

TRACES OF COMPLEXITY

STUDI IN ONORE DI ARMANDO DE GUIO
STUDIES IN HONOUR OF ARMANDO DE GUIO

a cura di

LUIGI MAGNINI, CINZIA BETTINESCHI, LAURA BURIGANA

SAP Società Archeologica
Mantova 2021

TRACES OF COMPLEXITY.

STUDI IN ONORE DI ARMANDO DE GUIO | STUDIES IN HONOUR OF ARMANDO DE GUIO

Curatela e redazione: Luigi Magnini, Cinzia Bettineschi, Laura Burigana.

La pubblicazione di questo volume è stata generosamente finanziata dall'Università degli Studi di Padova.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

stempa

ARCA NA



Copertina: Paolo Kirschner.

Immagine di copertina: fronte, attrattore di Lorenz; retro, profilo di Armando De Guio su immagine satellitare multispettrale dell'area intorno al fortino Basson (Luserna, TN).

Composizione e impaginazione: Francesca Benetti per SAP Società Archeologica s.r.l.

2021, © SAP Società Archeologica s.r.l.

Strada Fienili 39a, 46020 Quingentole (Mn)

www.saplibri.it | www.archeologica.it | editoria@archeologica.it

ISBN 978-88-99547-52-3

LUIGI MAGNINI

AUTOMATIC RECOGNITION **DEL RECORD ARCHEOLOGICO DI SUPERFICIE: UNA PROPOSTA APERTA ALL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE E ALL'ARCHEOLOGIA STRATIGRAFICA**

Introduzione

Come molti studenti di archeologia iscritti all'Ateneo paventino, conobbi Armando (allora il professor De Guio) al primo anno di Università durante il suo corso di Metodologie della Ricerca Archeologica, ma il ricordo più vivido di quel primo approccio allo studio delle sue linee di ricerca fu durante la preparazione all'esame, quando mi imbattei nell'articolo «Archeologia della complessità e *pattern recognition* di superficie». Un articolo denso e ricco di spunti di riflessione innovativi che però a uno studente fresco di diploma di maturità risultava piuttosto ostico e a tratti anche poco intellegibile. La «sintesi forzosamente dispnoica» e le «mirate strategie di "*pattern/object recognition*"» (De Guio 1996) richiedevano più di uno sforzo di concentrazione, letture multiple e, talvolta, invocazioni ritualistiche della più spinta archeologia cognitiva di matrice veneto-anglosassone, prima di venire assimilate anche solo a livello terminologico. Nel rileggere dopo molto tempo questo contributo e il seminale «Archeologia stratigrafica come topica del corrente dibattito teorico-metodologico e tecnologico in archeologia: una proposta aperta alla "intelligenza artificiale" (I.A.)... e naturale» (De Guio 1988a), alla luce di un percorso accademico ormai consolidato ironicamente nell'ambito dell'*object/pattern/scenery recognition*, risulta particolarmente interessante notare come a oltre trent'anni dalla prima proposta di De Guio dell'applicazione dell'Intelligenza Artificiale (I.A.) in archeologia (De Guio 1988a), gran parte delle sue idee abbiano trovato applicazione effettiva solamente negli ultimi vent'anni e molte altre intuizioni stiano venendo assimilate dalla comunità scientifica ancor più recentemente.

In questo contributo intendo presentare alcune considerazioni teorico-metodologiche sull'applicazione dell'intelligenza artificiale nel riconoscimento (semi)auto-

matico delle tracce archeologiche telerilevate attraverso tecniche di *object/pattern/scenery recognition*, anche nell'ambito più generale dell'archeologia di superficie, a partire dalle intuizioni e dalle proposte presentate da De Guio tra la metà degli anni '80 e l'inizio degli anni '90. L'evoluzione della disciplina si è infatti allontanata dall'accezione stratigrafica originariamente proposta (De Guio 1988a) per abbracciare, in un primo momento, lo studio della complessità culturale, che mantiene tuttora una chiara accezione come paradigma analitico per la modellazione computazionale in archeologia attraverso un approccio teorico ben delineato e formalizzato (es. Ramazzotti 2020). Negli ultimi vent'anni, si è però anche sviluppato un filone, fortemente applicativo, dell'I.A. per il riconoscimento, la classificazione e la visualizzazione delle "anomalie" topologiche a partire da dati acquisiti da *near* e *remote sensing* (Traviglia, Cowley, Lambers 2016). A fronte, però, di un comparto tecnico ormai maturo, è venuta parzialmente a mancare, in questo ambito applicativo, quella componente teorica fondamentale per l'affermazione, anche sul piano strettamente archeologico, del filone di ricerca e quella *expertise* pratico-operativa, da *old timer* di flanneriana memoria (Flannery 1982), indispensabile per comprendere le dinamiche formative delle "superfici di complessità" (De Guio 1996).

Ambiente di sviluppo (dis)integrato

L'ambiente di sviluppo principale delle applicazioni di *object/pattern/scenery recognition* e di *Machine Learning* in archeologia è quello del *Remote Sensing*, con un'accezione non esclusiva di *Landscape Archaeology* o di Archeologia Aerea, ma allargata nel suo spettro applicativo a tutte le tecniche di *imaging*, includendo quindi diverse scale, da quella territoriale a quella microscopica (Ma-

gnini, Bettineschi 2019; Fiorucci *et al.* 2020). L'introduzione di nuove metodologie di indagine *computer-aided* prende avvio dalla necessità di ottimizzare e sveltire le procedure di analisi dei dati telerilevati, che nell'ultimo decennio hanno avuto un incremento quantitativo e qualitativo notevole (Bennett, Cowley, De Laet 2014). Infatti, la sempre maggiore disponibilità di nuove tipologie di *dataset*, anche molto onerosi da processare (esemplificativi sono i dati multi, e soprattutto, iperspettrali: cfr. Doneus *et al.* 2014), non solo da aeromobile (Cowley 2015; Devereux *et al.* 2005), ma anche da satellite (Lasaponara, Masini 2012; Tapete, Cigna 2017) e da drone (Campana 2017; Waagen 2019), ha portato a una crescente necessità di trovare metodi alternativi e meno dispendiosi dal punto di vista energetico ed economico per analizzare le immagini (Casana 2020). Inoltre, la possibilità di oggettivizzare le normali pratiche di fotointerpretazione attraverso regole, algoritmi, stringhe di comando e, più in generale, procedure informatiche consente di minimizzare gli errori casuali derivati dalla soggettività del singolo operatore (Bennet, Cowley, De Laet 2014). Se nell'ambito dello studio dei paesaggi archeologici ormai, almeno a livello concettuale, questa "rivoluzione" è stata in buona parte assimilata, se non accettata, nello studio della cultura materiale e dell'archeometria devono ancora diffondersi metodologie che aiutino a rinnovare il processo analitico-interpretativo (Magnini, Bettineschi 2019).

