottimizzazione poligonale, ovvero di riduzione del peso in poligoni dei modelli in nostro possesso e di rimodellazione degli elementi troppo pesanti.

Un differente trattamento ha invece interessato gli edifici per i quali la ricostruzione è partita da zero muovendo dagli elaborati grafici prodotti con il software di disegno bidimensionale. Una volta importati nel software 3D i riferimenti bidimensionali, si è proseguito alla realizzazione low poly dei modelli, i quali, essendo dotati di un basso dettaglio poligonale, sono stati arricchiti attraverso il texturing realizzato in prima fase all'interno di 3D Studio Max a partire dalla realizzazione delle UVWmap. Una seconda fase,

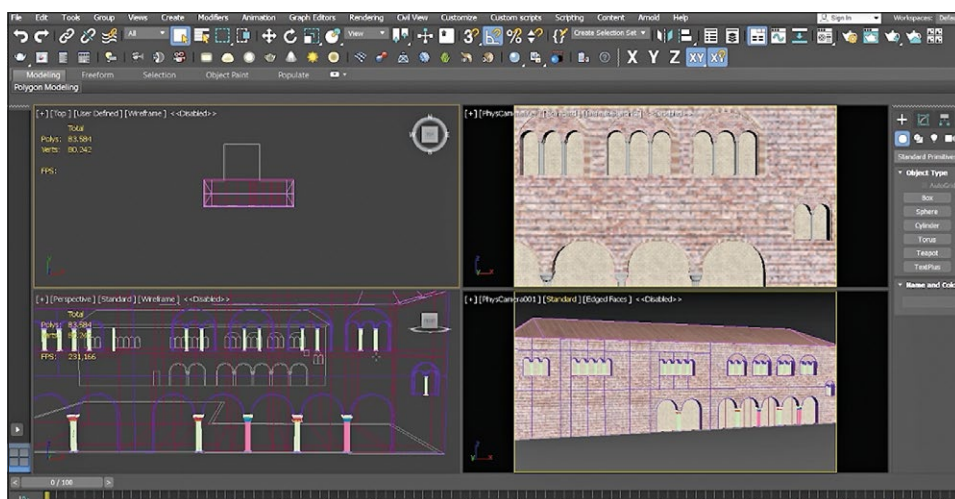


Fig. 8 – Fasi del lavoro di modellazione e restituzione 3D.



Fig. 9 – Lo spazio urbano di piazzale della Pace con il modello 3D di Palazzo Ducale sviluppato in AR.

invece, ha previsto l'ausilio del software Photoshop che ha consentito di proiettare immagini bitmap sulle superfici della geometria tridimensionale di ciascun modello. L'ulteriore alleggerimento dei modelli richiesto dall'applicazione è stato perseguito rendendo visibili solo i lati degli edifici effettivamente apprezzabili al momento della loro georeferenziazione e fruizione da parte dell'utente. Ogni modello, georeferenziato su scala urbana, sarà quindi visibile solo dalle prospettive non inquinate dagli ingombri delle attuali costruzioni e risulterà perfettamente inserito nella stratigrafia urbana.

Dato il contesto di grande potenza stratigrafica, un problema significativo è stato quello delle quote di posizionamento degli edifici. Nel 70% dei casi infatti i modelli, posizionati alle quote originarie, si sarebbero trovati alcuni metri sotto l'attuale piano di calpestio non permettendo la corretta comprensione della loro evoluzione insediativa. Con una licenza imposta dalla necessità di garantire l'originaria consistenza delle evidenze archeologiche e il loro esatto posizionamento, gli edifici sono stati, quindi, riportati alla quota attuale segnalando, nelle informazioni, l'effettiva quota di fondazione. La procedura ha quindi previsto la selezione delle fronti in vista dei rispettivi monumenti ai fini della restituzione in AR (Fig. 9). L'alleggerimento di modelli



per la gestione all'interno dell'applicativo è stato operato in una logica di compromesso con l'esigenza imprescindibile della precisione e della salvaguardia di elementi molto complessi, come ad esempio gli apparati statuari, le modanature o alcuni apparati decorativi particolarmente elaborati, che si è scelto di rappresentare con la proiezione delle relative immagini su superfici piane prive di volume inserite nel modello.

L'applicazione è stata sviluppata con tecnologia ibrida che ha permesso, con una sola versione del codice sorgente, di distribuire l'app sia per i dispositivi Android che per i dispositivi IOS; la soluzione rappresenta una variante del linguaggio nativo che avrebbe imposto la scrittura di due diverse app ed una conseguente minor sostenibilità. La tecnologia utilizzata è Unity, che permette appunto la compilazione ibrida, mentre per l'implementazione dell'AR si è selezionata la libreria grafica Vuforia. Unity ha inoltre messo a disposizione un ambiente di sviluppo che permette di posizionare nello spazio, alla distanza-altezza-angolazione predefinita dal punto noto, i modelli 3D poi caratterizzati con le rispettive texture. Per quanto riguarda la scrittura delle schermate e delle interfacce, il linguaggio di programmazione è JavaScript.

L'applicazione sarà scaricabile gratuitamente dall'AppStore (IOS) e dal PlayStore (Android) e, in questa prima release di sperimentazione, i modelli sono scaricati assieme all'applicazione stessa. Al fine di ridurre le dimensioni dell'app, oltre all'ottimizzazione dei modelli, è prevista la possibilità di download on demand che permette di scaricare i singoli modelli che compongono i diversi contesti al momento del download dell'applicazione. Le implementazioni prevedono, soprattutto pensando alla scalabilità dell'app in altri contesti, di scaricare i soli contenuti relativi al luogo in cui ci si trova, rendendo più semplice l'installazione. Una seconda implementazione prevista consentirà di rendere ancora più snella l'applicazione attraverso la funzionalità di recupero in streaming dei contenuti per ogni contesto AR (modelli 3D, texture, immagini e media di corredo, testi) ospitati all'interno del bucket cloud. In questo modo l'utente potrà, dopo aver scaricato la sola app e selezionato un contesto AR, scaricare successivamente i singoli contenuti di interesse. I contenuti saranno sempre accessibili con un'opzione complessiva così da facilitarne la fruizione educational o mediata dagli operatori turistici anche in assenza di copertura dati.

È stata prevista, dato il contributo GPS ai fini della georeferenziazione, la possibilità di tracking e raccolta di big data così da profilare le modalità di utilizzo dell'app da parte degli utenti con la conseguente opportunità di miglioramento della user experience. La funzionalità sarà attivata una volta esaurita la fase sperimentale per una più agile gestione e testing al netto dei passaggi di accettazione delle privacy policy necessari per la raccolta di big data. Nella medesima ottica di semplicità di utilizzo, i marker utilizzati per garantire il funzionamento dell'app in ogni condizione e per rendere



individuabile il percorso nello spazio sono stati ottimizzati graficamente per essere facilmente riconoscibili dall'utente senza elementi di disturbo e sufficientemente ricchi di caratteristiche per essere intercettati dal motore grafico dell'app ai fini del caricamento del contenuto corretto.

F.G.

ALESSIA MORIGI, FILIPPO FONTANA, FRANCESCO GARBASI  
Dipartimento di Discipline Umanistiche, Sociali e delle Imprese Culturali  
Università di Parma  
alessia.morigi@unipr.it, filippo.fontana@unipr.it, francesco.garbasi@unipr.it

## BIBLIOGRAFIA

- ADORNI B. 2008, *L'architettura a Parma sotto i primi Farnese 1545-1630*, Reggio Emilia, Diabasis.
- AFFÒ I. 1793, *Storia della città di Parma*, II, Parma.
- ARCAGNI S. 2020, *Immersi nel futuro. La realtà virtuale, nuova frontiera del cinema e della TV*, Palermo, Palermo University Press.
- BANZOLA V. (ed.) 1978, *Parma la città storica*, Parma, Cassa di Risparmio.
- BERTINI G., BIANCHI A. (eds.) 2003, *Il Palazzo Vescovile*, Parma, Cassa di Risparmio.
- BIANCHI A., CATARSI M. 2004, *Il museo diocesano di Parma*, Parma.
- BOMBELLES C.R. 1845, *Monumenti e munificenze di Sua Maestà la Principessa Imperiale Maria Luigia Arciduchessa d'Austria, Duchessa di Parma, Piacenza e Guastalla*, Parma-Parigi.
- BONACINI E. 2014, *La realtà aumentata e le app culturali in Italia: storie da un matrimonio in mobilità*, «Il Capitale Culturale: Studies on the Value of Cultural Heritage», 9, 89-121.
- CAPOFERRO CENCETTI A.M. 1994, *Gli anfiteatri romani dell'Emilia-Romagna*, in *Spettacolo in Aquileia e Cisalpina romana*, Antichità Altoadriatiche, 41, Trieste, Edizioni Università di Trieste, 301-313.
- CATARSI M. 2009, *Il contributo dell'archeologia*, in VERA 2009, 367-500.
- CATARSI M., ANGHINETTI C., RAGGIO P., USAI L. 2013, *Presenze longobarde nell'alta pianura parmense fra il torrente Parma e il fiume Enza. Atti del IV Convegno nazionale FederArcheo (Cosenza 2013)* ([http://www.archeobologna.beniculturali.it/publicazioni/2013\\_catarsi\\_longobardi.pdf](http://www.archeobologna.beniculturali.it/publicazioni/2013_catarsi_longobardi.pdf)).
- COMMUNICATION STRATEGIES LAB 2012, *Realtà aumentate: esperienze, strategie e contenuti per l'Augmented Reality*, Milano, Apogeo.
- CONFORTI P. 1979, *Le mura di Parma*, I, Parma, Battei.
- DALL'AGLIO M. 2000, *Il monastero di San Paolo a Parma*, «Felix Ravenna», 4, 153-156, 195-219.
- DALL'AGLIO P.L. 1987, *Problemi storico topografici in Agazia*, «Padusa», 23, 57-65.
- DALL'AGLIO P.L. 2000, *Il disegno urbano di Parma*, in F. BAROCELLI (ed.), *Una città e la storia: Parma attraverso i secoli*, Parma, Comune di Parma.
- DALL'AGLIO P.L. 2009, *Il territorio di Parma in età romana*, in VERA 2009, 555-601.
- DALPOZZO C., NEGRI F., NOVAGA A. (eds.) 2018, *La realtà virtuale. Dispositivi, estetiche, immagini*, Milano-Udine, Mimesis.
- DA MARETO F. 1978, *Chiese e conventi di Parma*, Parma, Deputazione di Storia Patria per le province parmensi.
- DE PAOLIS L.T. 2012, *Applicazione interattiva di realtà aumentata per i beni culturali*, «SCIRES-IT», 2, 121-132 (<http://dx.doi.org/10.2423/i22394303v2n1p121>).

- DI PIETRO I. 2018, *Realtà aumentata per la fruizione museale: risorse culturali o inevitabili invasioni?*, «INTRECCI d'Arte», 7, 117-122.
- FERDANI D., DEMETRESCU E., CAVALIERI M., PACE G., LENZI S., 2019, *3D modelling and visualization in field archaeology. From survey to interpretation of the past using digital technologies*, «Groma», 4, 1-21 (<http://dx.doi.org/10.12977/groma26>).
- GELICHI S., GRECI R. (eds.) 2013, *Andare oltretorrente. Archeologia e storia a Parma*, Parma, Edizioni Monte.
- GEROIMENKO V. (ed.) 2019, *Augmented Reality. Games II: The Gamification of Education, Medicine and Art*, Berlin, Springer.
- GIUSTESCHI CONTI P.M. 1962, *Note e spunti su Parma longobarda*, «Aurea Parma», 44, 207-2015.
- GREGORI G.L. 1984, *Amphiteatralia*, «Mélanges de l'Ecole française de Rome», 96, 338-343.
- GUZZON C. 1995, *Il palazzo dell'Arena: uno dei più significativi edifici di Parma attraverso ricostruzioni e rifacimenti durati quasi duemila anni*, «Archivio Storico per le Province parmensi», 47, 247-261.
- LA VALLE S. 2017, *Virtual Reality*, Cambridge, Cambridge University Press.
- LOCATELLI D., MALNATI L., MARAS D. 2013, *Storie della prima Parma. Etruschi, Galli, Romani: le origini della città alla luce delle nuove scoperte archeologiche*, Catalogo della mostra, Roma, L'Erma Di Bretschneider.
- MAMBRIANI C. 2006, *Il giardino di Parma*, Parma, Cassa di Risparmio di Parma.
- MARINI CALVANI M. 2012, *Ventidue secoli a Parma: lo scavo sotto la sede centrale della Cassa di Risparmio in piazza Garibaldi*, BAR International Series 2406, Oxford, Archaeopress.
- MONACO G. 1957, *Regione VIII, Parma. Rinvenimenti nel centro della città romana nel 1948*, «Notizie degli Scavi di Antichità», 11, VIII s., 231-240.
- MORIGI A. 2009, *La città dentro la città. Le trasformazioni di Parma antica*, in VERA 2009, 659-693.
- MORIGI A. 2014, *Nuove carte d'identità. Topografia antica & progettazione urbana moderna per il restyling consapevole della forma di Parma*, «Paideia», 70, 277-287.
- MORIGI A. 2016, *Pons lapidis. Nuovi documenti per la morfologia, la storia edilizia e la continuità insediativa postantica del ponte romano nell'Archivio Storico Comunale di Parma*, «Paideia», 71, 81-114.
- MORIGI A. 2018, *Luoghi archeologici ritrovati: il ponte antico di Parma/Archaeological sites rediscovered: The Roman bridge of Parma*, in A. MORIGI, C. QUINTELLI, *Fondare e ri-fondare. Parma, Reggio e Modena lungo la via Emilia romana/Founding and Re-founding. Parma, Reggio and Modena along the Roman Via Aemilia. Atti del Simposio internazionale (Parma 2017)*, Padova, Il Poligrafo, 355-374.
- MORIGI A. 2020, *Il linguaggio urbano. Segno, sopravvivenza e semantica dell'antico nel ponte di Parma e nelle città romane lungo la via Emilia*, in S. VOCE (ed.), *La città e le sue metamorfosi. Dal mondo antico all'età moderna. Atti del Convegno (Parma 2019)*, Bologna, Patron, 77-103.
- ORTALLI J. 1994, *I teatri romani dell'Emilia Romagna*, in *Spettacolo in Aquileia e Cisalpina romana*, Antichità Altoadriatiche 41, Udine, 271-300.
- PRIMI A. 2017, *Realtà aumentata per il turismo: da nuova tecnologia a strategia innovativa?*, «Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia», 159, 4-23.
- SANTORO S. 2009, *Gusto, cultura artistica e produzione artigianale in Parma romana*, in VERA 2009, 501-555.
- STRICKER D., GLEUE T., DAEHNE P., ALMEIDA L., VLAHAKIS V., IOANNIDIS N., KARIGIANNIS J., TSOTROS M., GOUNARIS M. 2002, *Archeoguide: An Augmented Reality guide for archaeological sites*, «IEEE Computer Graphics and Applications», 2, 52-59.
- VERA D. (ed.) 2009, *Storia di Parma, II, Parma romana*, Parma, Monte Università di Parma.

ABSTRACT

The core of the research project *CittAumentata* is the development of a software tool that fully uses the potential of AR as a way of understanding and improving ancient landscapes. The app links a model of collecting and processing archaeological and topographical datasets to an experience that increases users' interaction thanks to the ease-to-use and compatibility with most of the devices (smartphones and tablets). The scalability and the certification of a data protocol allows to systematize an innovative tool that manages 3D data and offers to citizenship a new way to understand cultural heritage and historical stratification in landscapes.

## WIKI LOVES CHURCHES! LA PIATTAFORMA WIKICARE PER LA CATALOGAZIONE COLLABORATIVA DELLE CHIESE ALTOMEDIEVALI IN ITALIA<sup>1</sup>

### 1. INTRODUZIONE

Wiki Loves Monuments è un concorso fotografico annuale nato nel 2010 in Olanda ed esteso a livello europeo l'anno successivo, con lo scopo di «porre in evidenza il patrimonio culturale dei Paesi partecipanti» (<http://www.wikilovesmonuments.org>), raccogliendo immagini di beni culturali mondiali con licenza libera, accessibili tramite la piattaforma Wikimedia Commons (RODRÍGUEZ POSADA *et al.* 2012) (Fig. 1). Oltre a questa iniziativa, centrata proprio sulla conoscenza e valorizzazione del patrimonio artistico e architettonico, grande successo hanno avuto altri progetti basati sull'accesso democratico alla conoscenza e sullo sviluppo collaborativo di contenuti online e open source (LEUF, CUNNINGHAM 2001). Wikipedia, ad esempio, è diventata sicuramente la maggiore opera di scrittura storica online, l'opera più letta della storia digitale e la più importante risorsa storica gratuita del world wide web, ma ha anche attirato non poche perplessità soprattutto nella comunità accademica, sia per la diversità nella qualità delle informazioni presenti all'interno delle pagine, sia per l'arbitrarietà dei temi nei contenuti pubblicati (LORENZ 2008, 2009). Alcuni studiosi, comunque, ne hanno sottolineato le potenzialità, sia a livello della diffusione delle conoscenze, sia come strumento didattico, rimarcando anche la vastità di pubblico che consulta queste pagine. Un successo che gli accademici non dovrebbero ignorare (ROSENZWEIG 2006).

Convinti del fatto che anche i ricercatori abbiano la responsabilità di diffondere le loro ricerche non solo alla stretta cerchia di specialisti che, un tempo, rappresentavano gli unici destinatari delle indagini e che l'uso del world wide web sia un'eccellente opportunità per farlo, dalla combinazione tra il wiki e il wiki semantico WikiBridge, nel 2010 è stata creata la piattaforma collaborativa WikiCARE ([http://arcmed.lettere.unipd.it/CARE\\_IT\\_HOME.html](http://arcmed.lettere.unipd.it/CARE_IT_HOME.html)). Tale pianificazione ha come obiettivo la catalogazione delle chiese europee anteriori al Mille e la creazione di una comunità scientifica con simili interessi di ricerca centrati sullo studio delle chiese e simili principi etici di responsabilità sociale ed educativa.

In questo contributo ripercorreremo dapprima le fasi costitutive del progetto e i suoi scopi, per poi presentare la struttura della scheda informatica,

<sup>1</sup> A fini curriculari i paragrafi 1, 2, 4, 5 sono stati scritti da Alexandra Chavarría Arnau e il paragrafo 3 da Paolo Vedovetto. Si ringrazia Francesca Benetti per le precisazioni relative ai diritti nell'uso delle immagini.



Fig. 1 – Locandina dell'edizione 2021 di WIKI Loves Monuments-Italia ([https://www.wikimedia.it/wp-content/uploads/2021/05/a3\\_locandina\\_wlm\\_2021\\_v01\\_low.pdf](https://www.wikimedia.it/wp-content/uploads/2021/05/a3_locandina_wlm_2021_v01_low.pdf)).

evidenziando alcune criticità riscontrate nella compilazione da parte del gruppo italiano; rifletteremo poi sulle prospettive future di WikiCARE, considerandone le potenzialità dal punto di vista di una condivisione sempre più ampia della ricerca, non solo in ambito accademico.

## 2. IL PROGETTO CARE-ITALIA

CARE-Italia (*Corpus Architecturae Religiosae Europaeae*) è un progetto di ricerca nato nel 2001 e ancora oggi attivo grazie alla partecipazione di un ampio gruppo di studiosi provenienti da tutta Italia, che raccoglie e rende fruibile, tramite una piattaforma wiki, la schedatura delle chiese costruite in Italia tra IV e X secolo (CHAVARRÍA ARNAU 2018). L'idea del CARE, in ambito europeo, nacque per iniziativa di Miljenko Jurković e Gian Pietro Brogiolo nel 2001 (BROGIOLO, JURKOVIĆ 2012) e fu sviluppata grazie a una serie di incontri tenutisi in Croazia, Spagna e Italia tra il 2002 e il 2007 dall'International Research Center for Late Antiquity and the Middle Ages (IRCLAMA) di Zagabria, durante i quali furono discussi gli obiettivi del censimento, gli strumenti da adottare (scheda cartacea e informatizzata, glossario terminologico-comparativo nelle principali lingue europee, norme grafiche per l'elaborazione di piante e prospetti), i tempi e i modi della pubblicazione dei dati. Ai Paesi fondatori del progetto (Croazia, Italia, Francia, Spagna) aderirono successivamente numerosi Stati europei: Repubblica Ceca e Slovacca (MAŘIKOVÁ-KUBKOVÁ, BAXA 2012), Germania e Svizzera (FACCANI,



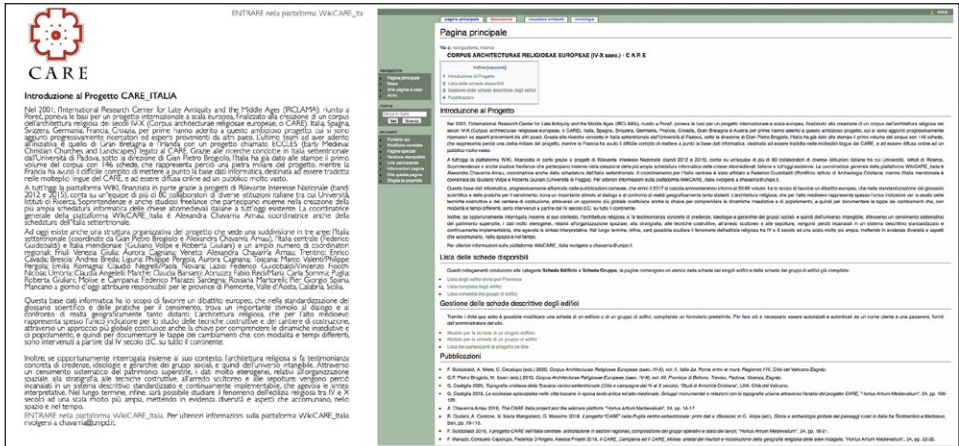


Fig. 2 – Landing page del progetto CARE e homepage della piattaforma WikiCARE Italia.

RISTOW 2012), Serbia (MILINKOVIĆ 2012), Benelux e Irlanda (CHANTINNE, MIGNOT 2012).

L'obiettivo del progetto CARE (Fig. 2) è di fornire una base informativa accurata, omogenea e aggiornata sul patrimonio architettonico ecclesiastico altomedievale grazie all'uso di un vocabolario comune e alla condivisione di metodi, strumenti e temi di ricerca. Con due ricadute: da un lato studiare e comparare il fenomeno della cristianizzazione e della creazione di reti di chiese a livello europeo con le conseguenze politiche, economiche, sociali e ovviamente ideologico-culturali che ne conseguono; dall'altro approfondire le caratteristiche e gli sviluppi di una serie di forme artistiche (nell'architettura, nella scultura, nella pittura e altro) fino all'età moderna, in un momento in cui l'arte religiosa costituiva la principale, se non unica, forma artistica che è giunta fino a noi (BROGIOLO 2015).

Il CARE ha altresì lo scopo di favorire un dibattito che, nella standardizzazione del glossario scientifico e delle pratiche per il censimento, offre un importante stimolo al confronto di realtà geograficamente distanti, sia a livello nazionale sia in ambito europeo. L'architettura religiosa rappresenta per l'alto medioevo spesso l'unico indicatore per lo studio delle tecniche costruttive e del cantiere di costruzione e, se analizzata attraverso un approccio più globale, costituisce anche la chiave per comprendere le dinamiche insediative e di popolamento, e quindi per documentare le tappe dei cambiamenti che, con modalità e tempi differenti, sono intervenuti a partire dal IV secolo d.C. su tutto il continente.

Ad oggi esiste una struttura organizzativa che vede una suddivisione del territorio italiano in tre aree, coordinate da altrettanti responsabili scientifici (Region\_Chief): Alexandra Chavarria Arnau (Italia settentrionale), Federico

Guidobaldi (Italia centrale e Roma), Giuliano Volpe e Roberta Giuliani (Italia meridionale), ai quali si aggiunge un ampio numero di coordinatori regionali (Region\_Editor). Il progetto ha avuto come risultato tre tipi di prodotti: il primo, una schedatura online attraverso la piattaforma wiki delle chiese altomedievali italiane; il secondo, la pubblicazione di queste schede in forma di volumi cartacei (per il momento sono state pubblicate le schede di quattro province della regione Veneto, in un volume “pilota” del 2009: BROGIOLO, IBSEN 2009, e il primo tomo delle chiese di Roma [regioni I-IV]: GUIDOBALDI, MIELE, CECALUPO 2020); il terzo prodotto consiste in studi territoriali relativi alla cristianizzazione di territori specifici concretizzati in volumi e articoli di sintesi.

### 3. LA PIATTAFORMA WIKICARE

Dopo dieci anni di sperimentazione, la piattaforma WikiCARE si è rivelata uno strumento versatile, come dimostrano le 682 schede inserite e in continuo aumento. Attualmente i collaboratori con accesso al WikiCARE sono un’ottantina, anche se le schede effettivamente inserite corrispondono ad un numero inferiore di autori (51) (Fig. 3)<sup>2</sup>. La distribuzione numerica delle schede suddivisa per regioni è la seguente: Abruzzo (12); Basilicata (12); Calabria (0); Campania (140); Emilia-Romagna (35); Friuli-Venezia Giulia (0); Lazio (69); Liguria (7); Lombardia (68); Marche (4); Molise (30); Piemonte (0); Puglia (28); Sardegna (8); Sicilia (0); Toscana (39); Trentino-Alto Adige (57); Umbria (36); Valle d’Aosta (0); Veneto (137) (Fig. 4). L’adesione di nuovi collaboratori è costante, spesso per territori significativi, come quella recente che si occuperà della schedatura di Torino. Le istituzioni di provenienza di questi studiosi sono in prevalenza le Università, il Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana di Roma, ma non mancano funzionari di alcune soprintendenze e ricercatori indipendenti.

La scheda CARE contiene le informazioni generali sulla chiesa, sulle preesistenze, sulle fonti disponibili e va compilata sia per gli edifici testimoniati indirettamente da elementi scultorei o quelli citati nelle fonti scritte e non più esistenti, sia per quelli conservati in alzato e/o documentati archeologicamente (Fig. 5).

Per questi ultimi va compilata anche una seconda parte, limitatamente alle fasi anteriori al Mille, seguendo lo schema: (a) struttura del complesso:

<sup>2</sup> L’elenco dei partecipanti attivi al WikiCARE Italia con il numero di schede inserite è il seguente: C. Capolupo (87), A. Frisetti (76), A. Colecchia (40), G. Castiglia (35), E. Possenti (35), E. Napione (34), M. Ibsen (33), C. Angelelli (30), P. Novara (28), A. Zonca (23), M. De Marchi (17), G.P. Brogiolo (16), A. Vella (16), M. Casillo, G. Lubraco (12), F. Guidobaldi (10), D. Quadrino, D. Uva, P. Vedovetto (9), K. Lenzi, A. Cagnana, R. Giuliani, F. Redi (7), E. Cavada, D. Mastorilli, P. Porta, P. Ralli (6), L. Pugliesi (5), F. Alberini, A. Sabbi, C. Cecalupo, A. Cardone, M. Caggiano (4), I. Zamboni, N. Usai, E. D’Ignazio, C. Nonne, C. Menghini, M.T. Gigliozzi (3), L. Acampora, M. Rapanà, B. Bruno, S. Sestito, M. Dalba (2), F. Luviner, I. Bove, A. Miele, C. Menghini, M. Dallemulle, I. Quircio, N. Pisu, E. Turrini (1).

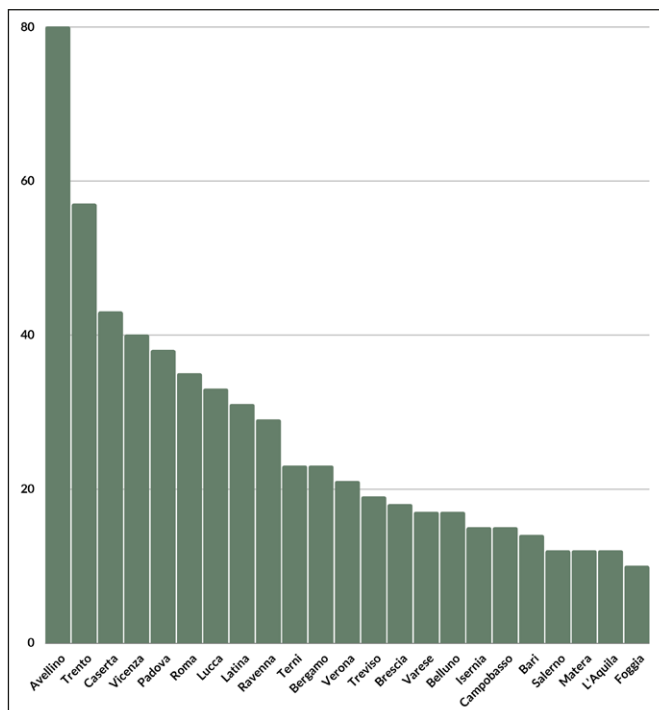


Fig. 3 – WikiCARE-Italia: numero di schede inserite suddivise per provincia (aggiornato a dicembre 2020).

pianta, spazi e ambienti funzionali, eventuale battistero; (b) materiali e tecniche costruttive e decorazione (per ciascuno degli elementi che costituiscono il complesso: corpo principale, annessi, battistero, etc.): attività di cantiere e rituali di fondazione, murature, pavimenti, coperture, altri elementi strutturali e architettonici, apparato decorativo applicato alle murature; (c) installazioni liturgiche; (d) sepolture; (e) iscrizioni; (f) datazione e interpretazione (per ciascun periodo si devono proporre una cronologia e una funzione in rapporto all’insediamento circostante, sulla base di un esame critico dei dati disponibili). Dal momento che il censimento riguarda le chiese anteriori al Mille, le trasformazioni edilizie bassomedievali e postmedievali sono descritte solo sinteticamente. La georeferenziazione dell’edificio, basata su OpenStreetMap, permette, tra l’altro, di cogliere visivamente il contesto nel quale si colloca.

La piattaforma offre, inoltre, la possibilità di memorizzare e gestire immagini all’interno delle singole schede. Tuttavia, il caricamento di file non avviene direttamente nella sezione “Galleria di immagini”, ma tramite un collegamento con il modulo “Carica un file”, situato nella pagina iniziale.

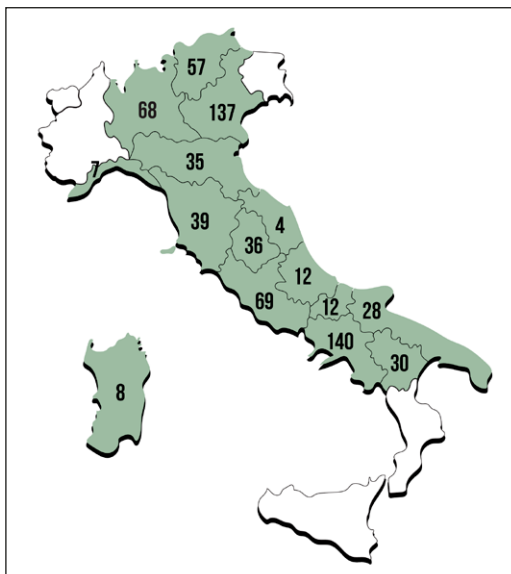


Fig. 4 – WikiCARE-Italia: numero di schede inserite suddivise per regione (aggiornato a dicembre 2020).

La dimensione massima dei file non deve superare i 100 MB e i formati consentiti sono .png, .gif, .jpg, .jpeg, .webp. Una volta completati i campi richiesti (“Nome del file”, “Dettagli del file”, “Licenza”), il collegamento dell’immagine avviene modificando direttamente i dati semantici della scheda relativa (accessibili dal campo “Modifica” del modulo di compilazione) tramite l’inserimento dei seguenti codici:

```
<gallery>  
Image:Nome_del_file.jpg|DIDASCALIA  
</gallery>
```

Per semplificare le operazioni di compilazione e migliorare l’accessibilità da parte degli utenti (con tempi minori di caricamento), la scheda di compilazione è stata suddivisa in otto sezioni, riportate nella barra di navigazione in alto (“Identificazione”, “Galleria di immagini”, “Informazioni generali”, “Sequenza”, “Elementi decontestualizzati”, “Interpretazione”, “Altre informazioni”, “Firma”), alla fine delle quali è possibile salvare i dati, visualizzare l’anteprima o mostrare le modifiche inserite.

Negli ultimi due anni, in contemporanea con la stesura del primo volume di Roma, si è posta la necessità di modificare alcune voci della “Scheda edificio”, adattando i dati già inseriti fino a quel momento. È stato, quindi,

**PADOVA, S. Maria Assunta**

Vai a: navigazione, ricerca

Indice [mostra]

**Dati**

**Fonti storiche e identificazione**

**Fonti storico-epigrafiche**

La prima attestazione di un vescovo padovano è quella di Crispino che, nel 543, sottoscrisse le deliberazioni del concilio di Sardica. La più antica testimonianza materiale della presenza vescovile o la conferma che la sede era quella attuale è rappresentata dall'epigrafe funerea del vescovo Tricido, datata su base paleografica tra la fine dell'VIII e inizio del IX secolo, già collocata nella cripta della cattedrale e dal 1748 collocata in una cappella laterale. La chiesa è attestata per la prima volta in un diploma dell'855 con il titolo di Santa Giustina (=episcopos ecclesiae sanctae Iustinae Patavensis). La dedicazione dell'antica cattedrale alla martire padovana ha originato una lunga dialettica tra gli studiosi, divisa tra chi la identifica con la chiesa marziale suburbana di Santa Giuliana e chi la ritiene ubicata nell'area di quella attuale. A queste posizioni si aggiunge recentemente quella di Gian Pietro Broglio, che non esclude, per Santa Giustina, un ruolo di cattedrale arcaica durante il periodo gotico e poi in quello della dominazione longobarda. Nell'897 la cattedrale è ricordata con la doppia intitolazione a santa Maria Vergine, (verosimilmente la dedicazione più antica), e a santa Giustina martire (=episcopium sanctae Patavensis ecclesiae in honore sanctae Dei genitricis virginis Mariae sanctique Iustinae martyris constructum).

**Fonti archeologiche**

Tra gli anni 2011 e 2012 sono stati condotti a varie riprese scavi a nord dell'attuale battistero del Duomo di Padova, su una superficie di 50 mq ca., fino a circa m 10 s.l.m., il che significa una profondità di scavo di circa 4 metri. La sequenza documentata tra gli anni 2011 e 2012 comprende cambiamenti strutturali e funzionali compresi in un arco cronologico dal IIIIV al IX secolo. La sequenza tardoromana è altomedievale si articola in due periodi principali. Il primo (IV-VI secolo) comprende la costruzione e l'utilizzo di un edificio, del quale sono stati individuati tre ambienti allineati nord-sud. L'analisi stilistica del mosaico che copre il pavimento dell'ambiente centrale, unitamente alla datazione della malta di allettamento, ha offerto una cronologia di metà IV secolo, compatibile con la prima menzione di un vescovo a Padova, Crispino. Il secondo periodo (VII-X secolo) si può articolare in tre fasi distinte. In una prima fase (VI secolo) l'edificio crollò parzialmente a causa di un incendio, con ogni probabilità riconducibile alla distruzione longobarda della città del 601. Testimoniate da Paolo Diacono, Digià strati di distruzione sono emersi, tra altri materiali, un capitello di ciborio esagonale e un frammento di mensa di altare, provenienti verosimilmente dal piano terra di un edificio adiacente, identificabile con il battistero tardoantico probabilmente situato nell'area di quello romanico. Del resto, come afferma Alessandra Chavarria Arrau, la prossimità con l'edificio battesimale era suggerita già dalla contiguità degli ambienti, tra loro comunicanti, e dalla presenza, in una fase successiva (XI secolo), di numerose torce di intarsi adossate al perimetro. All'arrivo ilurgico della cattedrale appartengono probabilmente anche un frammento di altare a cassa con fenestella confessionale, conservato nella Biblioteca Capitolare (VI secolo), di provenienza ignota, e un frammento di cornice, probabilmente di ciborio, rinvenuto tra il sagrato della cattedrale e il palazzo vescovile. In una fase successiva (VII-X secolo) l'area cambiò radicalmente destinazione, con la costruzione di abitazioni povere con annessa piccola necropoli. Tra X e XI secolo questo settore del complesso episcopale fu monumentalizzato con la costruzione di un nuovo battistero e del chiostro dei canonici, quest'ultimo attestato, come abbiamo visto, nel 1054. Anche la cattedrale fu probabilmente

**Contesto Inesdiativo**

**Descrizione**

La cattedrale fu costruita in un settore residenziale della città, spostato verso ovest, nei pressi delle mura.

**Strutture precedenti**

La cattedrale fu edificata in area periferica di Padova romana, al centro della cosiddetta insula delimitata dall'ansa del fiume Medoacus Meior (Brenta) ma dislocata verso ovest rispetto al centro politico e amministrativo della città, che gli studiosi tendono oggi a collocare nella zona in cui oggi sorge il Caffè Pedrocchi. Tra il I secolo a.C. e il II d.C. questo settore urbano era occupato da un quartiere a destinazione residenziale, come documentano i numerosi ritrovamenti di pavimenti in mosaico, più o meno frammentari, avvenuti a partire dal XVIII. Questo quartiere era attraversato da un complesso sistema viario, documentato dal rinvenimento di vari lazzari di strade lastricate in trachite, tra loro ortogonali.

**Abitato contemporaneo**

I dati disponibili per il IV e il V secolo non si offrono spunti per individuare variazioni funzionali e inesdiative nell'area di S. Maria Assunta. Almeno in un settore del centro episcopale tardoantico, dopo l'incendio e per un lungo periodo che va dal VII almeno al IX secolo, vengono costruite alcune capanne, con muri legati in argilla, e deposte quattro sepolture, messe in luce durante le indagini archeologiche del 2011-2012.

**Funzione**

**Funzione dell'edificio**

Cattedrale

**Complessi architettonici**

Complesso episcopale

**Galleria di immagini**

Scavi 2011-2012, Area di scavo

**Topografia**

Nazione	Italia
Regione	Veneto
Provincia	Padova
Comune	
C.A.P.	35141
Indirizzo/Localtà	piazza del Duomo
Toponimo	
Proprietario	
Vincoli	

Fig. 5 – WikiCARE-Italia: esempio di “Scheda edificio”.

predisposto un completo prontuario da parte di Federico Guidobaldi e Paolo Vedovetto con l’obiettivo di facilitare la compilazione delle schede, tenendo conto di alcune problematiche emerse da una revisione generale di tutte le schede inserite tra gli anni 2010 e 2018 (Appendice 1). Tale verifica, infatti, ha messo in luce inesattezze piuttosto comuni nella compilazione delle schede,



dovute soprattutto all'errato inserimento delle coordinate geografiche (latitudine, longitudine) che, inevitabilmente, comporta un errore nel collegamento della scheda alle liste di edifici ("Lista degli edifici divisi per provincia", "Lista completa degli edifici", "Lista completa dei gruppi di edifici").

Ricordiamo, inoltre, che la georeferenziazione dell'edificio, assieme all'immissione del nome dell'autore della scheda, sono gli unici campi obbligatori, e la loro mancata compilazione comporta l'impossibilità di salvare la scheda e, quindi, di proseguire nella compilazione delle altre voci. La georeferenziazione del luogo di culto presenta alcune difficoltà nel caso di edifici citati dalle fonti scritte e oggi scomparsi o di incerta ubicazione topografica, per i quali non è possibile inserire precise coordinate geografiche. Ove possibile, una localizzazione approssimativa della chiesa può essere, tuttavia, indicata sulla base della toponomastica (agiotoponomi o toponimi legati alla presenza di luoghi di culto di antica fondazione come Chiesazza, Chiesa Vecchia, etc.); ciò andrà poi argomentato dettagliatamente nel campo riguardante la descrizione del contesto insediativo.

Un altro problema abbastanza comune riguarda il campo di intestazione della scheda ("Maschera: Scheda edificio"), spesso redatto in modo difforme rispetto alle norme di compilazione del database, che prevedono l'inserimento del nome della città e provincia (in sigla, quando non capoluogo) tra parentesi tutto in maiuscolo, il nome dell'edificio attuale o ultimo prima della scomparsa (in minuscolo con iniziali maiuscole), preceduto da S. o SS.: es. ARLIANO (LU), S. Martino); ROMA, S. Agata dei Goti. Una corretta compilazione dell'intestazione è fondamentale, poiché non è più modificabile da parte dell'utente dopo l'inserimento del modulo "Scheda edificio" nella piattaforma.

Frequente è anche l'adozione di stili di citazione diversi e l'utilizzo di termini non compresi tra quelli elencati nelle guide di supporto associate a ogni campo, guide che riportano testualmente le voci del sopra citato prontuario cartaceo; si riscontra, inoltre, un limitato utilizzo del corsivo, previsto dal prontuario per le locuzioni e le parole latine, nonché per le citazioni bibliografiche, conformate allo stile Harvard (per applicare lo stile corsivo occorre inserire il testo tra doppio apostrofo diritto: es. "In honore sanctae Christi martyris Agathae").

#### 4. WIKI *VERSUS* GIS

Pur se inizialmente se ne è discussa molto l'opportunità rispetto ad altri strumenti tipo web-GIS, il wiki appare insostituibile soprattutto ai fini partecipativi e open del progetto. A differenza di un webGIS, la piattaforma wiki (basata sul software MediaWiki, di facile utilizzo, scritto in un linguaggio PHP: CHEVALIER *et al.* 2012) permette l'inserimento immediato dei dati da parte di un gran numero di utenti "abilitati", senza mettere a rischio la

sicurezza del server. Una volta inseriti e salvati i dati, la loro visualizzazione è immediata, consentendo in tempo reale il monitoraggio dello stato di avanzamento dei lavori. Il collaboratore può segnalare poi, all'interno del campo "Firma", lo stato di avanzamento della scheda scegliendo tra cinque stadi di completamento: 1. In corso di compilazione, 2. In corso di revisione, 3. In corso di rilettura, 4. Scheda non verificata, 5. Scheda verificata. Ogni scheda verificata è sottoposta a validazione da parte del responsabile locale e di quello nazionale, che hanno la possibilità di scegliere fra tre gradi di affidabilità dei dati inseriti (1. Affidabile, 0. Media, -1. Incompleta) (Fig. 6).

Se necessario, e come hanno già fatto molti gruppi, i dati del WikiCARE possono essere incorporati in un sistema informativo per svolgere ricerche più raffinate relative ai propri territori, utilizzando schede il cui grado di completezza e revisione si dia per definitivo. Non è, invece, consigliabile la realizzazione di geodatabase di carattere più generale (ad esempio per tutta l'Italia) soprattutto se non linkati direttamente alla scheda originale del wiki. Questo perché, com'è già stato segnalato in più occasioni, il WikiCARE è uno strumento ideato per lavorare in modo partecipato e consentire un completamento progressivo e continuo delle schede. Usarne i dati in modo automatico, senza tener conto del grado di completamento, produrrebbe inevitabilmente risultati distorti. Inoltre, la conversione dei dati delle schede wiki potrebbe richiedere una ristrutturazione del dato, con una semplificazione delle schede e una potenziale perdita del loro valore scientifico.

Oltre a garantire la collaborazione simultanea di numerosi ricercatori nella compilazione delle schede del catalogo, l'obiettivo del WikiCARE è di facilitarne la diffusione e la fruizione da parte di un'ampia fascia di utenti (anche non esperti di informatica), rappresentando un punto di partenza per ulteriori ricerche. Ad esempio, lo studioso può trovare nei campi "fonti" e "bibliografia" informazioni utili per sviluppare indagini più approfondite. Il divulgatore può trasformare il contenuto in racconto e le immagini tecniche (planimetrie, sezioni e fotografie) in disegni interpretativi, adatti ai differenti

Fig. 6 – WikiCARE-Italia: esempio di campo "Firma".

target di utenti: comunità locali, studenti, turisti, operatori dei beni culturali, etc. Gli insegnanti possono non soltanto utilizzare i dati relativi alle chiese locali per i propri contenuti didattici, ma anche la stessa piattaforma come base per la realizzazione di attività di ricerca e per migliorare le competenze digitali degli studenti (sull'uso pedagogico del wiki cfr. SCHAFFERT *et al.* 2006). La casella "Cerca in Care" permette analisi a più livelli ("Ricerca generica", "Ricerca avanzata", "Ricerca per schede", "Ricerca per autore", etc.) tra tutti i record delle schede inserite nella piattaforma. Il WikiCARE ha acquisito infine una più ampia possibilità di utilizzi ai tempi del COVID-19, dal momento che la mobilità è stata più ridotta, molte biblioteche sono state chiuse e cerchiamo nel web informazioni e strumenti utili, anche a livello didattico.

Risulta sempre più evidente, infatti, come la conservazione del patrimonio storico (e le chiese non fanno certo eccezione) necessiti di una preliminare opera di "traduzione" dei contenuti scientifici della ricerca storica affinché diventino memoria condivisa di gruppi sempre più ampi di popolazione. Un impegno dal quale non si può sottrarre lo stesso studioso, pena la perdita del suo ruolo in una società sempre meno attenta alle testimonianze del proprio passato.

## 5. PROBLEMI E PROSPETTIVE

Va in primo luogo sottolineato come molti gruppi abbiano aderito con entusiasmo all'iniziativa, evidentemente considerata opportuna, e l'Italia, tra i paesi europei coinvolti, si segnala senz'altro non solo per una produttività più alta, ma anche per aver utilizzato in diversi territori i dati per analisi sistemiche sulla società tardoantica e altomedievale, periodi coperti dalla schedatura. La carenza di risorse adeguate e continuative si è però tradotta per tutti in un impegno saltuario, spesso su base volontaria, con una serie di problemi, quali: inserimento parziale di schede, impossibilità di controllare sul terreno le planimetrie disponibili o di realizzarne di nuove, ritardo da parte dei coordinatori regionali nella validazione/correzione delle schede, assenza di un servizio tecnico che segua specificamente per l'Italia il funzionamento della piattaforma. La speranza è che in un futuro non lontano il progetto possa contare su un finanziamento che permetta innanzitutto di completare la schedatura delle aree mancanti, di inserire online le schede cartacee già compilate e di implementare la documentazione grafica.

Bisogna evidenziare, infatti, la quasi totale mancanza di immagini all'interno delle schede, in parte dovuta a una complessa procedura di inserimento, ma anche a questioni di diritti, specialmente per le immagini di scavo (per cui bisognerebbe chiedere autorizzazione al Ministero) o di elementi in proprietà di musei (ad es. epigrafi, etc. per cui bisognerebbe chiedere autorizzazione ai musei), che potrebbero comportare anche il pagamento di un canone a seconda

delle regole stabilite dai singoli enti. Questo problema si era evidenziato anche con Wiki Loves Monuments, per cui era stato firmato un protocollo d'intesa con il Ministero (CIURCINA, GROSSI 2016) e che ha introdotto in parte deroghe al sistema legislativo (BENETTI 2020, 135-138). Rimangono però i problemi relativi alle immagini di scavo, anche in concessione (cfr. le condizioni legate al rilascio delle concessioni 2019 che prevedevano un assenso preliminare alle modalità di condivisione anche online), nonostante le basi giuridiche (nonché etiche) di tale prerogativa.

Più in generale, sarebbe opportuno che non solo gli studiosi, ma anche le istituzioni e gli enti che finanziano le ricerche cominciassero a riflettere sulla possibilità di rendere obbligatoriamente disponibili, online e open access, non solo le sintesi delle ricerche, ma anche i numerosi database, GIS, etc. Operazione peraltro costosa, che necessita di uno specifico finanziamento soprattutto per quanto riguarda la sostenibilità nel tempo con l'aggiornamento dei dati e delle piattaforme di condivisione: manutenzione-ammortamento del server, del database e del personale che ci lavora. Ma da sostenere, come stiamo facendo a Padova con progetti relativi ad altri contesti, ad esempio nel Progetto CAMIS (Cimiteri Altomedievali in Italia Settentrionale), con link al geodatabase [http://arcm.ed.lettere.unipd.it/CAMIS\\_home.html](http://arcm.ed.lettere.unipd.it/CAMIS_home.html), e nel Progetto ARMEP (Architetture Residenziali Medievali di Padova), con link al geodatabase [http://arcm.ed.lettere.unipd.it/CatMedievale/ARMEP\\_home.html](http://arcm.ed.lettere.unipd.it/CatMedievale/ARMEP_home.html).

Lavori, al pari del CARE, che nascono o si propongono come attività di ricerca partecipata basata sulla collaborazione, il rispetto e la fiducia dei ricercatori coinvolti e con la volontà di diffondere la ricerca ad altri gruppi (su questi aspetti cfr. BROGIOLO, CHAVARRÍA ARNAU 2020; sugli aspetti giuridici della partecipazione cfr. BENETTI 2020). Obiettivo in linea con l'articolo 27 della Dichiarazione Universale dei Diritti Umani del 1948, secondo il quale ogni individuo ha diritto di prendere parte liberamente alla vita culturale della comunità, di partecipare al progresso scientifico e ai suoi benefici, finalità cui si ispira la Convenzione di Faro sottoscritta dal Consiglio d'Europa nel 2005 e finalmente ratificata il 23 settembre 2020, con ben 15 anni di ritardo, dal Parlamento italiano.

La speranza è che dalle buone intenzioni si passi a una svolta effettiva che veda una reale implementazione dei principi della Convenzione nell'ordinamento e nelle politiche nazionali, tenuto altresì conto dell'inaspettata irruzione del COVID-19, che ha sottolineato l'opportunità di nuovi strumenti di ricerca, lavoro, educazione e comunicazione basati sul web, le cui potenzialità sono state fino ad oggi solo in piccola parte esplorate dalla comunità scientifica.

ALEXANDRA CHAVARRÍA ARNAU, PAOLO VEDOVETTO

Dipartimento dei Beni Culturali

Università degli Studi di Padova

[chavarria@unipd.it](mailto:chavarria@unipd.it), [paolo.vedovetto@unipd.it](mailto:paolo.vedovetto@unipd.it)

## APPENDICE

### WIKICARE. PRONTUARIO AGGIORNATO

#### Scheda edificio

##### INTESTAZIONE DELLA SCHEDA

- Nome della città e provincia (in sigla, quando non capoluogo), tra parentesi tutto in maiuscolo, seguito dal nome dell'edificio attuale o ultimo prima della scomparsa (in minuscolo con iniziali maiuscole), preceduto da S. o SS. Si deve indicare solo l'intitolazione e l'eventuale attributo/toponimo, senza la funzione (evitare "pieve", "canonica", "cattedrale", etc.).

Esempio: 1) ARLIANO (LU), S. Martino; 2) CASTELSEPRIO (VA), S. Maria foris Portas; 3) ROMA, S. Adriano al Foro.

#### 1. IDENTIFICAZIONE

##### 1.1 Topografia

- Regione
- Provincia
- Comune
- C.A.P
- Indirizzo/Località
- Toponimo
- Proprietario
- Vincoli: vincoli ufficiali imposti per la protezione dell'edificio sotto l'aspetto storico e architettonico
- Riferimenti cartografici:
  - Numero particella di catasto attuale
  - Coordinate UTM:
    - Gauss Boaga
    - WGS84
  - Coordinate geografiche:
    - Latitudine
    - Longitudine
    - Altitudine
- Mappa catastale (immagine o foglio)

##### 1.2 Fonti

- *Fonti storico-epigrafiche*. In modo discorsivo e in ordine cronologico trascrivere e commentare tutti i passi specifici relativi alla storia dell'edificio, con la specificazione della data ed evidenziazione delle informazioni che se ne possono derivare. Il limite cronologico del X secolo si può oltrepassare eccezionalmente per documentare la sopravvivenza e le eventuali modificazioni. Per ogni fonte o interpretazione sarà riportato tra parentesi il riferimento bibliografico abbreviato (stile Harvard).
- *Scavi archeologici*. Segnalare in breve e in ordine cronologico le campagne di scavo con date, bibliografia (se pubblicata) e, se necessario, eventuali documentazioni inedite di scavo.
- *Bibliografia*. Riportare la bibliografia di riferimento, in forma estesa e integrale, attenendosi alle norme bibliografiche dei volumi CARE.



- *Documentazione grafica e fotografica*. Indicare la disponibilità di materiale grafico e fotografico con i relativi riferimenti.
- *Conservazione*. Indicare soltanto se l'edificio sopravvive (in tal caso indicare la datazione della fase sopravvissuta) o se non è più esistente (in tal caso indicare l'epoca delle ultime documentazioni prima della scomparsa).
- *Intitolazione attuale*. Intitolazione della chiesa oggi.
- *Intitolazioni precedenti*. Inserire, in ordine cronologico, tutte le denominazioni che risultano dalle fonti con accanto la relativa datazione.
- *Diocesi attuale*. Diocesi attuale di appartenenza.
- *Diocesi storica*. Diocesi di appartenenza precedente/i a quella attuale, in ordine cronologico.

### 1.3 Contesto

- *Breve descrizione del sito*. Descrivere la posizione specifica dell'edificio in contesto urbano o rurale, attuale.
- *Strutture precedenti*. Segnalare le strutture precedenti al primo insediamento religioso, riscontrabili al di sotto dell'edificio in questione, o inglobate in esso, oppure nelle immediate vicinanze.
- *Abitato contemporaneo all'edificio di culto antico*. Inquadrare, dove possibile, il tipo di abitato che corrispondeva all'edificio di culto tardoantico o altomedievale durante l'arco della sua esistenza e comunque tra IV e X secolo.

### 1.4 Funzione

- *Funzione dell'edificio*. Indicare la funzione principale (cattedrale, battesimale, titolare, oratorio, monastero, funeraria, assistenziale, diaconia, non specificata).
- *Descrizione*. Esplicitazione documentata e cronologicamente dettagliata della funzione dichiarata, particolarmente utile nel caso in cui le funzioni siano plurime (es. parrocchia e titolo cardinalizio, chiesa monastica e battesimale, etc.).
- *Complessi architettonici*. Da compilare nel caso in cui l'edificio cui è intitolata la scheda sia parte di un più vasto complesso.

## 2. GALLERIA DI IMMAGINI

- *Inserire un'altra immagine*.

## 3. INFORMAZIONI GENERALI

- *Descrizione*. Sintesi generale in ordine cronologico, ma articolata della storia architettonica della chiesa nelle sue fasi non solo paleocristiane e altomedievali, ma anche successive al Mille (devono essere inclusi anche i risultati delle analisi per sequenze che sono proposte nelle finestre successive), il tutto con relativa bibliografia nel testo, specialmente nel caso in cui le interpretazioni abbiano una precisa paternità. Nei casi di pareri discordi o di interpretazioni complicate è opportuno rinviare alla sezione 6 ("Interpretazione"), anche con commento specifico e con pareri personali.

## 4. SEQUENZA

- *Numero periodo*

### 4.1 Architettura

- *Tipologia planimetrica*. Indicare se cruciforme, triconca, polilobata, rotonda, a navata unica senza abside, a navata unica con abside non sporgente, a navata

unica con abside sporgente, a navata unica con due/tre absidi sporgenti, a navata unica con tre absidi non sporgenti, a navata.

- *Dimensioni*. Indicare le dimensioni totali dell'edificio.
- *Orientamento*. Indicare la posizione dell'abside.
- *Articolazione e annessi*. Descrizione dell'articolazione ossia divisione in navate ed eventuali annessi procedendo dall'ingresso verso all'area presbiteriale.
- *Alzati*. Descrizione delle partizioni interne, finestrati, coperture, etc.

#### 4.2 Materiali, tecniche costruttive e decorazione

- *Tipologia di intervento*. Indicare se si tratta di una costruzione, ricostruzione, integrazione, restauro, etc.
- *Tecnica muraria*. Specificare i materiali, la messa in opera e il tipo di legante.
- *Livelli d'uso e pavimenti*. Specificare le quote di insediamento, i dislivelli e le relative pavimentazioni, se esistenti, con l'estensione e la collocazione nella pianta della chiesa, pertinenti alla fase in questione.
- *Altri elementi strutturali e architettonici*. Indicare e descrivere i materiali di archi, colonne, finestrati, etc. pertinenti alla fase in questione.
- *Decorazioni applicate alle murature e alla costruzione*. Indicare e descrivere pitture, mosaici, stucchi, pertinenti alla fase in questione.

4.3 Installazioni liturgiche (per ognuna indicare la posizione, specificare se *in situ* o decontestualizzate, la presenza di eventuali decorazioni o iscrizioni, i materiali adoperati, le dimensioni, il tipo di manifattura)

- *Altare/i*
- *Ciborio*
- *Loculo per reliquie*
- *Cattedra*
- *Sedili e synthronon*
- *Recinzioni* (include tutte le parti scultoree, es. pilastrini, plutei, architravi etc.)
- *Pulpito*
- *Ambone*
- *Acquasantiera*
- *Vasca battesimale*
- *Altro*

4.4 Sepolture (descrizione delle sepolture integrate nell'edificio o che forniscono indicazioni riguardo alla funzione o alla cronologia)

- *Posizione e relazione con l'edificio*. Descrizione delle sepolture interne, esterne, nell'area presbiteriale, nelle navate, presso i muri perimetrali, presso gli accessi, nell'area esterna all'abside, nell'area esterna a N, S, E, W della chiesa, etc.
- *Strutture*. Descrivere l'architettura della tomba, specificare principalmente se si tratta di tomba strutturata o in nuda terra, tafonomia, deposito funerario, etc., ovviamente dipende dal numero di sepolture e complessità del cimitero.

4.5 Iscrizioni (di ogni genere ma strettamente pertinenti alla fase)

- *Trascrizione*

4.6 Datazione e giustificazione (conclusivi di ogni fase)

## 5. ELEMENTI DECONTESTUALIZZATI

- *Descrizione*. Descrivere tutti gli oggetti appartenuti all'edificio e dispersi, che permettano sia di attestare la sua esistenza, sia di rafforzare o datare un periodo.

## 6. INTERPRETAZIONE

- *Datazione e giustificazione critica*. Specificare le cronologie periodo per periodo, l'arco cronologico e gli argomenti che e le giustificano.
- *Confronti*. Proposte di confronto con edifici relativi a ciascuna fase costruttiva vera e propria.

## 7. ALTRE INFORMAZIONI

- *Confronti*. Elencazione critica di osservazioni che non hanno trovato posto nelle precedenti finestre.
- *Riassunto*. Sintesi delle osservazioni della finestra precedente.

## 8. FIRMA

- *Data*. Data di creazione della scheda.
- *Autore scheda informatica*. Autore principale della presente scheda informatica.
- *Autore scheda cartacea*. Autore che ha compilato la corrispondente scheda nella pubblicazione cartacea.
- *Stato di avanzamento della scheda* (stabilito dal redattore). In corso di compilazione, in corso di revisione, in corso di rilettura, scheda non verificata, scheda verificata.
- *Affidabilità dei dati* (stabilito dal responsabile). Affidabile, media, incompleta.

## BIBLIOGRAFIA

- BENETTI F. 2020, *Il diritto di partecipare. Aspetti giuridici del rapporto tra pubblico e archeologia*, PCA STUDIES 3, Mantova, SAP Società Archeologica s.r.l. ([http://www.postclassical.it/pca\\_studies.html](http://www.postclassical.it/pca_studies.html)).
- BROGIOLO G.P. 2015, *La ricostruzione della rete ecclesiastica attraverso il corpus europeo delle chiese altomedievali*, in R. MARTORELLI, A. PIRAS, P.G. SPANU (eds.), *Isole e terraferma nel primo cristianesimo: identità locale ed interscambi culturali, religiosi e produttivi*, XI Congresso Nazionale di Archeologia Cristiana (Cagliari-Sant'Antioco 2014), Cagliari, PFTS University Press, 273-290.
- BROGIOLO G.P., CHAVARRÍA ARNAU A. 2020, *Archeologia e sostenibilità in Italia nell'era post (?) Covid-19*, «European Journal of Post-Classical Archaeologies», 10, 7-20 ([http://www.postclassical.it/PCA\\_Vol.10\\_files/PCA10\\_Brogioolo-Chavarria.pdf](http://www.postclassical.it/PCA_Vol.10_files/PCA10_Brogioolo-Chavarria.pdf)).
- BROGIOLO G.P., IBSEN M. (eds.) 2009, *Corpus Architecturae Religiosae Europaeae (saec. IV-X), vol. II/I. Province di Belluno, Treviso, Padova, Vicenza, Zagreb-Motovun*, International Research Center for Late Antiquity and the Middle Ages.
- BROGIOLO G.P., JURKOVIĆ M. 2012, *Corpus Architecturae Religiosae Europaeae. Introduction*, «Hortus Artium Medievalium», 18, 1, 7-26 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.1.102781>).
- CHANTINNE F., MIGNOT P. 2012, *Prémices du projet CARE en Belgique*, «Hortus Artium Medievalium», 18, 1, 183-187 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.1.102794>).
- CHAVARRÍA ARNAU A. 2018, *The CARE Italia project and the wikicare platform*, «Hortus Artium Medievalium», 24, 14-17 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.5.115929>).
- CHEVALIER P., GRANJON L., LECLERCQ É., MILLEREUX A., SAVONNET M., SAPIN C. 2012, *Base de données annotées et Wiki pour la constitution du corpus numérique CARE*, «Hortus Artium Medievalium», 18, 1, 27-35 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.1.102782>).

- CIURCINA M., GROSSI P. 2016, *Considerazioni sugli open data e i beni culturali e paesaggistici in Italia. Il decreto Artbonus: cosa cambia per la riproduzione dei beni culturali?*, in P. BASSO, A. CARAVALE, P. GROSSI (eds.), *ArchaeoFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica. Atti del IX Workshop (Verona 2014)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 8, 35-41 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_8/06\\_Ciurcina-Grossi.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_8/06_Ciurcina-Grossi.pdf)).
- FACCANI G., RISTOW S. 2012, *Vorromanische Kirchenbauten online - ein internationales Projekt*, «Hortus Artium Medievalium», 18, 1, 179-182 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.1.102793>).
- GUIDOBALDI F., MIELE A., CECALUPO C. (eds.) 2020, *Corpus Architecturae Religiosae Europaeae (saec. IV-X), vol. II. Italia 2a. Roma entro le mura. Regiones I-IV*, Città del Vaticano-Zagreb, Pontificio Istituto Archeologia Cristiana, International Research Center for Late Antiquity and the Middle Ages.
- LEUF B., CUNNINGHAM W. 2001, *The Wiki Way - Quick Collaboration on the Web*, New York, Addison-Wesley Professional.
- LORENZ M. 2008, *Wikipedia: ein Modell für die Zukunft? Zur Gefahr des Verschwindens der Grenzen zwischen Information und Infotainment*, in M. JORIO, C. EGGS (eds.), *“Am Anfang ist das Wort”. Lexika in der Schweiz*, Baden, Hier+Jetzt, 91-109.
- LORENZ M. 2009, *Geschichtsdarstellung und Geschichtsverhandlung in Wikipedia oder: Die Sehnsucht nach Beständigkeit im Unbeständigen*, in B. KORTE, S. PALETSCHEK (eds.), *History goes Pop. Zur Repräsentation von Geschichte in populären Medien und Genres*, Bielefeld, Transcript, 289-312.
- MAŘIKOVÁ-KUBKOVÁ J., BAXA P. 2012, *Situation report of the CARE for the Czech and Slovak Republics*, «Hortus Artium Medievalium», 18, 1, 75-83 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.1.102785>).
- MILINKOVIĆ M. 2012, *Die kirchliche Architektur in Serbien 4-10. Jh. – Überblick der Forschungsgeschichte und des Forschungsstandes*, «Hortus Artium Medievalium», 18, 1, 166-177 (<https://doi.org/10.1484/J.HAM.1.102792>).
- RODRÍGUEZ POSADA E., GONZÁLEZ BERDASCO Á., SIERRA CANDUELA J., NAVARRO SANZ S., SAORÍN T. 2012, *Wiki Loves Monuments 2011: The experience in Spain and reflections regarding the diffusion of cultural heritage*, «Digithum», 14, 94-104 (<https://www.raco.cat/index.php/Digithum/article/view/254241>).
- ROSENZWEIG R. 2006, *Can history be open source? Wikipedia and the future of the past*, «The Journal of American History», 93.1, 117-146 (<https://doi.org/10.2307/4486062>).
- SCHAFFERT S., BISCHOF D., BÜRGER T., GRUBER A., HILZENSAUER W. 2006, *Learning with Semantic Wikis*, in M. VÖLKELE, S. SCHAFFERT (eds.), *Proceedings of the First Workshop on Semantic Wikis – From Wiki to Semantics*, «CEUR Workshop Proceedings», 206, 109-123.

## ABSTRACT

The aim of the collaborative platform WikiCARE, born in 2010, is the cataloging of European churches between the 4<sup>th</sup> and the 10<sup>th</sup> centuries and the creation of a scientific community with shared research interests centered on the study of the churches. In this contribution we will first retrace the constitutive phases of the project and its purposes, and then present the structure of the information sheet, highlighting some critical issues found in its compilation by the Italian group. We will then reflect on the prospects of WikiCARE, considering its potential from the point of view of an ever wider sharing of research, not only in the academic field.

RAPTOR RELOADED.  
UN GEODATABASE GESTIONALE  
PER LA TUTELA ARCHEOLOGICA:  
NUOVI AGGIORNAMENTI PER UN SISTEMA APERTO

1. UN SISTEMA SEMPLICE PER REALTÀ COMPLESSE

RAPTOR, acronimo di “Ricerca Archivi e Pratiche per la Tutela Operativa Regionale” (<https://www.raptor.beniculturali.it/>), è un geodatabase gestionale studiato appositamente per velocizzare alcune procedure di tutela archeologica in capo alle Soprintendenze ed è finalizzato non solo a semplificare il lavoro dei funzionari archeologi, ma soprattutto a garantire una trasmissione del dato al futuro (FRASSINE, ASTA, DE FRANCESCO 2019)<sup>1</sup>, rendendolo progressivamente disponibile all’utenza esterna, in un’ottica di dialogo costante con il territorio e le altre Amministrazioni pubbliche. Il sistema, nato nel 2011 all’interno dell’allora Soprintendenza per i Beni Archeologici del Friuli Venezia Giulia, è frutto in realtà di un lavoro condiviso tra le Soprintendenze di Piemonte (SABAP Novara), Lombardia e Veneto, che ha portato, dopo un lungo confronto sulle diverse modalità operative adottate nei rispettivi uffici, a modelli procedurali standard sovraregionali, codificati all’interno di RAPTOR.

Il software, che gestisce solo alcuni degli iter amministrativi delle Soprintendenze aventi ricadute dirette sul territorio, non richiede particolari nozioni informatiche poiché è stato appositamente elaborato per guidare l’utente in tutti i passaggi, sintetizzabili in “Progetti”, “Interventi” (archeologici) ed esiti, declinati in schede di “Sito” e di “Indagine Negativa”. La mappatura che avviene all’interno di questi tre moduli essenziali, mediante digitalizzazione via web o upload di formati shape file georeferenziati, consente di trasmettere a qualsiasi funzionario di Soprintendenza coinvolto nella pratica le informazioni associate a quella determinata procedura<sup>2</sup>. La solidità logico-strutturale dell’applicativo è stata ulteriormente confermata in occasione della riforma ministeriale (D.M. 44/2016), che ha portato alla soppressione

<sup>1</sup> L’infrastruttura hardware e software è la medesima descritta in FRASSINE, DE FRANCESCO, DI TONTO 2017, 76, ma si è proceduto ai seguenti aggiornamenti: Linux Debian 10 “buster”, server Apache 2, Tomcat 9, PHP 7.3, PDO (codice PHP utile per un interscambio dati sicuro e performante tra un qualsiasi database SQL – PostgreSQL, nel nostro caso – e la pagina PHP che li richiama tramite query), PostgreSQL 11.7, GeoServer 2.18.1, OpenLayers 2.13, JavaScript e JQuery 1.12.4 / 1.7.1

<sup>2</sup> Per eventuali approfondimenti sulla nascita e gli sviluppi progressivi di RAPTOR si rimanda ai contributi indicati in bibliografia. Il sistema, creato volutamente per un utilizzo user friendly, ha ottenuto il sostegno dell’allora Direzione Generale per le Antichità ed è stato finanziato dalla già Soprintendenza per i Beni Archeologici del Friuli Venezia Giulia, insieme alle Soprintendenze di Veneto, Lombardia e Piemonte (SABAP-Novara).



delle Soprintendenze Archeologia a favore di quelle uniche, disegnando una nuova realtà più frammentata in termini di competenze territoriali, alla quale il sistema ha permesso almeno in parte di far fronte.

RAPTOR è inoltre uno strumento a disposizione anche dell'utenza esterna, grazie all'accesso da remoto alle schede di sito archeologico, essenziali, ad esempio, per la redazione della documentazione necessaria alla valutazione preventiva dell'interesse archeologico in sede di progetto di fattibilità tecnico-economica di un'opera pubblica (D.Lgs. 50/2016, art. 25). Da giugno 2019, infatti, si è messo a disposizione il frutto di un lungo lavoro – iniziato nel 2013 e ancora in corso – di revisione e digitalizzazione delle informazioni contenute sia negli apparati bibliografici sia negli archivi cartacei delle Soprintendenze. Oggi è dunque possibile interrogare liberamente, accedendo alla mappa generale (<https://www.raptor.beniculturali.it/mappa.php#>), circa 16.000 siti archeologici. La visualizzazione delle geometrie e le risposte del sistema alle interrogazioni effettuate sono stabilite in base alla tipologia di utente e ai relativi permessi associati.

Per l'accesso libero senza login si è scelto, soprattutto per scopi di tutela, di utilizzare i centroidi dei poligoni, salvo per alcune situazioni particolari, come i siti lineari (ad es. strade) o le zone sottoposte a provvedimento di tutela (“vincoli”) che, per la loro stessa valenza intrinseca, sono state pubblicate in formato poligonale. La loro interrogazione consente di accedere ad un set minimo di dati identificativi del provvedimento, mentre per i siti è possibile ottenere informazioni essenziali, quali la definizione, la cronologia e la descrizione. Agli utenti accreditati, invece, con particolare riguardo per le ditte e i professionisti archeologi, è consentita la piena consultazione di quanto appena descritto. Questi ultimi possono inoltre esaminare le schede di “Indagine Negativa”, strumento fondamentale soprattutto ai fini dell'individuazione del potenziale archeologico e quindi della redazione del documento di valutazione archeologica in sede di progetto di fattibilità tecnico-economica di un'opera pubblica.

