ARCHEOLOGIA E TECNICHE DI EIDOLOGIA INFORMATICA

INTRODUZIONE ALLE TECNICHE DI DIGITAL IMAGE PROCESSING: IL CONTENUTO INFORMATIVO DELLE IMMAGINI

La voce e le immagini possono essere considerate quali due diverse forme di informazione di tipo "segnale". Esse, infatti, possono essere generate, trasmesse, ricevute e memorizzate. La voce è un segnale di tipo continuo, trasmettibile in forma analogica o digitale. Per valutare la "quantità" di informazione insita nel segnale voce, si pensi che per memorizzare in forma digitale tutte le parole pronunciate da un uomo nel corso della sua vita (mediamente 650 milioni di parole per una periodo medio di 70 anni) sono necessari circa 2 * (10 ** 12) bits, ossia duemila miliardi di bits. Analogamente le immagini possono essere di tipo continuo o discreto e la loro trasmissione può avvenire in forma analogica o digitale. Per valutare la quantità di informazione associata, ad esempio, al segnale video televisivo PAL, si può calcolare il numero di bits necessari per memorizzare sotto forma digitale tutta l'informazione fruibile da parte dello stesso uomo tipo. Supponendo che egli abbia guardato la televisione mediamente per due ore al giorno, sono necessari per la digitalizzazione circa 16 * (10 **15) bits, ossia sedici milioni di miliardi di bits. Il confronto con i bits necessari per memorizzare le parole mediamente pronunciate nel corso di una vita rivela quindi uno sbilanciamento di un fattore 3 a favore delle immagini. Si può concludere che allora è proprio vero che un'immagine 'vale più di mille parole' almeno dal punto di vista, se non della qualità, della quantità del contenuto informativo.

Le tecniche di "digital image processing" prevedono l'estrapolazione mediante opportuni algoritmi numerici del potenziale contenuto informativo insito in ogni immagine, ottenendo come risultato dell'elaborazione una nuova immagine più leggibile. Nel caso in cui l'input di un'elaborazione numerica non sia un'immagine, ma una descrizione, pur rimanendo l'output sotto forma di immagine, (caso delle tecniche di restituzione tridimensionale con "texture mapping": cfr. FORTE in questa sede) l'ambito di applicazione diviene quello della "computer grafica" (FOLEY, VAN DAM *et al.* 1990). Le due aree "image processing" e "computer grafica" sono strettamente correlate, ma in questa parte ci si occuperà esclusivamente della prima. Cerchiamo ora di caratterizzare meglio il concetto di immagine. Un'immagine può essere definita come « la riproduzione od imitazione della forma di una persona o di un oggetto » (definizione di Webster). Si tratta di una definizione limitata in quanto esistono diverse imma-

gini di tipo "non naturale" come ad esempio le funzioni matematiche o le immagini provenienti da sensori (registrazioni sismiche, immagini all'infrarosso). In generale le immagini possono essere rappresentate da un insieme di segnali, come nel caso delle immagini a colori, che possono essere descritte dalle tre componenti bidimensionali rosso, verde e blu. Una definizione più generale di immagine è quindi quella di "vettore di funzioni multidimensionali"; occorre pertanto formalizzare matematicamente questi concetti.

Rappresentazione e caratterizzazione matematica di immagini continue

Si può pensare ad un'immagine "continua" o "analogica" come ad un'immagine in cui l'intensità luminosa ad essa associata sia descrivibile da una funzione di tipo continuo ossia si può fare riferimento (Pratt 1978) ad una funzione $C(x,y,z,\lambda)$ che rappresenti la distribuzione nello spazio di energia irradiata da una sorgente posta alle coordinate x,y al tempo t con lunghezza d'onda λ. L'intensità della luce è maggiore od uguale a 0 e poiché essa è proporzionale al modulo quadrato del campo elettrico, la funzione "luce" dell'immagine è reale e non negativa. Le limitazioni fisiche fanno sì che l'intensità luminosa sia caratterizzata da un'ampiezza finita e cioè: $C <= C(x,y,t,\lambda) <= A$ dove A è la massima intensità. Vi è inoltre un'ovvia limitazione in area dell'immagine per cui si assume che la funzione sia positiva solo se:

$$-lx <= x <= lx$$
$$-ly <= y <= ly$$

dove le distanze lx ed ly determinano una regione rettangolare. Vi sarà anche una limitazione nel tempo espressa da:

$$-T <= t <= T$$

La $C(x,y,t,\lambda)$ risulta essere una funzione limitata a 4 dimensioni con variabili a valori finiti. Come ultima restrizione si assume che l'immagine sia continua nel dominio di definizione. Se poniamo $V(\lambda)$ uguale alla funzione sensibilità dell'occhio al variare di λ la funzione F che misura l'energia luminosa in un punto di coordinate x,y al tempo t è data da:

$$F(x,y,t) = \int_0^{\infty} C(x,y,t,\lambda)\, V(\lambda)\, d\lambda$$

Se si suppone l'immagine invariante nel tempo e monocromatica, si assume $F(x,y,t) = f(x,y)$ con t uguale a costante dove f rappresenta la funzione energia luminosa associata all'immagine continua; nel caso ad esempio di una fotografia si può associare la funzione immagine continua $f(x,y)$ alla densità fotografica

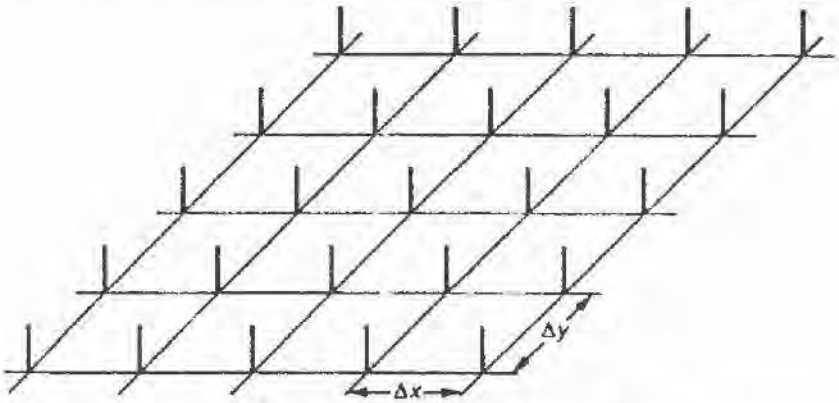
Conversione delle immagini dalla forma analogica alla forma digitale

La conversione analogico-digitale delle immagini è un processo particolar-

mente delicato e di importanza fondamentale in quanto consente un'eventuale successiva elaborazione numerica. Tale conversione si articola in tre passaggi fondamentali: campionamento, quantizzazione e codifica. Un'immagine in bianco e nero può essere rappresentata da una funzione continua f(x,y) come si è descritto precedentemente e quindi per ottenere un campionamento spaziale occorre moltiplicare la f(x,y) per una funzione c(x,y) di campionamento così definita:

$$c(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (x-m\Delta x,\ y-n\Delta y)$$

composta da un numero infinito di operatori di Dirac, disposti su una griglia rettangolare con passo Δx lungo l'asse x e Δy lungo l'asse y come appare nella figura seguente.



L'immagine campionata si può allora rappresentare nel modo seguente

$$f_C\ (x,y) = f(x,y)\ c(x,y) = f(m\Delta x, n\Delta y)\ (x-m\Delta x,\ y-n\Delta y)$$

In sostanza la funzione continua originale diviene discreta e cioè rimane definita solo nei punti di campionamento $m\Delta x$ e $n\Delta y$. Inoltre per il Teorema del Campionamento (Teorema di Shannon), analogamente a quanto avviene per i segnali monodimensionali, devono essere rispettate le seguenti condizioni al fine di garantire una assoluta non-perdita di informazione nel passare dalla forma continua a quella discreta del segnale immagine:

$$\Delta x <= 1/(2\ v_{xm})\ e\ \Delta y >= 1/(2\ v_{ym})$$

dove v_{xm} e v_{ym} indicano le frequenze spaziali massime.

In altri termini il campionamento della funzione immagine continua deve essere condotto con un passo tale da essere almeno il doppio della frequenza spa-

ziale massima presente lungo ciascun asse. Per chiarire, almeno qualitativamente, il concetto di frequenza spaziale, analogo a quello di frequenza temporale nel caso dei segnali monodimensionali, si pensi alla frequenza spaziale come ad un indicatore della misura della variabilità della luminosità presente in un'immagine. Una variazione brusca di intensità luminosa può essere così associata intuitivamente ad un alto valore di frequenza spaziale, mentre un'immagine caratterizzata da una luminosità uniforme sarà descritta da valori limitati di frequenze spaziali. Tornando al Teorema del Campionamento, in generale si sceglie un unico valore del passo di campionamento spaziale uguale al più piccolo dei due valori Δx e Δy in modo da disporre di una griglia di campionamento quadrata. Se sono state rispettate le condizioni del Teorema di Shannon, si otterrà una matrice che rappresenta l'immagine campionata in cui ogni elemento viene definito "pixel" (picture element), interrompendo così la continuità della funzione f(x,y), ma con la garanzia di non avere perso il contenuto informativo. Sarà poi necessario, per ottenere un'immagine in forma digitale, compiere le altre due operazioni: quantizzazione e codifica. La prima consiste nel rappresentare i singoli campioni spaziali f(m,n) con un numero finito di livelli quantizzati di ampiezza:

$$1 <= i <= Q$$

dove i sono i livelli possibili tali che:

$$a_1 <= a_i <= a_Q$$

dove con a si indica il valore minimo (generalmente 0) e con a_Q; il valore massimo dei livelli che nel caso di immagini monocromatiche consiste nel massimo valore disponibile per i livelli di grigio. L'espressione dell'errore di quantizzazione normalizzato all'ampiezza massima sarà:

$$q = (a_Q / Q)$$

Abbiamo trasformato così un'immagine continua in una matrice di numeri interi. Utilizzando una codifica in forma binaria si opera in modo che Q sia una potenza di 2, cioè $Q = 2^m$, dove m indica il numero di simboli binari utilizzati per rappresentare il campo numerico da 0 a Q-1. Si avranno così a disposizione parole o gruppi di m simboli binari essendo

$$i = \sum_{k=0}^{m-1} a_K 2^K$$

dove i coefficienti hanno valore binario 0 oppure 1. Tale rappresentazione corrisponde a numeri interi da 0 a 2^m. Tipicamente si ha m = 8 (8bits = 1byte) ed i livelli disponibili sono 256 (da 0 a 255). È possibile inoltre, per ottenere particolari effetti di rappresentazione dell'immagine, ricorrere ad un campionamento spaziale e ad una quantizzazione dei campioni non uniforme.

Classificazione delle principali tecniche di digital image processing

È utile classificare le principali tecniche di analisi numerica delle immagini in forma digitale in base all'obiettivo dell'elaborazione:
a) "contrast enhancement" (miglioramento della qualità): si cerca di rendere più leggibile l'immagine, modificandola per ottenere risultati migliori dalle successive analisi numeriche. Spesso si opera modificando l'istogramma delle immagini, ossia cercando di ridistribuire su tutto l'insieme di variabilità del segnale i livelli di grigio dell'immagine originaria secondo vari andamenti (lineari, esponenziali etc.; Gonzales, Wintz 1977). Queste elaborazioni sono note anche con il termine di equalizzazione;
b) "image restoration" (ripristino di qualità): l'obiettivo è simile al precedente, ma viene ottenuto compensando le degradazioni presenti nell'immagine originaria. Le degradazioni sono in generale connesse alla fase di aquisizione dell'immagine stessa; l'elaborazione si basa sulla conoscenza del modello del sistema che ha prodotto le alterazioni sull'immagine;
c) "feature extraction" (elaborazioni orientate all'estrazione di informazioni). Tra queste tecniche si possono considerare quelle di "edge detection" per l'estrazione dei contorni in un'immagine (Fig. 7) e le elaborazioni tipo "pseudo color processing" (Tav. Ia) che consistono nella progettazione di particolari tabelle di colore che mappano secondo opportune leggi i livelli di grigio dell'immagine originale al fine di evidenziare strutture non distinguibili nell'immagine originale (cfr. Forte in questa sede).