In anni recenti c'è stato un incremento vistoso della produzione scientifica di casi studio e applicazioni di procedure più o meno automatiche indirizzate al riconoscimento di tracce archeologiche, per lo più legate al telerilevamento dei paesaggi (Lambers, Traviglia 2016; Traviglia, Torsello 2017; Davis 2018; Magnini, Bettineschi 2019; Davis 2021). Questi approcci, decisi ad affermarsi rompendo parzialmente gli schemi con il passato, si sono concentrati principalmente sul dimostrare la propria utilità e il proprio grado di accuratezza nel confronto diretto con le metodologie di fotointerpretazione tradizionali. A partire, infatti, dai primi esempi applicativi, sono state mosse numerose critiche sul reale beneficio apportato dalle procedure (semi)automatiche di riconoscimento di elementi archeologici del paesaggio (Hanson 2008, 2010; Parcak 2009; Palmer, Cowley 2010; Casana 2014). Molti dubbi riguardavano sia le capacità tecniche delle metodologie allora in uso, sia, più concretamente, gli aspetti interpretativi delle tracce archeologiche di superficie (Traviglia, Cowley, Lambers 2016). Lo "scontro" si è svolto su aree di studio sempre più grandi e con *dataset* sempre più complessi, utilizzando tecniche di indagine che guardavano alle

scienze dure con sempre maggiore attenzione per trovare una legittimazione quantitativa a cui le materie umanistiche non sempre possono aspirare. Lo sforzo tecnologico e applicativo portato avanti da una, inizialmente limitata, ma agguerrita frangia di archeologi e informatici prestati ai beni culturali ha condotto all'affermazione delle metodologie di riconoscimento (semi)automatico nello studio dei paesaggi archeologici, attraverso un costante e continuo miglioramento dell'accuratezza dei risultati ottenuti. Questo importante balzo tecnologico, mutuato tra le altre da discipline come le scienze mediche e quelle informatiche e dettato da necessità operative, si è spesso concentrato principalmente sugli aspetti metodologici della problematica, tralasciando la finalità (o meglio, la domanda) archeologica alla base dell'indagine.

Pur potendo imparare dagli "errori" dei padri (e il prezioso contributo del dibattito tra *New Archaeology* e archeologia post-processualista in quest'ottica risulta tutt'altro che concluso o obsoleto: cfr. Renfrew 1982; Moore, Keene 1983; Hodder 1985; De Guio 1989), la scarsa capacità delle nuove generazioni di archeologi di cogliere e di mettere al centro dell'indagine la problematica archeologica, ha riportato in auge e aggravato una storica dicotomia all'interno del dibattito scientifico contemporaneo. Si sono, quindi, ripresi a battere nuovi "martelli" (modelli analitici), tecnologicamente più aggiornati, ma contraddistinti dallo stesso spirito di onnipotenza che aveva pervaso i primi esponenti della *New Archaeology* (Moore, Keane 1983). Assistiamo dunque a un ritorno, nello specifico settore di applicazione, della "tirannia del metodo" a discapito della teoria, avvallato da una rinnovata fede nelle tecnologie più avanzate, spesso mutate da altre discipline (De Guio 1992).

Tra i numerosi benefici dell'applicazione in archeologia di sempre più raffinate metodologie informatiche su basi numerico-statistiche, viene spesso citata la necessità dell'oggettivizzazione dei risultati. Procedure e risultati, se adeguatamente condivisi, possono sicuramente portare a una maggiore comparabilità tra i numerosi casi di studio presenti in letteratura e a un più ragionato dibattito sull'efficacia delle diverse metodologie (Magnini, Bettineschi 2019). D'altra parte però è necessario non scivolare nella "trappola" della generalizzazione dei risultati che già in passato era stata al centro della discussione tra la *New Archaeology* e la successiva archeologia post-processualista (Shanks, Tilley 1987). Se già con il passaggio da una "nuova archeologia" di matrice processuale a un post-processualismo che, nella sua accezione più estremista vedeva pressoché negata la possibilità di formulare ipotesi ricostruttive oggettive sui

sistemi socioculturali del passato (Shanks, Hodder 1995), oggi si assiste, grazie anche a un rinnovato approccio quasi tecnocratico della disciplina, alla formulazione di approcci metodologici il cui scopo è quello di porsi, se non come “migliore”, quantomeno come “più accurato”, “più oggettivo” o “più duttile sui diversi contesti”, ma in cui manca completamente o è relegato a orpello marginale il focus storico-archeologico dell'indagine (Davis 2021).

La parte più tradizionalista dell'archeologia, infatti, frequentemente guarda con sospetto alle innovazioni tecnologico-metodologiche introdotte (Thomas 2008). La critica viene anche mossa per una evidente difficoltà comunicativa tra la componente puramente archeologica della ricerca rispetto a quella informatica, dove quest'ultima, troppo di frequente, prende il sopravvento, portando a un'applicazione acritica di metodologie utilizzate con successo in specifici contesti, ma che non sempre risultano soddisfacenti per aree differenti o che non apportano grosse novità in termini di ricostruzioni storiche. Spesso questi approcci, talvolta anche a ragione, vengono visti come meri esercizi di stile, poco utili per garantire un afflusso costante di nuove informazioni alla disciplina o per rileggere e reinterpretare criticamente ipotesi già affermate (Casana 2020). In quest'ottica di sospetto, però, si rischia di imbattersi in una stagnazione teorico-metodologica che guarda esclusivamente a ripetere ossessivamente gli stessi schemi interpretativi arrestando un'evoluzione ormai già parzialmente avviata.

