

ARCHEOSEMA. SISTEMI ARTIFICIALI ADATTIVI PER UN'ARCHEOLOGIA ANALITICA E COGNITIVA DEI FENOMENI COMPLESSI

1. ARCHEOSEMA (AS). UN MODELLO ARCHEO-LOGICO

L'avvicinamento tra le scienze fisico-matematiche e le scienze cognitive segna oggi un percorso in fieri, impervio, talora ad ostacoli, ma anche affascinante perché capace di aprire nuove prospettive alla ricerca archeologica (RAMAZZOTTI 2010a). E, infatti, deve essere ricordato che è proprio dalla sperimentazione metadisciplinare che giungono alcune delle più rilevanti scoperte scientifiche dell'età contemporanea. In ambito archeologico e geofisico, l'integrazione tra carte topografiche vettoriali, sistemi informativi geografici, mappature geofisiche e classificazione intelligente delle anomalie geomagnetiche ha indotto ad esempio la straordinaria scoperta del Tempio della Roccia (2400-2350 a.C.) ad Ebla-Tell Mardikh, in Siria settentrionale (RAMAZZOTTI 2008, 2009a, 2010b); in ambito linguistico e filologico, a partire dalla glossematica e dalla semiotica generativa, l'ecdotica e l'applicazione di modelli computazionali ai testi codificati come sistemi hanno permesso di rileggere i criteri della distinzione semantica nella costruzione letteraria (CANETTIERI *et al.* 2004-2005, 2005; CANETTIERI 2012); in ambito estetico e cognitivo, la seriazione effettuata con sistemi di classificazione autopoietici e con processi di formalizzazione logica dell'immagine ha permesso di riconoscere fattori latenti nella sintassi di antichissime iconografie glittiche (DI LUDOVICO, RAMAZZOTTI 2008; DI LUDOVICO 2011) e codici ideografici nella costruzione di moduli geometrici solo in apparenza "decorativi" (DI LUDOVICO, RAMAZZOTTI 2011).

In ultimo, la simulazione dei processi insediamentali attraverso Reti Neurali Artificiali non solo ha consentito di superare la rigida impostazione della Teoria dei Sistemi offrendo inattese possibilità di espandere l'analisi cosiddetta multifattoriale delle prime urbanizzazioni mesopotamiche (RAMAZZOTTI 1997, 1999a, 1999b, 2000, 2002, 2009b, 2013c), ma anche di progettare e programmare strumenti d'analisi territoriale predittivi di tipo bottom-up che tentano di superare il descrittivismo tematico della fotografia satellitare (RAMAZZOTTI 2013a). Un fiume, dunque, di approcci e ricerche che – storiograficamente – dipende e segue il successo scientifico, internazionale, che ha ricevuto oggi, in Italia e nel mondo, la fisica e la matematica dell'Intelligenza Artificiale e dei Sistemi Artificiali Adattivi (BECKERMAN 1997; BUSCEMA, INTRALIGI 2003; MILLER, PAGE 2007; BUSCEMA, TASTLE 2013).

ARCHEOSEMA (AS) è il nome dato a un progetto interdisciplinare, recentemente premiato a Roma da Sapienza-Ricerca, in corso di svolgimento

presso il Laboratorio di Archeologia Analitica e Sistemi Artificiali Adattivi del Dipartimento di Scienze dell'Antichità della Facoltà di Lettere e Filosofia. Il titolo del progetto è un acronimo che ne sintetizza i due principali fondamenti teorici: l'apertura della moderna archeologia (ARCHEO) all'analisi dei segni fisici, storici, geografici e linguistici di contesti culturali estinti e la riproduzione artificiale delle semantiche (SEMA) sottese ai sistemi organici, naturali e culturali, tramite l'ausilio delle Scienze Artificiali. Il progetto è dunque connesso alla costruzione di un modello concepito come strumento epistemologico e metodologico al tempo stesso: epistemologico poiché impone un dialogo che coinvolge l'archeologia, la fisica, la geografia, la linguistica e la statistica; metodologico poiché intende produrre analisi destinate alla soluzione di problemi di classificazione, seriazione, organizzazione e struttura dei dati alfanumerici; ad implementare la simulazione dinamica di variabili che compongono sistemi organici naturali e/o culturali; ad identificare nuove regole dell'organizzazione spaziale, economica, politica e, inoltre, ad approfondire i fenomeni fisici, estetici, cognitivi e linguistici dell'auto-organizzazione, dell'entropia, dell'apprendimento e della traduzione.

Nello specifico, la progettazione di questo modello destinato alla ricerca teorica, metadisciplinare, applicativa e sperimentale di fenomeni archeologici, geografici e linguistici si fonda su un'architettura informatica programmata per integrare alle funzioni relazionali dei Sistemi Informativi Geografici (per le quali cfr. MOSCATI 1998), gli strumenti fisici e matematici dei Sistemi Artificiali Adattivi (SAA). I settori disciplinari coinvolti in questa programmazione fanno tutti riferimento al Laboratorio di Archeologia Analitica e Sistemi Artificiali Adattivi della Sapienza (dott. Luca Deravignone, dott. Alessandro Di Ludovico, dott.ssa Irene Viaggiu, dott.ssa Claudia Di Fede) e sono quelli dell'Intelligenza Artificiale (prof. Massimo Buscema e dott. Massimiliano Capriotti), della Fisica generale (prof. Vittorio Loreto e prof. Alessandro Londei), della Linguistica computazionale e della Filologia dinamica (prof. Paolo Canettieri e prof. Simone Celani), della Geografia economica (prof. Armando Montanari e prof. ssa Barbara Staniscia) e della Statistica multivariata (prof. Giorgio Alleva, prof.ssa Maria Felice Arezzo e prof. Filippo Belloc), dell'Antropologia Fisica e della Genetica della Popolazione (prof. Alfredo Coppa, prof. Franz Manni, prof. Francesca Candilio).

È, infine, opportuno ricordare che questa integrazione sperimentale tra i Sistemi Informativi Geografici e i Sistemi Artificiali Adattivi è divenuta un nucleo di ricerca, rilevante per le analisi archeologico-territoriali e le simulazioni geografico-economiche, di due progetti europei del settimo programma quadro (FP7) recentemente acquisiti dalla Sapienza Università di Roma: il progetto EBLA-CHORA (coordinato dal prof. Paolo Matthiae) e il progetto SECOA (coordinato dal prof. Armando Montanari); il contributo del Laboratorio di Archeologia Analitica AS al raggiungimento degli

obiettivi di queste due imprese è stato recentemente pubblicato (RAMAZZOTTI 2013a, 2013b).

2. LA “STORIOGRAFIA” DEL MODELLO LOGICO ARCHEO-LOGICO AS

Il retroterra dal quale mossero le prime fondamentali sperimentazioni di McCULLOCH e PITTS (1943) e poco dopo quelle di HEBB (1949) è costituito dagli studi neurobiologici condotti al fine di interpretare i neuroni alla stregua di dispositivi logici. La teoria scientifica sottesa a questo indirizzo di ricerca è conosciuta sotto il nome di Connessionismo (ROSENBLATT 1958, 1962; MINSKY, PAPERT 1968; FELDMAN, BALLARD 1982; GROSSBERG 1982; MINSKY 1986; MCCLELLAND, RUMELHART 1986; ACKLEY 1987; FODOR 1987; GROSSBERG 1987; FODOR, PYLYSHYN 1988; ANDERSON, ROSENFELD 1988; SMOLENSKY 1989). Per questa teoria cognitiva, il cervello non è riconducibile ad un sistema di regole e simboli ma è costituito dal funzionamento di elementi semplici e non intelligenti, i neuroni. Dal momento che è l'ampia gamma di connessioni tra neuroni ad esprimere proprietà di coerenza e intelligenza, quindi capacità cognitive, l'approccio connessionista rappresenta una reazione metodologica alle cosiddette ipotesi “comportamentiste” e “rappresentazioniste”. Quest'ultime rifiutavano lo studio dell'Intelligenza Artificiale sulla base di relazioni dinamiche e connettive tra neuroni, e proponevano di interpretare la logica del loro funzionamento nel flusso meccanico Input-Output.

Data questa premessa, il Laboratorio di Archeologia Analitica e Sistemi Artificiali Adattivi AS si occupa, prevalentemente, di sperimentare le teorie, i metodi e i modelli delle Scienze Artificiali (SZCZEPANIAK 1999; NUNES DE CASTRO 2007) per l'analisi dei contesti archeologici, geografici e linguistici; dal punto di vista storiografico, dunque, queste attività di ricerca si ispirano direttamente alle tradizioni metodologiche dell'Archeologia Analitica, Logistica, Computazionale e Cognitiva, prevalentemente europea (GARDIN 1970, 1987, 2002, 2003; DORAN, HODSON 1975; RENFREW, COOKE 1979; RENFREW 1981; GALLAY 1989; BAXTER 1995; MCGLADE, VAN DER LEEW 1997; CAMIZ, ROVA 2001; CAMIZ 2004; BEECKMAN, BADEN 2005; BARCELÓ 2007; BAXTER, COOL 2010; RAMAZZOTTI 2010a). Tuttavia, come si è osservato, l'architettura epistemica del modello AS è anche focalizzata sulla forte interazione tra l'ambiente informatico dei Database Relazionali, i Sistemi Informativi Geografici e gli strumenti d'analisi dei sistemi dinamici non-lineari, sicché incorpora anche alcune delle moderne tendenze analitiche emerse recentemente nell'Archeologia Insedimentale americana (KVAMME 1990; ZUBROW 1990, 2003; ALLEN 1999; KOHLER, VAN DER LEEUW 2007).