Alcuni approcci numerici per l'analisi di immagini digitali

Esistono diversi approcci numerici che offrono differenti prestazioni, richiedendo ovviamente costi computazionali diversi. Nel seguito si illustra una classificazione a cui corrisponde un costo crescente in termini di calcolo:
a) elaborazioni puntuali: ogni punto, a cui corrisponderà un livello di grigio nell'immagine elaborata, viene calcolato in base al valore di luminosità del punto corrispondente dell'immagine o delle immagini originarie come nel caso di cambiamenti di scala o di operazioni di tipo logico o algebrico tra immagini;
b) elaborazioni locali: si opera su aree centrate in un punto di cui si calcola un valore risultante secondo le modalità che verranno illustrate nel seguito. Sono le tipiche operazioni di filtraggio numerico spaziale quali i filtraggi passa-basso "noise cleaning" per eliminare il rumore e quelli tipo passa-alto per esaltare i contrasti (Fig. 14);
c) elaborazioni globali: prevedono l'uso di tutta l'immagine di ingresso per il calcolo di ogni valore dell'immagine di uscita. Tipicamente si usano delle trasformate, tra le più utilizzate quella di Fourier (Rosenfeld, Kak 1982)

Elaborazioni locali: la convoluzione

Un esempio di elaborazione locale è l'operazione di convoluzione che consiste nel trattare la funzione immagine f(m,n) discreta con un'elaborazione numerica di tipo lineare che produrrà un nuovo campo immagine g(m,n). Data una matrice detta nucleo di convoluzione

$$H = \begin{matrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{matrix}$$

e data un'immagine digitale f(m,n), per ottenere l'immagine convoluta g(m,n) per ogni pixel generico di coordinate i,j si ha:

$$\begin{aligned} f'(i,j) = {} & e * f(i,j) + a * f(i-1,j-1) + b * f(i-1,j) + \\ & c * f(i-1,j-1) + d * f(i,j-1) + f * f(i,j+1) + \\ & g * f(i+1,j-1) + h * f(i+1,j) + i * f(i+1,j+1) \end{aligned}$$

ed il valore finale del pixel sarà uguale a

$$g(i,j) = f'(i,j)/(a+b+c+d+e+f+g+h+i)$$

Se il denominatore è uguale a 0 viene posto uguale a 1 per evitare la divisione per 0. I nuclei di convoluzione (kernel) possono avere anche dimensione superiore a 3 (5,7,9 etc.); in questo caso l'operazione di convoluzione è un'ovvia estensione della precedente. Esistono vari tipi di kernel che applicati alle immagini producono effetti diversi. Ad esempio:

-1 -1 -1 -1 9 -1 -1 -1 -1	filtro passa-alto per evidenziamento dei contorni
1 1 1 1 1 1 1 1 1	filtro passa-basso "noise cleaning"
-2 -2 -2 0 0 0 -2 -2 -2	filtro per l'estrazione dei contorni verticali
-2 0 2 -2 0 2 -2 0 2	filtro per l'estrazione dei contorni orizzontali
0 -1 0 -1 4 -1 0 -1 0	filtro Laplaciano per l'estrazione dei contorni

Un'esemplificazione: l'estrazione automatica dei contorni

La ricerca dei contorni in un'immagine è un'operazione di fondamentale importanza; questi, infatti, corrispondono a limiti nello spazio, a cambiamenti di orientazione in superficie oppure a proprietà naturali. L'evidenziazione dei contorni può essere fatta con operazioni locali di tipo lineare come precedentemente illustrato, oppure con operatori non lineari quali il filtro di Sobel (Fig. 15) che realizza una differenziazione dell'immagine secondo il seguente algoritmo. I punti su cui agisce il filtraggio sono:

$$\begin{matrix} i\text{-}1,j\text{-}1 & i\text{-}1,j & i\text{-}1,j+1 \\ i,j\text{-}1 & i\text{-}1,j & i\text{-}1,j+1 \\ i\text{-}1,j\text{-}1 & i\text{-}1,j & i\text{-}1,j+1 \end{matrix}$$

al pixel centrale i,j dell'immagine originale viene sostituito il valore dato da

$$\begin{aligned} g(i,j) = {} & [\, f(i\text{-}1,j+1) + 2 * f(i,j+1) + f(i+1,j+1)\,] \\ & [\, - f(i\text{-}1,j\text{-}1) + 2 * f(i,j\text{-}1) + f(i+1,j\text{-}1)] \\ & + [f(i\text{-}1,j\text{-}1) + 2 * f(i\text{-}1,j) + f(i\text{-}1,j+1)] \\ & - [f(i+1,j\text{-}1) + 2 * f(i+1,j) + f(i+1,j+1)] \end{aligned}$$

Questo tipo di elaborazione può essere un primo ma significativo passo nell'automazione del disegno di oggetti rappresentati con immagini digitalizzate come verrà illustrato nel seguito.

Antonella Guidazzoli
CINECA - Casalecchio di Reno (Bologna)

LA SCIENZA DELLE IMMAGINI *

Il termine "eidologia informatica" traduce nella sostanza la dizione anglosassone "image processing", nel significato più ampio di elaborazione e trattamento delle immagini; più propriamente è opportuno parlare di elaborazione digitale delle immagini, trattandosi appunto di operazioni numeriche. Questo ambito di ricerca, sviluppato a partire dagli anni Sessanta, ha rappresentato e rappresenta tuttora un settore avanzato nell'ambito dell'informatica, moltiplicando progressivamente le proprie aree applicative. Si deve convenire che l'ar-

* Tutte le elaborazioni al calcolatore qui presentate (con l'unica eccezione alla nota 3) sono state realizzate presso il Laboratorio di Visualizzazione Scientifica del CINECA (Centro Interuniversitario di Calcolo Automatico) di Casalecchio di Reno nell'ambito di un più vasto program-

gomento necessiterebbe di una vasta introduzione teoretica e metodologica (e ormai anche storica), che esubera però i già sufficientemente lati percorsi dei campi applicativi a cui ci siamo indirizzati; pertanto per quanto riguarda questi aspetti, i riferimenti alle tecniche algoritmiche e più in generale i principi-base dell'eidologia informatica, rimando al precedente contributo di Antonella Guidazzoli che fungerà anche da relativo glossario per questa mia prima parte (per la bibliografia generale cfr. CAPPELLINI 1985; GONZALES, WINTZ 1977; PRATT 1978; MELLI 1991).

Schematizzando al massimo il discorso, possiamo indicare i due principali indirizzi di ricerca propri dell'eidologia informatica:

a) trasformazione del contenuto informativo di un'immagine (scena od oggetto) per ottenere dalla stessa immagine un contenuto informativo significativamente superiore → realtà semantica;

b) rappresentazione sintetica o simulazione di oggetti o scene (intese come insieme di elementi combinatori o categorie/oggetto; in questo senso quindi anche qualunque fenomeno fisico) in senso il più possibile realistico → raffigurazione di realtà fisiche in una realtà virtuale.

In entrambi i casi abbiamo a che fare con alterazioni e manipolazioni delle immagini e del corrispondente contenuto informativo originale ma con scopi del tutto differenti: nel primo caso infatti la modellazione dell'immagine si prefigge di attribuirle un nuovo valore cognitivo altrimenti inesplorabile e non percettibile; nel secondo caso invece l'immagine ha un valore documentativo riscontrabile nella sua più o meno marcata fedeltà di visualizzazione e sintesi di rappresentazione (ANCESCHI 1989, con bibl. precedente); soprattutto il carattere riassuntivo della rappresentazione in una realtà virtuale costituisce un elemento di grande potenzialità per gli esiti della ricerca. Dunque le facoltà evocative significanti delle immagini risiedono nei percorsi di accessibilità ai diversi livelli informativi che le caratterizzano. È proprio durante questa fase di caratterizzazione che si modella il contenuto informativo affinché acquisisca una forma (che non è mai definitiva) notevolmente intelligibile; l'importante è mantenere sempre il controllo delle alterazioni prodotte senza sovrastimare le rappresentazioni ottenute.

ma di ricerca finalizzato a sviluppare per l'archeologia le più avanzate tecniche di visualizzazione scientifica. Tale programma è stato attivato all'interno del mio corso di Dottorato in Archeologia (Etruscologia) all'Università "La Sapienza" di Roma grazie alla collaborazione tra il Direttore del CINECA Dott. Marco Lanzarini ed il coordinatore del Dottorato Prof. Giovanni Colonna, i quali vivamente ringrazio. Un particolare ringraziamento va infine ai ricercatori e collaboratori del Laboratorio di Visualizzazione Scientifica Ing. Gianna Fabiani, Dott. Luigi Calori, Dott. Roberto Scardovi e al Sig. Renzo "Ivan" Passarini.

Per quanto riguarda la disponibilità dei materiali si ringrazia per la collaborazione la Soprintendenza Archeologica dell'Emilia Romagna, particolarmente nelle persone del Dott. Luigi Malnati e del Sig. Sergio Sani. Per le foto aeree della terramara di Gaione (PR) si ringrazia per la gentile collaborazione il Dott. Gianluca Bottazzi.

Un'immagine digitale, ossia convertita in una matrice numerica, si autodescrive, o meglio è in grado di esprimere totalmente il contenuto in modo riflessivo; a noi spetta la ricerca delle chiavi di accesso, l'ingresso in una architettura aperta, continuamente ricostruibile, che altrove ho definito una sorta di "anastilosi" di informazioni (FORTE, GUIDAZZOLI 1991a). Questa ricerca di codici di accesso costituisce un cammino appassionante che insegue modelli informativi ad alta definizione, mai saturi. L'immagine così assume i connotati di uno spazio operativo da esplorare dove non solo a oggetti, ma anche a concetti possono essere attribuite forme grafiche e grafemiche fisionomiche alla loro definizione (DEGLI ANTONI 1989, 65-66); tale spazio non sarà necessariamente geometrico. Questo spazio eidomatico nella sua virtualità è anche spazio eidetico, memoria attiva di tutto ciò che rappresenta un modello del reale, sia esso accaduto o in divenire. Queste potenzialità, già evidenti nel campo delle scienze fisiche, credo che riescano a configurarsi come una nuova frontiera anche per le scienze storico-archeologiche. Gli studi paleoambientali e sul popolamento antico, l'evoluzione e la modellazione del paesaggio, geomorfologie, stratigrafie ed insediamenti archeologici, in sostanza qualunque scena, oggetto o fenomeno quantificabile numericamente o per immagini può essere restituito in una rappresentazione sintetica di informazioni che avranno come esponente e moltiplicatore i dati di accesso (perciò la definizione e l'attendibilità della restituzione saranno proporzionali alla qualità ed al dettaglio delle informazioni). Alcuni di questi indirizzi di ricerca sono stati attivati in passato soprattutto nel campo della simulazione e della modellazione matematica (BINFORD 1968; DORAN 1970; DORAN, HODSON 1975; HODDER 1978; SABLOFF 1981; per una sintesi cfr. MOSCATI 1987, 117 ss.), ma per altro non sono mai stati applicati, se non in minima parte, a realizzazioni eidologiche.

Al tema di un convegno di eidologia informatica svoltosi a Roma nel novembre del 1989 (*Roma* 1989) è stato dato un titolo estremamente stimolante: « Conoscenza per immagini »; parafrasando si potrebbe dire comunicazione per immagini. Il problema risiede semmai nell'interpretazione, ovvero nella selezione e trasferimento di configurazioni oggettivamente significative alla percezione, dunque classificabili. In questo caso ogni rappresentazione eidomatica diventa una vera e propria tassonomia delle immagini che deve indicare le successive strategie di interpretazione. A questo scopo l'elaborazione si indirizzerà verso criteri di assimilazione di tipo riconoscitivo e di tipo cognitivo (BOTTONI, MUSSIO 1989, 197) secondo gli obiettivi dell'indagine. Distinguendo per numero di categorie è possibile nell'analisi che il numero di classi all'inizio identificabili corrisponda a quelle effettivamente riconoscibili; ma è anche possibile che in seguito all'elaborazione si scoprano nuove classi non contemplate all'esordio dell'indagine perché supposte assenti o senza contributi cognitivi. Per questo è im-

portante prima di approcciarsi all'elaborazione scegliere la strategia operativa che potrà essere di tipo interattivo nel caso in cui l'analisi preveda in massima parte il fattore umano (quindi soggettivo), oppure di tipo automatico o semi-automatico se indipendente dall'intervento dell'operatore (Bottoni, Mussio 1989). In questa seconda ipotesi non si può prescindere dalla realizzazione di un sistema che conseguentemente all'analisi dell'immagine adotterà gli strumenti più idonei per la classificazione. Questi strumenti, dovrebbero prevedere:
a) la memorizzazione e la gestione delle conoscenze esterne all'immagine che l'operatore umano sfrutta nell'interpretazione;
b) la gestione dell'incertezza nei dati, nei risultati e nei ragionamenti di giudizio e di decisione, quando essa esista (Bottoni, Mussio 1989, 199).

Le soluzioni adottabili per questo genere di problemi si possono ricondurre alla formazione di linguaggi visuali ed ai sistemi interpretativi delle intelligenze artificiali (argomenti di grande interesse ma che comunque esuberano le finalità di questo contributo). Certamente il proporre soluzioni definitive ai criteri di interpretazione appare oltremodo irrealistico, correndo il rischio di adottare metodologie fuorvianti, se non asintotiche, per le priorità dell'indagine. Recentemente si è avviato allo studio un sistema, definito Image Interpretation Management System (IIMS), che si propone di utilizzare criteri concettuali comuni a differenti situazioni per interpretare una specifica classe di immagini, una volta indagatene le caratteristiche (Bottoni, Mussio 1989, 200, con bibliografia di riferimento).

Al momento credo che la scelta operativa più opportuna sia lavorare in modo interattivo lasciando ai sistemi automatici le operazioni di quantificazione e di analisi statistica dei dati, controllando direttamente le strategie di interpretazione, la qualità delle informazioni, e studiando i percorsi logici di accesso. Come supporto funzionale alla classificazione potrebbe essere estremamente utile attivare una memoria selettiva delle immagini che possa archiviare soltanto le caratteristiche salienti cognitive e notazionali dell'immagine medesima: queste ultime rappresenteranno i codici di identificazione ed i fattori discriminanti per l'interpretazione.

Per quanto si vogliano assommare serie di valutazioni più o meno positive sul futuro dell'eidologia informatica, risulta estremamente difficile prospettare anche il futuro più prossimo per queste nuove frontiere. Volendo fare valutazioni retrospettive si è riscontrato che il calcolo ogni cinque anni costa un fattore dieci in meno, cioè in venti anni le medesime prestazioni subiranno una riduzione dei costi di calcolo di almeno diecimila volte (Degli Antoni 1989, 59). Tutto questo senza contare fattori non quantificabili come i progressi della conoscenza.

Del resto le stesse applicazioni qui presentate nell'ambito dell'elaborazione delle immagini soltanto pochi anni fa sarebbero state assolutamente impratica-

bili su PC, con costi di calcolo e di memoria elevatissimi. Certamente un'esigenza piuttosto urgente sarà quella di ridurre ulteriormente i costi di memoria delle immagini creando archivi ottici di facile accesso e con contenuti costi di gestione. Sicuramente costruire un archivio di immagini digitali è di grande conforto per la ricerca non solo per l'infinitamente reversibile elaborazione delle informazioni, ma soprattutto perché non esiste teoricamente una soglia insuperabile di decifrabilità al contenuto informativo; e cioè la conoscenza dell'immagine progredirà con gli sviluppi del software e dell'hardware. Un altro fattore stimolante per la ricerca è che in questo campo le scienze umanistiche possono schierarsi a fianco delle cosiddette scienze pure senza ritardi tecnologici e soprattutto suggerendo metodologie di intervento che potranno essere universalmente fruibili e gestibili indipendentemente dal campo di azione.

Sottolineando il fatto che gli ambiti applicativi qui sotto indicati si caratterizzano secondo differenti valutazioni (livelli) sperimentali, vengono presentate di seguito alcune elaborazioni, ancora in corso, suddivise per campi di intervento.