D'altro canto, il “conflitto” si consuma internamente alla frangia piuttosto diffusa degli archeologi *high-tech*, più interessati a dimostrare che la metodologia da loro sviluppata o impiegata è la “migliore”, almeno in uno specifico campo di indagine. Questo ha portato a un proliferare di pubblicazioni su differenti e, sempre più complesse, tecniche analitiche che, seppur supportate da interessanti e utili casi di studio e da un *rating* di affidabilità sempre maggiore (con il supporto delle immancabili statistiche e percentuali), non trovano necessariamente un'applicazione diffusa nel lungo termine (Palmer 2020; Davis 2021). Un utilizzo, quindi, di tecnologia *usa e getta* che diventa obsoleta ancor prima di affermarsi e trovare diffusione. Questo consumismo scientifico, specchio di un ambiente accademico che spesso “consuma” idee e intuizioni in una spietata “lotta tra poveri” dove occorre essere sempre il “migliore” (non per forza nella propria disciplina) per emergere, aprire numerose nuove prospettive metodologiche che poi non vengono adeguatamente sviluppate. Infatti, a un rapido sviluppo *high-tech* non corrisponde un altrettanto adeguato ragiona-

mento critico per la formulazione della relativa *high-theory*. L'iperspecializzazione di una recente categoria di archeologi, che per semplicità chiamerò ironicamente archeologi da tastiera, slegati dalla verità-terreno e che vedono nell'I.A. e nelle procedure informatiche un *Deus ex machina* per la risoluzione delle problematiche di riconoscimento e interpretazione delle evidenze archeologiche di superficie, ha ulteriormente accentuato questo *gap* tra applicativi tecnologici molto avanzati e un approccio teorico ancora acerbo e poco legato a quella componente esperienziale terrena tipica dell'archeologia (Millican 2012).

Il dibattito intorno al *gap* tra metodi informatici quantitativi applicati allo studio dei paesaggi archeologici e approcci qualitativi legati all'esperienza sul campo si è sviluppato ben prima della diffusione degli automatismi in ambito archeologico. Sebbene siano stati mossi alcuni passi per superare la dicotomia tra approcci quantitativi e qualitativo-fenomenologici (Hamilton *et al.* 2006; Gilling 2009; Millican 2012), la distanza rimane ancora marcata, con la frangia degli archeologi esperienziali che ritengono di dover mantenere ben separati i due ambiti di indagine (Thomas 2004, 2008; Tilley 2004) e gli archeologi da tastiera che non vedono nell'esperienza sul campo e nello sviluppo teorico una strada percorribile per l'evoluzione della disciplina.

Questa divisione si manifesta anche nella verifica dei risultati archeologici delle applicazioni di riconoscimento automatico. Se si osservano con attenzione i numerosi casi di studio presenti in letteratura si noterà come solo una minima parte di questi utilizza una verifica diretta sul campo come metodologia di validazione dei risultati ottenuti (Magnini, Bettineschi, De Guio 2017; Inomata *et al.* 2017), mentre gran parte delle pubblicazioni si affidano a procedure matematico-statistiche (Caspari, Crespo 2019; Verschoof-van der Vaart, Lambers 2019; Dolejš *et al.* 2020) o alla validazione incrociata manuale con altri dati da remoto (Figorito, Tarantino 2014; Magnini, Bettineschi 2021; Trier, Reksten, Løseth 2021).

La necessità di sviluppare un quadro teorico condiviso o, quantomeno, un dibattito aperto che unisca le dinamiche proprie della realtà archeologica, le molteplici metodologie di rilevamento (semi)automatico e i numerosi casi di studio presenti in letteratura è ormai palese. In anni recenti sono stati, infatti, presentati alcuni contributi che tentano di superare questa immobilità teorica fornendo interessanti spunti di riflessione (Magnini, Bettineschi 2019; Numiger *et al.* 2020a, 2020b; Davis 2021) che, se adeguatamente dibattuti e integrati, potranno auspicabilmente portare a una prima formalizzazione teorica condivisa.

Bentornati in Matrix...

Il ritorno al *Matrix*, inteso nell'accezione più generale di Archeologia Stratigrafica (De Guio 1988a), sembra entrare potenzialmente in contrasto con le applicazioni dell'I.A. che, nell'intendere comune, lasciano poco spazio all'interpretazione umana, e nelle quali l'utente-archeologo viene cannibalizzato professionalmente dalla macchina senziente, come avveniva – in modo letterale – nel celebre film dei fratelli/ sorelle Wachowski. L'attuale realtà dei fatti, al di là di facili entusiasmi e forti dichiarazioni di intenti (e di risultati), per una buona riuscita dell'applicazione dell'I.A. in archeologia (sia nella modellazione delle dinamiche della complessità culturale, sia nel riconoscimento (semi)automatico delle tracce da telerilevamento), deve giocoforza mettere ancora al centro del processo di analisi la figura dell'archeologo nelle sue molteplici sfaccettature. Tale figura deve, infatti, trovare ampio spazio sia nella fase di addestramento della componente informatica intelligente, sia nel fondamentale passaggio interpretativo e, infine, nella fase di verifica dei risultati, meglio se effettuata sul campo.