I SAA, infatti, possono essere definiti anche come un insieme di strutture formalizzate della *Natural Computation* (BECKERMAN 1997; MIRA *et al.* 2009)

che descrivono, simulano e riproducono i processi naturali e/o culturali trasformandoli in sistemi artificiali dinamici e complessi (ELMAN, RUMELHART 1989; FELDMAN, BALLARD 1989; CHURCHLAND 1989; CLARK 1993; McCULLOCH, PITTS 1993; ARBIB 1995; MARCUS 2001; CLARK, ELIASMITH 2002; ROGERS, McCLELLAND 2004; McCLELLAND *et al.* 2010).

3. L'“EPISTEMOLOGIA” DEL MODELLO ARCHEO-LOGICO AS

Sul piano morfologico, i SAA possono poi essere ulteriormente suddivisi in Sistemi Evolutivi e in Sistemi di Apprendimento (*Learning Systems*). Le cosiddette Reti Neurali Artificiali (*Artificial Neural Networks*: ANNs) sono architetture organizzate come sistemi di apprendimento e costituiscono una famiglia di algoritmi ispirati al funzionamento del cervello (MINSKY 1954; HOPFIELD 1982; McCLELLAND, RUMELHART 1986; GROSSBERG 1988; KOSKO 1992; GALLANT 1993; BISHOP 1995; ZADEH, KLIR, YUAN 1996; SZCZPANIAK 1999; BAXTER 2006).

Dunque, nonostante ARCHEOSEMA sia un progetto sorto sulla linea marcata nel 1968 dall'Archeologia Analitica e Computazionale di D.L. CLARKE (1968, 1972, 1994), la sua morfologia conoscitiva contemporanea riconosce l'approccio cognitivista, ormai molto diffuso e diversificato nel panorama della ricerca, teorica e applicativa, contemporanea (RENFREW, ZUBROW 1994; DJINDJIAN 2002). Tuttavia il Laboratorio di Archeologia Analitica AS non si occupa di “applicare” le neuroscienze per risalire alle forme antiche, universali e/o contestuali, del comportamento cognitivo (RENFREW 2008; MALAFOURIS, RENFREW 2008, 2010), ma elabora gli strumenti e i modelli computazionali della Nuova Intelligenza Artificiale come metodo d'analisi dei fenomeni comunicativi, culturali, spaziali e linguistici complessi (RAMAZZOTTI 2010a, 2013a, 2013b, 2013c).

Sebbene le ANNs siano strutture matematiche formalizzate in maniera molto diversificata, le loro caratteristiche comuni possono essere sintetizzate come segue:

- 1) Gli elementi minimi di ogni Rete Neurale Artificiale organizzati in strati sono i nodi, detti anche elementi processabili (*Processing Elements*) e le connessioni (*Weights*).
- 2) Ogni nodo di una ANN ha un proprio Input definibile come una sorta di interfaccia rivolta all'ambiente esterno; uno strato di Output, tramite il quale comunica con l'ambiente; uno o più strati intermedi, detti Hidden, che costituiscono la vera e propria *black box* della rete, il luogo logico dell'attività di apprendimento della rete; una funzione di trasformazione tramite la quale, a partire dal segnale in Input, viene generato un Output globale.
- 3) Ogni connessione è caratterizzata dalla forza tramite la quale coppie di nodi si eccitano o si inibiscono: i valori positivi indicano connessioni eccitatorie,

quelli negativi indicano connessioni inibitorie; inoltre, le connessioni tra i nodi possono modificarsi nel tempo. Questa dinamica innesca nell'intera ANN un processo di apprendimento: le trasformazioni delle connessioni sono generate per ogni modello da un'equazione, convenzionalmente detta Equazione di Apprendimento. La dinamica complessiva di una ANN è legata al tempo: perché essa modifichi in modo opportuno le proprie connessioni è necessario che i dati processati agiscano sull'architettura topologica più volte, simmetricamente e ripetutamente. La dinamica complessiva di una ANN è legata unicamente all'interazione locale dei suoi nodi. Lo stato evolutivo finale di una ANN, conseguentemente, deve emergere in modo spontaneo dall'interazione di tutte le sue componenti sintattiche (i nodi organizzati in strati).

4) Le comunicazioni tra nodi in ogni ANN tendono ad avvenire in parallelo. Tale parallelismo può essere sincrono o asincrono, ma ogni modello lo esprime e può enfatizzarlo secondo modalità e forme diverse.

5) Ogni ANN deve presentare le seguenti componenti di architettura: A) Tipo e numero di nodi e loro proprietà; B) Tipo e numero delle connessioni e loro localizzazione; C) Tipo di strategie di flusso del segnale; D) Tipo di strategie dell'apprendimento.

4. LA STRUTTURA COGNITIVA DEL MODELLO ARCHEO-LOGICO AS

I nodi di ogni ANN possono essere almeno di 3 tipi, a seconda della posizione che occupano all'interno della rete:

- 1) Nodi di Input: sono i nodi che ricevono (anche) i segnali dell'ambiente esterno della ANN;
- 2) Nodi di Output: sono i nodi il cui segnale agisce (anche) sull'ambiente esterno della ANN;
- 3) Nodi Hidden: sono i nodi che ricevono segnali solo da altri nodi della ANN e inviano il loro segnale solo ad altri nodi della ANN.

Il numero di nodi di Input dipende dal modo in cui si vuole che la ANN apprenda l'ambiente: in questo senso essi possono essere assimilati a dei sensori. Quando l'ambiente di una ANN è costituito da dati che si vuole elaborare, ogni nodo di Input diviene un tipo di variabile di quei dati. Il numero di nodi di Output dipende dal modo in cui si vuole che la ANN agisca sull'ambiente; in tal senso gli Output potranno essere definiti come effettori della rete stessa e rappresenteranno le variabili attese (o i risultati dell'elaborazione). Il numero dei nodi Hidden dipende dalla complessità della funzione che si intende mappare tra i nodi di Input e i nodi di Output.

I nodi di ogni ANN possono essere raggruppati in classi di nodi che condividono le stesse caratteristiche (proprietà). Usualmente queste classi vengono definite strati (*Layers*) e implicano diverse tipologie di ANN:

- 1) ANN monostrato: quando tutti i nodi della ANN hanno le medesime caratteristiche;
- 2) ANN multistrato: quando tutti i nodi della ANN sono raggruppati in classi funzionali e condividono le stesse funzioni di trasferimento del segnale, ma ricevono il segnale solo da nodi di altri strati e lo inviamo solo a nuovi strati;
- 3) ANN geograficamente pertinenti (o senza alcuno strato): quando ogni loro nodo è specifico per la posizione che occupa nella ANN; ad esempio quando i nodi più vicini comunicano più intensamente di quelli più lontani.

Ogni connessione può essere dunque di cinque tipi:

- 1) Mono-Direzionale;
- 2) Bi-Direzionale;
- 3) Simmetrica;
- 4) Anti-Simmetrica
- 5) Riflessiva.

Il numero delle connessioni è proporzionale alle capacità di memorizzazione di una ANN. La localizzazione delle connessioni è opportuna come pre-processing metodologico del problema che una ANN dovrà affrontare, ma non è necessaria. Una ANN nella quale non tutte le connessioni tra nodi o tra strati sono abilitate viene definita ANN con connessioni dedicate; nel caso contrario si parla di ANN a gradiente massimo. In ogni ANN le connessioni possono essere di tre tipi:

- 1) Adattivo: quando si modificano secondo l'equazione di apprendimento;
- 2) Fisso: se restano su valori fissi per tutto il tempo dell'apprendimento;
- 3) Variabile: qualora si modificano deterministicamente in base al trasformarsi delle altre connessioni.

In ogni ANN il segnale può procedere in modo lineare (dall'Input all'Output) o in modo complesso. In tal caso, si distinguono due principali strategie di flusso:

- 1) ANN *Feed forward*: quando il segnale che procede dall'Input all'Output della ANN attraversa tutti i nodi una sola volta (MANGAN, ZASLAVER, ALON 2003);
- 2) ANN con *Feedback*: quando il segnale procede con *Feedback* specifici, determinati a priori, o legati al verificarsi di particolari condizioni.