La fotointerpretazione aerea

Lo studio del paesaggio e del territorio, sebbene articolabile in diverse applicazioni (cfr. ad es. Fussel 1982), necessita dell'analisi sistematica delle componenti e di tutti gli elementi significativi e caratterizzanti, classificabili come morfo-strutture, geomorfologie, suoli, colture, tracce, anomalie, ecc. Tale sintesi di elementi combinatori e di relazioni fra strutture presuppone quindi un'indagine di notevole complessità e metodologicamente selettiva. Si tratta cioè di estrapolare da un solido complesso, quale è il territorio a contenuto informativo elevato ed apparentemente disordinato, una serie di rappresentazioni significativamente percepibili ed ordinate con un contenuto informativo definitivamente leggibile in un sistema spaziale (Hodder, Orton 1976; Angyal 1941; Emery 1989). Il procedimento logico dell'elaborazione risulta una manipolazione guidata dei dati originari al fine di ottenere un riscontro oggettivo della realtà semantica (significante) del paesaggio (De Guio, Secco 1988 con bibliografia di riferimento).

Nella definizione del territorio e per la successiva relativa indagine è di primaria importanza procedere ad una valutazione ponderale (secondo l'accezione "statistica" del termine) degli elementi principali e secondari che lo definiscono, ovvero delle strutture discriminanti del paesaggio, siano esse specificamente naturali o artificiali. La fotografia aerea scelta per l'elaborazione computerizzata è una stampa in bianco e nero dell'I.G.M. risalente ad un volo del 1986 (autorizzazione I.G.M.I. n. 49, del 3.12.1985, Fig. 1), un'immagine quindi di qualità non certo privilegiata per indagini di tipo archeologico-topografico (infatti spes-

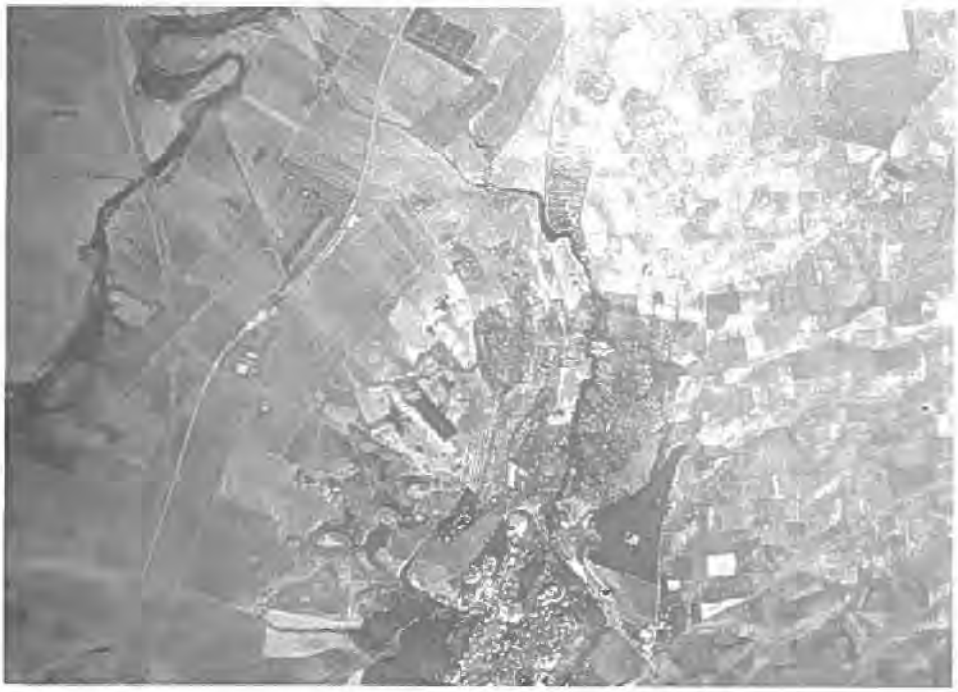


Fig. 1 — Foto aerea del territorio di Ascoli Satriano.

so le riprese più recenti corrispondono anche ad irreversibili alterazioni del paesaggio con scarsissima leggibilità per le strutture più antiche). La superficie del territorio coperta dalla ripresa aerea risulta di quasi 24 kmq.

Le coordinate macroscopiche discriminanti nella porzione territoriale indagata si possono considerare: nel settore Nord-occidentale la piana incisa dal corso del fiume Carapelle; più centralmente il tracciato del Fosso Rinaldi che praticamente disegna l'insediamento di Villa Faragola per poi affluire nel Carapelle; nel versante meridionale la collina su cui si sviluppa anche l'attuale abitato di Ascoli Satriano (Fig. 1). Le suddette morfo-strutture rappresentano certamente gli elementi dominanti del paesaggio e condizionano ponderalmente la percezione complessiva e l'interpretazione funzionale del territorio per lo studio della dinamica insediativa e del popolamento (per alcune metodologie cfr. De Guio, Secco 1988; De Guio, Wilkins, Whitehouse 1990; De Guio 1991).

Se lo studio ed il rilevamento delle tracce e delle anomalie costituiscono il prioritario strumento di indagine per l'identificazione di aree o siti archeologici (cfr. Piccarreta 1987 e, da ultimo, Alvisi 1989, con bibliografia precedente),

si deve constatare che questo tipo di analisi nel caso della nostra foto aerea non ha fornito indicazioni particolarmente interessanti (FORTE 1991a). Le informazioni desumibili dall'esame autoptico della ripresa aerea monocromatica evidenziano una quantità considerevole di tracce, soprattutto nelle tonalità cromatiche del grigio chiaro e molto chiaro, ma la quasi totalità di queste si sovrappongono e si confondono reciprocamente senza disegnare o suggerire alcuna figura geometrica o strutturale classificabile. La ragione principale per questo tipo di risultato è in gran parte da attribuire alla massiccia presenza in affioramento, e per lo più nell'immediato interro, di conglomerati di calcare assimilabili nella ripresa aerea ad una tonalità di grigio piuttosto chiara rispetto al terreno circostante. Lo stesso insediamento daunio di Villa Faragola, scoperto e rilevato topograficamente sul campo, come si vede nel fotogramma originale (Fig. 1) non presenta particolari attributi caratteristici o macroanomalie. Le uniche presenze antropiche dell'antichità estrapolabili con sicurezza nell'analisi della foto risultano i tracciati evidenti di tre strade romane che convergono a raggiera verso il centro di Ascoli, marcate nella continuità lineare dei toni di grigio chiarissimo (quasi al centro dell'immagine).

Il procedimento di elaborazione, portato a termine presso il laboratorio di Visualizzazione Scientifica del CINECA, ha seguito alcuni criteri operativi che, dato il buon esito, sono stati ripetuti anche per altre applicazioni; per questi soltanto possiamo parlare di successiva standardizzazione (quindi dove menzioneremo determinate procedure "standard" faremo riferimento alle descrizioni sotto esposte).

L'immagine, come quasi tutte quelle qui presentate, è stata acquisita da stativo tramite telecamera Sony DXC-3000 e successivamente digitalizzata con scheda VISTA dell'AT & T che acquisisce fino a 1024x1024 pixels con 32 bits di profondità (FABIANI, LANZARINI, ROSSI 1988). Memorizzata su calcolatore COMPAQ 386/20 è stata poi trasferita via rete su PC Macintosh II, su cui si è sviluppata e portata a termine l'intera fase di elaborazione. Il pacchetto di software utilizzato si chiama NCSA, nei moduli Datascope, Image, ImageIP, PalEdit, Layout, ed è stato elaborato al National Center for Supercomputing Applications dell'Università dell'Illinois, Urbana-Champaign [1].

Come si noterà dal confronto tra il fotogramma originale (Fig. 1) e la versio-

[1] La versatilità del programma è tale che i files possono essere salvati sia in formato raster (sistema a celle) sia in formato HDF (Hierarchical Data Format). Quest'ultimo formato presenta le seguenti importanti caratteristiche: 1) trasferibilità: un file HDF è trasferibile senza modifiche su qualunque tipo di elaboratore indipendentemente dal tipo di software ed hardware utilizzato; 2) autodescrizione: vi sono contenute oltre ai dati tutte le informazioni ad essi relative; 3) connettività: può contenere sequenze di immagini valide anche per realizzare animazioni; 4) compressione: l'HDF occupa in memoria meno del 50% dello spazio occupato dallo stesso file in formato ASCII (oltre ai manuali NCSA cfr. FABIANI, GUIDAZZOLI, PERIA 1990).

ne elaborata (Tav. Ia) le due scale spaziali non coincidono; infatti in un primo tempo per ottenere risultati più affidabili si è optato di restringere localmente il campo d'immagine ad una porzione centrale della ripresa aerea, sostanzialmente "zoomando" l'acquisizione. È stata operata questa scelta per diversi ordini di motivi: 1) la zona selezionata corrisponde ad un territorio geomorfologicamente abbastanza omogeneo e con un buon campo visivo data la rilevante percentuale di campi a coltura; 2) la necessità di calibrare l'applicazione ha dovuto presupporre il campionamento nell'immagine di un'area archeologica esplorata sul campo, rilevata topograficamente (abitato daunio di Villa Faragola) e con precise coordinate spaziali (Fosso Rinaldi) di riferimento; 3) le caratteristiche del settore più orientale del territorio compreso nell'aerofotogramma ne hanno comportato l'esclusione perché particolarmente soggetto a fenomeni di "rumore" (leggere distorsioni di ripresa ed accentuate alterazioni geomorfologiche sul terreno quali i conglomerati); altrettanto il settore più meridionale perché già interessato e parzialmente alterato dall'urbanizzazione di Ascoli Satriano.

Il percorso di ricerca che si è ritenuto più idoneo adottare pianificando l'elaborazione è stato il seguente (Forte 1991a, 1991b; Forte, Guidazzoli 1991b):

— campionamento e valutazione di un insediamento archeologico indagato sul campo (abitato daunio di Villa Faragola) considerando gli indici di riflettanza e di luminosità dei materiali presenti in superficie (ciottoli fluviali, ceramica, elementi fittili, terreno antropico, strutture);
— relativa caratterizzazione numerica e di contorno;
— individuazione morfologica e classificazione di elementi o morfo-strutture di disturbo alla fotointerpretazione, nella fattispecie i conglomerati di calcare;
— in base a parametri e criteri comparativi identificazione e classificazione automatiche di altri siti archeologici sconosciuti e non indagati sul terreno;
— realizzazione infine di una carta archeologica predittiva del territorio.

L'analisi statistica preliminare dell'aerofotogramma monocromatico digitalizzato ha indicato una inadeguata distribuzione dei livelli di grigio concentrati numericamente nelle gradazioni d'intensità luminosa da 90 a 160 (0 = bianco; 255 = nero). Quindi in base a questi riscontri l'immagine è stata equalizzata estendendo il range di intensità luminosa e redistribuendo i livelli di grigio; l'immagine così ottenuta risulta più contrastata e con un maggiore contenuto informativo (Fig. 2). A questo punto si sono sperimentati diversi filtri numerici per migliorare ancora di più il contrasto specialmente nelle zone dove si concentravano rilevanti discontinuità. Infine, osservate le caratteristiche numeriche della foto digitale, si è intrapresa l'analisi a pseudo-colore mediante la realizzazione di una look-up table a scala cromatica dedicata, progettando separatamente le

Fig. 2 — Foto aerea digitalizzata equalizzata.

tre componenti di colore R G B (red, green, blue). Come si può notare dalle figure a e b della Tav. I sono stati scelti due tipi di tavole cromatiche (palette): nella prima (a) si è indirizzata una particolare attenzione nella creazione della componente blu (le proprietà psicofisiche della visione cromatica mostrano un'elevata sensibilità al contrasto nella zona del blu) per la quale è stato scelto un andamento di tipo sinusoidale in cui è inserita una rilevante discontinuità intorno al valore medio del range di livelli riferibili all'area archeologica nota (Villa Faragola, UR 33); nella seconda (b) si sono esasperate ulteriormente le trasformazioni grigio-colore variando i toni nelle zone di discontinuità, ed evidenziando soprattutto i punti di stacco tra terreni arativi o a coltura ed aree archeologiche/terreni antropici.

Le immagini così elaborate forniscono un assetto informativo incomparabilmente superiore ai fotogrammi originali indirizzando l'indagine ad aree ben selezionate ed escludendo automaticamente dal campo visivo tutte quelle aree che anche all'esplorazione sul campo offrirebbero uno scarso contributo cognitivo (per es. campi coltivati a frutteto o a vegetazione ad alto fusto, geomorfologie, ecc.). Nella tavola cromatica elaborata particolarmente nella componente blu, ad esempio, i conglomerati di calcare, che nell'immagine monocromatica presen-

tavano all'occhio le medesime tonalità di grigio di altre tracce sul terreno, sono codificati nella palette in un colore rosato acceso, differenziandoli chiaramente dagli altri elementi presenti al suolo. In questa fase dell'elaborazione, con l'immagine praticamente già autodescritta in porzioni classificabili e piuttosto omogenee, è stato possibile campionare o "mappare" numericamente l'insediamento archeologico di Villa Faragola, già esplorato sul terreno (Tav. Ia, nel rettangolo giallo), ed in base a questo verificare la presenza di altre zone con caratteristiche numeriche affini. L'analisi ha circoscritto macroscopicamente l'attenzione (con livelli di luminosità intorno al valore di 128 come l'insediamento di Villa Faragola, Fig. 3) ad un'area ben marginata ed altrettanto omogenea collocata circa 1,5 km. a sud della precedente (Tav. Ia, all'interno del quadrato rosso) in località Valle Castagno (UR 76). La verifica sul campo intrapresa nel novembre del 1990 ha confermato le indicazioni suggerite dall'analisi numerica, rinvenendo un altro insediamento archeologico riferibile ad un abitato daunio e diagnosticato dalla presenza in superficie di ceramica geometrica daunia, ciottoli fluviali, tegole e coppi. Quest'ultimo sito andrà messo in relazione con tutto un sistema insediativo a vocazione prevalentemente agricola, tipico del territorio in esame.