L'analisi stratigrafica e lo studio dei processi formativi del record archeologico vengono ormai ben integrati nelle ricerche sul campo, almeno in ambito accademico, mentre questi aspetti sono ancora tutt'altro che pienamente acquisiti dall'archeologia di superficie (De Guio 1988a) e, soprattutto, dal telerilevamento archeologico (Millican 2012). L'introduzione delle procedure automatiche di *object/pattern/scenery recognition* ha solo reso più evidente questa discrasia, che si combina a una recente stagnazione teorica nell'ambito del telerilevamento archeologico, ancorato ancora troppo frequentemente al rapporto semplicistico e spesso biunivoco tra struttura e fossato. La prima, costituita da materiale drenante, avrà come esito un *crop mark* negativo, mentre il secondo darà origine a un *crop mark* positivo, stanti le variazioni in merito alla stagionalità e alle condizioni climatiche del periodo di acquisizione del dato. Il discorso può inoltre essere esteso anche alle altre tracce di superficie note in letteratura come i *soil marks* e, con un'accezione morfologica, gli *shadow marks* come ampiamente discusso da vari autori (solo per citare alcuni lavori, si vedano: Jones, Evans 1975; Piccarreta 1987; Wilson 2000; Musson, Palmer, Campana 2005; Cowley 2015). Risulta quindi fondamentale introdurre anche nella lettura delle tracce di superficie una "grammatica trasformativa" che superi

l'isomorfismo delle facili corrispondenze biunivoche (De Guio 1988a), per allargare i propri orizzonti a una complessità morfogenetica in cui la traccia di superficie non è il risultato finale di un processo formativo multistadiale e dinamico, ma è solo la porzione di informazione che raggiunge la superficie in un determinato momento di questo complesso processo. Infatti, le evidenze visibili dal dato telerilevato non possono essere altro che un esito derivato non solo da particolari e puntuali condizioni ambientali e climatiche (Cowley 2015), ma anche da un più lungo processo di formazione che ne ha determinato specifiche caratteristiche in uno specifico momento. È quindi necessario comprendere sia le condizioni ottimali di acquisizione¹, sia – a maggior ragione – i processi generativi e trasformativi che possono aver interessato quella specifica traccia. I concetti di multifinalità ed equifinalità delle tracce archeologiche di superficie (abbondantemente discussi in Magnini, Bettineschi 2019) svolgono un ruolo fondamentale e devono costituire parte integrante di qualsiasi processo di fotointerpretazione archeologica, sia automatica che manuale. Escludere la possibilità che una specifica tipologia di evidenza antropica possa evolvere in maniera differente nel tempo a seconda dell'intervento di agenti diversi è ormai un concetto superato (come hanno chiaramente dimostrato i lavori, es. di Schiffer 1972; Leonardi 1982; Butzer 1982; Schiffer 1987; De Guio 1988b; Harris 1989; Leonardi 2018). Lo step successivo è quello di approcciarsi allo stesso modo alle tracce archeologiche di superficie. Introducendo, però, questi concetti in una procedura (semi)automatica si andrà a immettere nel sistema anche una buona dose di entropia, riducendo, in gran parte dei casi, il *rating* positivo dei risultati.

Il sistema classificatorio introdotto da Clarke nel suo seminale *Analytical Archaeology* (1968) risulta particolarmente adatto anche per una preliminare classificazione teorica delle tracce di superficie, fermo restando quanto affermato finora sulla variabilità di queste ultime. Infatti, maggiore è la variabilità delle tracce riconosciute per una stessa tipologia di oggetto archeologico, maggiore sarà il grado di sofisticazione da introdurre per la sua classificazione. Aumentando, però, il grado di sofisticazione e la complessità della classificazione, il grado di generalizzazione, e quindi, la riapplicabilità su terra incognita dell'analisi verrà contestualmente ridotto (processo di "overfitting"). Tale eventualità non deve scoraggiare dall'applicazione sistematica di queste metodologie, che

¹ Le condizioni di acquisizione dipendono da fattori geografici, ambientali, climatici e temporali (stagionalità, orario, ecc.) specifici a seconda delle caratteristiche del sensore impiegato per l'acquisizione.

hanno dimostrato essere la nuova frontiera della teleosservazione. In quest'ottica, però, l'apprendimento da parte dell'I.A. dovrà prendere in considerazione un numero di variabili molto più elevato. L'introduzione, in anni recenti, di modelli analitici che simulano i processi neurali biologici ha permesso di ampliare considerevolmente le capacità computazionali dell'I.A. (Deravignone, Macchi Janica 2006), anche se l'utilizzo di *hidden layers* non permette la condivisione esplicita dei modelli semantici utilizzati (Ramazzotti 2014; Caspari, Crespo 2019; Verschoof-van der Vaart, Lambers 2019; Ghorbanzadeh *et al.* 2021).

L'unicità e l'incompletezza dei contesti archeologici, associate ai concetti di multifinalità e, soprattutto, di equifinalità limitano, in parte, le enormi potenzialità delle tecniche di *Machine Learning*. Ad esempio le *Artificial Neural Network*, pur utilizzando un sistema di I.A. di tipo neurale e adattivo (Deravignone, Macchi Janica 2006), basano il loro apprendimento essenzialmente su un numero molto elevato di esempi-campione (Verschoof-van der Vaart, Lambers 2019; Ghorbanzadeh *et al.* 2021). In questi casi il duplice rischio è quello, da un lato, di non avere un numero sufficiente di campioni per le differenti tipologie di tracce risultanti dai processi (tras)formativi su una medesima classe di oggetti archeologici, e dall'altro, di includere in una stessa analisi campioni con un livello di variabilità talmente elevato da compromettere l'accuratezza del risultato finale, introducendo un tasso molto significativo di errori di commissione. L'alternativa, che fin troppo spesso viene utilizzata, è quella di inserire come *samples* solo quelle tracce che soddisfano le caratteristiche canoniche del modello semantico dell'operatore che istruisce l'I.A. La problematica, qui, non risiede però nell'inadeguatezza tecnico-metodologica delle Intelligenze Artificiali, ma nelle difficoltà che si riscontrano durante il processo di *training*. Sebbene le *Artificial Neural Network* e la logica *fuzzy* mettano in campo un processo di analisi sulla carta sufficientemente sofisticato per l'identificazione automatica del record archeologico di superficie, manca una condivisione teorica e metodologico-operazionale che integri le procedure informatiche sui dati telerilevati con i dati raccolti attraverso lo scavo e le ricognizioni di superficie. L'anello debole, attualmente, non risiede più in un comparto tecnico inadeguato, ma in un comparto teorico-metodologico troppo spesso ignorato a favore dell'innovazione tecnologica *tout court*.

