

DAVIDE MASTROIANNI | GIUSEPPE GISOTTI

# INTRODUZIONE ALLA GEOARCHEOLOGIA PRINCIPI, METODI E TECNOLOGIE DI INDAGINE

# AREA TEMATICA “GEOARCHEOLOGIA”

La **SIGEA** per lo svolgimento delle finalità statutarie è organizzata in sezioni regionali, gruppi di lavoro e aree tematiche. Le aree tematiche hanno lo scopo di creare un confronto costruttivo e aggiornato tra i soci che hanno interessi in comune nell'ambito della geologia ambientale. I soci possono aderire a più aree tematiche e, nell'ambito delle stesse, proporre l'organizzazione di eventi (convegni, corsi, giornate di studio, pubblicazioni speciali, escursioni, ecc) o altri tipi di approfondimenti. Le aree tematiche hanno anche lo scopo di supportare le decisioni del Consiglio direttivo nazionale su specifici argomenti e di contribuire alla redazioni di documenti che possono essere sottoposti all'attenzione di altri associazioni, Enti e Istituzioni.

Attraverso le aree tematiche la SIGEA si propone di diffondere le buone pratiche di informazione, formazione e coinvolgimento dei propri soci, mettendo a disposizione di tutti le esperienze acquisite da gruppi di soci esperti in particolari campi della geologia ambientale.

**Area tematica Geoarcheologia.** In tempi relativamente recenti le discipline archeologia e geologia s.l. si sono avvicinate. Gli archeologi, sviluppando l'archeologia ambientale avevano bisogno di tutto quanto poteva fornire informazioni sugli ambienti fisici in cui si mossero e si svilupparono le società antiche; i geologi, dovendo datare certi fenomeni naturali e convinti che quello che è accaduto nel passato può avvenire nel futuro, avevano bisogno degli archeologi.

Come si può definire la Geoarcheologia? Un primo veloce tentativo potrebbe essere: il lavoro che fa il geologo quando opera nel campo dell'archeologia. Definizione quantomeno errata, perché induce a considerare questa disciplina come prettamente scientifica, mentre, essa deve essere ritenuta di unione fra i campi scientifici e quelli umanistici. Un'altra definizione, oggi abbastanza accettata (che esprime meglio l'idea di collegamento fra geologia e archeologia), è la seguente: ricerca archeologica che utilizza concetti e metodi delle Scienze della Terra.

Tra gli obiettivi dell'area tematica SIGEA c'è la volontà di offrire un contributo a una nuova pratica professionale soprattutto nel campo della Geoarcheologia urbana e della Geoarcheologia preventiva, pratiche delle quali la legislazione italiana è del tutto deficitaria. Inoltre nell'ambito dell'area tematica si creano strette collaborazioni fra Enti Universitari, Soprintendenze, Ordini professionali e Associazioni che perseguono i medesimi obiettivi nonché mediante l'organizzazione di convegni, corsi di formazione e esercitazioni sui temi della Geoarcheologia.

Per ulteriori informazioni consulta il sito **[www:sigeaweb.it](http://www.sigeaweb.it)**

*a Gioacchino Lena*

# Geologia dell'Ambiente

Supplemento

**4/2020**

ISSN 1591-5352

Periodico trimestrale della SIGEA  
Società Italiana di Geologia Ambientale



*Con il contributo del  
Ministero per i beni e le attività culturali e per il turismo*



Immagine di copertina:  
"Grotte rupestri di Pennapedimonte (CH)". Foto di Davide Mastroianni