La scelta di rendere liberamente fruibili le informazioni relative ai siti archeologici archiviate sul sistema si inserisce in un percorso già da tempo avviato dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo, oggi Ministero della Cultura (MiC), attraverso la messa in rete di differenti set di dati archeologici georiferiti registrati su portali che si prefiggono obiettivi diversi, come Fasti on line (<http://www.fastionline.org/>) specificamente dedicato all'archeologia e pensato per la registrazione e la divulgazione dei dati relativi alle indagini archeologiche condotte sul territorio nazionale, o altri non esclusivamente archeologici e connessi alle attività di tutela proprie del Ministero, come Vincoli in Rete (<http://vincoliinrete.beniculturali.it/VincoliInRete/vir/utente/login>), il Sistema Informativo Territoriale Ambientale e Paesaggistico (<http://www.sitap.beniculturali.it/>) o la Carta del Rischio dei Beni Culturali (<http://www.cartadelrischio.beniculturali.it/webgis/>). Il tema della pubblicazione

in rete delle informazioni relative al patrimonio archeologico è attualmente oggetto di un progetto organico da parte dell'Istituto Centrale per l'Archeologia (ICA) finalizzato alla creazione di un portale unico di interscambio dei dati archeologici prodotti da soggetti diversi sul territorio nazionale, il Geoportale Nazionale per l'Archeologia ([http://ic\\_archeo.beniculturali.it/it/222/il-geoportale-nazionale-per-l-archeologia-gna](http://ic_archeo.beniculturali.it/it/222/il-geoportale-nazionale-per-l-archeologia-gna); CALANDRA, BOI 2018, 68-72).

A livello periferico la pubblicità delle informazioni desunte dagli archivi e dall'operato quotidiano delle Soprintendenze, iniziata negli anni Novanta del secolo scorso con la pubblicazione della Carte Archeologiche, è proseguita, nell'ottica di una tutela condivisa con gli Enti territoriali, con l'inserimento di dati archeologici georiferiti all'interno dei portali webGIS di alcune Amministrazioni locali<sup>3</sup>. Il quadro disomogeneo e il limite imposto, come per l'edito, da un panorama conoscitivo in continuo divenire, oggi possono essere superati dall'utilizzo costante di RAPTOR da parte delle nove Soprintendenze coinvolte e dei professionisti archeologi. La gestione informatizzata dell'attività di tutela e l'archiviazione digitale dei suoi esiti permettono infatti di garantire una banca dati aggiornata, validata da parte degli Istituti preposti, consultabile online e al contempo disponibile per altre amministrazioni.

## 2. DALLA “BACHECA” ALLA SEPARAZIONE DEI “PROGETTI” DAGLI “INTERVENTI”

La nuova organizzazione ministeriale e l'esigenza di rendere l'utilizzo di RAPTOR ancora più agile e speditivo nella gestione del lavoro quotidiano dei funzionari hanno indotto a ricercare soluzioni ulteriori. In tale direzione è stata pertanto rivista la “Bacheca” dei funzionari archeologi (FRASSINE, NAPONIELLO 2012, 87-88), segnatamente nelle sezioni destinate al conteggio degli “Interventi in corso”, della “Documentazione di scavo da consegnare” e degli “Interventi conclusi (per anno)”. Inoltre è stata aggiunta un'altra sezione denominata “Scavi terminati slegati da sito/indagine negativa”, relativa a tutte quelle documentazioni di scavo archeologico inserite, ma di cui ancora non si è provveduto a compilare le schede di “Sito” o di “Indagine negativa”. Tutti gli elenchi contenuti nei box della bacheca sono scaricabili comodamente in formato .csv e .pdf.

L'innovazione maggiore è consistita tuttavia nella separazione dei “Progetti” dagli “Interventi” (di scavo archeologico). Oggi il funzionario può quindi decidere di seguire due strade. Quella canonica prevede, all'arrivo di una richiesta esterna (di autorizzazione o di parere su un progetto), l'aggiunta di un nuovo record nella sezione “Progetti”, compilando prima un form dedicato ai dati amministrativi (protocollo, data e oggetto) e poi uno riservato alle

<sup>3</sup> Solo per citare alcuni esempi: [http://sit2.cittametropolitana.milano.it/www/websit/viewer/index.aspx?IdMappa=sit\\_10\\_123456](http://sit2.cittametropolitana.milano.it/www/websit/viewer/index.aspx?IdMappa=sit_10_123456); <https://territorio.comune.bergamo.it/gfmaplet/>; <https://sit.provincia.brescia.it/gfmaplet10/?map=tav2.2>; <https://idt2.regione.veneto.it/idt/webgis/viewer?webgid=90>.

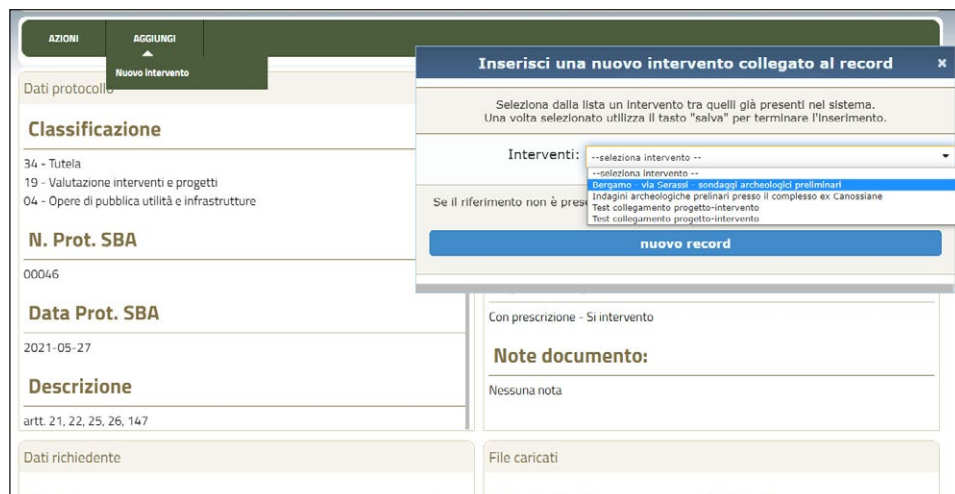


Fig. 1 – Pagina del “Progetto” dedicata al documento in uscita recante il parere della Soprintendenza con le prescrizioni: a destra la finestra filtro che consente di creare un nuovo “Intervento” di scavo o di collegarne uno già presente nel sistema.

specifiche progettuali che identificano l’opera, per terminare con l’inserimento (disegno via web o carico shape file) della relativa geometria. Dalla scheda monografica di progetto, che riassume tutte le informazioni precedentemente inserite e rese ora ancora più accessibili grazie alle modifiche apportate sia alla “Cronologia documenti” sia ai “File progetto” (ex “Allegati”)<sup>4</sup>, è possibile inserire il riscontro, ovvero il parere o l’autorizzazione prodotta dal funzionario, all’istanza presentata. Qualora vi sia una prescrizione che prevede un intervento di scavo archeologico questo sarà attivabile mediante l’apposito alert, comparso nella scheda monografica alla registrazione della risposta (FRASSINE, DE FRANCESCO, DI TONTO 2017, 76-79).

La seconda via permette oggi di evitare, o di demandare ad un secondo momento, tutta la procedura appena descritta. Al recepimento della comunicazione di inizio lavori è infatti possibile da parte del funzionario o di suo collaboratore accedere direttamente alla maschera di inserimento, anche se il Progetto non è ancora stato caricato, cliccando la voce “Interventi” dal menù generale e quindi il pulsante “Nuovo intervento”. La compilazione in pochi secondi dei campi essenziali se da un lato permette di far comparire nella bacheca della ditta o del professionista archeologo incaricato lo scavo

<sup>4</sup> Tra le modifiche si segnala, all’interno del menù “Azioni”, l’aggiunta di un nuovo pulsante “Chiudi progetto” che permette di completare in via definitiva la pratica senza dover tornare all’elenco generale “Progetti”.

assegnato (sulla procedura FRASSINE *et al.* 2015, 174-176), abilitandolo al contempo al carico della documentazione, dall'altro consente al funzionario di monitorare la situazione dei propri scavi, dal loro "stato" (in corso, sospeso, terminato) ai conteggi puntuali, attraverso la consultazione della propria "Bacheca" personale. Qualora poi quest'ultimo decidesse di recuperare anche la parte iniziale della procedura ovvero il "Progetto", l'intervento potrà essere collegato in qualsiasi momento all'istanza che lo ha generato mediante apposito menù a tendina (Fig. 1).

### 3. "SITO" E "VINCOLI": MODIFICHE E COLLEGAMENTI

L'esito dell'iter codificato in RAPTOR si conclude con la redazione di schede di "Sito" archeologico o di "Indagine negativa", laddove gli interventi di scavo abbiano rinvenuto o meno testimonianze antropiche del passato. Non volendo rinunciare alla libera fruizione dei dati contenuti nel sistema secondo le modalità sopra descritte, ma dovendo al contempo garantire la massima tutela di alcuni contesti, è stato abilitato un pulsante che permette di pubblicare ciascuna scheda compilata (Fig. 2).

The screenshot displays the RAPTOR web interface for managing site records. At the top, the logo 'M/BACT' and the title 'RAPTOR Ricerca Archivi e Pratiche per la Tutela Operativa Regionale' are visible. A yellow banner at the top right says 'Collega un vincolo alla scheda sito.' Below this, a navigation bar contains 'AZIONI', 'AGGIUNGI', and 'LIVELLI INFORMATIVI'. The main content area is divided into two columns. The left column, titled 'Scheda sito', contains a yellow box with the message 'La scheda risulta non pubblicata' and a 'pubblica' button. Below this are sections for 'Vincolo' (with a dropdown menu and a 'crea / aggiungi vincolo' button), 'Descrizione' (with a text area), 'Note', 'Sopralluoghi', 'Quote archeologiche/geologiche', and 'Coordinate'. The right column, titled 'Localizzazione', shows a map with a yellow bounding box around the site location. Below the map is a table of 'Fasi cronologiche principali'.

Crono. Iniz.	Crono. fin.	Tipologia	Definizione	Liv. Info.	Azioni
Seconda età del ferro	Seconda età del ferro	insediamento	tracce di insediamenti	Scavo	
Cronologia inserita	Cronologia inserita	sito non identificato	struttura muraria	Scavo	

Fig. 2 – Scheda monografica di "Sito": in alto a sinistra il pulsante che permette la pubblicazione all'utenza esterna delle informazioni contenute; sotto il nuovo strumento ideato per collegare un "Vincolo" e il relativo alert in alto.

Oggi l'ultimo tassello dell'intera procedura – progetto, intervento, sito – riguarda un aspetto essenziale del lavoro svolto all'interno delle Soprintendenze, ovvero l'indicazione se la nuova area individuata tramite lo scavo archeologico sia da sottoporre o meno a provvedimento di tutela. Per questo motivo nel form di inserimento di un nuovo sito archeologico è previsto ora il campo “Da vincolare” caratterizzato da un “radio button” che permette di scegliere tra le voci “Sì” e “No”. Spuntando il valore “Sì”, il sistema crea nella scheda monografica di sito un alert specifico (Fig. 2). A conclusione dell'iter amministrativo di verifica/dichiarazione di interesse culturale sul bene (D.Lgs. 42/2004, artt. 12-13) è possibile procedere all'inserimento del dispositivo di tutela adottato direttamente dalla scheda di sito, che manterrà dunque il collegamento ad esso. La selezione della voce “Sì” al quesito “da vincolare” fa comparire infatti un pulsante “Crea/aggiungi vincolo” che permette, attraverso una specifica finestra filtro (campi “Comune” e “Nome vincolo”), di associare un provvedimento di tutela selezionandolo tra quelli già registrati nel sistema, oppure di inserirne uno nuovo; il tasto è posizionato al posto dell'originario “Inquadramento topografico”, ora migrato nei “Dettagli” del form “Localizzazione”, sopra la mappa di riferimento.

#### 4. L'“ARCHIVIO SCAVI”: AGGIORNAMENTI

La sezione dedicata al caricamento e all'archiviazione della documentazione di scavo archeologico, così come quella dei “Metodi non invasivi” (“Telerilevamento”, “Geofisica”, “Survey”), è stata uniformata alle altre parti del sistema con l'aggiunta, all'interno della scheda monografica di scavo, di una mappa di localizzazione dell'intervento effettuato. Questo ha comportato una modifica anche nel menù a discesa del form di “Upload” con la creazione di due nuovi pulsanti dedicati, ovvero “Shape file GIS” e “Shape file (solo areale scavo)”. Con il primo strumento è possibile caricare la totalità delle elaborazioni di post-scavo effettuate in ambiente GIS da parte della ditta archeologica, mentre con il secondo esclusivamente la forma geometrica pertinente all'areale di scavo (prima solo archiviata), che viene così visualizzata sia sulla nuova mappa intergrata nella scheda monografica di scavo sia all'interno della “Mappa” generale del sistema. Inoltre per evitare che vi siano problemi durante l'upload, il software effettua una serie di controlli sullo shape file bloccandone il carico qualora il formato non sia corretto oppure laddove le coordinate della geometria siano fuori dai limiti territoriali inseriti dall'utente nell'inquadramento topografico dello specifico intervento di scavo.

Infine, per il corretto aggiornamento dello “stato” (in lavorazione/terminata) della documentazione all'interno della “Bacheca”, si è completamente rivisto e modificato il metodo di chiusura della stessa, prima demandato ai funzionari e ora direttamente in capo alle ditte. Spuntando il completamento



del caricamento di quanto richiesto, RAPTOR inoltra al funzionario incaricato della Direzione scientifica dello scavo archeologico una mail conclusiva ad attestazione delle operazioni effettuate dal professionista incaricato.

## 5. PIANTE DI FASE

Sempre dall’“Archivio scavi” è possibile accedere ad una nuova sezione studiata di recente per gestire le “piante di fase” prodotte dagli scavi archeologici o derivate da bibliografia edita o da altre attività, quali il telerilevamento o la geofisica. Questa sezione è concepita come un macro raccoglitore di informazioni utili a raffinare conoscenze e tutela, soprattutto all’interno dei centri urbani, senza giungere all’interrogazione spaziale della singola unità stratigrafica<sup>5</sup>. L’eventuale approfondimento di aspetti specifici del singolo contesto è infatti sempre demandato alla documentazione di scavo allegata all’“Archivio Scavi” e collegata alla rispettiva scheda di “Sito”.

Il listato iniziale in formato tabellare mostra alcune indicazioni essenziali (Comune, Località, Indirizzo, Denominazione convenzionale, Descrizione, link alla scheda sito, sì/no) e permette con il pulsante “Nuovo record” di accedere alla compilazione del form preposto. Esso si compone dell’“Inquadramento topografico” e della “Denominazione convenzionale” da assegnare al raccoglitore di fasi di ciascun contesto, inseribili, dopo il salvataggio del primo form, all’interno della scheda monografica. Le “Fasi” sono codificate con lo stesso metodo (pulsante “Aggiungi”) e gli stessi lemmi impiegati nella scheda sito (“Tipologia”, “Definizione”, “Cronologia iniziale/finale”, “Livelli informativi”; FRASSINE *et al.* 2015; FRASSINE, DE FRANCESCO 2015), ma con l’aggiunta di due campi dedicati, ovvero “Descrizione” e “Note” che permettono di descrivere in modo più articolato le caratteristiche della fase che si sta inserendo. Effettuato il salvataggio, è possibile caricare esclusivamente shape file relativi a quella specifica fase; una volta completata la sequenza minima richiesta, indicata dai canonici alert, si attiverà il tasto che permette la pubblicazione o meno di quanto contenuto per la libera consultazione sulla mappa generale da parte dell’utenza esterna. Al di sotto saranno inoltre visibili i link alle relative schede di sito, eventualmente collegate attraverso l’apposito pulsante “Crea/aggiungi sito” (Figg. 3-4). Qualora si vorrà, in futuro si potrà arrivare a collegare tra loro ciascuna fase presente nelle rispettive schede “Sito” e “Piante di fase”.

Queste informazioni, una volta pubblicate, saranno raggiungibili dalla “Mappa” generale del sistema cliccando sull’apposito simbolo (stella bianca):

<sup>5</sup> Per la gestione di un importante ambito urbano come quello della città di Roma cfr. il sistema SITAR (SERLORENZI 2017; SERLORENZI *et al.* 2017), che ha però un’impostazione logica diversa da RAPTOR.

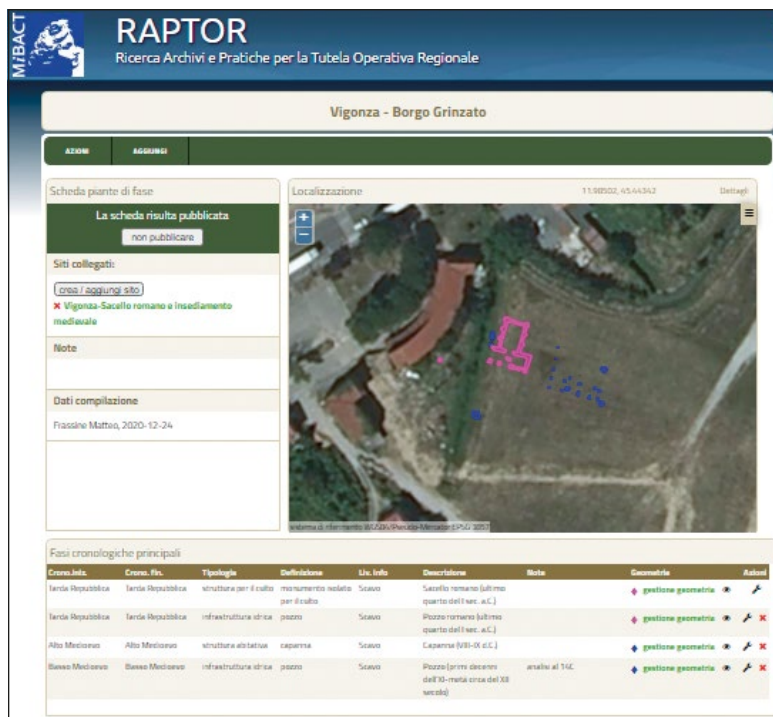


Fig. 3 – La scheda monografica dedicata alla gestione delle “Piante di fase” (dati desunti da FRASSINE 2018).

la pop-up che compare contiene sia il link diretto alla scheda sia gli occhietti di spunta, che permettono di visualizzare o spegnere direttamente ogni singola fase caricata.

## 6. ARCHEOLOGIA PREVENTIVA: UNA NUOVA SEZIONE PER NUOVI AUTOMATISMI

Tra le più importanti innovazioni di RAPTOR vi è la nuova sezione pensata espressamente per agevolare la consegna dei dati digitali d’archivio presenti nel sistema agli archeologi nell’ambito della procedura di verifica preventiva dell’interesse archeologico (D.Lgs. 50/2016, art. 25). Si è pertanto provveduto a dematerializzare il modulo di richiesta cartaceo esistente, rendendolo ora accessibile alle ditte/professionisti archeologi attraverso la nuova voce chiamata appunto “Archeologia preventiva”, presente nel gruppo “Pratiche” del menù generale. L’accesso al sistema da parte della ditta/professionista in possesso delle credenziali consente di visualizzare il listato personale contenente tutte le richieste effettuate alle Soprintendenze e il relativo stato, facilmente riconoscibile

**Civitas Camunorum**

AZIONE AGGIUNGI

Scheda piante di fase  
La scheda risulta non pubblicata  
pubblica

Siti collegati:  
crea / aggiungi sito

Note

Dati compilazione  
Di Francesco Stefania, 2020-12-28

Localizzazione 10.28150, 45.94316 Dettagli

Fasi cronologiche principali

Cronologia	Crono. fin.	Tipologie	Definizione	Lit. info	Descrizione	Note	Geometrie	Azioni
Ritorno generale	Ritorno generale	insediamento	insediamento urbano	litografica			gestione geometria	

Fig. 4 – Scheda monografica con le “Piante di fase” di età romana relative al centro di *Civitas Camunorum* (dati desunti da F. SIMONOTTI 2019, *Carta archeologica informatizzata di Cividate Camuno, Brescia*, testo inedito).

dal cerchio colorato a fine stringa (rosso = in corso; giallo = chiusa; verde = completata). Cliccando su “Nuovo record”, in alto a sinistra, si apre il form di richiesta che è suddiviso in quattro parti. Nella prima si trova la consueta stringa per l’inserimento degli elementi topografici (Comune, Località, Indirizzo, Foglio, Mappale, Partita tavolare) in RAPTOR, che permette di registrare l’areale in cui ricade l’opera di progetto; nella seconda vi sono i dati della ditta/professionista richiedente, già precompilati dal sistema sulla base di quanto inserito al momento dell’accreditamento; nella terza si chiede di specificare la stazione appaltante o il soggetto che ha incaricato la ditta/professionista unitamente al soggetto incaricato della ricerca d’archivio e firmatario del documento di verifica, che possono anche non coincidere. Seguono i campi “Descrizione” e “Note” e l’indicazione del funzionario/i referenti (Fig. 5).

Una volta effettuato il salvataggio e il controllo automatizzato sui campi obbligatori, viene visualizzata la finestra “nodo” che consente all’utente di decidere cosa fare: se individuare l’areale oggetto di richiesta attraverso

**RAPTOR**  
Ricerca Archivi e Pratiche per la Tutela Operativa Regionale

Utilizza il form per inserire una nuova richiesta di Archeologia preventiva

**AZIONI**

Attenzione! I campi in blu sono obbligatori

Comune/i, località per i quali si richiede la ricerca: Per le aree marine selezionare il valore "Non determinabile" presente nella lista dei Comuni

**Comune:**  **Località:**  **Indirizzo:**  **Catasto:**  **Foglio:**  **Map./p.c.:**  **Sub.:**  **Part.tav.:**

**La ditta**

<b>Nome:</b>	<b>Cognome:</b>	<b>Nome ente/soggetto:</b>	<b>In qualità di:</b>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Città:</b>	<b>Indirizzo:</b>	<b>Email/PEC:</b>	<b>* Telefono:</b>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
			<b>* Cellulare:</b>
			<input type="text"/>

\* compilare almeno uno dei due campi "Telefono" e "Cellulare"

**chiede l'autorizzazione ad accedere all'Archivio Dati Territoriali - Archeologia**

<b>Committente dell'opera pubblica:</b> <input type="text"/>	<b>Descrizione delle opere di progetto per le quali viene redatta la verifica:</b> <input type="text"/>
<b>Committente dell'incarico di verifica:</b> <input type="text"/>	
<b>Soggetto incaricato della consultazione d'archivio:</b> <input type="text"/>	<b>Note:</b> <input type="text"/>
<b>Soggetto responsabile della verifica preventiva:</b> <input type="text"/>	

**Funzionario/i a cui inoltrare la richiesta**

**Assegnazione funzionario/i:**

Fig. 5 – “Archeologia preventiva”: form per la richiesta di accesso agli archivi della Soprintendenza.

il caricamento di uno shape file poligonale o procedere al disegno manuale via web dello stesso; se tornare al listato delle proprie richieste oppure se visualizzare la scheda monografica, che raccoglie i dati inseriti e ancora modificabili fino a quando non si sarà provveduto a chiudere la prima parte della procedura, sempre guidata da appositi alert. Completato il primo step le ditte/professionisti potranno procedere alla stampa digitale in formato .pdf del modulo da inviare firmato alla Soprintendenza per gli adempimenti di competenza, mentre il funzionario indicato nel form specifico riceverà una mail da RAPTOR contenente il link alla scheda monografica di richiesta. Tale schermata differisce tra gli utenti solo nell'elenco delle geometrie presenti sotto la mappa. Il funzionario archeologo avrà infatti a disposizione, oltre allo shape file dell'areale caricato/disegnato in fase di compilazione dal richiedente, anche

Fig. 6 – La scheda monografica relativa all’“Archeologia preventiva”. In basso i pacchetti di dati in formato shape file compresso preparati in automatico da RAPTOR.

tutti i siti archeologici ricompresi all’interno di quell’areale specifico, suddivisi in “pubblicati”, cioè quelli resi liberamente consultabili sulla mappa generale, “non pubblicati” e “pubblicati e non” (Fig. 6). Si tratta di pacchetti di shape file creati in automatico da RAPTOR e messi a disposizione del funzionario affinché siano allegati all’autorizzazione finale di accesso agli archivi della Soprintendenza trasmessa al richiedente.

L’iter codificato si conclude con il caricamento da parte degli archeologi incaricati della verifica del file .pdf del documento di valutazione archeologica redatto in sede di progetto di fattibilità tecnico-economica di un’opera pubblica della relazione di archeologia preventiva, unitamente ad almeno una tavola (formato .pdf, .bmp, .jpg, .jpeg, .png, .tiff) e ai dati shape file raccolti



in una cartella in formato .zip, suddivisi tra quelli di progetto e quelli relativi esclusivamente ai nuovi siti discendenti dalla verifica effettuata. In questo modo si avrà a disposizione un archivio digitale, da rendere disponibile anche per le consultazioni da remoto, che sarà altresì popolabile con i documenti di valutazione pregressi, che potranno essere caricati sul sistema dalle Soprintendenze utilizzando pressoché lo stesso form “Archeologia preventiva”. Tutti i poligoni di questa nuova sezione sono visibili nella “Mappa” generale dell’applicativo e risultano interrogabili, fornendo dunque ai funzionari uno stato dell’arte costantemente aggiornato sui lavori di verifica preventiva condotti sul territorio di competenza; un’apposita pop-up attivata dal click sulla mappa in corrispondenza di ciascun poligono consente quindi di accedere ad alcune informazioni essenziali circa la ditta/professionista che ha inoltrato la richiesta e la data in cui è stata fatta; per gli approfondimenti necessari basterà cliccare sull’apposito link diretto alla scheda monografica.

## 7. AREE A POTENZIALE ARCHEOLOGICO

Nel menù generale, tra le “Indagini negative” e i “Metodi non invasivi” è stato aggiunto un pulsante di accesso per un’altra innovativa componente di RAPTOR dedicata alla gestione delle “Aree a potenziale archeologico”, pensate esplicitamente per incrementare il dialogo con le altre Amministrazioni pubbliche e in particolare con quelle locali. La sezione è infatti stata studiata per mappare le zone che sono state recepite come a rischio/potenziale/sensibilità archeologica in occasione della redazione degli strumenti di pianificazione territoriale (PGT, PTCP) e che pertanto, in base ai rispettivi Piani delle Regole, sono sottoposte a specifiche discipline o attenzioni nel caso di realizzazione di progetti o lavori. La sezione consente inoltre di registrare gli esiti di studi specialistici, indagini di archeologia preventiva<sup>6</sup>, analisi effettuate dai singoli funzionari in tema di mappatura del potenziale archeologico, sia ai fini dell’esercizio della quotidiana attività di tutela da parte delle Soprintendenze sia in vista dei futuri aggiornamenti dei Piani Territoriali.

Dal listato iniziale, che sintetizza in formato tabellare le informazioni del record (Comune, Località, Indirizzo, Denominazione, Prescrizioni vigenti/Proposte prescrittive), si accede attraverso l’usuale voce “Nuovo record” al form di compilazione che, oltre al tipico “Inquadramento topografico” e alla “Denominazione”, presenta un “radio button” (si/no) finalizzato ad indicare se l’area è inserita o meno all’interno degli strumenti di programmazione territoriale sopra descritti, operando dunque una netta distinzione tra aree già interessate da specifiche regole dettate da tali Piani, e zone di cui è solo

<sup>6</sup> Per una recente esperienza di definizione e mappatura del potenziale archeologico su scala provinciale cfr. DI FINZIO, FACCHINETTI 2020.

Fig. 7 – Form di inserimento delle “Aree a potenziale archeologico”.

individuato il “potenziale archeologico” ancora non sottoposto a specifiche disposizioni cautelative (Fig. 7). La scelta determina l’attivazione alternativa di due campi denominati “Prescrizioni vigenti” per il “sì” e “Proposte prescrittive” per il “no”, che consentono di riportare i disposti stabiliti nei Piani vigenti nel primo caso e le proposte di regolamentazione eventualmente adottabili in caso di recepimento nell’altro. Il “Potenziale” è definito attraverso il menù a tendina (“Alto”, “Medio”, “Basso”, “Generico”) del campo omonimo. Al salvataggio è possibile procedere al carico dello shape file o al disegno manuale della sola geometria areale, che verrà visualizzata all’interno della scheda monografica apposita, dotata, come quella di “Sito” o di “Fase”, di un pulsante per rendere pubblica l’informazione sulla “Mappa” generale (Fig. 9). Le aree che non sono state ancora recepite dagli strumenti di pianificazione territoriale, trattandosi di informazioni in corso di perfezionamento, potranno non essere pubblicate ed eventualmente essere messe a disposizione dei professionisti archeologi ai fini della verifica preventiva dell’interesse archeologico.

## 8. LA GESTIONE DELLE GEOMETRIE

Per rendere più speditivo il disegno/inserimento delle geometrie e ridurre al minimo eventuali errori materiali, oltre ai controlli impostati sugli shape file si è proceduto anche al potenziamento degli strumenti destinati ad agevolare la vettorializzazione diretta via web (selezione e interrogazione di geometrie multiple, cancellazione di più geometrie selezionate, split/merge), soprattutto in relazione ad una significativa implementazione dell’applicativo. Ora è infatti possibile avvalersi di qualsiasi geometria inserita copiandola e incollandola da

una sezione all'altra, attraverso una pratica finestra "filtro" che consente di scegliere la sezione da cui recuperare la geometria (Progetto, Intervento, Sito, Indagine Negativa, Vincolo, Scavo archeologico) e selezionare la voce interessata in base al suo identificativo (Fig. 8), rendendo ancora più speditivo e sicuro il recupero delle geometrie necessarie al completamento di una scheda specifica.

## 9. LA "MAPPA" GENERALE

La "Mappa", come già detto in altre sedi, è di fatto il cuore di RAPTOR poiché è la sintesi di tutte le operazioni condotte sul sistema e il punto di partenza per la tutela del territorio. Proprio per la sua importanza e valenza intrinseca si sono apportate alcune modifiche sostanziali discendenti da quanto in precedenza descritto.

Nei "Livelli di mappa" a disposizione del personale interno alla Soprintendenza sono state inserite le sezioni "Scavi", suddivisi in base alla "presenza/assenza" di record archeologico (così come codificato nella scheda monografica di scavo), "Piante di fase", "Archeologia preventiva" e "Aree a potenziale archeologico". Attraverso invece il nuovo pulsante "Ricerche/

The screenshot displays the RAPTOR software interface. On the left, a 'Scheda sito' (Site Record) form is visible, with a green header indicating 'La scheda risulta pubblicata' (The record is published) and a 'non pubblicare' (do not publish) button. Below this, there are sections for 'Vincolo' (Constraint) with radio buttons for 'si' (yes) and 'no' (selected), and 'Descrizione' (Description) containing a detailed archaeological report. On the right, a 'Localizzazione' (Location) map shows an aerial view of an urban area with a red location pin. Below the map, there are sections for 'Livelli informativi' (Information Levels) and 'Fasi cronologiche principali' (Main Chronological Phases). A 'Copia geometria' (Copy geometry) window is open, featuring a dropdown menu with options: 'scavo' (selected), 'progetto', 'intervento', 'sito', 'indagine negativa', 'vincolo', and 'scavo'. To the right of the dropdown is a text input field containing 'bg cmi' and a button labeled 'BG CMI 17/18'. Below the dropdown, a table lists various archaeological features and their associated phases.

Copia geometria		Fasi cronologiche principali			
idrica	canalizzazione	genovico	genovico	Scavo	✂ ✕
infrastruttura	canalizzazione	Medioevo	Medioevo		
agrona		genovico	genovico		
insediamento	tracce di insediamento	Basso Medioevo	Basso Medioevo	Scavo	✂ ✕
struttura per il culto	complesso conventuale	XVI secolo	XVI secolo	Scavo	✂ ✕
struttura per il culto	complesso conventuale	XVII secolo	XVII secolo	Scavo	✂ ✕

Fig. 8 – Finestra di selezione e filtro che consente di copiare e incollare qualsiasi geometria inserita in RAPTOR da una sezione a un'altra.

Download” è possibile effettuare ricerche incrociate sui contenuti di mappa, a partire dal topografico (Provincia/Comune). Già alla selezione del “Comune” il software risponde fornendo i quantitativi numerici delle risorse presenti, suddivisi per categorie (Vincolo, Progetto, Intervento, Indagine negativa, Sito) e di cui è possibile effettuare, in base all’utenza, il download in formato shape file, avvalendosi degli appositi menù a tendina. Per i siti, inoltre, la ricerca è raffinata avvalendosi contemporaneamente di ulteriori filtri, quali la “Cronologia” (iniziale/finale), la “Tipologia” o la “Definizione”; ciò permette una scrematura dei siti all’interno del relativo menù a tendina e una precisa identificazione delle singole fasi anche all’interno di un sito pluristratificato. Ad ogni elemento selezionato, RAPTOR provvede a centrarsi sulla mappa visualizzando la geometria richiesta (strumento “lente di ingrandimento” o selezione singola voce da menù a tendina). Identica procedura di ricerca è oggi a disposizione dell’utenza esterna limitatamente ai livelli di mappa già fruibili, a cui saranno aggiunti a breve anche le “Piante di fase” e le “Aree a potenziale archeologico”, per quanto finora è stato possibile inserire.

## 10. NUOVE POTENZIALITÀ E RICADUTE

Come si può evincere da quanto finora descritto, in questi ultimi tre anni, lo sviluppo di RAPTOR è proceduto su un doppio binario. Se, infatti, da una parte l’attenzione è stata indirizzata al potenziamento del sistema per i funzionari archeologi, dall’altra si è perseguita la via di una sempre maggiore interazione con l’utenza esterna, amministrazioni pubbliche e archeologi in particolare.

La ricaduta principale riguarda l’archeologia preventiva. La possibilità per i professionisti di accedere liberamente alle schede di “Sito”/“Indagine Negativa” ha notevolmente semplificato le ricerche per la verifica preventiva dell’interesse archeologico, mostrandosi indispensabile in quest’ultimo periodo in cui, per la nota emergenza sanitaria Covid-19, gli archivi cartacei delle Soprintendenze sono risultati difficilmente (o non) accessibili per lungo tempo. La nuova sezione è stata dunque creata appositamente per agevolare ulteriormente la consultazione da remoto non solo attraverso l’inoltro di pacchetti shape file (“Siti”) alle ditte o professionisti coinvolti nelle procedure di verifica, ma anche nella direzione di creare un archivio digitale delle documentazioni, anche pregresse, da rendere disponibili in consultazione al richiedente.

Se tra gli obiettivi vi è anche quello di alleggerire progressivamente il carico delle ricerche negli archivi delle Soprintendenze, tra i più rilevanti vi sarà sicuramente un potenziamento di quegli aspetti dell’archeologia preventiva che ancora faticano ad essere accolti e compresi, soprattutto dalle stazioni appaltanti, e i cui esiti RAPTOR gestisce attraverso la sezione “Metodi non invasivi” (Survey, Telerilevamento e Geofisica). Contestualmente si ridurrà sensibilmente il rischio di una proliferazione di siti che, pur discendendo da una medesima fonte (come

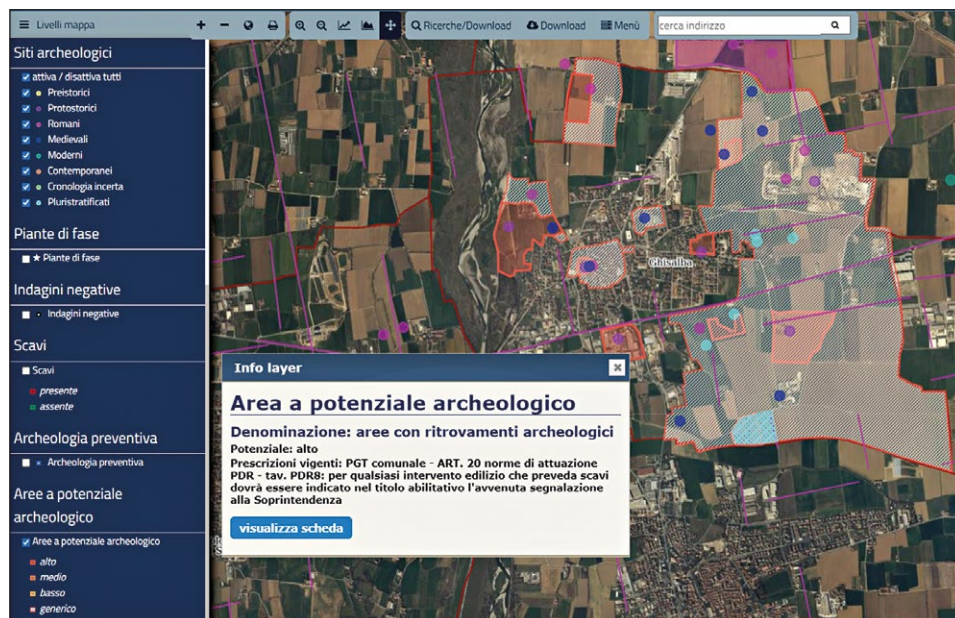


Fig. 9 – Aree a potenziale archeologico definite sulla base dei rinvenimenti, degli studi storico-documentali e degli elementi del paesaggio storico recepite dal PGT comunale di Ghisalba (Bergamo).

ad esempio i dati bibliografici o d'archivio), possono venire posizionati su base cartografica in punti differenti del territorio, sia per mero errore materiale nel disegno sia per una lettura non corretta dell'informazione .

Sempre nella direzione di incrementare il volume del patrimonio informativo relativo alle componenti archeologiche a disposizione degli utenti e ai fini di una tutela sempre più puntuale è stata creata una nuova sezione dedicata alla mappatura delle “Piante di fase”. Le informazioni che qui si vogliono rendere disponibili sono certo tese a suscitare un maggiore interesse e sensibilità dell'utenza esterna nei confronti delle testimonianze tramandate dal passato, ma sono altresì funzionali alla redazione di quanto previsto dalla procedura di verifica preventiva, avvalendosi di dati puntuali, essenziali soprattutto in ambito urbano e in presenza di siti complessi. Questo nuovo tassello del sistema è finalizzato in realtà ad andare oltre, inserendosi in un quadro di complementarietà di informazioni consultabili nella “Mappa” generale di RAPTOR, che servono al funzionario archeologo per definire al meglio il potenziale archeologico, attraverso un'analisi di complessità non limitata alla semplice presenza/assenza del rinvenimento, ma estesa ad una disamina del comportamento dei livelli archeologici in rapporto alle sequenze geomorfologiche e alle opere da realizzarsi. Un supporto di non secondaria



importanza a tale definizione è inoltre offerto dal recepimento di una serie di informazioni raccolte attraverso la georeferenziazione degli elementi notevoli ricavati dall'analisi diacronica della cartografia e della documentazione storica effettuata in occasione di alcune importanti opere pubbliche: i nuclei di antica formazione, gli edifici e i luoghi di culto storici, le strutture fortificate, i tracciati viari e i percorsi storici<sup>7</sup> oltre al posizionamento, laddove possibile, dei toponimi significativi per la ricostruzione archeologica attraverso il confronto di diverse cartografie storiche georeferenziate (cfr. ad es. CAPRONI 2019).

Quale agile strumento di sintesi è stata dunque creata un'apposita sezione denominata appunto "Aree a potenziale archeologico" (Fig. 9), destinata a recepire sia gli areali già codificati negli strumenti urbanistici vigenti sia a delinearne di nuovi ai fini di una mirata attività di programmazione territoriale svolta di concerto con le realtà locali.

MATTEO FRASSINE

Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio per l'area metropolitana di Venezia e le province di Belluno, Padova e Treviso  
matteo.frassine@beniculturali.it

STEFANIA DE FRANCESCO

Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio per le province di Bergamo e Brescia  
stefania.defrancesco@beniculturali.it

ALESSANDRO ZAMBETTI

AZ-Web

## BIBLIOGRAFIA

- CALANDRA E., BOI V. 2018, *Tra riproduzione e condivisione dei beni culturali: il ruolo dell'Istituto Centrale per l'Archeologia*, in M. ARIZZA, V. BOI, A. CARVALE, A. PALOMBINI, A. PIERGROSSI (eds.), *I dati archeologici. Accessibilità, proprietà, disseminazione (Roma 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28, 63-72 (<https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.08>).
- CAPRONI R. 2019, *Tracce longobarde tra Oglio e Adda. Le testimonianze toponomastiche*, in M. FORTUNATI, C. GIOSTRA (eds.), *I Longobardi del ducato di Bergamo. Le necropoli di Fara Olivana e Caravaggio - Masano*, Guide MAGO 3, Mantova, SAP Società Archeologica srl, 35-38.
- DI FINZIO C., FACCHINETTI G. 2020, *Servizio Idrico Integrato e archeologia, un binomio inedito e due punti di vista*, in *Archeologia preventiva, infrastrutture e pianificazione*, «Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti di Torino», 74, 2-3 n.s., 49-54.
- FRASSINE M. (ed.) 2018, *Vigonza. Dal sacello romano all'insediamento medievale. Archeologia ai margini della centuriazione di Padova nord-est*, Mantova, SAP Società Archeologica srl.

<sup>7</sup> Si cita ad esempio il lavoro in corso dal 2017 nelle Soprintendenze lombarde che, grazie alla redazione delle verifiche preventive dell'interesse archeologico per l'installazione della Banda Ultra Larga, ha permesso di mappare numerosi dati, oggetto di progressiva acquisizione all'interno di RAPTOR.

- FRASSINE M., ASTA A., DE FRANCESCO S. c.s., *RAPTOR per la tutela e la conoscenza del patrimonio culturale sommerso*, in *Atti del VI Convegno nazionale di archeologia subacquea (Taormina 2019)*, in corso di stampa.
- FRASSINE M., DE FRANCESCO S. 2015, *Il webGIS RAPTOR e la tutela del patrimonio archeologico di Milano*, in D. MASSARA, F. SLAVAZZI (eds.), *Milano Archeologia per Expo 2015. Verso una valorizzazione del patrimonio archeologico di Milano, Atti del Seminario (Milano 2014)*, «LANX», 19, 137-149 (<https://doi.org/10.13130/2035-4797/4894>).
- FRASSINE M., DE FRANCESCO S., DI TONTO S. 2017, *RAPTOR: verso l'apertura del sistema all'utenza esterna*, in R. AURIEMMA (ed.), *La democrazia della conoscenza. Patrimoni culturali, sistemi informativi e open data: accesso libero ai beni comuni? Atti del Convegno (Trieste 2016)*, Udine, Forum Edizioni, 75-88.
- FRASSINE M., NAPONIELLO G. 2012, *RAPTOR: archeologia e tutela. Verso la pubblica amministrazione digitale*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 81-99 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/05\\_Frassine\\_Naponiello.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/05_Frassine_Naponiello.pdf)).
- FRASSINE M., NAPONIELLO G. 2013, *RAPTOR 1.0. Archeologia e pubblica amministrazione: un nuovo geodatabase per la tutela*, in M. SERLORENZI (ed.), *ArcheoFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica, Atti del VII Workshop (Roma 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 4, 88-95 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_4/09\\_Frassine\\_Naponiello.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_4/09_Frassine_Naponiello.pdf)).
- FRASSINE M., NAPONIELLO G., DE FRANCESCO S., ASTA A. 2015, *RAPTOR 1.1. Archeologia nella "pratica": dai progetti alla documentazione di scavo*, in M. SERLORENZI, G. LEONI (eds.), *SITAR, Atti del III Convegno Internazionale (Roma 2013)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 7, 169-178 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_7/19\\_Frassine\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_7/19_Frassine_et_al.pdf)).
- FRASSINE M., NAPONIELLO G., DE FRANCESCO S., ASTA A. 2016, *RAPTOR 1.5., Aggiornamenti e sperimentazione*, in P. BASSO, A. CARVALE, P. GROSSI (eds.), *ARCHEOFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica. Atti del IX Workshop (Verona 2014)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 8, 61-71 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_8/09\\_Frassine\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_8/09_Frassine_et_al.pdf)).
- FRASSINE M., RIGONI A.N., BEZZI A., BEZZI L., NAPONIELLO G. 2014, *Un prototipo di Augmented Reality per la valorizzazione della villa romana di Torre di Pordenone (Friuli Venezia Giulia)*, «Archeologia e Calcolatori», 25, 189-206 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF25/10\\_Frassine\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF25/10_Frassine_et_al.pdf)).
- SERLORENZI M. 2017, *Per una conoscenza archeologica aperta e condivisa: l'esperienza del SITAR*, in R. AURIEMMA (ed.), *La democrazia della conoscenza. Patrimoni culturali, sistemi informativi e open data: accesso libero ai beni comuni?*, *Atti del Convegno (Trieste 2016)*, Udine, Forum Edizioni, 125-136.
- SERLORENZI M., LEONI G., JOVINE I., DE TOMMASI A. 2017, *Linking spatial-temporal points, connecting human and digital nodes: The ArcheoSITAR Project framework*, «Digital Archaeology», 1, 1 (<https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2017.0167>).

## ABSTRACT

RAPTOR is a geo-database built for the management of the archaeological administrative procedure of the Superintendencies. The system allows the recording of any kind of work carried out in any geographical context and the mapping of the archeological outcomes so that the archaeological maps can be constantly updated. A set of the archaeological data recorded in the system can now be freely accessed on the map by external users; archaeologists in particular can see full information of the archaeological sites. In order to support preventive archaeology, a new section of the system currently allows to map the preventive archaeology investigations and to obtain automatically the vector data of the archaeological sites within the project areas. Moreover, RAPTOR enables now to record and show the plans of the archaeological phases of each single site or urban context; on the other hand a new specific section is dedicated to the drawing of the areas of archaeological potential.

## IT APPLICATIONS TO ARCHAEOLOGY AND THE OA DIAMOND JOURNALS' CHALLENGE. ENHANCING ACCESS AND REUSE OF TEXTUAL AND VISUAL RESOURCES

### 1. INTRODUCTION

In recent years there have been increasing efforts by policy makers to promote Open Science, both at the theoretical and at the practical level, so that best practices and recommendations on Open Access (OA) to research data and publications have often turned into rules and mandates<sup>1</sup>. The OA publishing landscape is varied, comprising diverse strategies and approaches to ensure its sustainability. In this, the economic aspect is pivotal, especially for the so-called 'gold road' of OA. This consists of two different models: the APC-based model (where APC stands for Article Processing Charges), requiring fees from the authors for publication, and the 'diamond OA' model, with free publication for both authors and readers<sup>2</sup>.

«Archeologia e Calcolatori» (<http://www.archcalc.cnr.it/>) has been an OA diamond journal since the beginning of its online publication in 2005, long before this label was coined (MOSCATI 2009, 2018). This article presents the latest operational choices made in the valorisation and accessibility of the journal's resources to the benefit of the research community in IT applications in archaeology and discusses the new solutions we are experimenting to enhance the journal's archive, in line with the FAIR principles<sup>3</sup>. It focuses on two aspects: the provision of open visual resources – images and 3D models – in addition to the articles' full texts on the journal's website, and the management, enrichment, and provision of descriptive metadata of the journal's resources, in view of their reuse by service providers and inclusion in e-infrastructures, above all OpenAIRE, the Open Access Infrastructure for Research in Europe (<https://www.openaire.eu/>).

<sup>1</sup> See for instance the EU's Open Science policy ([https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/open-science\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/open-science_en)). For an overview of the history of the adoption of Open Science policies at the national levels, with a focus on France, see DACOS 2019. Italy recently included its first 'Piano nazionale per la scienza aperta' in the latest *Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027* (<https://www.mur.gov.it/sites/default/files/2021-01/Pnr2021-27.pdf>).

<sup>2</sup> For an overview of OA principles and practices in the Humanities, see the recent contribution by SALUCCI and CINOTTI (2021, postprint). For a study of the OA journals in the archaeological sector, see CARVALE, PIERGROSSI 2012, 2015. These articles also provide useful explanations of terminology and concepts related to OA publishing. For Open Science in archaeology, see MARWICK *et al.* 2017.

<sup>3</sup> The acronym FAIR stands for 'Findable, Accessible, Interoperable, Reusable'. FAIR principles, first codified in 2016, are guidelines for the production and dissemination of digital resources, aiming at improving their accessibility and reusability (WILKINSON *et al.* 2016, 2019). On FAIR principles in archaeology, see lastly PIERGROSSI 2020 (with references).

This paper is an opportunity to describe and assess the relevance of those initiatives within the digital archaeology disciplinary domain (HUGGETT 2015), in the light of the Open Science recommendations, and to map the current position of the journal against the landscape of the OA diamond publishing model. In particular, the possibilities that this paradigm offers in terms of research and development will be shown. We will then draw conclusions, based on this discussion, in section 4.

I.R., N.P.

## 2. FROM DATABASES TO INFRASTRUCTURES: CUSTOM SOLUTIONS FOR FAIR LITERATURE RESOURCES

### 2.1 «Archeologia e Calcolatori» and the early provision of metadata via an OAI gateway

Since 2005, «Archeologia e Calcolatori» has been providing online the PDF files for the published versions of journal articles through its official website. This was motivated by a pioneering adoption of OA principles, as promoted in the early 2000s by the Open Archives Initiative (OAI) (LAGOZE, VAN DE SOMPEL 2001). Along with the PDF files, «Archeologia e Calcolatori» also provided metadata about publications using open formats – namely, the *oai\_dc* metadata format based on Dublin Core terms – and interoperable standards, so that harvesting and aggregation services could have access to them. This was accomplished through a static OAI repository gateway (provided as a service by Ghent University, in Belgium) that served metadata via the Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting (OAI-PMH), using an XML file generated by the journal (BARCHESI 2005, 2019).

However, this solution meant that «Archeologia e Calcolatori» as a data provider was directly tied to a third-party service. Furthermore, the metadata generation process was indeed ‘static’ from the journal’s side, since the data were compiled into a single XML file, which was then used by the gateway. The XML document itself was generated by extracting data from a Microsoft Access database, which was therefore dependent on proprietary software.

With the substantial evolution of web technologies and the widespread adoption of open-source solutions, «Archeologia e Calcolatori» migrated from the static gateway provider to a custom implementation of OAI requirements for metadata provision, which proved particularly useful when Ghent University stopped offering its service. Therefore, a dedicated data provider repository<sup>4</sup>, compliant with OAI-PMH 2 specifications and designed around the new relational database, was developed.

<sup>4</sup> The repository is available at [http://www.archcalc.cnr.it/oai/aec\\_oaipmh2.php?verb=Identify](http://www.archcalc.cnr.it/oai/aec_oaipmh2.php?verb=Identify).

## *2.2 Relational database and development of a standalone OAI-PMH data provider*

One of the central steps in the restructuring and renovation of the underlying technology that supports «Archeologia e Calcolatori» was the design and implementation of a relational database to hold data on journal resources. As detailed by Salvatore FIORINO (2019), a conceptual model was defined to represent publications (Article entities) so that their relationships with authors, volumes, etc. would be clearer and more manageable. This resulted in the development of an Entity-Relationship model and, consequently, a logical and physical implementation of the database using an open-source Database Management System (DBMS), MySQL. This is in line with the general approach to move from proprietary to open solutions, which informs the journal's policy in its entirety. This database was then populated so that data about publication resources were properly distributed over the respective entities.

The significance of this restructuring of the data model – and its implementation – lies (among other things) in the fact that it became a necessary foundation for the development of the new data provider repository. Indeed, the repository dynamically generates the proper XML response to the various OAI-PMH requests (verbs and related parameters) by retrieving relevant data from the underlying database. To perform this task, it first processes the incoming HTTP request by parsing the query parameters according to the rules defined by the protocol. If the request is valid, it calls the relevant procedure, structures the data according to the requested metadata format, and returns the generated XML to the harvester (or, generally, the client that sent the request). If the request is not valid and does not comply with the protocol, the repository returns the appropriate error response, still in XML format.

The repository is structured as shown in Fig. 1. It exposes 4 different sets to allow selective harvesting based on resource type and category. Sets are the main option provided by the protocol to filter available resources, so harvesters like OpenAIRE rely on them to gather only the metadata they intend to, depending on the context. For instance, the *openaire* set was added to be compliant with OpenAIRE requirements for automated metadata harvesting, as detailed in paragraph 2.3.

Another important piece of information exposed by the repository is the datestamp of individual records (not to be confused with the publication date, which is part of the Dublin Core metadata set). The datestamp reflects either the creation date of the record or the date when it was last modified. This allows harvesters to only gather metadata for newly created resources or existing resources that were updated with respect to the latest harvesting, a process known as incremental harvesting (VAN DE SOMPEL



Verb	Description
<i>Identify</i>	Information about the repository itself (name, base URL etc.)
<i>ListSets</i>	The list of available sets for selective harvesting
<i>ListMetadataFormats</i>	The list of metadata formats exposed by the repository
<i>ListRecords</i>	The list of all records available in the repository, including metadata for each record. Metadata for a single record can be retrieved through the respective <i>GetRecord</i> request URL
<i>ListIdentifiers</i>	The list of only the identifiers of all available records, not the metadata. The corresponding <i>GetRecord</i> request URL is also exposed for each identifier

Fig. 1 – OAI-PMH verbs implemented by the repository.

OAI Record: oai:www.archcalc.cnr.it/oai/ae\_c\_oaipmh2.php:816

OAI Record Header

OAI Identifier: oai:www.archcalc.cnr.it/oai/ae\_c\_oaipmh2.php:816 [oai\\_dc/](#) [formats](#)

Datestamp: 2011-04-29

setSpec: S.A. [Identifiers](#) [Records](#)

setSpec: openaire [Identifiers](#) [Records](#)

Simple Dublin Core Metadata (dc)

Title: Dati culturaltha.it, un progetto pilota dedicato ai dati aperti e a Linked Open Data

Author or Creator: D. Giorgio, Sara

Right Management: info:eu-repo/semantics/openAccess

Right Management: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Other Contributor: Serforenni, Mirella

Other Contributor: Leoni, Giorgia

Abstract: The pilot project dati.culturaltha.it started in 2011 to build up a Linked Open Data (LOD) Service that will progressively make available open data sets from the web-portal Culturaltha, the Italian national aggregator for European. The application, online since 2011 (<http://dati.culturaltha.it/>), was designed to allow the resources aggregated by Culturaltha to be available into large semantic networks after exposing, sharing and connecting data according to LOD principles. Culturaltha is the Portal of Italian Culture managed by the Istituto Centrale per il Catalogo Unico (ICCU), in which are involved cultural institutions - museums, archives and libraries - from national, regional and local levels. Metadata aggregated by Culturaltha, encoded according to the XML schema FPCO Dublin Core Application Profile (FPCO AP), were mapped into two different RDF schemas: the European Data Model (EDM) and the CIDOC Conceptual Reference Model (CIDOC CRM). In particular, the OWL implementation named Erlangen CRM was chosen for implementing the mapping. RDF triples mapped into Erlangen CRM were then enriched with links to URIs identifying instances of internationally established RDF resources for geographic names and authority files for personal and corporate names, such as GeoNames and Virtual International Authority File (VIAF).

Date: 2011

Language: ita

Resource Type: info:eu-repo/semantics/bookPart

Resource Type: info:eu-repo/semantics/publishedVersion

Publisher: CNR - Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale

Publisher: Edizioni All'Insegna del Gallo

Resource Identifier: [http://www.archcalc.cnr.it/supplements/81\\_sup.php?id=oei:http://www.archcalc.cnr.it/supplements/A\\_C\\_oai\\_Archive\\_sup.xml:816](http://www.archcalc.cnr.it/supplements/81_sup.php?id=oei:http://www.archcalc.cnr.it/supplements/A_C_oai_Archive_sup.xml:816)

Resource Identifier: [http://www.archcalc.cnr.it/index/Suppl\\_7:11\\_Dcb2/Governo.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/index/Suppl_7:11_Dcb2/Governo.pdf)

Format: application/pdf

Source: Archeologia e Calcolatori, Supplemento 7. Il SITAR nella Rete della ricerca italiana. Verso la conoscenza archeologica condivisa. Atti del III Convegno (Roma, Museo Nazionale Romano, 23-24 maggio 2013)

Source: ISSN: 2185-202X

Source: ISBN: 9788878146259

Subject and Keywords: <http://id.loc.gov/authorities/subjects/sh85006507>

Subject and Keywords: <http://id.loc.gov/authorities/subjects/sh89003285>

Subject and Keywords: Multimedia and web tools

Subject and Keywords: Cultural Resource Management

Fig. 2 – Example record from «Archeologia e Calcolatori»’s repository.

et al. 2004). Therefore, the repository implements the ‘until’ and ‘from’ parameters defined by the protocol to enable this process. Fig. 2 shows an example record from the repository, in its presentation as an HTML page on the web.

In the transition from the static XML file to the repository, there was a problem to be solved to ensure that compatibility with the previous system was preserved. In fact, the repository includes – in the metadata for each

record – a URL to directly retrieve the related full text in PDF format. The full texts are hosted on «Archeologia e Calcolatori»'s website, and the URL schema that the website uses to visualize metadata on a web page depends on the record's ID in the static XML. However, when data was transferred to the relational database, the IDs of individual records changed and – in general – were no longer aligned with the XML. Therefore, a new column was added to the database table for article records to create a 'mapping' between old and new IDs. This was then used to generate the correct PDF URL for each record in the repository.

N.P.

### *2.3 Aligning «Archeologia e Calcolatori» metadata to the OpenAIRE Guidelines*

While the static XML files already served the records' integration by aggregators such as *CulturaItalia*<sup>5</sup> (PIERGROSSI, ROSSI 2019) and *Europeana*<sup>6</sup> (CARVALE, PIERGROSSI, ROSSI in print)<sup>7</sup>, the restructuring of «Archeologia e Calcolatori»'s repository was an opportunity to reconsider the description of the journal's resources metadata for their aggregation by other service providers, in particular by OpenAIRE (BAGLIONI *et al.* 2019). This task was facilitated by the fact that all resources were already described according to the Dublin Core Metadata Initiative (DCMI) specifications<sup>8</sup>, being *oai\_dc* the metadata format also required by OpenAIRE.

The alignment process to the *OpenAIRE Guidelines for Literature Repositories v3*<sup>9</sup>, the latest operative version by summer 2020, consisted in the addition of a few metadata to «Archeologia e Calcolatori» records and in the mapping of domain-relevant attributes to standard vocabularies and encoding rules (see Fig. 3).

Compared to the previous DCMI elements set (see BARCHESI 2005, Tab. 1), the repository records were basically enriched by two `dc:rights` for the Access Level and the License Condition, and two `dc:type` for the Publication Type and the Publication Version. Further elements were added or multiplied in order to provide the most complete description of the

<sup>5</sup> [http://www.culturaitalia.it/opencms/opencms/system/modules/culturaitalia/templates/ricerca.jsp?searchType=&submitButton=&language=it&cat=indice&facetUnlimited=categoria\\_3\\_facet&facetUnlimited=categoria\\_2\\_facet&searchMode=on&q=archeologia+e+calcolatori&\\_\\_meta\\_descSource\\_1\\_facet=Archeologia+e+Calcolatori](http://www.culturaitalia.it/opencms/opencms/system/modules/culturaitalia/templates/ricerca.jsp?searchType=&submitButton=&language=it&cat=indice&facetUnlimited=categoria_3_facet&facetUnlimited=categoria_2_facet&searchMode=on&q=archeologia+e+calcolatori&__meta_descSource_1_facet=Archeologia+e+Calcolatori).

<sup>6</sup> <https://classic.europeana.eu/portal/it/search?q=istituto+di+scienze+del+patrimonio+culturale>; [http://www.culturaitalia.it/opencms/it/contenuti/focus/Europeana\\_Archaeology\\_\\_risorse\\_digitali\\_accessibili\\_e\\_riutilizzabili\\_sul\\_patrimonio\\_archeologico.html?language=it&tematica=Tipologia&selected=2](http://www.culturaitalia.it/opencms/it/contenuti/focus/Europeana_Archaeology__risorse_digitali_accessibili_e_riutilizzabili_sul_patrimonio_archeologico.html?language=it&tematica=Tipologia&selected=2).

<sup>7</sup> The abstract of the paper, given at the Archaeofoss 2020 conference, is available in BOGDANI *et al.* 2020.

<sup>8</sup> <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/>.

<sup>9</sup> [https://guidelines.openaire.eu/en/latest/literature/index\\_guidelines-lit\\_v3.html](https://guidelines.openaire.eu/en/latest/literature/index_guidelines-lit_v3.html).

```

<record>
  <header>
    <identifier>oai:www.archcalc.cnr.it/oai/aec_oaipmh2.php:1120</identifier>
    <datestamp>2021-04-29</datestamp>
    <setSpec>J:A</setSpec>
    <setSpec>openaire</setSpec>
  </header>
  <metadata>
    <oai_dc:dc xmlns:oai_dc="http://www.openarchives.org/OAI/2.0/oai_dc/"
      xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/"
      xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
      xsi:schemaLocation="http://www.openarchives.org/OAI/2.0/oai_dc/
        http://www.openarchives.org/OAI/2.0/oai_dc.xsd">
      <dc:title>
        Use and reuse of spatial and quantitative data in archaeology: from 3D survey to serious
        game at Phaistos (Crete)
      </dc:title>
      <dc:creator>Buscemi, Francesca</dc:creator>
      <dc:creator>Militello, Pietro Maria</dc:creator>
      <dc:creator>Santagati, Cettina</dc:creator>
      <dc:creator>Figuera, Marianna</dc:creator>
      <dc:creator>D'Agostino, Graziana</dc:creator>
      <dc:creator>Aiello, Damiano Antonino Angelo</dc:creator>
      <dc:rights>info:eu-repo/semantics/openAccess</dc:rights>
      <dc:rights>https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/</dc:rights>
      <dc:description>
        The article presents the results of a wider research carried out by a multidisciplinary
        group (archaeologists and engineers) of the University and the CNR-ISPC of Catania
        in the South-Western Quarter of the Minoan Palace of Phaistos (Crete).
        The article focuses on two digital survey campaigns carried out respectively in 2014,
        laser scanning, and 2019, Structure from Motion. Starting from the point cloud by
        laser scanner, the most recent, low cost and user-friendly photogrammetric tools
        (GoPro camera and software Agisoft Metashape) have been used during the 2019 campaign
        in order to update and to improve the previous dataset, which was used as a grid for
        georeferencing and scaling the new virtual model. Special attention was addressed to the
        comparison of the two datasets and to the reuse of the first one for georeferencing
        and scaling the second one. Furthermore, the research has been focused on the opportunity
        to exploit the obtained virtual model both for scientific purposes and for the outreach.
        The lack of accessibility of the South-Western Quarter of Phaistos Palace to the visitors
        attributes a special interest to this output. The virtual environment thus realized
        constituted an ideal starting point for the development of an educational fruition project
        based on a Serious Game approach. The cooperation of archaeologists and engineers in the
        development of the Phaistos game ensures a gaming experience not only pleasant but also
        provided with a strong educational profile.
      </dc:description>
      <dc:date>2020</dc:date>
      <dc:language>eng</dc:language>
      <dc:type>info:eu-repo/semantics/article</dc:type>
      <dc:type>info:eu-repo/semantics/publishedVersion</dc:type>
      <dc:publisher>CNR - Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale</dc:publisher>
      <dc:publisher>Edizioni All'Insegna del Giglio</dc:publisher>
      <dc:identifier>
        http://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=oai:www.archcalc.cnr.it/journal/A_C_oai_Archive.xml:1120
      </dc:identifier>
      <dc:identifier>info:doi:10.19282/ac.31.1.2020.09</dc:identifier>
      <dc:identifier>
        http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF31.1/09_Buscemi_et_al.pdf
      </dc:identifier>
      <dc:format>application/pdf</dc:format>
      <dc:source>Archeologia e Calcolatori 31.1</dc:source>
      <dc:source>ISSN: 1120-6861</dc:source>
      <dc:subject>http://id.loc.gov/authorities/subjects/sh85006507</dc:subject>
      <dc:subject>http://id.loc.gov/authorities/subjects/sh89003285</dc:subject>
      <dc:subject>Virtual Reality and 3D Modelling</dc:subject>
      <dc:subject>Survey and excavations</dc:subject>
    </oai_dc:dc>
  </metadata>
</record>

```

Fig. 3 – XML record from «Archeologia e Calcolatori»’s repository, compliant with the *OpenAIRE Guidelines for Literature Repositories v3*.

publication record, such as `dc:contributor` to recognise the role of the editors of the Supplements' volumes<sup>10</sup>. This goes in the same direction as the request of DOIs for the monographic issues of the journal («Archeologia e Calcolatori. Supplements» series; see PIERGROSSI, ROSSI 2019), because of the relevance of acknowledging curatorship of books in the Humanities and Social Sciences. Moreover, the `dc:relation` element for the description of the Project Identifier was implemented to capture and transmit to OpenAIRE information regarding relevant funding leading to the publication described. The `dc:relation` element for the Dataset Reference was also added to link the publication with underlying research data<sup>11</sup>.

Further optional or recommended metadata listed in the OpenAIRE Guidelines are not applicable, e.g., the Embargo End Date (because the journal's publications have no embargo), or are not applicable yet, e.g. the Publication Reference and the Coverage, but might be implemented in the future, especially as the journal is planning to provide HTML versions of the articles on its website. Moreover, interesting results already achieved in the annotation of information contained in the articles full texts can be extracted and further exploited to this purpose (e.g. spatial annotation: see CANTONE, CARVALE 2019).

Some metadata were aligned to the terms of the standard vocabularies in use by OpenAIRE, i.e. the *info:eu-repo* vocabularies for Access Level, Publication Type and Publication Version<sup>12</sup>, the IANA MIME Types list<sup>13</sup> for Format, the ISO 639-3<sup>14</sup> for Language. The two main disciplinary fields of the journal are described in `dc:subject` elements, according to the Library of Congress Subject Headings<sup>15</sup> (LCSH) vocabulary, which is one of the encoding schemes maintained by the DCMI<sup>16</sup>. Thus, Archaeology<sup>17</sup> and Computer Science<sup>18</sup> add to the domain-specific concepts that had been classified based on the journals' interests. These describe both the archaeological field and the IT application field the resource is concerned with (see MOSCATI 1999 and more recently CARVALE, CECCARELLI 2019).

<sup>10</sup> The example above lacks this element because it is taken from the Journal Articles set.

<sup>11</sup> The issue of preserving and linking digital data in archaeology is topical; see recently RICHARDS *et al.* 2021, with references, and the «Journal of Open Archaeology Data» as an example of this data-centric approach in digital publishing.

<sup>12</sup> <https://wiki.surfnet.nl/display/standards/info-eu-repo>.

<sup>13</sup> <http://www.iana.org/assignments/media-types/media-types.xhtml>.

<sup>14</sup> <https://iso639-3.sil.org/>.

<sup>15</sup> <https://id.loc.gov/authorities/subjects.html>.

<sup>16</sup> <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/#http://purl.org/dc/terms/LCSH>.

<sup>17</sup> <https://id.loc.gov/authorities/subjects/sh85006507.html>.

<sup>18</sup> <https://id.loc.gov/authorities/subjects/sh89003285.html>.

## 2.4 «Archeologia e Calcolatori» as an OpenAIRE data provider: contributions to the disciplinary community

After positive compatibility tests of the repository on the Provide Dashboard<sup>19</sup> (Fig. 4) and registration as an OpenAIRE data provider, by summer 2020 «Archeologia e Calcolatori» landed on OpenAIRE Explore with nearly a thousand resources of scientific literature<sup>20</sup>. In agreement with the OpenAIRE support staff, the records metadata were soon added with links to the full texts of the articles in a `dc:identifier` element to allow OpenAIRE to access the resources for text mining, in order to enable their full services (i.e. extracting bibliographic references, project information and links to other resources, computing subject classifications, etc.).

Finally, «Archeologia e Calcolatori» was integrated within the OpenAIRE *Digital Humanities and Cultural Heritage* (DHCH) community<sup>21</sup>, adding its nearly 971 open-access articles, in addition to 111 metadata-only records corresponding to the articles of older issues, whose full texts are in the process of being uploaded<sup>22</sup>.

The research domain of IT applications to archaeology and cultural heritage is well represented in OpenAIRE<sup>23</sup>. The DHCH community aggregates contents from journals such as «Internet Archaeology» (709 OA publications), «Journal on Computing and Cultural Heritage» (91 OA and 175 restricted-access publications), «Frontiers in Digital Humanities» (89 OA publications), and «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage» (38 OA, 111 restricted- and 1 embargoed-access publications)<sup>24</sup>.

Other journals are indexed in OpenAIRE but are not currently listed as content providers in the DHCH community, though it aggregates a good number of their articles: «Virtual Archaeology Review», contributing 398 OA publications<sup>25</sup>, and «Studies in Digital Heritage», with its 86 OA publications<sup>26</sup>, in particular, represent the OA diamond publishing model in this research domain together with «Archeologia e Calcolatori».

<sup>19</sup> <https://provide.openaire.eu/>.

<sup>20</sup> [https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=openaire\\_\\_\\_::f3a35cc23d629e74e8d5fe0d8bca1684](https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=openaire___::f3a35cc23d629e74e8d5fe0d8bca1684).

<sup>21</sup> [https://dh-ch.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=openaire\\_\\_\\_::f3a35cc23d629e74e8d5fe0d8bca1684](https://dh-ch.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=openaire___::f3a35cc23d629e74e8d5fe0d8bca1684).

<sup>22</sup> The numbers reported in this article date to June 2021.

<sup>23</sup> For an up-to-date overview of the journals operating in this sector, see MOSCATI 2019b, 23-25.

<sup>24</sup> Their respective webpages in the DHCH Community can be accessed from the list of content providers (<https://dh-ch.openaire.eu/search/find/dataproviders?size=50>).

<sup>25</sup> <https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=doajarticles::1ccd0d954512fbc65588259717859622>.

<sup>26</sup> <https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=doajarticles::b9f0f74d7ce28ff8a491b08bd682635>.



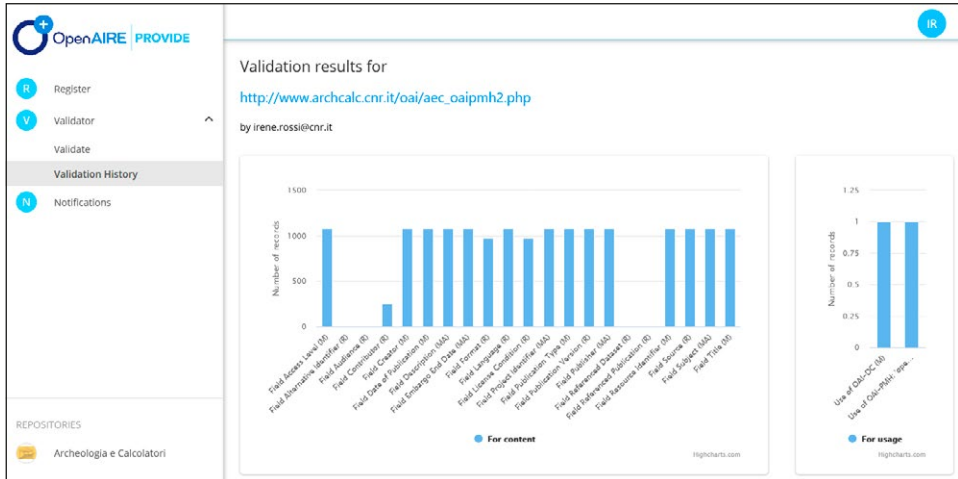


Fig. 4 – Result of the OpenAIRE validation test for «Archeologia e Calcolatori»’s OAI-PMH repository.