L'introduzione degli automatismi nel telerilevamento archeologico a livello operativo (e non solo teorico) ha portato alla ribalta una problematica centrale per il *remote sensing* archeologico, ovvero quella di trovare un territorio comune tra le capacità cognitive informatiche e i modelli semantici degli archeologi. Scindere i concetti di riconoscimento (*recognition*) e di (foto)interpretazione, destrutturando i processi subconsci di osservazione, identificazione, classificazione e interpretazione delle tracce, potrebbe, in questo senso, riportare un certo ordine formale nell'applicazione metodologica (Bennet, Cowley, De Laet 2014). Quello che viene definito con il termine generico di "sito"², non corrisponde nella realtà dei fatti a ciò che viene identificato durante l'analisi archeologica dei dati telerilevati (Dunnell 1992; McCoy 2020; Davis 2021). Il riconoscimento avviene, infatti, attraverso i cosiddetti mediatori di superficie, ovvero evidenze superficiali di diversa origine e con caratteristiche variabili a seconda del sensore utilizzato in fase di acquisizione, dell'ambiente, della stagionalità, del clima nonché dei processi morfogenetici intercorsi; sono proprio i mediatori di superficie che, se debitamente interpretati, possono portare all'identificazione di un "sito". Già Traviglia e colleghi nel 2016 (pp. 12-13) avevano evidenziato come gli aspetti di riconoscimento e identificazione delle tracce fossero gli unici a poter essere "automatizzati", lasciando ad appannaggio esclusivo dell'archeologo tutti gli aspetti legati all'interpretazione in chiave storico-archeologica dei risultati della ricerca. Infatti, il passaggio mentale tra il riconoscimento di una traccia e la sua interpretazione archeologica può essere molto rapido, quasi istintivo, per un archeologo esperto di *remote sensing* (Cowley 2015), mentre risulta un procedimento più complesso e insidioso per un neofita della disciplina (o nel caso di contesti ambientali nei quali anche l'operatore più navigato non ha una estesa esperienza).

Nostro compito è quindi quello di insegnare alla macchina come faremmo con un neofita con grandi capacità analitiche quantitative, ma alla prima esperienza archeologica. La conoscenza che la macchina acquisisce nel corso della procedura di apprendimento deriva da *samples* o da *rule sets* che l'operatore fornisce sulla base del proprio bagaglio di conoscenze (modello semantico), non solo informatiche, ma soprattutto archeologiche. I sistemi informatici estraggono quindi oggetti ed elaborano processi coerentemente con i dati di *input* forniti, stante un grado variabile di sofisticazione a seconda

² In quest'ottica comprensivo delle categorizzazioni di *site*, *near-site* e *off-site*.

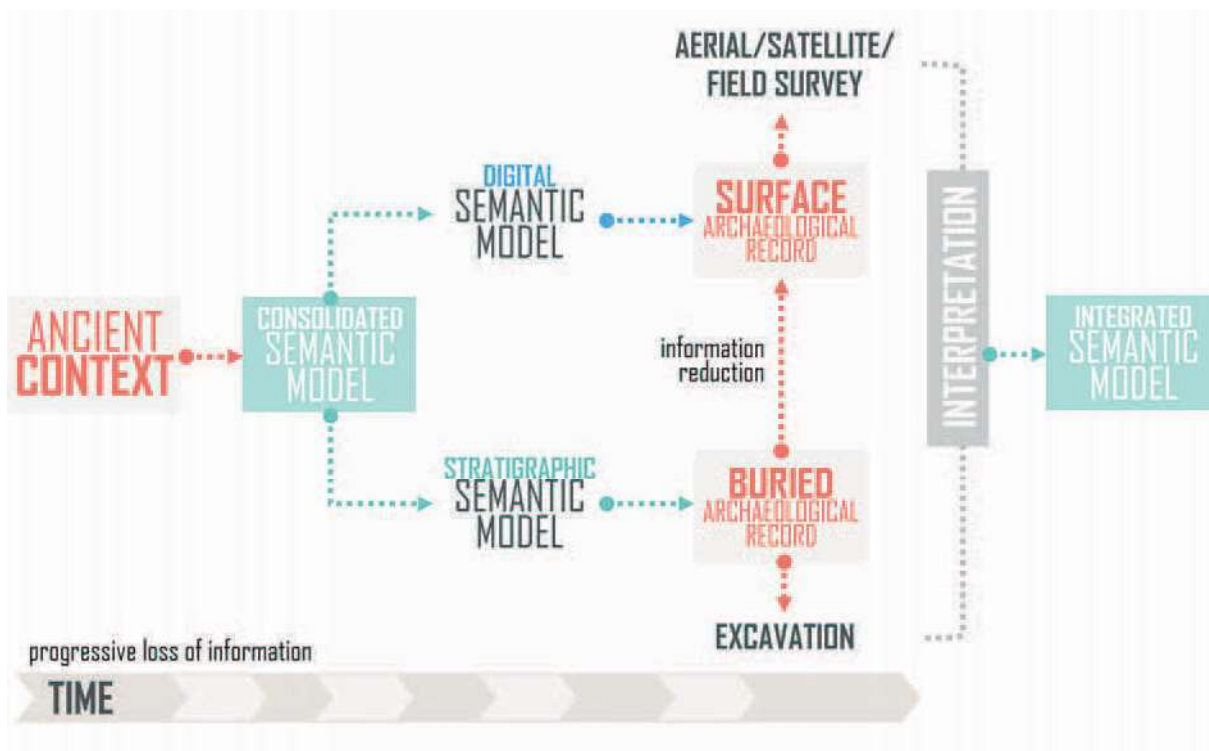


Fig. 1. Rappresentazione grafica del rapporto tra il contesto archeologico (antico, sepolto e di superficie) e i relativi modelli semantici.

della metodologia impiegata, e risultano pertanto privi di *bias* casuali tipici dell'approccio umano (Bennet, Cowley, De Laet 2014; Davis 2019). L'esperienza acquisita dal sistema, però, non deve prescindere dalle dinamiche di formazione delle tracce, che si riflettono nella varietà stessa del loro aspetto. L'eventualità che oggetti archeologici appartenenti alla medesima classe presentino in superficie caratteristiche estremamente diversificate (e talora anche opposte) è tutt'altro che irrealizzabile. Questo discostamento, anche drastico, tra il modello semantico dell'operatore e l'esito odierno dei processi morfogenetici, può venire in parte attenuato, anche se non superato, grazie a un attento ed esplicito utilizzo degli operatori logici che consenta la creazione di modelli semantici diacronici.