Completata dunque l'elaborazione dell'aerofotogramma per quanto concerne l'insediamento di Villa Faragola si è sovrapposto all'immagine elaborata il rilievo eseguito sul campo in base alla concentrazione ed all'affioramento dei materiali e posizionato sulla particella catastale. Il risultato ottenuto (Tav. IIa) evidenzia una sostanziale coincidenza sul versante settentrionale dell'area, mentre nel settore meridionale la concentrazione dei materiali rilevati appare più diffusa rispetto all'analisi della ripresa aerea. Pur considerando l'avvenuta dispersione dei materiali in seguito alle arature e ad altri fenomeni di trascinamento naturale (erosione, dilavamento, ecc.) in una zona che presenta una pendenza di circa il 10%, nell'analisi più generale del sito archeologico è opportuno comunque interpolare i risultati dei dati diversamente acquisiti privilegiando sempre la verifica sul terreno. Un dato importante di questa interpolazione è stato ad esempio il riscontrare come quasi tutte le capanne dell'abitato daunio perimetralmente identificabili dalla disposizione e concentrazione di ciottoli fluviali si collocassero nel versante settentrionale del pendio, cioè esattamente in corrispondenza dell'area evidenziata dall'analisi a pseudo-colore (Tav. IIa). Come controprova per verificare l'estensione dell'insediamento daunio di Villa Faragola, è stata intrapresa un'analisi a soglie praticamente escludendo dall'immagine quasi tutti quei livelli di luminosità che non corrispondevano alle caratteristiche numeriche del sito archeologico che, come abbiamo visto, nel nostro caso si aggiravano intorno a 128 di gradiente (Fig. 3).

Questo tipo di operazione, pur con qualche margine di incertezza (Tav.

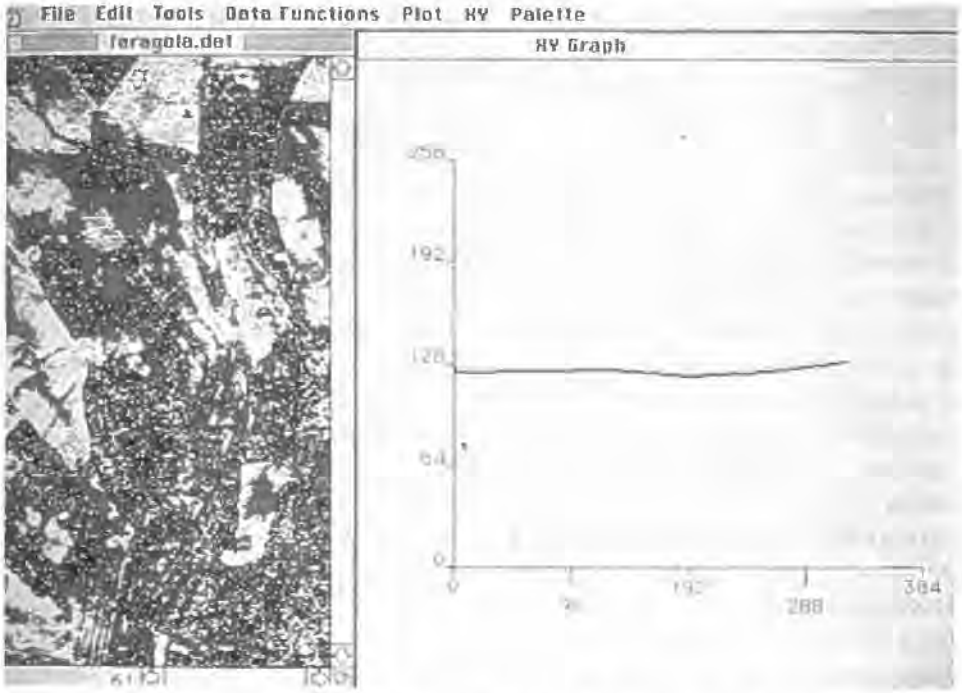


Fig. 3 — Pseudo-color processing della foto aerea di Ascoli Satriano: identificazione automatica di un sito archeologico mai indagato sul territorio.

IIb), evidenzia con maggiore dettaglio il profilo della regione di interesse distinguendo al suo interno alcune discontinuità puntiformi, qualificabili nelle tonalità del rosso e del rosso-amaranto, che corrispondono in massima parte alle più evidenti concentrazioni di materiali sul campo (per lo più le capanne perimetralmente identificabili). Le aree marginali dell'immagine che presentano pixels colorati analogamente (soprattutto sul lato sinistro) devono essere tralasciate nell'interpretazione perché sono elementi di disturbo determinati dall'ombra zenitale di alberi ad alto fusto (e dunque facilmente individuabili).

In base ai risultati estremamente confortanti conseguiti con le metodologie summenzionate (per altri studi e ricerche cfr. Scollar 1977, 1978; O'Brien *et al.* 1982; Aspinall, Haigh 1988), si è estesa l'analisi all'intero territorio compreso nell'aerofotogramma monocromatico (Fig. 1), per una superficie complessiva di quasi 24 kmq. Questo tipo di operazione, ovviamente a maggior rischio di errore data la vasta porzione territoriale indagata, riesce sostanzialmente a simulare la realizzazione di una vera e propria carta archeologica predittiva, del tutto preliminare a qualsiasi tipo di intervento sul terreno: potremmo definire questo procedimento come "inferenza eidomatica". Nel campo della fotointer-

pretazione aerea ritengo che al momento possa rappresentare il massimo obiettivo raggiungibile (anche se massimamente sperimentale), soprattutto considerando il fatto che la predittività (pur con margini di errore) trova fondamento scientifico nell'analisi del terreno e dei materiali presenti.

A questo scopo per l'identificazione di tutti i siti archeologici prevedibilmente presenti nel territorio preso in esame si è realizzata una tavola cromatica sintetica e selettiva calibrata corrispondentemente alle caratteristiche numeriche degli insediamenti noti o esplorati sul campo. Questa look up table riassume statisticamente i livelli medi di luminosità relativi ai pixels classificati come aree archeologiche (questo calcolo ha previsto volutamente una leggera sovrastima dei dati). Da quanto si evince dalla Tav. IIIa si sono utilizzate soltanto 4 tonalità di colore: il nero per le geomorfologie rilevanti che fungono anche da coordinate spaziali, verde chiaro e scuro per i suoli a coltura, il rosso per le aree archeologiche. I pixels relativi alle aree archeologiche sono stati colorati in base alla media statistica delle frequenze dei livelli di grigio presenti nei siti noti campionati (inferenza statistica-eidomatica) e una volta eliminati elementi di disturbo o rumore. Il confronto fra la carta archeologica così elaborata e i rinvenimenti archeologici individuati ed esplorati sul campo ha sino ad ora dimostrato l'esattezza delle previsioni in oltre il 75% dei casi con margini di errore riscontrati sempre per eccesso o sovrastima (cioè sino a questo momento nessun insediamento archeologico è stato tralasciato dall'analisi numerica, semmai sono risultati più dilatati i margini di contorno). Nonostante il buon esito dell'esperimento le procedure eseguite non vanno però indiscriminatamente generalizzate, né applicate automaticamente a qualunque tipo di indagine topografica.

Pertanto è opportuno adoperare, sin dalle prime fasi, rigorosi criteri analitici:

1) indagare le caratteristiche geomorfologiche del territorio cercando di esaminare aree abbastanza omogenee (anche nell'orografia); nel caso di porzioni territoriali poco coerenti o morfologicamente non uniformi è meglio suddividere l'immagine e continuare l'elaborazione per sotto-immagini calibrate ed analizzate separatamente;
2) standardizzare al massimo le condizioni di acquisizione dell'immagine in modo da non creare ulteriori "rumori" o disturbi alle originali condizioni di ripresa (che possono già presentare alterazioni delle condizioni di luminosità o visibilità); nel caso che l'immagine da acquisire presenti qualunque tipo di alterazione che ne comprometta la leggibilità è indispensabile apporre dei correttivi (per es. filtri numerici) prima di procedere con l'analisi numerica;
3) le metodologie applicate ed i risultati conseguiti con l'analisi e l'elaborazione di un'immagine valgono soltanto per quell'immagine; due differenti riprese della medesima scena od oggetto (quindi anche lo stesso paesaggio territoriale) devono essere analizzate separatamente (lo stesso valga per la medesima

immagine acquisita in tempi diversi). Nei casi dubbi è consigliabile esaminare le frequenze statistiche dei livelli di grigio.

Passiamo ora ad esaminare un'altra foto aerea, questa volta a colori, relativa alla terramara di Gaione (PR). Come si potrà notare la tipologia dell'insediamento è chiaramente leggibile (Tav. IIIb): il terrapieno, a traccia netta su toni chiarissimi, presenta una forma all'incirca quadrangolare ma con angoli smussati; all'interno si evidenzia l'abitato, caratterizzato da un terreno fortemente antropizzato di colore marrone scuro che disegna una forma sub-rettangolare allungata interrotta al centro e verso il margine meridionale da un'area circolare molto chiara (quest'ultima potrebbe essere interpretata come un accumulo di terreno conseguente ad un intervento di scavo). L'emergenza macroscopica nell'aerofotogramma è costituita dall'appezzamento di terreno a seminativo che interrompe in modo netto e lineare la lettura dell'insediamento occultando completamente il lato orientale del terrapieno e parzialmente quello meridionale. Nel complesso quindi abbiamo un'immagine che presenta un livello di lettura e di interpretazione più che buono da un lato, mentre dall'altro abbiamo una quasi totale illeggibilità con uno stacco netto delle superfici.

Partendo da questi dati è stata adottata una strategia operativa che contemplasse un'elaborazione per sotto-immagini, ovvero, considerate le disomogeneità, un trattamento separato per le due distinte porzioni di immagine. In pratica le priorità della ricerca si sono indirizzate nell'incrementare leggermente la definizione sul versante ben visibile dell'insediamento (che comunque non mostra particolari problemi interpretativi), e nell'esaltare al massimo il contrasto e le discontinuità dei livelli di luminosità in corrispondenza del versante orientale occultato dall'area a seminativo. Quindi una volta tagliata l'immagine in due sottoparti (in corrispondenza del limite del campo a coltura) si è proceduto nel modo seguente: la parte occidentale che ben delineava il terrapieno è stata elaborata per lo più quantizzandola come se fosse una bitmap a due soli livelli di grigio e migliorando la qualità del contrasto con una compressione e contrazione delle posizioni dei valori dati (funzione equalizzatrice di tipo lineare $a*x + b$); contemporaneamente è stata applicata una soglia per eliminare dall'immagine i valori dei pixels corrispondenti al terreno arativo, che infatti appare bianco. La seconda sotto-immagine, riferibile al campo a coltura, è stata equalizzata ed analizzata statisticamente esaltandone i livelli di discontinuità; infine vi è stata applicata una palette che assecondasse i parametri individuati dall'analisi numerica.

Come si può ben vedere dalla Tav. IVa l'area che si presentava all'occhio apparentemente uniforme, in realtà distingue tre differenti e piuttosto compatte classi di pixels (colorati dall'esterno all'interno rispettivamente in verde, in rosso ed in bianco), corrispondenti a tre diversi livelli di luminosità del terreno. Per quanto interessa alla nostra indagine le aree in bianco ed in rosso si possono

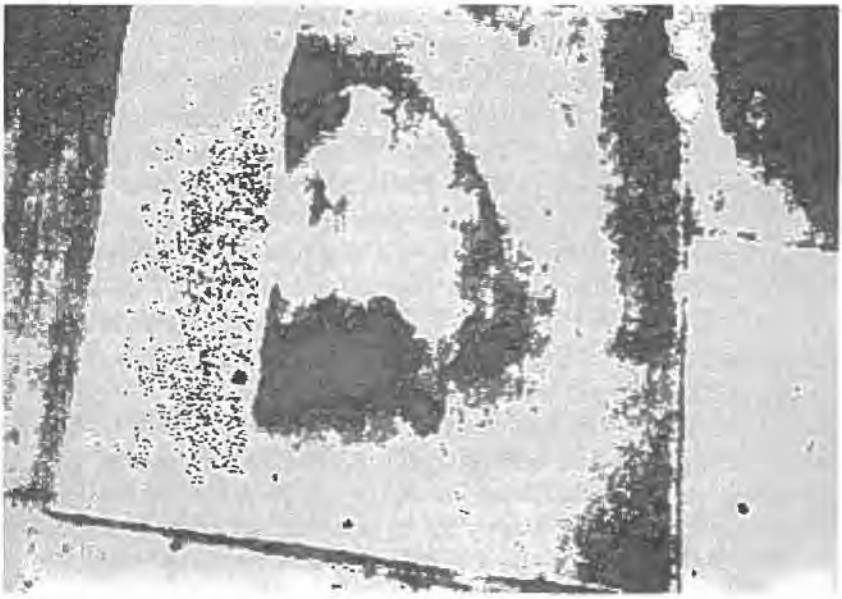


Fig. 4 — Elaborazione della foto aerea della terramara di Gaione (PR).

afferire, con qualche margine di incertezza (derivabile da pixels di dubbia classificazione), al terrapieno ed al fossato. Restringendo con maggiore precisione il campo di analisi mediante un procedimento di thinning (assottigliamento) dei pixels, eludendo cioè quelli di incerta classificazione e rilevando quelli coerentemente riferibili alla struttura, riusciamo ad ottenere progressivamente un'immagine estremamente nitida e ben interpretabile. L'esito finale è l'identificazione completa e precisa del terrapieno perimetrale anche per il lato occultato dal campo a coltura, caratterizzato da un profilo convesso leggermente schiacciato verso l'alto e più allargato in basso (nelle figure riprodotte il Nord geografico è in basso); di rilievo è l'individuazione dell'estremità quasi ad angolo retto che chiude la struttura sul lato NE (nella Fig. 4 a sinistra in basso). Alla fine dell'elaborazione le due sotto-immagini, trattate separatamente, sono state incollate (e così appaiono nella Tav. IVa e nella Fig. 4) restituendo integralmente l'immagine originale ad una nuova lettura (Fig. 4).