Le ANN con *Feedback* sono note anche con il nome di ANN Ricorrenti (MANDIC, CHAMBERS 2001). Più plausibili dal punto di vista biologico, sebbene più complesse da trattare dal punto di vista matematico, esse vengono usate spesso per l'elaborazione di segnali temporali.

Ogni ANN può apprendere nel tempo le caratteristiche dell'ambiente nel quale è immersa (o dei dati che le vengono presentati) in due modi tra loro interdipendenti:

- 1) Ricostruendo per approssimazione la funzione di densità di probabilità dei dati che riceve dall'ambiente, rispetto a vincoli preordinati;
- 2) Ricostruendo per approssimazione i parametri che risolvono l'equazione di connessione tra i dati di ingresso (Input) e quelli di uscita (Output), rispetto a vincoli preordinati.

Il primo metodo è noto, nell'Intelligenza Artificiale, come Quantificazione Vettoriale (*Vector Quantization*); il secondo è definito come metodo del Gradiente Discendente (*Gradient Descent*). Il metodo della Quantificazione Vettoriale comprime e articola le variabili di Input in Output costituiti da ipersfere di raggio definito (GERSHO, GRAY 1992). Il metodo del Gradiente Discendente articola le variabili di Input in Output costituiti da iperpiani (SNYMAN 2005).

La differenza tra questi due metodi diventa evidente nel caso di ANNs *Feed forward* con almeno uno strato di unità Hidden. Tramite la Quantificazione Vettoriale, le unità Hidden codificano in modo locale i tratti più rilevanti del vettore di Input; quando l'apprendimento è terminato, ogni unità Hidden sarà un prototipo che rappresenta uno o più valori rilevanti del vettore di Input, in forma definita ed esclusiva; anche tramite il Gradiente Discendente, le unità Hidden codificheranno i tratti più rilevanti del vettore di Input, ma alla fine dell'apprendimento, ogni unità Hidden tenderà a rappresentare parte dell'Input in modo più sfumato ed esso non sarà esclusivo (BISHOP 1995; BAXTER 2006; MCCLELLAND *et al.* 2010).

5. I PRIMI RISULTATI APPLICATIVI DEL MODELLO ARCHEO-LOGICO AS

La prima sperimentazione di AS ad alcune delle problematiche poste dall'archeologia analitica, dalla linguistica computazionale e dall'epigrafia digitale mostra già importanti risultati. Le simulazioni hanno, infatti, interessato tre banche dati molto estese che sono state trattate utilizzando tre tecniche d'analisi diverse: la Correlazione Lineare (*Linear Correlation*), la cosiddetta *Prior Probability* e la rete neurale *Auto Contractive Map*, quest'ultima ideata al Centro Ricerche Semeion (BUSCEMA, GROSSI 2007, 2008; BUSCEMA, TERZI 2007; BUSCEMA *et al.* 2008).

Nel caso della Correlazione Lineare, per ognuna delle basi dati è stata generata una matrice quadrata di connessioni che rappresenta la correlazione a coppie, lineare, tra ognuna delle entità registrate e formalizzate. Nel caso della *Prior Probability*, le connessioni rintracciate indicano la probabilità a priori della co-occorrenza di ogni coppia di entità. La rete neurale Auto-CM, in ultimo, fondata su un algoritmo in grado di evidenziare relazioni non lineari tra tutte le entità intese come un insieme dinamico, ha proiettato un'altra matrice contenente ancora altre "informazioni", diverse da quelle ottenute con le due precedenti simulazioni.

Dopo aver effettuato queste tre elaborazioni per ognuna della basi dati si è scelto di visualizzare la configurazione dei risultati “migliori” ottenuti con un grafo di tipo MST (*Minimum Spanning Tree*), ovvero con un grafo i cui vertici mostrano lo stato di minimizzazione dell’energia presente all’interno di una data struttura composta da elementi atomici e da pesi che ne definiscono le mutue relazioni (KRUSKAL 1956; GRAHAM 1985; GABOW *et al.* 1986; FREDMAN, WILLARD 1990). In altri termini, questi grafi ramificati visualizzano l’insieme delle associazioni più significative che collegano le entità/variabili di ogni base dati, ovvero quelle specifiche relazioni tra ogni entità e/o gruppi di entità che rappresentano al meglio i record di ogni data-set.

Il protocollo analitico osservato ha avuto, dunque, lo scopo di verificare le diverse capacità connettive (associative) dei modelli utilizzati e di estrapolare quei grafi dell’apprendimento neurale che possedevano una maggiore complessità informativa, non solo poiché confermavano quanto già era noto, ma anche perché prospettavano nuove correlazioni non lineari e latenti, altrimenti non riconoscibili. Le elaborazioni sono state prodotte con un software programmato nel laboratorio Archeosema, scritto in linguaggio C++, dotato sia delle più conosciute Reti Neurali Artificiali che di strumenti per il calcolo dell’algoritmo *Minimum Spanning Tree* in grado di elaborare i risultati in un formato adatto alla visualizzazione spaziale dei grafi con il software open source GEPHI 0.8 (il programma è stato realizzato dal dott. Massimiliano Capriotti).

La rete neurale Auto-CM ha elaborato un data-set (100 record per 40 variabili) contenente informazioni relative al *corpus* delle figurine fittili della coroplastica di Ebla del II millennio a.C. (RAMAZZOTTI 2012a, 345-375), generando una matrice di connessioni Input dell’algoritmo per la creazione di un *Minimum Spanning Tree*. Il grafo ad albero riprodotto in Fig. 1 definisce una mappatura delle connessioni tra le variabili che ricostruisce le tecniche di costruzione dell’immagine e fornisce informazioni, di tipo materiale ma anche cognitivo, sul processo tecnologico e psichico che le potrebbe avere generate. Infatti, le ramificazioni del grafo classificano tre generi differenti di informazioni:

- 1) Dal momento che i vertici indicano una delle parti che compongono l’immagine, il vertice di maggiori dimensioni – ovvero il vertice che presenta il valore di *Betweenness Centrality* più alto (valore normalizzato che rappresenta una misura della centralità del vertice in una generica rete equivalente al numero dei percorsi più brevi) – identifica la variabile preponderante nella produzione di queste immagini, ovvero l’incisione come perno della catena operativa posta a fondamento della costruzione figurativa e del significato ideografico dell’immagine.
- 2) Le diverse classi, rappresentate da differenti colori (qui tradotti in scala di grigi), indicano gruppi qualitativamente differenti di variabili che concorrono

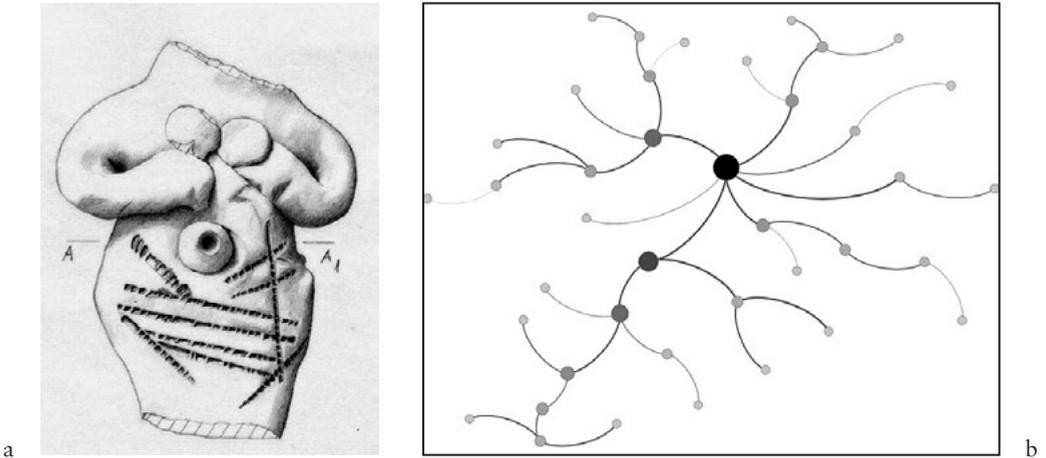


Fig. 1 – a) Disegno in scala 1:1 di una figurina fittile di Ebla conservata nel Museo di Idlib (TM92P618) e databile agli inizi del II Millennio a.C. (RAMAZZOTTI 2012, 372, fig. 4b); b) Grafo (elaborato con il programma Gephi v. 0.8) sulle relazioni semantiche del DBMS riferito alle figurine fittili di Ebla-Tell Mardikh.

a rendere la complessità tecnologica e cognitiva di ogni singola figurina; ne consegue che, per ognuno dei 100 record trattati è possibile ottenere un'ipersuperficie geometrica che ne codifica la complessità sistemica, tecnologica e cognitiva.