Other recently established initiatives, such as «Journal of Computer Applications in Archaeology»<sup>27</sup>, «Archéologies Numériques - Digital Archaeology»<sup>28</sup> and «Heritage»<sup>29</sup>, also contribute with their OA articles (42, 41 and 35 respectively) to the platform.

OpenAIRE collects the metadata of the above-mentioned journals via compatible aggregators, such as: CrossRef (<https://www.crossref.org/>) for «Archéologies Numériques - Digital Archaeology», «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», «Heritage», and «Journal on Computing and Cultural Heritage»; and DOAJ-Articles (<https://doaj.org/oai.article>) for «Frontiers in Digital Humanities», «Internet Archaeology», «Journal of Computer Applications in Archaeology», «Studies in Digital Heritage», and «Virtual Archaeology Review». In fact, DOAJ offers the publishers a feature for bibliographic metadata upload (either manually, via an API, or via static XML files compatible with the DOAJ schema), «on the understanding that the data will then be available for free, to be distributed to any third party who wants it» (<https://doaj.org/docs/xml/>). It then exposes its records in an OAI-PMH repository.

<sup>27</sup> <https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=doajarticles::8f83d0fcb363f2fcb942075a7d5b965a>.

<sup>28</sup> [https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=issn\\_\\_online::3d7413a1db96aa2a9f3380f8dcff5c05](https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=issn__online::3d7413a1db96aa2a9f3380f8dcff5c05).

<sup>29</sup> [https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=issn\\_\\_print::aa8c08e195474b9b3145d81ced27a061](https://explore.openaire.eu/search/dataprovider?datasourceId=issn__print::aa8c08e195474b9b3145d81ced27a061).

Due to «Archeologia e Calcolatori»'s long-standing adhesion to the OAI, the journal has opted for directly providing contents to OpenAIRE via its own repository, despite being indexed in DOAJ. This ensures immediate updatability, because when a new indexing is launched by OpenAIRE, the added or modified records of the database, exposed in the repository with a new datestamp, are automatically ingested by OpenAIRE by means of incremental harvesting. Moreover, the flexibility derived by the autonomous management of an OAI-PMH repository allows the journal to experiment with new solutions for the enhancement of descriptive metadata, as we will exemplify below.

## 2.5 Latest updates: enriching metadata

After several months of content provision to OpenAIRE, we were told by the OpenAIRE staff that the *Guidelines for Literature Repository Managers v4*<sup>30</sup> had become operational. With a view to keeping pace with the progress of research infrastructures, we are implementing the provision of literature records also according to these latest Guidelines, which require the use of two richer metadata formats: *oai\_datacite* and *oai\_openaire*<sup>31</sup>. Those schemas allow encoding references to vocabularies and authoritative lists as attributes of the elements.

For instance, annotation of the authors' information can be enriched with references to registries of people such as ORCID, encoded in the sub-properties of `datacite:creator`, e.g.:

```
<datacite:creators>
  <datacite:creator>
    <datacite:creatorName>
      Buscemi, Francesca
    </datacite:creatorName>
    <datacite:affiliation>
      Istituto di Scienze del
      Patrimonio Culturale - CNR
    </datacite:affiliation>
    <datacite:nameIdentifier nameIdentifierScheme=
      "ORCID" schemeURI="http://orcid.org">
      0000-0003-4886-656X
    </datacite:nameIdentifier>
  </datacite:creator>
</datacite:creators>.
```

<sup>30</sup> <https://openaire-guidelines-for-literature-repository-managers.readthedocs.io/en/v4.0.0/>.

<sup>31</sup> The repository will continue providing records in the *oai\_dc* format, since it is a basic requirement for a repository to be a valid OAI-PMH data provider and allows interoperability with a larger set of initiatives.

Terms of the COAR vocabularies (<https://vocabularies.coar-repositories.org/>) are referred to describe the genre of the resource, e.g.:

```
<oire:resourceType resourceTypeGeneral="literature"
uri="http://purl.org/coar/resource_type/c_6501">journal
article</oire:resourceType>
```

and to provide information on its accessibility, e.g.:

```
<datacite:rights rightsURI="http://purl.org/coar/
access_right/c_abf2">open access</datacite:rights>.
```

A further advantage is the possibility of encoding the type of resource version, that is its status in the publication process, e.g.:

```
<oire:version uri="http://purl.org/coar/version/
c_970fb48d4fbd8a85">VoR</oire:version>
```

and the location of the file of the resource, with declaration of the associated rights, e.g.:

```
<oire:file accessRightsURI="http://purl.org/coar/access_
right/c_abf2" mimeType="application/pdf" objectType=
"fulltext">http://www.archcalc.cnr.it/indice/
PDF31.1/09_Buscemi_et_al.pdf</oire:file>.
```

The upgrade of the journal's repository to the latest Guidelines will prove especially relevant as archives of different resource types and datasets of varied contents are getting more and more interconnected. Even within the journal's own archive, the richer semantics of some elements, such as the `datacite:relatedIdentifier`, allow for a more accurate description of the relations among the bibliographic resources (articles, volumes, series), and between the latter and additional digital objects, as described in the next section of this article. These updates to the repository will of course leverage the automatic generation of XML records from the database detailed above.

I.R.

### 3. BEYOND LITERATURE: OPEN ACCESS TO JOURNALS' NON-TEXTUAL CONTENTS

#### 3.1 *Open visual resources and metadata*

During the restructuring process of the database and the repository, «Archeologia e Calcolatori»'s editorial board decided to take advantage of the customisation possibilities of its own archival system to enhance not only the journal's textual resources, but also its non-textual digital contents. The objective was manifold.

Firstly, in the wake of «Archeologia e Calcolatori»'s contribution to the studies on digital and multimedia publishing in the archaeological domain

since the journal's earliest issues<sup>32</sup>, the aim was to facilitate the reader in the web fruition of the articles' visual content, which is instrumental in supporting the understanding of the archaeological and technological topics discussed. In addition to the still images corresponding to the articles' figures, other kinds of visual resources described in the publications are taken into consideration, such as the 3D models.

Secondly, the ideals informing the journal's policies called for the extension of the FAIR approach to those digital objects, not only allowing their full-size download and reuse, but also providing their description. This means considering the visual objects not just as supplementary materials embedded or attached to a publication's full text, but as independent resources, to be exposed as standalone metadata records in an archive for harvesting, while preserving the indissoluble relation with the literature sources which they belong to. As such, those visual resources, including photographs but also charts, drawings, etc., were to be assigned descriptive metadata, in order to foster discoverability of cultural and scientific contents.

The flexibility of the journal's archival system allowed to fulfil the above-mentioned requirements by simply extending the current database model and repository sets and implementing the website to present the visual resources in dedicated web pages, thus guaranteeing a comprehensive approach to the scientific product.

I.R.

### 3.2 Database extension and presentation on the website

To implement the new requirements for visual resources, as mentioned above, some specific changes to the database were needed. First, a conceptual model was drafted to integrate the new entities within the existing schema, creating an appropriate correspondence between metadata and database columns. The model defines two new entities, two one-to-many relationships and three many-to-many relationships (Fig. 5).

The entities represent data pertaining to images and 3D models, while the relationships are needed to properly refer each image and 3D model to their respective article and authors, and to reflect the interrelation between the visual resources themselves<sup>33</sup>. In addition to information needed to expose metadata, the database tables contain values related to the presentation of

<sup>32</sup> See the list of about 120 publications, retrievable through a search on the archive's content by the 'Multimedia and web tools' classification heading (<http://www.archcalc.cnr.it/pages/search.php>), spanning from the earliest volumes of the journal until the most recent study on the evolution of electronic publishing in the archaeological research from 1955 until today, by FROMAGEOT-LANIEPCE (2019).

<sup>33</sup> An image – as a figure within an article – can picture one or more 3D models. A 3D model can be source of several images.

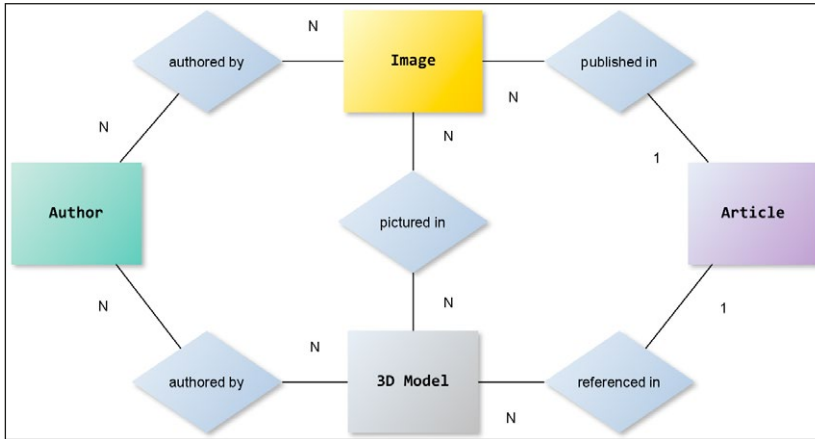


Fig. 5 – «Archeologia e Calcolatori» Entity-Relationship model for visual resources in the database.

the visual resources on the journal's website. To accomplish this goal, specific adaptations of the website were required, so that images and 3D models could be presented through dedicated web pages, showing both metadata in a human-readable format and media previews, along with direct file downloads (where possible).

### 3.3 Images

Virtually every article in «Archeologia e Calcolatori» contains several figures, many of which can be of general interest in their own right, as they reflect a substantial part of the authors' work. Therefore, an appropriate presentation of these resources on the website was deemed necessary. A preliminary step in this direction was the adaptation of the existing web page presenting metadata of individual articles to include information on related images and 3D models, where applicable.

These additions required changes to the way this dynamic page is generated on the website. In fact, this was previously accomplished by extracting metadata from the static XML file generated for the OAI gateway, as mentioned in paragraph 2.1. However, this approach was not suitable to represent relational data, since images and 3D models are separated entities, connected to the articles via relationships. Therefore, the dynamic generation of article pages was updated to retrieve all data, including relations, from the new database, and display them according to a modified template.

For the sake of example, we chose the article BUSCEMI *et al.* 2020, published in «Archeologia e Calcolatori» 31.1, as a case study to show the



## Archeologia e Calcolatori

CNR - DIPARTIMENTO SCIENZE UMANE E SOCIALI, PATRIMONIO CULTURALE  
 ISTITUTO DI SCIENZE DEL PATRIMONIO CULTURALE  
 JOURNAL ESTABLISHED BY Mauro Cristofari and Riccardo Franzosini - EDITOR: Paola Masulli

---

**Menu**

- Home Page
- About the Journal
- Editorial Staff
- Policy and Guidelines
- Index by Year
- Supplements
- Special Issues
- Search
- Image Gallery
- Open Access
- Credits and Contacts
- 20th Anniversary
- 30th Anniversary
- Cookie policy
- Open Access

<b>Authors</b>	Bucemi F., Miletto P., Santagati C., Figuera M., D'Agostino G., Aiello D.
<b>Title</b>	Use and reuse of spatial and quantitative data in archaeology from 3D survey to serious game at Phaistos (Crete)
<b>Volume</b>	Archeologia e Calcolatori 31.1
<b>Year</b>	2023
<b>Pages</b>	189-212
<b>DOI</b>	<a href="https://doi.org/10.19282/aec.31.1.2020.09">https://doi.org/10.19282/aec.31.1.2020.09</a>
<b>Full text:</b>	<a href="#">PDF</a>
<b>Publisher</b>	CNR - Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale
<b>Publisher</b>	Editori All'insegna del Grifo
<b>Subject</b>	Virtual Reality and 3D Modeling
<b>Subject</b>	Survey and excavation
<b>Abstract</b>	The article presents the results of a wider research carried out by a multidisciplinary group (archaeologists and engineers) of the University and the CNR-ISPC of Catania in the South-Western Quarter of the Minoan Palace of Phaistos (Crete). The article focuses on two digital survey campaigns carried out respectively in 2014, laser scanning, and 2019, Structure from Motion. Starting from the point cloud by laser scanner, the most recent, low cost and user-friendly photogrammetric tools (Gophy camera and software Agisoft Metashape) have been used during the 2019 campaign in order to update and to improve the previous dataset, which was used as a grid for georeferencing and scaling the new virtual model. Special attention was addressed to the comparison of the two datasets and to the reuse of the first one for georeferencing and scaling the second one. Furthermore, the research has been focused on the opportunity to exploit the obtained virtual model both for scientific purposes and for the outreach. The lack of accessibility of the South-Western Quarter of Phaistos Palace to the visitors attributes a special interest to this output. The virtual environment thus realized constituted an ideal starting point for the development of an educational fruition project based on a serious Game approach. The cooperation of archaeologists and engineers in the development of the Phaistos game ensures a gaming experience not only pleasant but also provided with a strong educational profile.
<b>Language</b>	English
<b>License</b>	CC BY-NC-ND 4.0
<b>Related images</b>	
<b>Related 3D models</b>	
<b>DOI-PHM Record</b>	<a href="https://www.archaeoic.cnr.it/doi/aec_aigpmh2.php?1120">https://www.archaeoic.cnr.it/doi/aec_aigpmh2.php?1120</a>

**Preview**

**Open Access**

**Full text**

**Archeological Computing Newsletter**

**Web Analytics**

Fig. 6 – New web page for the presentation of «Archeologia e Calcolatori»'s article data.

results of these adaptations (the same article used for the example records in section 2). The article contains 11 figures, which were all uploaded to the database with the corresponding metadata. It also references a 3D model, described in paragraph 3.4. The results are shown in Fig. 6.

A new field named 'Related figures' was added in the page, where the thumbnails of all related images are displayed in a row. The thumbnails are linked to the corresponding presentation page for each image. This page displays the resource's metadata, links to any related 3D models, and a preview of the image itself, which can also be downloaded in full resolution (Fig. 7).

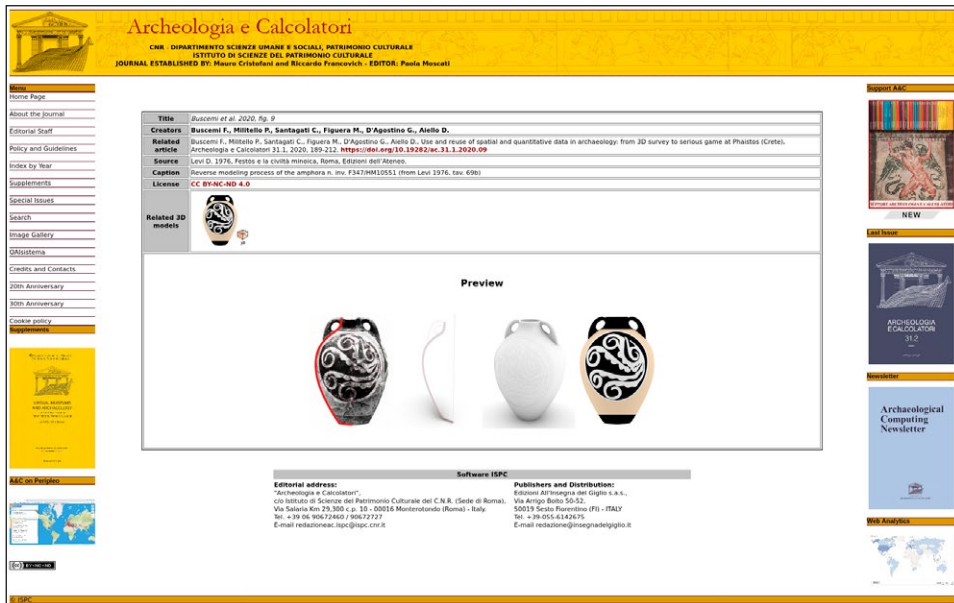


Fig. 7 – Presentation of image data in «Archeologia e Calcolatori»'s website (BUSCEMI *et al.* 2020, fig. 9).

### 3.4 3D models

The integration of 3D models in «Archeologia e Calcolatori»'s website is perhaps the most interesting aspect of the restructuring related to visual resources.

Some journals in the domain of digital technologies and archaeology have been doing this using different solutions. For example, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage»<sup>34</sup> provides previews of images and videos of 3D models, and allows downloading high resolution images and 3D files, along with supplementary materials. The pioneering «Internet Archaeology»<sup>35</sup>, instead, in addition to image galleries with full previews, also displays interactive previews of 3D models, with an embedded web viewer (RICHARDS, WINTERS 2015)<sup>36</sup>. The Deutsches Archäologisches Institut (DAI) has developed a tool called DAI Journal Viewer through which article metadata and figures are provided in a contextual presentation along with

<sup>34</sup> <https://www.journals.elsevier.com/digital-applications-in-archaeology-and-cultural-heritage/>.

<sup>35</sup> <https://www.intarch.ac.uk/>.

<sup>36</sup> See also the presentation 'Internet Archaeology – Open Access, Sharing Data' by the journal's editor Judith Winters at the colloquium *Actualité de l'Open Access en archéologie française* (23<sup>rd</sup>-24<sup>th</sup> of March 2017: <https://www.inrap.fr/internet-archaeology-open-access-sharing-data-13177>).

written text<sup>37</sup>. 3D models can be viewed via links to an external interactive viewer, hosted on the institute's Arachne platform (<https://arachne.dainst.org/>). Other journals, such as «Open Archaeology»<sup>38</sup>, rely on third party services – typically Sketchfab – to provide access to 3D models.

«Archeologia e Calcolatori»'s approach, in addition to web preview and downloads, also provides fully annotated and linked metadata for visual resources, including 3D models, which are therefore treated on the par with publications. To accomplish this, a suitable web 3D viewer was required, possibly with simple embedding and interactive features, and minimal impact in terms of changes to the underlying source code. The tool chosen as fitting for this purpose is the ATON 3.0 framework, developed and maintained within CNR-ISPC by Bruno Fanini<sup>39</sup>.

ATON is an open-source, web-based software framework (distributed under the GPL-3.0 license) to build and deploy interactive and collaborative 3D applications targeting cultural heritage (FANINI *et al.* 2021). ATON's 3D rendering components run in any modern web browser, thus not requiring any additional installation from users.

The main service that deploys ATON web applications can be installed and configured on a self-managed server with a dedicated domain name. The 3D scenes processed and deployed by ATON – via its front-end – can be then embedded in any web page using an *iframe* HTML element, that the application can generate automatically. In «Archeologia e Calcolatori»'s case, a standalone instance of ATON was installed on a virtual machine hosted by the CNR, referenced by the domain [aton.archcalc.cnr.it](http://aton.archcalc.cnr.it).

Since ATON assigns each 3D scene with a unique identifier, this can be used to automatically generate the URL that serves the scene itself (since the identifier is a parameter within the full URL). This mechanism was leveraged to dynamically extract from the database the ATON identifier related to each 3D model presented on «Archeologia e Calcolatori»'s website. Thus, the *iframe* embedded in the page renders the appropriate scene for the model itself based on the identifier. As in the case of images, the scene is included as an interactive preview in the web page, along with the model's metadata and related resources. The scene rendering employs a specific User Interface (UI) profile, that displays a set of interactive tools as buttons in a menu. The tools are: full screen mode, Virtual Reality mode, screenshot, measurement, and environment options. The result is shown in Fig. 8.

<sup>37</sup> <https://www.dainst.org/en/-/digital-publishing-award-2020-fur-archaologischen-anzeiger-und-dai-journal-viewer>.

<sup>38</sup> <https://www.degruyter.com/journal/key/OPAR/html>.

<sup>39</sup> <https://doi.org/10.5281/zenodo.4618387>.

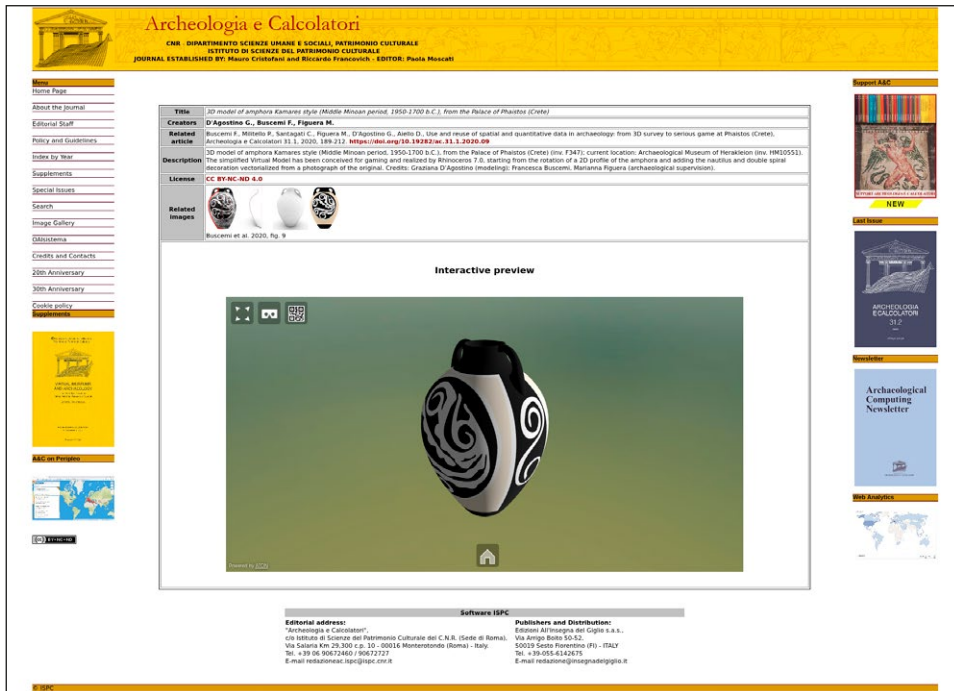


Fig. 8 – Web presentation of a 3D model, described in BUSCEMI *et al.* 2020.

In addition to visualization on the website, the models' files can be downloaded in GLTF or OBJ format, with a CC BY-NC-ND 4.0 (or less restrictive) license. The fact that «Archeologia e Calcolatori» provides this integrated access to resources – that is, full metadata annotation, media previews and downloads, all within the same user context – while also exposing direct links between related content, is perhaps its distinguishing factor compared to similar journals in the same domain.

N.P.

### 3.5 Repository implementation

As introduced in paragraph 3.1, a basic aspect of the valorisation of the visual resources is their description through interoperable metadata. Relevant images' and 3D models' information is stored in the respective tables of the database or can be inferred via the relationships between them. It comprises information on title, creator(s), bibliographic source (when the image is reused from a previous publication), publication date, publisher, description, identifiers, access rights, license condition, format, subjects, related «Archeologia

e Calcolatori»'s article, and related image(s) or 3D model(s) (for 3D model or Image records respectively).

It is beyond the current scope of the journal to encode technical (e.g. EXIF) metadata of the articles' images, all the more so as these do not solely or primarily consist of photographs, thus excluding, for instance, the thorough adoption of the IPCT Photo Metadata standard (<https://iptc.org/standards/photo-metadata/iptc-standard/>). As for the 3D models, relevant metadata can be embedded in the GLTF files that are available for fruition and download from the journal's website.

Descriptive metadata will be exposed in the journal's OAI-PMH repository to allow harvesting and reuse. In addition to the unqualified *oai\_dc*, other formats are being considered for harvesting by aggregators of literature and cultural resources. The current implementation aims at compatibility with the *OpenAIRE Guidelines for Data Archives*<sup>40</sup>, which adopt the DataCite Metadata Schema v3.1, with minor adjustments<sup>41</sup>. Image and 3D model records, identified via their URL, will feature some specific properties such as creator, title, size, format, rights, and description, and draw others from the related Article record, such as publisher, publicationYear, date, and the basic subjects list.

Providing the Image and 3D model records according to the *OpenAIRE Guidelines for Data Archives* allows their harvesting by OpenAIRE and mutual linking with the relevant literature records, also expressing the type of relation. In fact, the `datacite:relatedIdentifier` elements encode not only the machine-readable identifier of the connected resource, but also the semantics of this relation. For instance, referring to the case-study presented in this article, the record of the Image entitled 'Buscemi et al. 2020, fig. 9' can be related to the record of the article it belongs to, by a `relatedIdentifier` element having the attributes `relatedIdentifierType="DOI"` and `relationType="IsPartOf"`. Viceversa, the Article record (see paragraph 2.5) can be related to this and to the other Image records describing its figures through the same element, having the attributes `relatedIdentifierType="URL"` and `relationType="HasPart"`, and containing the relevant URL. The same applies to the relation between the Article and the 3D model records, having just a different `relationType` property, as the Article "Documents" the 3D model (and conversely the 3D model "IsDocumentedBy" the Article). An additional relation links the Image with any 3D model it is extracted from (`relationType="IsDerivedFrom"`), and conversely a 3D model with any Image deriving from it (`relationType="IsSourceOf"`).

I.R.

<sup>40</sup> <https://guidelines.openaire.eu/en/latest/data/index.html>.

<sup>41</sup> [https://guidelines.openaire.eu/en/latest/data/use\\_of\\_datacite.html](https://guidelines.openaire.eu/en/latest/data/use_of_datacite.html); [https://guidelines.openaire.eu/en/latest/data/application\\_profile.html](https://guidelines.openaire.eu/en/latest/data/application_profile.html).



4. «WE STILL HAVE THE FREEDOM TO EXPERIMENT»<sup>42</sup>

From June 2020 to February 2021, a large-scale survey on scientific journals was carried out under the impulse of cOAlition S<sup>43</sup> to study the landscape of OA diamond journals (BOSMAN *et al.* 2021). Keeping the latter as a constant term of comparison, the initiative aimed at gaining a better understanding of the variety, scope, and impact of OA diamond journals in various disciplines and regions, of their compliance with Plan S requirements<sup>44</sup>, of the operational challenges those journals face, and of their economic sustainability.

None of the three abovementioned OA diamond journals in the field of IT applications to archaeology and cultural heritage (see 2.4) was included in this survey. Nonetheless, the main results of this research appear to be compatible with our experience.

As an OA diamond journal, the editorial process and the implementation and maintenance of the digital assets and tools heavily depend on the voluntary commitment of its board and staff, referring only copy-editing, printing, and distribution of the paper journal to the commercial publisher (BOSMAN *et al.* 2021, 8, 90-91). OA diamond journals that are independent from publishing platforms are often tied to the legacy of their pioneering experience in terms of data management and digital tools, and have to face on their own the obsolescence of software and the evolving landscape of the best practices in scientific publishing. To achieve this goal, they need to constantly apply internal efforts, often aided by the support provided by the academic and research institutions they usually are a part of<sup>45</sup>. At the same time, the autonomy of OA diamond journals grants them flexibility and the freedom to experiment, which journals bound to external platforms may not enjoy, so that the former appear to adapt to change more easily and even promote it (BOSMAN *et al.* 2021, 89).

By building an open-access archive of the textual and visual resources of a journal counting more than 30 years of publication, «Archeologia e Calcolatori» aims at providing the scientific community with a powerful tool in the research

<sup>42</sup> BOSMAN *et al.* 2021, 89.

<sup>43</sup> <https://www.coalition-s.org/>.

<sup>44</sup> Relevant Plan S requirements for journals are: publishing content under Creative Commons licenses, with authors retaining copyright; a full Open Access model should be applied (no 'hybrid models'); no fees are required from authors and researchers (if applicable, any fees should be covered by funders and should be transparent). For more details, see <https://www.coalition-s.org/addendum-to-the-coalition-s-guidance-on-the-implementation-of-plan-s/principles-and-implementation/>.

<sup>45</sup> One of the recommendations to funders and infrastructures, based on the results of the abovementioned survey into the OA diamond landscape, is precisely to improve access to formatting tools and services for OA journals, such as those a number of infrastructures already provide, e.g. AmeliCA (<http://ameli.ca.org/>), PKP (<https://www.coalition-publi.ca/>), Metopes (<http://www.metopes.fr/>) and OpenEdition (<https://www.openedition.org/>), with its open-source publishing software Lodel (BECERRIL *et al.* 2021, 20). As a case study of the advantages of archaeological publishing on OpenEdition Journals, see RENAULT *et al.* 2020.

field of IT applications to archaeology, especially relevant for the study of the history of the discipline. The reader will benefit from the availability of full-size images and 3D models displayed in an embedded web viewer. In addition to this, «Archeologia e Calcolatori» follows a completely open and ‘linked’ approach, by providing interoperable metadata for all resources – both full annotations of individual records and their relations with other records – as well as contextual downloads of related files, thus facilitating reuse under the terms defined by the relevant Creative Commons licenses. Data provision to aggregators of scientific and cultural content ensures that the journal’s resources will be more and more interconnected and discoverable, thus feeding a virtuous cycle.

The CNR and its Institute of Heritage Science have been active players in e-infrastructures such as CLARIN<sup>46</sup>, DARIAH<sup>47</sup>, E-RIHS<sup>48</sup>, OpenAIRE and, more recently, SSHOC<sup>49</sup>, which will create the Social Sciences and Humanities area of the European Open Science Cloud (EOSC: HRUŠÁK *et al.* 2020)<sup>50</sup>. Institutional support has been essential in sustaining «Archeologia e Calcolatori»’s ‘OA diamond’ approach through time, and in opening the way for its integration into this digital ecosystem. The engagement towards this publishing model will be even more fundamental as Open Science has been rapidly turning into reality, and the OA diamond paradigm has proved to be the fairest one, making research sharable for all, based on excellence alone, regardless of economic considerations, and preserving the freedom to experiment new ways to provide accessible resources.

I.R., N.P.

### *Acknowledgements*

We would like to express our gratitude to Emma Lazzeri (CNR-ISTI) for facilitating «Archeologia e Calcolatori»’s approach to the OpenAIRE infrastructure, and the OpenAIRE staff, especially in the person of Amelie Christine Bäcker, for their kind and constant advice. We would also like to thank our colleagues Bruno Fanini, who supported us in the integration of ATON within «Archeologia e Calcolatori»’s website, and Francesca Buscemi, who kindly provided the 3D model used for testing the new features of «Archeologia e Calcolatori»’s database, repository and website. This research work has been supported by the CNR-ISPC project DSU.AD017.108 ‘Innovazione Patrimonio Culturale’.

IRENE ROSSI, NICOLÒ PARACIANI

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale – CNR  
irene.rossi@cnr.it, nicolo.paraciani@cnr.it

<sup>46</sup> <https://www.clarin.eu/>.

<sup>47</sup> <https://www.dariah.eu/>.

<sup>48</sup> <http://www.e-rihs.eu/>.

<sup>49</sup> <https://sshopencloud.eu/>.

<sup>50</sup> <https://eosc-portal.eu/>.

REFERENCES

- BAGLIONI M., BARDI A., KOKOGIANNAKI A. *et al.*, *The OpenAIRE research community dashboard: On blending scientific workflows and scientific publishing*, in A. DOUCET, A. ISAAC, K. GOLUB, T. AALBERG, A. JATOWT (eds.), *Digital Libraries for Open Knowledge, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Theory and Practice of Digital Libraries, TPD L 2019 (Oslo 2019)*, Lecture Notes in Computer Science, Springer International Publishing, 56-69 ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-30760-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30760-8_5)).
- BARCHESI C. 2005, «Archeologia e Calcolatori»: *nuove strategie per la diffusione di contenuti in rete sulla base dell'OAI-PMH*, «Archeologia e Calcolatori», 16, 225-241 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF16/Barchesi\\_16\\_2005.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF16/Barchesi_16_2005.pdf)).
- BARCHESI C. 2019, «Archeologia e Calcolatori»: *un'esperienza pionieristica nel mondo dell'Open Access e dell'Open Science*, in MOSCATI 2019a, 39-54 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.04>).
- BECERRIL A., BOSMAN J., BJØRNSHAUGE L., FRANTSVÅG J.E., KRAMER B., LANGLAIS P.-C., MOUNIER P., PROUDMAN V., REDHEAD C., TORNY D. 2021, *OA Diamond Journals Study. Part 2: Recommendations*, Zenodo (<http://doi.org/10.5281/zenodo.4562790>).
- BOGDANI J. *et al.* 2020, *Book of Abstracts. ArchoFOSS International Conference 2020 (Version 1). Presented at the ArchoFOSS XIV 2020*, Zenodo (<https://zenodo.org/record/4002961>).
- BOSMAN J., FRANTSVÅG J.E., KRAMER B., LANGLAIS P.-C., PROUDMAN V. 2021, *The OA Diamond Journals Study. Exploring Collaborative Community-driven Publishing Models for Open Access. Part 1: Findings*, Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.4558704>).
- BUSCEMI F., MILITELLO P.M., SANTAGATI C., FIGUERA M., D'AGOSTINO G., AIELLO D.A.A. 2020, *Use and reuse of spatial and quantitative data in archaeology: From 3D survey to serious game at Phaistos (Crete)*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 189-212 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.09>).
- CANTONE F., CARVALE A. 2019, «Archeologia e Calcolatori». *Classificazione geografica e tematica per la condivisione della conoscenza*, in MOSCATI 2019a, 93-107 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.07>).
- CARVALE A., CECCARELLI L. 2019, *La banca dati bibliografica degli anni Novanta. Dati quantitativi e analisi statistiche*, in MOSCATI 2019a, 109-122 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.08>).
- CARVALE A., PIERGROSSI A. 2012, *Archeologia in rete. Le riviste open access: risorse e prospettive*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 187-207 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/11\\_Caravale\\_Piergrossi.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/11_Caravale_Piergrossi.pdf)).
- CARVALE A., PIERGROSSI A. 2015, *Archaeological open access journals. The case of «Archeologia e Calcolatori»*, in F. GILIGNY, F. DJINDJIAN, L. COSTA, P. MOSCATI, S. ROBERT (eds.), *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA 2014 (Paris 2014)*, Oxford, Archaeopress, 257-264.
- CARVALE A., PIERGROSSI A., ROSSI I. in print, *Open Data, Open Knowledge, Open Science: The new research group at the Institute of Heritage Science (CNR)*, in *ArchoFOSS International Conference 2020*.
- DACOS M. 2019, *Des nains sur les épaules de géants : ouvrir la science en France*, «Revue Politique et Parlementaire», 1092, 175-189 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02366604/>).
- FANINI B., FERDANI D., DEMETRESCU E. 2021, *Temporal Lensing: An interactive and scalable technique for Web3D/WebXR applications in Cultural Heritage*, «Heritage», 4, 2, 710-724 (<https://doi.org/10.3390/heritage4020040>).
- FIORINO S. 2019, *Lo stato dell'arte dell'innovazione tecnologica per le architetture web: presente e futuro per «Archeologia e Calcolatori»*, in MOSCATI 2019a, 55-74 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.05>).

- FROMAGEOT-LANIEPCE V. 2019, *Les pratiques de la recherche en archéologie à l'heure du numérique. L'évolution de la recherche d'information et de la publication de 1955 à nos jours*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 12 (<https://doi.org/10.19282/acs.12.2019>).
- HRUŠÁK J., JONES S., ABRAMATIC J. 2020, *European Open Science Cloud (EOSC) work plan 2019-2020*, Publications Office of the EU (<https://doi.org/10.2777/972843>).
- HUGGETT J. 2015, *Challenging Digital Archaeology*, «Open Archaeology», 1, 1 (<https://doi.org/10.1515/opar-2015-0003>).
- LAGOZE C., VAN DE SOMPEL H. 2001, *The open archives initiative: Building a low-barrier interoperability framework*, in *Proceedings of the First ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries JCDL '01*, 54-62 (<https://doi.org/10.1145/379437.379449>).
- MARWICK B., D'ALPOIM GUEDES J., BARTON C.M. et al. 2017, *Open science in archaeology*, «SAA Archaeological Record», 17, 4, 8-14 (<https://eprints.gla.ac.uk/148887/>).
- MONS B., NEYLON C., VELTEROP J., DUMONTIER M., DA SILVA SANTOS L.O.B., WILKINSON M.D. 2017, *Cloudy, increasingly FAIR; Revisiting the FAIR Data guiding principles for the European Open Science Cloud*, «Information Services & Use», 37, 1, 49-56 (<https://doi.org/10.3233/ISU-170824>).
- MOSCATI P. 1999, «Archeologia e Calcolatori»: dieci anni di contributi all'informatica archeologica, «Archeologia e Calcolatori», 10, 343-352 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF10/10\\_23\\_Moscati.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF10/10_23_Moscati.pdf)).
- MOSCATI P. 2009, «Archeologia e Calcolatori»: le ragioni di una scelta, «Archeologia e Calcolatori», 20, 145-154 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF20/12\\_Moscati.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF20/12_Moscati.pdf)).
- MOSCATI P. 2018, *Le rôle de l'Open Access dans la diffusion des résultats de la recherche scientifique: le cas de «Archeologia e Calcolatori»*, «UISPP Journal», 1, 1, 27-41.
- MOSCATI P. 2019a (ed.), *30 anni di «Archeologia e Calcolatori». Tra memoria e progettualità*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 9-138 (<http://www.archcalc.cnr.it/journal/idyear.php?IDyear=2019-01-01>).
- MOSCATI P. 2019b, *Informatica archeologica e archeologia digitale. Le risposte dalla rete*, in MOSCATI 2019a, 21-38 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.03>).
- PIERGROSSI A. 2020, *What is F.A.I.R.?*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 253-256 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.12>).
- PIERGROSSI A., ROSSI I. 2019, «Archeologia e Calcolatori». *Accessibilità e diffusione della cultura scientifica*, in MOSCATI 2019a, 75-92 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.06>).
- RENAULT S., NOUVEL B., ALLAINGUILLAUME M., ASCHEHOUG A., COQUET N., TURKOVICS M.-A. 2020, *Harmoniser les pratiques éditoriales numériques des revues françaises d'archéologie*, «Humanités numériques», 2 (<https://doi.org/10.4000/revuehn.483>).
- RICHARDS J.D., JAKOBSSON U., NOVÁK D., ŠTULAR B., WRIGHT H. 2021, *Digital Archiving in Archaeology: The State of the Art. Introduction*, «Internet Archaeology», 58 (<https://doi.org/10.11141/ia.58.23>).
- RICHARDS J.D., WINTERS J. 2015, *Digging into data: Open Access and Open Data*, «European Journal of Post-Classical Archaeologies», 5, 285-298 (<https://eprints.whiterose.ac.uk/86312/>).
- SALUCCI G., CINOTTI R. 2021 in print, *Open Access e studi umanistici*, «Studi italiani» (<http://doi.org/10.5281/zenodo.4971768>).
- VAN DE SOMPEL H., NELSON M.L., LAGOZE C., WARNER S. 2004, *Resource harvesting within the OAI-PMH framework*, «D-Lib Magazine», 10, 12 (<https://doi.org/10.1045/december2004-vandesompel>).
- WILKINSON M.D., DUMONTIER M., AALBERSBERG I. et al. 2016, *The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*, «Scientific Data», 3, 160018 (<https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>).
- WILKINSON M.D., DUMONTIER M., AALBERSBERG I. et al. 2019, *Addendum: FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*, «Scientific Data», 6, 6 (<http://doi.org/10.1038/s41597-019-0009-6>).

ABSTRACT

Open Science best practices and policies have been increasingly promoted and adopted in Europe and worldwide to extend public availability of research data and publications, according to FAIR principles. In this context, the so-called 'Diamond Open Access' model is particularly relevant since it entails provision of scientific content entirely free of charge, both for authors and readers. The journal «Archeologia e Calcolatori» adopted this model at a very early stage, when – in 2005 – it started publishing online full-text PDFs and metadata of its articles according to recognised standards, as an Open Archives Initiative data provider. This paper addresses the evolution of «Archeologia e Calcolatori» in the context of scientific publishing in the disciplinary domain of IT applications to archaeology. It focuses on the updates of its OAI-PMH repository, which led to the journal's inclusion in OpenAIRE as a data provider, and on mapping its current position in the OA Diamond landscape. The paper also illustrates recent implementations of «Archeologia e Calcolatori»'s website to provide full access to visual and interactive resources, such as images and 3D models, related to its publications, and to relevant metadata, structured according to OpenAIRE's most recent guidelines. The combined, contextual provision of full texts, visual and interactive resources, and structured metadata – including full annotations and relations – turns out to be a pioneering publishing service in the domain of IT applications to archaeology.





FROM DIGITALISATION  
AND VIRTUAL RECONSTRUCTION  
OF ANCIENT MUSICAL INSTRUMENTS  
TO SOUND HERITAGE SIMULATION  
AND PRESERVATION

edited by  
Angela Bellia





INTRODUCTION: AN OVERVIEW OF HOW  
VIRTUAL RECONSTRUCTIONS AND SOUND SIMULATIONS  
CAN IMPROVE OUR KNOWLEDGE  
ON ANCIENT MUSICAL INSTRUMENTS AND SOUND HERITAGE

This special issue aims to discuss how digital technologies based on 3D modelling and sound simulation can expand our knowledge of ancient musical instruments and sound heritage. Computational methods for processing the 3D models allow for a more accurate analysis of surfaces, volumes, internal structures, and density of materials of ancient instruments. Being non-invasive, these methods enable the study of the instruments' measurements and morphology, overcoming the limitations posed by their fragility. Although reconstructions cannot tell us unequivocally how ancient musicians played these instruments and how audiences perceived their sounds – given that we cannot replicate the experience of ancient listeners – they offer the chance to not only break through the time barrier by reviving sound emissions, but also to explore the types of sound experiences that ancient peoples were exposed to, taking in consideration that they would be operating within different cultural, social and musical contexts (BETTS 2017, 23-25).

Whilst the consequences for our interpretations are still to be defined, the application of technology to the study of instruments allows for different kinds of approaches and studies that aim to acquire a better understanding of ancient sounds, such as those produced by string instruments, but also wind and percussion instruments, including examples from the Greek, Roman, and Etruscan periods as well as ancient instruments found in Northern Europe and South America (DE ANGELI *et al.* 2018). By combining optical metrology with computational analysis, some of the subjective observations on ancient instruments can be substituted by measurable parameters, opening up new perspectives for the study of ancient music and sound heritage as well as the organological and technological development of instruments in order to understand the artisan production manufacturing process of these special artefacts (SAFA *et al.* 2016). Studying how these material objects have undergone transformations and forms of handling, the survey on the evolution of these instruments could help us in defining a novel approach and methodology to the 'active preservation' of instruments and sound tools in order to develop new research fields in both humanities and technological research areas also involving the study of sound heritage (AVANZINI *et al.* 2015, 2016; PRETTO *et al.* 2020). For this reason, novel methodologies related to virtual reconstructions and sound simulations of instruments and sound heritage are a work in progress (BRESSAN, CANAZZA 2013) and are needed to confirm or,

where necessary, modify the hypotheses as well as to enhance and improve new ones (FARINA, TRONCHIN 2013).

Moreover, 3D-printed models can enable the exploration of their musical potential (BOTH 2008; BELLIA 2019a). Indeed, the virtual reconstruction of ancient musical instruments allows us to implement our knowledge of the main processes of their production thanks to the 3D scanning phase (Angela Bellia), the post-processing phase, and the reconstruction phase in a virtual environment (Antonio Rodà, Sergio Canazza, Giovanni De Poli, and Zezhou Sun, Emily Whiting). Digital technologies based on 3D models can overcome further limits related to ancient instruments (Stefan Hagel): given that their reconstruction is virtual, many different hypotheses can be tested despite the fact that these instruments are often damaged and cannot be played anymore (SUN *et al.* 2020). Indeed, it is possible to produce a basis for assessing different reconstructions.

It is worth noting that virtual models can be easily shared, making possible global access to this form of heritage; they can also be printed, thereby providing the opportunity to produce physical copies at a relatively low cost (ZORAN 2011; FANGBEMI, ZHANG 2018; DAMODARAN *et al.* 2021).

Keeping in mind that virtual instruments can be used in subjective listening tests to compare the ‘sound quality’ of different instruments for the evaluation of (real or simulated) restoration of ancient instruments, and for preliminary listening tests with newly designed ones before they are actually built, sound features of musical instruments, as well as their vibrational behaviour, represent one of the most important and fascinating fields of acoustics, or even of applied physics (TRONCHIN 2020). This aspect is sometimes neglected (or at least not investigated enough) during the restoration of ancient masterpieces, even though it is well known that the instruments’ sound production is something of inestimable value.

It is worth noting that a significant number of archaeological finds of ancient musical instruments are exhibited at archaeological museums (Georgios Th. Kouroupetroglou, Spyros Polychronopoulos, Konstantinos Bakogiannis). Some scholars are exploring user friendly, adaptable and expandable digital tools in order to create virtual instruments, which can reproduce their sounds within exhibitions (SWIFT *et al.* 2021) devoted to a lay public and students – and, in some cases, also useful to scholars and researchers – in order to disseminate the knowledge of ancient music not only among specialists, but also to a larger community (MICHELONI *et al.* 2016; BAKOGIANNIS *et al.* 2020).

In this regards, it is essential to emphasise that modern studies on ancient music’s technical history (EICHMANN, FANG, KOCH 2012, 2016) should be always seriously considered in order to avoid that digital application might misguide archaeologists and conservators if documented ancient sound – grounded on attested playing techniques and tunings – remains disregarded.



Moreover, in sound simulation of ancient instruments (TERZÈS 2020) should be avoid arbitrary sorting into classes, especially if an appropriate modelling description that simulates the basic sound mechanisms and factors is the aim of the reconstruction of instruments.

Digital technologies based on 3D modelling and sound simulation provide new insights in sound studies, as the data can be applied to sound simulators and soundscape reconstructions in ancient architectural structures and ancient spaces (TILL 2019). With the aid of new technologies in geo-referenced sound mapping and multimedia applications, it is possible to recreate, play, and test musical instruments and their sounds both under laboratory conditions and on-site in different architectural settings.

In this regard, this special issue aims also to explore the sonic interactions and the spatial configuration of sanctuaries and theatres in their respective landscapes and environment in order to investigate the use of auralisation technology in the archaeological field, as well as experimental interpretative 3D reconstructions integrating acoustic models. Indeed, in the last few years many scholars have devoted their studies and research to these themes with different methods and results, all with the aim of exploring how digital technologies based on 3D modelling and sound simulations can expand our knowledge on sounds and open new perspectives on the study and preservation of sound heritage and audio files (Sergio Canazza, Giovanni De Poli, Alvisè Vidolin).

This is an ambitious way of approaching and analysing archaeological sites, and involves speculating on the soundscape of performative spaces of ancient cultures as well as reconstructing how they were experienced. Combining binaural recording technology, psychoacoustic analyses, and site-mapping techniques, research methodology enables researchers to re-create the original conditions with high fidelity along with the precise orientation and directionality of sounds. Since the data points can be generated from digital recordings, this capability can be used to further explore the human sonic experience of the acoustic environment (JORDAN 2020; BELLIA 2021).

In this regard, it cannot be discounted that the sonic aspects of theatrical structures that existed in connection with the origin and significance of their public character might have played an integral and important role in increasing the functionality of these buildings as places of interaction and communication on multiple sensory levels, involving highly visual imagery and dramatic sounds, as well as other sensorial experiences (Cristina Manzetti, Nikos Papadopoulos). Thanks to the analysis of some acoustics parameters and the listening of sounds in a 3D environment, it is possible to explore the creation process of performative structures. Moreover, the study of the sound features and sonic environment of these structures provides us with new insights on their acoustic reasoning and function (MANZETTI 2019). In this respect, in recent years the study on sound has attracted enormous interest and yielded

substantial insights, yet there are still many aspects of sound heritage to be explored in order to consider sound as a form of cultural heritage to be understood, preserved and disseminated. For this reason, these topics should be addressed through the contributions of scholars working in various fields, not only including archaeology and archaeomusicology (BOTH 2009), but also information engineering, interactive museums, sound heritage, acoustics, physics, virtual heritage, ecoacoustics, and craftsmanship.

It should be noted that, although a generation of European researchers has been excluded from the research system of their country of birth due to the stagnating research funding landscape of the past decade and the rigid, conservative, and anachronistic hierarchy of academia in some countries (especially in Southern and Eastern Europe), collaborations and interdisciplinary research involving humanities and technological fields have been enhanced thanks to the hard efforts of researchers and the investment of European resources (BELLIA 2019b). Formulating theoretical foundations, principles and processes to be followed (traceable, transparent, reproducible and verifiable), these collaborative and multidisciplinary works can provide not only a better integration and a growing 'ibridation' among humanities with technological fields, but also an unmatched contribution to the workings of innovation in the present and in the future of studies related to music and sound, which can be spread widely among researchers and the general public.

By trying and trying again, we will be able to not only produce significant insights on sound heritage and new lines of research in the fields of digital heritage and of digital approaches to historical acoustemology (GEOFFROY-SCHWINDEN 2018), but also present a novel analytical framework that models the acoustics of archaeological spaces. As Marie Skłodowska-Curie said: «Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less».

Preliminary versions of some of the themes contained in this special issue were presented at the webinar *From the Digitalisation to the Virtual Reconstruction and Sound Simulation of Ancient Musical Instruments* held on February 25<sup>th</sup> 2021 at the Institute of Heritage Science of the National Research Council of Italy. I would like to thank all the speakers for their interesting papers, as well as everyone who attended and participated in creating a positive environment. Special thanks must go to Costanza Miliani, Director at the Institute of Heritage Science, for encouraging me to organise the event. I am also very grateful to Paolo Romano and Nella Pagano as well as to Danilo Pavone, Silvia Iachello, and Fabio Viscuso for their valuable collaboration and support.

My warmest thanks go to all authors who have contributed and have accepted with enthusiasm the invite to take part in this special issue; they have engaged deeply with the critical issues at the core of this volume: Konstantinos

Bakogiannis, Sergio Canazza, Giovanni De Poli, Stefan Hagel, Georgios Kouroupetroglou, Pamela Jordan, Maria Cristina Manzetti, Antonio Rodà, Nikos Papadopoulos, Alvisé Vidolin, Spyros Polychronopoulos. I am also very grateful to the anonymous reviewers for their valuable comments on the various essays. Moreover, I would like to express my gratitude to Lucio De Paolis, Raquel Jaménez Pasalodos, Arnaud Saura-Ziegelmeÿer, Ellen Swift, Chr stos Terz s and Lamberto Tronchin for their valuable suggestions. Finally, I must extend my gratitude to Claire Ramtuhul for her assistance as this volume has taken shape.

In addition, I would like to thank to *All'Insegna del Giglio*, the publisher of this volume, the editor-in-chief, Paola Moscati, for accepting the inclusion of this work as a special issue of the open access peer reviewed Journal «Archeologia e Calcolatori». Publication was made possible by the project *Stesichoros* (Project ID: 792058), funded by the European Commission's Marie Skłodowska-Curie Actions Programme, Individual Fellowships.

ANGELA BELLIA

Institute of Heritage Science  
National Research Council of Italy

## REFERENCES

- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., PRETTO N., RODÀ A., ANGELINI I., BETTINESCHI C., DEOTTO G., FARESIN E. *et al.* 2015, *Archaeology and virtual acoustics, A Pan flute from ancient Egypt*, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference in Sound and Music Computing (SMC 2015) (Maynooth 2015)*, 31-36 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851067>).
- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., MICHELONI E., PRETTO N., RODÀ A., GASPAROTTO S., SALEMI G. 2016, *Virtual reconstruction of an ancient Greek Pan flute*, in *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Sound and Music Computing Conference (SMC2016)*, 41-46 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851179>).
- BAKOIANNIS K., POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., KOUROUPETROGLOU G. 2020, *ENTROTUNER: A computational method adopting the musician's interaction with the instrument to estimate its tuning*, «IEEE Access», 8, 53185-53195 (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981007>).
- BELLIA A. 2019a, *Towards a new approach in the study of ancient Greek music: Virtual reconstruction of an ancient musical instrument*, «Digital Scholarship in the Humanities», 34, 2, 233-243 (<https://doi.org/10.1093/llc/fqy043>).
- BELLIA A. 2019b, *Redefining excellence to overcome geopolitical imbalances in research: To realize Europe's full research potential, we must broaden research excellence to recognize and reward widening participation*, «Angle Journal» (<http://anglejournal.com/article/2018-12-overcoming-european-geopolitical-differences-for-the-future-of-research-to-realize-europes-full-research-potential-the/>).
- BELLIA A. 2021, *Aural experiences in the ancient performative spaces*, in L. TRONCHIN (ed.), *Proceedings of I3DA 2021 International Conference on Immersive and 3D Audio (Bologna 2021)* (forthcoming: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>).
- BETTS E. 2017, *The multivalency of sensory artefacts in the city of Rome*, in E. BETTS (ed.), *Senses of the Empire: Multisensory Approaches to Roman Culture*, London, Routledge, 23-38.

- BOTH A.A. 2008, *3D-computed tomography and computational fluid dynamics. Perspectives in the non-contact organological and acoustical research of ancient musical instruments*, «Orient-Archäologie», 12, 383-388.
- BOTH A.A. 2009, *Music archaeology: Some methodological and theoretical considerations*, «Yearbook for Traditional Music», 41, 1-11.
- BRESSAN F., CANAZZA S. 2013, *A systemic approach to the preservation of audio documents: Methodology and software tools*, «Journal of Electrical and Computer Engineering», ID 489515 (<https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/489515/>).
- DAMODARAN A., SUGAVANESWARAN M., LESSARD L. 2021, *An overview of additive manufacturing technologies for musical wind instruments*, «SN Applied Sciences», 3, 162 (<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04170-x>).
- DE ANGELI S. 2018, *The Music and Sounds in Ancient Europe*, Rome, Lazio Region Directorate for Culture and Youth Policies.
- EICHMANN R., FANG J., KOCH L.-C. (eds.) 2012, *Sound from the Past. The Interpretation of Musical Artifacts in an Archaeological Context*, Papers from the 7<sup>th</sup> Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at the Tianjin Conservatory of Music, Tianjin, China, 20-25 September, 2010. Studien zur Musikarchäologie VIII, Orient-Archäologie 27. Rahden/Westf, Verlag.
- EICHMANN R., FANG J., KOCH L.-C. (eds.) 2016, *Sound-Object-Culture-History*, Papers from the 9<sup>th</sup> Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at the Ethnological Museum, State Museums Berlin, 09-12 September, 2014. Studien zur Musikarchäologie X, Orient-Archäologie 37. Rahden/Westf, Verlag.
- FANGBEMI A.S., ZHANG Y. 2018, *Wrist-worn sensor-based tangible interface for virtual percussion instruments*, in L.T. DE PAOLIS, P. BOURDOT (eds.), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, Berlin, Springer, 54-66.
- FARINA A., TRONCHIN L. 2013, *3D sound characterisation in theatres employing microphone arrays*, «Acta Acustica», 99, 118-125.
- GEOFFROY-SCHWINDEN R.D. 2018, *Digital approaches to historical acoustemology*, in M.C. LINGOLD, D. MUELLER, W. TRETTIEN (eds.), *Digital Sound Studies*, Durham, Duke University Press, 231-249.
- JORDAN P. 2020, *Sound experience in archaeology and field investigations: An approach to mapping past activities through sound at Mount Lykaion's Sanctuary of Zeus*, «Kleos. The Amsterdam Bulletin of Ancient Studies and Archaeology», 3, 9-30.
- MANZETTI C. 2019, *The performance at the Theatre of the Pythion in Gortina, Crete. Virtual acoustics analysis as a support for interpretation*, «Open Archaeology», 5, 1, 434-443 (<https://doi.org/10.1515/opar-2019-0027>).
- MICHELONI E., PRETTO N., AVANZINI F., CANAZZA S., RODÀ A. 2016, *Installazioni interattive per la valorizzazione di strumenti musicali antichi: il flauto di Pan del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università degli Studi di Padova*, in A. TERZAROLI, A. VALLE (eds.), «Extending Interactivity». Atti del XXI CIM - Colloquio di Informatica Musicale (Cagliari 2016), Venice, IUAV University, 203-208 ([http://cim.lim.di.unimi.it/2016\\_CIM\\_XXI\\_Atti.pdf](http://cim.lim.di.unimi.it/2016_CIM_XXI_Atti.pdf)).
- PRETTO N., MICHELONI E., GASPAROTTO S., FANTOZZI C., DE POLI G., CANAZZA S. 2020, *Technology-enhanced interaction with cultural heritage: An ancient Pan flute from Egypt*, «Journal on Computing and Cultural Heritage», 13, 2, 267-280 (<https://doi.org/10.1145/3355395>).
- SAFA E., BARREAU J.B., GAUGNE R., DUCHEMIN W., TALMA J.D., ARNALDI B., DUMONT G., GOURANTON V. 2016, *Digital and handcrafting processes applied to sound-studies of archaeological bone flutes*, in M. IOANNIDES, E. FINK, A. MOROPOULOU, M. HAGEDORN-SAUPE, A. FRESA, G. LIESTØL, V. RAJCIC, P. GRUSSENMEYER (eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. 6<sup>th</sup> International Conference, EuroMed 2016 (Nicosia 2016)*, Berlin, Springer, 184-195 ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_15)).

- SUN Z., RODÀ A., WHITING E., FARESin E., SALEMI G. 2020, *3D virtual reconstruction and sound simulation of an ancient Roman brass musical instrument*, in M. RAUTERBERG (ed.), *Culture and Computing. HCII 2020*, Lecture Notes in Computer Science, 12215, Cham, Springer ([https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50267-6\\_21#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50267-6_21#citeas)).
- SWIFT E., BOSWORTH L., CREESE D., MORRIS G., PUDSEY A., RICHARDSON J., STONER J., WALKER F., WRIGHT G. 2021, *Creation of functional replica Roman and Late Antique musical instruments through 3D scanning and printing technology, and their use in research and museum education*, «Internet Archaeology», 56 (<https://doi.org/10.11141/ia.56.1>).
- TERZĒS C. 2020, *Musical instruments of Greek and Roman antiquity*, in T. LYNCH, E. ROC-CONI (eds.), *A Companion to Ancient Greek and Roman Music*, John Wiley & Sons, Inc., 213-227 (<https://doi.org/10.1002/9781119275510.ch16>).
- TILL R. 2019, *Sound archaeology: A study of the acoustics of three World Heritage sites, Spanish Prehistoric Painted Caves, Stonehenge, and Paphos Theatre*, «Acoustics», 1, 661-692 (<https://doi.org/10.3390/acoustics1030039>).
- TRONCHIN L. 2020 (ed.), *Special Issue on Musical Instruments: Acoustics and Vibration, «Applied Sciences»*, 10, 9, 3294 (<https://doi.org/10.3390/app10093294>).
- ZORAN A. 2011, *The 3D printed flute: Digital fabrication and design of musical instruments*, «Journal of New Music Research», 40, 4, 379-387.





## 3D VIRTUAL RECONSTRUCTION AND SOUND SIMULATION OF OLD MUSICAL INSTRUMENTS

### 1. INTRODUCTION

For millennia, music culture has been handed down orally since the earliest detailed written music documents are relatively recent (TOMLINSON 2012). Therefore, what we know about the music of the past is due to indirect documents, such as literature, music theory treatises, and iconography. In this context, archaeological finds of musical instruments such as ancient flutes or harps coming from ancient Egypt or Greek-Roman areas are a very important direct source of information. Unfortunately, these instruments are often seriously damaged and can no longer be played. Therefore, by observing these artifacts we can get an idea of the global shape and analyze the materials they are built from, but we can not listen to their sound and have experience of the performing practice.

Traditionally, playable copies of ancient instruments were built by craftsmen. This approach has several limits: a) the manufacturing process is usually slow and expensive; b) often one or few copies only can be built, limiting access to the instrument; c) when the reconstruction is uncertain, due to the poor state of conservation of the artifact, it is difficult to test and evaluate different possibilities.

Digital technologies based on 3D models overcome these limits. The reconstruction is virtual, therefore many different hypotheses can be tested; finite elements methods (UMETANI *et al.* 2016) and physically informed algorithms allow to simulate the sounds produced by the artifacts, also giving a basis for evaluating the different reconstructions; virtual models can be easily shared, making possible global access to the heritage; finally, additive printing technologies offer the opportunity to have physical copies at relatively low costs. Nevertheless, methods and algorithms to obtain a virtual reconstruction of musical instruments in an automatic or semi-automatic way are still missing. Several algorithms were developed in the past years for simulating the sound of known instruments, but these algorithms need to be modified and improved to meet the requirements of these ancient and almost unknown instruments. 3D printing processes need to be tuned to consider the influence of materials and textures on sound generation.

### 2. RELATED WORK

The importance of music in particular, is a topic discussed broadly in literature (SACKS 2006; BERGH 2007; STORR 2015). Music, as a cultural activity

that can express and evoke emotions (COOKE 1959), is believed to be able to bind people and bring them together. «No culture so far discovered lacks music. Making music appears to be one of the fundamental activities of mankind» not only in present days but also in ancient times (STORR 2015). Thanks to the written music compositions handed down over the years and the specific details of the construction of the musical instruments, we can still nowadays arguably “hear” not only Bach’s music but also, for instance, Mozart’s and Beethoven’s music the same way as the audience of their time. Furthermore, most of the places where they performed, along with some well-preserved musical instruments, dated back to their time, still exist today (GREILSAMER, FREEMAN, BAKER 1927). However, the same cannot be said about ancient music.

Although a good amount of ancient Roman and Greek musical artifacts have survived from antiquity, most of them are fragmentary and, for the most part, in no condition of being played. However, in order to better understand a musical instrument, it is very useful to listen to the sounds it produces (PRETTO *et al.* 2020). The archaeology of music field focuses on excavating, identifying, classifying and ultimately reconstructing these ancient musical instruments (VAN KEER 2010). Usually the first reconstruction is digital where a 3D model of the artifact is created. Making a 3D model opens many possibilities when it comes to analysing, simulating and recreating the lost sounds of the instrument, as well as creating a material copy of the instrument (KOUMARTZIS *et al.* 2015). Afterwards, all efforts are aimed at further investigating the difference between the simulated sounds of the 3D model and the sounds produced by the physical replica. It is important to note that the materials constituting the instrument (including their provenance, treatment and workmanship), the playing posture and techniques, textual information as well as the location are all elements that need to be considered when simulating the sounds of the instrument (BOTH 2009). Therefore all the musical discoveries need to be evaluated in their archaeological and historical context, rather than in isolation (BELLIA 2019). For example when reconstructing the Greek lyre of Hermes a tortoise-shell was used as a soundbox (KOUMARTZIS *et al.* 2015).

There are several other reconstructions and sound simulations of ancient musical instrument. A fascinating case is the discovery in Sanzeno (Italy) of the remains of ancient Celtic musical artifacts known as *karnykes* (RONCADOR *et al.* 2014). These musical instruments were war trumpets that were used by the Celtic population to psychologically terrorize their enemies. Thanks to multiple international collaborations the historical and chronological context as well as the chemical and metallurgical properties of these musical artifacts have been studied. In 2011, to better understand the unique sounds produced by this instrument, a first prototype, made in brass, has been created. In addition to the case of the *karnykes* from Sanzeno, musical artifacts belonging to the same family have been excavated in Tintignac (France). Because the

*karnykes* from Tintignac were recovered in better conditions than the ones from Sanzeno, experts were able to put some of the parts together to make an almost complete authentic *karnyx*. Afterwards the virtual copy of the instrument was analyzed from an acoustic point of view to obtain data regarding its sounding characteristics. More specifically, several measurements concerning input impedance, resonance and playing frequencies have been made and the possible influence of the artifact's structure on the radiated sound was taken into consideration (GILBERT *et al.* 2012).

Another interesting example is the virtual and physical reconstruction (using polymer as the main material) of the *aulos* wind instrument found under Temple R at Selinunte and dated to 570 BCE (BELLIA 2019). This important discovery can help researchers better understand and investigate the ancient Greek music.

In general, not only small but also bigger organizations and museum institutions have been involved. The museum of Louvre-Lens has presented the first big exhibition *Musiques! Échos de l'Antiquité* dedicated to ancient musical instruments belonging to Greek, Roman and Egyptian ancient civilizations. Among these instruments, it is worth mentioning the case of the *cornua* of Pompeii. Five of these ancient wind instruments, belonging to the brass family, have been excavated and recovered in Pompeii, Naples. A virtual reconstruction of artifacts has been created and the sounds have been all modelled and synthesized with the help of the Naples National Archaeological Museum (EMERIT *et al.* 2017).

Another project that is important to mention is the European Music Archaeology Project (EMAP)<sup>1</sup>, which has already reconstructed high-quality physical reproductions of more than 60 ancient musical instruments. Several exhibitions have been arranged where the public was able to touch and play some of these ancient instruments and experience past sound worlds and environments (DE ANGELI *et al.* 2018).

It is however important to note that, except for a few projects such as EMAP or Museo Interactivo de la Música in Malaga (MIMMA)<sup>2</sup>, not much has been done to promote and enhance these ancient musical instruments on the web. As we have seen, a certain number of research on sound simulation and virtual/physical reconstruction of ancient instruments exists, however, apart from the individuals involved in the research, most people do not have the possibility to listen to the fascinating music these musical artifacts can create. It is true that some of these researches have promoted these instruments through museum installations (BELLIA 2019; PRETTO *et al.* 2020); however,

<sup>1</sup> <http://www.emaproject.eu/> (retrieved May 5, 2021).

<sup>2</sup> <http://www.musicaenaccion.com/mimma> (retrieved May 5, 2021).

as discussed in the previous section, museums do not have the same appeal and the same potential to reach as many people as online websites can.

## 2.1 *Tuning and timbre*

Digital models are interesting because they allow us to have accurate measurements to simulate sounds, which is important to have evidence on the music of the time and to support hypotheses on the playing technique. Being able to listen to their sound and understand the methods of production allow us to have information on their use and role in society (FRITZ *et al.* 2021).

Among the many characteristics of a sound, the pitch is often considered the most important, at least from a musical point of view. Indeed, by knowing the set of pitches that can be generated by an ancient instrument, we can infer which structures of pitches (scales, modes, tetrachords, etc.) were used at that time. This is a very important aspect for many musical traditions, in particular for the ancient Greek-Roman music, where the analysis of coeval musical instruments can give evidences for a deeper understanding of the various historical theoretical treatises (see e.g. BARKER 2007) and support hypotheses related to the fine-tuning of those pitch structures (HAGEL 2009).

However, other aspects of the sound different from pitch are also interesting, such as intensity and timbre. To study these aspects, digital synthesis techniques offer many useful approaches. The sound produced by acoustic musical instruments is caused by the physical vibration of a resonating structure excited by a suitable action. It can be represented by a mathematical model and can be computed by synthesis algorithms (DE POLI 1983; BORIN *et al.* 1992).

If an existing reference instrument is available, it is possible to store in wavetables a large quantity of sound examples and during synthesis we just need to play one sound from the stored repertoire. Pitch transposition can be obtained by varying the speed when reproducing the sound. This technique (*sampling*) is characterized by high computational efficiency and high imitation quality, but by low flexibility for sounds not initially included in the repertoire or not easily obtainable with simple transformations.

*Granular synthesis* constructs complex acoustic events starting from a large quantity of elementary acoustic elements called grains. When the grains are irregularly distributed, we can obtain “clouds” of micro-sounds, or sonic textures, where the general statistical properties are more important than the exact sound evolution. In general, we can expect these types of sounds to occur in the real world when they are the result of multiple realizations of the same event or the same phenomenon. For example, among unpitched percussion, we find micro-sounds in the angled rainstick, (shaken) small bells, (grinding) ratchet, (scraped) guiro, (jingling) tambourine, and the many varieties of rattles.

Various instruments can be modelled as exciters, characterized by a rich spectrum, and a resonator (called filter) that transforms its spectrum. The



*source-filter model* allows to control and modify the fine (pitched or noisy) structure of the source separately from the spectral envelope of the filter. It is very effective for voice and resonating percussion instruments synthesis.

*Physical modeling synthesis* refers to sound modeling techniques in which the synthesis algorithms are designed based on a description of the physical phenomena involved in sound generation, in particular the physical objects and interactions that generate the sound. Among the different techniques, the *digital waveguide model* is particularly efficient for simulating flexible structures such as strings, cylindrical or conical tubes. This technique is based on the analytic solution of the equation that describes the propagation of waves in a medium and is realized with delay lines, junction elements, and filters. The structure and the parameters of the model can be derived from measurements of an actual artifact, but it is possible experiment the acoustic effects of structure and parameter variations, in correspondence of different reconstruction hypothesis.

### 3. METHODOLOGY

To build a digital model of a musical instrument, we can start from different sources: pictures, textual descriptions, technical drawings, and, of course, archaeological finds (Fig. 1). In the latter case, we need to measure these finds, by hand or, better, using recent techniques such as structured light scanners or computational tomography. From these techniques we can directly obtain a first rough 3D model of the instrument or the parts/fragments of it. By means of digital processing techniques, the instrument can be virtually restored. Interesting, we can obtain many different versions of the restored

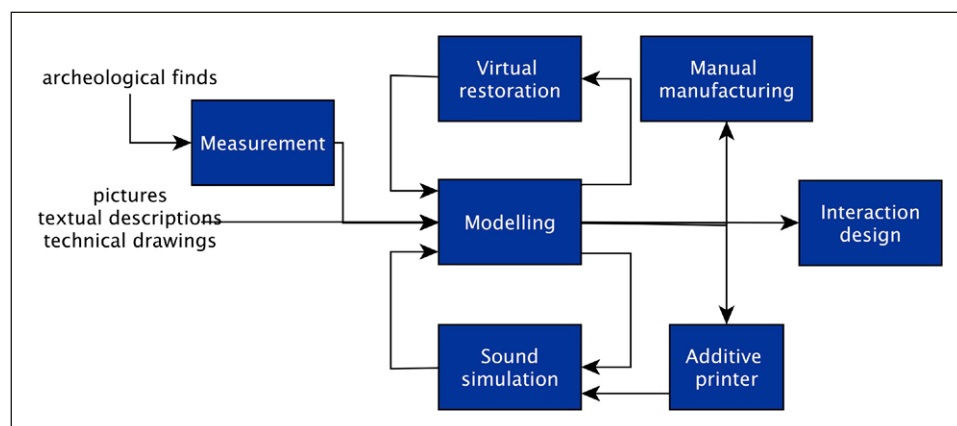


Fig. 1 – An iterative approach to the model of ancient musical instruments.

instrument, starting from different sets of hypotheses (about geometry, materials, missing parts, etc.) or addressing different objectives (e.g., to show the instrument as it is now or as it was originally).

From the restored model, we can then obtain a simulation of the sounds that could be produced by a musical instrument with such geometrical and functional properties. The generated sounds can also be used as a validation of the assumptions taken to build the model and can sometimes suggest further improvements to it.

The 3D model can also be used as a guide for a craftsman to construct physical copies of the instrument. Or, more easily, a physical version of the model can be directly obtained by an additive printer. In turn, following an iterative process, the physical copy can be used to estimate the parameters of the sound simulation algorithms more precisely.