DAVIDE MASTROIANNI | GIUSEPPE GISOTTI

# **INTRODUZIONE ALLA GEOARCHEOLOGIA PRINCIPI, METODI E TECNOLOGIE DI INDAGINE**



SOCIETÀ ITALIANA DI GEOLOGIA AMBIENTALE



# INDICE

7

Introduzione

**Definizioni. Rapporti fra Geologia e Archeologia**

## **PARTE PRIMA PRINCIPI**

11

**1. Il tempo e come misurarlo**

18

**2. La Sedimentologia**

24

**3. La Pedologia**

30

**4. La Micromorfologia**

34

**5. La Geomorfologia**

## **PARTE SECONDA METODI E TECNOLOGIE DI INDAGINE**

45

**1. Il GIS e le Analisi Spaziali per la Geoarcheologia**

55

**2. Tecniche di Remote Sensing per la Geoarcheologia**

65

**3. Tecniche di Laser Scanning per la Geoarcheologia**

73

**4. Le analisi geofisiche per la Geoarcheologia**

81

**GLOSSARIO**



## Introduzione

### Definizioni. Rapporti fra Geologia e Archeologia

Attraverso le metodologie delle Scienze della Terra, la Geoarcheologia fungeva da ponte nel rispondere ad alcuni quesiti che il solo scavo archeologico non riusciva a colmare, in contesti particolari, con l'obiettivo di comprendere appieno le relazioni tra Geologia e Archeologia. Quando si sente parlare di Geoarcheologia, la prima accezione che salta alla mente è la sua vicinanza alle Scienze della Terra, piuttosto che alla Geologia; questo accade per il semplice motivo che la Geoarcheologia abbraccia più discipline scientifiche quali, per citarne alcune, la *Stratigrafia*, la *Micromorfologia*, la *Pedologia*, la *Geomorfologia*, la *Cartografia*, la *Chimica*, l'*Agronomia* e l'*Archeologia*. Si potrebbe parlare di *Scienze Geoarcheologiche*, piuttosto che di *Geoarcheologia*; occorre, dunque, che venga riconosciuta la figura del Geoarcheologo come tale e non come un qualcosa di ibrido.

Gladfelter, Conwall, Butzer, Ferring, Schiffer, Waters, Rapp, Hill e Cremaschi sono i pionieri che hanno dato i natali alla Geoarcheologia come disciplina; le definizioni che ne hanno dato Butzer e Cremaschi sono quelle che più si avvicinano alla sua specificità:

*Geoarchaeology implies archaeological research using the methods and concepts of the earth sciences* (Butzer).

*La geoarcheologia è una disciplina che interpreta le testimonianze archeologiche utilizzando i metodi e le tecniche proprie delle scienze della terra* (Cremaschi).

La definizione più utilizzata e riconosciuta dai geoarcheologi è quella di Butzer, essendo stata ripresa e tradotta in varie lingue. Ovviamente, alla concezione teorica delle discipline della Geologia e dell'Archeologia, si collegano una serie di tecnologie come il *GIS*, il *Remote Sensing*, il *rilievo 3D* e la *geofisica* che sono di fondamentale supporto nel caso in cui l'occhio del geoarcheologo non fosse sufficiente per una ricostruzione sinottica-globale del sistema naturale-antropico.

La Geoarcheologia, alla luce di quanto detto, si potrebbe definire come la **disciplina che coniuga tutte le scienze diagnostiche, invasive e non invasive, nello studio delle dinamiche antropofisiche del paesaggio.**

### Bibliografia

BUTZER K. (1964), *Environment and Archaeology: An Introduction to Pleistocene Geography*, Aldine, Chicago.

BUTZER K. (1982), *Archaeology as Human Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge.

CLARKE D. L. (1968), *Analytical Archaeology*, Methuen, London.

CONWALL I. (1958), *Soils for Archaeologist*, Phoenix House, London.

CREMASCHI M. (2000), *Manuale di Geoarcheologia*, Laterza, Roma.

FERRING R. (1994), *Review of Principles of Geoarchaeology: a North American Perspective* (di WATERS M. R.), in *American Anthropologist*, 96, 1, pp. 218-219.

GLADFELTER B. (1981), *Developments and Directions in Geoarchaeology*, in SCHIFFER M., *Advances in Archaeological Method and Theory*, 4, Academic Press.

GISOTTI G. (2018), *Geomorfologia antropogenica, con particolare riguardo ai rapporti con l'archeologia*, in *Geologia dell'Ambiente*, 2, Roma, pp. 2-17.

GISOTTI G. (2020), *Geologia per archeologi. Forme del terreno e civiltà antiche*, Carocci Editore, Roma.