3) Lo spessore delle linee che connettono i nodi, ovvero le connessioni pesate dei vertici, segnala la misura della contiguità tra le diverse variabili che descrivono ogni figurina della base dati (nei termini di gradi di transizione probabilistica), ed è direttamente proporzionale ai valori delle connessioni; tali connessioni ramificate possono, in altri termini, suggerire la qualità e l'intensità delle relazioni tecnologiche e cognitive tra tutte le variabili che sono state scelte per descrivere ogni singola figurina. Attraverso questa metodologia sarà possibile, in futuro, ricostruire in maniera molto accurata i meccanismi che sottendono al processo di produzione di queste "immagini" in argilla (di questi aspetti se ne sta occupando nello specifico chi scrive e la dott.ssa Irene Viaggiu).

La rete neurale Auto-CM ha elaborato un dataset (185 record \times 98 variabili) contenente informazioni relative ad alcuni documenti testuali, generando una matrice di connessioni input dell'algoritmo per la creazione di un *Minimum Spanning Tree*. L'albero riprodotto in Fig. 2 definisce una mappatura delle connessioni tra le variabili per la ricostruzione di diverse fasi di scrittura e fornisce informazioni, di tipo materiale ma anche cognitivo, sul processo creativo. Infatti questo albero sintetizza tre tipi di informazioni:

1459-1911

Como um fôr de sol e um ariz...
 Como um fôr de sol e um ariz...

Tente como um fôr de sol e um ariz...

I.

Eu nunca guardei rebanhos,
 mas é' como se os guardasse...
~~mas a alma é' como um pastor,~~
 Pertence ao vento e ao sol,
 e anda pela mão das colinas,
 a correr e a brincar...
 Toda a paz da Natureza sem gente
 vem sentar-se a meu lado...
 mas eu fôr triste como um fôr de sol,
 quando acortee ao fundo do oceano,
 e se sente a noite entrar
 Como uma borboleta pela janela.

Mas a minha tristeza é' alegre,
 Porque é' natural e justa
 e é' o que deve ter a alma
 Quando não pensa que existe
 e as mãos colhem flores sem ella dar por ellas...

Como um riudo de chovalhos
 Para além da curva do estale,
 Os meus pensamentos são ^{contentes} ~~insipientes~~,
 Aí' tenho pena de saber que elles são ^{contentes} ~~insipientes~~,
 Porque, se o não soubesse,
 Eu vez de serem ^{insipientes} ~~insipientes~~ e ^{tristes} ~~tristes~~,
 Seriam alegres e ^{contentes} ~~insipientes~~.

Pensar incómodo como andar a chumbar
 Quando o vento sopra e parece que chove mais...

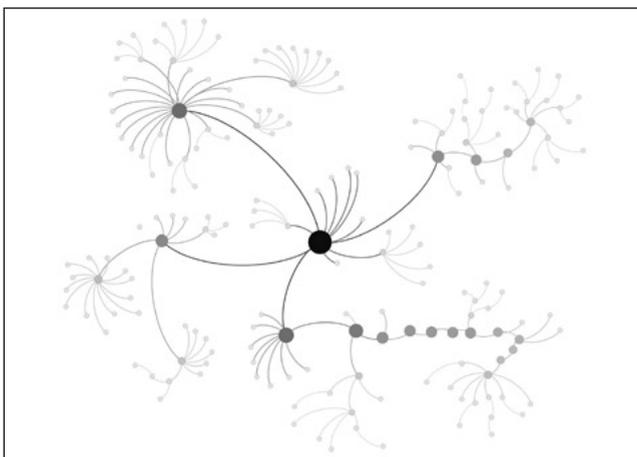
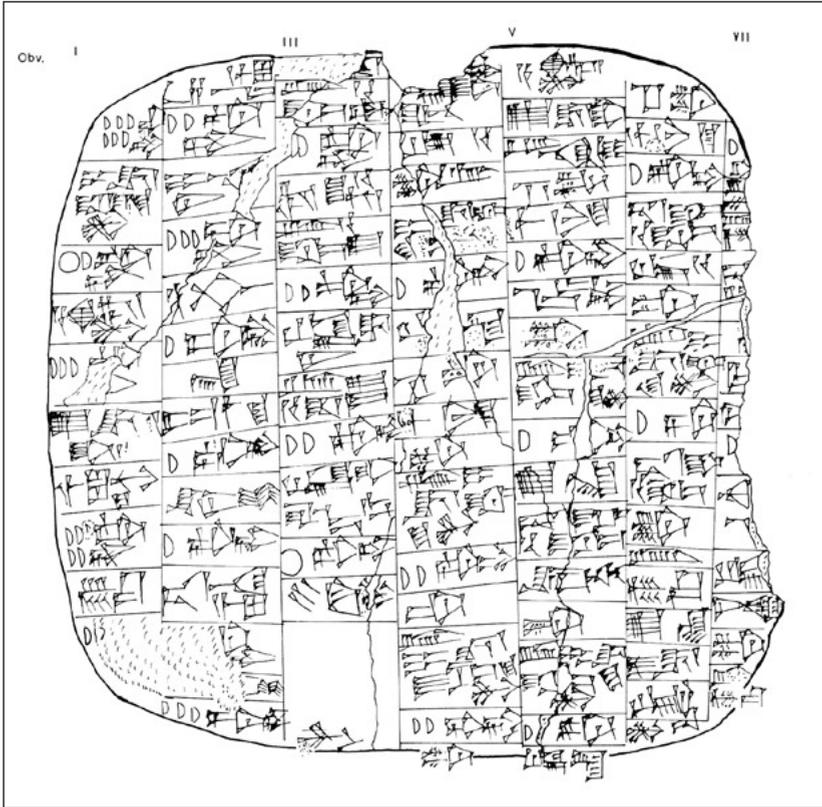
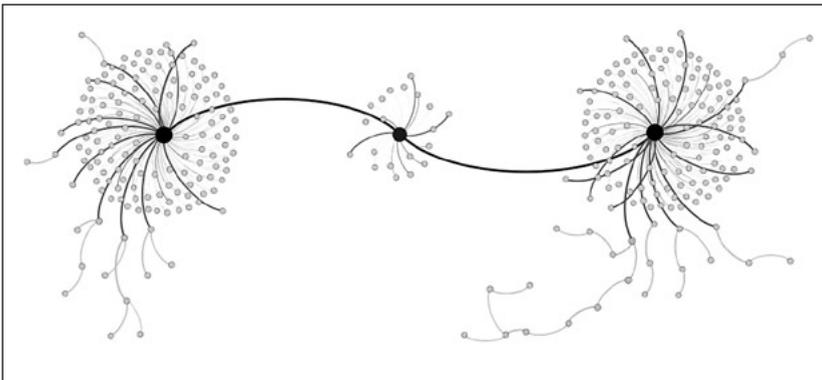


Fig. 2 – a) Carta originale contenente l'incipit della poesia proemiale del *Guardador de rebanhos* di Alberto Caetano (segnatura: E3/145-1); b) Grafo (elaborato con il programma Gephi v. 0.8) sulle relazioni semantiche del DBMS riferito a documenti testuali conservati nel fondo Pessoa.



a



b

Fig. 3 – a) Disegno di una tavoletta cuneiforme rinvenuta nell'Archivio Reale di Ebla nel Palazzo Reale G (ARCHI 1993, pl. IV); b) Grafo (elaborato con il programma Gephi v. 0.8) sulle relazioni semantiche del DBMS riferito ad alcune tavolette cuneiformi provenienti dall'Archivio Reale di Ebla-Tell Mardikh.

1) Informazioni sui vertici: ogni vertice indica uno dei documenti da cui è composto il testo. Il vertice di maggiori dimensioni ha il valore di *Betweenness Centrality* normalizzato più alto (valore che rappresenta una misura della centralità del vertice in una generica rete equivalente al numero dei percorsi più brevi, *Shortest Paths*, da ogni vertice verso ogni altro, che passano attraverso il vertice analizzato). Questo vertice identifica il documento-chiave nella produzione del testo, che fa da ponte tra le diverse sezioni.

2) Informazioni di clusterizzazione: le diverse classi, rappresentate da differenti colori (qui in scala di grigi) indicano alcune delle sezioni del testo.

3) Informazioni sulle connessioni (pesate) tra i vertici: lo spessore delle linee che connettono i nodi indica la misura della contiguità tra le fasi di scrittura (nei termini di gradi di transizione probabilistica), direttamente proporzionale ai valori delle connessioni.

Attraverso questa metodologia sarà possibile, in futuro, identificare e chiarire alcuni dei meccanismi che sottendono al processo di produzione testuale e alla sua specifica dimensione semantica (di queste elaborazioni si stanno occupando nello specifico i colleghi Simone Celani e Paolo Canettieri).