Infine, bisogna sottolineare che il ruolo dell'archeologo e le sue *expertise*, non solo nell'ambito del telerilevamento, ma anche dei processi formativi, non vengono affatto sostituiti o sminuiti dagli approcci automatici, ma rivestono un ruolo fondamentale in tutte le fasi del processo, a partire da quella di addestramento del sistema fino alle successive e fondamentali fasi di interpretazione e validazione dei risultati. Solo la presenza di una figura che possa discriminare, verificare ed eventualmente rivedere i risultati, anche alla luce della "verità-terreno", potrà rendere davvero performante questo

approccio alla ricerca, apportando un contributo sia dal punto di vista metodologico che nella ricostruzione dei processi storico-archeologici sottesi. Le possibilità offerte da un'implementazione sistematica dell'I.A. nell'analisi dei dati telerilevati appaiono ormai chiare e offrono ancora abbondante libertà di manovra, sia agli archeologi da campo che a quelli da tastiera. Compito dei primi – sicuramente non semplice – sarà di verificare ed eventualmente implementare, la mole di risultati che le svariate applicazioni automatiche producono con cadenza ormai rapida e regolare; per i secondi, invece, si apre una nuova stagione di impegno nella formalizzazione di procedure esplicite che prendano in considerazione gli aspetti peculiari della realtà archeologica. L'augurio finale, però, è che si possa superare velocemente la dicotomia di questi ruoli iperspecializzati, per evitare di fare nuovamente i conti con "una parabola per l'archeologia" su modello di quanto originariamente proposto da Flannery (1982), ma aggiornata al terzo millennio.

In conclusione, quello che appare ormai necessario per un'evoluzione programmatica dell'I.A. in archeologia, è superare la soggettività e la scarsa comparabilità dei risultati attraverso l'individuazione di un linguaggio comune tra uomo (archeologo) e macchina per la creazione di modelli semantici diacronici. A partire dal-

l'esperienza di scavo, che ha una storia differente e, per certi versi, più lunga del telerilevamento, occorre creare delle linee guida che consentano di mettere in relazione i numerosi stadi dell'evoluzione processuale del record archeologico con le tracce di superficie. Questo approccio non deve prendere in considerazione solo l'evoluzione più diretta del record archeologico ma, partendo da questa, valutare quante più variabili e varianti possibili attraverso un approccio politetico. L'applicazione

delle I.A. nel telerilevamento archeologico non dovrà, quindi, a parere di chi scrive, focalizzarsi in via preferenziale al riconoscimento globale degli oggetti archeologici visibili da remoto ma, alla luce dei numerosi fattori di incertezza che regolano la formazione del record archeologico di superficie, rendere imparziale e sempre più oggettiva l'identificazione delle tracce residuali visibili, sfruttando al meglio le potenzialità diagnostiche dei diversi sensori.

ABSTRACT

L'Intelligenza Artificiale (I.A.) è attualmente uno dei domini di maggiore interesse per l'archeologia spaziale e il telerilevamento archeologico. A partire dalle precoci intuizioni di Armando De Guio, questo contributo intende offrire uno sguardo teorico-metodologico "archaeology-oriented" degli aspetti più significativi del riconoscimento automatico delle tracce archeologiche. L'approccio proposto pone l'accento sulla stretta relazione tra le dinamiche di formazione e trasformazione del record archeologico e le tracce residuali visibili in superficie. Questo rapporto, infatti, risulta fondamentale nella fase di addestramento di un'Intelligenza Artificiale funzionale al riconoscimento automatico di queste evidenze.

Artificial Intelligence (AI) is currently one of the domains of greatest interest in spatial archaeology and archaeological remote sensing. Starting from the early insights of Armando De Guio, this contribution will offer an archaeology-oriented, theoretical and methodological view on the most significant characteristics of automatic recognition of archaeological traces. The proposed approach emphasizes the close relationship between the dynamics of formation and transformation of the archaeological record and the residual traces visible on the surface. This relationship is, in fact, fundamental in the training phase of an Artificial Intelligence for the automatic recognition of these evidences.

KEYWORDS

Intelligenza Artificiale, riconoscimento automatico, processi formativi, archeologia stratigrafica, telerilevamento.

Artificial Intelligence, automatic recognition, formation processes, stratigraphic archaeology, remote sensing.