LENA G. (2020), *Viaggio geoarcheologico attraverso la Calabria*, Rubbettino, Soveria Mannelli.

LENA G., MASTROIANNI D. (2021), *Geositi e geomorfositi. E i geoarcheositi?*, in *Geologia dell'Ambiente*, 1, Roma, pp. 2-17. pp. 3-15

SCHIFFER M. (1987), *Formation Processes of the Archaeological Record*, Albuquerque, University of New Mexico Press.

SCHIFFER M. (1995), *Behavioral Archaeology. First Principles*. University of Utah Press, Salt Lake City.

WATERS M. (1992), *Principles of geoarchaeology. A North American perspective*, The University of Arizona Press, Tucson.

RAPP G. JR., HILL C. (1998), *Geoarchaeology. The Earth Science Approach to Archeological Interpretation*, Yale University Press, New Haven.



**PARTE PRIMA**

**PRINCIPI**



## I. Il tempo e come misurarlo

In Geologia come nella geoarcheologia, il tempo ha un ruolo essenziale per comprendere in maniera ancora più precisa le dinamiche di deposizione degli strati. La "temporalità del tempo" consente di comprendere come si verificano specifici eventi quali, ad esempio, l'erosione di una valle fluviale, l'origine delle catene montuose o la creazione di bacini oceanici; sono manifestazioni temporalmente lunghissime e impercettibili all'uomo. Come si determina l'età di un evento? Qual è la scala cronologica di riferimento? Per rispondere alla prima domanda è quanto mai appropriato integrare le datazioni relative (lettura delle stratificazioni e seriazioni tipologiche dei manufatti archeologici di scavo) con le datazioni assolute (ad esempio le datazioni isotopiche). Per rispondere, invece, alla seconda, la scala cronologica di riferimento riguarda il Quaternario.

Quindi, esistono due metodi per datare le rocce, i fossili e gli eventi passati: la *datazione relativa* e la *datazione assoluta* o *radiometrica*. La prima, basata sui due concetti fondamentali quali la sovrapposizione degli strati e l'evoluzione biologica, non fornisce una datazione numerica o quantitativa, ma solo relativa (una roccia o uno strato sono collocati in una scala temporale di cui non si conosce la misura quantitativa). Nel 1759, il veronese Giovanni Arduino stabilì una suddivisione cronologica relativa alle formazioni geologiche del Veneto, dalla più recente alla più antica (Quaternaria, Terziaria, Secondaria, Primaria). La seconda, assoluta o radiometrica, si basa sul decadimento degli elementi radioattivi ed è in grado di quantificare, con buona approssimazione, l'età di una roccia, un fossile o uno strato.

### 1.1 Il Quaternario quale scala cronologica di riferimento

Il Quaternario, denominato anche Età Glaciale o Antropocene, è l'ultimo periodo dell'era Cenozoica, ovvero quello più recente (Fig. 1), ed è importante per la Geoarcheologia. Il Quaternario ha una durata di cir-

ca 1.800.000 di anni fa e si divide, a sua volta, in *Pleistocene* e *Olocene*.

#### 1.1.2 Il Pleistocene

Il Pleistocene (dal greco *pleisto* "il più" e *kaionos* "recente") si divide in Pleistocene Inferiore, Pleistocene Medio, Pleistocene Superiore; l'inizio del Pleistocene Inferiore è fissato a 1,8 milioni di anni, in corrispondenza dell'episodio paleomagnetico Olduvai, quello del Pleistocene Medio a 0,76 milioni di anni, a cavallo tra le epoche magnetiche Matuyama e Bruhnes, mentre quello del Pleistocene Superiore a 128 migliaia di anni. L'inizio dell'Olocene è posto a 12.000 circa dal presente.