L'informazione codificata per l'indagine concernente il repertorio epigrafico-amministrativo (6163 record \times 232 variabili) è stata esplorata per mezzo dell'algoritmo Auto-CM. L'albero mostrato in Fig. 3 illustra le relazioni individuate tra i contenuti del *corpus* di registrazioni amministrative, nonché tra essi e le strategie e procedure sintattiche e di messa in pagina adottate dai redattori dei testi. I tre vertici messi in evidenza dall'esplorazione del grafo condotta secondo il criterio della *Betweenness Centrality* sono da porre in relazione con aspetti cruciali dell'organizzazione e dello sviluppo delle raccolte di registrazioni amministrative. In particolare, essi mettono in evidenza il ruolo centrale svolto dalle dimensioni fisiche delle sezioni di ogni documento, ma al tempo stesso pongono delle basi per ripensare la classificazione tipologica dei testi stessi e alcune possibili sotto-classificazioni. Ogni vertice indica una caratteristica dei testi. I vertici riguardano il contenuto e la posizione delle diverse sezioni dei testi che compongono il documento. Ciascuno dei tre vertici messi in evidenza dalla *Betweenness Centrality* organizza attorno a sé i tratti contenutistici fondamentali, ma soprattutto quelli sintattici, delle diverse sezioni codificate.

Il percorso che lega i tre vertici è dunque un asse che attraversa concettualmente l'intero *corpus* esaminato (di questi aspetti se ne sta occupando nello specifico il collega Alessandro Di Ludovico).

6. ARCHEOLOGIA ANALITICA... UN "RITORNO AL FUTURO"

I risultati preliminari del progetto AS mostrano, con evidenza, che alcuni Sistemi Artificiali Adattivi possono essere addestrati a rintracciare le regole

sfumate di una data configurazione complessa di dati, e possono formalizzarla in un grafo geometrico che si trasforma dinamicamente in rapporto agli stimoli che apprende e che riceve. Nello specifico, l'applicazione della Rete Neurale Artificiale Auto-CM alle prime tre basi dati di ARCHEOSEMA ha generato tre ipersuperfici geometriche che rappresentano il medesimo apprendimento neurale di tre, distinte, configurazioni di dati complesse. Queste tre ipersuperfici – che codificano solo alcuni dei problemi scientifici posti dall'Archeologia Analitica, dalla Filologia Dinamica e dall'Epigrafia Digitale – sono state successivamente tradotte in grafi ad albero che sintetizzano, ulteriormente, i caratteri dominanti di ognuna delle configurazioni trattate; caratteri e vincoli sui quali è già cominciata una nuova esplorazione tesa a delineare sempre meglio (e in termini quantistici) l'oggetto di indagine, e ad osservare come questo stesso oggetto d'analisi cambi forma se si enfatizzano, si aggiungono o si sottraggono alcune variabili.

I risultati definitivi di queste prime applicazioni del modello ARCHEOSEMA a problematiche archeologiche, geografiche e linguistiche, insieme ad altre elaborazioni realizzate con Sistemi Artificiali Adattivi sono ora in corso di stampa per un numero speciale di «Archeologia e Calcolatori», dedicato alla memoria di D.L. Clarke e, soprattutto, al ruolo che l'Archeologia Analitica da lui fondata assolve tuttora nel promuovere e incoraggiare la ricerca teorica, applicativa e sperimentale.

La Cibernetica, che proprio D.L. Clarke introdusse nella ricerca archeologica essenzialmente come Teoria dei Sistemi, ebbe il ruolo di consolidare negli anni Settanta l'idea che le culture archeologiche, antropologiche e linguistiche funzionassero come organismi naturali e che il loro funzionamento organico-biologico potesse essere simulato come funzionamento meccanico di parti interconnesse, azionate da un Input. Queste parti avrebbero potuto riferire dell'intero procedimento che causava l'alterazione di equilibri, e tali alterazioni non sarebbero state tanto dissimili da quelle osservabili nei cosiddetti Sistemi Culturali (BINFORD 1965; FLANNERY 1968; DORAN 1970a, 1970b; BINTLIFF 1997). Tuttavia, questa meccanizzazione della complessità culturale ha distolto dalla ricerca di altre analogie possibili che potessero essere chiamate in causa per risolvere problemi altamente complessi e, soprattutto, ha radicalizzato una sola accezione della complessità, ovvero il suo essere una dimensione fattuale esterna all'uomo, indipendente dalla natura cognitiva umana, esistente in sé.

Ma a partire dalla fine degli anni Ottanta un nutrito numero di studi è riemerso nel tentativo di comprendere la complessità dei contesti archeologici, antropologici e linguistici, non più come dimensione esterna all'uomo, oggetto passivo della sua "imparziale" ricerca applicativa, quanto piuttosto come un'espressione, viva e dinamica, delle sue abilità mnemoniche, percettive e creative (FRANCFORT 1990, 1997; FLANNERY, MARCUS 1993; GARDIN 1996; DJINDJIAN 2003).

In questo senso, tale complessità è stata quasi sottratta al dominio incontrastato della sua interpretazione esterna, analizzabile attraverso sistemi meccanici e lineari, ed è divenuta il soggetto di ricerche specifiche che intendono risalire alle capacità mentali dell'uomo di crearla. Si profila allora la possibilità di organizzare, dall'analogia tra complessità culturale e complessità dell'intelligenza, un nuovo apparato di conoscenze teoriche, di metodi, di applicazioni che legano la ricerca analitica alla Nuova Intelligenza Artificiale. Il ricercatore che simula il comportamento dinamico di un Sistema Complesso attraverso questi modelli della Nuova Intelligenza Artificiale intende, dunque, esplorare la configurazione dei dati (che è stata appresa) come un'ipersuperficie di connessioni memorizzate. Anziché dunque descrivere la complessità puramente sistemica di un dato contesto, quel ricercatore tenderà ad agire su come quel contesto è stato appreso da un Sistema Artificiale Adattivo per interrogarlo in modo diversificato e rintracciarne ogni possibile combinazione, ogni possibile forma, ogni possibile sfumatura, rendendo, in questo modo, uno spaccato ampio di previsioni del suo "stato".

Lo studio analitico, applicativo e sperimentale di sistemi complessi archeologici (BARCELÓ 1995, 1996; RAMAZZOTTI 1997, 1999a, 1999b, 2000, 2002, 2009b; 2013a, 2013c; BARCELÓ, FAURA 1999; HERMON, NICOLUCCI 2002, 217-232; ZUBROW 2003; BINTLIFF 2005; DERAVIGNONE, MACCHI 2006; DI LUDOVICO, PIERI 2011), linguistici (CANETTIERI 2012; CANETTIERI *et al.* 2004-2005, 2005; SMOLENSKY, LEGENDRE 2006; LORETO, STEELS 2007; PUGLISI, BARONCHELLI, LORETO 2008; DI LUDOVICO, RAMAZZOTTI 2008; GONG *et al.* 2012) e geografici (HEWITSON, CRANE 1994; BLACK 1995; OPENSHAW, OPENSHAW 1997; FISCHER 1998, 2000, 2001, 2002; BUSCEMA, TERZI 2007; EHSANI 2007) che si può avvalere della Nuova Intelligenza Artificiale è, in ultima analisi, una ricerca che valuta il "significato" delle relazioni tra i dati come una costruzione essenzialmente umana, "fisicamente" connessa alle capacità computazionali delle reti.

Questo studio ripete dunque una posizione ancora forte dell'Archeologia Analitica, ma l'aggiorna sulla base del progresso che proprio la Nuova Intelligenza Artificiale sta realizzando nel superare i limiti di calcolo imposti dalla teoria dei sistemi e sulla base del progresso che le Scienze Cognitive ottengono, ogni giorno, nel riconoscimento, nella riproduzione, nella simulazione e nella classificazione di alcuni dei principi che regolano la memoria, l'orientamento, il linguaggio e la traduzione.

MARCO RAMAZZOTTI

Dipartimento di Scienze dell'Antichità
Archeologia e Storia dell'Arte del Vicino Oriente antico
Sapienza Università di Roma