BIBLIOGRAFIA

- R. BENNETT, D. COWLEY, V. DE LAET 2014, *The data explosion: tackling the taboo of automatic feature recognition in airborne survey data*, "Antiquity", 88, pp. 896-905.
- K.W. BUTZER 1982, *Archaeology as human ecology*, Cambridge.
- S. CAMPANA 2017, *Drones in Archaeology. State-of-the-art and Future Perspectives*, "Archaeological Prospection", 24, pp. 275-296.
- J. CASANA 2014, *Regional-Scale Archaeological Remote Sensing in the Age of Big Data. Automated Site Discovery vs. Brute Force Methods*, "Advances in Archaeological Practice: A Journal of the Society for American Archaeology", 2 (3), pp. 222-233.
- J. CASANA 2020, *New technology and archaeological practice. Improving the primary archaeological recording process in excavation by means of UAS photogrammetry*, "Journal of Field Archaeology", 45 (1), pp. 89-100.
- G. CASPARI, P. CRESPO 2019, *Convolutional neural networks for archaeological site detection – Finding "princely" tombs*, "Journal of Archaeological Science", 110, 104998.
- D.L. CLARKE 1968, *Analytical Archaeology*, Methuen.
- D. COWLEY 2015, *Aerial photographs and aerial reconnaissance for landscape studies*, in A. CHAVARRIA ARNAU, A. REYNOLDS (eds.), *Detecting and Understanding Historic Landscapes*, Mantova, pp. 17-46.
- D. DAVIS 2018, *Object-based image analysis: a review of developments and future directions of automated feature detection in landscape archaeology*, "Archaeological Prospection", 26 (2), pp. 155-163.
- D. DAVIS 2021, *Theoretical Repositioning of Automated Remote Sensing Archaeology: Shifting from Features to Ephemeral Landscapes*, "Journal of Computer Applications in Archaeology", 4 (1), pp. 94-109.
- A. DE GUIO 1988a, *Archeologia stratigrafica come topica del corrente dibattito teoretico-metodologico e tecnologico in archeologia: una proposta aperta alla "intelligenza artificiale" (I.A.) e naturale*, "Archeologia Stratigrafica dell'Italia Settentrionale", 1, pp. 219-226.
- A. DE GUIO 1988b, *Unità archeostratigrafiche come unità operazionali: verso le archeologie possibili degli anni '90*, "Archeologia Stratigrafica dell'Italia Settentrionale", 1, pp. 9-22.
- A. DE GUIO 1989, *Costruzione di modelli e archeologia "postprocessuale": un percorso critico*, in *Dottrina e Metodologia della Ricerca Preistorica*, Atti della XXVII Riunione Scientifica dell'IIPP, Ferrara, pp. 301-313.
- A. DE GUIO 1992, *"Archeologia della complessità" e calcolatori: un percorso di sopravvivenza fra teorie del caos, "attrattori strani", frattali e... frattaglie del postmoderno*, in M. BERNARDI (ed.), *Archeologia del paesaggio*, Firenze, pp. 305-389.
- A. DE GUIO 1996, *Archeologia della complessità e pattern recognition di superficie*, in E. MARAGNO (ed.), *La ricerca archeologica di superficie in area Padana*, Atti del Workshop (1 ottobre 1994, Villadose), Stanghella, pp. 275-317.
- L. DERAVIGNONE, G. MACCHI JANICA 2006, *Artificial Neural Networks in Archaeology*, "Archeologia e Calcolatori", 17, pp. 121-136.
- DEVEREUX et al. 2005 = B.J. DEVEREUX, G.S. AMABLE, P. CROW, A.D. CLIFF 2005, *The potential of airborne lidar for the detection of archaeological features under woodland canopies*, "Antiquity", 79, pp. 648-660.
- DOLEJŠ et al. 2020 = M. DOLEJŠ, J. PACINA, M. VESELÝ, D. BRÉTT 2020, *Aerial Bombing Crater Identification: Exploitation of Precise Digital Terrain Models*, "International Journal of Geo-Information", 9, 713.
- DONEUS et al. 2014 = M. DONEUS, G. VERHOEVEN, C. ATZBERGER, M. WESS, M. RUS 2014, *New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels*, "Journal of Archaeological Science", 52, pp. 84-96.
- R.C. DUNNELL 1992, *The Notion Site*, in J. ROSSIGNOL L. WANDSNIDER (eds.), *Space, Time, and Archaeological Landscapes*, Boston, pp. 21-41.
- B. FIGORITO, E. TARANTINO 2014, *Semi-automatic detection of linear archaeological traces from orthorectified aerial images*, "International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation", 26, pp. 458-463.
- FIORUCCI et al. 2020 = M. FIORUCCI, M. KHOROSHILTSEVA, M. PONTIL, A. TRAVIGLIA, A. DEL BUE, S. JAMES 2020, *Machine Learning for Cultural Heritage: A Survey*, "Pattern Recognition Letters", 133, pp. 102-108.
- K. FLANNERY 1982, *The Golden Marshalltown: A Parable for the Archaeology of the 1980s*, "American Anthropologist", 84, pp. 265-278.
- GHOORBANZADEH et al. 2021 = O. GHOORBANZADEH, S.R. MEENA, H. SHAHABI SORMAN ABADI, S. TAVAKKOLI PIRALILOU, L. ZHIYONG, T. BLASCHKE 2021, *Landslide Mapping Using Two Main Deep-Learning Convolution Neural Network Streams Combined by the Dempster-Shafer Model*, "IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing", 14, pp. 452-463.