Finally, the large amount of data and knowledge coming from this process, can be used to design novel approaches for enhancing the access to these instruments by scholars and the general public.

#### 4. CASE STUDIES

The approach presented in Section 3 is exemplified through three case studies, differing in many aspects, the most relevant one is the state of conservation: the first study is a Pan flute in a good state, with 14 pipes mostly intact; the second is a brass musical instrument, quite damaged and broken in 8 more or less incomplete pieces; the last one is instead a lost instrument, of which we have only some technical drawings.

##### 4.1 *Padova's Pan flute*

The first case presented in this paper is a well preserved ancient Pan flute, recovered in Egypt in the 1930s and currently exhibited in the Museum of Archaeological Sciences and Art (MSA) at the University of Padova (Fig. 2). Before being included in the permanent exhibit, the flute underwent a major restoration program for consolidation and (passive) preservation. Details about the history of the artifact, the place and circumstances of its recovery, as well as related literary and iconographic references in the Greek-Roman world, are provided in previous publications (AVANZINI *et al.* 2015, 2016).

In comparison to similar findings, see e.g. the Pan flutes hosted at the Petri (SWIFT *et al.* 2021) and Louvre (EMERIT *et al.* 2017) museums, this musical instrument is in a quite good state of conservation, with almost intact 14 pipes. The results of a radio-carbon analysis support the hypothesis that the flute dates back to the 7<sup>th</sup> c. CE.

From an acoustic point of view, the sounds of a Pan flute are generated by blowing inside the cavities of the pipes from the opened side of them. The

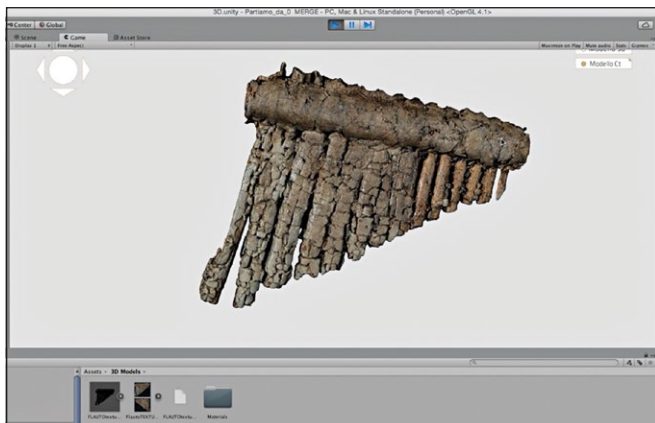


Fig. 2 – A view of the rendered 3D model of the Pan flute of Padova.

other end of the pipes is closed: in our case, the closures are obtained by means of the natural knots of the lake reeds that make up the instrument. Since the shape of the cavities of the reeds is well approximated by a cylinder with the length much greater than the diameter, the analytical solution of the wave equation is well known and allows to calculate the fundamental frequency of the sound produced by each pipe by means of the Eq 1:

$$f = \frac{4c}{l_{int} + \Delta l} Hz \quad (1)$$

where  $c$  is the sound velocity,  $l_{int}$  is the internal pipe length, and  $\Delta l = 0.305d_{int}$  is the length correction at the open end, proportional to the internal pipe diameter  $d_{int}$  (FLETCHER, ROSSING 1991).

As shown by this equation, the estimation of the fundamental frequency requires the internal dimensions of each pipe. Since many pipes were full of residual dirt, which could not be removed to not compromise stability, a series of non-invasive analyses, based on 3D scanning using computed tomography (CT), have been performed (AVANZINI *et al.* 2016). Taking into account the inevitable measure errors, we estimated the possible range of the fundamental frequencies produced by each pipe (Table 1).

As previously stated, digital models of a musical instrument also allow us to simulate the sounds that such an instrument can produce. However, when we want to return the sounds from a so distant past, we must address the issues that we know very little about the way (e.g., the position and shape of the mouth in relation to the opened end of the pipe) those instruments were played, and which kind of music (i.e., sequences of pitches and rhythms)

pipe	$f_{min}$ [Hz]	$f_{max}$ [Hz]
1	638.7	649.7
2	677.2	700.7
3	753.6	773.5
4	843.1	874.4
5	928.3	974.7
6	1010.1	1041.3
7	1142.2	1184.3
8	1283.2	1346.4
9	1389.6	1438.2
10	1538.3	1602.0
11	1721.8	1758.1
12	1901.4	1957.3
13	2128.4	2205.1
14	2292.9	2499.7

Table 1 – Fundamental frequencies (min and max) estimated for each pipe starting from the measurements taken from the CT scan.

was used to be played, because no audio recordings exist and only very few fragments of written music (in some form of notation) arrived to us<sup>3</sup>.

To get around these issues, we developed an interactive digital instrument that allows a user (musician, scholar, general public) to choose which notes to play and to control interactively some performance parameters such as the amplitude envelope (i.e., how the loudness of a sound varies in time). The user can play the instrument by using its blow, similar to an acoustic Pan flute: the flow of the blow is estimated by a sensor and its amplitude envelope is translated in messages of the MIDI protocol, namely *NoteOn* (attack), *ControlChange* (decay, sustain), and *NoteOff* (release), which control respectively the start, the time evolution, and the stop of the sound reproduction; then, these messages were sent to a sound synthesizer, specially developed on the base of a sampling approach (see Section 2.1).

The choice of this synthesis method for the Padova's Pan flute was guided by the following considerations: in comparison to other synthesis techniques it has a low computational cost, suitable for an interactive application; the Pan flute is a well-known instrument and it is easy to record or find audio samples of good quality; the main interest of this project was in rendering and studying the pitch patterns (musical scales, tetra-chords) generated by the instrument and the fine tuning of the tones, therefore a more refined simulation of the timbre was beyond its scope.

<sup>3</sup> The study of musical practice also includes the agogic and dynamic aspects of the music performance (CANAZZA *et al.* 2015).

An interactive museum installation<sup>4</sup> for the instrument has also been designed and built. Thanks to this installation the visitors can hear the sounds of the Pan flute by physically blowing on specific holes, each having a microphone, located on a panel. This multimedia installation also provides the possibility of discovering the instrument's background and history as well as inspecting its 3D models (AVANZINI *et al.* 2015, 2016). The creation of the installation was based on a carefully tuned multidisciplinary design approach centered on *Design Thinking* (PRETTO *et al.* 2020).

#### 4.2 Voghenza's Roman brass

The second case study is related to several pieces of metal, unequivocally recognized as a brass musical instrument, found in the context of the excavation of a Roman building in Voghenza, close to Ferrara (Italy), dated to the 2<sup>nd</sup> c. CE, and now hosted in the archaeological section of the Civic Museum of Belriguardo. This instrument is the subject of an ongoing multidisciplinary project<sup>5</sup>, that aims to analyze, reconstruct, and valorize this important musical heritage.

The instrument, made of a metal alloy, is broken into 8 pieces, and each piece further suffers from large holes and damages. The 3D model of each piece was acquired by means of a structured light system that uses light patterns (or codes) and is based on digital cameras and projector. Models of the different pieces were subjected to two kinds of numerical elaboration. The first one aims to repair small holes and deformations by means of filters and numerical interpolation and is particularly suited for pieces with less severe damages. The second one aims to estimate the geometry of the entire instrument, by virtually reconnecting the pieces, also in case of very corrupted parts. In particular, an original algorithm was developed to estimate the central axis of the curved tube of the instrument and its increasing diameter (see SUN *et al.* 2020 for more details). Fig. 3 shows the estimated geometry (blue) of the entire instrument superposed to the original damaged pieces.

After the estimation of the geometry of the recomposed instrument, it is possible to simulate the set of tones that a musical instrument with that dimensions can produce. The mouthpiece, very similar to that of modern trumpets, trombones, and horns, reveals that the Voghenza's instrument certainly belongs to the brass family. The modalities of sound generation of these instruments are widely described in literature (e.g. FLETCHER, ROSSING 2012). The acoustic waves produced by the vibrating lips propagates through

<sup>4</sup> Here you can see a video of the installation: <https://youtu.be/P4yjjw5R5qqY?t=165>.

<sup>5</sup> The project currently involves the University of Padova (Dept. of Information Engineering and Cultural Heritage), the University of Bologna (Dept. of Cultural Heritage), the University of Salento (Dept. of Cultural Heritage), the Boston University (Dept. of Computer Science).



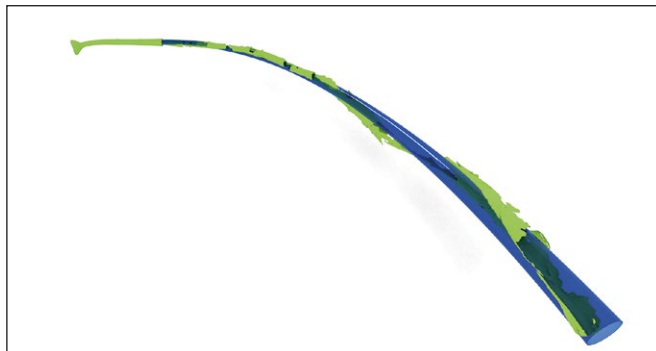


Fig. 3 – Aligned pieces from 3D scanning (green) and restored/rebuilt instrument (blue).

the cylindrical part of the instrument, the length of which can be modified in many brass instruments by means of holes (as in the cornetto), valves (as in the trumpet) or a sliding mechanism (as in the trombone). Then, the waves reach the ending flared section, where part of the acoustic energy is radiated to the outside of the instrument, and the rest part is reflected inside the bore.

From what we can observe from the remains, the Voghenza instrument has no holes, valves, or sliding parts. Therefore, the fundamental frequency of the tones depends largely on the peaks of the acoustic impedance of the bore. This impedance can be estimated analytically, starting from the well-known wave equation and solving it in the case of a wave propagating in a bore with increasing diameter. The solution lets to the following equation (CHAIGNE, KERGOMARD 2016) that allows the estimation of the frequencies  $f_n$  corresponding to a local maximum of the acoustic impedance:

$$f_n = \frac{c}{2(l + X_i)} \left[ n - \frac{1 - \nu}{2} \right] \text{ Hz} \quad (2)$$

where  $c$  is the sound speed propagation,  $l$  is the length of the cylindrical part,  $X_i$  is the length of the flared part,  $\nu$  is a coefficient related to the shape of the flared part, and  $n$  is an integer number.

The unknown parameters of Eq. 2 were estimated by fitting the geometry of the reconstructed instrument (Fig. 3). Table 2 reports the frequencies of the natural resonances of the instrument estimated from Eq. 2. Finally, a sample of these sounds<sup>6</sup> were generated by a physically-informed algorithm based on a waveguide model (COOK 1991).

<sup>6</sup> Examples of the sounds can be listen at: <http://www.dei.unipd.it/~roda/brass/>.

$n$	$f_n$ [Hz]
1	123
2	266
3	409
4	553
5	696
6	839
7	982
8	1126
9	1269
10	1412

Table 2 – Natural resonant frequencies estimated from the geometry of the re-constructed 3D model of the instrument.

### 4.3 Milan's Studio di Fonologia Musicale

The last case study is a quite particular musical instrument, or better a set of instruments that were part of the *Studio di Fonologia Musicale* of Milan. Some of these instruments are no more existing, at least in their earliest form, but they are well documented by means of original technical drawings and pictures. During the 1950s and 1960s, this studio was one of the leading places in Europe to produce electro-acoustic music, together with Paris and Cologne. Although not ancient in a strict sense, these instruments can be considered as remarkable examples of industrial archaeology, due to its uniqueness and to the rapid evolution of the electronic technologies. Moreover, they represent the first steps towards the diffusion of musical electronic and digital devices that, in the following decades, radically changed the way of producing music and listening to it. The Studio (NOVATI 2009) was founded in 1955 at the Milan offices of the Italian Radio-Television (RAI), under the initiative of the Italian composers Luciano Berio and Bruno Maderna. In a few years, the Studio became one of the European centers of reference for the production of electroacoustic music, by deploying cutting-edge devices for the generation and processing of sound. These devices were especially designed and crafted by Alfredo Lietti: oscillators, filters, modulators, and other unique pieces, created with great care to meet the needs of the composers who attended the Studio. In 1967 the Studio underwent a partial renovation; as a consequence, much of the older equipment was dismantled and has been lost (RODÀ 2012). However, many photographs, diagrams, drawings, and audio recordings<sup>7</sup> were found in the archive of the Studio and thanks to these

<sup>7</sup> Magnetic tapes containing the music works produced by using the electronic devices of the Studio. See BRESSAN *et al.* 2013 for aspects concerning the preservation of this type of documents.

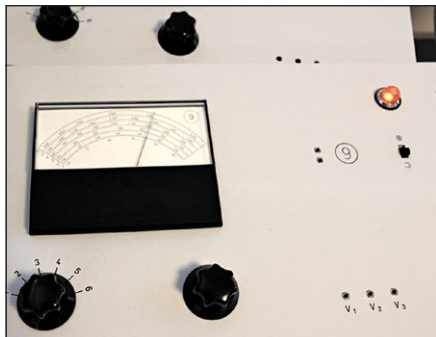


Fig. 4 – The replica of the control panel of one of the original oscillators of the Studio.

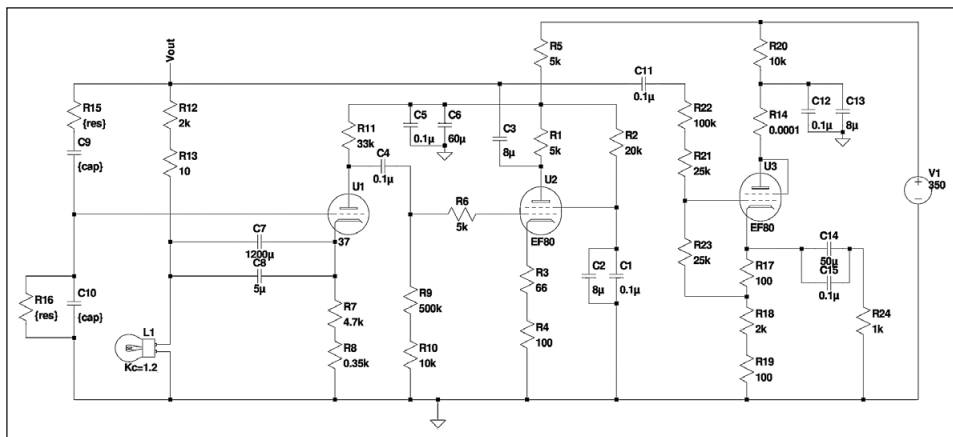


Fig. 5 – A transcription of the technical drawing of the oscillators designed by Alfredo Lietti for the Studio di Fonologia of Milan.

documents it is possible to know the characteristics and the functionality of most equipment that no longer exist. Electronic music instruments differ from traditional ones in many respects: the use of electric energy as the main sound producing mechanism, rapid obsolescence, the dependence on scientific research and available technology.

In 2011, the EU-funded DREAM project (NOVATI, DACK 2015) defined an approach to an active preservation of the electrophone instruments of the Studio, by following a multidisciplinary perspective that involved engineering, interaction design, and musicological competences. The project main outcome was to build a tangible copy of some of the electronic devices of the Studio, by

using digital simulation of the internal analog components and by replicating the physical appearance (Fig. 4).

The digital simulation of the sound generated by the devices was obtained by starting from their technical drawings. For example, Fig. 5 shows a transcription of the technical drawing of the oscillators designed by Alfredo Lietti for the Studio. Each electric and electronic component of this schema can be characterized by well known (because the single components were produced industrially) input-output functions, that was simulate numerically. By combining the function of the different components it is possible to simulate the output signal of the entire device (AVANZINI, CANAZZA 2012). This approach is very similar to the physical modeling techniques (see Section 2.1) used to simulate the sound produced by acoustic instruments, with the difference that in this case we deal with electrical signals rather acoustic waves. Finally, a public installation was built and temporarily exhibited at the Music Instrument Museum in Milan; in this way visitors could feel the original experience of playing and producing electronic music (CANAZZA *et al.* 2011), by acting on switches and knobs<sup>8</sup>.

## 5. CONCLUSIONS

Digital modeling techniques offer great opportunities for the study of musical instruments of antiquity, or even just no longer playable due to a precarious state of conservation or a rapid technological obsolescence. Of particular interest is the numerical simulation of the sounds those instruments could generate when they were in use: digital models allow us to generate and listen to those sounds, even if we have only a few fragmentary pieces of the instrument or just some descriptions or pictures. Although many sound modeling and simulation techniques are described in the literature, the choice of which one to use strongly depends on a) the state of conservation of the artifact (almost intact, strongly incomplete, no longer existing); b) its acoustic properties and the manner in which it is played (for example, percussion instruments are generally modeled differently from flutes or brass instruments); c) the aspects to be studied (musical structures, intonation, timbre); d) the access modalities that we want guarantee (e.g., only for scholars or accessible and playable by the general public). The case studies presented in this article offer three concrete examples of how and why these choices can be made.

What these projects showed us is that returning the sounds of instruments that are now silent is of great importance to support knowledge on the development of music and its function within the societies of the past. At the same time, specially from the point of view of museum curators, it represents

<sup>8</sup> See <https://youtu.be/7dxjJrmUMxA?t=260> for a demonstration of the digital simulation of some electronic devices of the Studio.

a great opportunity to bring this knowledge to the general public through a means (the sound) that is always very engaging, thanks to the emotional response that music and sound usually induce in the listener.

During the past decade, museums have embraced digital technology to enhance visitors' experiences. The use of digital technologies encourages museum visitors to actively engage with the artifacts. While respecting the original culture, technologies enable the development of new languages and experimentation by multiplying the narrations of the work. In this way, the visit to a museum becomes both educational and entertaining. Presenting artifacts to the general public is a complex task for their multifaceted nature, and digital technology must not sacrifice accuracy or depth of information for the sake of entertainment. Deploying digital technology is a multidisciplinary effort that requires interplay among different fields, from history and archaeology to information engineering and craftsmanship. A proper design methodology is necessary to draw the role of the artifacts of museums and galleries in the visitor experience.

### *Acknowledgements*

This work was partially supported by the "Archaeology & Virtual Acoustics. A Pan flute from ancient Egypt" research project of the Depts. of Cultural Heritage and Information Engineering of Padova University.

ANTONIO RODÀ, GIOVANNI DE POLI, SERGIO CANAZZA  
Department of Information Engineering  
University of Padova  
roda@dei.unipd.it, depoli@dei.unipd.it, canazza@dei.unipd.it

ZEZHOU SUN, EMILY WHITING  
Department of Computer Science  
Boston University  
micou@bu.edu, whiting@bu.edu

### REFERENCES

- AVANZINI F., CANAZZA S. 2015, *Virtual analogue instruments: An approach to active preservation of the Studio di Fonologia Musicale*, in NOVATI, DACK 2015, 89-108.
- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., MICHELONI E., PRETTO N., RODÀ A., GASPAROTTO S., SALEMI G. 2016, *Virtual reconstruction of an ancient Greek Pan flute*, in *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Sound and Music Computing Conference (SMC2016)*, 41-46 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851179>).
- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., PRETTO N., RODÀ A., ANGELINI I., BETTINESCHI C., DEOTTO G., FARESin E. *et al.* 2015, *Archaeology and virtual acoustics. A Pan flute from ancient Egypt*, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference in Sound and Music Computing (SMC 2015) (Maynooth 2015)*, 31-36 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851067>).
- BARKER A. 2007, *The Science of Harmonics in Classical Greece*, Cambridge, Cambridge University Press.



- BELLIA A. 2019, *Towards a new approach in the study of ancient Greek music: Virtual reconstruction of an ancient musical instrument*, «Digital Scholarship in the Humanities», 34, 2, 233-243 (<https://doi.org/10.1093/llc/fqy043>).
- BERGH A. 2007, *I'd like to teach the world to sing: Music and conflict transformation*, «Musicae Scientiae», 11 (2 suppl.), 141-157.
- BORIN G., DE POLI G., SARTI A. 1992, *Algorithms and structures for physical models synthesis*, «Computer Music Journal», 19, 4, 30-42.
- BOTH A.A. 2009, *Music archaeology: Some methodological and theoretical considerations*, «Yearbook for Traditional Music», 41, 1-11.
- BRESSAN F., RODÀ A., CANAZZA S., FONTANA F., BERTANI R. 2013, *The safeguard of audio collections: A computer science based approach to quality control. The case of the sound archive of the Arena di Verona*, «Advances in Multimedia», ID 276354 (<https://doi.org/10.1155/2013/276354>).
- CANAZZA S., AVANZINI F., NOVATI M., RODÀ A. 2011, *Active preservation of electrophone musical instruments. The case of the "Liettizzatore" of "Studio di Fonologia Musicale" (RAI, Milano)*, in *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Sound and Music Computing Conference (SMC 2011)*, 304-309 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.849867>).
- CANAZZA S., DE POLI G., RODÀ A. 2015, *CaRo 2.0: An interactive system for expressive music rendering*, «Advances in Human-Computer Interaction», ID 850474 (<https://doi.org/10.1155/2015/850474>).
- CHAIGNE A., KERGMARD J. 2016, *Acoustics of Musical Instruments*, New York, Springer.
- COOK P. 1991, *Tbone: An interactive waveguide brass instrument synthesis workbench for the NeXT machine*, in *Proceedings of the 1991 International Computer Music Conference, ICMC 1991 (Montreal 1991)*, 297-299 (<https://dblp.org/rec/conf/icmc/HirschmanCS91>).
- COOKE D. 1959, *The Language of Music*, Oxford, Oxford University Press.
- DE ANGELI S., BOTH A., HAGEL S., HOLMES P., JIMÉNEZ PASALODOS R., LUND C. (eds.) 2018, *Music and Sound in Ancient Europe: Contributions from the European Music Archaeology Project*, European Music Archaeology Project.
- DE POLI G. 1983, *A tutorial on digital sound synthesis techniques*, «Computer Music Journal», 7, 4, 8-26.
- EMERIT S., GUICHARD H., JEAMMET V., PERROT S., THOMAS A., VENDRIES C., VINCENT A., ZIEGLER N. 2017, *Musiques! Échos de l'Antiquité*, Gent, Snoeck Publishers.
- FLETCHER N.H., ROSSING T.D. 1991, *The Physics of Musical Instruments*, New York, Springer Verlag.
- FLETCHER N.H., ROSSING T.D. 2012, *The Physics of Musical Instruments*, Springer Science & Business Media.
- FRTZ C., TOSELLO G., FLEURY G., KASARHÉROU E., WALTER P., DURANTHON F., GAILLARD P., TARDIEU J. 2021, *First record of the sound produced by the oldest Upper Paleolithic seashell horn*, «Science Advances», 7, 7 (<https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9510>).
- GILBERT J., BRASSEUR E., DALMONT J.-P., MANIQUET C. 2012, *Acoustical evaluation of the Carnyx of Tintignac*, in *Proceedings of Acoustics 2012 (Fremantle 2012)*, 3956-3959.
- GREILSAMER L., FREEMAN J.C., BAKER T. 1927, *On old violins*, «The Musical Quarterly», 13, 3, 410-433.
- HAGEL S. 2009, *Ancient Greek Music: A New Technical History*, Cambridge, Cambridge University Press.
- KOUMARTZIS N., TZETZIS D., KYRATIS P., KOTSAKIS R. 2015, *A new music instrument from ancient times: Modern reconstruction of the Greek lyre of Hermes using 3D laser scanning, advanced computer aided design and audio analysis*, «Journal of New Music Research», 44, 4, 324-346.
- NOVATI M.M. (ed.) 2009, *Lo Studio di Fonologia. Un diario musicale 1954-1983*, Milano, BMG Ricordi Publications.

- NOVATI M.M., DACK J. (eds.) 2015, *The Studio di Fonologia: A Musical Journey 1954-1983, Update 2008-2012*, Milano, BMG Ricordi Publications.
- PRETTO N., MICHELONI E., GASPAROTTO S., FANTOZZI C., DE POLI G., CANAZZA S. 2020, *Technology-enhanced interaction with cultural heritage: An ancient Pan flute from Egypt*, «Journal on Computing and Cultural Heritage», 13, 2, 267-280 (<https://doi.org/10.1145/3355395>).
- RAUTERBERG M. (ed.), *Culture and Computing. HCII 2020*, Lecture Notes in Computer Science, 12215, Cham, Springer ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-50267-6\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50267-6_21)).
- RODÀ A. 2012, *Evolution of the equipments of the Studio di Fonologia Musicale of Milan*, in NOVATI, DACK 2015, 33-81.
- RONCADOR R., BELLINTANI P., SILVESTRI E., ERVAS A., PICCARDO P., MILLE B. 2014, *Karnykes a Sanzeno: dalla riscoperta alla ricostruzione sperimentale*, in *Les Celtes et le Nord de l'Italie. Premier et Second Âges du Fer, Actes du XXXVI<sup>e</sup> Colloque International de l'AFEAF (Vérone 2012)*, «Revue Archéologique de l'Est», Suppl. 36, 667-678.
- SACKS O. 2006, *The power of music*, «Brain», 129, 10, 2528-2532.
- STORR A. 2015, *Music and the Mind*, New York, Simon and Schuster.
- SUN Z., RODÀ A., WHITING E., FARESin E., SALEMI G. 2020, *3D virtual reconstruction and sound simulation of an ancient Roman brass musical instrument*, in C. STEPHANIDIS (ed.), *Human-Computer Interaction - HCI International 2020 (Copenhagen 2020)*, Springer, 267-280.
- SWIFT E., BOSWORTH L., CREESE D., MORRIS G., PUDSEY A., RICHARDSON J., STONER J., WALKER F., WRIGHT G. 2021, *Creation of functional replica Roman and Late Antique musical instruments through 3D scanning and printing technology, and their use in research and museum education*, «Internet Archaeology», 56 (<https://doi.org/10.11141/ia.56.1>).
- TOMLINSON G. 2012, *Musicology, anthropology, history*, in M. CLAYTON, T. HERBERT, R. MIDDLETON (eds.), *The Cultural Study of Music*, New York, Routledge, 81-94.
- UMETANI N., PANOTOPOULOU A., SCHMIDT R., WHITING E. 2016, *Printone: Interactive resonance simulation for free-form print-wind instrument design*, «ACM Transactions on Graphics», 35, 6, 1-14.
- VAN KEER E. 2010, *Archaeology of ancient Greek music: From reconstructing instruments to deconstructing concepts*, «Studies in Music Archaeology», 7, 43-51.

## ABSTRACT

Digital technologies and 3D models, nowadays largely used to document archaeological remains and to obtain hypothetical reconstructions when these remains are more or less heavily damaged, can also be powerful tools to simulate and render the acoustic response of an environment, such as the interior of a building, or an artifact, such as sounding objects or musical instruments. This work addresses the cases of three musical instruments of the past – namely a Pan flute, a brass instrument, and an electrophone instrument – coming from different periods and in different states of preservation, which voices can now be heard thanks to as many multidisciplinary projects. Possible approaches to the simulation of the sounds that these instruments could generate are discussed in relation to different aims and contexts.

## COMPUTED TOMOGRAPHY AND HANDCRAFTING PROCESSES OF AN ANCIENT MUSICAL INSTRUMENT: THE AULOS FROM POSEIDONIA<sup>1</sup>

### 1. INTRODUCTION

Among non-invasive investigation methods applied to cultural heritage, the role of radiology is well known. For several years, the definition of diagnostic imaging has mostly been used in medicine in order to highlight the numberless series of available investigative methods in radiology (e.g. computed tomography, magnetic resonance imaging, ultrasound, etc.). Whilst this technological enhancement has improved the work of radiologists, these innovations are still not fully considered or exploited in some fields of research applied to art and cultural heritage, and especially to musical heritage (PRETTO *et al.* 2020). In this field of research, only a few museums and institutes for the preservation and restoration of musical instruments have autonomous radiological sections (SWIFT *et al.* 2021). This could explain the gap between medical radiology and radiology applied to musical heritage, particularly regarding ancient instruments (along with the lack of presence of specialised figures in these institutions) (BÄR *et al.* 2018).

Indeed, until recently, although its methods have great potential in the diagnostics and conservation of ancient musical instruments, radiology has been underused in this field of application. Thanks to digital imaging and computed tomography (CT), diagnostic imaging can give us significant results in the study of ancient instruments, providing scholars with valuable information that would be otherwise unavailable. Indeed, CT also enables the study of the instruments' measurements and morphology, quickly generating information and overcoming the limitations presented due to their fragility without jeopardising the integrity of specimens; this method can also measure the thickness of the internal structures (FUCHS *et al.* 2019). Moreover, the CT allows two and three-dimensional reconstructions on coronal, axial and sagittal planes, revealing details of the constructive characteristics of instruments as well as the state of their conservation, allowing for their digital storage and making possible a non-contact re-investigation at any time. CT also ensures the data is collected in a less error-prone form, so that the figures obtained

<sup>1</sup> This article is – in all its parts – the product of a joint effort of both authors. Only for academic purposes, we attribute here the textual part to Angela Bellia and the graphic part to Danilo Paolo Pavone.

from the object can be checked later. Optimally, this amounts to preparing a three-dimensional (3D) digital image: CT serves this purpose extremely well because it also exhibits internal structures of instruments, and allows for a useful evaluation of the instruments' working processes as well as the visualisation of invisible fracture lines and lesions in their structures, showing possible modifications, damage and repairs.

## 2. BACKGROUND

Considering the changing framework in ancient instruments studies from one that treats them as images to another that considers them exclusively for their organological characteristics, the aim of our study is to analyse how the application of computational imaging to ancient instruments can provide a new means of understanding, interpreting and disseminating results, and, most importantly, to enable us to study these artefacts as multidimensional entities and three-dimensional material objects that have undergone transformations and forms of handling (ZORAN 2011).

That is particularly important given that musical instruments, until recently, have been treated as images, as artistic depictions and objects whose meanings and functionality needs to be surveyed through iconological and organological methods. As such, they have been rendered and represented as two-dimensional, finished and static entities. Their formal qualities, e.g. size, features and proportions, took priority over, say, material processes, technologies of making, postproduction modification, circulation, deposition and discard. Yet, as many studies have shown, musical instruments were continuously modified. Sometimes, they were intentionally fragmented, reshaped and re-introduced into circulation. Moreover, these artefacts were special three-dimensional objects meant to be engaged with in a multi-sensory way: they were handled, interfered with, interacted with by human bodies and with other entities, such as architectural features and spaces as well as other objects and materials.

Despite the image-based discourse on musical instruments being challenged by several studies in the last decade, it has largely shaped the way they are depicted in archaeological and music archaeological publications: it is this corpus of images that has in turn shaped further thinking and discussion on ancient instruments, especially since it has always been the case that very few people have been able to handle the original, three-dimensional, physical objects. Using 3D digital models combined with cutting-edge digital methods, some of the subjective observations typically made by scholars on ancient instruments on the basis of traditional measurements can be substituted by measurable parameters, which also opens up new perspectives for the study of the production processes of instruments. Taking into consideration the

*aulos* found at Poseidonia in southern Italy, which dates from the end of the 6<sup>th</sup> to the beginning of the 5<sup>th</sup> c. BCE, this article focuses on the process of the creation of ancient instruments through 3D scanning and printing technology, which can be used not only as a methodological case study, but also as a research tool.

### 3. THE *AULOS* FROM POSEIDONIA

The *aulos* from Poseidonia was found in 1969 in tomb 21 at the necropolis of Tempa del Prete, a few kilometres South of the town outside the ancient city walls, where musical instruments were also discovered in two other graves and in the best-known ‘Tomb of the Diver’ (BELLIA 2016). In the same tomb 21, most likely belonging to an adult man on the basis of the grave goods, a small turtle shell was also found, which most likely was the sound-box of a *barbitos*. The *aulos*, a pair of pipes – with vibrating reeds in their mouthpieces – held out in front of the player, was the omnipresent musical instrument in Greek cults, festivals and funerary rituals (Fig. 1). The different types of *auloi* were classified on the basis of their range, pitch, and origin as well as their material and occasion of musical performance. As in the so-called ‘early type’ *auloi* – which are defined by the absence of mechanisms for sound production – the wind instrument found in tomb 21 (held today at the National Archaeological Museum of Poseidonia-Paestum, modern Capaccio, Salerno, inv. 23068), was played by covering the holes in the upper part of the two tubes with fingers and by covering the thumbholes placed at the back of the pipes, which form a pair (Fig. 2a-b) (BELLIA 2012, 98-99; PSAROUDAKËS 2014).

A peculiarity of the tubes belonging to the instrument from Poseidonia is the presence of two similar small holes (HAGEL 2010-2011) (Fig. 3a-b), which would have had expressive purposes given that a musician could use these little holes for modifying resonance and, as a side-effect, the timbre of the instrument or the “colour” of its sound (BARKER 2002, 67-70). Moreover, eight sections form the tubes; each section suffers from damage, but on the whole the instrument is well preserved. Understandably, the parts receiving the reeds and the reeds are missing: being made from cane, they are forever lost to us.

According to written sources, deer bones were used to form *auloi* (Pollux, IV, 71): in particular, the tibia of a deer was the most common material used for making *auloi* in ancient times, at least until the Hellenistic age (WEST 1992, 81-82). Given the texture of material, particularly the adult deer bone could be handled easily, and it required tools and processing techniques similar to those used for working ivory and wood. Moreover, deer bone is usually white or ivory: it could be smoothed, acquiring a lustre tending towards bright white or a golden colour. Being similar to the rare and precious ivory, the deer bone



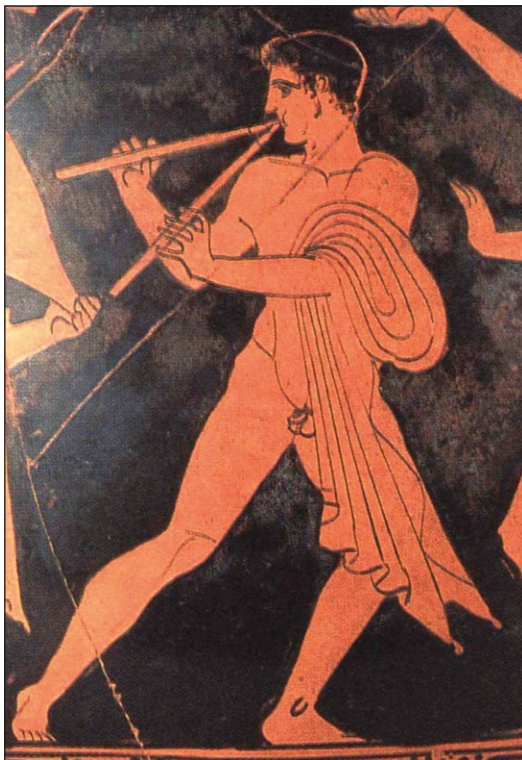


Fig. 1 – Regional Archaeological Museum of Agrigento. Inv. AG. 22797. *Aulos* player. Particular of the Attic red-figured bell krater from the necropolis of Contrada Pezzino in Akragas. 5<sup>th</sup> c. BCE.



Fig. 2a-b – National Archaeological Museum of Poseidonia-Paestum, inv. 23068. The *aulos* found in the tomb 21 of Tempa del Prete. 6<sup>th</sup> -5<sup>th</sup> c. BCE. From PSAROUDAKËS 2014, 129, figs. 13-14.



Fig. 3a-c – Small holes in the mouthpieces and outhpieces end of the tubes. From PSAROUDAKËS 2014, 127, figs. 4-5a-b.



Fig. 4a-b – A deer tibia bone and a hypothesis of how the craftsman could transformed deer bones into musical instruments sections. Photo: Marco Sciascia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

was not only aesthetically pleasant, but it was also easily available and very low cost, given that it was a form of food waste. For this reason, bone-processing shops were often placed near slaughterhouses or sanctuaries, where deer sacrifices and banquets of meat were held (ANGLIKER 2016).

Some ancient texts focus on the materials used for the handling of the *auloi* in the Greek-Roman ages, highlighting how there were several of them and a variety of uses on the basis of sonic demands and needs, as well as of scales and of the “regionality” of Greek musical practice. Athenaeus (IV, 182d, *FGrHist* 275 F 82) and Pollux (IV, 75-76) mention how the use of deer bone for making *auloi* was a Theban innovation, and Plutarch (*Moralia*, 150e) recalls how Greek (and Roman) craftsmen used medium to large sized animal bones for creating wind instruments. For its shape, the tibia bone is one of the most suitable to be worked not only because of its long bone flaring towards the two epiphyses, but also for its cylindrical inner part, or

diaphysis, especially of the sheep, goat and deer bones (BERLINZANI 2014). On the basis of their porosity and/or compactness, the tibia bones had a great influence on the instruments' sounds both due to their specific weight and for the allowed speed of sound propagation (Fig. 4a-b).

It is worth noting that bone wind instruments were generally composed of tubes joined together (given the presence of spigots and sockets) so as to be able to create mainly cylindrical tubes, as the preserved instruments found in tombs and sacred areas in Greece and Magna Graecia display. Moreover, as in the case of the *aulos* from Poseidonia, the pipes' workmanship seems to reveal the use of an arched or rope drill used by craftsmen to pierce the surfaces of the tubes. Thanks to 3D CT, we are able to explore the production process of this instrument and how its craftsman transformed deer bones into a precious musical instrument which has been passed down to us.

#### 4. COMPUTATIONAL METHODS FOR PROCESSING THE 3D MODELS OF THE *AULOS* FROM POSEIDONIA

CT could be used as the primary tool in identifying and cataloguing ancient musical instruments. There is no need to invest huge sums of money in purchasing and developing expensive testing equipment. Medical CT equipment is almost universally available. There is no need to ship instruments to distant laboratories, an expensive and risky business at best. Musical instruments can be also scanned locally or *in situ*, avoiding risky transportation (ALBERTIN *et al.* 2019). The process takes little time, is non-invasive and non-destructive, and produces digital data. This data is unique and can serve as a fool proof "fingerprint" of the instrument. Moreover, this data can also be used not only as a tool in the restoration and conservation of damaged instruments, but also to consider their affordances – the properties of instruments that enabled tubes to be handled and their capacity to produce sound of a particular volume and pitch – and to create replicas of these artefacts. This method could also provide new insights on how craftsmen handled the bones on the basis of their shape and inner structure, as well as on the development of instruments most likely linked to cultural, social and musical changes, especially in the theatrical context.

Information can be retrieved thanks to 2D cross-section images or 3D full-volume images, which allow for the inspection and the exploration of the inner part of the instrument; moreover, by processing tomographic data, a 3D model of the sample can be obtained for virtual reality applications or digital archives storage.

It is worth noting that the use of medical CT scanners gives good results only in the case of analysis of samples with a size and density similar to those of the human body, as in the case of the deer bone. In order to fulfil all these

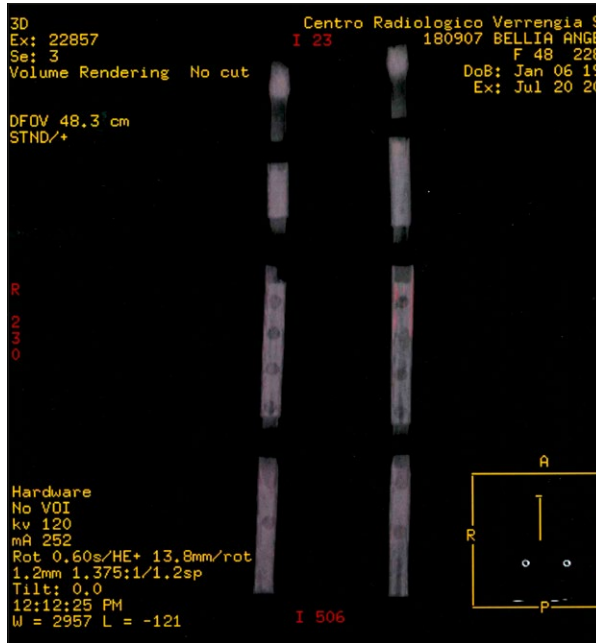


Fig. 5 – CT scan of the bone *aulos* from Poseidonia realised at the Verrengia Radiological Centre in Salerno.

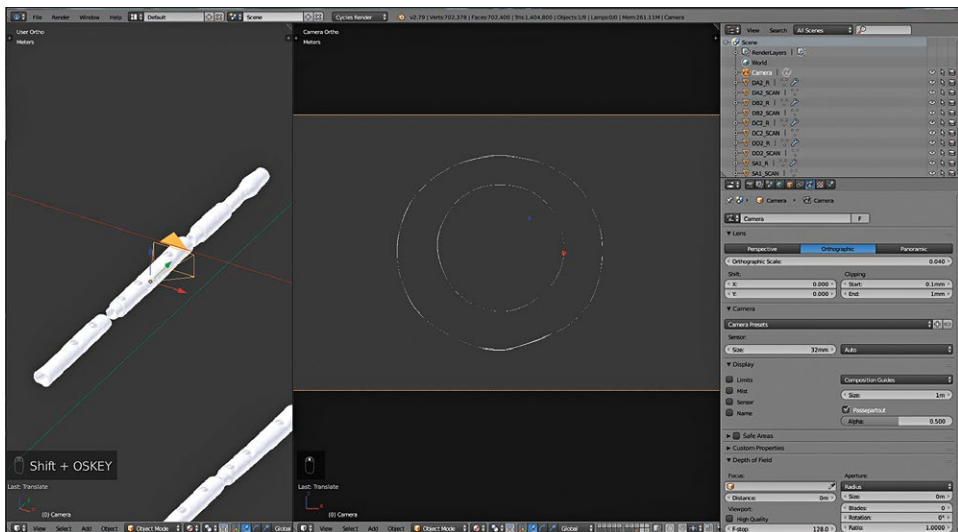


Fig. 6 – Details of the internal structure of the *aulos* from Poseidonia.

needs, after acquiring permission to use the instrument and the pick up of the instrument from the National Archaeological Museum of Poseidonia-Paestum, the CT scan of the bone *aulos* from Poseidonia (Fig. 5) was realised at the Verrengia Radiological Centre in Salerno, under the supervision of our team and of the museum team. Given that for ancient musical instruments, the inner structure contributes significantly to the colouration and amplification of their sound, it was requested that the medical staff – which was formed of radiographers and radiology technologists – focus their attentions on the scanning phase of the inner structure of the musical instrument in order to provide as much visibility as possible (Fig. 6). Moreover, given that inner structure is either hidden to the eye or inaccessible from the outside by conventional methods, we aimed to obtain information about constructional details that pointed to specific construction methods of certain instrument makers, as well as accurate measurements of the internal structure of the *aulos*. Up until that moment it was difficult (if not impossible) to access the internal sections, given that scholars who have previously studied this instrument (BAKOIANNIS *et al.* 2020, 53189-53192) used only traditional methods to avoid the high risk of damaging the object, providing us with hypothetical and questionable reconstructions of acoustics on the basis of available measurements.

In order to scan the wind instrument, the staff at the Verrengia Radiological Centre used a CT scanner equipped with a rotating X-ray tube. The multiple X-ray measurements of the *aulos* taken from different angles were then processed on a computer using reconstruction algorithms to produce tomographic (cross-sectional) images (virtual “slices”) of the instrument sections. The files (pixel resolution: 0.625mm) were saved in DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) format, a standard method to transfer images and associated information between different vendor devices, which produces a variety of digital image formats, enabling the integration of imaging devices as well as the exchange and transmission of images to multiple users. Using the Osiris software, the data generated was processed in order to obtain a three-dimensional mesh. The model was exported in STL (Standard Triangulation Language) format.

In the alignment phase, several scans from different views were mosaicked to obtain a model that could be studied in a virtual space, also producing metric measurements. Within this framework, information from the undamaged parts of the objects was utilised in combination with literary and iconographic sources in an attempt to re-create the appearance of the complete instrument.

#### 4.1 *From the three-dimensional model to the two-dimensional drawing*

The post-processing phase focused on the reorganization of the meshes in order to obtain a correct topology of the 3D models by the separation and cleaning of the parts and a subsequent retopology of the surfaces of the



models. This method allowed us to obtain a high-resolution model. Moreover, we obtained 3D renderings images of this instrument. The tools we used are divided into those involving the use of computational methods for processing the 3D models, and those involving the development of interactive tools aimed at engaging users in the exploration of instruments.

2D graphic reference images have been imported into an orthographic camera view as image planes: from the three-dimensional model, imported and composed in the Blender 3D rendering software virtual photo set, we considered each element in the following order: front view, front view section, side view, side view section. They were subsequently composed in a single layout, allowing us to obtain an overall view of the inner thicknesses of the two pipes and of the holes of the instrument. The rendered images (scaled 1:1) have been displayed in two graphic tables (external view/section view) in order to obtain an overall and scaled view of the digitised object.

Having established the 2D viewing space in a graphic table form, the instrument was subjected to an interpretative analysis of its elements. Despite the *aulos* being well preserved, there were some gaps or missing parts as well as some structural deformations of the deer bones, which interfered with the reconstructive prototyping of the instrument. In the graphic tables created, the features of the object, such as the natural curvature of the bone tubes (DC2), were considered, taking into account their uniqueness against the prototyping of a “generic” access model (Fig. 7a-i).

#### *4.2 Web-based viewer for shared access to the musical instrument*

The *aulos* sections have been also implemented thanks to the 3DHOP viewer (3D Heritage Online Presenter by Visual Computing Laboratory - ISTI - CNR). This open-source framework for the creation of interactive Web presentations of high-resolution 3D models, oriented to the Cultural Heritage field, allows dynamic access to the 3D model, which is usable and measurable on a computer and/or tablet via a web browser, such as Firefox, Safari or Chrome. Moreover, the 3DHOP viewer allows users to virtually interact with the instrument in the rotation movement, activating section planes in the X/Y/Z-axes and in the measurements of the instrument’s surfaces (Fig. 8a-b).

#### *4.3 From the reconstructive prototype to the access model*

The inner and external measurements extracted from the digitized model were essential for the creation of the reconstructive prototype. These measurements were also essential for the process of discretization and simplification of the sections of the *aulos*. Therefore, a discretized reconstruction of the actual instrument was obtained, keeping the main features of the object and modifying some deformations of single elements.

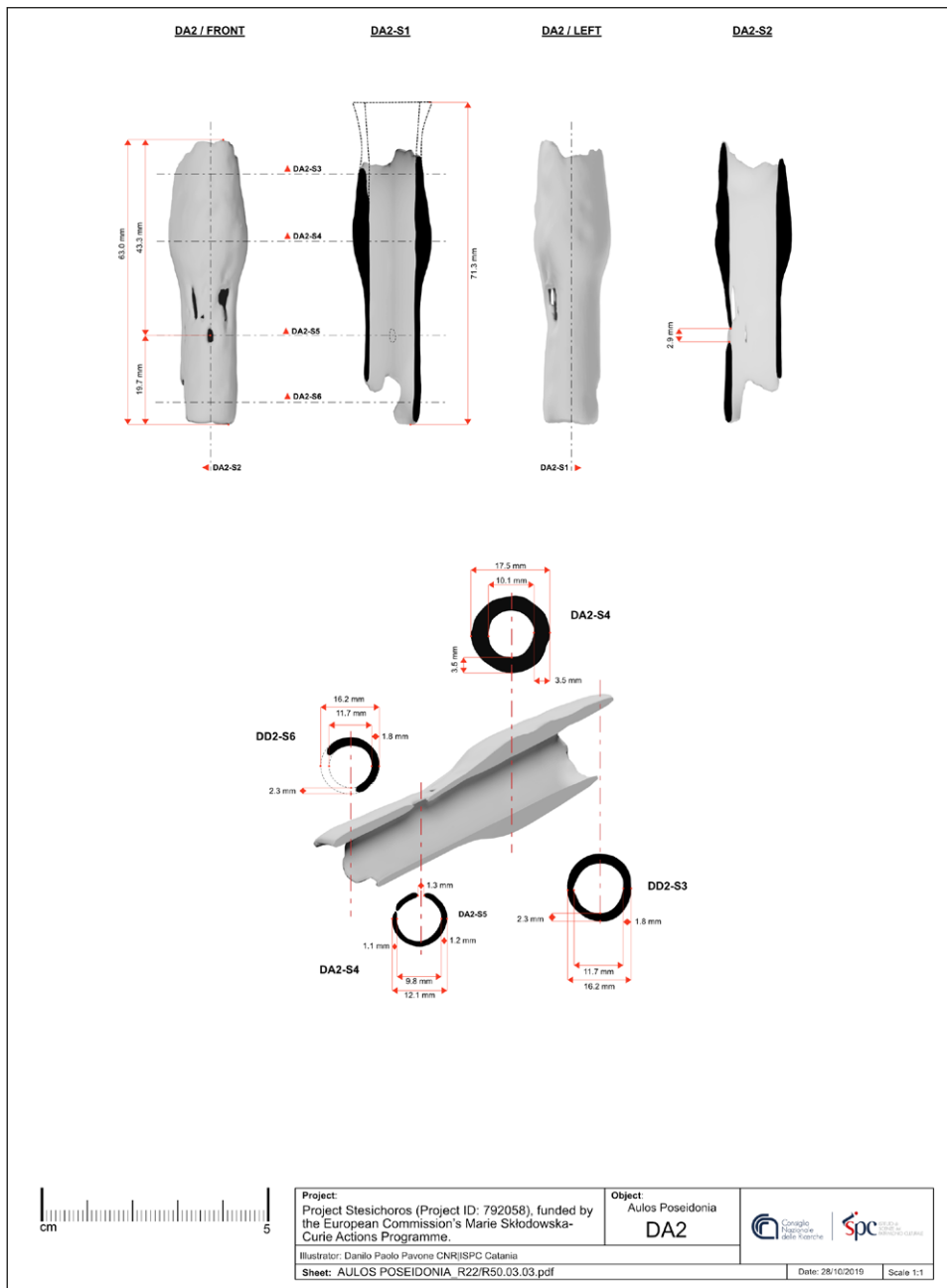


Fig. 7a – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

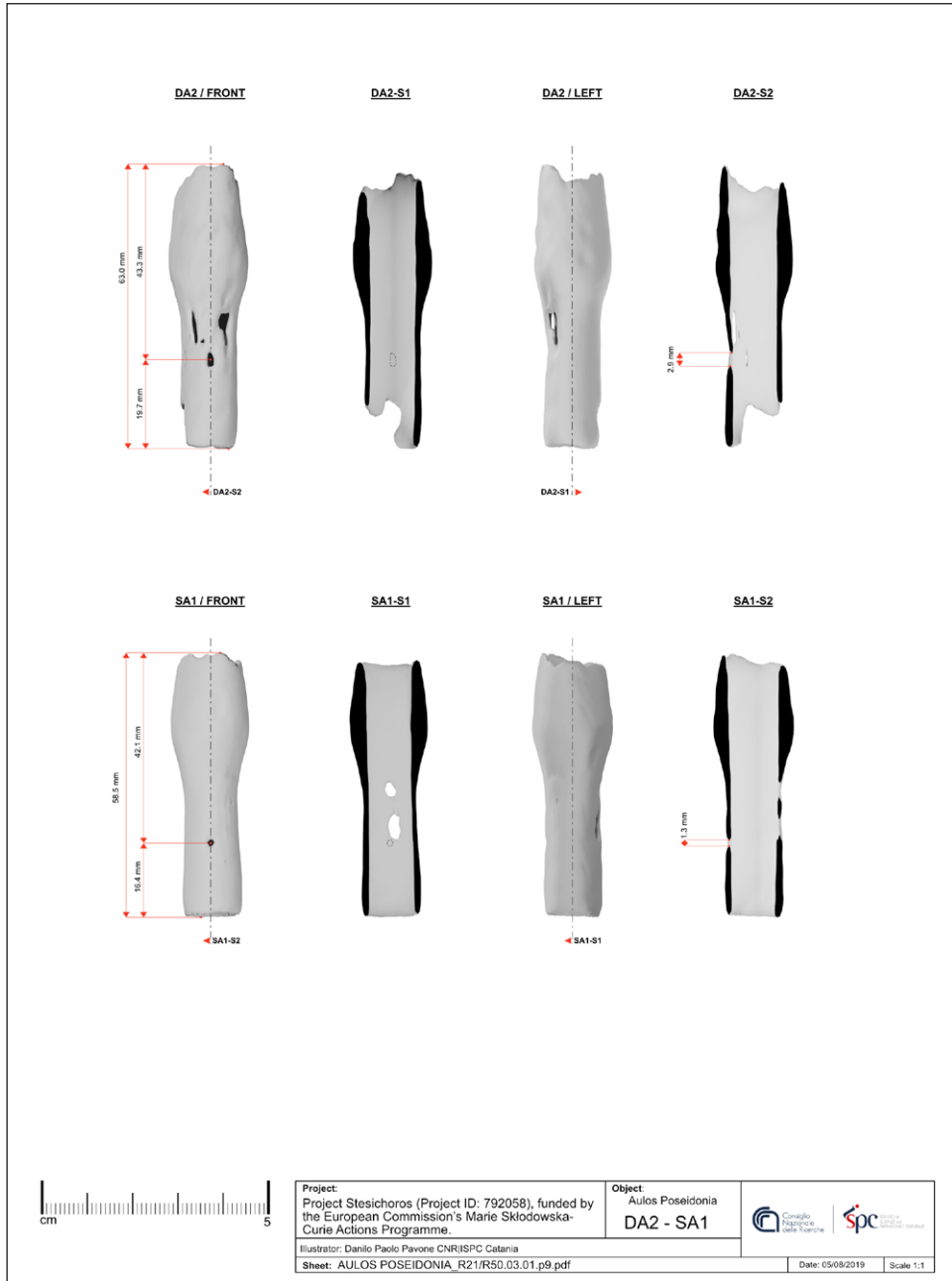


Fig. 7b – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

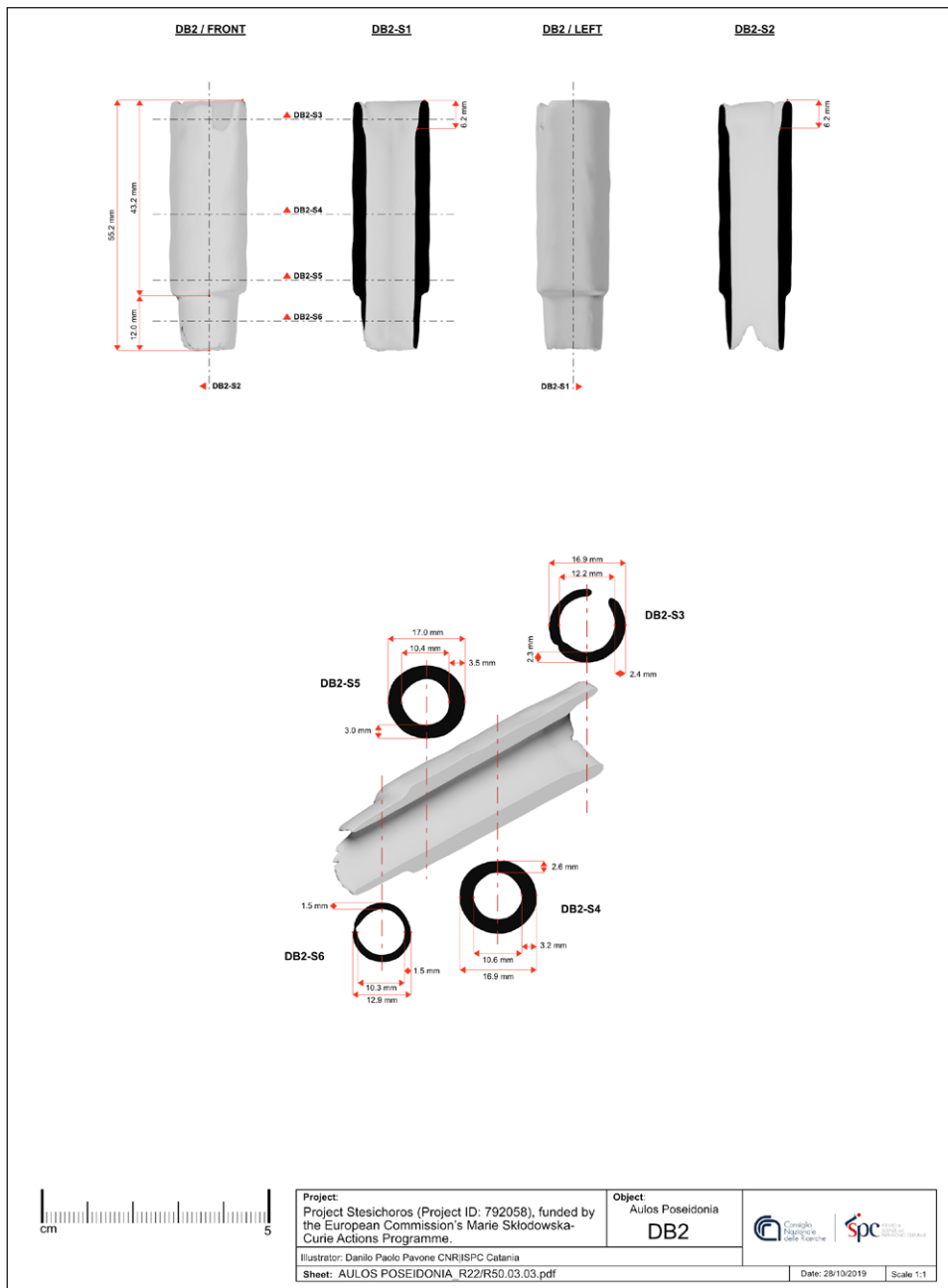


Fig. 7c – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

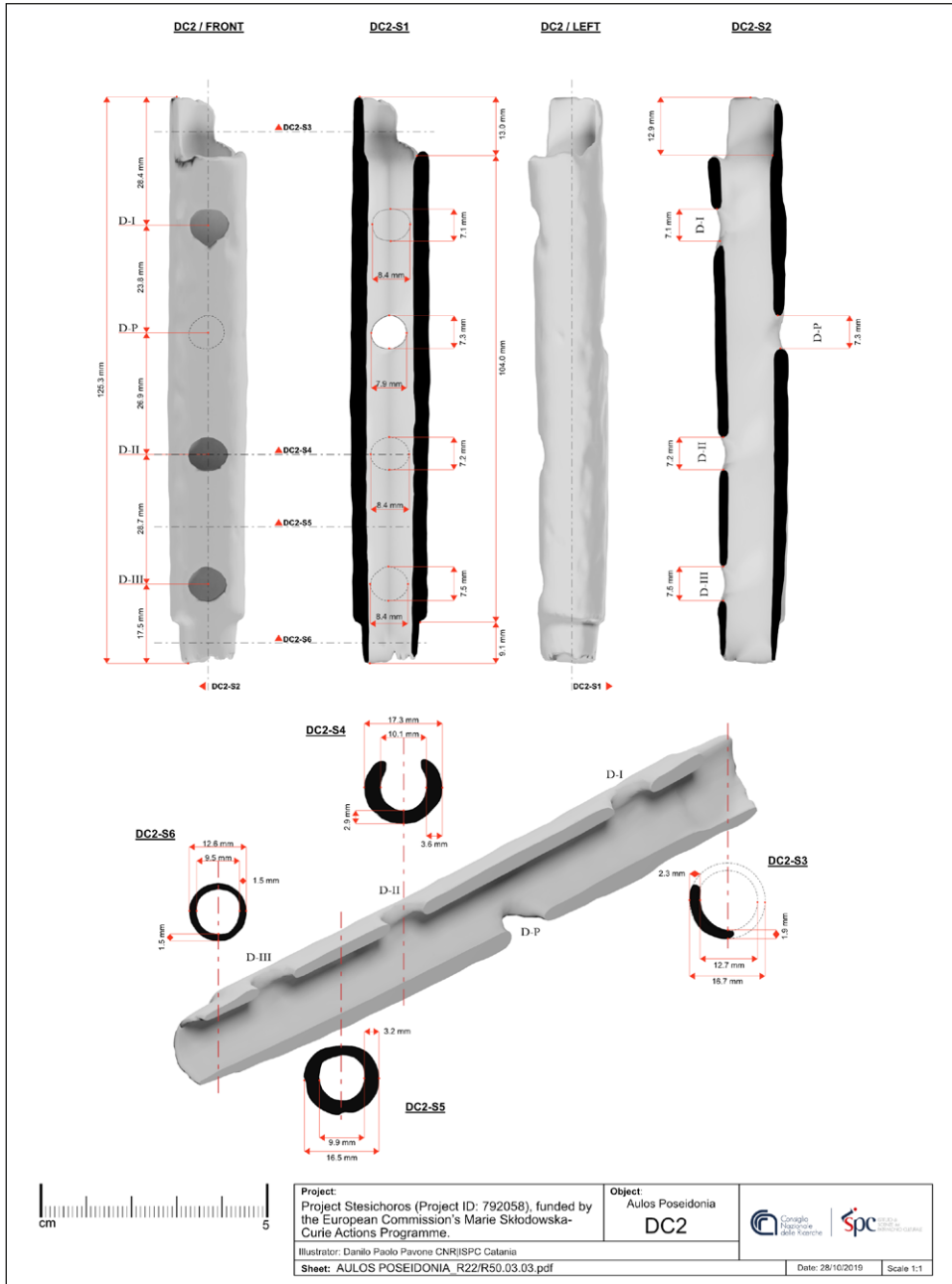


Fig. 7d – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.