BIBLIOGRAFIA

- ACKLEY D.H. 1987, *Connectionist Machine for Genetic Hill Climbing*, Boston, Kluwer Academic Publishers.
- ALLEN J. 1999, *Spatial assemblages of power: From domination to empowerment*, in D. MASSEY, J. ALLEN, P. SARRE (eds.), *Human Geography Today*, Cambridge, Wiley, 194-218.
- ANDERSON J.A., ROSENFELD E. (eds.) 1988, *Neurocomputing Foundations of Research*, Cambridge Ma., MIT Press.
- ARBIB M.A. 1995, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Cambridge Ma., MIT Press (2nd ed. 2002).
- BARCELÓ J.A. 1995, *Back-propagation algorithms to compute similarity relationships among archaeological artifacts*, in J. WILCOCK, K. LOCKYEAR (eds.), *Computer Applications in Archaeology 1993*, BAR International Series 598, Oxford, Archaeopress, 165-176.
- BARCELÓ J.A. 1996, *Heuristic classification and fuzzy sets. New tools for archaeological typologies*, in H. KAMERMANS, K. FENNEMA (eds.), *Interfacing the Past: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA95*, Analecta Praehistorica Leidensia, 28, Leiden, 313-326.
- BARCELÓ J.A. 2007, *Automatic Archaeology: Bridging the gap between Virtual Reality, Artificial Intelligence, and Archaeology*, in F. CAMERON, S. KENDERDINE (eds.), *In Theorizing Digital Cultural Heritage*, Cambridge Ma., MIT Press, 437-456.
- BARCELÓ J.A. 2008, *Computational Intelligence in Archaeology. Investigations at the Interface between Theory, Technique and Technology in Anthropology, History and the Geosciences*, London, IGI Global.
- BARCELÓ J.A., FAURA J.M. 1999, *Time series and Neural Networks in archaeological seriation: An example on early pottery from Near East*, in L. DINGWALL, S. EXON, V. GAFFNEY, S. LAFLIN, M. VAN LEUSEN (eds.), *Archaeology in the Age of the Internet*, BAR International Series 750, Oxford, Archaeopress, 91-102.
- BAXTER M.J. 1995, *Standardization and transformation in Principal Component Analysis with applications to archaeometry*, «Applied Statistics», 4, 513-527.
- BAXTER M.J. 2006, *A review of supervised and unsupervised pattern recognition*, «Archaeometry», 48, 4, 671-694.
- BAXTER M.J., COOL H.E.M. 2010, *Correspondence Analysis in R for archaeologists: An educational account*, «Archeologia e Calcolatori», 21, 211-228.
- BECKERMAN M. 1997, *Adaptive Cooperative Systems*, New York, John Wiley & Son.
- BEECKMAN C.S., BADEN W.W. (eds.) 2005, *Nonlinear Models for Archaeology and Anthropology: Continuing the Revolution*, London, Aldershot.
- BINFORD L.R. 1965, *Archaeological systematics and the study of culture process*, «American Antiquity», 31, 2, 203-210.
- BINTLIFF J. 1997, *Catastrophe, chaos and complexity: The death, decay and rebirth of towns from antiquity to today*, «Journal of European Archaeology», 5, 67-90.
- BINTLIFF J. 2005, *Being in the (past) world: Vermeer, Neural Networks and archaeological theory*, in T.L. KIENLIN (ed.), *Die Dinge als Zeichen. Culturelles Wissen und materielle Kultur*, Bonn, Verlag Dr Rudolf Habelt, 125-131.
- BISHOP C.M. 1995, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford, Oxford University Press.
- BLACK W.R. 1995, *Spatial interaction modelling using Artificial Neural Networks*, «Journal of Transport Geography», 3/3, 159-166.
- BUSCEMA M., GROSSI E. 2007, *A novel adapting mapping method for emergent properties discovery in data bases: Experience in medical field*, in *Proceedings of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics, ISIC, IEEE (Montreal, Canada, 2007)*, 3457-3463.

- BUSCEMA M., GROSSI E. 2008, *The semantic connectivity map: An adapting self-organising knowledge discovery method in data bases*, «International Journal of Data Mining and Bioinformatics», 2/4, 362-404.
- BUSCEMA P.M., INTRALIGI M. 2003, *Filosofia dei Sistemi Artificiali Adattivi*, «Dedalo», 2, 27-40.
- BUSCEMA M., PETRITOLI R., PIERI G., SACCO P.L. 2008, *Auto Contractive Maps*, Technical Paper, 32, Roma, Aracne Editrice.
- BUSCEMA P.M., TASTLE W.J. 2013, *Intelligent Data Mining in Law Enforcement Analytics: New Neural Networks Applied to Real Problems*, Heidelberg-New York, Springer.
- BUSCEMA M., TERZI S. 2007, *A new evolutionary approach to topographic mapping*, in *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing (Cavtat, Croatia, 2007)*, 12-19.
- CAMIZ S. 2004, *On the coding of archaeological finds*, in P. MOSCATI (ed.), *New Frontiers of Archaeological Research. Languages, Communication, Information Technology*, «Archeologia e Calcolatori», 15, 201-218.
- CAMIZ S., ROVA E. 2001, *Exploratory analysis of structured images: A test on different coding procedures and analysis methods*, «Archeologia e Calcolatori», 12, 7-45.
- CANETTIERI P. 2012, *Unified Theory of the Text (UTT) and the question of authorship attribution*, «Memoria di Shakespeare», 8, 65-77.
- CANETTIERI P., LORETO V., ROVETTA M., SANTINI G. 2004-2005, *Philology and information theory: Towards an integrated approach*, in P. BARET, A. BOZZI, C. MACÉ (eds.), *Textual Criticism and Genetics*, «Linguistica Computazionale», 24-25, 104-126.
- CANETTIERI P., LORETO V., ROVETTA M., SANTINI G. 2005, *Ecdotics and information theory*, «Rivista di Filologia Cognitiva», 3 (<http://w3.uniroma1.it/cogfil/ecdotica.html>).
- CHURCHLAND P.M. 1989, *A Neurocomputational Perspective. The Nature of Mind and the Structure of Science*, Cambridge Ma, MIT Press.
- CLARK A. 1993, *Associative Engines: Connectionism, Concepts and Representational Change*, Cambridge Ma., MIT Press.
- CLARK A., ELIASMITH C. 2002, *Philosophical issues in brain theory and connectionism*, in M. ARBIB (ed.), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Cambridge Ma., MIT Press, 2nd ed., 886-888.
- CLARKE D.L. 1962, *Matrix analysis and archaeology with particular reference to British beaker pottery*, «Proceedings of the Prehistoric Society», 28, 371-383.
- CLARKE D.L. 1968, *Analytical Archaeology*, London, Methuen.
- CLARKE D.L. 1972, *Models and paradigms in contemporary archaeology*, in D.L. CLARKE (ed.), *Models in Archaeology*, London, Methuen, 1-57.
- CLARKE D.L. 1994, *Culture as a system with subsystem*, in M.S. PEARCE (ed.), *Interpreting Objects and Collections*, New York-London, Routledge, 44-47.
- DERAVIGNONE L., MACCHI J. 2006, *Artificial Neural Networks in archaeology*, «Archeologia e Calcolatori», 17, 121-136.
- DI LUDOVICO A. 2011, *Experimental approaches to glyptic art using Artificial Neural Networks. An investigation into the Ur III iconological context*, in E. JEREM, F. REDŐ, V. SZEVERÉNYI (eds.), *On the Road to Reconstructing the Past. Proceedings of the 36th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) (Budapest 2008)*, Budapest, Archaeolingua, 135-146.
- DI LUDOVICO A., PIERI G. 2011, *Artificial Neural Networks and ancient artefacts: Justifications for a multiform integrated approach using PST and Auto-CM models*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 99-128.
- DI LUDOVICO A., RAMAZZOTTI M. 2008, *Reconstructing lexicography in glyptic art: Structural relations between the Akkadian age and the Ur III Period*, in R.D. BIGGS, J. MYERS, M. ROTH (eds.), *Proceedings of the 51st Rencontre Assyriologique Internationale (Chi-*

- cago 2005), «Studies in Ancient Oriental Civilization», 62, Chicago, Oriental Institute Publications, 263-280.
- DI LUDOVICO A., RAMAZZOTTI M. 2011, *Design at Ebla. The decorative system of a painted wall decoration*, «Orientalia», 80, 1, 66-80.
- DJINDJIAN F. 2002, *Pour une théorie générale de la connaissance en archéologie*, in DJINDJIAN, MOSCATI 2002, 101-117.
- DJINDJIAN F. 2003, *Modèles «cognitifs» et modèles «paradigmatiques» en archéologie*, in *I modelli nella ricerca archeologica* 2003, 178-199.
- DJINDJIAN F., MOSCATI P. (eds.) 2002, XIV UISPP Congress (Liège-Belgium 2001). *Proceedings of Commission IV Symposia. Data Management and Mathematical Methods in Archaeology*, «Archeologia e Calcolatori», 13.
- DORAN J.E. 1970a, *System theory, computer simulation and archaeology*, «World Archaeology», 1, 289-298.
- DORAN J.E. 1970b, *Archaeological reasoning and machine reasoning*, in GARDIN 1970, 57-69.
- DORAN J.E., HODSON F.R. 1975, *Mathematics and Computers in Archaeology*, Edinburgh, Edinburgh University Press.
- EHSANI A.H. 2007, *Artificial Neural Networks: Application in Morphometric and Landscape Features Analysis*, KTH, Stockholm, Royal Institute of Technology.
- ELMAN J.L., RUMELHART D.E. 1989, *Advanced in Connectionist Theory*, Hillsdale NJ, Speech, Erlbaum.
- FELDMAN J.A., BALLARD D.H. 1982, *Connectionist models and their properties*, «Cognitive Science», 6, 205-254.
- FELDMAN J.A., BALLARD D.H. 1989, *Connectionist representation of concepts*, in R. PFEIFER, Z. SCHRETER, F. FOGELMAN-SOULIÉ, L. STEELS (eds.), *Connectionism in Perspective*, Amsterdam, North Holland.
- FISCHER M.M. 1998, *A genetic-algorithm based on evolutionary Computational Neural Network for modelling spatial interaction data*, «The Annals of Regional Science», 32/3, 437-458.
- FISCHER M.M. 2000, *Methodological challenges in neural spatial interaction modelling: The issue of model selection*, in A. REGGIANI (ed.), *Spatial Economic Science: New Frontiers in Theory and Methodology*, Berlin, Heidelberg and New York, Springer, 89-101.
- FISCHER M.M. 2001, *Neural Spatial Interaction Models*, in M.M. FISCHER, Y. LEUNG (eds.), *Geo-Computational Modelling: Techniques and Applications*, Berlin, Heidelberg and New York, Springer, 195-219.
- FISCHER M.M. 2002, *Learning in neural spatial interaction models: A statistical perspective*, «Journal of Geographical Systems», 4/3, 287-299.
- FISCHER M.M., REISMANN M. 2002, *A methodology for neural spatial interaction modeling*, «Geographical Analysis», 34/3, 1-23.
- FLANNERY K.V. 1968, *Archaeological system theory and early Mesoamerica*, in J.B. MEGGERS (ed.), *Anthropological Archaeology in the Americas*, Washington, Anthropological Society of Washington, 67-87.
- FLANNERY K.V., MARCUS J. 1993, *Cognitive archaeology*, «Cambridge Archaeological Journal», 3, 260-270.
- FODOR J. 1987, *Psychosemantics: The Problem of Meaning in the Philosophy of Mind*, Cambridge Ma., MIT Press.
- FODOR J., PYLYSHYN Z. 1988, *Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis*, «Cognition», 28, 3-71.
- FRANCFORT H.-P. 1990, *Modelling interpretative reasoning in archaeology with the aid of Expert Systems: Consequences of a critique of the foundations of inferences*, in R. ENNALS, J.-C. GARDIN (eds.), *Interpretation in the Humanities: Perspectives from Artificial Intelligence*, LIR Report 71, The British Library, 101-129.