- M. GILLINGS 2009, *Visual affordance, landscape, and the megaliths of Alderney*, "Oxford Journal of Archaeology", 28 (4), pp. 335-356.
- HAMILTON *et al.* 2006 = S. HAMILTON, R. WHITEHOUSE, K. BROWN, P. COMBES, E. HERRING, M. SEAGER-THOMAS 2006, *Phenomenology in practice: towards a methodology for a "subjective" approach*, "European Journal of Archaeology", 9 (1), pp. 31-71.
- W.S. HANSON 2008, *The future of aerial archaeology (or are algorithms the answer?)*, in R. LASAPONARA, N. MASINI (eds.), *Proceedings of the 1st International EAR-SeL Workshop on Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management* (Roma, 30 settembre - 4 ottobre 2008), Roma, pp. 47-50.
- W.S. HANSON 2010, *The future of aerial archaeology in Europe*, "Photo Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing", 46 (1), pp. 3-11.
- E.C. HARRIS 1989, *Principles of Archaeological Stratigraphy*, London-New York.
- I. HODDER 1985, *Postprocessual Archaeology*, in M.B. SCHIFFER (ed.), *Advances in Archaeological Theory and Method*, 8, New York, pp. 1-26.
- INOMATA *et al.* 2017 = T. INOMATA, F. PINZÓN, J.L. RANCHOS, T. HARAGUCHI, H. NASU, J.C. FERNANDEZ-DIAZ, K. AOYAMA, H. YONENOBU 2017, *Archaeological application of airborne LiDAR with object-based vegetation classification and visualization techniques at the lowland Maya site of ceibal, Guatemala*, "Remote Sensing", 9, 563.
- R.J.A. JONES, R. EVANS 1975, *Soil and crop marks in the recognition of archaeological sites by air photography*, in D.R. WILSON (ed.), *Aerial reconnaissance for archaeology*, CBA research report, London, pp. 1-11.
- K. LAMBERS, A. TRAVIGLIA 2016, *Automated detection in remote sensing archaeology: A reading list*, "AARGnews", 53, pp. 25-29.
- R. LASAPONARA, N. MASINI 2012, *Satellite Remote Sensing. A new tool for archaeology*, Dordrecht - Heidelberg - London - New York.
- G. LEONARDI 1982, *Lo scavo Archeologico: appunti e immagini per un approccio alla stratificazione*, Padova.
- G. LEONARDI 2018, *In quei pochi centimetri di terra...*, in C. MONTANARI, M.A. GUIDO (eds.), G. MORENO, *Dal documento al terreno. Storia e archeologia dei sistemi agro-silvo-pastorali. Nuova edizione. Attualità di una proposta storica*, Genova, pp. 427-456.
- L. MAGNINI, C. BETTINESCHI 2021, *Object-Based Predictive Modeling (OBPM) for Archaeology: Finding Control Places in Mountainous Environments*, "Remote Sensing" 13, 1197.
- L. MAGNINI, C. BETTINESCHI 2019, *Theory and practice for and object-based approach in archaeological remote sensing*, "Journal of Archaeological Science", 107, pp. 10-22.
- L. MAGNINI, C. BETTINESCHI, A. DE GUIO 2017, *Object-based shell craters classification from LiDAR derived Sky-view factor*, "Archaeological Prospection", 24, pp. 211-223.
- M.D. MCCOY 2020, *The Site Problem: A Critical Review of the Site Concept in Archaeology in the Digital Age*, "Journal of Field Archaeology", 45 (1), pp. 18-26.
- K. MILLICAN 2012, *The Outside Inside: Combining Aerial Photographs, Cropmarks and Landscape Experience*, "Journal of Archaeological Method and Theory", 19 (4), pp. 548-563.
- J.A. MOORE, A.S. KEENE (eds.) 1983, *Archaeological Hammers and Theories*, New York.
- C. MUSSON, R. PALMER, S. CAMPANA 2005, *In volo nel passato. Aero-fotografia e cartografia archeologica*, Firenze.
- NUMIGER *et al.* 2020a = L. NUNINGER, R. OPITZ, P. VERHAGEN, T. LIBOUREL, C. LAPLAIGE, S. LETURCO, N.L. VOGUER, C. FRUCHART, Ž. KOKALJ, X. RODIER 2020, *Developing FAIR Ontological Pathways: Linking Evidence of Movement in Lidar to Models of Human Behaviour*, "Journal of Computer Applications in Archaeology", 3 (1), pp. 63-75.
- NUMIGER *et al.* 2020b = L. NUNINGER, P. VERHAGEN, T. LIBOUREL, R. OPITZ, X. RODIER, C. LAPLAIGE, C. FRUCHART, S. LETURCO, N. LEVOGUER 2020, *Linking Theories, Past Practices, and Archaeological Remains of Movement through Ontological Reasoning*, "Information", 11 (6), 338.
- R. PALMER 2020, *Computational approaches to archaeological site detection and monitoring: a brief review of a workshop held in Cambridge, 29 February 2020*, "AARGnews", 60, pp. 25-26.
- R. PALMER, D. COWLEY 2010, *Interpreting aerial images - developing best practice*, in M. FORTE, S. CAMPANA, C. LUIZZA (eds.), *Space, time, place. Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, Oxford, pp. 129-135.
- S.H. PARCAK 2009, *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, New York.
- F. PICCARRETA 1987, *Manuale di fotografia aerea: uso archeologico*, Roma.
- M. RAMAZZOTTI 2014, *Analytical Archaeology and Artificial Adaptive Systems Laboratory (LAA&AAS)*, "Archeologia e Calcolatori", Supplemento 6, pp. 85-112.
- M. RAMAZZOTTI 2020, *Modelling the past. Logics, semantics and applications of Neural Computing in archaeology*, "Archeologia e Calcolatori", 31 (2), pp. 169-180.
- C. RENFREW 1982, *Towards an Archaeology of Mind*, Cambridge.

- M.B. SCHIFFER 1972, *Archaeological context and systemic context*, "American Antiquity", 37 (2), pp. 156-165.
- M.B. SCHIFFER 1987, *Formation processes in the archaeological record*, Albuquerque.
- M. SHANKS, C. TILLEY 1987, *Re-constructing archaeology: Theory and practice*, Cambridge.
- M. SHANKS, I. HODDER 1995, *Processual, Postprocessual, and Interpretive archaeologies*, in I. HODDER, M. SHANKS, A. ALEXANDRI, V. BUCHLI, J. CARMAN, J. LAST, G. LUCAS (eds.), *Interpreting Archaeology. Finding meaning in the past*, London/ New York, pp. 12-41.
- D. TAPETE, F. CIGNA 2017, *Trends and perspectives of space-borne SAR remote sensing for archaeological landscape and cultural heritage applications*, "Journal of Archaeological Science: Report", 14, pp. 716-726.
- J. THOMAS 2004, *Archaeology and modernity*, London.
- J. THOMAS 2008, *Archaeology, landscape and dwelling*, in B. DAVID, J. THOMAS (eds.), *Handbook of Landscape archaeology*, Walnut Creek, pp. 300-306.
- C. TILLEY 2004, *The materiality of stone: explorations in landscape phenomenology*, Oxford.
- A. TRAVIGLIA, D. COWLEY, K. LAMBERS 2016, *Finding common ground: human and computer vision in archaeological prospection*, "AARGnews", 53, pp. 11-24.
- A. TRAVIGLIA, A. TORSSELLO 2017, *Landscape Pattern Detection in Archaeological Remote Sensing*, "Geosciences", 7, 128.
- Ø.D. TRIER, J.H. REKSTEN, K. LØSETH 2021, *Automated mapping of cultural heritage in Norway from airborne lidar data using faster R-CNN*, "International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation", 95, 102241.
- W.B. VERSCHOOF-VAN DER VAART, K. LAMBERS 2019, *Learning to Look at LiDAR: The Use of R-CNN in the Automated Detection of Archaeological Objects in LiDAR Data from the Netherlands*, "Journal of Computer Applications in Archaeology", 2 (1), pp. 31-40.
- J. WAAGEN 2019, *New technology and archaeological practice. Improving the primary archaeological recording process in excavation by means of UAS photogrammetry*, "Journal of Archaeological Science", 101, pp. 11-20.
- A.R. WILSON 2000, *Air photo interpretation for archaeologists*, Stroud.