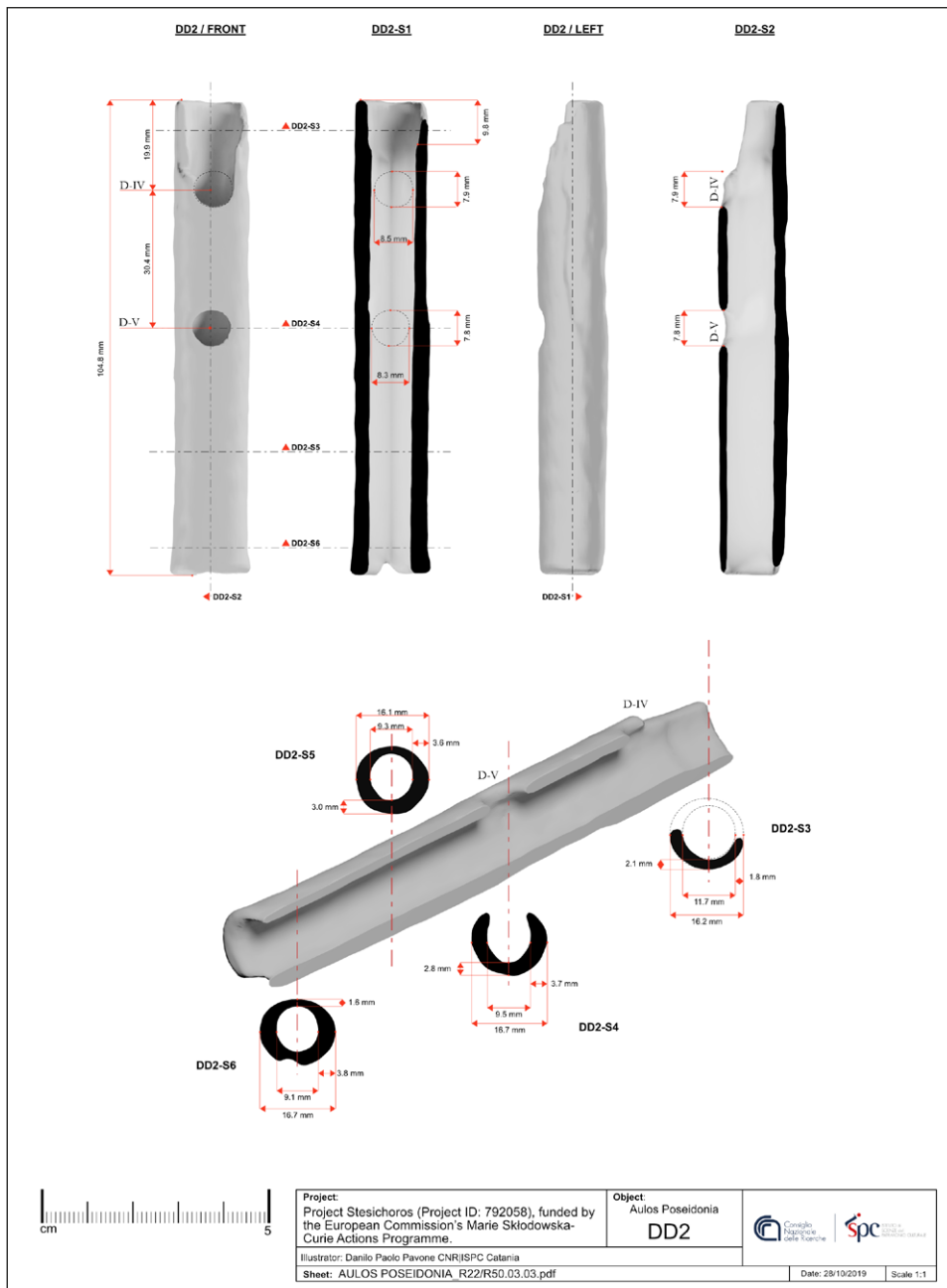


Fig. 7e – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

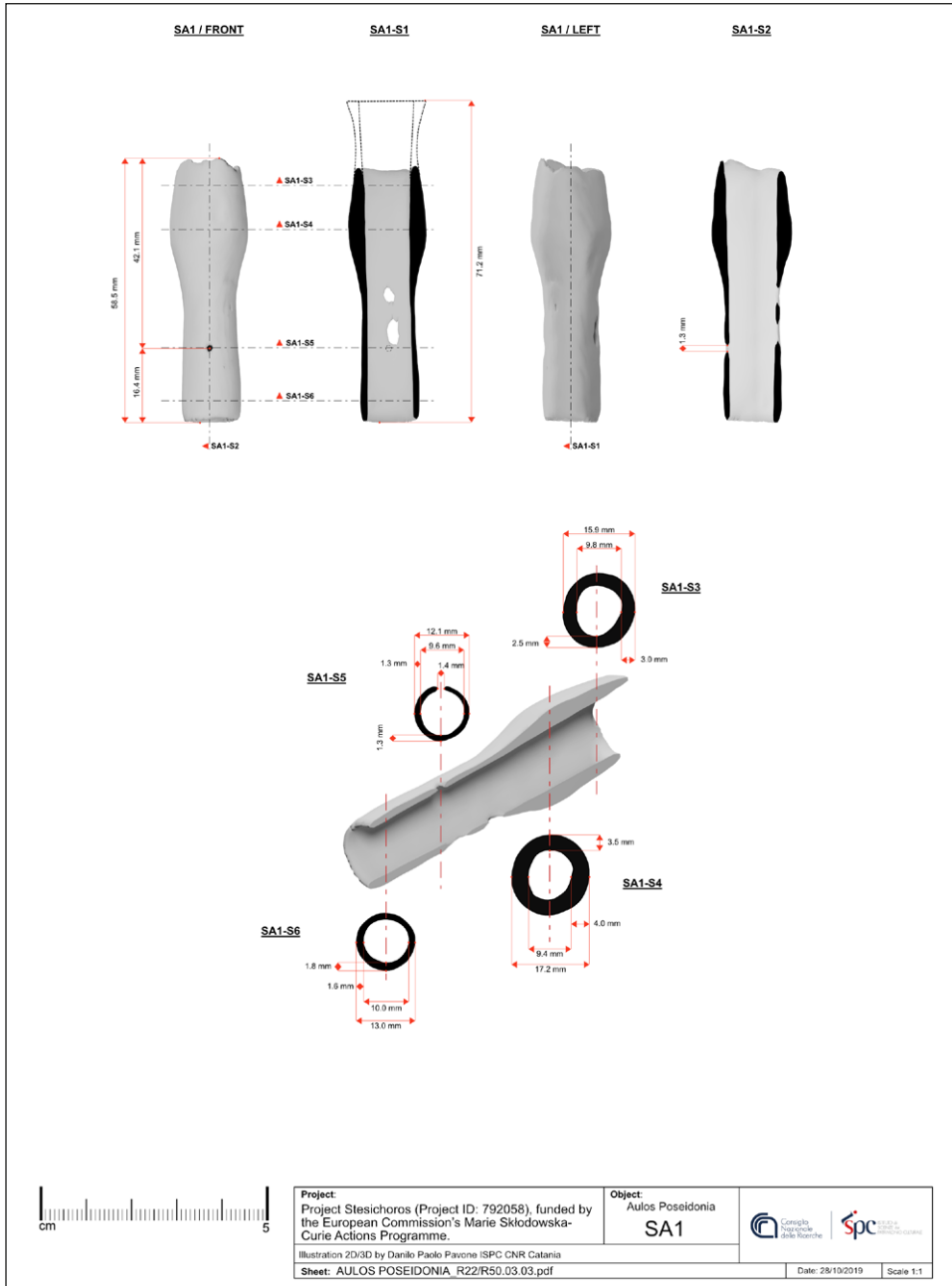


Fig. 7f – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

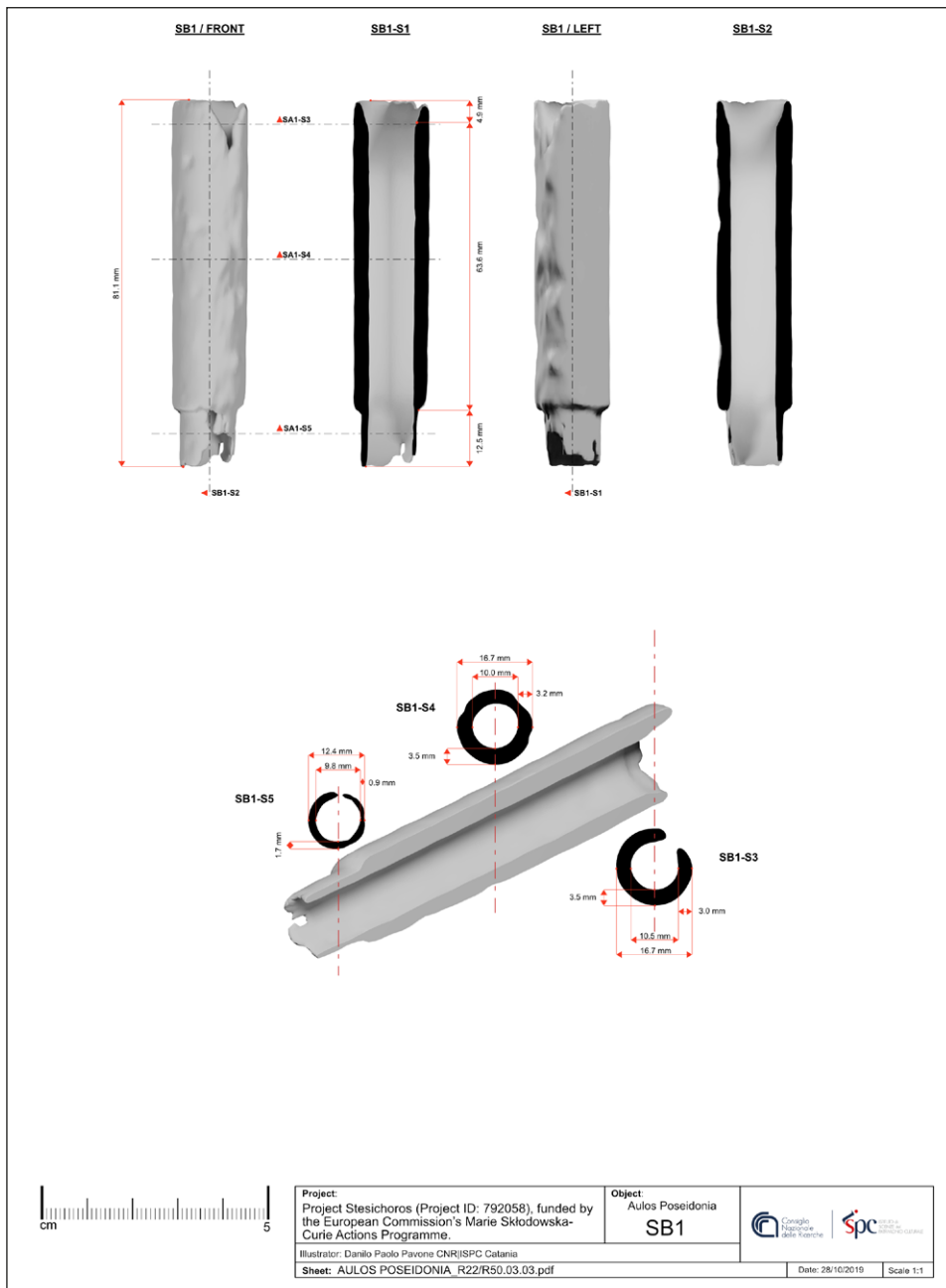


Fig. 7g – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

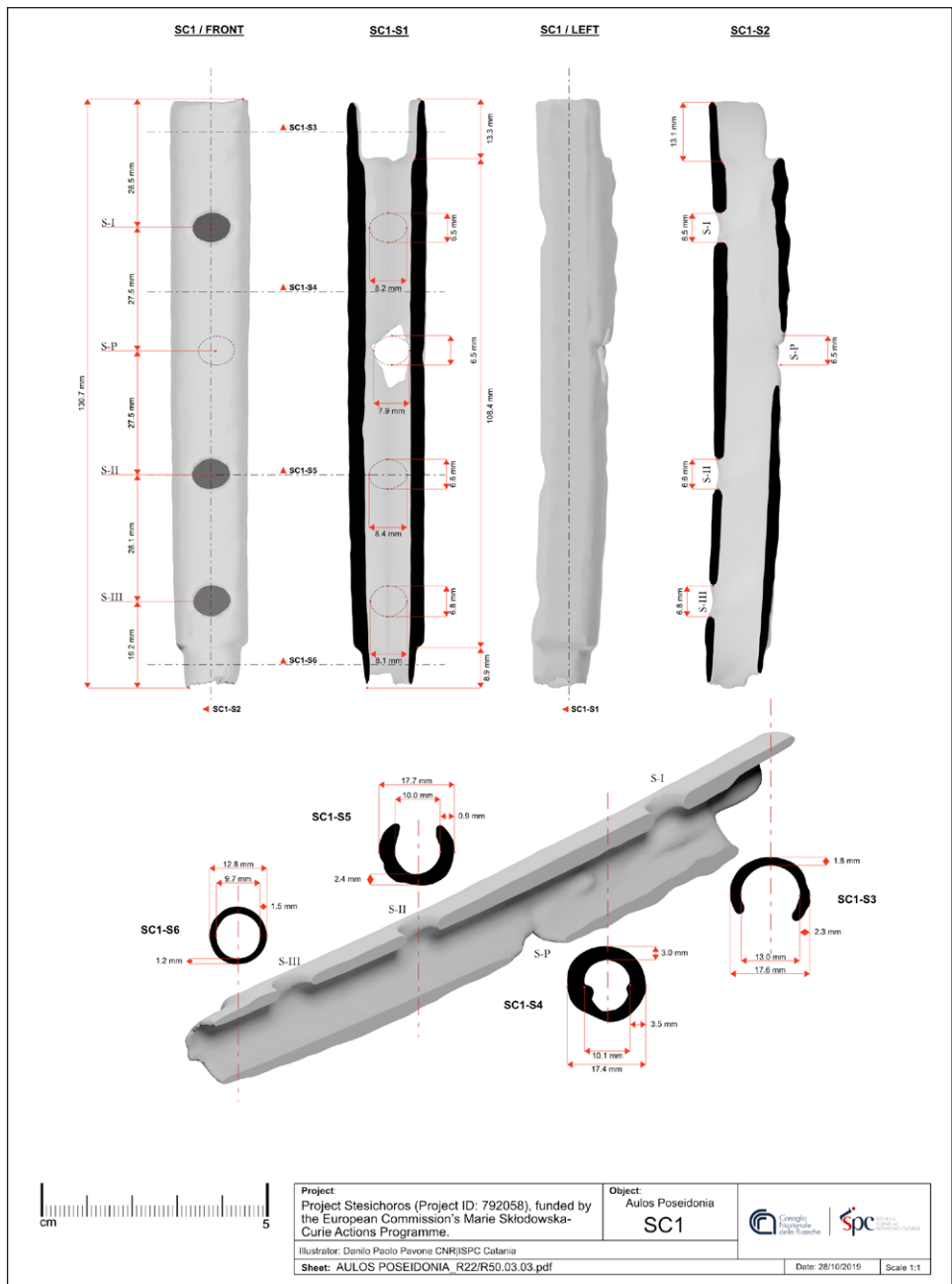


Fig. 7h – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

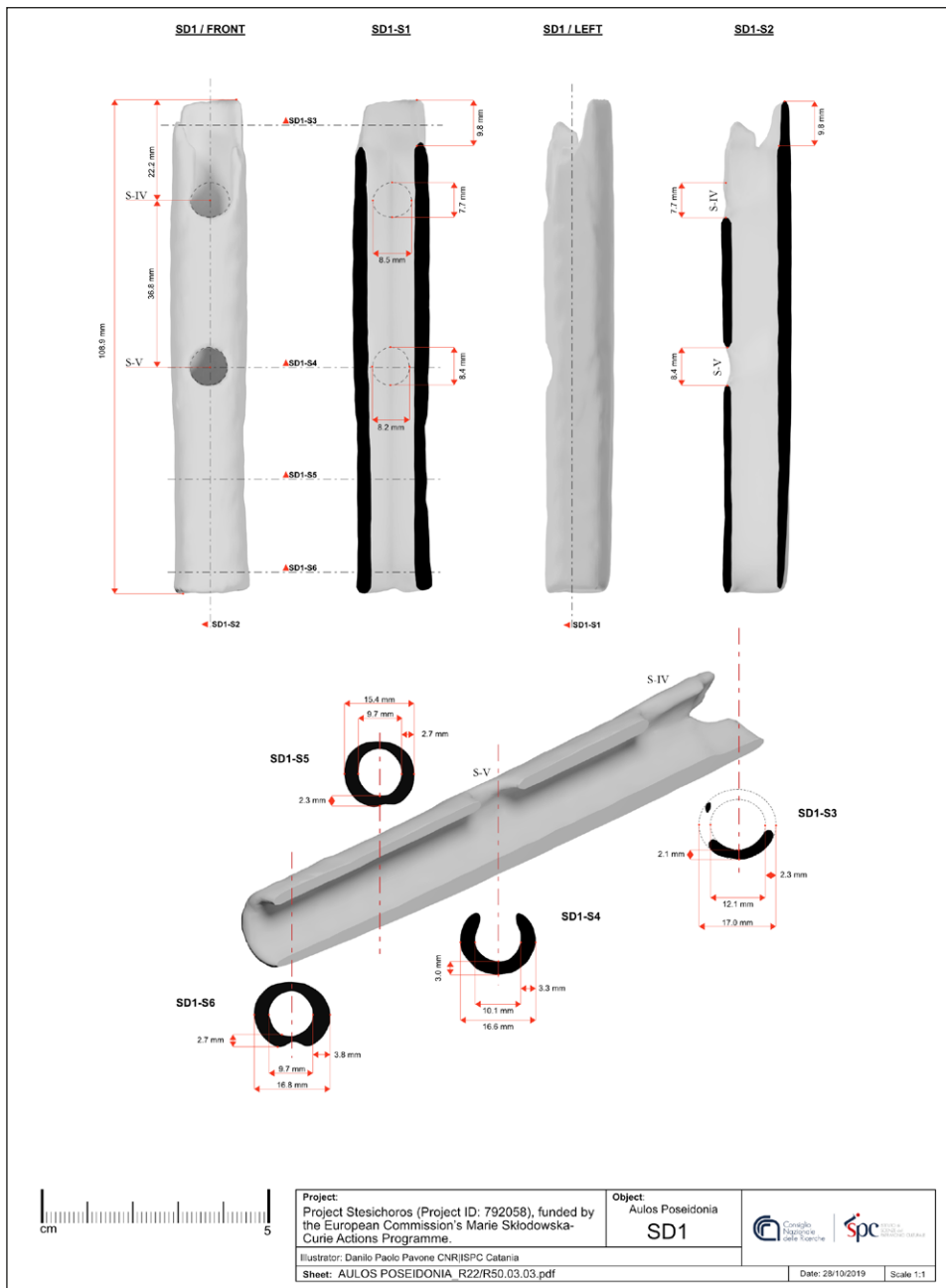


Fig. 7i – Graphic tables of the two tubes of the *aulos* from Poseidonia. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

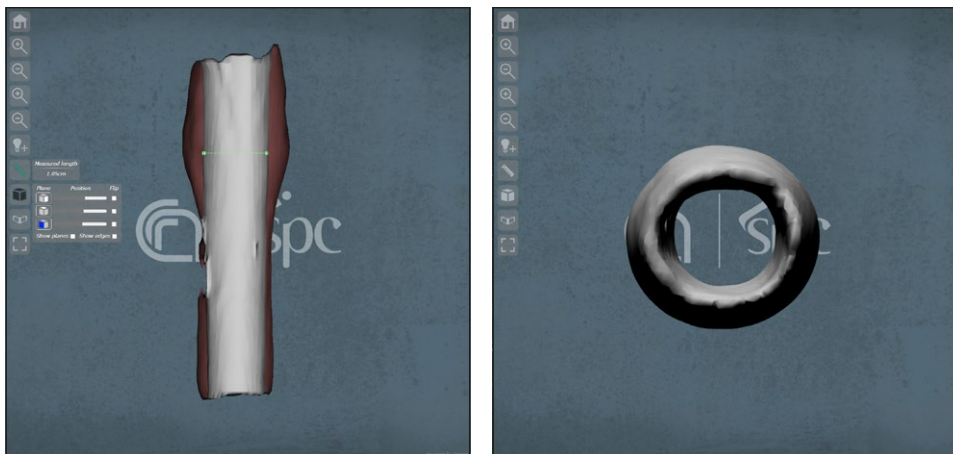


Fig. 8a-b – The 3DHOP viewer allows users to virtually interact with the instrument in the rotation movement, activating section planes in the X/Y/Z-axes and in the measurements of the instrument's surfaces. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

After that, the completed model was considered finished. The digital model was translated into original and restored copies, and two printed copies of the original and of the restored instrument were created in polymer material (Fig. 9a-c). Moreover, on the basis of measurements of the 3D model, an instrument maker specialised in the reconstructions of ancient musical instruments (Marco Sciascia), reconstructed the *aulos* from Poseidonia. The measurements of the 3D model of this instrument were compared with other similar instruments, especially the “early type” *auloi* dated to the 6<sup>th</sup>-5<sup>th</sup> c. BCE found in the *Persephoneion* in Locri (BELLIA 2018, 91-92) under Temple R (BELLIA 2019) at the sanctuary of *Malophoros* in Selinunte (BELLIA 2017): these fragmented instruments have been subjected to CT scanning and previous research. These surveys provided us new insights within a larger music-historical picture of the development of ancient instruments, including the evolution of wind instruments' shape and the related craftsmanship.

##### 5. DISCOVERING THE HANDCRAFTING PROCESSES OF THE MUSICAL INSTRUMENT FROM POSEIDONIA

Whilst the interdependence between musical practice, composers, performers, teachers and instrument makers in antiquity has been understudied, these various activities were part of a complex network of interaction, as written sources remind us and archaeological specimens of musical instruments suggest, which highlight how the development and the evolution of





Fig. 9a-c – Discretized reconstruction of the actual instrument and printed copies of the original and of the restored instrument created in polymer material. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

these special objects was in a strong relationship with cultural, social and performative contexts. The methods for processing 3D models of musical instruments provide us with useful information on the techniques used by craftsmen engaged in designing and handling instruments (SAFA *et al.* 2016). In some cases, it is not only possible to discover the procedures useful to the craftsmen for shaping a musical instrument from raw bones, but also to investigate the technique and type of tools used during the working phases: this is useful in reconstructing the chain of the technical progress of instruments. Concerning the *aulos* from Poseidonia, the study seems reveal that for the construction of this instrument, the craftsman proceeded through at least three main phases of workmanship: the preparation of the bone, the shaping of the bones and the finishing of the sections of the instrument.

### 5.1 Preparation of the deer bone

As regards to the tools used by craftsmen, on the basis of the handling traces left on the bones visible on the 3D scans, they could be bow or rope drills. Given that the spigots and sockets were very well defined and processed – and for this reason very fragile – it is most likely that the first phase of the processing consisted of the preparation of the bone for creating the sections of the instrument's pipes, which could be refined both internally and externally through the next step. As in Fig. 10a-b, the ends of some sections of the *aulos* are shaped with straight grooves: a metal blade for sawing could have been used by artisans for cutting these sections perpendicularly to the bone. Using the metal blade, therefore, a cylindrical support in the form of a tube



Fig. 10a-b – Section of the *aulos* from Poseidonia shaped with straight groove and internal parts of the section. Illustrator: Danilo Paolo Pavone.

could have been obtained from along the bone by removing the two porous ends. Furthermore, the metal saw could also have been effectively used to cut the bone into smaller pieces (RAVANI, THUN HOHENSTEIN 2010) to obtain a *holmos* and the other shorter sections.

It is worth noting that the metal saw was used by artisans who worked hard materials of animal origin since the Metal Age, however, we are not able to establish when it was used in the crafting of bone musical instruments. In workshops dated to the Archaic and Classical Ages, where processing waste has been found, this technique is documented by the presence of sawn off and discarded proximal and distal epiphyses, and diaphyses prepared for subsequent processing (DE GROSSI MAZZORIN, EPIFANI 2012). Traces of this type of processing can be found on some fragments of wind instruments found in workshops in Sicily (BELLIA 2012, 96-97) and Delos (ANGLIKER 2016, 30).

## 5.2 Making and shaping pipes

To shape the sections of the deer bone instrument, tools almost identical to those still in use today by modern craftsmen working with bone or ivory were used. The chisel, as with the preparation of the support, could be useful for shaping operations because it allowed the instrument to be put into a precise shape through a series of successive notches, deepening recesses or eliminating the discontinuous surface layer of the material whilst keeping the original shape of the bone.

The final shape of the instrument sections could also have been modelled by abrasion, that is, by rubbing the object on an abrasive surface, with a circular “to and fro” movement, most likely with a metal file. Abrasion should not be confused with sanding (or polishing) since, if the first is done in the phase of shaping the object, removing a large amount of material, the second is carried out as a final finishing operation and does not transform the object’s form (DE GROSSI MAZZORIN, EPIFANI 2012). Given that the flat surface allowed the *aulos* player to gain a better grip on the tube, by facilitating their alternation on the holes, the abrasion technique seems to have been used by the craftsman to obtain the flatter surfaces on the upper part of the tubes sections of the.

Given the accuracy of the crafting handling of the inner and external sections of the musical instrument, it cannot be excluded that, especially for the longer sections, the craftsman used a lathe to work on the sections of the bone, making it rotate by means of a belt or a strap wrapped around the object. It is worth noting that the deer bones could have been subjected to a softening technique. As in the case of this procedure applied to horn, mentioned by written sources, softening was practiced in order to modify the shape of the bones (or parts of musical instruments made in bone), which were then moulded to the desired shape (BARKER 2002, 77-81). To achieve

this, bones were immersed in water. This preliminary operation made bones easier to work, without causing irreversible alterations in the composition of the bone fabric. Alternatively, it was possible to boil the bones briefly, for about fifteen minutes, so as not to alter the quality of the bone tissue itself. These procedures could be useful for working the holes of the wind instrument, which required great precision by the craftsman, as the 3D images highlight.

One of the interventions on the *aulos* sections in the shaping phase could be the perforation of the internal part: this was a delicate operation that was also essential for drilling the holes in the pipe sections. The basic principle was to drill the inside of the bone so it could be emptied in several places. Taking into account that, as it is evident in the 3D images, the internal walls of the instrument have vertical streaks, it is very likely that the craftsman pierced the bone through a rotary movement of an arched bow or of a rope drill consisting of a cylindrical stick with a sharp tip, making rotate it on the inside the bone by rubbing between the palms of the hands or by turning the spindle on the workpiece. As it is possible to observe on the 3D model, working traces of a tip correspond to the holes in the internal parts of the sections (Fig. 10b).

### 5.3 *Refining and polishing the instrument*

Through the final polishing of the tubes, the craftsman may have eliminated all traces of processing left on the surface of the instrument sections. This may have been done with an abrasive material. According to written sources (Pliny, *Naturalis Historia*, IX, 40), the bone objects were smoothed with the rough skin of a shark (shagreen) or of a ray fish. Alternatively, other materials of an organic nature could have been used, such as bone ash, coal dust and skins covered with sand. It cannot be excluded that this procedure was also used by the craftsman to ensure the surface of the bones used to make the *Poseidonia aulos* were perfectly smooth: given that the surface of the object is on the whole compact, it is possible that the traces left by the earlier production procedures were erased, strengthening the object and enhancing it aesthetically. However, some parts of the sections, especially those close to the holes and to the spigots and sockets, are very fragile: in these areas cracks and fractures in the bone are evident and concentrated.

## 6. CONCLUSION

As a non-destructive method that facilitates new insights into ancient musical instruments, CT allows us to obtain useful data that could not be gained by other means without disassembling the object or the risk of damaging it. The variety of sizes, shapes and materials of ancient instruments

pose various challenges for CT scans. These issues have to be addressed by selecting appropriate CT parameters, scan procedures and data and image processing algorithms to obtain not only a high quality in the reconstructed volume images, but also useful information related to the craftsmanship of musical instruments. The processes of 3D scanning, 3D model creation, 3D printing, and craft reconstruction of the *aulos* from Poseidonia can facilitate the parameterisation and further processing of future scans of similar instruments and can be used to create a set of replica instruments to be considered as reasonably veracious ‘functional replicas’ (SWIFT *et al.* 2021). Thanks to these ‘functional replicas’, we will also be able to evaluate (to a certain extent) how far the craftsmen tailored their work to the needs of individual musicians and how they designed instruments on the basis of models or instruments transported in the ancient Mediterranean.

From a research perspective, the exploration of production processes can facilitate an enhanced understanding of the development of musical instruments used and requested in a particular social and musical context, allowing us to evaluate how shapes, craftsmanship, and evolution of instruments can be related to the development of spaces of performances, theatres, and architectural structures in antiquity.

It is worth noting that small variations in the measurements of instruments could significantly affect pitch (AVANZINI *et al.* 2015; AVANZINI *et al.* 2016). For this reason, the manufacturing process should be evaluated from different points of view using 3D scanning data for future use in ancient sound simulations (SUN *et al.* 2020); the data could possibly be made available for public engagement (MICHELONI *et al.* 2016), and for scholars working in different disciplines, given that musical instruments research is undoubtedly an interdisciplinary field of survey which involves physics of instruments, material science, manufacturing methods and acoustics (DAMODARAN *et al.* 2021). In this regard, the re-creation of a plausible acoustic environment, for example, an ancient theatrical space contemporary to the instruments in which *auloi* were most likely played, could provide an insight into the acoustics of the space (TRONCHIN 2020), and the effect of the sounds of these instruments in a virtual environment (FARINA, TRONCHIN 2013): this challenge could enable us to consider wider aspects of the experience of soundscapes in antiquity (GEOFFROY-SCHWINDEN 2018).

### *Acknowledgements*

This is one of the published outputs of *Stesichoros*, a project funded by the European Commission’s Marie Skłodowska-Curie Actions Programme (Project ID: 792058). For the permissions to examine and publish the musical instruments of Poseidonia, Selinunte, and Locri in this contribution, we would like to thank: the former director, Marina Cipriani, and the team of the National Archaeological Museum of Posei-

donia-Paestum, especially Dr. Giovanni Avagliano, Gelsomina Aganci, and Raffaele Cantiello; Prof. Clemente Marconi; James R. McCredie, Professor in the History of Greek and Archaeology at the Institute of Fine Arts at New York University; the former director, Francesca Spadafora and the team of the Regional Archaeological Museum “Antonino Salinas” of Palermo, especially Dr. Alessandra Carrubba, Dr. Alessandra Merra, and Dr. Alessandra Ruvituso; and the former director of the National Archaeological Museum of Locri Epizefirii, Rossella Agostino. Special thanks go to the director of the Radiological Centre in Salerno, Professor Francesco Verrengia, and his team, especially Antonio Ferraiuolo and Remo Edmondo Rossi; to Prof. Roberto Lagalla and Prof. Massimo Midiri, respectively former director and director of the Department of Diagnostic Imaging and Interventional Neuroscience of the University of Palermo, and all staff members. We would like also to thank Samuele Barone, Pitano Perra and Marco Sciascia, as well as the 3D Lab in Reggio Emilia and 3D Italy in Ragusa.

ANGELA BELLIA

Institute of Heritage Science, National Research Council of Italy  
angela.bellia@ispc.cnr.it, angbellia@gmail.com

DANILO PAOLO PAVONE

Institute of Heritage Science, National Research Council of Italy  
danilopaolo.pavone@cnr.it

## REFERENCES

- ALBERTIN F., BETTUZZI M., BRANCACCIO R., MORIGI M.P., CASALI F. 2019, *X-ray computed tomography in situ: An opportunity for museums and restoration laboratories*, «Heritage», 2, 2028–2038 (<https://doi.org/10.3390/heritage2030122>).
- ANGLIKER E. 2016, *Musical instruments and the festivals of Apollo: A study of the auloi dedications in the sanctuary of Delos*, in BELLIA, BUNDRICK 2016, 25-37.
- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., PRETTO N., RODÀ A., ANGELINI I., BETTINESCHI C., DEOTTO G., FARESin E. et al. 2015, *Archaeology and virtual acoustics. A Pan flute from ancient Egypt*, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference in Sound and Music Computing (SMC 2015) (Maynooth 2015)*, 31-36 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851067>).
- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., MICHELONI E., PRETTO N., RODÀ A., GASPAROTTO S., SALEMI G. 2016, *Virtual reconstruction of an ancient Greek Pan flute*, in *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Sound and Music Computing Conference (SMC2016)*, 41-46 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851179>).
- BAKOIANNIS K., POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., KOUROUPETROGLOU G. 2020, *ENTROTUNER: A computational method adopting the musician's interaction with the instrument to estimate its tuning*, «IEEE Access», 8, 53185-53195 (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981007>).
- BÄR F.P., FUCHS T., KIRSCH S., WAGNER R., SCHOLZ G., KRETZER C., SCHIELEIN R., BRENNHÄUSER G., BÖHNEL M., REIMS M., EBERHORN M., KOPPERS T., RAQUET M., WOLTERS-ROSBACH M., FISCHIEDL K., WAGNER S., ZEPF M. 2018, *Three-dimensional computed tomography scanning of musical instruments*, in M.A. PÉREZ, E. MARCONI (eds.), *Wooden Musical Instruments Different Forms of Knowledge*, Paris, Musée de la Musique.
- BARKER A. 2002, *Euterpe. Ricerche sulla musica greca e romana*, Pisa, Edizioni ETS.



- BELLIA A. 2012, *Strumenti musicali e oggetti sonori nell'Italia meridionale e in Sicilia (VI-III sec. a.C.)*. Funzioni rituali e contesti, Lucca, Libreria musicale italiana.
- BELLIA A. 2016, *Tombe di 'musicisti' in Magna Grecia: il caso di Metaponto*, in A. BELLIA, A. DE SIENA, G. GRUPPIONI (eds.), *Solo tombe di musicisti a Metaponto? Studio dei resti ossei e degli strumenti musicali contenuti nei corredi funerari*, Pisa-Roma, Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, 45-98.
- BELLIA A. 2017, *Su uno strumento musicale ri-trovato nel Museo Archeologico Regionale "Antonino Salinas" di Palermo. Il frammento di aulos dal santuario della Malophoros*, «Sicilia Antiqua», 14, 17-22.
- BELLIA A. 2018, *Musical instruments as votive gifts: Towards an archaeology of musical performances*, in BELLIA, BUNDRICK 2016, 89-102.
- BELLIA A. 2019, *Towards a new approach in the study of ancient Greek music: Virtual reconstruction of an ancient musical instrument*, «Digital Scholarship in the Humanities», 34, 2, 233-243 (<https://doi.org/10.1093/llc/fqy043>).
- BELLIA A., BUNDRICK S.D. (eds.) 2019, *Musical Instruments as Votive Gifts in the Ancient World*, Pisa-Roma, Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali.
- BERLINZANI F. 2014, *Alcuni reperti in osso da Camarina. Riconsiderando A. Bélis*, «Aristonothos», 4, 203-230.
- DAMODARAN A., SUGAVANESWARAN M., LESSARD L. 2021, *An overview of additive manufacturing technologies for musical wind instruments*, «SN Applied Sciences», 3, 162 (<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04170-x>).
- DE GROSSI MAZZORIN J., EPIFANI I. 2012, *Le tecniche di lavorazione delle materie dure di origine animale e gli strumenti utilizzati*, in J. DE GROSSI MAZZORIN (ed.), *Artigiani dell'osso, avorio e palco. Ornamenti, utensili e giochi dalla preistoria al medioevo*, Lecce, UniSalento Press.
- FARINA A., TRONCHIN L. 2013, *3D sound characterisation in theatres employing microphone arrays*, «Acta Acustica», 99, 118-125.
- FUCHS T. WAGNER R., KRETZER C., SCHOLZ G., BÄR F., KIRSCH S., WOLTERS-ROSBACH M., FISCHIEDL K. 2019, *Musical instrument computed tomography examination standard: The final report featuring methods for optimization, results of measurements, recommendations, checklists and meta-data models*, in 9<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2019 (Padova 2019) (<https://www.ndt.net/search/docs.php?id=23696>).
- GEOFFROY-SCHWINDEN R.D. 2018, *Digital approaches to historical acoustemology*, in M.C. LINGOLD, D. MUELLER, W. TRETTIEN (eds.), *Digital Sound Studies*, Durham, Duke University Press, 231-249.
- HAGEL S. 2010-2011, *The aulos sýrinx*, in D. CASTALDO, F.G. GIANNACHI, A. MANIERI (eds.), *Poesia, musica e agoni nella Grecia antica*, vol. 2 (Rudiae. Ricerche sul mondo classico 22-23, 2010-2011), Congedo, Galatina, 491-518.
- MICHELONI E., PRETTO N., AVANZINI F., CANAZZA S., RODÀ A. 2016, *Installazioni interattive per la valorizzazione di strumenti musicali antichi: il flauto di Pan del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università degli Studi di Padova*, in A. TERZAROLI, A. VALLE (eds.), «*Extending Interactivity*». Atti del XXI CIM - Colloquio di Informatica Musicale (Cagliari 2016), Venice, IUAV University, 203-208 ([http://cim.lim.di.unimi.it/2016\\_CIM\\_XXI\\_Atti.pdf](http://cim.lim.di.unimi.it/2016_CIM_XXI_Atti.pdf)).
- POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., BAKOGIANNIS K., KOUROUPETROGLOU G.T., PSAROU-DAKĒS S., GEORGAKI A. 2021, *Physical modeling of the ancient Greek wind musical instrument aulos: A double-reed exciter linked to an acoustic resonator*, «IEEE Access», 9, 98150-98160 (10.1109/ACCESS.2021.3095720).
- PRETTO N., MICHELONI E., GASPAROTTO S., FANTOZZI C., DE POLI G., CANAZZA S. 2020, *Technology-enhanced interaction with cultural heritage: An ancient Pan flute from Egypt*, «Journal on Computing and Cultural Heritage», 13, 2, 267-280 (<https://doi.org/10.1145/3355395>).

- PSAROUDAKËS S. 2014, *The aulos of Poseidōnia*, in A. BELLIA (ed.), *Musica, culti e riti dei Greci d'Occidente*, Roma-Pisa, Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, 117-129.
- RAVANI A., THUN HOHENSTEIN U. 2010, *Oggetti d'uso quotidiano in materia dura animale proveniente dal sito di I-VI sec. d.C. di Chiusano, Ficarolo – Gaiba (Rovigo)*, in A. TAGLIACCOZZO, I. FIORE, S. MARCONI, U. TECCHIATI (eds.), *Atti del V Convegno Nazionale di Archeozoologia (Rovereto 2006)*, Rovereto, Osiride, 253-255.
- SAFA E., BARREAU J.-B., GAUGNE R., DUCHEMIN W., TALMA J.-D., ARNALDI B., DUMONT G., GOURANTON V. 2016, *Digital and handcrafting processes applied to sound-studies of archaeological bone flutes*, in M. IOANNIDES, E. FINK, A. MOROPOULOU, M. HAGEDORN-SAUPE, A. FRESA, G. LIESTØL, V. RAJCIC, P. GRUSSENMEYER (eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. 6<sup>th</sup> International Conference, EuroMed 2016 (Nicosia 2016)*, Berlin, Springer, 184-195 ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_15)).
- SUN Z., RODÀ A., WHITING E., FARESin E., SALEMI G. 2020, *3D virtual reconstruction and sound simulation of an ancient Roman brass musical instrument*, in M. RAUTERBERG (ed.), *Culture and Computing. HCII 2020, Lecture Notes in Computer Science*, 12215, Cham, Springer ([https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50267-6\\_21#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50267-6_21#citeas)).
- SWIFT E., BOSWORTH L., CREESE D., MORRIS G., PUDSEY A., RICHARDSON J., STONER J., WALKER F., WRIGHT G. 2021, *Creation of functional replica Roman and Late Antique musical instruments through 3D scanning and printing technology, and their use in research and museum education*, «Internet Archaeology», 56 (<https://doi.org/10.11141/ia.56.1>).
- TRONCHIN L. 2020 (ed.), *Special issue on musical instruments: Acoustics and vibration*, «Applied Sciences», 10, 9, 3294 (<https://doi.org/10.3390/app10093294>).
- WEST M.L. 1992, *Ancien Greek Music*, Oxford, Clarendon Press.
- ZORAN A. 2011, *The 3D printed flute: Digital fabrication and design of musical instruments*, «Journal of New Music Research», 40, 4, 379-387 (<https://doi.org/10.1080/09298215.2011.621541>).

## ABSTRACT

This paper aims to explore how digital imaging and computed tomography (CT) can provide us with significant results and valuable information otherwise unavailable in the study of ancient instruments. Whilst its methods provide great potential in terms of the diagnostics and preservation of ancient musical instruments, radiology has been underused in this field of application. As an improved method for the visualisation and analysis of the material density of instruments and of their surfaces and volumes, CT allows for a useful evaluation of the handcrafting process of instruments as well as the visualisation of invisible fracture lines and lesions in their structures, showing possible modifications, damages and repairs.



## ASSESSING UNKNOWN PARAMETERS OF INSTRUMENT FINDS BY WRITING SOFTWARE

### 1. INTRODUCTION

The computer world has evolved considerably since I began using the computer to explore ancient music. Nevertheless, the reader, should he/she not abandon this contribution right now, will find that the author has been sticking to old-fashioned approaches wherever possible. The following is therefore partly a defence against the expectations inevitably raised by a world of shinier software, which however, I will argue, fosters a tendency towards mustering astounding resources for very limited or indeed questionable goals. Under the pretext of sharing some of my general experiences it will briefly develop into a rant, which I justify beforehand with what is at stake, politically: the waste of considerable public resources, made possible by a deficient reviewing system. I do not claim that ill intention necessarily forms the core of what I feel might (and perhaps should) develop into a major crisis of public trust in our science. As with so much that goes wrong, initial basic misapprehensions may simply propagate themselves up to a point when it is too late to pull the breaks without considerable self-sacrifice.

As researchers we may be accustomed to observe such mechanisms in enthusiasts from outside academia, whose lack of connection with the bibliography and with methodologies that keep us alert to potential fallacies have led them to fantastic conclusions heralded in social as well as conventional media. All the more it may escape us how little we are ourselves protected from similar errors whenever we venture outside our expertise. The ensuing problems expose themselves with exceptional clarity in a field like music archaeology that is still novel and lacks a solid tradition handed down in university courses. Music archaeologists turning to computer people will normally not know what the available algorithms can do – and will habitually overestimate their potential.

Experts for sound-related software engaging with archaeologists, on the other hand, will habitually overestimate the input to expect both in terms of quality and comprehensiveness. This state of mistaken confidence unavoidably makes itself heard in grandiose grant applications, in a scientific environment that has learnt to counter the shockwaves of Thatcherism with the abolition of humility. Reviewers will not normally be equally at home at both sides of the conceptual abyss, consequently share the misapprehension of the other side's potential, and therefore overlook potentially disastrous implications of

those limits with which they are familiar. If a project is finally implemented, however, and if project communication works as it should, the truth may sooner or later dawn on its members<sup>1</sup>. In a worst-case scenario, this leads to the publication of what, for all practical aspects, would need to be termed fake results: valid products of computational modelling, while everybody involved is aware, on some level of bad consciousness, that these heavily depend on parameters way beyond any evidence and are perhaps produced by algorithms that do not really apply to the investigated material.

As I said, this is the worst case, and there are many grey shades of more or less compromised results and different portions of researcher souls sold to the promises of career and recognition. But how to avoid the allure? Of course, at least when we find ourselves in the role of a reviewer, keeping aware of the mechanisms outlined above may already help. When planning a project, on the other hand, I am afraid this will not suffice. Here a solid foundation can only be laid when a profound knowledge of the potentials and limits of all involved methodologies, archaeological, iconographical, philological, ethnological, you name it, is assembled within the single brain of at least one person. *Nota bene*, the potentials and limits, not all the technical details and procedures.

This may of course be achieved during intense exchange in the planning phase, where a potential PI from the music-archaeological side must not recoil from investigating what existing or planned software (which for him/her, as such, may remain a black box) needs to be fed and what it can produce with which degree of reliability as well as, crucially, how uncertainties in various parameters would affect the results. On the other hand, a PI who is primarily software expert would need to press his/her colleagues about the reliability and comprehensiveness of their data, familiarising himself/herself with all the uncertainties in the interpretation of the archaeological record, with iconographical and literary conventions and invention, knowns and unknowns about ancient aesthetics, or also pronunciation and vocal styles. He/she might also be well advised not to rely on a random colleague from a particular field just because this colleague happens to sit next door: comparatively few philologists, for instance, would be all too well informed about the sound of the ancient living voice.

Sadly, not a few projects might die at this stage, for instance when an archaeologist finds he/she needs to abandon the idea of reconstructing the soundscape of a building where we do not know if its walls might not have

<sup>1</sup> While I recommend the described model as an interpretational framework because it reduces the assumption of ill intent to a minimum, I must confess it may fail in some cases. One particularly infamous in music-archaeological circles was the 'virtual reconstruction' of a harp (wrongly termed 'epigoneion') by a project named ASTRA about a dozen years ago, which seems to have been flawed on many levels from the outset.

been covered in tapestries. There is an undeniable unfairness in this approach – the most honest and committed researchers stand the least chance ever to apply for funding – for which to compensate is once more the responsibility of reviewers.

From these preliminaries it may have become clear why I recommend the closest possible proximity between programmers and music archaeologists. In the following it remains to explain the advantages of the extreme case: personal unity. As everything, these come at a cost: making software work, and more, making it work in an intuitive way that integrates as seamlessly as possible within one's scientific workflow, can consume a lot of time. On the other hand, it can also be a lot of fun. Exploring uncharted territory, facing towering obstacles, iterated frustration with futile attempts, finally the joy of an elegant solution behind which the hideous shadows of subsequent challenges lurk, all this may make your working hours the rewarding experience in the quest for which others need to waste their free time gaming in front of just the same kind of screen.

## 2. THE EXAMPLE OF THE *AULOS*: WHAT TO MODEL

In order to describe the more scientific gains, we need to settle on a particular case study. Among my attempts at computational research on ancient instruments, my experience with doublepipes is by far the most extensive. Back in 1997, starting from Martin L. West's interpretations of the *aulos* measurements available to him (WEST 1992, 97-101), I undertook refining his rough calculations that were based solely on hole distances by employing precise formulas that take into account bore and hole diameters as well as wall thickness, and potentially the effects of cross fingering or 'open' versus 'closed' playing (playing styles in which all holes beneath the one principally sounding the actual note are left open or closed respectively). Even the nature of the formulas evidently requires the use of a computer; the need for some proper software emerged from the fact that one crucial parameter was always unknown, namely the extension of the vibrating air column at the upper end, next to the player's mouth. Sometimes only the reed itself was missing, often including the frail top part of the pipe into which it fitted, and in other cases the entire upper part of a pipe was lost. In any case, this would require numerical experimenting with a large number of possible lengths.

In this endeavour, I have been primarily interested in the reconstruction of instrumental pitches that would hopefully emerge meaningful in terms of ancient music-theoretical writings and in turn elucidate the practical background of these. This is very different from virtually reconstructing the actual sound of an instrument. This would have required very different technology,



incomparably more computing time and processor power without promising meaningful results.

In a reed-driven instrument, the quality of the sound depends to a large degree on the properties of the reed, and therefore on a factor which was almost entirely unknown when I started my research. Moreover, the sound of each *aulos* pipe is also influenced significantly by the coupling of the oscillatory regime of reed plus tube to the secondary resonator of the mouth cavity and, via this and the player's lips, to the other pipe, which drastically encumbers physical modelling. Meanwhile, with much experimental work, we have learned to produce reeds that match the ancient iconography; but this has only reduced the potential variability of the unknown parameters.

Even today, it therefore seems to make little sense to compound uncertainties in the input data with inaccuracies in physical modelling when more accurate results can easily be gained by actually sounding a replica or working model. Contrarily, a similar replica-based approach is not viable when it comes to assess the pitches of a reed instrument (though it may work quite well for flutes, see TERZĚS 2020). Firstly, since at least one important variable is always unknown, a series of practical experiments would need a large number of different reeds, which is unfeasible.

More importantly, reeds are flexible and lend themselves to bending the intonation that is 'built into' an instrument. This is an advantage whenever the instrument is poorly tuned or for some other reason cannot produce all required notes straightforwardly, for instance when a musically precise positioning of finger holes conflicts with the physiology of the human hand (HAGEL 2010, 71). When exploring a sound tool from another culture, however, it turns into an insuperable obstacle, because every modern experimenter who is sufficiently versed in playing reedpipes will unconsciously bend the notes emitted by each fingering in a way to fit his/her musical expectation. The computer, in turn, will render unbiased sets of pitches that rely solely on the physics of the pipe. Whenever we are dealing with an expertly made instrument – which is *a priori* to be assumed for all the expensive pipes with mechanisms, and has *a posteriori* emerged for others as well – the computer can thus be expected to help assessing the musical intentions of the original makers and consequently the musical expectations of performers and audience within the relevant cultural horizon.

### 3. DEVELOPING AN INTEGRATED RESEARCH ENVIRONMENT

While it might have been feasible to reuse some pre-existing software for predicting woodwind pitches, this would have put tight limits on my research. Almost all modern music software is conceptually tied to the idea of an equally tempered scale, often also to a concert pitch of A440, which entails

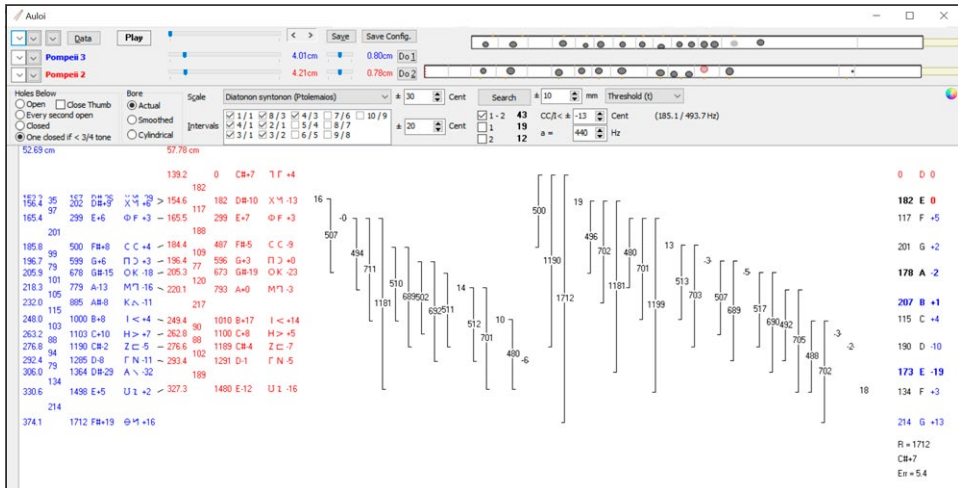


Fig. 1 – Software calculating pitches for a given instrument design with reeds of specific effective lengths. Example from Naples Archaeological Museum inv. 76892 and 76893, two pipes retrieved from Pompeii. Image Stefan Hagel.

not only considerable inconvenience but also a built-in methodological bias that is hard to eliminate. Every single output – bearing in mind the necessity of innumerable calculations while experimenting with missing parameters – would thus require to be transformed, in a secondary step, in order to display its relation with the musical structures of the ancient world, a world of a different, probably more flexible pitch standard, and of a whole flurry of fine tunings recorded by ancient authors, only two of which come reasonably close to a grid of equal semitones. Having my software purpose-made thus meant integrating meaningful output values from the start (Fig. 1).

In addition to opaque frequencies in Hertz and slightly more approachable intervallic steps in cents, as well as the deviations from roughly equivalent modern notes, it was thus possible to print each resulting pitch as its equivalent ancient note as well, of course again including the deviation from an abstract ancient semitone grid<sup>2</sup>, using the most recent assessment of the ancient pitch standard, which has long been agreed within a range of less than a tone (WEST 1992, 273-76; HAGEL 2009, 68-95). In addition, it becomes possible to match any calculated set of pitches with interval sequences described by ancient authors, either in terms of fractions of tones in the harmonicist tradition, most prominently represented by Aristoxenus, or in terms

<sup>2</sup> For mapping out ancient pitch space in this way, see Aristides Quintilianus 1.11, 24-27 Winnington-Ingram. Note that these pitches do not as such form practical scales.

**Aulos Fragments**

Name:

Date:

Provenance:

Length:  Ø Main Bore:

Outer Ø:  Ø Fingerholes:

Far End Preserved Length:   Ø:

Near End Preserved Length:   Ø:

Invertible

Hand:

Finger Holes													
Nr	<input type="text" value="1"/>	Pos.	<input type="text" value="7"/>	Diam. L	<input type="text" value="7"/>	Azim.	<input type="text"/>	Slv Shift	<input type="text"/>	Btn ±L	<input type="text" value="0"/>	Shp	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Thumb	Diam.	<input type="text" value="0"/>	Diam. T	<input type="text" value="7"/>	Wall+	<input type="text" value="0"/>	Slv Wall	<input type="text" value="0"/>	Btn ±A	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Nr	<input type="text" value="2"/>	Pos.	<input type="text" value="45.5"/>	Diam. L	<input type="text" value="7"/>	Azim.	<input type="text"/>	Slv Shift	<input type="text"/>	Btn ±L	<input type="text" value="0"/>	Shp	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Thumb	Diam.	<input type="text" value="0"/>	Diam. T	<input type="text" value="7"/>	Wall+	<input type="text" value="0"/>	Slv Wall	<input type="text" value="0"/>	Btn ±A	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Nr	<input type="text" value="3"/>	Pos.	<input type="text" value="-71"/>	Diam. L	<input type="text" value="-7"/>	Azim.	<input type="text" value="180"/>	Slv Shift	<input type="text"/>	Btn ±L	<input type="text" value="0"/>	Shp	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Thumb	Diam.	<input type="text" value="0"/>	Diam. T	<input type="text" value="-7"/>	Wall+	<input type="text" value="0"/>	Slv Wall	<input type="text" value="0"/>	Btn ±A	<input type="text" value="0"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

OpenSCAD Params:

Buttons: New Finger Hole, Paste Finger Holes, Paste Ellipses, Revert, Reload Instruments, New Section

3D Model View:

Fig. 2 – A data form describing the physical properties of an *aulos* section. Example from the Oxus temple find. Data Gunvor Lindström, Olga Sutkowska. Image Stefan Hagel.

of the ratios both transmitted and newly derived by Ptolemy – or also scales suggested in modern scholarship or found in the ethnological record. In this way, what would otherwise involve tedious procedures of data transfer and separate evaluation is achieved in the blink of an eye, all integrated within a tailored graphical interface.

Behind the scenes, of course, the relevant data need to be stored. Originally I designed a Microsoft Access relational database, to which my software connected via ODBC, with separate tables describing fragments, sections and tone holes on fragments, including the position of buttons operating a potential sleeve mechanism, joining capabilities between fragments, possible (or certain) arrangements of fragments to pipes, and finally, where feasible, of pipes to instruments (Fig. 2). Such a local database comes with the considerable advantage of permitting all kinds of work without Internet connection, which was prerequisite in the 90ies but can still be useful when working in Museum basements or while travelling. With this combination of relational database and graphical user interface it has since been possible to obtain consistent musical interpretations of numerous *aulos* finds, whose predicted pitches were always closely matched by the replicas (HAGEL 2004, 2008, 2010, 2012, 2014, 2020).

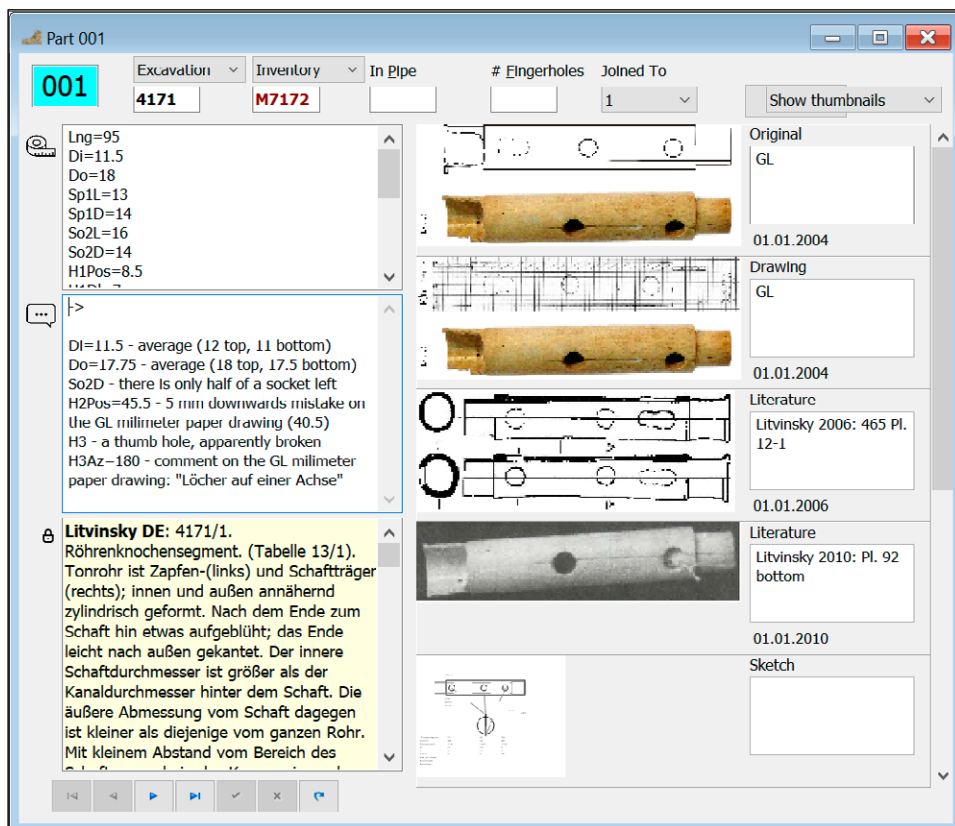


Fig. 3 – A data form collecting the evidence for an *aulos* section. Example from the Oxus temple find. Data Gunvor Lindström, Olga Sutkowska, Boris A. Litvinsky. Image Stefan Hagel.

In a more modern world, and with increasing interest in the field and the establishment of collaborative projects, I have devised a complementary online database, coming with a desktop front end that connects to a MySQL server (Fig. 3). Here we store and link to image data such as photographs and drawings as well as modern literature, include competing identification systems such as find and inventory numbers, but also information about the viability of physical joints and the placement of individual fragments within tentatively assembled instruments. Together with Olga Sutkowska we have also devised a comprehensive system of sigla for all kinds of relevant measurements, enabling collaborators to include whatever technical information is available. The data can then be transferred directly to the evaluation software, whenever required.

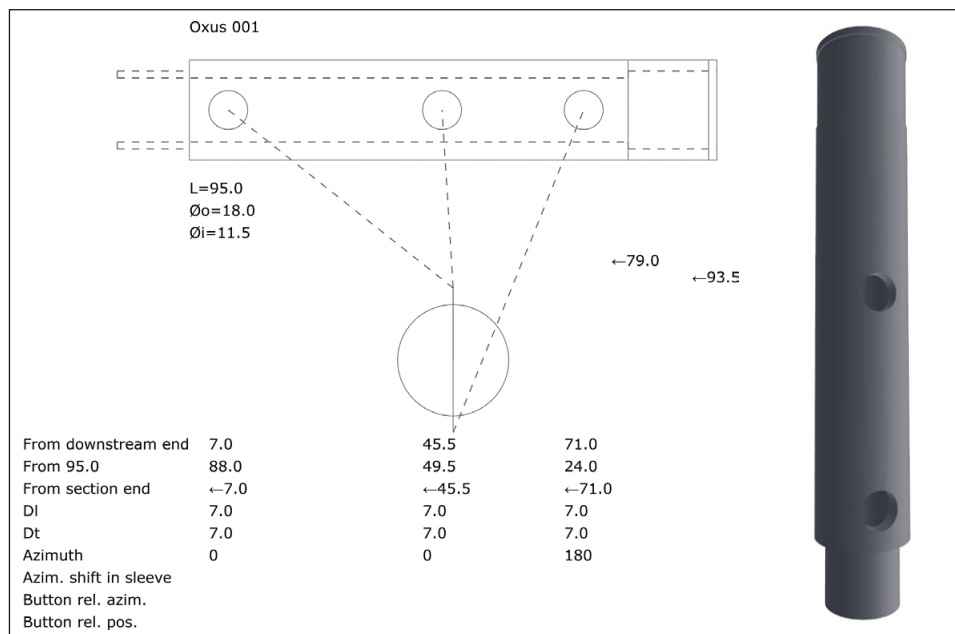


Fig. 4 – SVG sketch of an *aulos* section and printable *aulos* part. Example from the Oxus temple find. Data Gunvor Lindström, Olga Sutkowska. Image Stefan Hagel.

From the same data, it is furthermore possible to create schematic SVG sketches as well as printable 3D models in OpenSCAD descriptive language (for concision using functions from an *aulos*-specific module I have written) (Fig. 4). With proper printing technology, such as selective laser sintering (SLS), the latter may yield fully working models, even up to imitating the rotating-sleeve mechanism of Roman-period instruments.

These interfaces are crucial for the quality management in our projects (Fig. 5). Firstly, errors inevitably creep in during the process of taking measurements – often hundreds on a single day – and transferring these to the computer. With an automatically generated transparent sketch, with which photographs of the objects can easily be overlaid, errors down to a millimetre or even less are readily discerned and can consequently be corrected. The fully integrated approach, on the other hand, ensures that no further transmission errors are to be expected in the course of most of the workflow. The working models, for instance, will follow the specifications up to the precision of the used printing technique. In this way, they are reliable tools for testing the acoustic predictions of the software in practice, and may even serve as performers’ instruments.

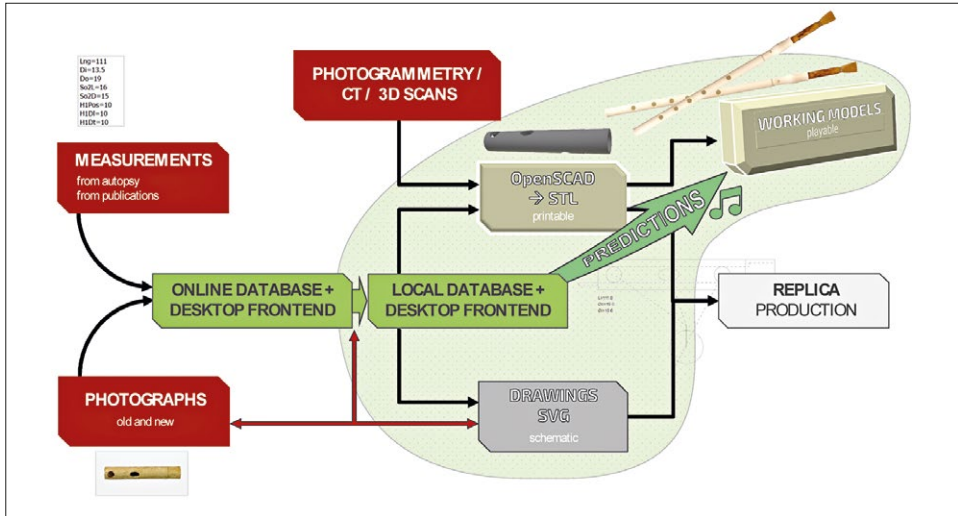


Fig. 5 – Workflow from artefact to interpretation and replication. Within the green area, copying errors should be excluded. Image Stefan Hagel.

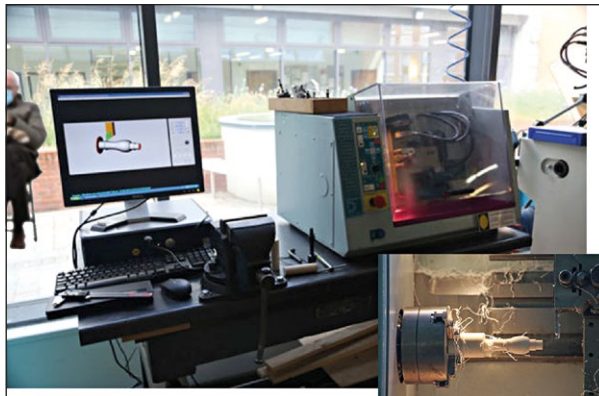


Fig. 6 – Manufacturing part of an *aulos* bulb+insert assemblage on the CNC lathe at Middlesex University, London. Image Neil Melton, Peter Holmes.

Equally importantly, sketches and printed models are of invaluable help in the process of manufacturing actual replicas by traditional means. Not only are copying errors once more excluded; even more importantly, many communicational hurdles regarding the conceptualisation of relative positions and, above all, azimuths are easily avoided by providing a three-dimensional



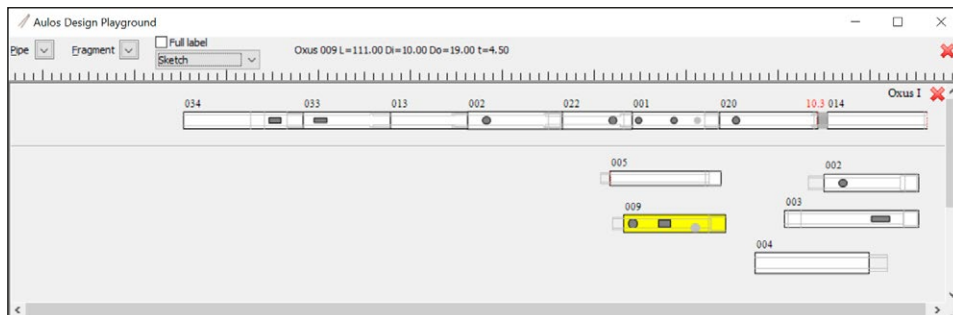


Fig. 7 – Module for experimental assemblage of *aulos* parts. Random example from the Oxus temple find. Data Gunvor Lindström, Olga Sutkowska. Image Stefan Hagel.

model of the final product. If parts of the production process involve computer numerical control (CNC), the respective input may also be derived from available formats (Fig. 6).

For the scholar, a useful by-product is the export of any data regarding either physical dimensions or the relation of predicted pitches in numerical and graphical formats, facilitating the production of diagrams and illustrations for publication. Since their dimensions thus reflect the numerical data precisely, they can easily be juxtaposed with data from other sources.

More recently, when we started to work on the highly fragmented instrument finds from Queen Amanishakheto's pyramid tomb at Meroë (BODLEY 1946; GÄNSICKE, HAGEL 2017; HAGEL 2019), on the one hand, and from the Oxus temple in present-day Tajikistan (LITVINSKY 1999, 2010, 424-53), on the other, it became evident that the search for physically possible as well as musically meaningful configurations of fragments required manipulating such configurations on the computer quickly and efficiently, while maintaining a live view on the ensuing pitch predictions. At this stage, a reliance on pre-existing software would once more have been detrimental. Instead, it was not all too difficult to augment our software with a new module, where the fragments can be assembled graphically using the mouse, dropping them into experimental instrument designs, or flipping them around by double-clicking (Fig. 7).

#### 4. ROBUST OPTIMISATION OF UNKNOWN REED LENGTHS

As much as an extensive use of the possibilities that modern computing offers may advance music-archaeological research, its value can never be greater than that of the methodologies which are written into the software. However, as has been argued in the outset, the combination of the very different worlds of an ultimately humanities-rooted subject, on the one

hand, and computer sciences, on the other, both coming with mutually intimidating languages, lends itself much more readily to the temptation of obfuscating than is possible when staying within a single well-ploughed field of expertise. It will be useful to analyse a specific *aulos*-related example, which bears on the question of what computer-assisted ‘optimisation’ may meaningfully represent.

In the foregoing I have described the universal problem of establishing the ‘correct’ effective reed length, often including a missing upper pipe end. If the intended scale of an instrument were known beforehand, this problem might be rephrased to finding the total length which produces the smallest deviation from that scale. However one might define ‘smallest deviation’ for that purpose, with an ancient instrument we will hardly ever find us in the lucky position of knowing the makers’ musical objectives in advance. For that reason, a more general approach is needed. Since ancient harmonic analysis had been centred on pitch structures bounded by pure fourths, fifths and octaves, intervals that are found to be of primary importance also in ancient Near Eastern musical sources, it appears reasonable to maximise the number of such intervals, in addition to unisons.

Of course, no material interval is ever ‘pure’ in the mathematical sense of the word, with its implication of infinite precision. The optimal configuration might therefore be defined as containing the greatest number of near-pure intervals, with a smallest total deviation. However, finding a meaningful formulaic expression for that idea is less straightforward: how would the number of intervals and the respective deviations be weighted against each other? I have found it practical to first introduce a threshold value for the inclusion of intervals, then establishing the largest possible number of these, and only in a final step use the deviations to find the precise optimal configuration for the pre-established maximal number of intervals. This has the advantage of yielding intuitive results, which can also be displayed graphically in the form of the ‘admitted’ intervals (Fig. 1). A more refined algorithm would weight each applicable interval (most practically, for instance, each interval that lies within a quartertone of the ideal) according to its deviation from the ideal, counting it fully only when it is precise. Modelling human perception requires that intervals that are only a few cents off are still assigned relatively high values, which then need to drop rather quickly to near-zero for greater deviations. The corresponding bell shaped curve is conveniently modelled as a Gaussian function of the deviation  $d$  (expressed in logarithmic units such as cents) with a maximum of 1 and a standard deviation  $\sigma$  (expressed in the same units) that reflects the tolerance level:

$$f(d) = e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}$$

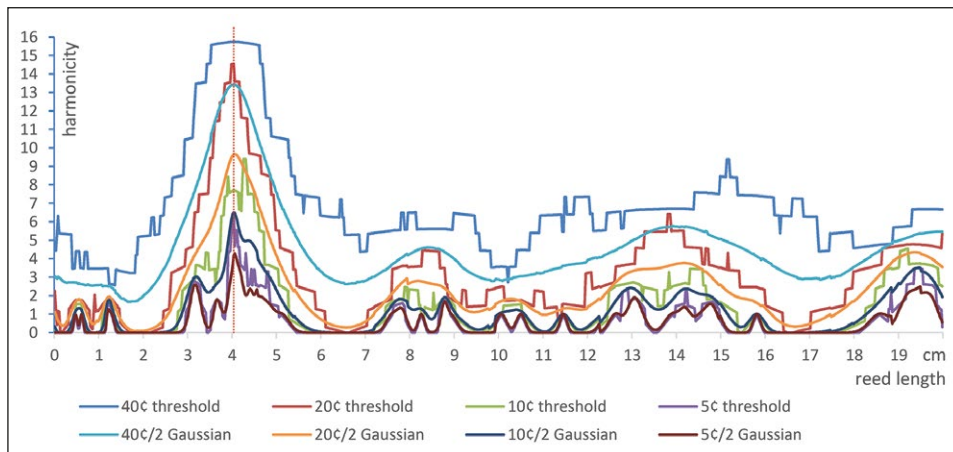


Fig. 8 – Robustness of reed length optimisation: Louvre E10962, high pipe. Red dotted line: predicted optimal reed length.

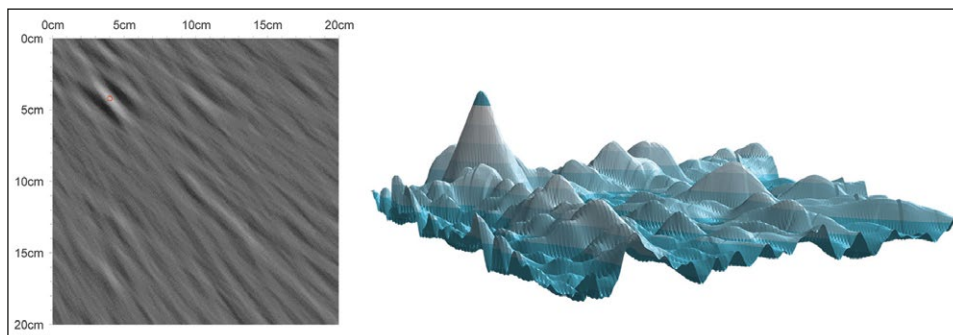


Fig. 9 – ‘Harmonicity map’ for various effective reed lengths configurations as colour map (threshold, 20¢) and surface plot (Gaussian,  $\sigma=20¢/2$ ). Lighter areas (left) and higher elevations (right) indicate a larger number and higher quality of near-pure unisons, octaves, fifths and fourths. The optimum occurs at (4.01 cm; 4.21 cm); cfr. Fig. 1. Example from Naples Archaeological Museum inv. 76892 and 76893, two pipes retrieved from Pompeii. Image Stefan Hagel.

Fig. 8 shows the robustness of both approaches over a wide range of tolerance levels, using the example of intervals within a single pipe. The ragged lines reflect the threshold approach; the smooth contours, Gaussian weighting. The thresholds are varied over a factor of eight, ranging from 5 to 40 cents for the simple algorithm, and the respective half values for the standard deviation in the weighted approach (in this way, the inflection points of the bell curves coincide with the respective thresholds). Nevertheless, in spite of the

fundamental differences in the algorithms as well as the extreme variation in the tolerance parameters, the predicted optimal reed length remains identical within less than a millimetre.

For a most intuitively useful threshold value, I have in practice settled on 20 cents, the tenth part of a tone, which easily accounts for small measuring errors as well. It falls just short of the so-called syntonic comma, an interval that Ptolemy described as negligible for certain practical purposes (*Harm.* 1.16, p.39.19-22; 40.1-6; HAGEL 2009, 184-85).

On the basis of either of the described algorithms, the computer can readily establish optimal extensions for either a single pipe or a pair simply by comparing the results for various values that are separated by small steps (e.g., 0.1 mm), throughout the conceivable overall range. For a pair, the results are conveniently visualised as a coloured Cartesian plane, where different shades indicate different numbers of near-pure intervals, or also as a 3D surface, where the optimum stands out as the tallest peak (Fig. 9). Where the upper ends of both instruments survive, meaningful results are expected to include similar lengths for both reeds and therefore an optimum close to the diagonal  $x=y$  in the diagram.

Optimisation in this sense thus establishes a maximum by varying one specific parameter on which all members of the result set (the predicted pitches) depend.

## 5. MISAPPLYING THE CONCEPTS

It might go without saying that the success of the method relies on varying the right parameter across a meaningful spectrum. A reed of 30 cm length would make no sense – but the computer would not know that. Neither would it make sense to tamper with the evidence, for instance, by varying the positions of fingerholes (unless, perhaps, in order to produce an educated guess when a hole position is unknown due to damage). Producing a higher number of nice intervals is therefore not necessarily a token of better methodology; it may be quite the contrary.

An obvious example would be increasing the threshold value for admitting intervals. This would spawn new ‘near-pure’ intervals quite liberally, none of which would carry any real meaning. For instance, if the threshold is set to a semitone, i.e. five times the value I have generally been using, then a pair of notes spanning the obviously dissonant interval of a tritone would pass as a pure fourth. Even more absurdly, it might at the same time count as a pure fifth as well. When spelt out in a clear-cut way, the preposterousness of such an approach stands out so evidently that the reader may wonder why I would waste their precious time discussing the theoretical possibility of such outlandish fabrications. But what if these, instead of laying bare their

misrepresentation of reality and common sense, came clad in smug technical language? Such as, «by increasing Hagel's unrealistically small admittance threshold, which in reality even falls short of the ranges associated with experimentally ascertained embouchure variation in double-reed instruments, our enhanced approach to virtually modelling the harmonicity of *aulos* finds was able to discover no less than 11 hitherto undetected potential pure intervals, taking our understanding of ancient music to a new level».

How many readers and even reviewers would not swallow this without raising an eyebrow? Note that all the facts are correct: embouchure variation can indeed change the pitch of a fingerhole significantly (though much less so for bass notes), and this consideration might well be technically implemented as an increased threshold, which would correctly increase the resulting numbers. Even so, a sum of truisms does not necessarily make a conclusive argument. In fact, the fictitious «enhanced approach» above basically abandons researching the properties of the actual instrument under scrutiny. Instead, it models the options of playing that instrument *against* its built-in musical properties. Undeniably, it is indeed possible to elicit the «undetected pure intervals» by adjusting the reeds in various different ways. Ultimately, it may well be possible even to play, from the same pair of fingerholes between the two pipes, once a fourth and once a fifth. However, this is trivial. The same could be argued for reed instruments of the modern Western orchestra. Nonetheless, we know that these modern instruments are carefully manufactured to play particular pitches, and there is good reason to assume that the same was true for many ancient instruments.

Unfortunately, the preceding is no mere fiction. The same logical error forms the basis of a recent publication (BAKOGIANNIS *et al.* 2020), in which the authors sent the computer through five million iterations each of various algorithms only to establish what anybody equipped with a sketch of the Louvre *aulos* scale (Louvre inv. E10962; BÉLIS 1984; HAGEL 2004, 2014) can work out: if all the notes would come close enough to a 'Pythagorean' tuning, one would count precisely 56 pure intervals. That is just the way a diatonic scale works; all one needs to know is that one pipe ranges from *A* to *a*, and the other from *A* to *d'* but lacks *B*.

The cited study also presents methodological issues in other respects. Its software (ENTROTUNER) relies on two types of input, fundamental frequencies and instrumental sound spectra. Instead of physically modelling the former, the authors use published values (53190), apparently without noticing that these do not represent the required fundamental frequencies but already take the predicted inharmonicity of higher partials into account (HAGEL 2004, 380).

A sound spectrum, on the other hand, can only be obtained from a replica, with all the uncertainties associated with the reed and not least the

playing technique. The authors multiply the problem by recording not a replica of the narrow wooden instrument with a small reed under scrutiny (which would have been available to them through their cooperation with renowned music archaeologist Chrēstos Terzēs), but a bone instrument with a wide bore and huge reed blades that produces a fairly different sound, and do not even compare the resulting data with the available published spectrum of a Louvre replica (HAGEL 2004, 387 Diagram 1). Finally, the bone instrument is also used in a final experiment that shows how a musician can reproduce ‘optimised’ pitches on a replica.

I have deemed it necessary to dwell on a particularly flawed example because all this has huge bearings on our understanding of ancient music. BAKOGIANNIS *et al.* claim to have achieved «the re-determination of the musical scales and a more in-depth understanding of the musicological aspects of an era» (53194). Actually, they have but enforced their preconceptions of how a scale must work upon an ancient artefact. All ancient authors, in contrast, agree that the true scales of antiquity by no means followed the principle of maximal ‘harmonicity’ at all costs. Not some but all of the contemporary lyre tunings so meticulously reported by none less than Claudius Ptolemy (*Harm.* 2.15-16) stand in stark opposition to the ‘Pythagorean’ scale implied by BAKOGIANNIS *et al.*

Those ancient scales feature different kinds of (mostly smaller) semi-tones, which disrupt tuning sequences that rely exclusively on pure fourths and fifths. If an ancient *aulos* were built to play in tune with a cithara of Ptolemy’s cultural environment, it would likely reflect such different fine tunings. There might be a reasonable chance to detect these using the method I have employed in previous studies, even though it relies on a *general* importance of pure fifths and fourths (see e.g. HAGEL 2009, 353 on potential links between such a ‘deviant’ note and the musical documents of the period). Contrarily, a procedure that instates harmonicity where the instrument design does not bear it out would *a priori* override the intentions of ancient makers and musicians.

To be sure, it is perfectly possible that some non-pure intervals in the calculations depend on shortcomings in the formulae (less likely), measurements errors (more likely), or original design flaws rather than genuine musical intention. Also, ancient performers would certainly have tried to compensate for such shortcomings. It is absolutely reasonable to point out that this might have been the case, and to which extent each pitch would need to be bent. Only, one needs to keep in mind that such speculations cannot possibly bring us any closer to deciphering the intentions of ancient musicians than does the study of the physical properties of the artefacts in combination with literary testimonies and the evidence from the remains of ancient tunes.