- FRANCFORT H.-P. 1997, *Archaeological interpretation and non-linear dynamic modelling: Between metaphor and simulation*, in S.E. VAN DER LEEUW, J. MCGLADE (eds.), *Time, Process and Structured Transformation in Archaeology*, London, Routledge, 151-175.
- FREDMAN M.L., WILLARD D.E. 1990, *Trans-dichotomous algorithms for minimum spanning trees and shortest paths*, in *Proceedings of the 31st Annual Symposium on Foundations of Computer Science (St. Louis Missouri 1990)*, EEE Computer Society Press, 719-725.
- GABOW H.N, GALIL Z., SPENCER T., TARJAN R. 1986, *Efficient algorithms for finding the minimum spanning trees in undirected and directed graphs*, «Combinatorica», 6, 109-122.
- GALLANT S.I. 1993, *Neural Network Learning and Expert System*, Cambridge Ma., MIT Press.
- GALLAY A. 1989, *Logicism: A French view of archaeological theory founded in computational perspective*, «Antiquity», 63, 27-39.
- GARDIN J.-C. 1970, *Archéologie et calculateurs: problèmes mathématiques et sémiologiques*, Paris, Ed. du CNRS.
- GARDIN J.-C. 1987, *De l'analyse logiciste aux systèmes experts*, in J.-C. GARDIN, O. GUILLAME (eds.), *Systèmes experts et sciences humaines: le cas de l'archéologie*, Paris, Eyrolles, 27-42.
- GARDIN J.-C. 1996, *La révolution cognitive et l'archéologie*, in P. MOSCATI (ed.), *III International Symposium on Computing and Archaeology (Roma 1995)*, «Archeologia e Calcolatori», 7, 2, 1221-1230.
- GARDIN J.-C. 2002, *Les modèles logico-discursifs en archéologie*, in DJINDJIAN, MOSCATI 2002, 19-30.
- GARDIN J.-C. 2003, *Archéologie et modèles: essai sur les rapports entre thèmes du Symposium*, in *I modelli nella ricerca archeologica* 2003, 5-23.
- GERSHO A, GRAY R.M. 1992, *Vector Quantization and Signal Compression*, New York, Springer.
- GONG T., BARONCHELLI A., PUGLISI A., LORETO V. 2012, *Modelling the emergence of universality in color naming patterns*, «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», 107, 2403-2407.
- GRAHAM L.R. 1985, *On the history of the minimum spanning tree problem*, «Annals of the History of Computing», 7, 43-57.
- GROSSBERG S. 1982, *Studies of mind and brain: Neural principles of learning, perception, development, cognition, and motor control*, Dordrecht, Reidel.
- GROSSBERG S. 1987, *The Adaptive Brain*, New York, North Holland.
- GROSSBERG S. 1988, *Neural Networks and Natural Intelligence*, Cambridge Ma., MIT Press.
- HERMON S., NICCOLUCCI F. 2002, *Estimating subjectivity of typologists and typological classification with fuzzy logic*, in DJINDJIAN, MOSCATI 2002, 217-232.
- HEWITSON B., CRANE R. 1994, *Neural Nets: Applications in Geography*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- HOPFIELD J.J. 1982, *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities*, «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», 79/8, 2554-2558.
- I modelli nella ricerca archeologica. Il ruolo dell'informatica. Atti del Convegno internazionale (Roma 2000)*, Contributi del Centro Linceo Interdisciplinare Beniamino Segre, n. 107, Roma, Accademia Nazionale dei Lincei 2003.
- KOHLER T.A., VAN DER LEEUW S.E. (eds.) 2007, *The Model-Based Archaeology of Socionatural Systems*, Santa Fe, New Mexico, SAR Press.
- KOSKO B. 1992, *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall.

- KRUSKAL J.B. 1956, *On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem*, «Proceedings of the American Mathematical Society», 7/1, 48-50.
- KVAMME K.L. 1990, *The fundamental principles and practice of predictive archaeological modelling*, in A. VOORRIPS (ed.), *Mathematics and Information Science in Archaeology: A Flexible Framework*, Bonn, Holos-Verlag, 257-295.
- LORETO V., STEELS V. 2007, *Emergence of language*, «Nature Physics», 3, 758-760
- LOW W.G. 1981, *Using system dynamics to simulate the past*, in J.A. SABLOFF (ed.), *Simulations in Archaeology*, Albuquerque, University of New Mexico Press, 249-281.
- MALAFOURIS L. 2010, *Metaplasticity and the human becoming: Principles of neuroarchaeology*, «Journal of Anthropological Sciences», 88, 49-72.
- MALAFOURIS L., RENFREW C. 2008, *Steps to a 'neuroarchaeology' of mind: An introduction*, «Cambridge Archaeological Journal», 18, 381-385.
- MALAFOURIS L., RENFREW C. 2010, *The cognitive life of things: Archaeology, material engagement and the extended mind*, in L. MALAFOURIS, C. RENFREW (eds.), *The Cognitive Life of Things: Recasting the Boundaries of the Mind*, Cambridge, McDonald Institute Monographs, 1-12.
- MANDIC D., CHAMBERS J. 2001, *Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability*, London, Wiley.
- MANGAN S., ZASLAVER A., ALON U. 2003, *The coherent feed-forward loop serves as a sign-sensitive delay element in transcription networks*, «Molecular Biology», 334, 197-204.
- MARCUS G.F. 2001, *The Algebraic Mind. Integrating Connectionism and Cognitive Science*, Cambridge Ma., MIT Press.
- MCCLELLAND J.L., BOTVINICK M.M., NOELLE D.C., PLAUT D.C., ROGERS T.T., SEIDENBERG M.S., SMITH L.B. 2010, *Approaches to cognitive modeling. Letting structure emerge: Connectionist and dynamical systems approaches to cognition*, «Cognitive Sciences», 14, 348-356.
- MCCULLOCH W.S., PITTS W.H.A. 1993, *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*, «Bulletin of Mathematical Biophysics», 5, 115-133.
- MCCLELLAND J.L., RUMELHART D.E. (eds.) 1986, *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*, Cambridge Ma., MIT Press.
- MCGLADE J., VAN DER LEEW S.E. 1997, *Introduction: Archaeology and non-linear dynamics - New approach to long-term change*, in J. MCGLADE, S.E. VAN DER LEEW (eds.), *Time, Process and Structured Transformation in Archaeology*, London, Routledge, 1-31.
- MILLER J.H., PAGE E.S. 2007, *Complex Adaptive Systems. An Introduction to Computational Models of Social Life*, Princeton, Princeton University Press.
- MINSKY M. 1954, *Neural Nets and the Brain-Model Problem*, Doctoral Dissertation, Princeton University.
- MINSKY M. 1986, *The Society of Mind*, New York, Simon and Schuster (Trad. ital. *La società della mente*, Milano 1989).
- MINSKY M., PAPER S. 1968, *Perceptrons*, Cambridge Ma., MIT Press (Expanded ed. 1988).
- MIRA J., FERRÁNDEZ J.M., DE LA PAX F., TOLEDO F.J. (eds.) 2009, *Methods and Models in Artificial and Natural Computation. A Homage to Professor Mira's Scientific Legacy. Third International Work-Conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation*, IWINAC 2009 (Santiago de Compostela 2009), Berlin, Springer.
- MOSCATI P. 1998, *GIS Applications in Italian Archaeology*, in P. MOSCATI (ed.), *Methodological Trends and Future Perspectives in the Application of GIS in Archaeology*, «Archeologia e Calcolatori», 9, 191-236.
- NUNES DE CASTRO L. 2007, *Fundamentals of natural computing: An overview*, «Physics of Life Reviews», 4, 1-36.