Nonostante i risultati certamente interessanti conseguiti con le metodologie adottate bisogna comunque sottolineare come teoricamente non esistano soglie definitive al completamento di un'elaborazione. Se infatti siamo noi a scegliere di volta in volta quali sono i criteri che soddisfano gli scopi della ricerca, non per questo l'indagine può dirsi definitivamente conclusa: il lavoro potrebbe continuare all'infinito seguendo classificazioni sempre più dettagliate e procedendo

per sotto-immagini sempre più piccole. Una soglia immaginaria la possiamo collocare nel punto dell'indagine in cui le informazioni eccedono la stessa interpretazione depistandone le finalità primarie e compromettendo la leggibilità dell'immagine.

Con questi presupposti la gestione e la tutela ambientale, lo studio del paesaggio (BURROUGH 1987), nonché la stessa pianificazione territoriale (LYONS 1976, 1981; LYONS, AVERY 1977; LYONS, MATHIEN 1980), potranno avvalersi di avanzate tecniche di elaborazione a costi ridottissimi sia in termini economici che di tempo impiegato, dal momento che è ormai possibile completare questo tipo di indagini interamente su Personal Computer (Mac II), guidate quindi e soprattutto razionalizzate dall'esperienza propria del ricercatore e del topografo.

LE PROSPETTIVE DEL TELERILEVAMENTO

Uno dei campi potenzialmente a maggiore sviluppo applicativo per analisi sul territorio e studi sul paesaggio è sicuramente rappresentato dal telerilevamento e dall'utilizzo di immagini da satellite. Dal momento che in questo ambito le tecniche di rilevamento interessano immagini multispettrali, è forse opportuna una breve introduzione sull'argomento.

Rispetto ad altri sistemi di acquisizione, questo tipo di rilevazioni viene effettuato tramite sensori multispettrali, rilevatori termici o radiometri, che possono essere collocati a bordo di satelliti artificiali o di aerei. La ripresa delle immagini avviene quindi mediante sistemi a scansione che registrano energia elettromagnetica, convertita da un apposito rivelatore in segnali elettrici di intensità proporzionale alla quantità di energia radiante pervenuta. La rilevazione sarà attiva se misura la risposta della superficie terrestre alle radiazioni emesse da laser, radar, e strumenti a microonde (radar ad apertura sintetica saranno disponibili grazie al satellite ERS-1); sarà passiva se registra la radiazione solare riflessa o diffusa dalla Terra, oppure le sue onde elettromagnetiche. In base a questi principi è possibile attribuire una firma spettrale a differenti classi morfologiche relative al tipo di copertura e/o composizione del suolo, ma anche relative ad elementi macroscopici presenti in acque litoranee. Per quest'ultimo caso è bene rammentare che, se le componenti verdi e blu dello spettro visibile stentano ad attraversare l'atmosfera, viceversa riescono a penetrare agevolmente i corpi d'acqua; in campioni d'acqua particolarmente limpida la luce blu riesce a penetrare sino alla profondità di circa 10-20 m.

La geometria ideale del telerilevamento è rappresentata dalle riprese da satelliti artificiali, le cui immagini più diffuse sono sicuramente quelle riferibili ai satelliti Landsat, il primo dei quali fu messo in orbita dalla NASA nel 1972. Attualmente, per usi civili, sono operative le piattaforme spaziali dei satelliti

Landsat 5 e del francese SPOT. I Landsat sono in grado di riprendere immagini di 185 x 185 km. di dimensioni con due sistemi di acquisizione: uno multispettrale a scansione (MSS, risoluzione spaziale di 80 x 80 m.) ed uno più complesso chiamato Thematic Mapper (TM) che possiede una più elevata risoluzione spaziale e spettrale (30 x 30 m. per tutte le bande eccetto la sesta per la quale la risoluzione è di 120 x 120 m.). Così restituite, le immagini, o scene, si definiscono in matrici numeriche con le righe corrispondenti alle linee di scansione necessarie (circa 6000) e tante colonne quanti sono gli intervalli di campionamento di ogni linea. La "natura" digitale delle immagini, come già si è rilevato nel precedente paragrafo, ne consente una precisa classificazione e discriminazione in classi. Infatti le potenzialità e la precisione dell'analisi multispettrale risiedono nel fatto che ogni corpo od oggetto si caratterizza per la proprietà di riflettere le onde elettromagnetiche che vi incidono anche in base alla loro lunghezza.

Ragionando per categorie di massima le proprietà di riflettanza e di assorbimento della superficie terrestre individuano tre principali classi di copertura sul territorio: il suolo nudo, la vegetazione e l'acqua. Per ciascuna classe è possibile identificare una firma spettrale di riferimento che ne costituisce il prototipo. In base all'analisi numerica i range di riferimento saranno attribuiti secondo intervalli numerici (interamente da 0 a 255). Quindi per qualunque tipo di ricerca si potrà partire da aree campione (suoli o vegetativo) o prototipo per arrivare a classificare automaticamente ampie superfici anche a larga scala spaziale. Una volta campionati i codici numerici di riferimento si potrà procedere per analisi più dettagliate di tipo spaziale, spettrale (ampiezza e posizione nello spettro delle singole bande di rilevamento), temporale (reiterate riprese della medesima area geografica in un determinato lasso di tempo). Come è noto con questi sistemi si sono moltiplicate le applicazioni in tutti i settori della ricerca scientifica e dello studio dell'ambiente (Del Pero, Marino 1986; Del Pero, Tonelli 1987).

Per quanto riguarda le indagini archeologiche con sistemi di telerilevamento lo stato della ricerca è ad una fase ancora embrionale (Baker, Gumermann 1981; Del Pero, Pizzaferri 1991)[2] mentre più diffuse sono analisi topografiche su fotogrammi satellitari (cfr. Marcolongo, Mascellani 1978; Barisano, Bartholomè, Marcolongo 1984; Jacques *et al.* 1988). Difficoltà oggettive possono essere rappresentate dalla insufficiente definizione della scala spaziale per indagini più dettagliate (il satellite SPOT con sensore pancromatico è in grado però di riprendere immagini in bianco e nero sullo spettro visibile con una

[2] È attualmente in corso di perfezionamento un progetto di collaborazione scientifica che vede impegnato il sottoscritto, il CINECA (Centro Interuniversitario di Calcolo Automatico), e l'ESA (Agenzia Spaziale Europea), per sviluppare applicazioni in questo campo.

risoluzione di 10 m.) e dalla generale mancanza di criteri standard per la classificazione. Considerando comunque i diversi fattori fisici che determinano la firma spettrale, quali ad esempio la percentuale di umidità e di assorbimento dell'acqua di un terreno, o la presenza in campi a coltura di materiali geomorfologicamente estranei che ne alterano i normali indici di riflettanza (per es. aree antropizzate, presenze di ceramica o materiali da costruzione), credo si potranno comunque ottenere risultati di grande interesse anche nell'esplorazione di aree archeologiche strutturalmente non macroscopiche.

Pertanto indicherò di seguito alcuni percorsi di ricerca che ritengo abbiano nel prossimo futuro notevoli potenzialità applicative:

— analisi delle firme spettrali di determinati insediamenti archeologici per indagini e classificazioni su ampia scala, sia al suolo, che lungo i litorali, con la facoltà di individuare presenze archeologiche rilevanti sino ad una profondità di circa 10-20 m. (in condizioni di limpidezza dell'acqua: cfr. ad es. il caso di relitti, porti o insediamenti sommersi);
— classificazione degli insediamenti archeologici relativamente alle condizioni geomorfologiche di giacitura;
— caratterizzazione dei medesimi in base allo studio dell'evoluzione del paesaggio;
— realizzazione di carte archeologiche predittive e studi sul popolamento antico;
— realizzazione di mappe tematiche;
— riproduzioni cartografiche con informazioni topografiche integrate da immagini satellitari secondo sistemi analogici o digitali per ottenere la migliore corrispondenza geometrica e la massima flessibilità nell'associare dati di varia natura;
— classificazione degli elementi che compongono l'immagine sulla base della teoria decisionale statistica e della frequenza spaziale;
— analisi delle relazioni spaziali tra siti, e tra siti e strutture del paesaggio;
— trasformazione prospettica delle immagini e proiezione su modelli digitali del terreno;
— rendering visivo di tali modelli in base allo studio delle risposte spettrali di regioni del terreno;
— ricostruzioni sintetiche tridimensionali del paesaggio;
— navigazione ed esplorazione tridimensionale realistica dell'ambiente;
— integrazione dei dati in sistemi d'informazione geografica delle diverse banche dati nazionali (G.I.S.);
— costituzione di archivi e database ottici per immagini multispettrali (registrate su nastri magnetici) come laboratorio di ricerca permanente per indagini topografico-territoriali.

Proprio quest'ultimo punto credo che possa rappresentare per il futuro la condizione ideale per sviluppare ricerche in questo ambito: offrire all'archeologo e allo scienziato la possibilità di accedere ad un patrimonio informativo di altissima definizione, un contenitore di dati geografico-territoriali continuamente in espansione. Con il progredire delle tecnologie cambieranno i criteri di accesso alle informazioni delle immagini che saranno esplorabili a contesti sempre più dettagliati, guidandone così l'interpretazione.

Le trasformazioni prospettiche del paesaggio e i modelli digitali del terreno

La simulazione di scene ambientali e lo studio di modelli digitali di elevazione del terreno (cfr. sull'argomento Harris 1988, 161-169) rappresentano una fase della ricerca estremamente stimolante per le scienze informatiche ed altrettanto indispensabile per qualunque tipo di analisi territoriale.

Si definisce modello digitale del terreno (D.E.M., Digital Elevation Model, o D.T.M., Digital Terrain Model) una restituzione altimetrica di un territorio (in scala) elaborata da una matrice di dati numerici in cui per ogni coordinata spaziale è data una quota altimetrica. Le differenze di definizione e di dettaglio dei modelli sono date da tecniche matematiche di interpolazione dei dati acquisiti e registrati al calcolatore. In base alle tecniche di interpolazione adottate cambierà la rappresentazione e visualizzazione del modello; la realizzazione ottimale sarà quella realisticamente più affine alle caratteristiche fisiche dell'area riprodotta. La Fig. 5 (tratta da Furini *et al.* 1991) illustra in uno schema riassuntivo le molteplici strategie operative che si possono intraprendere per arrivare alla costruzione di un'immagine sintetica tridimensionale (schema TISS). I più avanzati percorsi di ricerca per la costruzione di D.E.M. si sono indirizzati, con risultati piuttosto incoraggianti, allo sviluppo di metodologie basate sulla matematica e sulla geometria frattale (Barnsley 1988). Le tecniche frattali infatti risultano peculiarmente adatte per l'osservazione e la modellazione del paesaggio, soprattutto se tradotto da immagini satellitari, proprio perché presenta una fisionomia erratica (Brivio, Righetti 1989; Furini *et al.* 1991). A confronto della geometria classica, senz'altro appropriata per la descrizione di oggetti finiti, specie se tecnologici, la geometria frattale si presta bene alla definizione infinitamente segmentata di forme naturali o di modelli di strutture fisiche.

A questo proposito, per gentile concessione degli autori[3], faccio riferimen-

[3] Ringrazio vivamente per la collaborazione il Prof. Daniele Marini del Dipartimento di Scienze dell'Informazione dell'Università degli Studi di Milano per l'autorizzazione a pubblicare un'immagine tratta dal lavoro di Furini *et al.* 1991, che si inserisce in un progetto comune di ricerca tra il suddetto Dipartimento ed il C.N.R. Istituto per la Geofisica della Litosfera — Telerilevamento.

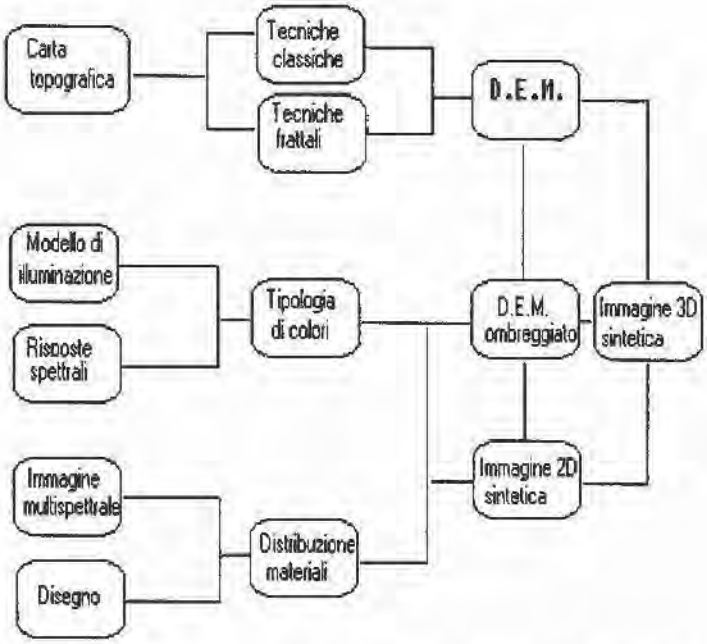


Fig. 5 — Schema T.I.S.S.: costruzione di un'immagine sintetica tridimensionale.

to alla costruzione di un modello 3D con metodi frattali relativo ad una regione montagnosa della Valle Aurina, nelle Alpi Orientali, sita a quote comprese fra i 1700 e i 3500 metri (Fig. 6). Per quest'area è stato realizzato, in un primo momento con tecniche classiche, un D.E.M. digitalizzando le isoipse con una equidistanza di 100 m. e con una griglia di m. 30 x 30 affinché si integrasse perfettamente con le immagini da satellite Landsat TM (Thematic Mapper) che hanno la stessa risoluzione (Brivio, Righetti 1989). La visualizzazione dello scenario rappresentato ha tenuto conto di molteplici fattori tra cui le condizioni di illuminazione, la proiezione prospettica del modello del terreno, la resa cromatica, e gli scambi di energia elettromagnetica radiante tra le morfostrutture del paesaggio. Per ottenere poi la più dettagliata resa fotorealistica, anche nel colore, sono state classificate le regioni di interesse in base alle corrispettive risposte spettrali ricavate dai dati multispettrali del satellite. L'elaborazione è stata infine completata con altri effetti di rendering per simulare altre realtà fisiche come il cielo e le nubi (Fig. 6).