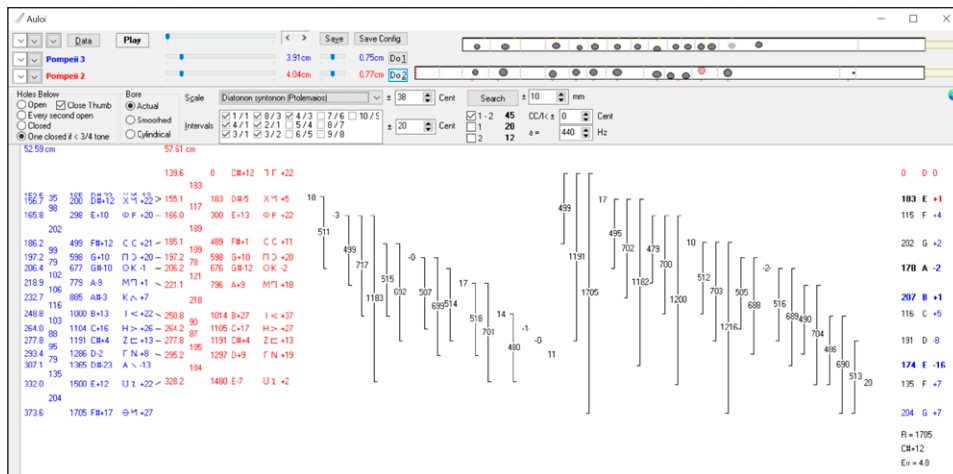


Fig. 10 – The data from Fig. 1 optimised for closed thumb holes. Image Stefan Hagel.

## 6. A SMALL STEP FORWARD

All this is by no means to say that the method I have followed cannot be improved upon. On the contrary, I would like to conclude by addressing an inaccuracy I had previously been sluggish enough to accept, but which I take this opportunity to eliminate. Above, we have come across the difference between ‘open’ and ‘closed’ playing: when the finger holes below the ‘sounded’ hole are closed, the note becomes just a tiny little bit lower (the effect is much more pronounced on most modern instruments, whose fingerholes are smaller in respect to the bore). Generally I have found that the open variant produces better results and therefore published these (with required modifications on instruments with a more chromatic design, where part of the holes was mechanically closed in any performance setup).

However, this misrepresents the physiology in the case of the thumbhole. When ‘sounding’ its note, the thumbhole is of course opened, by rolling the thumb on its tip, which then supports the instrument. However, whenever the index finger hole above it is released, it would be entirely unpractical to keep the thumb hole open as well; instead, the thumb naturally ensures a securer grip on the pipe by rolling back over its hole (where the makers sometimes carved an extra recess for it to rest in). As a consequence, an open-holes-below approach must be expected to misrepresent the pitch of the index finger hole, for which we need to reckon with at least one closed hole below. Apart from the index hole, no other hole is of course affected (unless in the case of *auloi* with more than one thumbhole, none of which are yet published).

After adjusting the software accordingly, the computer-optimised configuration changes from that shown in Fig. 1 to that of Fig. 10. The differences are minute, but it may be significant that they point in the direction of better tuning. In terms of near-pure intervals up to 20 cents deviation, we now obtain 45+20+12 instead of 43+19+12. Most strikingly, the top interval on the higher pipe has shrunk from 217 cents to 204 cents, precisely the whole tone ancient theory requires here (in the Lydian *tónos*, which is the central key of the ancient system and one of the keys the instrument could play, this interval marks the distance between *nētē synēmménōn* and *nētē diezeugménōn*, respectively a fourth and a fifth above *mésē*). One might also note that the difference in effective reed lengths has shrunk from 2 mm to 1.3 mm; but this is hardly of practical relevance.

What about the other published many-holed instruments? On the Louvre *aulos*, the adjustment for closed thumbholes produces one additional near-pure interval between the pipes, though this comes at the comparatively lower cost of losing one within the higher pipe; here, as well, the top interval shrinks from predicted 213 to 206 cents, almost precisely a whole tone. The Berlin *aulos* also gains one near-pure interval, from 18+9+3 (with reeds of 24.0 mm and 36 mm, which already contains an improvement over the originally published 16+7+4) to 19+8+4 (reeds: 24.5 mm; 35.5 mm).

Such a general tendency towards ‘better’ harmonicity when correcting measurements (HAGEL 2012, 105 and 110, fig. 1) or refining the modelling of instrument physics and practicalities of playing raises confidence in the scientific method and indeed substantiates the validity of the approach. The prerequisite for this is that none of the adjustments are made precisely in order to fit the hypothesis. It is a pity that modern technology has not only given us unprecedented tools to advance all fields of enquiry in revolutionary ways, but makes it increasingly difficult to tell their proper and fruitful application from biased and redundant misuse. A relatively young and notoriously interdisciplinary field like music-archaeology is perhaps especially vulnerable in this respect – but the promise of recovering even a distant ringing of humanity’s musical past is certainly worth the effort of keeping an alert eye on the technological demons that so easily subvert the intentions of their masters.

### Acknowledgements

I extend my sincere gratitude to Peter Holmes, Neil Melton and further colleagues at Middlesex University for taking the implementation of the *aulos* part of the EMAP project (financed under the Culture Programme of the European Commission, Grant Agreement No. 2013-1570/001-001) far beyond what had originally been envisaged, including the creation of a printable version of the Louvre *aulos*, which has played an essential role in launching the present *aulos* revival movement.

Part of my work on this publication has formed part of the project Ancient Music Beyond Hellenisation that has received funding from the European Research Council

(ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (Grant Agreement No. 787522). The views presented here, however, reflect only those of the author; the ERCEA is not responsible for any use that may be made of the information contained.

STEFAN HAGEL

Austrian Archaeological Institute  
Austrian Academy of Sciences  
stefan.hagel@oeaw.ac.at

## REFERENCES

- Aristidis Quintiliani De musica libri tres*, edidit R.P. Winnington-Ingram, Leipzig 1963, Teubner.
- BAKOGIANNIS K., POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., KOUROUPETROGLOU G. 2020, *ENTROTUNER: A computational method adopting the musician's interaction with the instrument to estimate its tuning*, «IEEE Access», 8, 53185-53195 (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981007>).
- BÉLIS A. 1984, *Auloi grecs du Louvre*, «Bulletin de Correspondance Hellénique», 108, 111-122.
- BODLEY N.B. 1946, *The auloi of Meroë: A study of the Greek-Egyptian auloi found at Meroë*, *Egypt*, «American Journal of Archaeology», 50, 217-240.
- GÄNSICKE S., HAGEL S. 2017, *The auloi from Meroë: Preliminary notes on the conservation, technical examination, and interpretation of a cache of ancient musical instruments*, in J.M. DAEHNER, K. LAPATIN, A. SPINELLI (eds.), *Artistry in Bronze: The Greeks and Their Legacy. XIX<sup>th</sup> International Congress on Ancient Bronzes*, Los Angeles, Getty Publications, 381-388.
- HAGEL S. 2004, *Calculating auloi: The Louvre aulos scale*, in E. HICKMANN, R. EICHMANN (eds.), *Studien zur Musikarchäologie IV*, *Orient Archäologie*, 4, 15, 373-390.
- HAGEL S. 2008, *Re-evaluating the Pompeii auloi*, «The Journal of Hellenic Studies», 128, 52-71.
- HAGEL S. 2009, *Ancient Greek Music: A New Technical History*, Cambridge, Cambridge University Press.
- HAGEL S. 2010, *Understanding the Aulos Berlin Egyptian Museum 12461/12462*, in *Studien zur Musikarchäologie VII*, *Orient Archäologie*, 7, 25, 67-87.
- HAGEL S. 2012, *The Pompeii auloi: Improved data and a hitherto unknown mechanism*, in *Studien zur Musikarchäologie VIII*, *Orient Archäologie*, 8, 27, 103-114.
- HAGEL S. 2014, *Better understanding the Louvre aulos*, in *Studien zur Musikarchäologie IX*, *Orient Archäologie*, 9, 33, 131-142.
- HAGEL S. 2019, *Reconstructing the auloi from Queen Amanishakheto's Pyramid*, in *Studien zur Musikarchäologie XI*, *Orient Archäologie*, 11, 40, 177-197.
- HAGEL S. 2020, *Understanding early auloi: Instruments from Paestum, Pydna and elsewhere*, in G. ZUCHTRIEGEL, A. MERIANI (eds.), *La tomba del Tuffatore: rito, arte e poesia a Paestum e nel Mediterraneo d'epoca tardo-arcaica*, Pisa, ETS, 421-459.
- LITVINSKY V.A. 1999, греческие флейты (авлосы) в глубинной Азии (*Greek flutes (auloi) in Central Asia*), in J. DUCHESNE-GUILLEMIN (ed.), *Monumentum Marcelle Duchesne-Guillemain*, «Acta Iranica», 3, 19, 517-543.
- LITVINSKY V.A. 2010, Храм Окса в Бактрии, 3: Искусство, Художественное ремесло, Музыкальные инструменты (*The Temple of Oxus in Bactria. 3: Art, Fine art, Musical Instruments*), Moscow, Vostochnaya Literatura.
- TERZĚS C. 2020, *Musical instruments of Greek and Roman antiquity*, in *A Companion to Ancient Greek and Roman Music*, John Wiley & Sons, Ltd, 213-227.
- WEST M.L. 1992, *Ancient Greek Music*, Oxford, Oxford University Press.

ABSTRACT

Music-archaeology can show exemplarily the potential as well as the dangers of digital approaches. Both are here illustrated using case studies from the field of virtual modelling the intended scales of ancient reed instruments, with a focus on the requirement of the closest possible collaboration between music-archaeologists and programmers from the planning stages of a project and throughout its development. On the one hand, the potential robustness of predictive algorithms is shown, on the other, methodological fallacies are exposed that have led to redundant results and consequently misguided interpretations, which however, due to the ubiquitous partition of expertise, have slipped through reviewing processes. Finally, the author amends a problematic detail in the approach underlying previous publications of his own, showing how reflecting the physiology of *aulos* playing more accurately may enhance the harmonicity of modelled pitch sets, which in turn lends further credibility to the general method.



## AUGMENTATION AND ENRICHMENT OF CULTURAL EXHIBITS VIA DIGITAL INTERACTIVE SOUND RECONSTRUCTION OF ANCIENT GREEK MUSICAL INSTRUMENTS

### 1. INTRODUCTION

A significant number of Ancient Musical Instruments (AMIs) findings, which date from the 5<sup>th</sup> c. BCE to the 1<sup>st</sup> c. BCE, are kept in various archaeological museums in Greece and all over the world. Some of them are in good condition. Some of the most important AMIs are exhibited at the Archaeological Museum of Piraeus (PSAROUDAKĒS 2013a): from the classical era a flute (PSAROUDAKĒS 2013b), a chelys (a type of lyre), and a *trigonon* (a type of harp) (TERZĒS 2013), and at the Archaeological Museums of Megara (TERZĒS 2020): from the Hellenistic period two pairs of *aulos* with metal sliding keys. Some of the excavated AMIs have been studied by expert archaeomusicologists who emphasized their functional restoration and reconstruction (BELLIA 2015; SAFA *et al.* 2016). Indirect but valuable information about the musical instruments of Greek antiquity can be found in ancient Greek literature (the surviving texts of ancient Greek authors) and the musical iconography (representations of musical instruments on vases, painted or embossed works). The research results on ancient Greek music have increased exponentially in the last twenty years (PÖHLMANN, WEST 2001; HAGEL 2009a), and that is mainly due to the development of archaeomusicology and the recently excavated AMIs (PSAROUDAKĒS 2000, 2002, 2008, 2010, 2013a; HAGEL 2004, 2008; TERZĒS 2013, 2020).

According to recent studies (KURKE 2000; MURRAY, WILSON 2004), organized sound (music and song) was the main factor that formed the ancient Greek intellectual and artistic product (epic, choral/lyric poetry, drama, comedy). However, even nowadays, there are not enough studies regarding the sonification of the AMIs to cover the majority of the excavated instruments, and therefore, the museum visitor cannot hear the actual sound of an exhibited instrument. On the other hand, their visual representation is widespread (a large volume of digitized illustrations is available). Despite the fact that recent technology is put in practice and remarkable progress has been done (i.e., digitization of the cultural apparatus, development of on line museum tours and digital guides based on mobile devices, such as tablets or smartphones), the reconstruction of the AMIs sound is still not available, except Avanzini's individual project (AVANZINI *et al.* 2015).

The reconstruction of AMIs via physical apparatus (replicas), through interdisciplinary study and research (musicology and archaeology), provides



satisfactory results. Nevertheless, as it is usually approached by trial and error techniques, it requires disproportional effort, which increases the construction cost (HAGEL 2009b; PSAROUDAKĒS 2013a; KOUMARTZIS *et al.* 2015). A similar problem is present in the construction of traditional instruments, especially in the process of standardization and optimization. The introduction of playable reconstructed musical instruments in the museums (as is the case with any object that contains elements of ancient technology) is not considered appropriate, and it is not adopted because: a) of aesthetic arrangement issues of the exhibition space, b) of noise disturbance issues when used by a visitor, c) the generated sound is not representative especially in the case of AMIs made of animal bones (SAFA *et al.* 2016), and d) of provided grounds for anachronistic interpretations that may hurt the exhibited instrument. We here propose an enriched museum experience where the visitor sees the original AMI and at the same time interacts with its digital simulation through a tablet, a digital kiosk, or a mobile device (either by altering some of its features or by playing notes) and hears the generated sound (on headphones) in real-time. Moreover, this application will help the scientists (i.e., archaeomusicologists) to study the AMIs as it provides flexibility in modifying the instruments' parameters (e.g., geometrical features) and swiftly obtaining the relevant sound. This is a powerful tool that will speed up the musicological study of the AMIs, by enabling a fast and accurate scale estimation. Furthermore: a) our method can be combined with recent methods that take into account the musician's interaction with the instrument to optimally tune the set of generated fundamentals (BAKOIANNIS *et al.* 2020), b) our method's output signals can then be filtered with a digital filter which simulates the acoustics of various ancient theatres to obtain their sound in their natural auditory space (VASSILANTONOPOULOS, MOURJOPOULOS 2003; POLYCHRONOPOULOS *et al.* 2013), and c) the instrument's introduced geometry can be treated as an acoustic metamaterial (POLYCHRONOPOULOS, MEMOLI 2020) enabling the 3D printing of a functional (in some instrument classes) musical instrument (NORELAND *et al.* 2013).

In the last two decades, the synthesis of the sound of musical instruments using the method of physical modeling (ECKEL 1995) has received increasing attention in the field of music technology. This method is based on the description of the production and propagation mechanisms of sound using mathematical models that describe the acoustics of sound production. It embodies the Newtonian ideal of an exact mathematical model of a mechanical-acoustic process (ROADS, STRAWN 1996). Unlike the rest of the simulation methods, it does not require instrument recordings in order to build a model, which is a rather significant advantage in some cases (i.e., in the case of an excavated ancient musical instrument where it is fragile or/and not in one piece).

For the creation of the virtual musical instruments and their use during the performance, the physical modeling method is going to be used as it provides not only more realistic but also more expressive synthetic sound (VÄLIMÄKI, TAKALA 1996; ARAMAKI *et al.* 2001; RABENSTEIN, TRAUTMANN 2001). The usual methods of sound synthesis (FM, additive, subtractive, AM, PD, Granular: MIRANDA 2002) try to reproduce the spectral content of the acoustic signal produced by a musical instrument, but their parameters are not related to the instrument's physical parameters. Moreover, all the other methods, for example, the widely used and computationally cheap method of sampling (reproduction of recorded samples from the physical instrument), require the existence of the instrument. This is a major constrain when the instruments in question are excavated, thus, fragile and usually not in one piece. On the contrary, the physical modeling method does not produce the sound directly but produces and controls the process that creates the sound (SERAFIN, SMITH 2000). The main approaches of this methodology include the digital waveguide (VÄLIMÄKI, SAVIOJA 2000), the transfer function model (BORIN, DE POLI, SARTI 1992), the modal synthesis (BISNOVATYI 2000), and the finite differences using resonant filters (BILBAO 2009). Furthermore, approaches for the physical modeling of double-reed musical instruments have been presented in the literature (ERKUT, KARJALAINEN 2002; BILBAO, SMITH 2003; KARJALAINEN, ERKUT 2004; BENZA *et al.* 2005).

The Virtual Musical Instrument (VMI) is a credible (as much as possible) digital representation of the corresponding real one and consists of two distinct parts (TZEVELEKOS, GEORGAKI, KOUROUPETROGLOU 2008). The first is responsible for the audio reconstitution of the produced sound in real-time, and we call it Acoustic Virtual Musical Instrument (AVMI) and the second one is the Visual Representation, which is usually a realistic three-dimensional representation. The most promising simulation method of AMIs is based on physical modeling algorithms that solve the system of equations that corresponds to the acoustics of the real musical instrument (VÄLIMÄKI V, TAKALA 1996). A digitally simulated AMI has to produce a sound as similar as possible to the sound that the corresponding musical instrument makes and, moreover, to enable the ability to interact with it through an external physical apparatus. Nevertheless, there are no strict directions and autonomous frameworks for the development of AVMIs. Most of the relevant applications are limited (closed and non-scalable systems) and do not combine their visual representation as the user interacts with them (i.e., playing music). They are not easy to use and not suitable for non-specialists (e.g., museologists, archaeologists) as they cannot modify them or develop their own digital AMI based on specific requirements (e.g., to accurately reproduce the sound of a specific exhibited AMI). In this work we show the simulation method of the AMIs and propose a flexible and scalable digital tool through which: i) the museum's scientific

staff will be able to create an AVMI that will accurately reproduce the sound of a specific AMI and ii) the experience of each *in situ* or online visitor of the museums will be enriched and enhanced with the digitally generated sound (by every single digital AMI) along with its three-dimensional representation, but will also enable the real-time interaction to produce music.

## 2. METHODS

In this section, we discuss the simulation of wind AMIs (classes: *Aulos*, *Plagiaulos*, *Syrinx*, and *Salpinx*) and the simulation of string AMIs (classes: *Phorminx*, *Chelys*, *Barbitos*, *Kithara*, and *Trigonon*).

Digital waveguides were used to simulate the wind AMIs. Due to the complex shape of their body and material properties, the string AMIs are simulated using a hybrid method. We used Digital Signal Processing (DSP) and, more precisely, digital waveguides to simulate the vibrating string (ASKENFELT, JANSSON 1993; FLETCHER, ROSSING 1998; GIORDANO, GOULD, TOBOCHNIK 1998; ROSSING 2010; PEROV, JOHNSON, PEROVA-MELLO 2016) and Finite Element Method (FEM) to simulate the vibrating body of the instrument (RICHARDSON, ROBERTS 1985; KARJALAINEN, SMITH 1996; CARLSON 1996; STANCIU, VLASE, MARIN 2019). Through this hybrid (DSP-FEM) method, the overall sound production mechanism is modeled, and the sound produced by the musical instrument is approximated.

### 2.1 Wind instruments

Not all wind instruments share the same type of excitation mechanism (sound generator). The classes of wind AMIs this project is taking into account have three different types. The first one is the reed instruments, where the exciter includes the dynamics of reed vibration and air flowing through a reed aperture. Initially, the reed is at rest, where the pressure difference (between the mouth pressure and the pressure inside the reed) equals zero, and the reed's opening area is at its maximum level. While they slowly increase the pressure, the blades are closing progressively. When the pressure difference exceeds a certain value, the reed is forced to shut rapidly (ALMEIDA, VERGEZ, CAUSSÉ 2004). The second is the air-jet-driven instruments, where the excitation mechanism is described by the air jet deflected. The acoustic oscillation inside the resonator creates an oscillating transversal flow through the embouchure hole, which perturbs the jet's trajectory (CARPENTER 2012; FABRE, GILBERT, HIRSCHBERG 2018) at the flow separation point. Because of the unstable nature of air jets, this perturbation travels and gets instinctively amplified along with the jet. The required acoustic energy to sustain the air particles' oscillation inside the resonator is provided by the interaction of the perturbed flow with the labium (DE LA CUADRA 2006). The perturbed flow

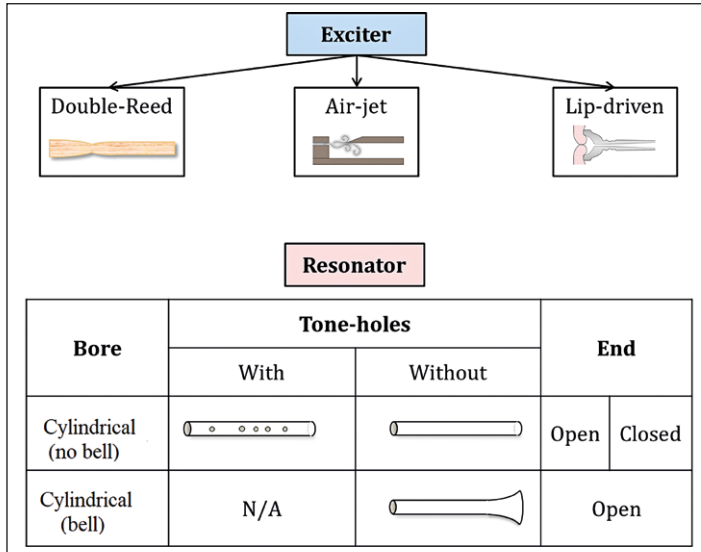


Fig. 1 – Three types of excitation mechanisms: Double-reed (*Aulos*), Air-jet instrument (*Plagiaulos* and *Syrinx*), and Lip-driven (*Salpinx*). Resonator types with various geometries, with (*Aulos* and *Plagiaulos*) and without tone-holes (*Syrinx* and *Salpinx*), with open (*Aulos*, *Plagiaulos*, and *Salpinx*) or closed (*Syrinx*) end for and the cylindrical bore without a conical bell (*Aulos*, *Plagiaulos*, and *Syrinx*) and with a conical bell (*Salpinx*).

is amplified until it reaches a side displacement which prevents its form from being cohesive and results in the reformation of the air jet. The behavior of the air jet inside a flue instrument is a non-linear phenomenon. This non-linearity is due to the fact that, even though the jet grows linearly at first, when it interacts with the perturbed flow, it breaks into vortices that conclude into turbulence (CARPENTER 2012).

The third one is the lip-driven generator mechanism. There is an important difference between this type of excitation mechanism and the aforementioned two types, which mainly arises from the fact that the blowing pressure tends to force the player's lips open, while in woodwinds, it tends to force the reed closed. It should be noted here that, in this mechanism, the lips are the equivalent to the vibrating reed.

Fig. 1 shows the exciter types that will be discussed here as they are relevant to the exciter mechanisms of the instruments this work is focusing on. More precisely the exciter types of the AMIs we simulated are: Double reed (*Aulos*) (ALMEIDA, VERGEZ, CAUSSÉ 2004, 2007), Air-jet (*Plagiaulos* and *Syrinx*) (CHANAUD 1970; FLETCHER, ROSSING 1998; AUVRAY, FABRE 2016; FABRE, GILBERT, HIRSCHBERG 2018), and Lip-driven (*Salpinx*)

(BENADE 1990). The various resonator types are also shown in Fig. 1; with (*Aulos* and *Plagiaulos*) and without tone-holes (*Syrinx* and *Salpinx*), with open (*Aulos*, *Plagiaulos*, and *Salpinx*) or closed (*Syrinx*) end and the cylindrical bore without a conical bell (*Aulos*, *Plagiaulos*, and *Syrinx*) and with a conical bell (*Salpinx*). The cylindrical bore of the *Aulos*, *Plagiaulos*, and *Syrinx* was modeled as a one-dimensional digital waveguide, i.e., as two delay lines, one for the left and one for the right going wave, as the theory of digital waveguides describes (SCAVONE 1997; CZYŻEWSKI, JAROSZUK, KOSTEK 2002; SMITH 2002; SCAVONE 2018). Concerning the excitation mechanism, in the case of *Aulos*, a reflection coefficient factor is used (due to the reed mechanism) (SMITH 2002, POLYCHRONOPOULOS et al. 2021), while in the case of *Plagiaulos* and *Syrinx*, the sigmoid function is used to simulate the air-jet excitation mechanism (COOK 1992), and in the case of *Salpinx* the lip oscillation is simulated as a mass-spring-damper oscillator (COOK 1991). The open and close ends were simulated by digital filters according to the frequency-dependent transmittance and reflectance happening in each type of ending. The reflection and transmission characteristics of the *Salpinx* bell are implemented by using lumped filters (BERNERS 1999) in combination with the waveguide model of the instrument. According to SMITH 2004a, the reflectance of the travelling waves due to the bell of a woodwind instrument is commonly modeled as a low-pass filter, while the transmittance is implemented as a complementary high-pass filter. The modeling methods described above simulate the basic mechanisms and factors of the wind instruments' sound generation, in particular, the bore's geometry (length, inner and outer diameters), the bore's ending type (open/closed), the bore's shape (cylindrical/conical), the tone-holes (number, position, and dimensions/ geometry), and the excitation mechanisms (reed driven, air jet, and lip driven). Our models can be further expanded to enable additional simulation parameters, such as the player's subtle control of the sound quality (e.g., vibrato and transients), type of flaring, and the mouthpiece effect, and can be further tuned to produce more realistic outcomes (BAKOIANNIS et al. 2021).

The fundamental note (frequency) created in the resonator depends on the length of the resonator and whether the end of it is closed or open. As a simplified practice, one can assume that, by opening a tone-hole, the effective length of the resonator reduces and, therefore, the fundamental frequency generated is higher. For an open-end, the wavelength of the fundamental frequency is approximately twice the length of the pipe, and for a closed-end the wavelength is approximately four times the length of the pipe (WOLFE 2018). In the final application the user sets the parameters' values for each AVMI (see Figs. 3 and 4) and both wind or string instrument physical models run in the time domain to synthesize the relevant audio signal and plot its spectrum in the frequency domain through the Fast Fourier Transform.

## 2.2 String instruments

DSP using Digital Wave Guides (DWG) and FEM solving in Time Domain are the two most commonly used physical modeling techniques. The DSP method is more commonly used than the FEM mainly because it is less computationally demanding. Therefore, in order for the algorithm to be able to respond and play the sound of an instrument in real-time, the DSP method is more suitable. The vibration of string musical instruments can be simulated as 1D DWG. However, the vibrating body of the instrument, which is the main sound source due to its complicated geometry, cannot be simulated with the same computationally cheap method. Julius Smith published an article comparing the effectiveness of DWG and Finite Difference Time Domain (FDTD)

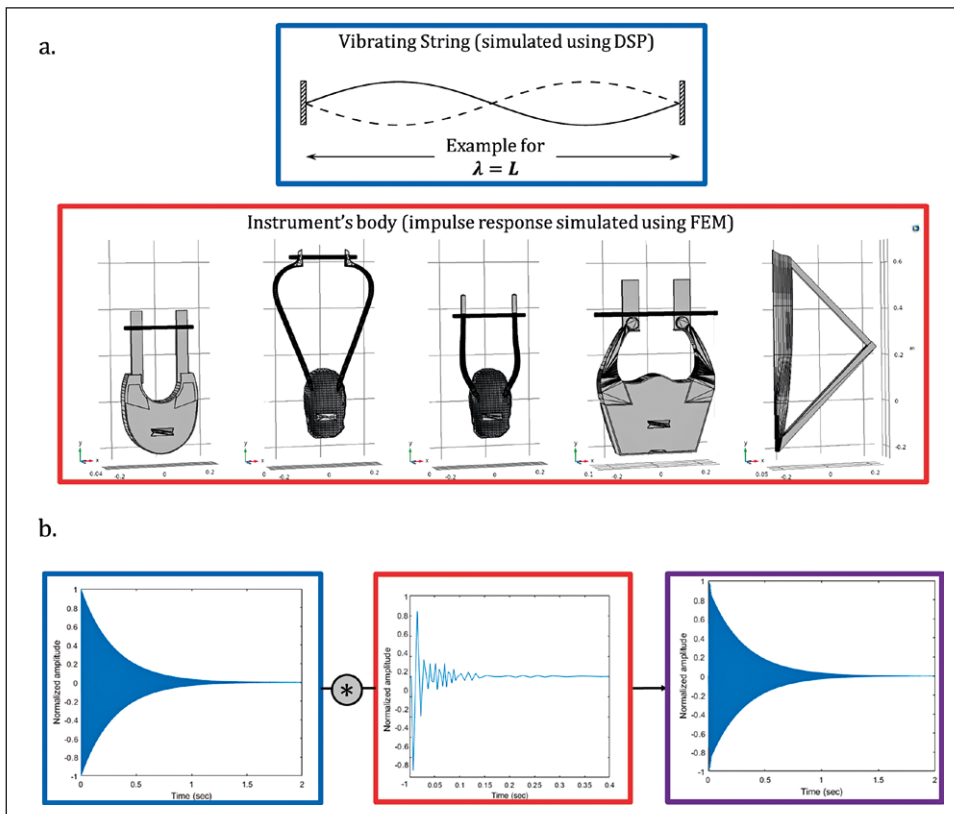


Fig. 2 – a) blue frame: the vibrating string; red frame: the 3D of the body of the instruments (*Phorminx*, *Chelys*, *Barbitos*, *Kithara*, and *Trigonon*) in COMSOL Multiphysics 5.5. b) blue frame: the signal from a vibrating string (string's length = 0.36 m, Tension = 32.85 N, Linear Density = 0.0005832 kg/m) simulated using DPS (digital waveguides); red frame: the impulse response of the body of the instrument (*Trigonon*) using FEM; purple frame: their convolution.



(SMITH 2004b). Our FEM model used to simulate the body's vibrations through the calculation of its impulse response shares common principles with FDTD as it runs in the Time Domain in order to calculate the impulse response of the system. After Smith's work, more works followed (ERKUT, KARJALAINEN 2002; BILBAO, SMITH 2003; BENSÁ *et al.* 2005). Cumhur Erkut and Matti Karjalainen came up with an approach combining the two models for the simulation of string instruments (ERKUT, KARJALAINEN 2002). Additional work was published 2 years later by the same authors with a more generalized approach proposing a renewed hybrid model (KARJALAINEN, ERKUT 2004).

In this work, in order to encounter the complicated geometry of the body of the string instruments, a hybrid method was used. The signal from the vibrating string (DSP-DWGs) is convoluted with the impulse response of the body of the instrument (FEM – solving in Time Domain) for our hybrid model to output the final audio signal of the wind AMI (KARJALAINEN, VÄLIMÄKI, JÁNOSY 1993; KARJALAINEN, SMITH 1996) (Fig. 2). The complete study of the sound produced must include, in addition to the distinct study of the string and the body, the role of the bridge. The frequency response of the body is obtained by exciting the bridge at different frequencies (ROSSING 2010). In low frequencies, there is a better agreement between the produced sound and the excitation than in high frequencies. This is due to the fact that the directionality can vary as a function of eigenfrequency, as well as the fact that a small movement of the bridge does not automatically imply a high level of sound production. More precisely, the body of the string musical instrument functions as a linear mechanical-acoustical system, which transforms the forces imposed by the vibration of the string into sound pressure waves propagating in the air.

As the calculation of the impulse response in FEM requires some time, we here propose two application types: a) the impulse response of all the AMIs exhibited in the museum is pre-calculated in order for the visitor to be able to interact with the digital instrument in real-time altering only the strings' parameters and b) the user is able to upload the 3D geometry of the body of the instrument and parameterize the strings as well. The first application type runs in real-time, and it is better for commercial use, while the second one provides more freedom in the design and it is more research-oriented. In case the string AMI, found in the excavation, is in one piece, its geometry can be easily obtained by using a 3D scanner. If there are missing parts, the archaeologist can digitally design various possible versions of the instrument's body and study each version's results. Moreover, the digital calculation of the impulse response does not require a physical measurement (which is not possible since AMIs are fragile and the impact could destroy them), enabling the researchers to test their assumptions regarding unknown parameters of the soundboxes, even when there are no actual remains of the instruments (for instance, in the case of *kitharas* or *phorminx*).

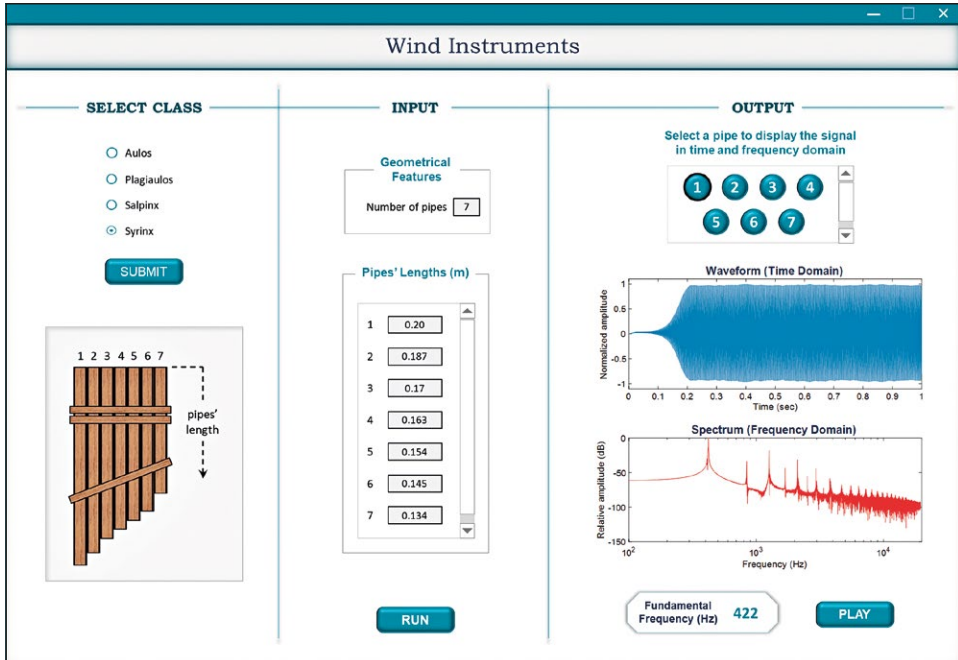


Fig. 3 – The Graphical User Interface of the wind instruments. The user can select between instrument classes (*Aulos*, *Plagiaulos*, *Syrinx*, and *Salpinx*) and the relevant parameters. In the example shown here, the *Syrinx* class is selected and the parameters are shown. The generated signal in time and frequency domain as well as the fundamental frequency, are calculated right after the user hits the run button. After the calculation is completed, the user selects the desirable pipe and the relevant plots are illustrated on the right part of the GUI. The audible stimulus occurs by hitting the play button.

### 3. APPLICATION

We here demonstrate the Graphical User Interface for the project’s wind (Fig. 3) and string (Fig. 4) instruments. The user can select between the instrument classes of a wind (*Aulos*, *Plagiaulos*, *Syrinx*, and *Salpinx*) or a string (*Phorminx*, *Chelys*, *Barbitos*, *Kithara*, and *Trigonon*) instrument. We would like to note here that due to the way we are simulating the body of the string instruments we provide the option for the user to add a 3D geometry, which is giving extra flexibility considering that small differences in the body of the instrument will significantly affect the generated signal. Then, a set of parameters show up as illustrated in Fig. 3 and Fig. 4 in the input section. We narrowed down the allowed parameters’ values to be between low and high extreme values (within logical limits, e.g., two tone-holes cannot be at the same position). This is mandatory firstly for the algorithm to be able to

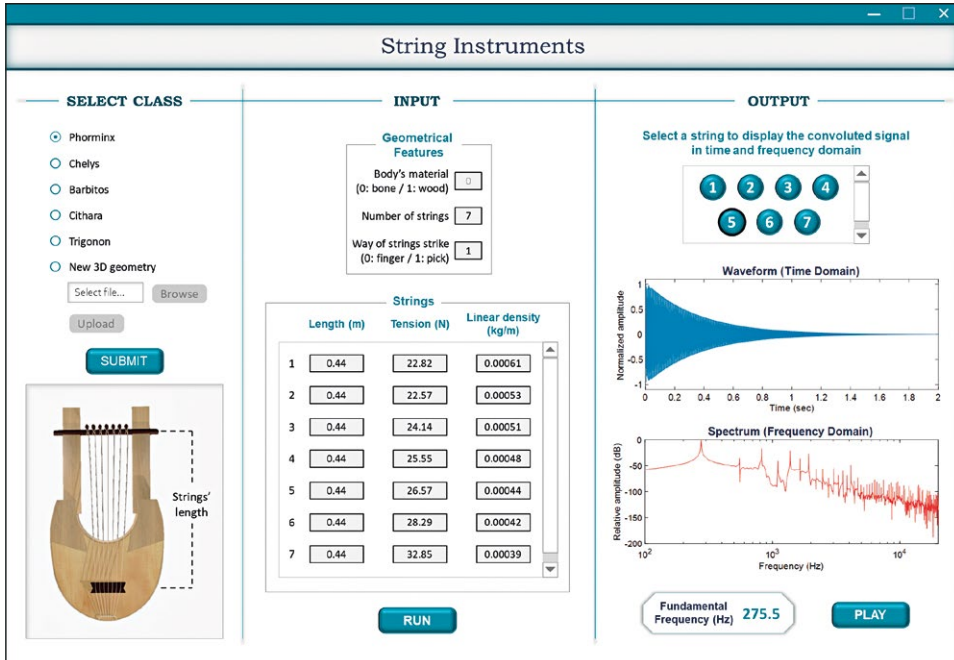


Fig. 4 – The Graphical User Interface of the string instruments. The user can select between instrument classes (*Phorminx*, *Chelys*, *Barbitos*, *Kithara*, and *Trigonon*) and the relevant parameters. In the example shown here, *Phorminx* class is selected and the parameters are shown. The generated signal in time and frequency domain, as well as the fundamental frequency, are calculated right after the user hits the run button. After the calculation is completed, the user selects the desirable string and the relevant plots are illustrated on the right part of the GUI. The audible stimulus occurs by hitting the play button.

run the calculations (e.g., not acceptable parameter number of strings = 0) and secondly for the results to make sense (e.g., not acceptable 50 m long string as it does not make sense for an AMI). In the examples shown in Fig. 3 and Fig. 4, *Syrinx* and *Phorminx* classes are selected, and the relative parameters are shown. The generated signal in the time and the frequency domain, as well as the fundamental frequency, are calculated right after the user hits the run button. After the calculation is completed, the user selects the desirable option (e.g., pipe in the case of the syrxinx in the example of Fig. 3 or string in the case of any string instrument), and the relevant plots are illustrated on the right part of the GUI. The audible stimulus occurs by hitting the play button.

This application will be useful not only to scientists but to a broader audience as well. The first category is mainly the scientific staff of museums (e.g., archaeologists, museologists) and archaeomusicologists. The scientists

who have found a Greek AMI (even if it is not in one piece) or even a visual representation of it (for example, on a vessel) will be able – most probably by assuming some geometrical features and materials – to hear how it sounds. They will be able to experiment further with all the parameters side by side with the relevant generated musical scales. The second category is comprised of museum visitors, musicians, or even students. The museum visitors will be able to interact via a touch screen interface (tablet) or a midi controller with the digitally simulated instrument and hear the result in real-time. This enables its use by musicians who want to experiment with the sounds of AMI. The application will also help students familiarize themselves with a variety of instruments that generate different musical scales than modern instruments.

#### 4. CONCLUSION

In this work, an interactive digital tool of simulated wind and string AMIs is illustrated. This application will not only be a useful tool for scientists (anthropologists, archaeologists, and archaeomusicologists) to study the instrument's sound without the need of building pricey replicas but also for non-specialists such as the museum visitors' where such an application will enrich their experience. The user is able to alter the geometrical features of the instrument and hear the generated sound without the need of building replicas which is a time consuming and pricy procedure. We highlight the simulated techniques for four classes of wind instruments (*Aulos*, *Plagiaulos*, *Syrinx*, and *Salpinx*) using the DSP (DWGs) method and five classes of string instruments (*Phorminx*, *Chelys*, *Barbitos*, *Kithara*, and *Trigonon*) using a hybrid method based on DSP (DWGs) and FEM (solving in the Time Domain). The application allows the real-time interaction with the selected class of the digital instrument, the alteration of its parameters (i.e., geometrical features), and its 3D visual representation.

#### *Acknowledgments*

This research has been co-financed by the European Regional Development Fund of the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship, and Innovation, under the call RESEARCH-CREATE-INNOVATE (project MNESIAS: “Augmentation and enrichment of cultural exhibits via digital interactive sound reconstitution of ancient Greek musical instruments” code: T1EDK-02823 / MIS 5031683).

GEORGIOS KOUROUPETROGLOU, SPYROS POLYCHRONOPOULOS,  
KONSTANTINOS BAKOGIANNIS

Department of Informatics and Telecommunications  
National and Kapodistrian University of Athens  
koupe@di.uoa.gr, spyrospoly@di.uoa.gr, kostasbako@di.uoa.gr

REFERENCES

- ALMEIDA A., VERGEZ C., CAUSSÉ R. 2004, *Experimental investigations on double reed quasi-static behavior*, in *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (Kyoto 2004)*, International Commission for Acoustics, II, 1229-1232.
- ALMEIDA A., VERGEZ C., CAUSSÉ R. 2007, *Quasistatic nonlinear characteristics of double-reed instruments*, «The Journal of the Acoustical Society of America», 121, 1, 536-546.
- ARAMAKI M., BENSA J., DAUDET L., GUILLEMAIN P., KRONLAND-MARTINET R. 2001, *Resynthesis of coupled piano string vibrations based on physical modeling*, «Journal of New Music Research», 30, 3, 213-226.
- ASKENFELT A., JANSSON E. 1993, *From touch to string vibrations. III. String motion and spectra*, «The Journal of the Acoustical Society of America», 93, 4, 2181-2196 (<https://doi.org/10.1121/1.406680>).
- AUVRAY R., FABRE B. 2016, *Specific features of a stopped pipe blown by a turbulent jet: Aero-acoustics of the Panpipes*, «The Journal of the Acoustical Society of America», 139, 6, 3214-3225 (<https://doi.org/10.1121/1.4953066>).
- AVANZINI F., CANAZZA S., DE POLI G., FANTOZZI C., PRETTO N., RODÀ A., ANGELINI I., BETTINESCHI C., DEOTTO G., FARESin E. et al. 2015, *Archaeology and virtual acoustics - A Pan flute from ancient Egypt*, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference in Sound and Music Computing (SMC 2015) (Maynooth 2015)*, 31-36 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.851067>).
- BAKOIANNIS K., POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., KOUROUPETROGLOU G. 2020, *ENTROTUNER: A computational method adopting the musician's interaction with the instrument to estimate its tuning*, «IEEE Access», 8, 53185-53195 (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981007>).
- BAKOIANNIS K., POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., KOUROUPETROGLOU G. 2021, *Audio Enhancement of Physical Models of Musical Instruments Using Optimal Correction Factors: The Recorder Case*, «Applied Sciences», 11, 6426 (<https://doi.org/10.3390/app11146426>).
- BELLIA A. 2015, *The virtual reconstruction of an ancient musical instrument: The aulos of Selinus*, in G. GUIDI, R. SCOPIGNO, J.C. TORRES, H. GRAF (eds.), *Proceedings of the Digital Heritage International Congress (Granada 2015)*, IEEE, 2, 20-22 (<https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7413833>).
- BENADE H. 1990, *Fundamentals of Musical Acoustics*, New York, Dover Publication.
- BENSA J., BILBAO S., KRONLAND-MARTINET R., SMITH J., VOINIER T. 2005, *Computational modeling of stiff piano strings using digital waveguides and finite differences*, «Acta Acustica United with Acustica», 91, 2, 289-298.
- BERNERS D.P. 1999, *Acoustics and Signal Processing Techniques for Physical Modeling of Brass Instruments*, Ph.D. Thesis, Electrical Engineering Department, Stanford University.
- BILBAO S. 2009, *Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*, Chichester, John Wiley & Sons Inc.
- BILBAO S., SMITH J.O. 2003, *Finite difference schemes and digital waveguide networks for the wave equation: Stability, passivity, and numerical dispersion*, «IEEE Transactions on Speech and Audio Processing», 11, 3, 255-266 (<https://doi.org/10.1109/TSA.2003.811535>).
- BISNOVATYI I. 2000, *Flexible software framework for modal synthesis*, in *Proceedings of COST-G6 Conference on Digital Audio Effects (DAFx-00) (Verona 2000)* (<https://arxiv.org/pdf/cs/0103006.pdf>).
- BORIN G., DE POLI G., SARTI A. 1992, *Algorithms and structures for synthesis using physical models*, «Computer Music Journal», 16, 4, 30-42.
- CARLSON M. 1996, *Applications of finite element analysis for an improved musical instrument design*, in *Proceedings of the MSC 1996 World Users' Conference (Los Angeles 1996)*, 1-20.

- CARPENTER T.G.F. 2012, *Developing an Audio Unit Plugin Using a Digital Waveguide Model of a Wind Instrument*, M.Sc. Thesis in Acoustics and Music Technology, Edinburgh College of Art, University of Edinburgh.
- CHANAUD R.C. 1970, *Aerodynamic whistles*, «Scientific American», 222, 1, 40-47.
- COOK P. 1992, *A meta-wind-instrument physical model, and a meta-controller for real-time performance control*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (San Jose, California, 1992)*, Michigan Publishing, 273-276 (<http://hdl.handle.net/2027/spo.bbp2372.1992.072>).
- COOK P. 1991, *Tbone: An interactive waveguide brass instrument synthesis workbench for the next machine*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (Montreal 1991)*, 297-299 (<http://hdl.handle.net/2027/spo.bbp2372.1991.069>).
- CZYŻEWSKI A., JAROSZUK J., KOSTEK B. 2002, *Digital waveguide models of the Panpipes*, «Archives of Acoustics», 27, 4, 303-317.
- DE LA CUADRA P. 2006, *The Sound of Oscillating Air Jets: Physics, Modeling and Simulation in Flute-Like Instruments*, Ph.D. Thesis, University of Stanford.
- ECKEL G. 1995, *Sound synthesis by physical modelling with modalys*, in *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (Durdan 1995)*, 478-482.
- ERKUT C., KARJALAINEN M. 2002, *Finite difference method vs. digital waveguide method in string instrument modeling and synthesis*, in *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (Mexico City 2002)*, 9-13.
- FABRE B., GILBERT J., HIRSCHBERG A. 2018, *Modeling of wind instruments*, in R. BADER (ed.), *Handbook of Systematic Musicology*, Berlin, Springer, 121-139 ([https://doi.org/10.1007/978-3-662-55004-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55004-5_7)).
- FLETCHER N.H., ROSSING T.D. 1998, *Materials for musical instruments*, in N. FLETCHER, T. ROSSING (eds.), *The Physics of Musical Instruments*, New York, Springer, 711-734 ([https://doi.org/10.1007/978-0-387-21603-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-0-387-21603-4_22)).
- GIORDANO N., GOULD H., TOBOCHNIK J. 1998, *The physics of vibrating strings*, «Computers in Physics», 12, 2, 138-145 (<https://doi.org/10.1063/1.168621>).
- HAGEL S. 2004, *Calculating auloi: The Louvre aulos scale*, in E. HICKMANN, R. EICHMANN (eds.), *Studien zur Musikarchäologie*, 4, 373-390.
- HAGEL S. 2008, *Re-evaluating the Pompeii auloi*, «The Journal of Hellenic Studies», 128, 52-71.
- HAGEL S. 2009a, *Ancient Greek Music: A New Technical History*, Cambridge, Cambridge University Press.
- HAGEL S. 2009b, *Reconstructing the Hellenistic professional aulos*, in M.C. MARTINELLI (ed.), *La Musa dimenticata. Aspetti dell'esperienza musicale greca in età ellenistica*, Pisa, Edizioni della Normale, 227-246.
- KARJALAINEN M., ERKUT C. 2004, *Digital waveguides versus finite difference structures: Equivalence and mixed modeling*, «EURASIP Journal on Applied Signal Processing», 7, 978-989 (<https://doi.org/10.1155/S1110865704401176>).
- KARJALAINEN M., SMITH J.O. 1996, *Body modeling techniques for string instrument synthesis*, in *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Computer Music Conference (Hong Kong 1996)*, Michigan Publishing, 232-239 (<https://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.1996.072/1>).
- KARJALAINEN M., VÄLIMÄKI V., JÁNOSY Z. 1993, *Towards high-quality sound synthesis of the guitar and string instruments*, in *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Computer Music Conference (Tokyo 1993)*, Michigan Publishing, 55-63 (<https://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.1993.010/1>).
- KOUMARTZIS N., TZETZIS D., KYRATZIS P., KOTSAKIS R.G. 2015, *A new music instrument from ancient times: Modern reconstruction of the Greek lyre of Hermes using 3D laser scanning, advanced computer aided design and audio analysis*, «Journal of New Music Research», 44, 4, 324-346 (<https://doi.org/10.1080/09298215.2015.1106563>).



- KURKE L. 2000, *The strangeness of “song culture”*: Archaic Greek poetry, in O. TAPLIN (ed.), *Literature in the Greek and Roman Worlds: A New Perspective*, Oxford, Oxford University Press, 58-87.
- MIRANDA E. 2002, *Computer Sound Design: Synthesis Techniques and Programming*, Oxford, Focal Press.
- MURRAY P., WILSON P. 2004, *Music and the Muses: The Culture of “Mousikē” in the Classical Athenian City*, Oxford, Oxford University Press.
- NORELAND D., KERGOMARD J., LALOË F., VERGEZ C., GUILLEMAIN P., GUILLOTEAU A. 2013, *The logical clarinet: Numerical optimization of the geometry of woodwind instruments*, «Acta Acustica united with Acustica», 9, 4, 615-628.
- PEROV P., JOHNSON W., PEROVA-MELLO N. 2016, *The physics of guitar string vibrations*, «American Journal of Physics», 84, 1, 38-43 (<https://doi.org/10.1119/1.4935088>).
- PÖHLMANN E., WEST M.L. 2001, *Documents of Ancient Greek Music: The Extant Melodies and Fragments*, New York, Oxford University Press.
- POLYCHRONOPOULOS S., KOUGIAS D., POLYKARPOU P., SKARLATOS D. 2013, *The use of resonators in ancient Greek theatres*, «Acta Acustica United with Acustica», 99, 1, 64-69.
- POLYCHRONOPOULOS S., MEMOLI G. 2020, *Acoustic Levitation with Optimized Reflective Metamaterials*, «Scientific Reports», 10, 4254 (<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60978-4>).
- POLYCHRONOPOULOS S., MARINI D., BAKOGIANNIS K., KOUROUPETROGLOU G., PSAROU-DAKĒS S., GEORGAKI A. 2021, *Physical Modeling of the Ancient Greek Wind Musical Instrument Aulos: A Double-Reed Exciter Linked to an Acoustic Resonator*, «IEEE Access», 9, 98150-98160 (<http://doi.org/> hyperlink: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3095720>).
- PSAROU-DAKĒS S. 2000, *The Arm-Crossbar Junction of the Classical Hellenic Kithara*. *Music Archaeology of Early Metal Ages*, in *Studien zur Musikarchäologie*, 2, 263-278.
- PSAROU-DAKĒS S. 2002, *The Aulos of Argithea*, in *Studien zur Musikarchäologie*, 3, 10, 335-366.
- PSAROU-DAKĒS S. 2008, *The Auloi of Pydna*, in *Studien zur Musikarchäologie*, 6, 22, 197-216.
- PSAROU-DAKĒS S. 2010, *The Hellenistic side flute and the Koile-Athens instrument*, in D. CASTALDO, F.G. GIANNACHI, A. MANIERI (eds.), *Rudiae: ricerche sul mondo classico*, Galatina, Congedo, 519-554.
- PSAROU-DAKĒS S. 2013a, *The Daphnē Aulos*, «*Greek and Roman Musical Studies*», 1, 93-121 (<https://doi.org/10.1163/22129758-12341239>).
- PSAROU-DAKĒS S. 2013b, *An organological study of the three musical instruments (aulos, che-lys, trigonon) from the “Tomb of the Poet” in Daphne of Attica*, John S. Latsis Public Benefit Foundation.
- RABENSTEIN R., TRAUTMANN L. 2001, *Digital sound synthesis by physical modelling*, in S. LONČARIĆ, H. BABIĆ (eds.), *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (Pula 2001)*, IEEE, 12-23 (<https://doi.org/10.1109/ISPA.2001.938598>).
- RICHARDSON B.E., ROBERTS G.W. 1985, *The adjustment of mode frequencies in guitars: A study by means of holographic interferometry and finite element analysis*, in A. ASKENFELT, S. FELICETTE, E. JANSSON, J. SUNDBERG (eds.), *Proceedings of the Sound and Music Acoustics Conference (Stockholm 1983)*, Royal Swedish Academy of Music, 285-302.
- ROADS C., STRAWN J. 1996, *The Computer Music Tutorial*, Cambridge, MA, USA, MIT Press.
- ROSSING T.D. 2010, *The Science of String Instruments*, New York, Springer.
- SAFA E., BARREAU J.B., GAUGNE R., DUCHEMIN W., TALMA J.D., ARNALDI B., DUMONT G., GOURANTON V. 2016, *Digital and handcrafting processes applied to sound-studies of archaeological bone flutes*, in M. IOANNIDES, E. FINK, A. MOROPOULOU, M. HAGEDORN-SAUPE, A. FRESA, G. LIESTØL, V. RAJCIC, P. GRUSSENMEYER (eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. 6<sup>th</sup> International Conference, EuroMed 2016 (Nicosia 2016)*, Berlin, Springer, 184-195 ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_15)).

- SCAVONE G. 1997, *An Acoustic Analysis of Single-Reed Woodwind Instruments with an Emphasis on Design and Performance Issues and Digital Waveguide Modeling Techniques*, Ph.D. Thesis, Stanford University.
- SCAVONE G. 2018, *Delay-lines and digital waveguides*, in R. BADER (ed.), *Springer Handbook of Systematic Musicology*, Berlin, Springer Verlag, 259-272.
- SERAFIN S., SMITH J.O. 2000, *A multirate, finite-width, bow-string interaction model*, in *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00) (Verona 2000)*, 207-210 ([http://www.dafx.de/paper-archive/2000/pdf/Serafin\\_Stefania\\_paper.pdf](http://www.dafx.de/paper-archive/2000/pdf/Serafin_Stefania_paper.pdf)).
- SMITH J.O. 2002, *Principles of digital waveguide models of musical instruments*, in M. KAHRNS, K. BRANDENBURG (eds.), *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*, Boston, Springer, 417-466 ([https://doi.org/10.1007/0-306-47042-X\\_10](https://doi.org/10.1007/0-306-47042-X_10)).
- SMITH J.O. 2004a, *Equivalence of the digital waveguide and finite difference time domain schemes*, «The Journal of the Acoustical Society of America», 116, 4, 2563 (<https://doi.org/10.1121/1.4785237>).
- SMITH J.O. 2004b, *Virtual acoustic musical instruments: Review and update*, «Journal of New Music Research», 33, 3, 283-304 (<https://doi.org/10.1080/0929821042000317859>).
- STANCIU M.D., VLASE S., MARIN M. 2019, *Vibration analysis of a guitar considered as a symmetrical mechanical system*, «Symmetry», 11, 6, 727 (<https://doi.org/10.3390/sym11060727>).
- TERZĒS C. 2013, *The Daphnē harp*, «Greek and Roman Musical Studies», 1, 1, 123-149 (<https://doi.org/10.1163/22129758-12341240>).
- TERZĒS C. 2020, *Musical instruments of Greek and Roman antiquity*, in T. LYNCH, E. ROCCONI (eds.), *A Companion to Ancient Greek and Roman Music*, John Wiley & Sons, Inc., 213-227 (<https://doi.org/10.1002/9781119275510.ch16>).
- TZEVELEKOS P., GEORGAKI A., KOUROUPETROGLOU G. 2008, *HERON: A zournas digital virtual musical instrument*, in S. TSEKERIDOU, A.D. CHEOK, K. GIANNAKIS, J. KARIGIANNIS (eds.), *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Digital Interactive Media in Entertainment and Arts (Athens 2008)*, Association for Computing Machinery, 352-359 (<https://doi.org/10.1145/1413634.1413698>).
- VÄLIMÄKI V., SAVIOJA L. 2000, *Interpolated and warped 2D digital waveguide mesh algorithms*, in *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00) (Verona 2000)*, Verona, Dipartimento Scientifico e Tecnologico, Università di Verona, 183-188.
- VÄLIMÄKI V., TAKALA T. 1996, *Virtual musical instruments. Natural sound using physical models*, «Organised Sound», 1-2, 75-86.
- VASSILANTONOPOULOS S.L., MOURJOPOULOS J.N. 2003, *A Study of ancient Greek and Roman theater*, «Acoustics, Acta Acustica united with Acustica», 89, 1, 123-136.
- WOLFE J. 2018, *The acoustics of woodwind musical instruments*, «Acoustics Today», 14, 1, 50-56.

## ABSTRACT

A significant number of Ancient Musical Instruments (AMIs) are exhibited in archaeological museums all over the world. Organized sound (music and songs) was the prominent factor in the process of both formulating and addressing intellectual activity and artistic creation. Thus, the way AMIs sound is a key element of study for many scientific fields such as anthropology, archaeology, and archaeomusicology. Most of the time, the excavated instruments are not in good condition and rather fragile to move around (in order to perform studio recordings or exhibit them). Building replicas was the only way to study their performance. Unfortunately, replicas are not trivial to build and, once built, not modifiable. On the other hand, digitally simulated instruments are easier to build and modify (e.g., in terms of geometry, material, etc.), which is a rather important feature in order to study them. Moreover, the

audio stimulus and the digital interaction with an AMI through a Graphical User Interface would give more engagement and knowledge to the museum's visitor. In this work, we show the simulation methods of wind (classes: *Aulos*, *Plagiaulos*, *Syrinx*, and *Salpinx*) and string (classes: *Phorminx*, *Chelys*, *Barbitos*, *Kithara*, and *Trigonon*) Greek AMIs and the relevant built-applications useful to scientists and broader audience. We here propose a user-friendly, adaptable, and expandable digital tool which reproduces the sound of the above classes of AMIs and will: a) allow the museum scientists to create specific Auditory Virtual Musical Instruments and b) enrich the experience of a museum visitor (either in situ or on line) through a digital sound reconstruction and a 3D visual representation of AMIs, allowing real-time interaction and even music creation.

## SEARCHING FOR ANCIENT SONIC EXPERIENCE IN PRESENT-DAY LANDSCAPES

### 1. INTRODUCTION

The mountaintop sanctuary to Zeus on Mount Lykaion in Arcadia, Greece hosted cult practice for centuries. An ash altar at the peak of the mountain evidences Neolithic origins and Mycenaean formalization, while a series of Hellenistic structures were built to support public, ritualized athletic competitions in a lower sanctuary (ROMANO 2014, 2015, 2019). Unusually, the buildings appear to have been built in one building campaign rather than appearing organically over time, suggesting a premeditated site plan. Little is known about the daily practices and rituals carried out in antiquity; the written record contains sparse references to the sanctuary and its famous games in honor of Zeus, with the most complete account of the physical environment made by Pausanias hundreds of years after it had fallen out of use (Pausanias, 8.30.2-3, 8.36.3, 8.38.5-6; Pindar, *Nemean Odes*, 10.45ff). The most significant source of evidence of ancient site use is the site itself. While the structures of the lower sanctuary sit in extensive ruin above ground level today, the hippodrome is still intact and visible, and the geological forms of the leeward mountainsides encircling the lower sanctuary have remained stable since ancient times (DAVIS 2017, 2018). One's imagination is necessary to envision the original architecture, but the greater landscape forms likely bear strong resemblance to past conditions.

This consistency is important to the greater sensory landscape. When traversing the lower sanctuary, startling acoustics are evident in the landscape. Communication over long distances (what will be referred to as soundlines) is possible in some positions, while moments of sonic isolation can be present in plain sight. Many of these dynamics coincide with structure footprints or prominent landscape features and are likely indicative of ancient conditions as well. Critically, the greater mountainous region surrounding the archaeological site holds promises of continuity as well. The area maintains a rural character, with low-density villages isolated from developments and major road systems. Shepherding and scattered chestnut farming continue to be the primary activities in the landscape, introducing few modern elements that might impact the archaeological area. Combined, these aspects render the landscape setting as a critical surviving site component and an experiential buffer between industry-heavy activities in the valley; the archaeological site's relative isolation affords the unusual opportunity to study the acoustic dynamics without significant outside sonic interference. What remains to be

found, and which is the focus of the research described in what follows, is whether and how the acoustics could have determined the form and function of the lower sanctuary's Hellenistic layout.

## 2. EXISTING APPROACHES TO STUDYING SOUND IN AN ANCIENT LANDSCAPE

Sound-based approaches to ancient experience have been an increasingly frequent contribution to historic site investigations. The sonic study of ancient architecture has been established through a variety of practices, including work from archaeoacoustics, sensory archaeology, affective heritage, and architectural phenomenology (CAVANAUGH 1980; MYLONOPOULOS 2006; SCARRE, LAWSON 2006; FAHLANDER, KJELLSTRÖM 2010; SKEATES 2010; MCMAHON 2013; McBRIDE 2014; TILL 2014, 2017; DÍAZ-ANDREU, MATTIOLI 2015; HAMILAKIS 2015; SUÁREZ *et al.* 2016; TRONCHIN, KNIGHT 2016; SIKORA *et al.* 2018; SKEATES, DAY 2019).

Measurement-based studies often apply the tools and lessons of modern acoustic design to map the acoustics of an interior space or specific structures, for instance to recreate ancient theaters (CHOURMOUZIADOU, KANG 2008; ECONOMOU, CHARALAMPOUS 2013; WITT, PRIMEAU 2018; BARKAS 2019). The focus of these studies is the architecture as designed vessels in which certain acoustical properties may have been designed. A less common perspective is to pursue measurement campaigns at larger exterior scales, such as ancient cultural landscapes or cityscapes, to understand their sonic contributions to ancient experience (MLEKUZ 2004; HAMILTON *et al.* 2006; CROW, TURNER, VIONIS 2011; KING, SANTIAGO 2011; DÍAZ-ANDREU, GARCÍA BENITO 2012; SCULLIN, BOYD 2014; CONTRERAS 2015; KOLAR, COVEY, CRUZADO CORONEL 2018; PRIMEAU, WITT 2018; RAINIO *et al.* 2018; SCULLIN 2018). Despite apparent changes to the landscapes during the intervening years, these studies demonstrate the potential and the diversity of approaches at larger scales.

One of the most recent introductions to the methodological toolkit of ancient sound study is psychoacoustic analysis (JORDAN 2020; VALENZUELA, DIAZ-ANDREU, ESCERA 2020). The field of psychoacoustics studies the human perception of sound in addition to the objective properties of sound energy in a space (FASTL, ZWICKER 2007). Its application can effectively center human experience in sensory considerations rather than simply the affordances surrounding the human actor. When applied in historic or ancient settings, psychoacoustic analyses offer a more direct avenue for considering the daily experience of ancient users. VALENZUELA, DIAZ-ANDREU, ESCERA (2020) present many of the challenges posed by this new approach and include various approaches being explored in different projects, including the introduction of predictive site modeling and lab-based sound quality assessment to determine possible ancient conditions. The investigation at Mount Lykaion is based

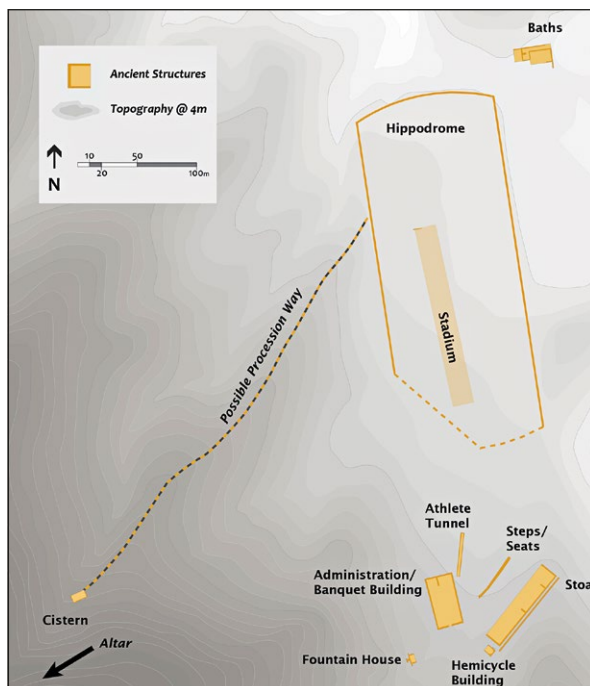


Fig. 1 – Site plan of Mount Lykaion's lower sanctuary with building remains outlined.

on observable field data gathered *in-situ* through binaural field recordings. These are then analyzed according to various psychoacoustic parameters and mapped for anomalous results, site alignments, and other patterns.

### 3. SITE INVESTIGATION APPROACH ON MOUNT LYKAION

Before any recordings are made, the site and its history – particularly elements related to sonic relationships and likely activities – must be understood. Details have been published previously on archaeological findings from the Mount Lykaion Excavation and Survey Project (ROMANO, VOYATZIS 2014, 2015), as well as on the author's architectural and sound-based historical reviews (JORDAN 2020, 2021). Fig. 1 depicts the visible building remains. In addition to an historical overview, direct experience of the sonic dynamics is of course essential; the author gathered this level of information over many years conducting architectural documentation, conversations with archaeological team members, observing usage dynamics during the regional Lykaion Games held on the site in 2017, and more recent field surveys (JORDAN 2016, 2020).



Making binaural recordings of current conditions at Mount Lykaion fulfills three major aims. The first is to document the most accurate recorded representation of the soundscape in human experiential terms for archival purposes. A second is to enable true-to-life playback (audio fidelity), including the precise replication of sound directionality, for both analytical purposes and future archaeological interpretive potential. This includes gathering an acoustic signature to enable future convolution processing and playback should conditions on the mountain change. The third aim is to enable data analysis of the resulting recordings according to the particularities of human hearing and signal processing, which will be elaborated upon in Section 4.

### 3.1 *Choosing study positions*

With the above references in hand, positions and areas of research interest were identified for sonic study. Connectivity is a major theme for point selection, such as identifying whether two structures are connected by an unusual soundline or whether a structure or area surrounding the hippodrome is sonically isolated from the rest of the site. For instance, spectating was a major factor in the public ritual games held in honor of Zeus, yet no formal seating arrangements have survived – testing sought to determine what hillsides provided clear soundlines to activities taking place on the hippodrome. In a similar vein, a ridgeline running parallel to the stoa's long axis has been posited as a possible processional way between the baths and the Agno fountain (and possibly the altar). Given the sonic contributions of typical processions at the time in other sanctuaries (PEDLEY 2005; MYLONOPOULOS 2006; CONNELLY 2011), testing sought to identify the borders of sonic accessibility between the ridgeline and lower sanctuary. This would help identify the scope of inclusion from sonic practices along the processional way – whether the procession could be experienced throughout the lower sanctuary or only in certain nearby locales. Of particular interest were building entrances and unexplained features, such as a prominent but unexplained indentation positioned within the top tread of the ceremonial seats. Equally, sonic isolation can also determine what activities a building could host, either as co-participants in the ritual atmosphere of the games or as sonic environments unto themselves. So testing was conducted across the site at close-range and long-distance to determine site connectivity between structures as close as the stoa and adjacent semi-circular building, or as far apart as the Agno fountain and the baths.

Reciprocal recordings were made whenever possible between source and receiver positions. For example, if the speaker (source) was placed on the hippodrome and the microphones (receiver) on an adjacent hill for a cycle of recordings, the speaker and microphone positions were reversed and the recordings repeated so as to identify any directional differences in sonic experience between two points. So far, such pairings have only been recorded once; future

field recording seasons will focus on repeating measurements to control for differences in weather and faunal activity and to determine baseline conditions.

### *3.2 Sounds used for site testing*

In order to produce results from a wide range of possible physical conditions, communicative dynamics, and selected analysis methods, five control sounds have been employed so far: a popped balloon functioning as an impulse response for possible convolution processing; a sinusoidal sweep between 20 Hz and 20,000 Hz (the human hearing range) to observe any outlier or common characteristics at particular frequencies, and as a secondary recording for convolution processing; a series of pure tones within the human hearing range (at 498, 996, 1992, 4008, 7992 and 15360 Hz) randomized in terms of rising frequency and duration, in order to explore an abstracted version of pattern recognition inherent in music; and a series of ten sentences used in the Göttinger Sentence Test for audiometry to enable future explorations of pattern recognition, time-dependent adaptation, and speech clarity in open field conditions. The Göttinger Satztest, “Sentence Test”, is a standardized series of 200 sentences that reflect the average phoneme distribution of German language speakers (KOLLMEIER 1990).

### *3.3 Field equipment and calibration*

The equipment used for field testing was selected for stability in outdoor exposures and for extended use without a power source. Sounds had to be consistently replicable in varying conditions and at a distance, and equipment needed to be portable, long-lived, and easy to handle in rugged terrain. Recordings were made using the handheld SQobold II recording system (HEAD Acoustics, GmbH) paired with binaural headset (binaural microphones worn as headphones) with an attached GPS receiver that linked each recording with geo-locational data. The researcher wearing the binaural recording device always directed the speaker towards the receiver position. A portable, battery-powered Samson XP360 Expedition Express speaker projected the recorded sounds and was mounted at its base on a standard tripod at human height (the base was positioned at approximately 152 cm/5 feet from ground level).

The test sounds were loaded onto an iPhone SE with the iOS11.4 operating system and then played at maximum phone volume via the Google Drive app, which relayed them to the speaker via Bluetooth. The master volume on the speaker was set to a particular value for the recorded speech (resulting in an SPL of 65.4 dBA at one meter from the speaker’s face), and at a higher value preset for the sweep and tones files. Two different balloons were chosen for impulse tests based on their consistency and capabilities at different frequency ranges (PÄTYNEN, KATZ, LOKKI 2011): a standard G95 balloon with a 30 cm diameter was employed for short and medium-range

tests (up to about 250 m/820 feet) and a larger G180 balloon with a 50 cm diameter for medium and long-range tests (from 200 up to 712 m/2337 feet). Balloons of each size were filled using a manual air pump in the field adjusted to a set pressure. Subsequently, these were held above the researcher's head directly adjacent to the speaker installation and popped with a small knife.

Meteorological data was noted at each point of signal recording using a TACKLife Anemometer (Model DA02) and a TACKLife Humidity Meter (Model HM01). As weather conditions may affect sound propagation and perception (BOHN 1988; ATTENBOROUGH 2008), average value readings were taken during the period of time spent recording all five sounds at each location – a period of approximately five-to-ten minutes per placement. Any momentary sonic interference from the spinning mechanism of the wind velocity meter was found to be negligible. Generally, recordings are made when wind is at low or consistent levels – files with sudden audible gusts are rerecorded whenever possible.

Recording results were calibrated via a set of control tests that were conducted in the large anechoic chamber at the Technische Universität Berlin. Recording and speaker equipment were set up identically to field conditions and readings were taken with one meter and five meters (3.3 and 16.4 feet respectively) separating source and receiver. These measurements established a baseline for the sound propagation capabilities of the speaker.