Il clima instabile, caratterizzato dall'alternarsi di periodi caldi (interglaciali) e freddi (glaciali), è la caratteristica principale del Quaternario ed è la causa che ha determinato in gran parte la forma attuale delle terre emerse e l'estensione delle acque oceaniche. Il modello classico per definire la cronologia delle glaciazioni fu formulato da Penck e Brückner, agli inizi del '900; i due studiosi utilizzarono le Prealpi Bavaresi come strumento di confronto. In quest'area, Penck e Brückner individuarono due ordini di terrazzi (*Niedterrassen* e *Hochterrassen*) che, in direzione delle Prealpi, si congiungevano ad altrettante cerchie moreniche. Secondo questo schema, ad ogni glaciazione corrispondeva la

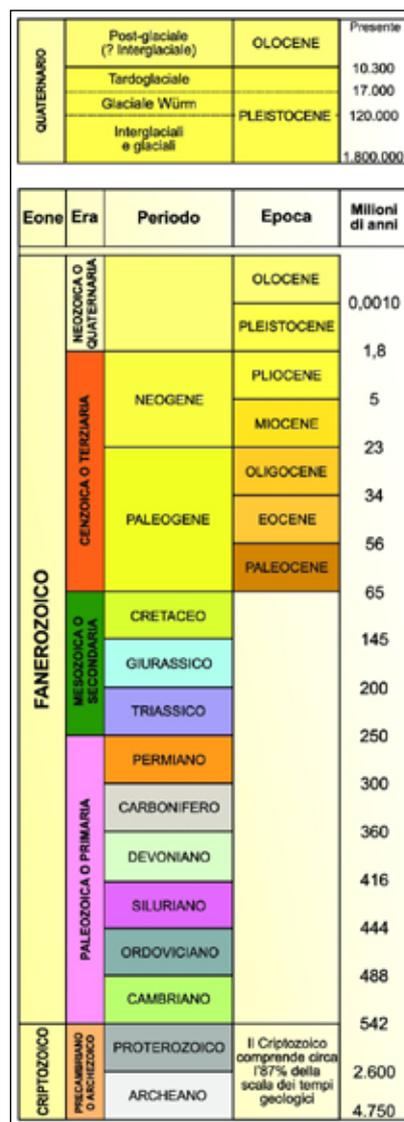


Fig. 1. Scala schematica dei tempi geologici. In alto le suddivisioni semplificate, del Quaternario.

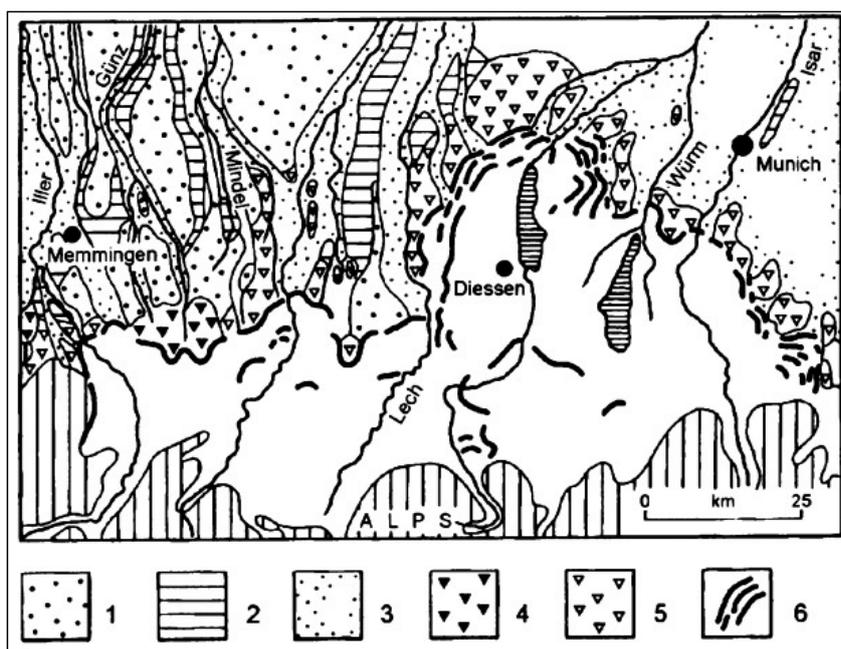


Fig. 2. Carta geomorfologica del margine alpino bavarese (1. Ghiaie di copertura-Deckenschotter; 2. Terrazzo antico; 3. Terrazzo recente; 4. Morene Mindel; 5. Morene Riss; 6. Morene Würm).