Un'alternativa altrettanto interessante sempre nell'ambito della costruzione di modelli tridimensionali e parzialmente integrabile alla suddescritta si può considerare un'applicazione di tipo texture mapping. Il procedimento consiste sostanzialmente nel sovrapporre (ma si potrebbe dire anche "incollare") un'im-

Fig. 6 — Modello 3D frattale relativo ad una regione montagnosa della Valle Aurina.

magine relativa ad una scena reale (nel nostro caso ripresa aerea o da satellite), oppure il suo rilievo strutturale, ad una superficie tridimensionale che può essere restituita a poligoni (quest'ultima realizzata con tecniche classiche 3D o con interpolazione frattale). Si tratta cioè di modellare un'immagine facendola aderire punto per punto ad un solido costruito esattamente secondo le caratteristiche strutturali dell'immagine stessa[4]. Le simulazioni ambientali e le trasformazioni prospettiche così realizzate non solo contemplano una risoluzione spaziale estremamente precisa, ma assimilano l'immagine ai suoi colori naturali senza alcun tipo di alterazione o convenzione grafica, restituendone un modello non aleatorio. Completata questa estrapolazione di un solido da una realtà territoriale complessa è possibile muoversi al suo interno scegliendo infinite prospettive

[4] Un esperimento di questo tipo realizzato mediante Pixel Machine è in corso al CINECA di Casalecchio di Reno ed interessa il rilievo della città etrusca di Marzabotto.

di accesso e punti di vista ipotetici o impossibili.

La prospettiva più affascinante in questo tipo di ricostruzioni ambientali sintetiche è quella di poter navigare nel paesaggio, muoversi all'interno di una realtà tridimensionale esplorandone progressivamente tutte le regioni del campo visibile ed intervisibile. Tale navigazione potrà anche essere animata (registrando le immagini frame by frame) e pilotata dal ricercatore, che guiderà i propri vettori di esplorazione attraverso il paesaggio conducendo l'indagine da qualunque punto di osservazione. La Tav. IVb raffigura un esempio di questo genere tratto da un'elaborazione realizzata su Pixel Machine[5]: rappresenta una ripresa aerea di una zona del Colorado restituita tridimensionalmente mediante un texture mapping, ed in cui si riconosce un puntatore (in tempo reale è una navicella in movimento) che si sposta sulla superficie terrestre riprodotta sinteticamente e riconosce il microrilievo come se fosse una realtà fisica. Quindi in una sequenza animata vedremo il puntatore sparire in una valle o in un dosso per poi ricomparire percorrendo nuove dimensioni spaziali.

Queste tecniche, che sono attualmente forse lo strumento più sofisticato per indagini di tipo ecologico-ambientale, costituiranno nel prossimo futuro un banco di ricerca importantissimo per indagini topografico-archeologiche, per la pianificazione territoriale di aree a rischio, per analisi spaziali e sul popolamento antico, per ricostruzioni paleoambientali, modelli predittivi di simulazione, ecc. Il nodo centrale della ricerca verte sul fatto che non si deve intendere il paesaggio come una realtà geometrica consolidata, né spazialmente immutabile, ma piuttosto come un solido complesso in continua definizione. Per questi motivi e per i problemi succitati è possibile che in futuro lo studio e la descrizione di realtà fisiche complesse, quali quelle territoriali, tralascino del tutto la sintassi della geometria euclidea per utilizzare le tecniche della geometria frattale.

Come esempi di rappresentazioni grafiche tradizionali in campo archeologico (sull'argomento cfr. anche Moscati 1986) presento qui alcune delle elaborazioni relative alle già menzionate ricerche topografiche nel territorio di Ascoli Satriano (FG). Il primo modello tridimensionale (Tav. Va) ricostruisce, in base ai rinvenimenti topografici delle ricerche di superficie, lo sviluppo degli insediamenti di età daunia. Questi ultimi (in blu scuro), esattamente in scala, sono stati posizionati seguendo puntualmente la morfologia del territorio (Forte 1991b), in modo che si possano apprezzare dettagliatamente le relazioni strutturali e spaziali tra siti, e tra siti e paesaggio. La restituzione si deve naturalmente intendere sinteticamente, e nella versione grafica è contemplata una scala cromatica altimetrica che distingue le quote al suolo dal bruno scuro (le più alte) all'azzur-

[5] La riproduzione dell'immagine è stata resa possibile grazie alla cortese collaborazione dell'Ing. Simone Pappalardo della Delphi s.p.a. di Milano.

ro chiaro (le più basse). I dati di partenza, successivamente digitalizzati per coordinate spaziali, sono stati acquisiti direttamente dalle isoipse cartografiche, in questo caso riferibili ad una carta in scala 1:5000 del territorio di Ascoli Satriano. La matrice di interpolazione della griglia è di tipo cubic-spline; inoltre gli stessi dati sono riconvertibili planimetricamente secondo le curve di livello.

Il secondo modello tridimensionale (Tav. Vb) si riferisce particolarmente all'insediamento daunio di Villa Faragola, precedentemente citato. I dati, in questo caso, sono stati acquisiti direttamente sul terreno mediante un tacheometro a stazione totale che ha registrato in circa tre ore 170 punti di battuta[6]. Trasferiti i dati automaticamente su calcolatore, si è provveduto a due tipi di elaborazione: un modello tridimensionale con proiezione delle isoipse (non illustrato), ed un modello caratterizzato da regioni altimetriche (per isoipse) con relativa collocazione delle strutture sul terreno (capanne, tombe, fornaci; Tav. Vb).

Altri esempi di elaborazioni grafiche

Ho voluto concisamente raggruppare in questa categoria quelle elaborazioni che, per l'intrinseca eterogeneità e per la particolare affinità con le restituzioni grafiche del disegno, male si accostavano alle precedenti trattazioni. In particolare rientrano benissimo in questa classe le immagini quantizzate a due soli livelli (bitmap) o comunque a pochi livelli, invece degli usuali 256, poiché si prestano bene ad una stampa monocromatica (assolutamente irrinunciabile nelle edizioni di ambito archeologico). Gli sforzi più cospicui nella documentazione archeologica informatizzata si sono particolarmente indirizzati alla automazione delle tecniche di disegno e di rilievo, sia per quanto riguarda lo scavo archeologico (Gottarelli 1987), che il disegno e la classificazione della ceramica (Scott 1982; Kampffmeyer *et al.* 1988, con bibliografia precedente; Turner, Keary, Peacock 1990). In tali ambiti infatti si riscontra una urgente necessità di contenere i costi e i tempi di esecuzione, nonché di incrementare la precisione degli elaborati restituendoli a forme digitali reversibili a qualunque tipo di trattamento. Il più grande vantaggio delle metodologie operative è tanto più apprezzabile quanto più si riescono ad eliminare le fasi di ritocco manuale, di correzione geometrica e di aggiustamento (Krinzinger, Schick, Teegen 1990, 199 ss.). A questo proposito il contributo che può offrire l'eidologia informatica è certamente di rilievo, soprattutto a fronte dei limiti insiti nel disegno manuale. Per fare un esempio prendiamo in considerazione il significato attribuibile al dise-

[6] I rilievi sul campo e le ricerche topografiche nel Comune di Ascoli Satriano sono stati condotti dalla Cooperativa AR/S Archeosistemi di Reggio Emilia, e dalle Dott.sse Elena Antonacci, Silvia De Vitis, Teresa Guaitoli, sotto la direzione dell'Istituto di Archeologia dell'Università degli Studi di Bologna (Prof. Giorgio Gualandi).

gno tecnico di materiali archeologici realizzato da operatori manuali: possiamo definire un disegno una rappresentazione grafica bidimensionale del tutto convenzionale.

Le informazioni desumibili da questo tipo di restituzione sono condizionate preventivamente dai criteri scelti dal disegnatore e modellate in base a canoni prestabiliti ed alla sua personale esperienza; il risultato finale è una rappresentazione definitivamente caratterizzata e schematica non passibile di ulteriori elaborazioni. La domanda che ci si pone in questi casi è: qual è la "soglia" grafica e grafematica utile o indispensabile alla rappresentazione di un oggetto ed al suo significato? Quanto è valido il contenuto della riproduzione? Il concetto di "fedeltà" all'originale potrebbe diventare fuorviante, poiché una riproduzione grafica fedele non è detto che sia significativa o comunicativa. La risposta ovvia è che un oggetto ha infinite prospettive e come tale comporterebbe infinite rappresentazioni.

Siccome però la nostra esigenza pratica è di avere un oggetto classificabile, dobbiamo metterci nelle condizioni di scegliere di volta in volta l'elaborazione grafica più idonea ai fini della ricerca; condizioni che si verificano automaticamente nell'analisi di immagini numeriche. A questo riguardo per ottenere un'elaborazione al maggior livello informativo e cognitivo, è indispensabile individuare i contorni fisici degli oggetti. La tecnica di estrazione dei contorni si prefigge prioritariamente lo scopo di creare una nuova immagine semplificata rispetto all'originale (quindi con ridotti livelli di luminosità), conservando ed anzi esaltandone il contenuto informativo. L'individuazione dei contorni fisici degli oggetti si definisce nella ricerca di limiti nello spazio, nei cambiamenti di orientazione in superficie, ed in proprietà naturali. Ad ogni contorno corrisponde una discontinuità nella visione che si caratterizza nei cambiamenti di intensità nell'immagine in relazione a determinati processi fisici.

Le tecniche di identificazione dei contorni, che dividono fra loro le diverse regioni dell'immagine, soddisfano inoltre tempi di calcolo piuttosto ridotti e al contempo diminuiscono l'ingombro di memoria dell'immagine originale ("alleggerita" di molti livelli di luminosità).

Tali operazioni vengono di solito realizzate facendo uso degli operatori gradiente e laplaciano (da Laplace; cfr. Guidazzoli, in questo articolo). A questo riguardo la Fig. 7 presenta l'aerofotogramma monocromatico (per l'originale cfr. Fig. 1) del territorio di Ascoli Satriano trattato con un filtro numerico di tipo Laplace per l'estrazione dei contorni. La versione grafica dell'immagine così restituita evidenzia al tratto le principali morfostrutture del paesaggio, quali le parcellizzazioni dei campi, piccoli corsi d'acqua e, al centro, il tracciato del fiume Carapelle.

Per emulare infine automaticamente le caratteristiche di un disegno, si può

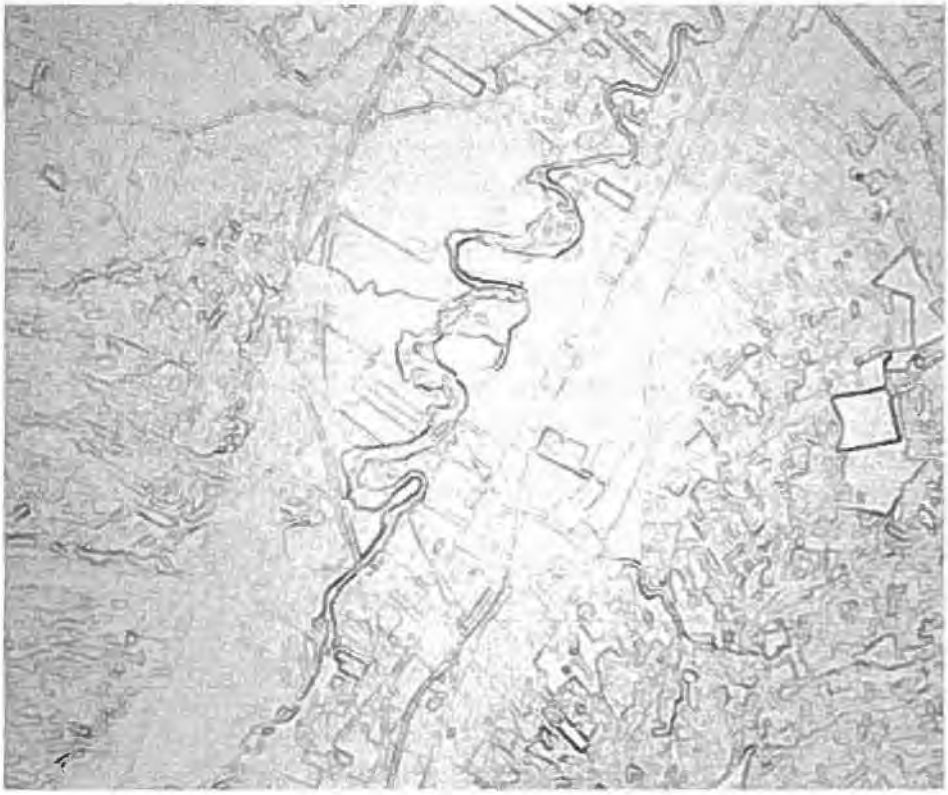


Fig. 7 — Aerofotogramma del territorio di Ascoli Satriano elaborato con filtro numerico di tipo Laplace.

procedere con tecniche di sfoltimento dei punti di contorno (thinning), ed eventualmente arrivare ad una classificazione del profilo in base, ad esempio, al codice di Freeman (FREEMAN 1961).

Una proposta di classificazione per immagini digitalizzate è stata avanzata per il bucchero (FORTE, GUIDAZZOLI 1991a), prendendo in considerazione le microsezioni degli impasti riprese al microscopio a 10x (immagini prima fotografate e poi digitalizzate). Tale progetto, assolutamente sperimentale, si prefigge di arrivare alla creazione di un archivio ottico/banca dati per immagini digitalizzate classificabili automaticamente.