#### 4. PSYCHOACOUSTIC ANALYSIS OF FIELD RECORDINGS

As mentioned, the goal of recording is both to gather acoustic signatures of the space through various test sounds and to create data for psychoacoustic analysis away from the field. Different analyses can be run with the same collected binaural files, homing in on key elements to human sound perception that are less frequently incorporated into other historical sound studies. These include filtering mechanisms (e.g. the ability to tune out wind interference), time-based perceptive shifts (e.g., one's immediate reaction versus one's perceptual adjustments after a few seconds), pattern recognition (e.g. language identification, birdsong identification, or merely the sorting of foreground or background sound sources), and the role of aspects such as perceived loudness, roughness, and sharpness of component sounds (SOTTEK, GENUIT 2005; GENUIT, FIEBIG 2017). On Mount Lykaion, a few analyses have proven particularly useful so far that are detailed below.

##### 4.1 *Software and file preparation*

ArtemiS Suite (HEAD Acoustics, GmbH) has been used to analyze the recorded data from Mount Lykaion by producing interactive spectrograms from which data points can be collected as needed. These images visualize

each recording according to the analysis being run, providing a quick visual impression of the recording. The software package comes pre-loaded with customizable analysis functions to investigate objective and subjective components to sound perception. On Mount Lykaion, baseline sound pressure levels (dB SPL and A-weighted) provide conditions baselines. Accentuation of particular frequencies can be noted in the balloon or sweep recordings, which might hinder or favor human speech communication among many possibilities.

Other analysis functions enable the detailed comparison of contributing psychoacoustic elements; on Mount Lykaion, perceived loudness has proven a fruitful starting point for each sound source recording. Metrics such as speech clarity or intelligibility are also applicable when considering the spoken control sounds, though these were designed for and continue to be tested in interior space analysis or sonic environments prone to noisy conditions, such as busy streets and along airplane flight paths (TRAER, MCDERMOTT 2016). As a result, their indicative bearing within the Mount Lykaion context is still to be determined.

Unique to ArtemiS Suite is the “Relative Approach” analysis (cp/cPa), which combines psychoacoustic elements with time and frequency pattern recognition, filter mechanisms, and adaptation over time into a single analytic of human perception of sound quality (GENUIT 1996; BRAY 2004). Though designed for sound quality assessments typically found in soundscape studies (AXELSSON 2015; ISO 2018), it is a powerful tool for comparing overall impressions of sonic events on Mount Lykaion and has helped to convert anecdotal observations into consultable data. The time-based spectrograms that result have been found to be legible by a wide audience of acoustics specialists and non-specialists.

Prior to analysis, each sound recording is trimmed so that one-to-one comparisons can be made (for instance, the recordings of the pure tones are all trimmed to be seven seconds long). Averaged single values can then be derived as needed, such as the average A-weighted dB levels or average loudness of a speech file, though they are subject to significant interference when the recording includes faunal activity or wind gusts. These kinds of measurements are also useful for overall impressions before investigating certain frequency bands or other details.

#### *4.2 Sample analysis. Hippodrome and adjacent hills*

To illustrate how the psychoacoustic analyses described above can be applied to field observations, a few simple examples will be described. The first example is the use of the ‘Relative Approach’ analysis to compare the sonic experience of a sound played from two different positions. The basis of this example was anecdotal information from conversations with archaeologists and the author’s site experience, which relayed that sounds from two different

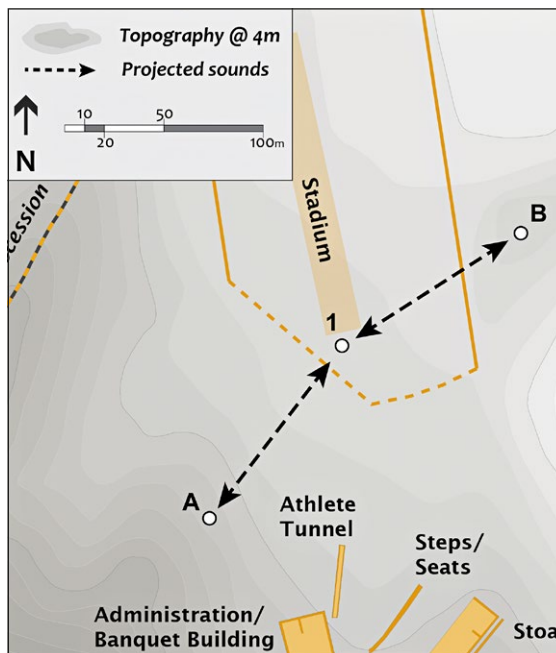


Fig. 2 – Partial site plan depicting the positions of sound sources (A and B) and microphone (1) used to compare sound quality impressions from the two hills.

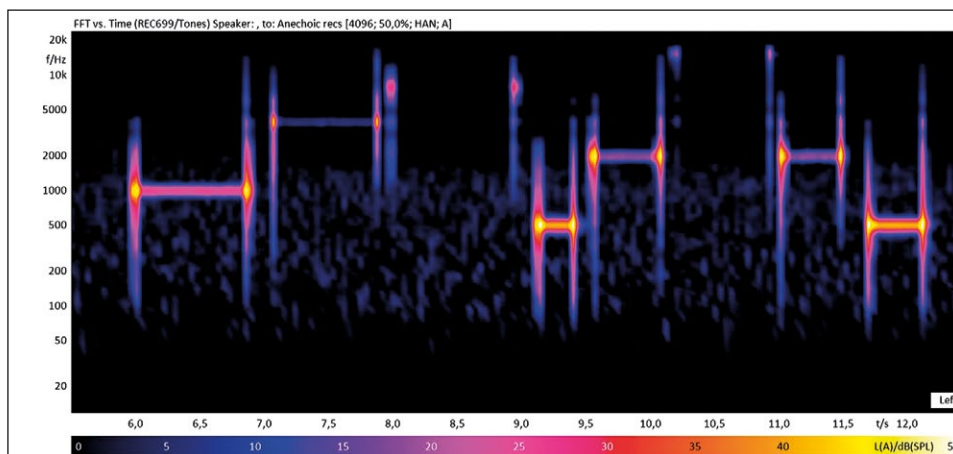


Fig. 3 – FFT vs Time analysis of tones file recorded in an anechoic chamber (A-weighted dB SPL); eight tones are visible at 996, 4008, 7992, 498, 1992, 15360, 1992, and 498 Hz, with the beginning and end of each tone particularly prominent.

hills could be heard clearly from the hippodrome surface. The intent was to determine from which hill the sound could be heard more strongly (Fig. 2).

A position was chosen on the hippodrome surface with clear sightlines to both hills and approximately equidistant from each (position 1 in Fig. 2). The leeward side of Mount Lykaion that overlooks the entire hippodrome was the first hillside for comparison (position A); a small outcrop on the eastern side of the hippodrome was the second hillside (position B). The elevation of position A is around 4 m higher than position B. The tones file described above was used to compare impressions; a baseline spectrogram of this tones file (produced in an anechoic chamber) is depicted in Fig. 3.

The recordings made on the hippodrome of the tones file projected from each hill were then compared to each other using the Relative Approach analysis with identical settings, as depicted in Fig. 4.

Comparing the two recordings, the tones under 1000 Hz can be distinguished from background noise by observing how clearly their duration stands out against background noise (straight blue and pink bars against a dark background). The analysis shows that the perception of sound from each hill seems to be very similar (repeated recordings will be needed to confirm the observation). Noting this, a new query was introduced that compared the inverse: what does the tones file played at point 1 sound like from position A and B? Fig. 5 depicts the corresponding spectrograms.

What is immediately apparent from Fig. 5 is how much stronger and clearer the tones file is perceived on the hills when played on the hippodrome surface (note that the color range for cp/cPa is identical between Figs. 4 and 5). Seven of the eight tones are clearly distinguishable against all background sound. Spot measurements taken at the points indicated in Figs. 4 and 5 give a more specific indication of the perceptual difference: the beginning of the 5<sup>th</sup> tone is heard at 40 cPa on the hippodrome but is heard at 95 cPa at point B.

In this example, field observations highlighted two different hills that were known as good places to speak from; archaeologists have used them to help communicate across the site when their walkie-talkie batteries have run low. Before employing psychoacoustic analyses, there was no way to compare how well one could be heard from each hill compared to the other; furthermore, it was not possible to conclude that sound could be better heard on the hills than on the hippodrome because too much time would elapse between listening in one position and moving to the other to repeat the experiment. Average human hearing is comparative but only within a short timeframe; we do not possess an absolute scale against which we calibrate our impressions (GENUIT 1996), and the specific impression from one hill would be lost while walking to the other. The Relative Approach analysis factors these inherent functional dynamics into its calculations to depict an aurally-accurate representation of perceived acoustic quality.



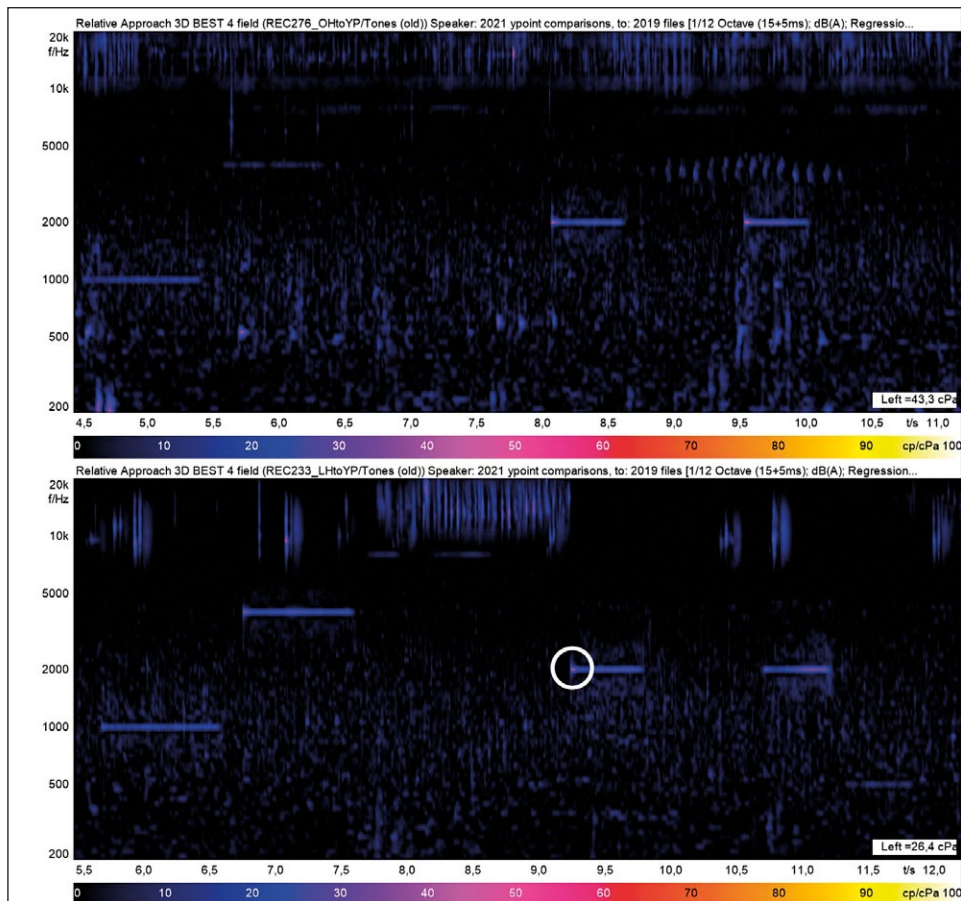


Fig. 4 – Relative Approach analyses of 1A (above) and 1B (below) recordings of the tones file projected from A and B respectively. The white circle indicates where a spot measurement was taken.

As a result, the data collected so far indicate that both hills (in the areas studied) would have made good positions from which to hear *and* see activities on the hippodrome, while those on the hippodrome might only perceive the louder activities taking place on the hillsides. This observation begins to give form to possible ancient site organization according to sound by demonstrating where the ‘best’ positions for spectating could have been and offering that sounds within lower frequency ranges could be better heard on the hippodrome. Does this offer insight into what sounds a crowd might have directed towards athletes or each other? Further study could identify where the relationship of hippodrome to surrounding hillsides are more evenly

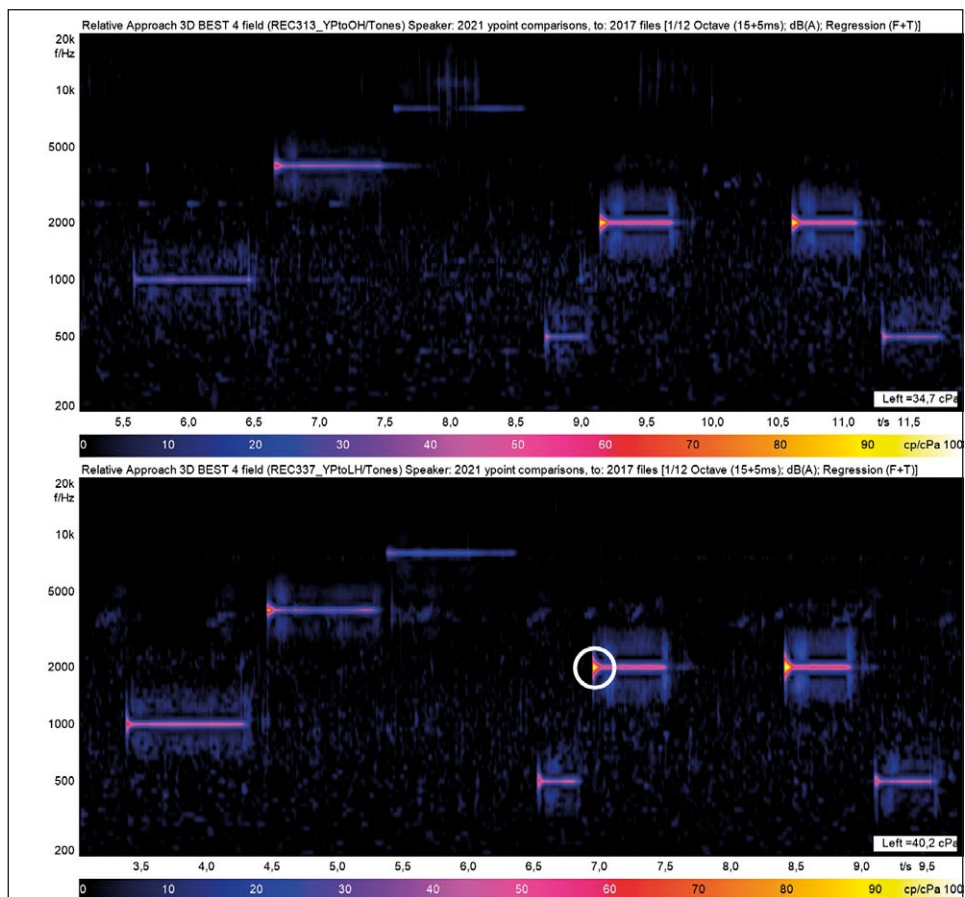


Fig. 5 – Relative Approach analyses of 1A (above) and 1B (below) recordings of the tones file projected from point 1. The white circle indicates where a spot measurement was taken.

mirrored acoustically, allowing for a dynamic exchange and participation in ritual activity between athletes and spectators.

#### 4.3 Sample analysis. Connectivity between a central point and two site features

Another example can demonstrate the power of comparing specific measurements from analyses that might be more familiar. In this example, a central position within the lower sanctuary had been previously identified as a possible area for wrestling competitions, given its adjacency to the only structure thought to be for seating (see point 2 in Fig. 6 near the “Seats”).

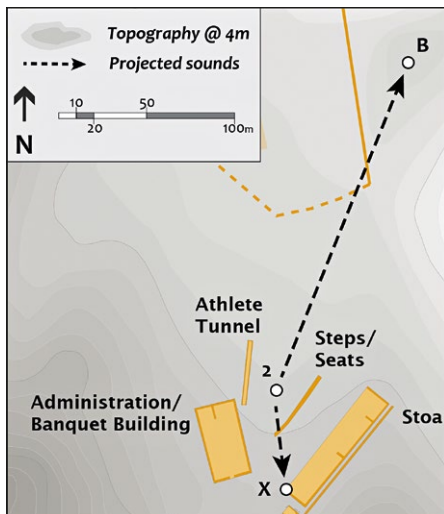


Fig. 6 – Partial site plan showing the central study position (2) and the recording positions on a hill (B) and the front of the stoa (X) used to determine inter-feature sonic connectivity. Point B is the same hill position depicted in Fig. 2.

A larger recording campaign was carried out to understand where sound projected from point 2 could be discerned throughout the lower sanctuary. Vast sonic connectivity would have rendered point 2 a potentially important component to overall sensory experience; limited connectivity would indicate that its role might have been more localized to immediate structures such as the Seats. Analyses examined the A-weighted dB SPL readings, perceived loudness (sone), and Relative Approach measurements (cp/cPa). The tones file from the previous example was examined; spot measurements were taken at the same instant across recordings for precise comparisons at the maximum reading of the individual tone and the mid-point of the tone (to account for variability and, in the case of the Relative Approach analysis, to account for adaptation over time). From the results, two positions stood out against what would be expected in an open field condition. For ease of discussion, results from the 996 Hz tone only are depicted in Tab. 1.

Noting the difference in distance between B and X to point 2, it is first surprising to note that the maximum and middle values of A-weighted dB SPL are relatively similar. On its own, this would suggest the unusual situation that sound is heard on the small hill almost as intensively as on the much closer western edge of the stoa. The perceived loudness calculation, which accounts much more specifically for human perception of loudness, shows

Projected from/to	Distance	Analysis	Tones Frequency Measurements (996 Hz)	
2 to B	160 m	FFT v Time (A-weighted dB SPL)	Max	8.98
			Mid	7.22
		Specific Loudness (soneGF/Bark)	Max	0.2651
			Mid	.2491
		Relative Approach (cp/cPa)	Max	42.18
			Mid	32.7
2 to X	56 m	FFT v Time (A-weighted dB SPL)	Max	12.76
			Mid	11.29
		Specific Loudness (soneGF/Bark)	Max	0.2124
			Mid	0.1931
		Relative Approach (cp/cPa)	Max	20.72
			Mid	19.98

Tab. 1 – Measurements and analysis of 996 Hz tones from field recordings, with dB and Relative Approach results highlighted at the small hill and western edge of the stoa.

that the sound reaching the small hill is actually louder than that reaching the western stoa, raising the possibility of an aspect of sonic accentuation at work on the way to the small hill. The Relative Approach analysis makes the difference even more apparent and depicts an entirely different experiential reality: the 996 Hz tones are heard with far more intensity on the small hill than the western stoa. The hill is three times farther away than the stoa and is hidden from view by a mature grove of walnut trees, while the western edge of the stoa is easily visible from point 2.

This example demonstrates that sightlines do not necessarily coincide with soundlines. There could be many contributing factors for why physical and acoustical proximity do not coincide in this case, but such a decisive divergence calls for repeated measurements. So far, it suggests that portions of the landscape may be more sonically present within the lower sanctuary core than between adjacent buildings. The zones of sonic participation, which could have enabled certain activities, provided privileged access, or demarcated private versus public activity, may not have been determined by the built structures or visual pathways alone. In fact, psychoacoustic study may be the best way to identify such zones.

This type of discovery underscores just how valuable psychoacoustic investigations can be in a complex outdoor environment. The measured dB level alone, even though A-weighted for human sensitivities, cannot describe emplaced human experience. Adding psychoacoustic investigation to studies of Mount Lykaion provides comparative evidence to substantiate the perceptive similarities and relationship potentials between landscape and architectural feature. These spaces are remarkably experientially connected and could have been in antiquity as well; activities at these locations could have been coordinated, directed,

presided over and otherwise bound by sound, even without corresponding visual links or large architectural constructions providing hard surfaces for sound reflection. The findings can serve as the starting point for more detailed sound explorations and archaeological fieldwork in and between these areas.

## 5. DISCUSSION

A number of challenges are encountered by the study of an ancient soundscape via a present one. Perhaps the biggest challenge on Mount Lykaion is that the landscape is the only artifact left to study directly – the architecture is mostly gone, plant growth patterns have changed, and the typical ancient practices and sonic participants are unknown. Yet enough of the landscape and historical references remain to act as entry-points into the experience of the ancient past. Together they provide a unique opportunity both to investigate what the site could have sounded like before the stone buildings were built and to determine if the buildings were purposefully placed to take advantage of latent acoustics in the landscape. The acoustic sophistication of contemporaneous theaters (designed for 20,000 spectators in the case of the Megalopolis theater in the adjacent valley) suggests that local builders knew how to harness acoustic properties towards public gathering. And without any evident construction for the approximately 200 years of games practices before monumental architecture was introduced, sonic study on Mount Lykaion may be the most direct way to research the early phase of the lower sanctuary and its use (JORDAN 2020). Ongoing psychoacoustic analysis akin to the examples presented above are currently underway to examine connections between site and architecture in this manner.

Site-based research is an important first step to uncover what dynamics are present and what sound-facilitated relationships are possible. It does not factor in the influence of crowds, specific sound-based activities, or the influence of cultural or personal expectations; these are interpretive layers that must be added later to understand the full human experience. For this reason, effort has been made to make recordings that are robust in the information they gather and the research uses they can be put towards in the future. Yet despite the sophistication of the recording equipment and analysis software at this moment, the technologies are still under development. Debate between psychoacousticians continues as to how to apply them and what their results signify, and the field of psychoacoustics has a history derived from military development that should not be forgotten (YOST 2015; OUZOUNIAN 2020). Psychoacoustic data can only offer conclusions based on the present moment in time in terms of understanding, especially in an outdoor context that attempts to transcend such a distant past. This is particularly true for newer metrics such as the Relative Approach analysis, but also for applications such

as impulse response tests and speech clarity analyses that were developed and standardized for indoor applications.

## 6. CONCLUSION

Mount Lykaion presents a unique set of circumstances: few details about the ritual or daily practices that developed over many hundreds of years of use; evidence of a unified site plan implemented in antiquity; deteriorated architectural remains with still identifiable footprints; landforms that are greatly intact since before monumental architecture was introduced; sonic isolation from modern sound sources; and noticeably unusual acoustic properties. The application of psychoacoustics enables a comparative study of the current acoustic environment according to how people perceive it.

Psychoacoustics comes to archaeological investigation via more contemporary soundscape studies. Its introduction to historic investigations helps to bridge observations of sound behavior in a space with the way humans have found these behaviors to be meaningful through time. Between these two realms of understanding lies the consistent way humans receive and process sound, and tracing the dynamics of human sound experience can help to investigate what conditions in the past could facilitate sound-dependent activities – as they do today. Sonically meaningful spaces were not limited to theaters or public squares – Mount Lykaion was a place of such ritual interactions and meanings. It is emblematic of the need to find new ways of approaching archaeological sites as forms made to facilitate dynamic, sounded, meaningful activities.

PAMELA JORDAN

Department of Archaeology  
Amsterdam Center for Ancient Studies and Archaeology (ACASA)  
University of Amsterdam  
p.f.jordan@uva.nl

## REFERENCES

- ATTENBOROUGH K. 2008, *Sound propagation in the atmosphere*, in M.J. CROCKER (ed.), *Handbook of Noise and Vibration Control*, Hoboken (NJ), Wiley & Sons, 67-78 (<http://doi.wiley.com/10.1002/9780470209707.ch5>).
- AXELSSON Ö. 2015, *How to measure soundscape quality*, in C. GLORIEUX (ed.), *Proceedings of Euronoise 2015 (Maastricht 2015)*, 1477-1481 (<https://www.conforg.fr/euronoise2015/proceedings/data/articles/000067.pdf>).
- BARKAS N. 2019, *The contribution of the stage design to the acoustics of ancient Greek theatres*, «Acoustics», 1, 1, 337-353 (<https://www.mdpi.com/2624-599X/1/1/18>).
- BOHN D.A. 1988, *Environmental effects on the speed of sound*, «Journal of the Audio Engineering Society», 36, 4 ([https://www.proacousticsusa.com/media/wysiwyg/PDFs/Environmental\\_Effects\\_on\\_the\\_Speed\\_of\\_Sound.pdf](https://www.proacousticsusa.com/media/wysiwyg/PDFs/Environmental_Effects_on_the_Speed_of_Sound.pdf)).
- BRAY W.R. 2004, *The “Relative Approach” for direct measurement of noise patterns*, «Sound and Vibration», 38, 9, 20-23.



- CAVANAUGH W.J. 1980, *Preserving the acoustics of mechanics hall: A restoration without compromising acoustical integrity*, «Technology and Conservation», 5, 3, 24-28.
- CHOURMOUZIOU K., KANG J. 2008, *Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres*, «Applied Acoustics», 69, 6, 514-529.
- CONNELLY J.B. 2011, *Ritual movement through Greek sacred space: Toward an archaeology of performance*, in A. CHANIOTIS (ed.), *Ritual Dynamics in the Ancient Mediterranean: Agency, Emotion, Gender, Representation*, Stuttgart, Franz Steiner Verlag, 313-346.
- CONTRERAS D.A. 2015, *Landscape setting as medium of communication at Chavín de Huántar, Peru*, «Cambridge Archaeological Journal», 25, 2, 513-530.
- CROW J., TURNER S., VIONIS A. 2011, *Characterizing the historic landscapes of Naxos*, «Journal of Mediterranean Archaeology», 24, 1, 111-137 (<https://journal.equinoxpub.com/JMA/article/view/907>).
- DAVIS G.H. 2017, *Tectonic klippe served the needs of cult worship, sanctuary of Zeus, Mount Lykaion, Peloponnese, Greece*, «GSA Today», 27, 12, 4-9 (<http://www.geosociety.org/gsatoday/science/G353A/abstract.htm>).
- DAVIS G.H. 2018, *Geologic and geoarchaeological mapping of the sanctuary of Zeus, Peloponnese, Greece*, «Geological Society of America Digital Map and Chart Series», 23 (<https://doi.org/10.1130/2018.DMCH023>).
- DÍAZ-ANDREU M., GARCÍA BENITO C. 2012, *Acoustics and Levantine rock art: Auditory perceptions in La Valltorta Gorge (Spain)*, «Journal of Archaeological Science», 39, 12, 3591-3599 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2012.06.034>).
- DÍAZ-ANDREU M., MATTIOLI T. 2015, *Archaeoacoustics of rock art: Quantitative approaches to the acoustics and soundscape of rock art*, in S. CAMPANA, R. SCOPIGNO, G. CARPENTIERO, M. CIRILLO (eds.), *Proceedings of the 43<sup>rd</sup> Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Siena 2015)*, Oxford, Archaeopress, 1049-1058.
- ECONOMOU P., CHARALAMPOUS P. 2013, *The significance of sound diffraction effects in simulating acoustics in ancient theatres*, «Acta Acustica United with Acustica», 99, 1, 48-57 (<http://www.ingentaconnect.com/content/10.3813/AAA.918587>).
- FAHLANDER F., KJELLSTRÖM A. 2010, *Beyond sight: Archaeologies of sensory perception*, in F. FAHLANDER, A. KJELLSTRÖM (eds.), *Making Senses of Things: Archaeologies of Sensory Perception*, Stockholm, TMG Sthlm, 1-13.
- FASTL H., ZWICKER E. 2007, *Psychoacoustics*, Berlin-Heidelberg, Springer, 3<sup>rd</sup> ed. (<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-68888-4>).
- GENUIT K. 1996, *Objective evaluation of acoustic quality based on a Relative Approach*, Institute of Acoustics Proceedings, 18, 6, Liverpool, Institute of Acoustics.
- GENUIT K., FIEBIG A. 2017, *Human-hearing-related measurement and analysis of acoustic environments: Requisite for soundscape investigations*, in J. KANG, B. SCHULTE-FORTKAMP (eds.), *Soundscape and the Built Environment*, Boca Raton, CRC Press, 133-160.
- HAMILAKIS Y. 2015, *Archaeology and the Senses*, Cambridge, Cambridge University Press.
- HAMILTON S. et al. 2006, *Phenomenology in practice: Towards a methodology for a "subjective" approach*, «European Journal of Archaeology», 9, 1, 31-71 (<https://doi.org/10.1177/1461957107077704>).
- ISO 2018, *International Organization for Standardization 2018, ISO 12913-2:2018 - Acoustics - Soundscape Part 2, Data Collection and Reporting Requirements*, Geneva (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:12913:-2:ed-1:v1:en>).
- JORDAN P. 2016, *Soundscape in historic settings. A case study from ancient Greece*, in *Proceedings of the INTER-NOISE 2016. 45<sup>th</sup> International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future (Hamburg 2016)*, Reston, VA, Institute of Noise Control Engineering.
- JORDAN P. 2020, *Sound experience in archaeology and field investigations: An approach to mapping past activities through sound at Mount Lykaion's sanctuary of Zeus*, «Kleos. The Amsterdam Bulletin of Ancient Studies and Archaeology», 3, 9-31.

- JORDAN P. 2021, *Sounding the mountain: Analyzing the soundscape of Mount Lykaion's sanctuary to Zeus*, in E. ANGLIKER, A. BELLIA (eds.), *Soundscape and Landscape at Panhellenic Greek Sanctuaries*, TELESTES. Studi e Ricerche di Archeologia musicale nel Mediterraneo, V, Pisa-Roma, Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, 51-65.
- KING S.M., SANTIAGO G.S. 2011, *Soundscape of the everyday in ancient Oaxaca, Mexico*, «Archaeologies», 7, 2, 387-422 (<http://link.springer.com/10.1007/s11759-011-9171-y>).
- KOLAR M.A., COVEY R.A., CRUZADO CORONEL J.L. 2018, *The Huánuco Pampa acoustical field survey: An efficient, comparative archaeoacoustical method for studying sonic communication dynamics*, «Heritage Science», 6, 1 (<https://doi.org/10.1186/s40494-018-0203-4>).
- KOLLMEIER B. 1990, *Meßmethodik, Modellierung und Verbesserung der Verständlichkeit von Sprache*, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- MCBRIDE A. 2014, *The acoustics of archaeological architecture in the Near Eastern Neolithic*, «World Archaeology», 46, 3, 349-361 (<http://dx.doi.org/10.1080/00438243.2014.909150>).
- MCMAHON A. 2013, *Space, sound, and light: Toward a sensory experience of ancient monumental architecture*, «American Journal of Archaeology», 117, 2, 163-179 (<http://www.jstor.org/stable/10.3764/aja.117.2.0163>).
- MLEKUZ D. 2004, *Listening to landscape: Modelling past soundscapes in GIS*, «Internet Archaeology», 16 (<http://intarch.ac.uk/journal/issue16/6/index.html>).
- MYLONOPOULOS I. 2006, *Greek sanctuaries as places of communication through rituals: An archaeological perspective*, in E. STAVRIANOPOULOU (ed.), *Ritual and Communication in the Graeco-Roman World*, Liège, Presses universitaires de Liège, 69-110 (<http://books.openedition.org/pulg/1135>).
- OUZOUNIAN G. 2020, *Stereophonica: Sound and Space in Science, Technology, and the Arts*, Cambridge (MA), MIT Press.
- PÄTYNEN J., KATZ BRIAN F.G., LOKKI T. 2011, *Investigations on the balloon as an impulse source*, «Journal of the Acoustical Society of America», 129, 1, EL27-EL33.
- PEDLEY J. 2005, *Sanctuaries and the Sacred in the Ancient Greek World*, Cambridge, Cambridge University Press.
- PRIMEAU K.E., WITT D.E. 2018, *Soundscape in the past: Investigating sound at the landscape level*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 19, 875-885 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.044>).
- RAINIO R., LAHELMA A., ÄIKÄS T., LASSFOLK K., OKKONEN J. 2018, *Acoustic measurements and digital image processing suggest a link between sound rituals and sacred sites in Northern Finland*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 25, 2, 453-474 (<http://link.springer.com/10.1007/s10816-017-9343-1>).
- ROMANO D.G. 2019, *The organization, planning and architectural design of the sanctuary of Zeus at Mount Lykaion, Arcadia*, in E.C. PARTIDA, B. SCHMIDT-DOUNAS (eds.), *Listening to the Stones: Essays on Architecture and Function in Ancient Greek Sanctuaries in Honour of Richard Alan Tomlinson*, Oxford, Archaeopress, 98-108 (<https://doi.org/10.2307/j.ctvr00x79>).
- ROMANO D.G., VOYATZIS M.E. 2014, *Mt. Lykaion excavation and survey project, part 1: The upper sanctuary*, «Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens», 83, 4, 569-652 (<http://www.jstor.org/stable/10.2972/hesperia.83.4.0569>).
- ROMANO D.G., VOYATZIS M.E. 2015, *Mt. Lykaion excavation and survey project, Part 2: The lower sanctuary*, «Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens», 84, 2, 207-276 (<https://doi.org/10.2972/hesperia.84.2.0207>).
- SCARRE C., LAWSON G. (eds.) 2006, *Archaeoacoustics*, Cambridge, McDonald Institute for Archaeological Research.
- SCULLIN D. 2018, *Mapping sound: Creating a static soundscape*, in M. GILLINGS, P. HACIGÜZELLER, G. LOCK (eds.), *Re-Mapping Archaeology*, London, Routledge, 231-259.
- SCULLIN D., BOYD B. 2014, *Whistles in the wind: The noisy Moche city*, «World Archaeology», 46, 3, 362-379 (<http://dx.doi.org/10.1080/00438243.2014.921099>).

- SIKORA M., RUSSO M., ĐEREK J., JURČEVIĆ A. 2018, *Soundscape of an archaeological site recreated with Audio Augmented Reality*, «ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications», 14, 3, 1-22 (<https://doi.org/10.1145/3230652>).
- SKEATES R. 2010, *An Archaeology of the Senses: Prehistoric Malta*, Oxford, University Press.
- SKEATES R., DAY J. (eds.) 2019, *The Routledge Handbook of Sensory Archaeology*, New York, Routledge (<https://www.taylorfrancis.com/books/9781317197478>).
- SOTTEK R., GENUIT K. 2005, *Models of signal processing in human hearing*, «AEU International Journal of Electronics and Communications», 59, 3, 157-165 (<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1434841105000701>).
- SUÁREZ R. et al. 2016, *Archaeoacoustics of intangible Cultural Heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny*, «Journal of Cultural Heritage», 19, 567-572 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.12.003>).
- TILL R. 2014, *Sound archaeology: Terminology, Palaeolithic cave art and the soundscape*, «World Archaeology», 46, 3, 292-304 (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00438243.2014.909106>).
- TILL R. 2017, *An archaeoacoustic study of the Hal Saflieni hypogeum on Malta*, «Antiquity», 91, 355, 74-89 (<https://doi.org/10.15184/aqy.2016.258>).
- TRAEER J., McDERMOTT J.H. 2016, *Statistics of natural reverberation enable perceptual separation of sound and space*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 48, E7856-E7865 (<http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1612524113>).
- TRONCHIN L., KNIGHT D.J. 2016, *Revisiting historic buildings through the senses visualising aural and obscured aspects of San Vitale, Ravenna*, «International Journal of Historical Archaeology», 20, 1, 127-145 (<http://link.springer.com/10.1007/s10761-015-0325-2>).
- VALENZUELA J., DIAZ-ANDREU M., ESCERA C. 2020, *Psychology meets archaeology: Psychoarchaeoacoustics for understanding ancient minds and their relationship to the sacred*, «Frontiers in Psychology», 11, 1-9 (<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2020.550794/full>).
- WITT D., PRIMEAU K. 2018, *Performance space, political theater, and audibility in downtown Chaco*, «Acoustics», 1, 1, 78-91 (<http://www.mdpi.com/2624-599X/1/1/7>).
- YOST W.A. 2015, *Psychoacoustics: A brief historical overview*, «Acoustics Today», 11, 3, 46-53.

## ABSTRACT

Research on ancient sensory experience has questioned ocular-centric research as the primary form of knowledge production in archaeological investigations. With enough information about the material composition of an ancient building, the acoustic properties of the interior spaces can be modeled for greater understanding of the daily experience of past users. Acoustics can reveal what people heard in the past, an experiential starting point to begin asking how someone heard in the past. Thus, acoustic study of place offers the potential to deepen understanding of the emplaced past experience as well as limitations to what conclusions can be drawn directly from gathered data. One area that remains underdeveloped is the research of sounded experience in ancient outdoor settings. This paper presents ongoing acoustic research at the ancient Greek sanctuary to Zeus on Mount Lykaion, applying psychoacoustic analysis to comprehensive recording efforts. Moments of sonic connectivity and isolation in this mountainous site align with past building outlines and prominent landscape features, suggesting that the sanctuary landscape likely played a key role in ritual experiences. The sonic dynamics of the landscape can still be experienced – and measured – today. The paper details the current approach to data collection and analysis on the mountain and includes some of the challenges afforded by applying acoustic study in the ancient built landscape.

## BEING A SPECTATOR IN A ROMAN THEATRE: A VR APP

### 1. ARCHAEOLOGY, AURALISATION, AND DIGITAL APPLICATIONS

In the last years, studies and digital applications involving both archaeology and auralisation have increased but they are still uncommon, above all in the archaeological field. Here, our interest is to summarize a few of these works to discuss the success of such a combination, but also to highlight what can be done more to fully take advantage of this interdisciplinary approach.

The auralisation consists of the convolution of an anechoic file with an impulse response recorded in a specific position of a given space by a receiver. The result of the auralisation is an audio file that sounds as if it would be physically recorded in the specific space at the specific spot where the receiver recorded the impulse response. Thanks to 3D modelling and virtual acoustics, it is possible to obtain auralised files also of not preserved, or partially preserved, sites. In addition, the recreated sounds can be integrated with visual reconstructions and other information through virtual reality and augmented reality.

The project *Archeoechi* has been carried out by a team of scholars specialised in several disciplines (archaeologists, acousticians, actors and 3D experts), by the collaboration of the Department of Humanities of the University of Foggia and the AudioLab of the University of York. The project sees the development of a virtual reality application that offers an immersive experience within a Medieval cathedral in Southern Italy (Montecorvino, Puglia). The result is a fascinating educational instrument through which users, employing the head-mounted display Oculus Go, can explore the 3D reconstruction (which is based on information obtained from archaeological excavations and by analogies) of the cathedral not fully preserved. Users can interact with it, read descriptive panels and listening to a couple of auralised files as if they were at the centre of the church, back in the Middle Ages. One of the authors of the project stresses as the educational impact is higher when immersive applications take into account audio as well (GRAZIOLI 2020).

A different digital application, for touristic promotion, has been developed by the University of Split (Croatia). It consists of a mobile audio augmented reality tool for soundscape auralisation of ancient archaeological sites, called *Soundscaper*. Different kind of auralised audios have been tested along Split's promenade to realize the correct audio augmented system by the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (SIKORA, ĐANA, RUSSO 2016). Subsequently, the developed system has been used and tested within an archaeological site whose soundscape was recreated.

A group of students visited the archaeological site of Crkvina (9<sup>th</sup> c. basilica dedicated to St. Mary and St. Stephen), accompanied by the audio augmented reality equipment that simulates sounds that, hypothetically, populated the site at Medieval times. Through a qualitative and subjective questionnaire, the scholars have demonstrated that it is preferable an augmented audio experience while visiting archaeological sites (SIKORA *et al.* 2018). Despite the tool developed is probably a very good and user-friendly instrument to attract visitors, the archaeological aspect is a bit neglected. The experience of the visitors would be culturally enriched if there would be a historical study of the many possible medieval sounds of the specific landscape. Moreover, to deliver something realistic, the auralised sound should be listened to in a reconstructed environment, as similar as possible to the original aspect of the site. This audio augmented reality tool would be much more valuable if it would not limit itself only to a walk with pleasant background sound. Hopefully, archaeologists will take the best from it.

Another project which involves sounds related to a religious archaeological site is the Virtual Paul's Cross Project. The multidisciplinary team aimed to produce a digital re-creation of John Donne's gunpowder day sermon, that occurred on 5<sup>th</sup> November 1622, to investigate the acoustic phenomena and the communicative power in the area of St. Paul's Cathedral in London, in the early modern age. This work is very well structured and has produced fascinating results. The area surrounding the cathedral has been virtually reconstructed with great accuracy, on the base of several old images as paintings and drawings. At the same time, the speech of John Donne and the entire soundfield (crowd murmur, church's bells, dog barking, birds twitters, horses) has been auralised (AZEVEDO, MARKHAM, WALL 2013). On the website where the full project is presented (<https://vpcp.chass.ncsu.edu/>), the user can choose 8 different positions within the churchyard from which to see the reconstructed surrounding area of the church and listen to the sermon accompanied by different soundscapes.

One of the archaeological sites that is quite intriguing from an acoustics perspective is Stonehenge. Many scholars still wonder which was the function of such site: the most widespread hypothesis is that it would have been employed for ritual and ceremonial purposes, therefore the interest to study and reconstruct the soundfield a Neolithic man used to listen to (FAZENDA 2013; FAZENDA, DRUMM 2013). The last acoustic researches about Stonehenge took advantage of 3D modelling and the real reconstruction of the site at Maryhill (Washington, USA) since it is not completely preserved nowadays. The approach to the study of the acoustics of Stonehenge and its auralisation is more advanced than simply knowing the acoustics characteristic of the place or experiencing a ceremony at Neolithic time. In this case, scholars think to acoustics and auralisation as instruments for archaeological interpretations

and to raise new questions: was the circles of stones build to valorise the acoustic aspect of the rituals? What kind of knowledge the Neolithic man had about acoustic phenomena?

The auralised files are contained in the interactive Soundgate app (<http://www.emaproject.eu/content/soundgate-app.html>). It shows the hypothetical reconstructions of the site at different times and it allows to listen to the auralised sound of an ancient bird bone flute which was found nearby. The night visualization of the reconstruction of Stonehenge is accompanied by the sound produced by different birds, owl, nightingale and corncrake.

This is only a short list of digital applications related to both auralisation and archaeology, but there are not many more, unfortunately.

Even by this short list, a couple of characteristics are evident: the auralisation in archaeology is chiefly used to offer experiences; the most popular sites for auralisation are churches (among the cited ones, we can mention also Agia Sophia in Istanbul (PENTCHEVA, ABEL 2017) and San Vitale in Ravenna (KNIGHT, TRONCHIN 2020), in the context of the contemporary pandemic known as the plague of Justinian. The ordered sequence of reverberant aural encounters at San Vitale is posited as a method of spiritual and physical cleansing. The original metrical verse in the atrium of San Vitale refers to the church as an arcem (stronghold, for instance). The case study of Stonehenge is interesting since it differs from the majority, not only because of the typology of the site but because the aim is to investigate through auralisation the Neolithic society which used to have activities in that space. Archaeology could benefit from the implementation of the auralisation if we start considering the latter as an interpretative instrument. We can inspect the results of the auralisation from a different point of view: was the acoustics of that space good according to subjective perception? Was the people who built it aware of the architectural rules for good acoustics? Did the sound there evoke specific emotions or feelings? Did the acoustics have a particular meaning, or role, at a specific time or place?

The importance of the role of auralisation in archaeological contexts may be strengthened if more archaeologists would be involved and interested in such researches. As we can see from the short literature review presented, the majority of the studies about this topic have been published by journals of acoustics scope and none by archaeological journals.

## 2. VR APP “ROMAN THEATRES”

Ancient theatres have been quite well investigated from an acoustic perspective but, mainly, such kind of studies focus on the acoustic characteristics of these ancient buildings and less on the recreation of typical sounds of those spaces. Moreover, such kind of researches remains in the academic



field, available and comprehensible only to specialists, without any involvement of or communication to the general public. An exception is the investigation of the acoustics of the ancient theatre of Paphos (Cyprus), which has combined acoustic measurements, auralisation and digital application (TILL 2019). Through Soundgate application (already mentioned before) the user can visualize the 3D reconstruction of the Roman phase of the theatre and listen to several auralised files: waves, local birds and two Roman musical instruments played directly by the user.

The research presented in this paper is the final step of a wider PhD study finished in 2018 (MANZETTI 2018). It sees the development of a virtual application for Oculus Rift, which enables the user to explore the 3D reconstruction of six Roman theatres located in Crete and, at the same time, to listen the auralisation of an ancient performance from different seats. The VR application can be downloaded at <http://romantheatres.ims.forth.gr> (created by Aris Kidonakis). The main aim of this VR application, developed through Unity, is to virtually bring back to life these ancient theatres and to experience the feeling of being a spectator in the past Roman times.

The VR application has been created through four main steps:

1. 3D modelling and texturing of six of the Roman theatres of Crete (the theatre of Apta, the theatre of Hersonissos, the theatre on the acropolis of Gortyna, the theatre of the Pythion at Gortyna, the theatre at Kazinedes at Gortyna and the theatre of Koufonissi);
2. Auralisation of an anechoic file from several seats spread in the cavea of the 3D models of the six theatres;
3. Creation of icons and informative panels for each theatre;
4. Development of the VR application through Unity3D, a cross-platform game engine.

### 2.1 Step 1

The 3D models have been created after having collected and studied the available documents about their architectural structure. The virtual reconstructions of these theatres are the result of several analyses and interpretations of the data acquired: comparisons with other Roman theatres in Rome and all the Empire, description of the architecture of the Roman theatres by Vitruvius, overlapping of aerial pictures with ancient plans and geophysical maps, 3D visibility analysis and virtual acoustics analysis (MANZETTI, PARTHENIOS 2018).

3D Studio Max 2016 is the software used to realize and texturize the 3D models. The materials applied to the surfaces of the objects composing the 3D models are Mental Ray materials and consequently, the renderer has been set on NVIDIA mental ray. Mental Ray materials have been preferred to

others because they offer sets of materials specific for architectural rendering (as Arch&Design Material) and a kit with pre-set characteristics for some materials, like stone and hardwood, which are present in the reconstructions of ancient theatres. Furthermore, the Mental Ray renderer eases the procedure of lightening of the scene, generating “correct simulation of lightening effects”. Being an outdoor scene, the daylight system has been used in all the 3D reconstructions of the theatres, setting the real latitude, longitude and northern direction of the position of each theatre. To create a more faithful reconstruction, the terrain in its real shape has been used along with the 3D models of the theatres. Unity is a real-time engine and to maintain the characteristics set through the choice of the materials plus lightening and shadows in 3D Studio Max, the baking texture option has been chosen. Thanks to a texture procedure, it is possible to record in one image all the characteristics of the procedural texture applied to the object, which means it records the effects of the light on the object, the reflections coming from other objects and all the characteristics of the material set for that texture. After having mapped again the new images on the 3D models, they have been exported as .fbx, to easily import them in Unity.

## *2.2 Step 2*

The auralisation was performed through the software Odeon Room Acoustics. For each theatre few audio files, from five to eight (depending on the size of the building), have been auralised for different positions of the cavea.

The anechoic file has been recorded in the laboratory of the Institute of Acoustics and Sensors “Mario Corbino” at the CNR of Rome Tor Vergata, with the collaboration of Dr Paola Calicchia, Dr Cristina Pace and Martina Giovanetti. The latter is a student of Classical Philology at the University of Rome Tor Vergata and she played a monologue in ancient Greek from the work “The Trojan Women” by Euripides, which has been recorded in the anechoic room of the above-mentioned laboratory. The recorded file, which is about four minutes long, has been imported in the project of each theatre in Odeon Room Acoustics and it has been automatically convolved with the impulse response recorded by the receivers placed in the cavea. Simplifying, the impulse response contains the information about the acoustic characteristics of the building (which depend on its architecture) and this is the reason why through the auralisation it is possible to create an audio file that corresponds to the real sound in a specific position of a building.

The auralised files of each theatre have been imported in Unity, so that the user can better experience the feeling of presence and, thanks to the possibility to compare various theatres, the user can also understand the influence that the architecture has on the sound. The VR application enables the user to select one of the seats of the cavea from the centre of the orchestra. He/she

will automatically move to the chosen position and will start listening to the auralised file. Then the user can select another seat to move again and listen to the audio file from another position.

### 2.3 Step 3

In order to create a more instructive and educational application, some informative panels have been added for each theatre. Information includes the history and the characteristics of the theatre, its location, pictures, drawings, and details. Each category of panels is represented by an icon and when it is selected it shows the corresponding panels. The book icon is related to the panels about the history and the characteristics of the theatre. They are text panels and they contain very brief information about the state of the art of the monument (who discovered it, when and who documented it, etc.), its architectural structures (the number of sectors in the cavea, the number of seats, etc.), its state of preservation and other typical features. The images icon is connected to panels showing pictures of the theatre, ancient and new plans plus sections, and aerial images. The icon representing the top view of a theatre is related to the drawings panels, which means the plan, the section and the representation of the hypothetical reconstruction of the theatre. The location icon is connected to a panel embedding a video realized through the tool Movie Maker in Google Earth Pro, which shows the full island of Crete from above and then zooms in till the exact area where the remains of the theatre are placed.

The details icon shows a panel about the reliability and accuracy of the 3D reconstruction of the theatre. Three images in the central part of the panel indicate three different sectors of the theatre: cavea, scene and *parodoi*. On the left side of the images, the instruments used to study the theatre and helpful for the formulation of the hypothesis about its architectural structure are listed: archaeological excavations, written sources, ancient plans, aerial pictures, geophysical maps, 3D visibility analysis, and virtual acoustics analysis. On the right side of the panel, the words “reliable, possible and hypothetical” suggest the accuracy of the 3D reconstruction for each sector of the theatre. Accuracy is one of the principles listed in the Seville Charter (LOPEZ-MENCHERO BENDI-CHO 2013) and it is fundamental to explain that the presented reconstruction is not the only possible. When we are dealing with destroyed buildings we can never be sure about their original structure, but some clues (as archaeological remains) bring us closer to reality and some others can be useful only to assume the real aspect of a building. It must be explicitly clear if the 3D reconstruction is based on reliable data and if it is an exact reconstruction rather than a conjecture based on information but without material evidence. This is fundamental if we want to have a scientific approach and if we want to disseminate culture rather than only attractive 3D models.

## 2.4 Step 4

The VR application of the Roman theatres of Crete has been developed through the cross-platform game engine Unity3D (its programming language is based on C#) for Oculus device.

The reasons to opt for Unity instead of other game engines are several. First of all, it is an open-source software that has many functionalities and often does not need any external plug-in since it has numerous libraries embedded. The second main advantage is that it can export to many platforms, more than 25 across mobile, desktop, console, TV, VR, AR and Web. In addition, Unity3D has an asset store from where many packages can be downloaded for free too; it is constantly updated with the latest techniques and tools developed; it allows you to distribute your applications for non-commercial reasons without any fee. Being a VR application, the best device to use is a head-mounted display that allows you to have a 360° view, which enhances the feeling of presence in the virtual world and the sensation to physically live the virtual experience. In addition, some of the head-mounted displays enable the user to easily interact with the objects in the virtual world.

Oculus Rift is the device that has been chosen to be used for the VR application of the Roman theatres in Crete. Oculus Rift has been preferred to the cheaper Google Cardboard for two main reasons: the better quality (the screen resolutions and the quality of the lenses) and its functionalities (the orientation tracking, the gyroscope, the accelerometer and the magnetometer).

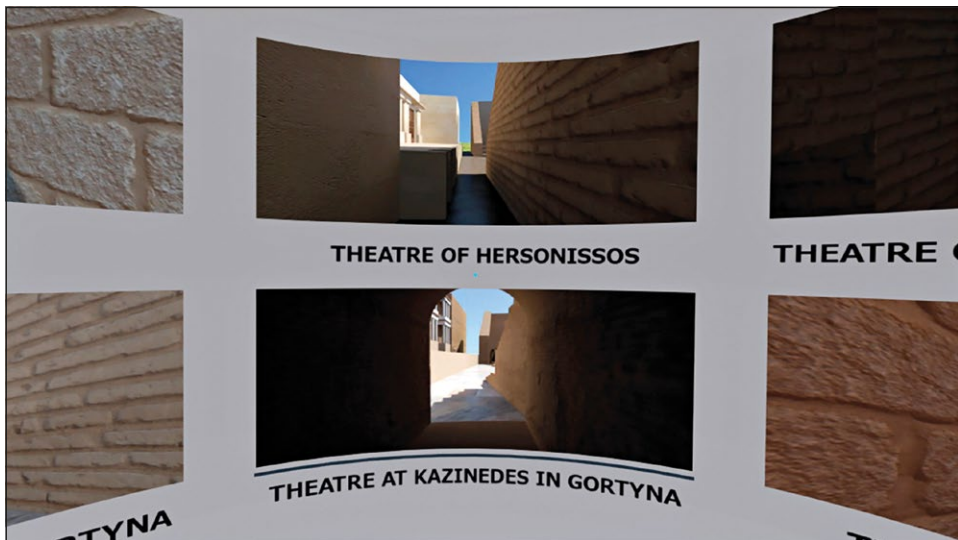


Fig. 1 – Main menu of the VR application of the Roman theatres of Crete.



Fig. 2 – Icons in the theatre of Kazinedes, at Gortyna, in the VR application.

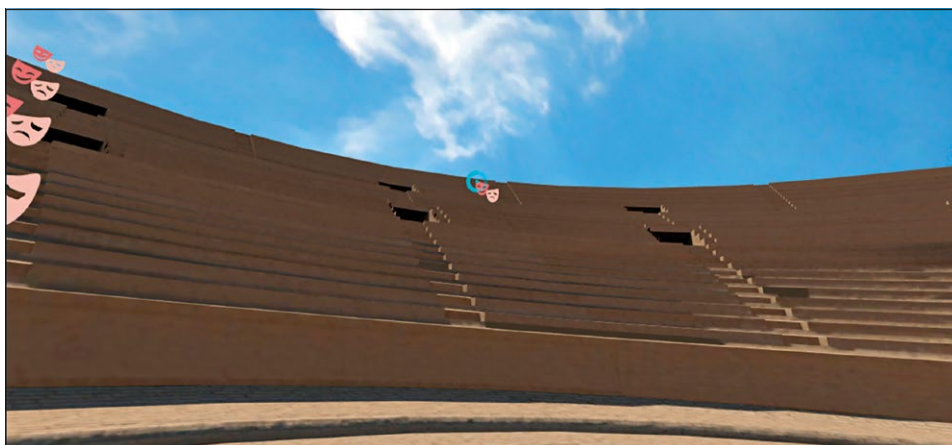


Fig. 3 – Seat selection in the theatre of Kazinedes at Gortyna through the VR application.

Samsung Gear as well is very convenient because it has functionalities too and it has the advantage to be portable, but the quality depends on the graphic card of the mobile used along with it. However, once an application has been built in Unity for Oculus Rift, it can be easily exported for Samsung Gear as well, without any further modifications.





Fig. 4 – View of the stage from one of the seats of the theatre of Kazinedes at Gortyna in the VR application.

The VR application includes six of the Roman theatres of Crete (Fig. 1). The main menu shows six panels with the name of each theatre and with an image of its 3D model.

Once the user targets the name of the theatre he/she wants to explore, after three seconds the user will automatically enter the selected theatre and he/she will be in the orchestra facing the stage and the scene building. In this position, the five icons (book, images, drawings, location and details) are visible and they can be selected (Fig. 2).

If the user looks around, he/she will see several icons representing two theatrical masks, used to indicate the seats of the cavea, that can be selected. Targeting one of the couple of masks, the user will automatically move to the position occupied by the icon from where he/she can look at the stage, and at the same time listen to the auralised file (Fig. 3). Moving across the different positions indicated by the masks, the user will be able to appreciate the diverse acoustics according to the distance from the source and to the architectural characteristics of the space (Fig. 4).

During the creation of the VR application, some issues arose. One of the main issues concerned the size of the application: several scenarios (six different 3D models of theatres accompanied by the correspondent terrains) are contained in the Unity project plus videos, audios and images for each one of them. The application is consequently very heavy in terms of volume



size. In order not to burden it even more, some modifications have been made, as decreasing the quality and the length of the videos and removing trees from the 3D models. The second issue noticed is that the visualization through Oculus is not optimal: it is not completely clear, the pixels and the grid between the pixels are visible, producing the so-called “screendoor effect” (the Oculus version used during this research is the development kit 2). This feature makes it harder to focus on details, therefore also reading texts might be annoying through Oculus.

The next step to improve the VR application dedicated to experiencing and knowing the Roman theatres of Crete, will be to create an evaluation test about the ease of use, the ease to learn from the application, the level of entertainment, the level of comfort in using Oculus. The questionnaire will be presented to people of various age, various type of education, and various cultures.

Once the VR application about the Roman theatres in Crete will be improved and enhanced, it would be interesting and attractive to use it directly in the involved archaeological sites. The 3D models along with a VR application facilitates the learning process so that visiting an archaeological site is going to become both an educational and exciting experience. Such a formative experience will motivate a larger part of the society to visit archaeological sites and museums, facilitating the economic and scientific growth of these cultural institutions.

### 3. CONCLUSION

This paper briefly shows the current relationship among archaeology, auralisation and digital applications plus a new approach and a new VR application that exhibits the fruitful combination of the above-mentioned different disciplines.

The cooperation of such disciplines is offering a unique experience for visitors of museums and archaeological sites. Such kind of experiences can be a powerful instrument to attract society towards culture and history with the resulting educational enhancement of people. This aspect is without any doubt important and specialists should improve the number of similar products addressed to the general public. However, this is not the only advantage of combining archaeology, auralisation and digital media, and unfortunately, other meaningful aspects are still a bit neglected.

Auralisation should be considered a real technique to apply in many archaeological contexts and not only churches or ritual spaces. The research about acoustics in ancient theatres can be expanded with a deeper archaeological focus: what kind of performances used to take place? Which were the subjective perceptions and the feelings theatrical performances used to evoke? Did ancient theatres have different acoustic quality according to the

cultural and technical knowledge of the place? In addition, more sites should be considered as Roman basilicas where the emperors used to communicate with people, ancient courts, *mausoleum* and other funerary spaces, battlefields, prehistoric settlements, with subsequently other questions as: did ancient people use sounds to provoke specific emotions in the individuals?

The study of acoustics and the auralisation of such places will highlight new insight into past civilizations. Planning a standard methodology for the auralisation of ancient spaces would provide a rigorous approach that would assure consistent and meaningful results. In order to achieve important archaeological information from auralisation, scholars from different disciplines must cooperate at the same level and towards the same directions to answer punctual research questions. Among the specialists, beyond archaeologists, historians, acousticians, actors, experts of psychoacoustics are also indispensable. The combination of psychoacoustics and archaeology would determine a phenomenological approach able to investigate the perceptions of past societies in specific contexts or events.

MARIA CRISTINA MANZETTI, NIKOS PAPADOPOULOS  
Laboratory of Geophysical-Satellite Remote Sensing &  
Archaeoenvironment  
Institute for Mediterranean Studies  
Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH)  
cristina@ims.forth.gr, nikos@ims.forth.gr

## REFERENCES

- AZEVEDO M., MARKHAM B., WALL J.N. 2013, *Acoustical archaeology-recreating the soundscape of John Donne's 1622 gunpowder plot sermon at Paul's Cross*, in *Proceedings of Meetings on Acoustics 19 (Montreal 2013)* (<https://doi.org/10.1121/1.4799054>).
- FAZENDA B. 2013, *The acoustics of Stonehenge*, «Acoustics Bulletin», 38, 32-37.
- FAZENDA B., DRUMM I. 2013, *Recreating the sound of Stonehenge*, «Acta Acustica United with Acustica», 99, 110-117 (<https://doi.org/10.3813/AAA.918594>).
- GRAZIOLI G. 2020, *ArcheoEchi. A virtual reconstruction of a medieval cathedral in Southern Italy*, «Engineering Brief», 618 (<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=20904>).
- KNIGHT D.J., TRONCHIN L. 2020, *San Vitale's aural networks in the context of pandemic and transformation*, «Journal of Physics: Conference Series», 1655 (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012130>).
- LOPEZ-MENCHERO BENDICHO V.M. 2013, *International guidelines for Virtual Archaeology: The Seville principles*, in C. CORSI, B. SLAPŠAK, F. VERMEULEN (eds.), *Good Practice in Archaeological Diagnostics: Non-invasive Survey of Complex Archaeological Sites*, Cham, Springer, 269-283.
- MANZETTI M.C. 2018, *An Interdisciplinary Approach for the Study and the Valorization of the Roman Theatres of Crete*, PhD Thesis, School of Architectural Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece.
- MANZETTI M.C., PARTHENIOS P. 2018, *A new methodology for ancient theatre architecture hypotheses verification*, in *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on Virtual Archaeology (Saint Petersburg 2018)*, 122-126.

- PENTCHEVA B.V., ABEL J.S. 2017, *Icons of sound: Auralizing the lost voice of Hagia Sophia*, «Speculum», 92, S336-S360 (<https://doi.org/10.1086/693439>).
- SIKORA M., ĐANA G., RUSSO M. 2016, *A tool for soundscape auralization of ancient archaeological sites*, Paper presented at the 7<sup>th</sup> AAAA Congress on Sound and Vibration (Ljubljana 2016), 22-23.
- SIKORA M., RUSSO M., ĐEREK J., JURČEVIĆ A. 2018, *Soundscape of an archaeological site recreated with Audio Augmented Reality*, «ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications», 14, 3, 1-22 (<https://doi.org/10.1145/3230652>).
- TILL R. 2019, *Sound archaeology: A study of the acoustics of three World Heritage sites, Spanish Prehistoric Painted Caves, Stonehenge, and Paphos Theatre*, «Acoustics», 1, 661-692 (<https://doi.org/10.3390/acoustics1030039>).

## ABSTRACT

This paper aims to present the advantages of including auralisation techniques in archaeology. Archaeology can benefit from auralisation under several aspects. Not only does it offer the possibility to live a unique experience listening sounds originated within ancient buildings, but it allows to formulate subjective interpretations of the quality of the audio of a specific space. In addition, the subjective feeling evoked by the auralised audio can be further investigated through psychoacoustics analysis. The combination of archaeology and auralisation is also attractive for the general public thanks to digital applications that can be employed for educational purposes. The involvement of society through digital applications is important to bring it near to research and archaeology. After a short literature review about the implementation of archaeology, auralisation and digital applications, the final elaboration of a PhD research will be presented: the development of a virtual reality app that shows the 3D reconstruction of six Roman theatres in Crete, including the virtual auralisation from different seats within the theatres. The VR app is the ultimate product of a research that studied hypothetical reconstructions of the Roman theatres in Crete through 3D visibility analysis and virtual acoustics analysis. Through the VR app, users will not only experience an ancient performance in different Roman theatres, but they will also be able to observe the influence of architecture on the sound.

## NOT ONLY PAPER: COMPUTER ENGINEERING TO CONTRAST THE ECLIPSE OF THE AUDIO DOCUMENTS. THE CASE STUDY OF A PERSONAL ARCHIVE

### 1. INTRODUCTION

The introduction of electronic and information technology into art gave rise to new challenges for archives and for the preservation of cultural heritage. If technology has been a stimulus to new forms of artistic creation, at the same time it also becomes the cause of their rapid deterioration and an ever shorter life expectancy. Their great dependence on technology makes them particularly vulnerable and there is a serious risk of losing an important part of today's culture. Music, also due to its immaterial nature, was one of the earliest types of art to explore the creative use of new technologies: new musical forms have assumed an increasingly artistic importance since the second half of the last century (BRESSAN, CANAZZA 2014).

The conservation of this heritage presents very different problems from those posed by traditional artworks. To safeguard this heritage, it is not enough to digitize the content of recordings and documents, but the performance practice must also be preserved. That is, it is necessary to preserve all the elements that allow us to understand and reconstruct the set of production processes of the work, from the specific details of the composition to the technological system and the operating practices used (PRETTO *et al.* 2018).

Notice that the performative or behavioral aspect is rarely documented in detail, and when it is, the documentation refers to the technology of the time in which the work was produced. Often only the author's notes and annotations in his personal archive are available. Therefore, every effort must be made to keep and make accessible all information relating to the work, the equipment used and the performance practice. To this purpose it is very important to properly address the problems of personal archives preservation and access (ORIO *et al.* 2009).

This paper is organized as follows: the first part discusses the main issues for the conservation of audio documents; then it presents a well-tuned *re-mediation* methodology, an artificial intelligence based approach to detect audio tape *discontinuities* and finally access tools for renovating the listening experience of old analogue media. The second part first discusses the issues for personal archive preservation in the digital age, focusing on archive content and inventory description and detailing how audio documents should be preserved. Then we present, as a case study, the design and development of an information management system allowing the long-time preservation

and the access to different documents, among them: audio, letters, musical scores, and manuscripts. Finally we draw some concluding remarks and give directions for further work.

## 2. COMPUTER ENGINEERING AND AUDIO DOCUMENTS

Many documents are in the analog domain (e.g., paper, magnetic tapes, phonographic discs, film). These must be transferred in the digital domain, in other formats with different encoding (re-mediation), for public access (access copy) and long-term preservation (preservation master, stored in different copies and locations, locally and in the cloud).

The fifty years of experience gained at the Centro di Sonologia Computazionale (CSC) in music production has led to the definition of a scientific methodology of the audio documents active preservation (FANTOZZI *et al.* 2017) based on two pillars: (a) the multidisciplinary nature of the team researchers involving engineers, musicians, musicologists, composers and archivists, and (b) the philological accuracy with which the digital tools developed preserve the history of the transmission of the audio document, thanks to the set of metadata and ancillary information included in the digital master conservation (VERDE *et al.* 2018).

The original document active preservation phase must produce a digital conservation master that meets the requirements of reliability, accuracy and authenticity. An exhaustive documentation of the entire conservation process, including a description of any restorative interventions carried out on the original support, assumes particular importance in order to preserve the history of the transmission of the object under protection. In accordance with international provisions, the transfer process is divided into three phases: preparation of the support, transfer of the signal and processing of the collected data (BRESSAN, CANAZZA 2013). Each phase in turn includes many steps that involve different professional figures: archivists, chemists, composers, engineers, musicians, musicologists, audio technicians. The result is a multidisciplinary work whose success also depends on the dissemination and sharing of these practices among the archives.

Even before the analog/digital (A/D) transfer of the signal, complete photographic documentation must be collected to testify the conditions in which the material is concerned, and information on the support that would be lost with its future deterioration (any signs written on tape, size, etc.). The study of the degradation mechanisms of magnetic tapes is a wide and still open field that must take into account the chemical characteristics of each material (BRESSAN, CANAZZA 2015; BRESSAN *et al.* 2016). Equally complicated is the measure of a syndrome degree in a tape, some of which, such as Soft Binder Syndrome-Sticky Shed Syndrome (SBS-SSS), can only be diagnosed at the

time of A/D transfer. Actions such as the visual inspection of the document and any recovery treatments, cannot be underestimated and must be entrusted to specialized personnel able to access appropriately equipped chemical laboratories. It is necessary to objectively describe the state of conservation and define a priority order of intervention before proceeding with the A/D transfer of the signal. The use of modern reproduction machines appropriately calibrated and compliant with the recording format of the document in question is recommended. In particular cases, such as the collections of electroacoustic music archives, it is advisable to combine the audio monitoring of the document with the video recording of the tape running on the player. The video will integrate the series of ancillary information that complete the digital conservation master and may be future object of study, leaving traces of any corruption or signs of processing present on the tape (which can be extraordinarily informative from the musicological point of view). Extracted data must be validated with appropriate software in order to ensure the authenticity of the document and help in the philological study of the document.

The preservation of audio documents has as its natural objective of allowing scholars and/or the general public to access the information stored. This phase cannot involve the preservation master, which must be left unaltered: appropriate access copies must therefore be created. Only the latter can be used by third parties and can be subject to digital restoration for concert purposes or for a commercial edition.

### *2.1 Re-mediation*

The archives must (i) minimize the information loss with respect to the original document (audio information, metadata and contextual information), and (ii) keep track of the document provenance, of the re-mediation process (Fig. 1) and of the re-mediation system.

The preservation master includes: (i) a list of all the files contained in it, information on the origin of the original document, the data relating to each audio file, the location where the A/D transfer took place and the technician responsible for the transfer; (ii) the audio data at high resolution (96kHz/24bit); (iii) photographic documentation of the support, its case, box or envelope and accompanying material, and a technical sheet describing the transfer; (iv) video recording of the tape running on the player; (v) first level metadata: three types of audio data checksum; second level metadata: technical specifications of the file formats included in the preservation master (BWF/WAVE, pdf, ...).

### *2.2 Artificial Intelligence for musical cultural heritage*

An initial visual inspection of the original (analogue) document by the technician may show the presence of several alterations of the carrier (tape,



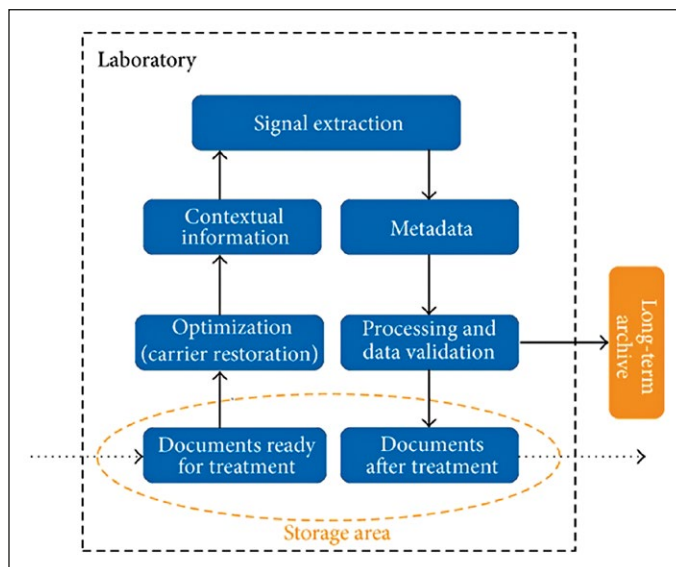


Fig. 1 – Scheme of the re-mediation process. Each step is articulated in procedures and sub-procedures.

film, paper) such as blocking, leafing, windowing, spoking, or embossing, fungi and molds. This first stage is essential to determine whether or not the carrier has to be restored prior to digitization. Nonetheless, some corruptions and other *discontinuities* can only be detected during the digitization process, after the visual inspection. Consequently, both these two stages become particularly important to evaluate the preservation condition of the document.

The term Point of Interest (POI) will be used henceforth to indicate all the carrier alterations (or discontinuity or irregularities) from its original manufacture state that are visually detectable. Although not strictly an alteration, manufacturers may print their brand name or logo on the carrier itself (on the back of the tape, on the box of the film, on the envelope of the paper). As necessary and useful information for the identification of the document, brand markings will also be considered a discontinuity.

All the POI included in the methodology defined at CSC during are listed below:

- L-M splices (*lmsp*). Splices of leader tape to magnetic tape (or vice versa).
- M-M splices (*mmsp*). Splices of magnetic tape to magnetic tape.
- Brands on tape (*b*). Most of the brands consist of the full name of the tape manufacturer, logo, or tape model codes. The brand changes in size, shape, and color, depending on the tape used, thus complicating the classification task.



Fig. 2 – Area of the tape recorder reading head.