- OPENSHAW S., OPENSHAW C. 1997, *Artificial Intelligence in Geography*, Chichester, John Wiley.
- PUGLISI A., BARONCHELLI A., LORETO A. 2008, *Cultural route to the emergence of linguistic categories*, «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», 105, 7936-7940.
- RAMAZZOTTI M. 1997, *La fase 'Middle Uruk': studio tramite Reti Neurali Artificiali su un orizzonte latente nella protostoria della Bassa Mesopotamia*, in P. MATTHIAE (ed.), *Studi in memoria di Henri Frankfort (1897-1954) presentati dalla scuola romana di Archeologia Orientale*, Roma, Sapienza, 495-522.
- RAMAZZOTTI M. 1999a, *La Bassa Mesopotamia come laboratorio storico in età protostorica. Le Reti Neurali Artificiali come strumento di ausilio alle ricerche di archeologia territoriale*, Contributi e Materiali di Archeologia Orientale, VIII, Roma, Sapienza.
- RAMAZZOTTI M. 1999b, *Analisi qualitativa dei depositi archeologici come indice guida delle ricerche a scala territoriale*, in M. BUSCEMA (ed.), *Reti Neurali Artificiali e sistemi sociali complessi. Teoria - Metodi - Applicazioni*, Milano, Franco Angeli, 261-269.
- RAMAZZOTTI M. 2000, *Dall'analisi diacronica all'analisi sincronica: indagine sulle dinamiche insediamentali del periodo Jemdet Nasr nella regione di Warka*, «Scienze dell'Antichità», 10, 9-38.
- RAMAZZOTTI M. 2002, *La «Rivoluzione Urbana» nella Mesopotamia meridionale. Replica 'versus' Processo*, Rendiconti, Serie IX, Accademia Nazionale dei Lincei, Classe delle Scienze Morali Storiche e Filologiche, 13, 651-752.
- RAMAZZOTTI M. 2008, *An integrated analysis for the urban settlement reconstruction. The topographic, mathematical and geophysical frame of Tell Mardikh, Ancient Ebla*, in H. KÜHNE, R.M. CZICHON, F.J. KREPPNER (eds), *Proceedings of the 4th International Congress of the Archaeology of the Ancient Near East (Berlin 2004)*, 1, Berlin, Harrasowitz Verlag, 191-205.
- RAMAZZOTTI M. 2009a, *Dall'automazione del record geomagnetico alla scoperta del «Tempio della Roccia» (2400-2350 a.C. ca.)*, «Archeomatica», 1, 12-15.
- RAMAZZOTTI M. 2009b, *Lineamenti di archeologia del paesaggio mesopotamico. Descrizioni statistiche e simulazioni artificiali adattive per un'analisi critica della demografia sumerica e accadica*, in G. MACCHI (ed.), *Geografia del popolamento*, Siena, Fieravecchia, 193-202.
- RAMAZZOTTI M. 2010a, *Archeologia e semiotica. Linguaggi, codici, logiche e modelli*, Torino, Bollati Boringhieri.
- RAMAZZOTTI M. 2010b, *The Ebla Archaeological Park. Natural, archaeological and artificial Italian portrait of the ancient Syrian capital*, in P. MATTHIAE, F. PINNOCK, L. NIGRO, N. MARCHETTI (eds.), *Proceedings of the 6th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East (Roma 2008)*, 2, Wiesbaden, Harrasowitz Verlag, 581-597.
- RAMAZZOTTI M. 2012a, *Aesthetic and cognitive report on ancient Near East clay figurines based on some Early Bronze and Middle Bronze records discovered at Ebla-Tell Mardikh (Syria)*, «Scienze dell'Antichità», 17, 345-375.
- RAMAZZOTTI M. 2012b, ARCHEOSEMA. *Un modello archeo-logico per la ricerca teorica, analitica e sperimentale dei fenomeni complessi*, «Archeomatica», 2, 6-10.
- RAMAZZOTTI M. 2013a, *Where were the early Syrian Kings of Ebla buried? The Ur-Eridu survey neural model as an Artificial Adaptive System for the probabilistic localization of the Ebla Royal è madim*, «Scienze dell'Antichità», 19, 1, 10-34.
- RAMAZZOTTI M. 2013b, *Logic and semantics of computational models for the analysis of complex phenomena. Analytical Archaeology of Artificial Adaptive Systems*, in A. MONTANARI (ed.), *Urban Coastal Area Conflicts Knowledge: Human Mobility, Climate Change and Local Sustainable Development*, Roma, Sapienza Università Editrice, 23-55.
- RAMAZZOTTI M. 2013c, *Mesopotamia antica. Archeologia del pensiero creatore di miti nel Paese di Sumer e di Accad*, Roma, Artemide.
- RENFREW C. 1981, *The Simulator as demiurge*, in J.A. SABLOFF (ed.), *Simulation in Archaeology*, Albuquerque, University of New Mexico Press, 285-306.

- RENFREW C. 2008, *Neuroscience, evolution and the sapient paradox: The factuality of value and of the sacred*, «Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences», 363, 2041-2047.
- RENFREW C., COOKE K.L. (eds.) 1979, *Transformation: Mathematical Approaches to Culture Change*, New York, Academic Press.
- RENFREW C., ZUBROW E.B.W. (eds.) 1994, *The Ancient Mind. Elements of Cognitive Archaeology*, Cambridge, Cambridge University Press.
- ROGERS T.T., MCCLELLAND J.L. 2004, *Semantic Cognition: A Parallel Distributed Processing Approach*, Cambridge Ma., MIT Press.
- ROSENBLATT F. 1958, *The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain*, «Psychological Review», 65/6, 386-408.
- ROSENBLATT F. 1962, *Principles of Neurodynamics*, New York, Spartan.
- SMOLENSKY P. 1989, *Connectionism and constituent structure*, in R. PFEIFER, Z. SCHRETER, F. FOGELMAN-SOULIÉ, L. STEELS (eds.), *Connectionism in Perspective*, Amsterdam, North Holland.
- SMOLENSKY P., LEGENDRE G. 2006, *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-theoretic Grammar*, Cambridge Ma., MIT Press.
- SNYMAN J.A. 2005, *Practical Mathematical Optimization: An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms*, New York, Springer.
- SZCZPANIAK P.S. (ed.) 1999, *Computational Intelligence and Applications*, Heidelberg-New York, Springer.
- ZADEH L.A., KLIR G.J., YUAN B. (eds.) 1996, *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A. Zadeh*, Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory, 6, Singapore, World Scientific Publishing.
- ZUBROW E.B.W. 1990, *Modelling and prediction with Geographic Information Systems: A demographic example from prehistoric and historic New York*, in K.M.S. ALLEN, S.W. GREEN, E.B.W. ZUBROW (eds.), *Interpreting Space: GIS and Archaeology*, London, Taylor & Francis, 307-318.
- ZUBROW E.B.W. 2003, *The archaeologist, the neural network, and the random pattern: Problems in spatial and cultural cognition*, in M. FORTE, P.R. WILLIAMS (eds.), *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies - Italy-United States Workshop*, Oxford, BAR International Series 1151, Oxford, Archaeopress.

ABSTRACT

ARCHEOSEMA is the name of a metadisciplinary theoretical, analytical and experimental research project which has recently been awarded a grant by the Sapienza University of Rome. The purpose of the research is to create a logical model based on the interaction between Geographical Information Systems and Artificial Adaptive Systems. The model is conceived as an epistemological and methodological instrument: epistemological because it requires an interdisciplinary dialogue that involves archaeology, physics, geography, linguistics and statistics, and methodological because it is intended to analyze solutions for problems of classification, seriation and organization of alpha-numerical data; to implement the dynamic simulation of the variables which compose organic and/or cultural systems; to identify new rules for spatial, economic and political organization and, moreover, to analyze physical, aesthetic and linguistic phenomena of the self-organization, entropy, learning and translation. This epistemological and methodological instrument which is technically programmed like a GIS combines the most advanced instruments of physics, mathematics, algebra and geometry and the first simulations made on three different databases (territorial, aesthetic, and linguistics), already show a series of preliminary results that open new possibilities for territorial archeology, cognitive archeology and computational linguistics.