In tal senso a scopo dimostrativo si è archiviata ogni immagine riproducendo quattro possibili contenuti informativi. Come si evidenzia dalla Fig. 8 a sinistra in alto è riportata la fotografia del materiale, a destra in alto il relativo disegno automatico eseguito al calcolatore, in basso a destra un campione ripreso al microscopio, in basso a sinistra l'analisi statistica degli istogrammi costituenti

la matrice di luminosità della ripresa al microscopio (naturalmente la presenza di inclusi o particolari caratteristiche tecnologiche determineranno condizioni di riflettanza diagnostiche per l'indagine). Quest'ultima informazione, che esprime dati numerici, può consentire una classificazione oggettiva degli impasti anche su ampia scala, traducendo le qualità cromatiche dei corpi ceramici in formato utile a qualunque tipo di analisi statistica (ad es. per clusters), e sollevando contemporaneamente lo studioso dal dover attribuire caratteristiche soggettive al materiale. Affinché questa metodologia possa offrire i migliori risultati è indispensabile che la conversione digitale delle riprese al microscopio sia di assoluta precisione. In attesa di ulteriori sperimentazioni le strategie operative più idonee possono essere: l'utilizzo di un microscopio elettronico digitale (che digitalizza cioè direttamente i dati da acquisire), oppure l'adozione di un colorimetro a riflettanza in grado di classificare il colore in base alla relativa lunghezza d'onda dominante (cfr. FORTE, GUIDAZZOLI 1991a con bibliografia relativa).

Come esperimenti di disegno automatico sviluppato integralmente al calcolatore (Mac II, con software NCSA) si presentano qui quattro esempi di elabo-

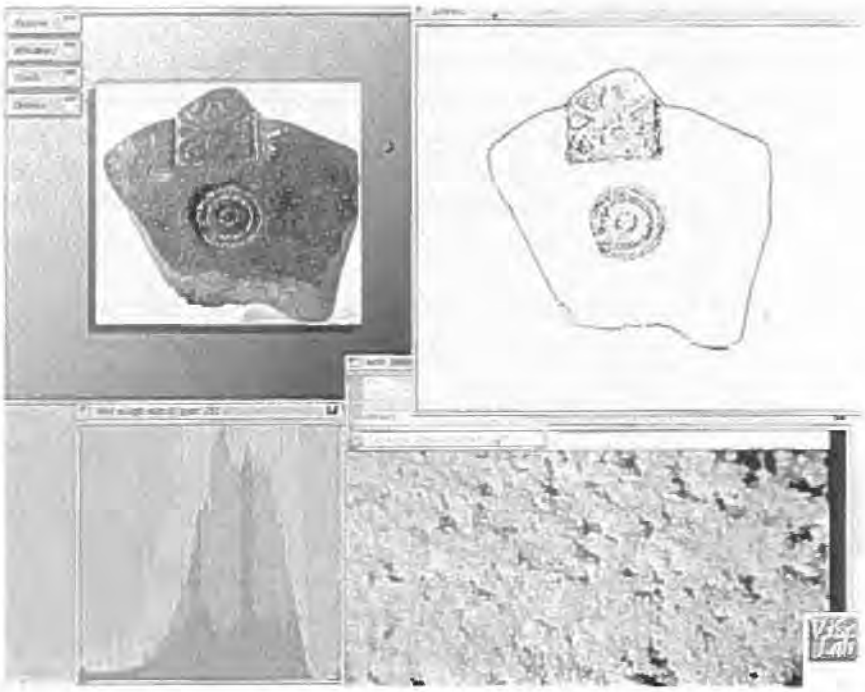


Fig. 8 — Classificazione digitale automatica di una sezione sottile di bucchero ripresa al microscopio.

razione riferibili rispettivamente a: una fibula villanoviana di bronzo ad arco rivestito (dalla necropoli di Castenaso, Bologna), un'iscrizione etrusca sul fondo di una scodella di bucchero da Marzabotto, un'antefissa templare da Luni, una decorazione plastica a palmetta in bucchero pesante (da Marzabotto). Nel caso della fibula, una volta acquisita l'immagine da telecamera e digitalizzata, si è operato con diverse tecniche locali. Come prima cosa l'immagine originale è stata convertita in negativo in formato raster (Fig. 9), successivamente si sono operate scelte grafiche diverse, presentando ciascuna un differente contenuto informativo. La prima elaborazione restituisce il solo contorno esterno dell'oggetto, ed è stata ottenuta riducendo all'essenziale gli intervalli spaziali tra aree numericamente discontinue (sistema contour plot, che riconosce le linee di contorno tra aree di differenti livelli di contorno). La seconda riproduce 5 differenti intervalli con più livelli di grigio, identificando così e disegnando un consistente numero di caratteristiche dell'oggetto (contour plot). La terza è stata invece elaborata utilizzando l'operatore di Laplace dopo che era stata equalizzata. La quarta infine (Fig. 10) rappresenta un'elaborazione a soglie mediante analisi dei livelli di grigio; ovvero si sono riprodotti dell'immagine originale solo quei livelli campionati che corrispondevano alla geometria fisica dell'oggetto, escludendo i vari disturbi di luminosità e di rifrazione.

Nel caso dell'iscrizione etrusca (originale a Fig. 11) su bucchero (pubblicata da Giovanni Colonna con lettura -ainuathi) i criteri dell'elaborazione si sono concentrati, ovviamente, a migliorare al massimo la leggibilità delle lettere, esasperando i livelli di discontinuità tra le incisioni ed il materiale di fondo. Per fare questo si è tradotta l'immagine in negativo esaltando il contrasto nelle regioni discontinue ed applicando una scala cromatica "dedicata"; l'utilizzo poi di soglie ha consentito di chiarire meglio il contorno delle lettere e di verificare l'azione di sovrapposizione tra l'iscrizione ed il graffito centrale a croce. L'immagine così ottenuta (Fig. 12), sebbene non ancora ottimale (l'elaborazione è attualmente in corso) è già idonea per una fedele elaborazione a stampa e per più dettagliate versioni grafiche.

L'immagine della terracotta architettonica lunense (Fig. 13), acquisita da un fotogramma a colori, è stata invece ottenuta riducendo sostanzialmente il numero dei livelli di grigio, ruotando e contrastando successivamente la palette nella scala dei grigi; tutta l'operazione è stata realizzata con l'immagine al negativo.

Per quanto concerne la palmetta decorata plasticamente su una brocca in bucchero pesante (da Marzabotto, cfr. Forte, Guidazzoli 1991a) si sono sperimentate due soluzioni grafiche operando con filtri numerici: nella fattispecie con un filtro passa-alto (Fig. 14), e con un filtro di tipo Sobel (Fig. 15).

In chiusura, anche se non rientra propriamente nelle categorie indicate nel paragrafo, desidero mostrare un'immagine acquisita direttamente da un filmato

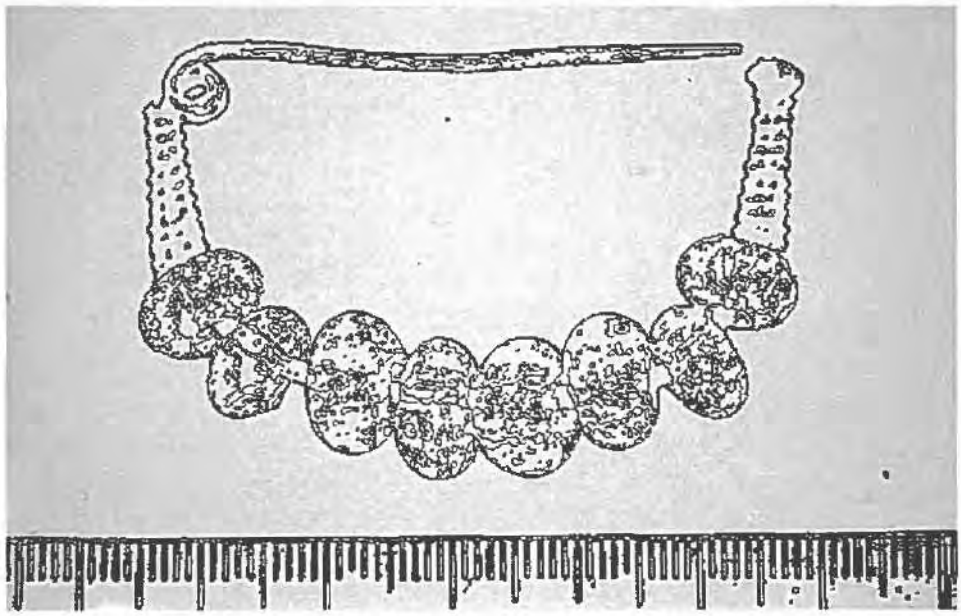


Fig. 9 — Fibula villanoviana da Castenaso (BO): elaborazione finalizzata al disegno automatico.
Fig. 10 — Fibula villanoviana da Castenaso (BO): elaborazione mediante analisi a soglie.

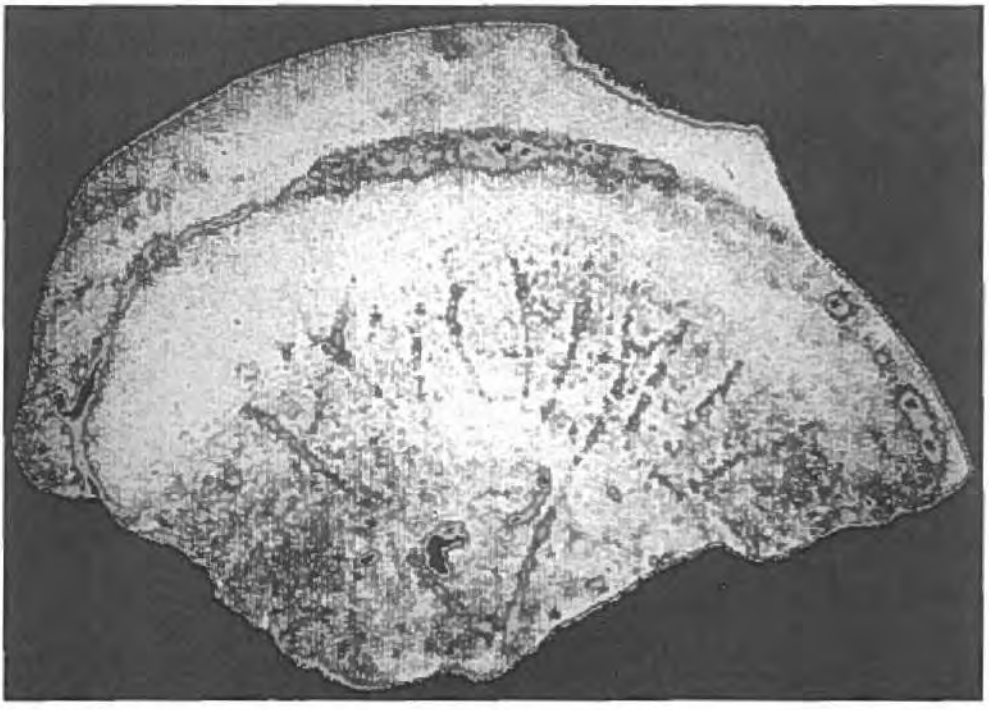
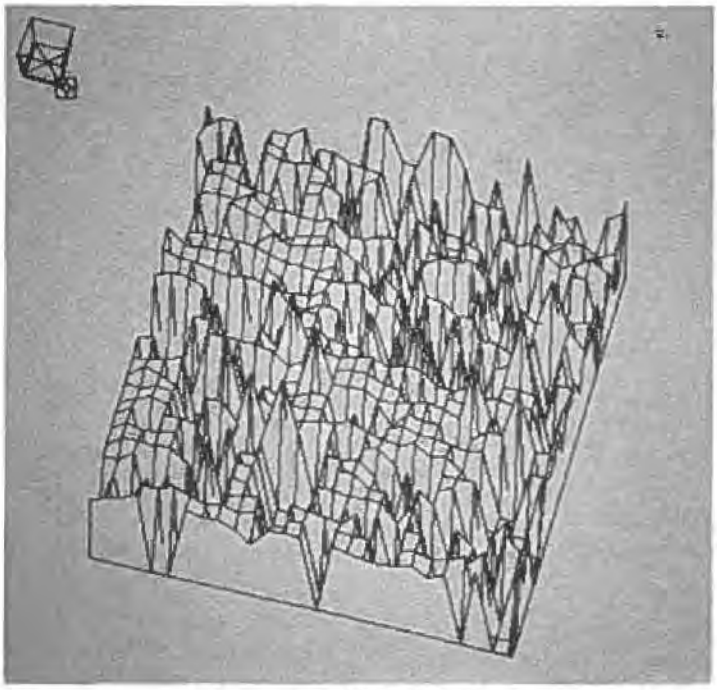


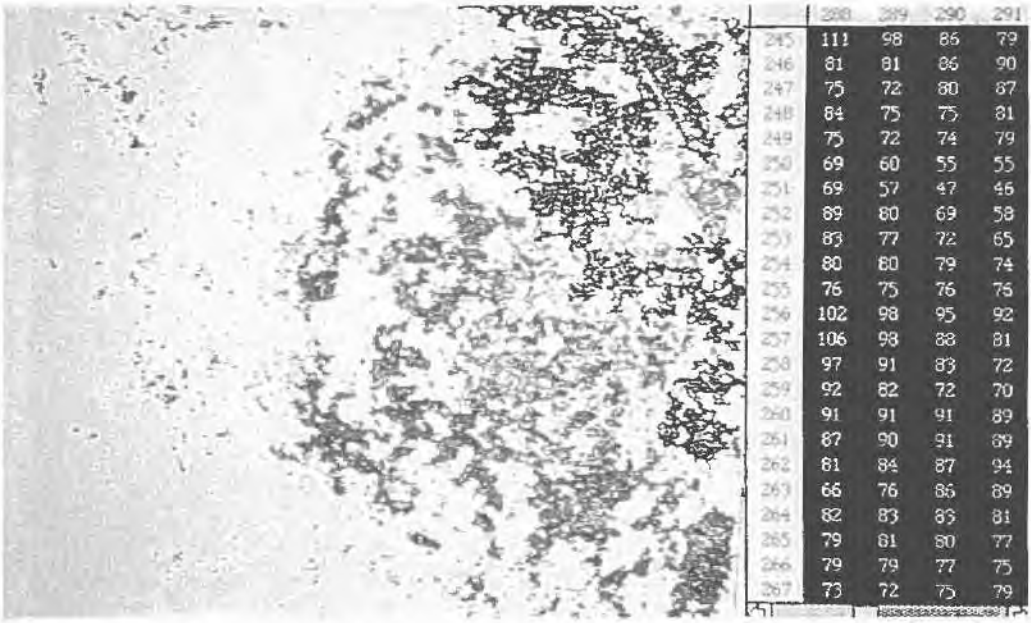
Fig. 11 — Iscrizione etrusca su bucchero da Marzabotto (BO).
Fig. 12 — Iscrizione etrusca su bucchero da Marzabotto (BO): elaborazione con filtri numerici e trasformazione a pseudo-colore.