- Ends of tape (*eot*). It refers to what happens when the tape reaches its end of playback, at which point it is neither under tension nor in contact with the capstan and pinch roller. The distinguishing visual characteristic of this class is the tape coming free – or completely detached – from the capstan.
- Damaged tape (*da*). It groups all kinds of damages on the surface of the tape and alterations of the tape shape. This class includes:
  - a) Ripples. This is formally known in the cataloguing rules as “kink” or “wrinkle,” these may be a single crease on a layer of tape or multiple creases in the tape. This class groups all the alterations in the shape of the tape, such as cuppings and damages on tape edges.
  - b) Cupping. An abnormal flexure of the tape surface across or along its width, due to different rates of shrinkage along the substrate and recording layers.
  - c) Damage to tape edges. It occurs when the edges do not appear flat or straight.
- Dirt (*di*). Tape contamination and dirt: presence of mold, powder, crystals, other biological contaminations, or similar sullyng.
- Marks (*m*). Signs or words written on the back of the tape (i.e., the non-magnetic side) or on the adhesive tape of splices. Similarly, the presence of ink or dye on the surface of the tape, or writings on the back seeping through the tape to the front, comprise the phenomenon of “bleeding”.
- Shadows (*s*). The class contains frames in which shadows or reflections are temporarily cast on the tape by external objects in motion.

The *Video Analyzer* software developed at CSC aims to detect the significant frames from the digital video. The detection is focused on two areas. The first one is the reading head of the tape recorder (Fig. 2). The second one is under the pinch roller (Fig. 3). The *eot* and *s* irregularities are detected



Fig. 3 – Area under the pinch-roller.



Fig. 4 – A POI pop-up with a frame of a splice correctly detected. The technician in the digitizing lab can confirm or reject the correctness of the result.

evaluating the pinch roller change of position. The others are evaluated in the first area. Significant frames are extracted comparing consecutive frames. If there are important color changes between the two frames (Fig. 4) the last one is indicated as significant. The implementation is based on OpenCV libraries.

The CSC proposes an algorithm that classifies the images provided by the video analyzer using the neural network GoogLeNet, Keras libraries and TensorFlow.

A good data set for supervised training must be large enough to cover the different circumstances that may occur. In addition, class imbalance should be minimal: the number of elements in each class must be similar. Our data set was built from more than 100,000 documents obtained from a number of preservation projects carried out at CSC. Among others, the most representative are: Paul Sacher Stiftung Archive, Luciano Berio's collection (tape music, electronic music); Luigi Nono Archive, all collections (tape music, electronic music); Teatro Regio di Parma, all collections (opera, Western classical music, pop/rock); Tullia Magrini Archive (ethnomusic); Istituto per i Beni Artistici, Culturali e Naturali of the Region Emilia Romagna (ethnomusic, speech), Fondazione Giorgio Cini, Venezia. PRETTO *et al.* (2020) describes the projects and summarizes results, reporting statistical data.

The accuracy measured is in the range of 70% to 100%, depending on the carrier and on the discontinuity. It is the first approach of this kind in the scientific literature, and the positive results prove its potential. To obtain a more reliable tool, however, a larger and more balanced data set of frames is required to train the convolutional networks. Moreover, further research can improve the detection rate and the classification quality.

### *2.3 Preservation is nothing without access*

The access methodology is complementary to that of active preservation (see Section 2.1), sharing its ultimate goal: to obtain a copy as faithful as possible to the original. Fidelity must be assessed according to three distinct criteria: (a) the reproduction of the audio content, (b) the simulation of the original listening experience, and (c) the completeness of metadata and contextual ancillary information. The first criterion is mainly determined by three factors: number of tracks, playback speed and equalization. The first factor is essential as an analog magnetic tape can accommodate 1 to 24 different sound tracks. It is evident, for example, that a stereo CD-A player is not suitable for the reproduction of audio coming from the dubbing of a multitrack electroacoustic music tape, not allowing the acoustic projection of the different tracks independently. As for the second factor, it is not uncommon to find sections of the same tape recorded at different speeds. The methodology perfected at the CSC in Padua foresees the memorization in the conservation master of several digital copies of the tape reproduced at different reading speeds: also in this case the passage from one speed to another is far from easy using general purpose digital readers. It is even impossible with CD-A players. The reproduction speed is also closely linked to the equalizations: as the first one changes, the characteristics of the filtering

curve also change. If this is not considered, the listening will no longer be faithful to the original document.

Since electroacoustic music on magnetic tape is strongly linked to the physical medium and the recording system, the virtual simulation of the peculiarities of the device and its use is a necessary step to satisfy the second criterion. Traditional access methods, such as the CD-A edition or listening through software jukeboxes, are inadequate to restore the listening experience of old analogue media, as they do not respect the characteristics of the original document, in addition to not providing adequate access methods to metadata and ancillary information. The reproductions of the appearance, of the commands (real-time modification of the speed and equalization) and of the moving parts of the tape recorder (running of the tape) are important to make the virtualization of the playback tool complete. CSC (CANAZZA, FANTOZZI, PRETTO 2015) has created various software for mobile devices and for web access to the most popular readers of analogue sound documents of the 20<sup>th</sup> c. (e.g., tape recorders, gramophones, turntables). An example is shown in Fig. 5. The main activity of REMIND app provides a skeuomorphic representation of the Studer A810-VUK 2-track audio recorder. The overall appearance of the tape recorder is virtualized with touch buttons (play, stop, fast forward, rewind and reset of the timer) and knobs (allowing to change replay speed and equalization). A video shooting, synchronized with the audio signal, of the original magnetic tape is shown. Several other features are represented, such as the movement of the tape with the rotation speed of each reel that is proportional to the amount of tape left in the reel and the timer. The user interface (UI) is implemented with a custom Java subclass of the



Fig. 5 – The main activity of REMIND app. A video of the original tape is shown outside the body of the tape recorder to improve its readability.

standard Android class View. Nearly all of the UI classes that appear in the main activity are custom: not only for the personalization of the appearance and behavior of the UI elements, but also to exploit hardware acceleration. The custom UI elements are 3D objects rendered into a Canvas allowing a consistently high frame rate for moving objects, and, at the same time minimizing the impact on the CPU. This choice also simplifies the scaling of the elements to support multiple display resolutions.

Looking ahead, these algorithms will be implemented online and will be able to virtually reproduce an analog player. Users will thus be able to benefit from access copies, free of charge or with subscription services, and these software applications will be useful in the musicological analysis.

### 3. THE CASE-STUDY OF A PERSONAL ARCHIVE

#### 3.1 *Personal archives*

Personal archives represent a particular type of private archives whose characterizing and unifying element is the individual who produced them. This peculiarity makes them organic complexes, within which the individual parts acquire full meaning. All media – not only paper – are considered to be relevant sources as long as this relates to the life, memories and experiences of a person. The material is no longer exclusively of a written, photographic, audio or video nature; more and more new kinds of materials are present with specific conservation problems. The archives of certain professional categories can be peculiar for the type of material stored: for example, the architects' archives generally preserve, in addition to letters and other documents commonly found in private archives, materials such as drawings, sketches, tempera, collages and other materials referable to project drawings, as well as, in the most fortunate cases, collections of models. The musicians' archives store musical instruments and audio documents. The heterogeneity of the materials stored in the private archives requires particular care and a well-tuned scientific methodology.

Until a few decades ago, personal archives were not objects of archival interest: considered *different archives*, they aroused historical, historical-artistic, or literary attention for a particular preserved document. Personal archives as independent nuclei developed at the moment in which the greater awareness of each individual to be able to be an *artifex* of his own destiny and that his life experiences can be a potential source of historical and cultural interest. Traditionally, documents that are maintained by an organization vs. by an individual or a family have been considered distinct entities. Today's archivists recognize that both are bodies of interrelated materials that have been brought together because of their function or use. Archivists respect and seek to maintain the established relationships between individual items in records groups and in personal papers (DANIELS 1984).



This recognized importance poses new challenges to the management and preservation of personal archives, which are often born without the long-term preservation aim. The heterogeneity of the materials stored, the peculiarities of each archive, the differences in the criteria and purposes of the individual, who produced the archive, requires a specific effort for the analysis, management, preservation and access of the archive content.

Many see the digital age as bringing an opportunity to leave an important legacy for future generations. During the past decade archives embraced digital technology to enhance user access and experiences and long-term preservation. The use of digital technologies encourages visitors to actively engage with the archive in a remote way. Due to the lower economic profitability compared to large archives, due to the lack of attention of national and international archival associations, due to the scarcity of funds, due to the difficulty, for a small archive, of getting to use archival/IT experts, and despite the archival/cultural importance of the documents in their possession, personal archives often have not yet adopted information technology. Existing systems are very often specific to the archive for which they were made. For instance, the database management systems included in <http://www.archivi.beniculturali.it/> (Italy) and in <http://www.archivesportaleurope.net/home> (Europe) only allow to trace where a particular personal archive is kept, whose existence is already known; there is a lack of standardized tools for searching within archives.

The consolidated methodologies for institutional archives are not always sufficient to manage this new type of archives, with their peculiarities. It is therefore worth discussing the most appropriate methodologies. The methodology, in addition to considering the analysis of the content and the organization of the archive, must also oversee the design and development of the computer system for the management and the access to the archive, also in view of the evolution of information technology. Standardized tools must be provided for interoperability between different systems.

### 3.2 *Inventory description*

The term *fond* is often used in the Continental system to indicate the entire body of records of an organization, family, or individual that have been created and accumulated as the result of an organic process reflecting the functions of the creator (PEARCE 2005). It should be viewed primarily as an *intellectual construct* and thus as the conceptual *whole* that reflects an accumulation process of the records which themselves exhibit a natural unity (COOK 2011).

Before addressing any description, a global examination of the *fond*, a sort of overview from above, is particularly indispensable for personal archives. These archives are generally devoid of repertoires but lacking in indications on the criteria adopted in the conservation of the papers. Dealing

diligently with one document after another, neglecting the archival ensemble, its history and internal stratifications at various levels limits the correct historical-biographical placement of the papers, making the description incomplete, if not downright misleading. In all cases in which a personality has kept private documents accumulating them without apparent organization or directions, the archivist can and must try to immerse himself in the subject's working method through the traces that may have remained, then bringing him back to the organization of his papers. The archive should also keep track of the organization that the person had given himself.

Especially for personal archives, the inventory description must provide information both on the archival unit in question as well as on the producer subject and on the historical context, and at the same time make clear and explicit the relationships between the units and the complex they belong to. Librarian-economic descriptions, often managed through software designed for book cataloguing, which in the past were used for personal archives, present this main shortcoming: they do not sufficiently highlight the links between an archival unit and another. Often, the literary or artistic importance of individual documents preserved in personal archives, such as can be considered *artistic objects* even beyond the historical context in which they are located, requires an analytical description. The inventory structure proves to be the fundamental tool for a global vision of the archive. A specific search can then be very well supported by descriptions managed on a database, the more appreciable the more the computer tool is able to reproduce the complexity of the documents. Today there is a tendency to consider as *objects* archival documents that were once divided between archives, libraries and museums (books, photographs, prints, collections of postcards, ornaments, relics, medals). The information management system should allow the virtual recomposition of personal archives divided among several institutions, cities or countries. Alongside the classic juxtaposition of multiple inventories, it should be possible to achieve a real virtual integration of both descriptions and documents in digital form. Without forgetting, however, that the inventory description has a completely different purpose from digital reproduction: it is a *mediation tool* allowing the scholar to trace, define, identify, understand the document, where digital reproduction is the very useful and perfect copy of the original document.

#### 4. CASE-STUDY: ELECTRONIC MUSIC

##### 4.1 *Luigi Nono and Luigi Nono Archive*

Among the various activities that CSC is carrying out (CANAZZA, DE POLI 2019), the personal archive of the Luigi Nono Archive Foundation (ALN) is an important case-study, because both the interest raised by the Archive at

the musicological and cultural level, and the heterogeneity of the materials contained, but also because Luigi Nono worked at the CSC in 1984 to create the computer part of his last opera *Prometeo-Tragedia dell'ascolto* (1984-85).

Musical language of Luigi Nono (Venice, January 29, 1924-Venice, May 8, 1990) in the 1950s clearly places him as one of the major exponents of the post-Webernian avant-garde, but his artistic personality expresses the desire to overcome the formalisms of serialism in order to re-propose the unity of the sound phenomenon in a highly original way. In 1956 *Canto sospeso* (for solo voices, chorus and orchestra, based on texts from letters of members of the European Resistance movement who were condemned to death) was the first of his works to gain international recognition.

In the 1960s he began working at the Studio di Fonologia Musicale of the RAI in Milan, discovering the musical potential of the electronic medium, used both independently and as part of compositions for soloists, ensembles, large orchestras and in musical theatre works. In those years his research on sound and electroacoustic space merged with a very strong ideological drive on a political level, intensely felt, which was reflected in the compositions of this period and which placed him in a unique position on the post-war musical scene. These works include *La fabbrica illuminata*, *Ricorda cosa ti hanno fatto in Auschwitz*, *A floresta é jovem e cheja de vida*, and the opera *Al gran sole carico d'amore*, premiered in 1975.

The composition ... *sofferte onde serene* ... (1977) marked the turning point towards a new, more introspective creative period, which evolved in the 1980s into a research path with the Live Electronics of the Experimental studio der Heinrich Strobel Stiftung des Südwestfunks E. V. in Freiburg (Breisgau). In the space of a few years, Nono renewed his compositional technique, conditioned by the rigidity of magnetic tape, creating a group of soloists specialised in the technique of 'mobile sound', in the use of micro-intervals and in interaction with live electronics. Starting with *Das atmende Klarsein* (1981), for bass flute, small choir and live electronics, the journey towards the opera *Prometeo, tragedia dell'ascolto* with texts chosen by Massimo Cacciari, for soloists, choir, four instrumental groups and live electronics. The first performance took place in 1984 in the Church of San Lorenzo in Venice, where Renzo Piano built an architectural structure with the aim of gathering performers and audience inside a *new instrument* for listening to music in space<sup>1</sup>.

ALN was created in December 1993 in Venice, through the efforts of his widow, Nuria Schoenberg Nono, for the purpose of housing and conserving the Venetian composer's legacy. ALN was declared "of local interest" in

<sup>1</sup> For an in-depth study of Luigi Nono's work, see DE BENEDICTIS, RIZZARDI 2018.

1994 by the Veneto Region (Italy) and ‘of considerable historical interest’ in 2000 by the Archival Superintendence, Italian Ministry of Cultural Heritage.

The Archive was founded as an Association, later transformed into a Foundation (FALN) in 2007 and thereafter placed in its current location, the ex-convent Saints Cosma e Damiano, on the island of Giudecca in Venice. The Archive’s activities are supported by public bodies, national and international sponsors, and by the generous contributions of the Friends of the ALN.

The Archive preserves manuscripts of Nono’s compositions, in particular sketches and preparatory studies (2300 sheets); a collection of open reel tapes (230) and audio-cassettes (90) consisting of recordings of Nono’s works as well as preliminary studies and material for his electronic compositions (sound sketches of considerable importance), and several interviews; manuscripts of essays, articles, lectures and lessons (12,000 sheets); Nono’s correspondence; Nono’s library encompassing over 10,000 volumes (many with marginalia) reflecting the breadth of his interests: music, literature, politics, philosophy, fine arts and sciences; concert programs, reviews and magazine articles; video tapes documenting his life and works and a collection of photographs and slides (6500); Nono’s LP record collection of more than 1200 records<sup>2</sup>.

#### 4.2 *Documents storage*


ALN stored all data in the cloud, keeping a copy locally (on redundant NAS), both of the documents in high resolution and of the compressed files. The aims are: performance, scalability, availability, and long-term preservation. The storage resources are scaled to adapt the possible fluctuations in demand (by the ALN) without upfront investments or resource supply cycles, automatically creating and storing copies of all audio-video-images-documents objects. The data are available at any time to both the Archive and to the users (with different access levels) and are protected from failures. Data are stored and protected from unauthorized access with encryption features and access management tools developed on purpose. Public access is blocked to all objects at the account level and the system operates compliance programs, such as the General Data Protection Regulation, adopted in April 2016, that has superseded the Data Protection Directive and became enforceable on 25 May 2018 (BLACKMER 2016). The storage system offers robust capabilities to manage access, cost, replication and data protection. Because the system works with AWS Lambda, the archive stores log activities and defines alarms. The system is able to perform big data analysis across objects inside the archive with query-in-place instruments.

<sup>2</sup> See DAL MOLIN 2016 for an exhaustive report of the personal papers included in the ALN.

### 4.3 Archive management software system

An archive management software system was developed, combining independent modules and using different programming languages and technologies (mainly Java, MySQL, PHP, and shell scripting). The main purpose is to support the process of active preservation of the documents according to the methodology described above. The expected users are archivists of the archive and scholars and in this sense the user interface assists the operator in (i) the creation of the digital preservation copies and (ii) metadata extraction and ingestion into the database.

The strength of the module is that it ensures the alignment between the data on documents (audio/video/manuscript/etc.) and their metadata in a relational database, minimizing the cognitive load of the operator and reducing the processing time required by each preservation master. The software implements redundant data integrity verification procedures, and optimizes the workflow by batch processing large sets of data and metadata, progressively storing the complete preservation copies in the cloud digital



**LN** admin

**Frontend**

- Ricerca
- Opere

**Backend**

- Lista
- Meta / Registro
- Attachment
- Utenti

**Admin**

- Template
- Meta
- Immagini

**La fabbrica illuminata**

**Identificazione / Identity Statement**

Codice / Identifier	27
Titolo / Title	La fabbrica illuminata
Complemento del titolo / Other title information	Per voce femminile e nastro magnetico
Datazione / Date(s)	1964 (composizione)
Stato / Status	Publiccata
Testi / Texts	Testi di Giuliano Scabia e Cesare Pavese (da "Due poesie a T" per il finale)
Edizioni / Edition(s)	Ricordi, partitura 131242 (1967) Ricordi, nastro magnetico 131321
Esecuzioni / Performance(s)	Venezia, 15 settembre 1964 (prima assoluta)
Note / Notes	Dedica: "Agli operai della Italsider di Genova"

ID	Content	Segnatura	Azioni
11647	Valutazione del lavoro operai Italsider : accordo 30 aprile 1961 : manuale di valutazione del lavoro, Genova Tipografia AGIS, Italsider 1961; sottolineature a pagg. 1, 8, 17, 24, 41, 43, 50-51, 55, 58-60, 70-74, 98;  Italsider, valutazione del lavoro impiegati, regolamentazione (accordo 6-6-1962 e successivo accordo del 22-3-1963), pagg. 104; manuale di valutazione del lavoro, Genova Tipografia AGIS, Italsider 1963; esemplare mutilo di alcune pagine  Poche sottolineature a matita rossa riguardanti la selezione di frasi per la composizione di La fabbrica illuminata: frontespizio, pag. 85 ("esposizione ad elevata temperatura"), pag. 88	27.01.01	👁️

Fig. 6 – Identity statement of *La fabbrica illuminata* (a musical work by Luigi Nono, 1964).

preservation archive. The software is designed to assist the preservation process, and to preserve the entire workflow, allowing backward analyses of the processing times, dates, data flow, etc. It includes several modules: particularly innovative is the module for the description of the signs and symptoms of degradation at the audio-video carrier level. The information system has been online since July 2021. All users can access the database locally in ALN. Users are able to carry out their queries remotely as well, through a web interface linked to the Fondazione ALN website (<http://www.luiginono.it/en/>). Figs. 6, 7 e 8 show examples of the *La fabbrica illuminata* (a musical work by Luigi Nono, 1964): 1) identity statement; 2) manuscripts digitized; 3) audio tracks.

Italian legislation strives to guarantee access to the documents, safeguarding the rights of the creators, persons or organizations involved. In line with these principles, first of all, one needs permission either from the creator or his/her heirs and (for letters that are not part of the Luigi Nono's collection) from the preserver. Where the Fondazione ALN does not have a written release, users must obtain authorization themselves, with the eventual mediation of the Foundation. It should be noted that preservers have sometimes only provided copies of letters for cataloguing purposes and not for consultation. On presentation of the required authorization, the ALN staff check and eventually censor the text of the letters, removing any sensitive or classified data from consultation, in accordance with Chapter III of the 2004 Legislative Decree 42 (*Codice dei beni culturali e del paesaggio*). The user does not receive originals but photocopies of the selected documents for consultation only, which confirms the usefulness of the description of the original document offered in the database. The publication of a part or the whole of a transcript is subject to approval from the copyright owners. This also applies to the publication of photographic reproductions.

Following methodology described above, the link between the preservation copy (and therefore the original document) and the *re-mediated* access unit is maintained by means of the relationship between the audio track associated with the unit and all the audio tracks coming from the preservation copies that were used by Luigi Nono and co-workers to produce it. With this structure, the presentation of the data can concern the general public (interested in the content of a unit), as well as musicologists willing to study the philological reconstruction of the source, or the physical characteristics of the original carrier. Obviously, and very important, the users can trace the information of a preservation copy starting from the result of the queries on the content and vice versa. For each carrier (audio: magnetic tape, phonographic disc, wax cylinder, etc.; paper, in the case of manuscripts), all the relevant characteristics have been identified, which have been formalized in a set of



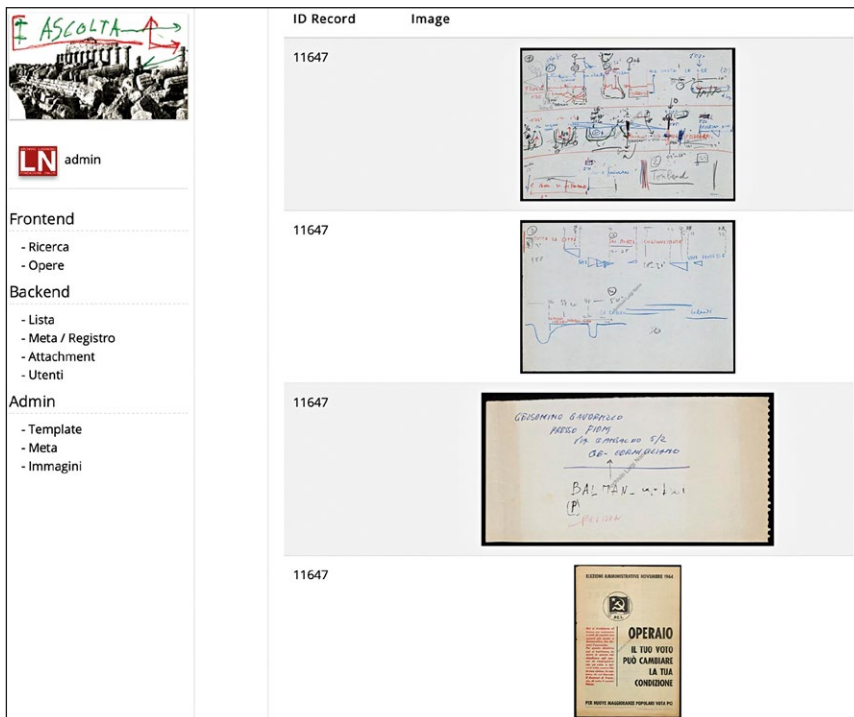


Fig. 7 – Access to digitized manuscripts.

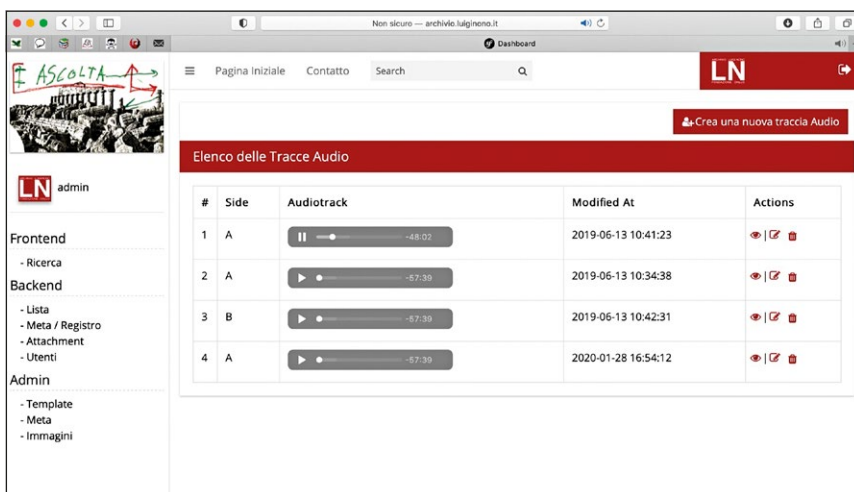


Fig. 8 – Audio file (an example of four channels tape).

attributes represented in the database project. There are some intersections among the attributes of different types (e.g., for all the audio documents, the registration technique must be specified); the superset of all attributes constitutes the original document table in the database.

In some cases, no control is required in the user interface (where a component that allows the user to make a selection from a controlled vocabulary). In these cases, the most appropriate value will be entered in the database in a transparent way to the user, to deprive her/him to insert a not valid value, because of distraction or incompetence. In this sense, the user interface includes a limited number of components.

The system is able to minimize the introduction of errors, not only by filtering the interface components, but also by filtering the values that are presented in the components, and which depend on the type of support considered. For example, the *speed* attribute is shared by the compact-cassette, micro-cassette, open reel and phonographic disc. For the first three, the tape speed, for the last one, the angular speed of the disc. The component for selecting the speed is not included in the interface even if the user is working on a compact-cassette, since it is assumed that the tape speed for the cassettes is always 4.75 cm/s; for the micro-cassettes is 1.2 cm/s and 2.4 cm/s. These values are not valid for the open reels, for which valid values are 4.75 cm/s (intersection with audio cassettes), 9.5 cm/s, 19 cm/s, 38 cm/s and 76 cm/s. Finally, the valid values for phonograph records, expressed in revolutions per minute (rpm): 16 rpm, 33 1/3 rpm, 45 rpm, and 78 rpm.

The software is able to create preservation copies of the documents, to share access copies; to catalog the mediated resources for access; to check the integrity and internal consistency of the archive documents; create backup copies of data and metadata.

## 5. CONCLUSIONS

In this article, we first presented a scientific methodology for the audio documents active preservation and access, developed thanks to the fifty years of experience gained at CSC in music production: a well-tuned *re-mediation* methodology, an artificial intelligence based approach to detect audio tape discontinuities and access tools for renovating the listening experience of old analogue media. Then the problem of preserving and accessing all the information related to the artworks stored in the author's personal archive was addressed. We presented in detail, as a case study, the design and development of an information management system allowing the long-term preservation and the access to different documents, among them: audio, letters, musical scores, and manuscripts of the personal archive of Luigi Nono. Our approach is based on two pillars: (a) the multidisciplinary nature of the team researchers

involving engineers, musicians, musicologists, composers and archivists, and (b) the philological accuracy with which the digital tools developed preserve the history of the production and transmission of the audio document.

Multimedia and interaction technologies have promoted the creation of new artistic typologies that integrate the various forms of communication in a single artwork and that allow the performer (or the public in the case of installations) to modify the structure and response according to their own behavior. The sector that encompasses these experiences is called media art. We can observe that media art is both material and performative: it is as artifactual or object-centric as performative or behavior-centric and it exhibits a variable form, much like music.

We believe that our methodology has general value, therefore can be fruitfully applied to other forms of media art and to other personal archives, different from electronic music composers, but also the practical findings we illustrated for our system can be inspiring in a wide range of contexts. One of the strengths of this project consists in having defined an original scientific methodology in the field of digital preservation, characterized by the fact of targeting the type of European personal archives, and having successfully applied it to a real archive, obtaining concrete results. The majority of the personal archives of the 20<sup>th</sup> c. are nevertheless kept outside the State Archives by a myriad of public or private institutions, often with few funds and personnel. The consolidated methodologies for institutional archives are not always sufficient to manage this new type of archives. An interesting open issue, not sufficiently discussed yet in the literature and archival practices, concerns the standardization of these small, personal, multimedia archives. Standardized tools must be provided for interoperability between different systems. Our proposal can be a step toward the possibility that personal archives interconnect with each other, creating a large network.

### *Acknowledgments*

This work was partially supported by Archivio Luigi Nono, AudioInnova srl, Ernst von Siemens Music Foundation, and Paul Sacher Stiftung.

SERGIO CANAZZA\*, GIOVANNI DE POLI  
Department of Information Engineering  
University of Padova  
canazza@dei.unipd.it, depoli@dei.unipd.it

ALVISE VIDOLIN  
Centro di Sonologia Computazionale (CSC)  
University of Padova  
vidolin@dei.unipd.it

\* Corresponding Author

REFERENCES

- BLACKMER W.S. 2016, *GDPR: Getting Ready for the New EU General Data Protection Regulation*, Information Law Group. Archived from the original on 14 May 2018 (<https://web.archive.org/web/20180514111300/https://www.infolawgroup.com/2016/05/articles/gdpr/gdpr-getting-ready-for-the-new-eu-general-data-protection-regulation/>).
- BRESSAN F., CANAZZA S. 2013, *A systemic approach to the preservation of audio documents: Methodology and software tools*, «Journal of Electrical and Computer Engineering», ID 489515 (<https://doi.org/10.1155/2013/489515>).
- BRESSAN F., CANAZZA S. 2014, *The challenge of preserving interactive sound art: A multi-level approach*, «International Journal of Arts and Technology», 7, 4, 294-315.
- BRESSAN F., CANAZZA S. 2015, *Honey, I Burnt the Tapes!, A study on thermal treatment for the recovery of magnetic tapes affected by Soft Binder Syndrome-Sticky Shed Syndrome*, «IASA Journal», 44, 53-64.
- BRESSAN F., BERTANI R., FURLAN C., SIMIONATO F., CANAZZA S. 2016, *An ATR-FTIR and ESEM study on magnetic tapes for the assessment of the degradation of historical audio recordings*, «Journal of Cultural Heritage», 18, 313-320 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.09.004>).
- CANAZZA S., DE POLI G. 2019, *Four decades of music research, creation, and education at Padua's Centro di Sonologia Computazionale*, «Computer Music Journal», 43, 4, 58-80.
- CANAZZA S., FANTOZZI C., PRETTO N. 2015, *Accessing tape music documents on mobile devices*, «ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications», 12, 1s, 1-20.
- COOK T. 2011, *The archive(s) is a foreign country: Historians, archivists, and the changing archival landscape*, «The American Archivist», 74, 2, 600-632.
- DAL MOLIN P. 2016, *Accessing Luigi Nono's correspondence: A user's perspective*, in P. DAL MOLIN (ed.), *Musicians' Correspondence and Interaction Between Archives*, Venezia, Fondazione Giorgio Cini, 101-111.
- DE BENEDICTIS A.I., RIZZARDI V. (eds.) 2018, *Luigi Nono. Nostalgia for the Future - Luigi Nono's Selected Writings and Interviews*, Oakland (CA), University of California Press.
- DANIELS M.F. 1984, *A Modern Archives Reader: Basic Readings on Archival Theory and Practice*, National Archives Trust Fund Board, Washington D.C., Chapter Introduction to Archival Terminology, 336-342, (<https://hdl.handle.net/2027/mdp.39015011587063?urlappend=%3Bseq=8>).
- FANTOZZI C., BRESSAN F., PRETTO N., CANAZZA S. 2017, *Tape music archives: From preservation to access*, «International Journal of Digital Libraries», 18, 233 (<https://doi.org/10.1007/s00799-017-0208-8>).
- ORIO N., SNIDARO L., CANAZZA S., FORESTI G.L. 2009, *Methodologies and tools for audio digital archives*, «International Journal of Digital Libraries», 10, 4, 201-220 (<https://doi.org/10.1007/s00799-010-0060-6>).
- PEARCE-MOSES R. 2005, *Glossary of Archival and Records Terminology*, Archival Fundamentals Series II, Chicago, Society of American Archivists.
- PRETTO N., FANTOZZI C., MICHELONI E., BURINI V., CANAZZA S. 2018, *Computing methodologies supporting the preservation of electroacoustic music from analog magnetic tape*, «Computer Music Journal», 42-4, 59-74.
- PRETTO N., RUSSO A., BRESSAN F., BURINI V., RODÀ A., CANAZZA S. 2020, *Active preservation of analogue audio documents: A summary of the last seven years of digitization at CSC*, in S. SPAGNOL, A VALLE (eds.), *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Sound and Music Computing Conference 2020, SMC'20 (Torino 2020)*, Axa sas/SMC Network.
- VERDE S., PRETTO N., MILANI S., CANAZZA S. 2018, *Stay true to the sound of history: Philology, phylogenetics and information engineering in musicology*, «Applied Sciences», 8, 2, 226 (<https://doi.org/10.3390/app8020226>).

## ABSTRACT

Music was one of the earliest kinds of art to explore the creative use of electronic and information technologies: new musical forms have assumed an increasingly artistic importance since the second half of the last century. Technology, at the same time, also is the cause of their rapid deterioration and risk of disappearance. The conservation of this heritage presents very different problems from those posed by traditional artworks. To this purpose this paper first presents some results for the conservation of audio documents: a well-tuned re-mediation methodology, an artificial intelligence based approach to detect audio tape discontinuities and access tools for renovating the listening experience of old analog media. To safeguard this heritage, it is not enough to digitize the content of recordings and documents, but all the related information, collected on the author's personal archive, must also be accessible. The second part of this paper presents in detail, as a case study, the design and development of an information management system allowing the long-time preservation and the access to different documents, among them: audio, letters, musical scores, and manuscripts of the personal archive of an important electronic music composer.

## NOTE E RECENSIONI

Archeologia e Calcolatori  
32.1, 2021, 489-492  
<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.27>

### *Diritto d'autore, copyright e licenze Creative Commons*

Per mantenere un alto livello di standard di pubblicazione, le riviste ad accesso aperto devono necessariamente confrontarsi con alcuni criteri inerenti l'accesso, l'apertura e la ricercabilità dei contenuti digitali, nonché il rispetto dei diritti degli autori. Nella presente nota, si intende portare l'attenzione su alcuni aspetti relativi a questa ultima tematica, oggetto di specifica riflessione in tempi recenti considerando che l'avvento della tecnologia digitale di massa e la diffusione di Internet su scala globale hanno necessariamente spinto il dibattito sui nuovi criteri da adottare in rapporto all'accesso universale ai dati. Come sottolinea S. ALIPRANDI (2013) «Il copyright è stato creato molto prima della nascita di Internet, e – così com'è – può rendere difficile svolgere legalmente le azioni che in rete diamo ormai per scontate: copiare, incollare, modificare un contenuto, e postarlo sul web. L'impostazione di default del diritto d'autore richiede che per fare tutte queste azioni si ottenga un permesso esplicito e concesso in anticipo, al di là che tu sia un artista, un insegnante, uno scienziato, un bibliotecario, un dirigente, o solo un semplice utente privato». La sempre maggiore disponibilità di dati digitali ha portato quindi necessariamente con sé un ripensamento, in chiave più elastica, del copyright tradizionale, fondato sul concetto di “tutti i diritti riservati” e la conseguente ricerca di un altro modello di gestione dei diritti d'autore, attuato tramite l'applicazione di nuove licenze d'uso.

Da una idea di Lawrence Lessig, giurista della Stanford University, è nata nel 2001 l'organizzazione non-profit Creative Commons. Il 16 dicembre 2002 sono stati lanciati i primi modelli di copyright “flessibile”, espressione di un nuovo modo di pensare i diritti d'autore per la rete, che permettesse agli autori di “aprire” le loro opere mantenendo riservati solo alcuni diritti (<https://creativecommons.org/>). Le licenze Creative Commons sono state pensate per le opere creative che per legge sono considerate tutelabili e tendono ad accentuare il profilo di protezione dei diritti morali, piuttosto che quello di sfruttamento commerciale dell'opera, essendo mirate soprattutto a diffondere l'opera con un riconoscimento della paternità e senza modificazioni. Esse sono dirette agli artisti, giornalisti, docenti, studiosi, istituzioni e creatori che vogliono condividere le loro opere in modo più ampio, secondo il modello “alcuni diritti riservati”.

Le licenze Creative Commons, originariamente in lingua inglese, sono state tradotte e adattate alle giurisdizioni di oltre 50 paesi da team di volontari, al fine di renderle sia più accessibili sia più solide in caso di controversia legale; oggi le licenze sono giunte alla versione 4, la prima a non avere differenti varianti nazionali: di essa infatti esiste unicamente una tipologia chiamata “international”.



Le licenze Creative Commons si avvalgono dei seguenti termini-chiave:

1. Attribution (BY): si tratta della forma più semplice e liberale, che permette di utilizzare, modificare, adattare, includere il materiale pubblicato, purché venga rispettata l'attribuzione originale;
2. Share Alike (SA): consente la circolazione dell'opera che, se trasformata o sviluppata, deve mantenere sempre la stessa licenza del materiale originario. Insieme alla licenza CC BY è quella che permette la maggiore libertà nell'uso del materiale pubblicato, il quale quindi può essere riutilizzato in modo pieno, illimitato, creativo e trasformativo.
3. No Commercial (NC): la licenza non consente lo sfruttamento dell'opera da parte dell'utente per fini commerciali o compenso monetario;
4. No derivatives (ND): la licenza non consente modifiche o alterazioni dell'opera, né un suo uso finalizzato alla creazione di una simile. Queste due ultime licenze costituiscono dunque un modello più restrittivo: la prima degli scopi di utilizzo, la seconda delle modalità.

Le combinazioni delle scelte sopraindicate generano le licenze CC elencate di seguito a partire da quella maggiormente permissiva. Come si può notare, l'elemento BY è sempre presente, e, data l'incompatibilità tra ND e SA, sono sei le differenti varianti di associazione risultanti (Fig. 1):

1. CC BY
2. CC BY-SA
3. CC BY-ND
4. CC BY-NC
5. CC BY-NC-ND
6. CC BY-NC-SA.







Le licenze Creative Commons		
si può	non si può	si deve
 usare modificare distribuire		citare l'autore indicare le modifiche
 usare modificare distribuire		citare l'autore indicare le modifiche usare la stessa licenza
 usare distribuire	modificare	citare l'autore
 usare modificare distribuire	usare a fini commerciali	citare l'autore indicare le modifiche
 usare modificare distribuire	usare a fini commerciali	citare l'autore indicare le modifiche usare la stessa licenza
 usare distribuire	modificare usare a fini commerciali	citare l'autore

Fig. 1 – I sei tipi di licenze Creative Commons (da <https://susannaruffato.it/licenze-creative-commons/>).

Ogni licenza si compone di tre livelli, che sono distinti nella forma, ma coincidenti nella sostanza: il Legal Code, il Commons Deed e il Digital Code. Il primo è la licenza vera e propria, il documento esteso e giuridicamente vincolante tra le parti, che, scritto in modo tecnico, può risultare poco chiaro ai non esperti; il Commons Deed (lett. “atto per persone comuni”) costituisce invece la versione accessibile e sintetica del documento legale, di cui esprime i concetti chiave in poche righe, in modo da essere chiaro e comprensibile a tutti. Il terzo livello della licenza, il Digital Code, riguarda tutti i metadati che rendono la licenza facilmente rintracciabile dai motori di ricerca, così che le informazioni che la riguardano possono essere identificate e catalogate in modo automatico. Ogni licenza ha una sua versione grafica resa attraverso una rappresentazione simbolica che consente una immediata comprensione dei diritti anche ai non esperti. Il sito di Creative Commons offre anche un tool che guida l’utente nella scelta della licenza, fino ad arrivare a scaricare il codice HTML con il link alla stessa.

Oltre a queste sei tipologie di combinazioni esiste in realtà anche una settima possibilità, che è la cosiddetta CC0, la “waiver” (“atto di rinuncia”) in inglese. Si tratta del solo “strumento” che di fatto indica che un’opera è stata rilasciata in regime di pubblico dominio e che è quindi utilizzabile senza necessità di chiedere alcun permesso; con esso dunque l’autore libera l’opera da ogni vincolo, prima che avvenga la naturale scadenza dei 70 anni dalla morte (art. 25, L. 635/1941 come modificato da art. 17, L. 52/1996).

Le due licenze CC BY e CC BY-SA, insieme naturalmente alla CC0 di cui ora si è detto, sono quelle che si accordano appieno con la definizione di opera culturale libera, “free cultural work”, tanto che dal 2008 esiste anche un marchio specifico che sigilla questa condizione (Approved for free cultural works); queste tre stesse licenze, inoltre, nel 2014 sono state approvate dalla Open Knowledge Foundation come conformi alla Open Definition, che indica così la conoscenza aperta: «Open means anyone can freely access, use, modify, and share for any purpose (subject, at most, to requirements that preserve provenance and openness» (<http://opendefinition.org/>).

Per quanto riguarda le riviste open access, la Directory of Open Access Journal (DOAJ, <https://doaj.org/>) offre una serie di indicazioni relative alle licenze Creative Commons. DOAJ è un portale che raccoglie e offre accesso a oltre 10.000 riviste on-line open access, con un’ampia copertura sia in termini di discipline che di lingue e paesi di pubblicazione, con l’obiettivo di individuare e indicizzare i journal scientifici e accademici open access che utilizzano un sistema di controllo della qualità, a garanzia dei contenuti pubblicati. DOAJ raccomanda agli editori ad accesso aperto l’uso delle licenze Creative Commons come best practice, poiché si tratta di licenze gratuite create su misura per soddisfare le esigenze dell’open access. Dal marzo 2014, insieme ai nuovi criteri di inclusione resi necessari dal gran numero di riviste interessate ad essere inserite nella Directory, è stato creato anche il “sigillo di DOAJ”, che “premia” quelle riviste che rispettano, sotto molteplici aspetti, un alto standard di pubblicazione open, indipendentemente dal fatto che esse chiedano o meno agli autori una quota per le spese di pubblicazione (Article Processing Charge, APC). Per quanto riguarda le licenze, quelle che consentono la possibilità di avere il sigillo sono la CC BY, la CC BY-SA, che come abbiamo visto sono quelle che garantiscono un più ampio riuso dei materiali pubblicati, ma anche la CC BY-NC è permessa.

Se si fa riferimento al settore archeologico, tra le 126 riviste incluse nella Directory, la tipologia delle licenze appare piuttosto varia. La maggior parte (47) ha scelto la più libera CC BY, ma molte (33) anche la più restrittiva CC BY-NC-ND, che è quella che comunque offre la maggiore tutela agli autori e al contempo agli editori, che possono produrre anche opere a stampa contemporaneamente alle edizioni digitali. Quasi equivalenti i numeri per CC BY-NC-SA (19) e CC BY-NC (17), mentre decisamente meno numerose sono quelle con licenza CC BY-SA (9) e CC BY-ND (1). Nell'ambito della comune politica open access, le riviste scientifiche mantengono dunque una certa autonomia nella scelta di come rendere condivisi e fruibili i contenuti pubblicati in un momento storico in cui la diffusione del pensiero e del sapere avviene sempre più per via telematica.

ALESSANDRA CARVALE

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale – CNR  
alessandra.caravale@cnr.it

#### BIBLIOGRAFIA

- ALIPRANDI S. 2013, *Creative Commons. Manuale operativo*, Lecce, Sum Edizioni (<http://www.didatticaduepuntozero.it/d20/books/creativecommons.pdf>).
- ALIPRANDI S. 2017, *Fare Open Access*, Milano, Ledizioni (<https://books.openedition.org/ledizioni/5161>).
- MORANDO F. 2017, *Conoscenza aperta. L'utilizzo delle licenze Creative Commons nell'ambito dei Beni Culturali*, «IBC», 25 (<http://rivista.ibc.regione.emilia-romagna.it/xw-201701/xw-201701-a0001>).
- PIANA C. 2018, *Open source, software libero e altre libertà*, Milano, Ledizioni (<https://books.openedition.org/ledizioni/5642?lang=it>).

#### Archeologia e Calcolatori

32.1, 2021, 492-496

<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.28>

A. DEL BIMBO *et al.* (eds.), *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges Virtual Event, January 10-15, 2021, Proceedings, Part VII, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Pattern Recognition for Cultural Heritage* (LNCS, vol. 12667), Springer 2021.

Dal 10 al 15 Gennaio 2021 si è tenuto, in forma virtuale e ricalendarizzato a causa delle restrizioni pandemiche, l'IPCR2020 (25<sup>th</sup> International Conference of Pattern Recognition). I 416 articoli, selezionati fra circa 700 proposte, sono stati pubblicati in 8 volumi<sup>1</sup> per Springer, nel 2021, nella serie Lecture Notes in Computer Science Series (LNCS). Gli Atti sono organizzati in specifici cluster tematici, in parte

<sup>1</sup> A cura di Alberto Del Bimbo, Rita Cucchiara, Stan Sclaroff, Giovanni Maria Farinella, Tao Mei, Marco Bertini, Hugo Jair Escalante, Roberto Vezzani. Piano dell'opera e indice dei volume al link <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-68790-8#volumes>.

derivanti dalla Conferenza principale e in parte da 46 workshop ad essa collegati. La varietà di tali nuclei illustra efficacemente l'interesse trasversale per il tema dell'apprendimento automatico, spaziando dal Machine Learning (ML) alla Computer Vision, dalla robotica alla biometrica e all'egovision, ai sistemi di tracciamento intelligente, all'elaborazione di immagini e segnali, con innumerevoli applicazioni nel campo delle scienze mediche, sociali, giuridiche, dell'ambiente, dell'alimentazione e del patrimonio culturale.

A quest'ultimo ambito, in particolare, è dedicata gran parte del volume VII degli Atti, che ospitano i risultati del 2<sup>nd</sup> *International Workshop on Pattern Recognition for Cultural Heritage*<sup>2</sup>. Il workshop è stato finalizzato alla discussione dello sviluppo di tecnologie e soluzioni di PR/AI per l'analisi, la ricostruzione e la conoscenza di dati digitali relativi al patrimonio culturale e già esistenti (scansioni di documenti e manufatti, mappe, musica digitale, etc.), intesi come punto d'avvio per lo sviluppo di metodologie innovative per la creazione di ulteriori materiali digitali come modelli matematici di apprendimento, applicazioni robotiche, realtà aumentata, serious game.

Innovazione tecnologica e digitale sono tra i principali contenuti dell'azione del CNR, anche specificamente rivolta a queste tematiche. Tra le istituzioni di afferenza dei membri del Comitato organizzatore di PatReCH2020 figura, infatti, anche il CNR-ISTI (Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo"), alcune delle cui linee di ricerca sono indirizzate alle tecnologie visuali (Segnali e Immagini; Visual Computing) e all'intelligenza artificiale, con particolare riguardo alle applicazioni ai Beni Culturali.

Gli Atti del workshop costituiscono un interessante strumento di riflessione e aggiornamento sulle sfide specifiche che i Beni Culturali pongono all'apprendimento automatico. Gli argomenti dei contributi consentono di enucleare efficacemente i temi attualmente al centro del dibattito scientifico intorno all'uso dell'Intelligenza Artificiale (IA) in questo ambito, i quali spesso si sovrappongono e si intrecciano all'interno dei singoli lavori, riguardando, appunto, challenge comuni e intrinseche ai materiali storici.

In una recentissima ricognizione delle applicazioni di Machine Learning ai Beni Culturali nell'ultimo quinquennio<sup>3</sup>, Marco Fiorucci *et al.* hanno indicato nel numero limitato di training dataset disponibili uno degli ostacoli principali per la diffusione di tali metodi rispetto ad altri ambiti, come quello delle bioimmagini. Questo tema, indubbiamente centrale e a monte sia della clusterizzazione dei dati sia dei processi di apprendimento, è affrontato in diversi contributi degli Atti, come per esempio quello di C. Kiourt e V. Evangelidis (*AnCoins: image-based automated identification of ancient coins through transfer learning approaches*, 54-67) dedicato alla costituzione di dataset numismatici, dai metodi di acquisizione digitale, alle *identification features* specifiche per le monete. Fanno eccezione i dataset relativi a fonti di tipo testuale, a cui è dedicato il maggior numero dei contributi degli Atti, data anche la

<sup>2</sup> <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68787-8>. Ringrazio il prof. Filippo Stanco, tra gli organizzatori del workshop e membro del Chair Committee, e il dott. Dario Allegra, dell'Università degli Studi di Catania, per il pronto e amichevole supporto nel consentirmi la lettura degli Atti per la recensione.

<sup>3</sup> FIORUCCI M. *et al.* 2020, *Machine Learning for Cultural Heritage: A survey*, «Pattern Recognition Letters», 133, 102-108, <https://doi.org/10.1016/J.PATREC.2020.02.017>.

lunga tradizione di metodi di analisi statistica nell'ambito linguistico e la vitalità della comunità scientifica internazionale, che dispone di specifiche occasioni di incontro sui temi degli Atti, come l'ICDAR, International Conference on Document Analysis and Recognition.

La paleografia digitale fa oggi un largo uso del ML, affrontando difficoltà specifiche della disciplina: S. Brenner e R. Sablating (*Subjective Assessments of Legibility in Ancient Manuscript. Images – The SALAMI Dataset*, 68-82) si concentrano sul tema molto attuale dei testi manoscritti, non solo lacunosi perché fisicamente degradati, ma esposti ad una variabile soggettiva nell'interpretazione che necessita di passaggi peculiari ai fini dell'automatizzazione dei processi di riconoscimento. M.O. Tamrin *et al.* (*Simultaneous detection of regular patterns in ancient manuscripts using GAN-based deep unsupervised segmentation*, 279-291; *A two-stage unsupervised deep learning framework for degradation removal in ancient documents*, 293-303) presentano un modello non supervisionato GAN-based per la segmentazione di manoscritti e l'eliminazione di "rumori" in supporti degradati. Il superamento delle difficoltà derivanti dal deterioramento è un obiettivo presente in molti altri contributi, come anche quello di N.D. Cilia *et al.* (*PapyRow: a dataset of row images from ancient Greek papyri for writers identification*, 223-234), che presenta un dataset di papiri del VI secolo a.C. ritornando sull'importanza di dataset ben popolati, e si focalizza sulle tecniche di ottimizzazione delle immagini e segmentazione delle linee testuali, volti a minimizzare l'impatto del degrado dei materiali.

Le competenze spesso estremamente specialistiche necessarie a questo tipo di studi determinano talvolta la paradossale inaccessibilità dei suoi propri materiali allo studioso di formazione umanistica. Tale fenomeno ha stimolato lo sviluppo di strumenti visual programming based centrati sull'utente, con interfacce intuitive che consentano l'analisi di feature nei documentati testuali, come l'Advanced Manuscript Analysis Portal (AMAP), destinato a utilizzatori non esperti in programmazione e presentato nell'articolo di P.S. Pandey *et al.* (*Analysis of ancient documents: the case of magical signs in Jewish manuscripts*, 156-170) sui segni magici nei manoscritti giudaici.

La creazione di uno strumento software interattivo e di dataset interrogabili a partire da opere a stampa di ampio respiro non indicizzate è presentata nell'articolo di C. Rouillet *et al.* (*Transfer learning methods for extracting, classifying and searching large collection of historical images and their captions*, 185-199) che, nell'ambito del Virtual Pompeii Project, utilizza il caso studio degli 11 volumi di *Pompei: Pitture e Mosaici*, contenente oltre 20.000 immagini storiche annotate. Utilità di classificazione e di estrazione secondo similarità tra immagini e tra didascalie sono tra le possibilità offerte dal tool presentato.

Decisamente più rari sono i repository di dati 3D relativi ai Beni Culturali, sebbene nuovi strumenti applicativi come ArchAIDE abbiano molto sensibilizzato alcuni ambiti come l'archeologia sull'uso del ML, in particolare in ceramologia, e la diffusione della Structure from Motion (SfM) come tecnica di rilievo low cost e user friendly abbia reso comunemente accessibile la creazione di documentazione digitale tridimensionale. Problemi di accuratezza e risoluzione in rapporto agli obiettivi e alle tecniche di post-processing, di registrazione di numerose nuvole di punti, di gestibilità di modelli complessi rimangono oggetto di dibattito. Questi temi sono affrontati in alcuni articoli degli Atti, talora con proposte sperimentali come quella di T. Pribanić

et al. (*Can OpenPose be used as a 3D registration method for 3D scans of Cultural Heritage artifacts*, 83-96), che hanno utilizzato il modello di deep learning OpenPose, dedicato al riconoscimento della figura umana in differenti pose e scenari per la registrazione di nuvole di punti di manufatti archeologici.

L'articolo di G. Gallo et al. (*Abstracting stone walls for visualization and analysis*, 215-222), a cui ha partecipato anche chi scrive, e che è dedicato all'analisi quantitativa delle architetture antiche da modelli 3D fotogrammetrici, si confronta con alcune sfide peculiari quali l'estrema esiguità di dataset tridimensionali relativi a questa classe di manufatti archeologici, nonché di vocabolari standard relativi alle tecniche murarie e i materiali edilizi, soprattutto in contesti e cronologie specifici; la segmentazione automatica di modelli 3D; il clustering gerarchico di oggetti secondo concetti simili a quelli del BIM, ma riferito ad elementi particolarmente irregolari e dunque scarsamente predittivi, che richiedono un approccio di apprendimento rigorosamente supervisionato.

Questo tema dell'irregolarità degli oggetti, in particolare, rappresenta una difficoltà che riguarda più ampiamente gli studiosi del patrimonio culturale che vogliano occuparsi di ML e cioè la classificazione e l'analisi dei propri materiali rispetto a quelli per i quali i modelli teorici di riferimento sono stati generati. Così, per esempio, anche il contributo di C. Ostertag e M. Beurton-Aimar (*Using graph neural networks to reconstruct ancient documents*, 39-53) sull'uso di reti neurali artificiali nella ricostruzione di documenti frammentari antichi (epigrafi, papiri, ceramica), dove la già nota *puzzle resolution*<sup>4</sup> deve essere adattata a frammenti non indicativi della forma dell'oggetto, in quanto aventi margini consunti e modificati nel tempo. Piuttosto che un intero dataset di immagini, lo studio prende in esame ogni singola coppia di tale insieme e interpreta la ricostruzione di immagini da frammenti come una questione di classificazione dei margini (*edge classification*), in cui ogni margine è rappresentato come il nodo di un grafo e parte di un Graph Neural Network (GNN). Attraverso tale sistema un modello di AssemblyGraphNet è stato proposto, con una performance superiore rispetto agli studi precedenti.

Gli Atti "fotografano" efficacemente come, mentre la riflessione sui processi di segmentazione possiede già un robusto corpo teorico nelle applicazioni ai dati e materiali testuali (papiri, pergamene, manoscritti in genere, epigrafi, testi a stampa, etc.), il problema della segmentazione delle architetture cominci solo adesso ad imporsi all'attenzione degli studiosi dei Beni Culturali che utilizzano l'IA<sup>5</sup>. Soprattutto le finalità di monitoraggio e conservazione del patrimonio culturale outdoor spingono attualmente in questa direzione, come sottolineato da alcuni contributi, tra cui quello di K. Idjaton et al. (*Stone-by-stone segmentation for monitoring large historical monuments using deep neural networks*, 235-248) che si focalizza poi su alcune criticità in termini ergonomici,

<sup>4</sup> KLEBER F., SABLATNIG R. 2009, *A survey of techniques for document and archaeology artefact reconstruction*, in *Proceedings of 10th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, 26-29 July 2009, 1061-1065, <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2009.154>.

<sup>5</sup> Su questi temi vedi: GRILLI E., DININNO D., PETRUCCI G., REMONDINO F. 2018, *From 2D to 3D supervised segmentation and classification for cultural heritage applications*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42, 2, 399-406, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-399-2018>.



quale la segmentazione manuale “pietra per pietra” delle architetture, e presenta alcuni algoritmi che ne consentono l’automazione per l’analisi di ortomosaici 2D.

Da un altro canto, i dataset tridimensionali possono risultare disallineati rispetto ai principi FAIR e in particolare a quello della riusabilità. Questo interessante punto di vista emerge dal contributo di A. Frisky *et al.* (*MCCNet: multi-color cascade network with weight transfer for single image depth prediction on outdoor relief images*, 263-278), che sottolineano come i dati sorgente dei modelli virtuali fotogrammetrici, cioè le singole fotografie di partenza, siano quasi sempre non disponibili rispetto all’elaborato finale, impedendone altre forme di processamento e utilizzo. È il caso delle immagini 2.5D, elaborate da singole posizioni di ripresa o singole fotografie secondo il metodo SIR (Single Image Reconstruction) e attraverso la stima delle mappe di profondità (Single Image Depth Prediction), utili nel caso di oggetti di cui non sia richiesta la documentazione del retro, come per esempio le decorazioni architettoniche a rilievo.

Il problema della ricerca aperta è esplicitamente affrontato nell’articolo di G. Skifas *et al.* (*Quaternion generative adversarial networks for inscription detection in Byzantine monuments*, 171-184), che si muove in un’ottica completamente open source e che mette a disposizione il link al codice sorgente per l’utilizzo di una variante dei GAN (Generative Adversarial Networks) nell’analisi delle epigrafi e, in generale, per lo studio di immagini multicanale. Anche il riconoscimento automatico di altri tipi di immagine, e cioè, quelle iperspettrali sta registrando un crescente interesse nell’ambito dei Beni Culturali, in passato legato soprattutto agli usi nel remote sensing.

Meno rappresentato negli Atti è, invece, il grande comparto della valorizzazione e fruizione del patrimonio culturale. Da nuovi Sistemi di raccomandazione per lo storytelling digitale (M. Casillo *et al.*, *Recommender system for digital storytelling: a novel approach to enhance cultural heritage*, 304-317), a nuove piattaforme di orchestrazione dei servizi (F. Clarizia *et al.*, *A contextual approach for coastal tourism and Cultural Heritage enhancing*, 318-325), i contributi dedicati al turismo 2.0, basato sulle ICT, mostrano come la valorizzazione contemporanea si ispiri al paradigma smart city, con l’ambizione di creare un discorso partecipato tra gli attori generatori di contenuti (istituzioni, musei, comunità, aziende e individui) e l’utente finale.

Il contributo del digitale a questi scopi è al centro del lavoro di D. Tanasi, S. Hassam e K. Kingsland (*Underground archaeology: photogrammetry and terrestrial laser scanning of the Hypogeum of Crispia Salvia (Marsala, Italy)*, 353-367) che chiude gli Atti e presenta il rilievo dell’Ipogeo di Crispia Salvia a Marsala, realizzato sia con tecnica SfM, sia attraverso scansione laser, nell’ambito di un più vasto progetto di acquisizione digitale di strutture ipogee in Sicilia. Oltre che sulle tecniche e gli strumenti utilizzati, il lavoro si sofferma sulle potenzialità della documentazione tridimensionale di queste architetture in negativo, nella direzione sia della fruizione e della disseminazione, sia degli ulteriori utilizzi delle basi documentali. Tra questi, si segnala l’anastilosi virtuale degli affreschi decorativi attraverso l’uso del ML e della pattern recognition. Un’utile ricognizione bibliografica dei più recenti studi di ML in archeologia è proposta nell’introduzione.

FRANCESCA BUSCEMI

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale – CNR  
francesca.busce mi@cnr.it

Archeologia e Calcolatori  
 32.1, 2021, 497-500  
<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.29>

R. VECCHIATTINI (ed.), *La datazione delle malte in architettura tra archeologia e archeometria*, «Archeologia dell'Architettura», 24, 2019, 1-119.

Nel numero 24 della rivista «Archeologia dell'Architettura», Supplemento della rivista «Archeologia Medievale», è stata pubblicata a cura di R. Vecchiattini una monografia sui metodi archeologici e archeometrici di datazione delle malte storiche. Come osserva la stessa Vecchiattini nell'intervento introduttivo, pubblicato sia in italiano sia in inglese (*Datate la malta. Alcuni metodi e applicazioni a confronto/ Mortar dating. A comparison of some methods and applications*), il tema della datazione di edifici antichi è di estrema rilevanza sia dal punto di vista archeologico che architettonico. Il concetto principale del volume è sinteticamente espresso dall'autrice «Se l'analisi stratigrafica aiuta a studiare gli edifici formando una sequenza ordinata di parti e attività costruttive, è solo l'applicazione dei molteplici metodi di datazione, archeologici e archeometrici, che riesce a fissare dei punti nella linea del tempo e consente di calare gli oggetti nel tempo storico».

Infatti, l'impiego di metodi analitici per la caratterizzazione dei materiali del costruito storico permette di interpretare la tecnica di costruzione e conseguentemente di determinarne la datazione. Tra i materiali, in particolare la malta risulta il migliore indicatore cronologico in quanto è funzionale alla costruzione di un edificio, non può essere riciclata come può avvenire per altre parti e, una volta fatta presa e completato il processo di carbonatazione, la sua messa in opera è estremamente durevole. Inoltre, la composizione principalmente di calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e di altri carbonati, ad esempio dolomite, consente di ottenere una datazione assoluta attendibile che deriva dalla misurazione dell'anidride carbonica assorbita durante la fase di carbonatazione.

Il volume ha un'impostazione prevalentemente metodologica destinata agli addetti ai lavori; vengono infatti presentati diversi metodi di datazione al radiocarbonio della calce aerea o idraulica, mentre per il legante si propone la tecnica della termoluminescenza. Tutti i metodi applicati sono illustrati attraverso specifici casi di studio.

Il volume si apre con il contributo di un team interdisciplinare di studiosi danesi e finlandesi (A. Lindroos, J. Heinemeier, Å. Ringbom, *Radiocarbon dating of lime mortars. The sequential dissolution method*), che propongono un metodo di dissoluzione sequenziale parziale in acido ortofosforico dei carbonati presenti nelle malte per poter separare le diverse frazioni di  $\text{CO}_2$  che consentono la datazione al  $^{14}\text{C}$  in date storiche assolute, ovvero anni BP. L'articolo di G. Pesce (*Radiocarbon dating of lime lumps: current and future challenges*) fa poi un excursus sulla tecnica di datazione, indicando l'impiego dei soli grumi di calce pura, composti generalmente da calcite cristallina, presenti nella matrice della malta e non contaminati da aggregati di sabbia né da altre impurità silicee, come il quarzo. Essi sono riconoscibili nell'impasto della malta perché si presentano bianchi e compatti e, una volta separati, possono essere datati al  $^{14}\text{C}$ . Tuttavia, l'autore sottolinea come le malte impiegate per gli allettamenti contengano raramente i grumi, che sono invece presenti nei nuclei cementizi. Inoltre, in caso di calce magnesiacca il metodo proposto non funziona, quindi si conclude come sia necessaria una caratterizzazione preliminare

dei carbonati per poter effettuare datazioni affidabili e che la tecnica con grumi di calce è complementare e non sostitutiva di quella della datazione al radiocarbonio di interi campioni di malta.

Proprio sull'impiego dei grumi di calce torna anche R. Vecchiattini (*Precisione ed esattezza della tecnica di datazione del radiocarbonio applicata ai "grumi di calce" contenuti nelle malte storiche. Una ricerca in corso*), ricordando come in Italia la tecnica di datazione al radiocarbonio dei grumi di calce si sia sviluppata a partire da un'intuizione di T. Mannoni, il quale in un articolo del 2002 identificò e analizzò un grumo di calce e carboni di legno all'interno di una muratura del sito fortificato di Castello Aghinolfi (Massa Carrara). Tra il 2008 e il 2019, l'analisi dei grumi combinata con la Spettrometria di Massa con Acceleratore-AMS è stata applicata sia a siti archeologici e complessi monumentali, quali, ad esempio, il Colosseo, sia a chiese e castelli. L'autrice discute la natura di tali grumi e sostiene l'ipotesi che siano grumi di calce spenta (idrossido di calcio) che si sono carbonatati durante la permanenza in fossa, cioè prima della messa in opera. Quindi, si sostiene che, proprio partendo dal presupposto che la calce venisse spenta immediatamente prima dell'impiego, si potrebbe addirittura arrivare alla datazione del lasso di tempo intercorso tra il cantiere con la preparazione della calce e la posa nella muratura. Tuttavia, si sottolinea come sussista il problema della caratterizzazione che è efficace su grumi formati da calcite pura, mentre risulta più complessa nel momento in cui questi contengano sia calcite che magnesite, quando sono state impiegate come legante della calce dolomitica e magnesiaca. La datazione al radiocarbonio di questi ultimi grumi può, comunque, essere condotta, ma sarebbe opportuno verificarne i risultati con la termoluminescenza sui mattoni, legati dalle malte in oggetto e integrati da analisi stratigrafica, associata allo studio cronotipologico delle malte e delle murature.

S. Roascio, A. Decri e S. Scrivano (*Il sito di San Calocero di Albenga (SV). Approcci integrati di Archeologia dell'Architettura: dalle indagini minero-petrografiche alla datazione radiocarbonica dei "grumi di calce"*) presentano la metodologia precedentemente descritta applicata al sito di San Calocero di Albenga, con analisi archeometriche su legante e aggregati nelle malte. I risultati su murature e pavimenti con datazione archeologica attesa tra III e V secolo d.C. sono in gran parte compatibili, ma gli autori sottolineano come le analisi al radiocarbonio possano essere effettuate solo su pochi campioni e come questi non sempre si rivelino adatti. Importante anche il contributo di A. Boato e R. Vecchiattini (*Le fasi costruttive medievali della chiesa di Sant'Ampelio a Bordighera (IM). Una nuova proposta di ricostruzione storica in accordo con le datazioni <sup>14</sup>C delle malte*) sulle fasi costruttive medievali della chiesa di Sant'Ampelio a Bordighera, il quale giunge a simili conclusioni sulle interessanti possibilità fornite dalle datazioni al radiocarbonio che però presentano alcuni aspetti problematici non del tutto risolti, quali la raccolta di campioni significativi, le alterazioni chimiche a cui sono sottoposte le malte esposte alle acque atmosferiche e le difficoltà di lettura stratigrafica.

P. Ricci, C. Germinario e C. Lubritto (*Mortar Radiocarbon Dating: Cryo2Sonic sample preparation procedure. Method and applications*) presentano la procedura Cryo2Sonic sempre su grani di calce, che consiste in un protocollo standardizzato per la preparazione dei campioni di malte archeologiche per la datazione al <sup>14</sup>Ca, con esempi di applicazione a Modena, nella basilica di Ponte della Lama a Canosa di Puglia

e in tre castelli medievali in Andalusia (Spagna). Segue il contributo di F. Marzaioli *et al.* (*Investigation of pre-screening and cost-effective tools for Mortar dating at CIRCE and CIRCe: data from the usage of  $^{13}\text{C}$  in the framework synthetic samples*), nell'ambito delle ricerche congiunte del progetto Mortar Dating Intercomparison Study (MODIS) dei laboratori CIRCE (Università della Campania "Luigi Vanvitelli") e CIRCe (Università di Padova), in cui si presenta un modello di datazione di malte basato sui rapporti isotopici del radiocarbonio, testato su malte sintetiche prodotte in laboratorio e funzionale come attività pre-screening all'analisi di malte storiche. Un diverso metodo di datazione delle malte è proposto da P. Urbanová (*Luminescence dating of mortars by "single grain" procedure and its potential for building archaeology*); tale metodo consiste nell'analisi a termoluminescenza con la tecnica a "grano singolo" (SG-OL) dei grani di quarzo, che l'autrice suggerisce di combinare con la stessa analisi ai mattoni per ottenere datazioni più accurate di strutture antiche.

Tale metodologia viene poi applicata nel contributo di J.-B. Javel, P. Urbanová, P. Guibert, H. Gaillard (*Chronological study of the Saint-Jean-Baptiste de la Cité chapel in Périgueux, France: the contribution of mortar luminescence dating to the history of local Christianity*) alla cappella di Saint-Jean-Baptiste, costruita su strutture romane della fine del III secolo d.C. nella chiesa medievale di Saint-Etienne a Périgueux in Dordogna. Per ottenere risultati con la termoluminescenza con metodo "a grano singolo", gli autori sottolineano l'importanza del campionamento di malte che non siano state esposte alla luce. L'ultimo contributo metodologico di R. Ricci (*L'uso dell'analisi mineralogico-petrografica dell'aggregato per lo studio e la datazione delle malte storiche*) indica come sia fondamentale la fase di studio delle malte e la loro caratterizzazione mineralogica-petrografica prima dell'applicazione di ogni altro metodo di datazione; queste analisi, infatti, consentono di determinare le caratteristiche meccaniche delle malte e il loro comportamento chimico-fisico verso gli agenti di degrado. Rifacendosi alle ricerche di Mannoni, l'autore presenta i risultati su campioni di malte provenienti da Genova, Chiavari e Savona.

In conclusione, la monografia raccoglie i più recenti contributi metodologici sul tema cruciale, in ambito archeologico, della datazione delle malte tramite analisi a radiocarbonio e termoluminescenza, metodologie con protocolli ormai consolidati nella ricerca archeologica e storica, ma che richiedono competenze e laboratori altamente specializzati. Il valore del volume risiede proprio nel presentare l'evoluzione della ricerca sulle datazioni perché, generalmente, nella letteratura scientifica le malte romane e medievali sono state oggetto di numerosi studi archeometrici volti solamente a determinarne composizione, tecnologia di produzione, provenienza delle materie prime. I casi di studio presentati, però, dimostrano anche i limiti delle tecniche di datazione al radiocarbonio che possono essere influenzate dal campionamento, il che rende imprescindibile un preliminare, attento studio stratigrafico della muratura. Inoltre, un altro aspetto della tecnica da tenere in considerazione è quello della sensibilità dello strumento che, nonostante la calibrazione, basata su complessi algoritmi matematico-statistici, fornisce un'attendibilità intorno al 90% in un range cronologico di un paio secoli, tali limiti però possono essere migliorati con una tecnica avanzata di calibrazione basata su un approccio statistico bayesiano che combina le informazioni ottenute dalla datazione con ipotesi note sulla datazione dei campioni, dal punto di vista archeologico.

Come dimostrato in diversi contributi, lo studio crono-tipologico delle malte e delle murature costituisce, infatti, il punto di partenza ed un supporto fondamentale alle tecniche per la loro datazione. Sarebbe, quindi, interessante, alla luce dei risultati presentati in questo volume, poter implementare anche analisi archeometriche e datazioni al radiocarbonio all'interno di banche dati per l'archeologia dell'architettura antica e medievale, che sono strumenti importanti di supporto alla ricerca. Per il mondo romano è fondamentale il progetto ACOR database (*Atlas of Roman construction techniques*) che costituisce un corpus di tecniche, identificate secondo i principali elementi caratterizzanti delle singole strutture murarie, posizionate all'interno degli edifici e dei siti di appartenenza, quindi, oltre ai moduli di ricerca testuale è possibile consultare la banca dati partendo anche dalla cartografia. Per il mondo medievale si segnala *L'Abaco delle Murature* (<https://www.abacomurature.it/index.php>), un database online contenente lo studio di edifici georeferenziati in Toscana, con anche i risultati di analisi di malte e prove sperimentali su pannelli murari.

LETIZIA CECCARELLI

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"

Politecnico di Milano

letizia.ceccarelli@polimi.it







32.1  
2021

€ 40,00

ISSN 1120-6861

e-ISSN 2385-1953

ISBN 978-88-9285-056-9

e-ISBN 978-88-9285-057-6

AC-32-1



ARCHEOLOGIA  
E CALCOLATORI