Fig. 13 — Terracotta architettonica da Luni: elaborazione dell'immagine in negativo con esaltazione dei contrasti ed "edge detection".

Fig. 14 — Decorazione a palmetta su brocca in bucchero pesante da Marzabotto (BO): elaborazione con filtro passa-alto.

Fig. 15 — Decorazione a palmetta su bucchero: elaborazione con filtro di tipo Sobel.





	288	289	290	291
245	111	98	86	79
246	81	81	86	90
247	75	72	80	87
248	84	75	75	81
249	75	72	74	79
250	69	60	55	55
251	69	57	47	46
252	89	80	69	58
253	83	77	72	65
254	80	80	79	74
255	76	75	76	76
256	102	98	95	92
257	106	98	88	81
258	97	91	83	72
259	92	82	72	70
260	91	91	91	89
261	87	90	91	89
262	81	84	87	94
263	66	76	86	89
264	82	83	83	81
265	79	81	80	77
266	79	79	77	75
267	73	72	75	79

Fig. 16 — Buco di palo da Marzabotto: analisi statistica con rappresentazione 3D dei livelli di grigio.

Fig. 17 — Buco di palo da Marzabotto: elaborazione a soglie e a pseudo-colore della matrice numerica.

realizzato (con sistema VHS) sugli scavi di Marzabotto (*Regio* IV, 1, casa 6) e riferibile ad una struttura della fase arcaica della città: si tratta della probabile traccia di un buco di palo infisso nell'argilla sterile. L'analisi statistica dei livelli riprodotta in tre dimensioni (Fig. 16) segnala già a prima vista una depressione uniforme di forma circolare che indica la presenza di una struttura ben caratterizzata. Applicando successivamente un'analisi a pseudo-colore la struttura arriva a caratterizzarsi definitivamente (la look up table è stata fatta ruotare per ottenere il migliore effetto ottico). L'esito finale dell'operazione è visualizzato nell'ultima elaborazione (Fig. 17) realizzata mediante un'analisi a soglie della matrice numerica della struttura: si evidenzia benissimo la forma circolare del buco di palo quasi si trattasse di un vero e proprio disegno automatico.

Quest'ultimo esempio credo possa suggerire una piccola riflessione sui criteri ed i problemi interpretativi che interessano la documentazione dello scavo archeologico. Il nodo centrale della questione è di poter fruire di mezzi di interpretazione e di leggibilità il più possibile oggettivi, prescindendo al limite anche dall'esperienza dei singoli operatori, e in modo da contemplare rappresentazioni grafiche che, pur nella loro convenzionalità, non eccedano od alterino il contenuto informativo di realtà fisiche. Ebbene, se siamo ancora lontani dal possedere supporti scientifici così sofisticati, lo sviluppo nel prossimo futuro delle tecniche dell'eidologia informatica integrate all'uso di intelligenze artificiali potrà offrire anche alle scienze umanistiche un notevolissimo contributo cognitivo.

MAURIZIO FORTE
Dipartimento di Scienze Storiche,
Archeologiche, Antropologiche
Università "La Sapienza" di Roma

BIBLIOGRAFIA

ALVISI G. 1989, *La fotografia aerea nell'indagine archeologica*, Roma.

ANCESCHI G. 1989, *La grafica della scienza*, in *Roma* 1989, 79-87.

ANGYAL A. 1941, *Foundations for a Science of Personality*, Harvard University Press, 243-261.

ASPINALL A., HAIGH J.G.B. 1988, *A review of techniques for the graphical display of geophysical data*, in S.P.Q. RAHTZ (ed.) *Computer and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR International Series 446 (ii), Oxford.

BAKER C., GUMERMANN G.J. 1981, *Remote Sensing: Archaeological Applications of Remote Sensing in the North Central Lowlands*, Washington.

BARISANO E., BARTHOLOMÉ E., MARCOLONGO B. 1984, *Télédétection et archéologie. Interprétation intégrée de données télédectées - Hcmm, Landsat, Photos sériennes - corrélée avec des aspects physiographiques et archéologiques dans la plaine venitienne occidentale*, CNRS, Paris.

BARNSLEY M. 1988, *Fractals Everywhere*, New York, Academic Press.

BINFORD S.R., BINFORD L.R. (edd.) 1968, *New Perspectives in Archaeology*, Chicago.

BOTTONI P., MUSSIO P. 1989, *Metodologie e tendenze nell'interpretazione di immagini*, in *Roma* 1989, 196-202.

BRIVIO A., RIGHETTI M. 1989, *Metodi frattali per la costruzione di modelli digitali del terreno*, in *Roma* 1989, 277-280.

BURROUGH P.A. 1987, *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources*, Oxford.

CAPPELLINI V. 1985, *Elaborazione numerica delle immagini*, Torino.

DORAN J.E., HODSON F.R. 1975, *Mathematics and Computers in Archaeology*, Edinburgh.

DE GUIO A. 1991, *Calcolatori ed Archeologia: un progetto per gli anni '90*, « Archeologia e Calcolatori », 2, 25-78.

DE GUIO A., WILKINS J., WHITEHOUSE R. (edd.) 1990, *"Progetto Alto-Medio Polesine-Basso Veronese": quarto rapporto*, « Quaderni di Archeologia del Veneto » 6, 217-238.

DE GUIO A., SECCO G. 1988, *Archaeological applications of the "Percolation Method" for data analysis and pattern recognition*, in S.P.Q. RAHTZ (ed.), *Computer and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR International Series 446 (i), Oxford, 63-93.

DEGLI ANTONI G. 1989, *Evoluzione della tecnologia e comunicazione della conoscenza*, in *Roma* 1989, 59-67.

DEL PERO G., MARINO C.M. 1986, *Il contributo del telerilevamento da aereo e da satellite nel quadro delle problematiche relative ad un corretto utilizzo delle risorse di un territorio*, in *Atti del IV Convegno Nazionale "Attività estrattive e Difesa del Suolo" (Saint Vincent, 8-9 settembre 1986)*.

DEL PERO G., PIZZAFERRI G. 1991, *Creazione di data base per l'inventario, la catalogazione e la creazione di carte del rischio relative ai beni culturali: il contributo dei dati telerilevati da aereo e da postazioni a terra*, in *Atti del VI Convegno di "Icographics" (Milano, 5-8 marzo 1991)*, 394-404, Milano.

DEL PERO G., TONELLI A.M. 1987, *Telerilevamento di prossimità nell'analisi di strutture di valore artistico*, in *Atti del Primo Convegno Nazionale "Telerilevamento Aerospaziale e Risorse Ambientali", (Parma, 29-30 settembre e 1-2 ottobre 1987)*, 172-177.

DORAN J.E. 1970, *Systems Theory, Computer Simulations and Archaeology*, « World Archaeology », 1, 289-298.

EMERY F.E. 1989 (ed.), *La teoria dei sistemi*, Milano.

FABIANI G., GUIDAZZOLI A., PERIA A. 1990, *Software NCSA per la visualizzazione di dati scientifici. Versione preliminare*, Dipartimento di Tecnologia dei Sistemi. Laboratorio di Visualizzazione scientifica del CINECA, copia interna.

FABIANI G., LANZARINI M., ROSSI R. 1988, *Grafica e Supercomputer: il laboratorio grafico del CINECA*, « Pixel », 9, 45-52.

FOLEY J.D., VAN DAM A. *et al.* 1990, *Computer Graphics Principle and Practice*, Addison Wesley.

FORTE M. 1991a, *La carta archeologica di Ascoli Satriano (FG): risultati preliminari. Alcuni esempi di "image processing" nella fotointerpretazione aerea*, in *"L'archeologia del paesaggio", IV Ciclo di Lezioni sulla Ricerca applicata in Archeologia, Certosa di Pontignano, Siena*, in corso di stampa.

FORTE M. 1991b, *Applicazioni di eidologia informatica nella fotointerpretazione aerea*, in *Ricerche di topografia storica ad Ascoli Satriano*, in corso di stampa.

FORTE M., GUIDAZZOLI A. 1991a, *Considerazioni preliminari sul bucchero di Marzabotto: qualche esempio di classificazione di immagini digitalizzate*, in *"Produzione artigianale ed esportazione*

nel mondo antico. Il bucchero etrusco". Colloquio internazionale, (Milano, 10-11 maggio 1990), in corso di stampa.

FORTE M., GUIDAZZOLI A. 1991b, *Fotointerpretazione aerea digitale e archeologia*, « Pixel », 10, 11-14.

FREEMAN H. 1961, *On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations*, IRE Trans. Electronic Computers, vol. EC-10, 2, 260-268.

FURINI P., RIGHETTI M., BRIVIO P.A., MARINI D. 1991, *Una metodologia per la simulazione di scene ambientali*, in *Atti del VI Congresso di "Icographics" (Milano, 5-8 marzo 1991)*, 405-412, Milano.

FUSSEL A. 1982, *Terrestrial photogrammetry in archaeology*, « World Archaeology », 14, 2, 157-172.

GONZALES R.C., WINTZ P. 1977, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.

GOTTARELLI A. 1987, *Tecniche di documentazione dello scavo archeologico: introduzione alla videometria digitalizzata*, in F. D'ANDRIA (ed.), *Informatica e archeologia classica. Atti del Convegno Internazionale (Lecce, 12-13 maggio 1986)*, Galatina, 63-90.

HARRIS T. 1988, *Digital terrain modelling in archaeology and regional planning*, in C.L.N. RUGGLES, S.P.Q. RAHTZ (edd.), *Computer and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR International Series 393, Oxford, 161-169.

HODDER I. 1978 (ed.), *Simulation Studies in Archaeology*, Cambridge.

HODDER I., ORTON C. 1976, *Spatial Analysis in Archaeology*, Cambridge.

JACQUES C. *et al.* 1988, *L'apport du satellite spot a l'archéologie du paysage*, Paris.

KAMPFFMEYER U., ZAMPERONI P., TEEGEN W.R., GRAÇA L. 1988, *Untersuchungen zur rechnergestutzten Klassifikation der Form von Keramik*, Arbeiten zur Urgeschichte des Menschen, 11, Frankfurt.

KRINZINGER F., SCHICK M., TEEGEN W.R. 1990, *Un calcolatore disegna e registra ceramica antica: il sistema ARCOS-1 negli scavi di Velia, Comune di Ascea (Salerno)*, « Archeologia e Calcolatori », 1, 179-209.

LYONS T.R. 1976, *Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies: Non-destructive methods of archeological exploration, survey and analysis (Reports of the Chaco Center, 1)*, New Mexico, Chaco Center.

LYONS T.R. 1981, *Remote Sensing: Multispectral Analyses of Cultural Resources*, Washington.

LYONS T.R., AVERY T.E. 1977, *Remote Sensing: A Handbook for Archeologists and Cultural Resource Managers*, Washington.

LYONS T.R., MATHIEN F.J. 1980, *Cultural Resources Remote Sensing*, Washington.

MARCOLONGO B., MASCELLANI M. 1978, *Immagini da satellite e loro elaborazioni applicate alla individuazione del reticolato romano nella pianura veneta*, « Archeologia veneta », 1, 131 ss.

MELLI P. 1991, *L'elaborazione digitale delle immagini*, Milano.

MOSCATI P. 1986, *Un esempio di grafica computerizzata*, in *Atti del II Convegno "Archeologia nella Tuscia" (Viterbo 1984)*, Roma, 27-33.

MOSCATI P. 1987, *Archeologia e Calcolatori*, Firenze.

O'BRIEN M.J., BEETS J.L., WARREN R.E., HOTRABHAVANANDA T., BARNEY T.W., VOIGT E.E. 1982, *Digital enhancement and grey-level slicing of aerial photographs: techniques for archaeological analysis of intrasite variability*, « World Archaeology », 14, 2, 173-190.

PICCARRETA F. 1987, *Manuale di fotografia aerea. L'uso archeologico*, Roma.

PRATT W.K. 1978, *Digital Image Processing*, New York.

Roma 1989: MARINI D., ALBINO E., MOLTEDO L. (edd.), *Conoscenza per immagini, Atti del Workshop, (Roma, 27-28 novembre 1989)*, Roma.

ROSENFELD A., KAK A.C. 1982, *Digital Picture Processing*, Academic Press.

SABLOFF J.A. 1981 (ed.), *Simulations in Archaeology*, Albuquerque.

SCOLLAR I. 1977, *L'information appliquée à l'archéologie aérienne*, « Archéologia. Dossier de l'Archéologie », 22, 78-87.

SCOLLAR I. 1978, *Computer image processing for archaeological air photographs*, « World Archaeology », 10, 1, 71-87.

SCOTT P.J. 1982, *Drawing and measurement of finds: A Reflex action*, « World Archaeology, 14, 2, 191-199.

TURNER J.D., KEARY A.C., PEACOCK D.P.S. 1990, *Drawing potsherds: A low-cost computer-based system*, « Archaeometry », 32, 2, 177-182.

ABSTRACT

The Digital Image Processing Technique is a complex computational tool which allows a powerful extraction of relevant information from digital data. A Research Project has been developped at CINECA (InterUniversity Supercomputing Center, Bologna) in cooperation with the University of Rome "La Sapienza" in order to produce specific image processing tools for archeological applications. The application fields are:Digital Analysis of aerial photographs; Remote Sensing; Automatic classifications; Automatic drawing; D.E.M. (Digital Elevation Models); Texture Mapping; 3D Landascape Navigation.