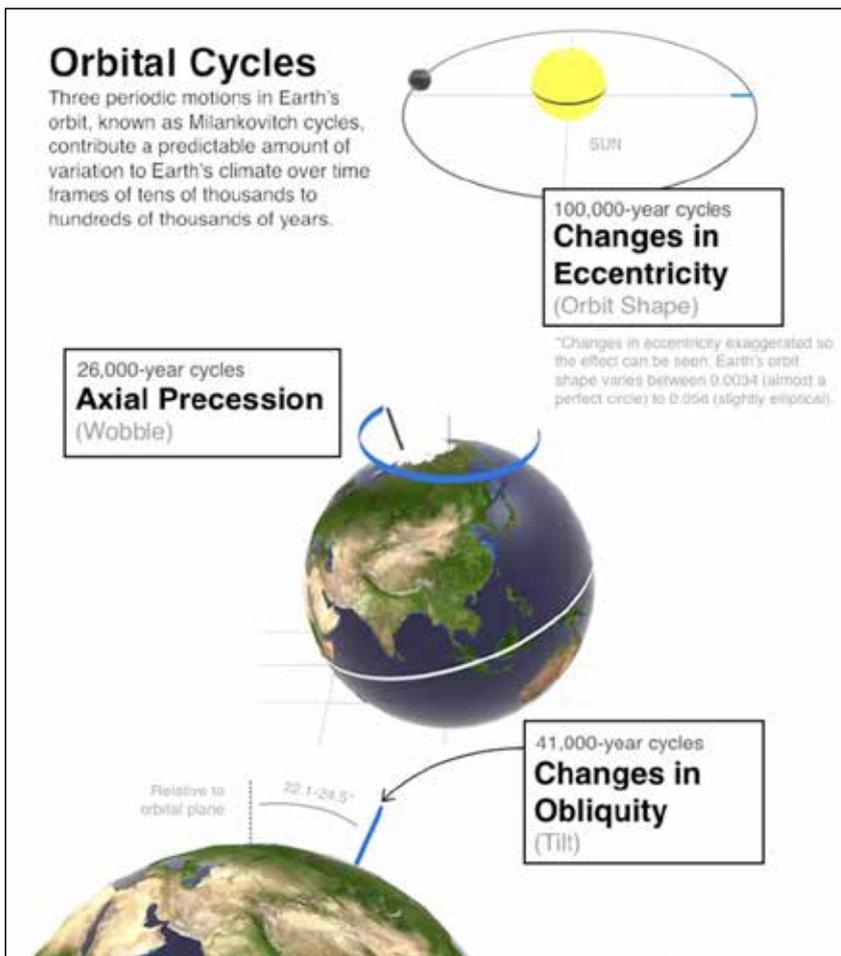


Fig. 3. I cicli di Milankovitch e gli effetti collettivi delle variazioni cicliche dei parametri orbitali della Terra sul suo clima.

formazione di una morena terminale e di un terrazzo fluvioglaciale. Nei periodi interglaciali, corsi d'acqua con portata di solito elevata incisero le morene formando i terrazzi. Penck e Brückner, quindi, utilizzarono i nomi dei corsi d'acqua (*Würm*, *Riss*, *Mindel* e *Günz*) per stabilire la cronologia delle quattro distinte glaciazioni, intervallate dai periodi interglaciali intermedi (*Riss-Würm*, *Mindel-Riss* e *Günz-Mindel*) (Fig. 2).

Furono proposti dei limiti cronologici per le fasi delle glaciazioni, in base allo spessore dei depositi lacustri e dei paleosuoli ad essi attribuibili: quella *würmiana* fu quella più breve, quella di *Günz* la più lunga. La medesima logica fu applicata ai periodi intermedi e postglaciali: il *Riss-Würm*, il *Mindel-Riss* (chiamato il Grande Interglaciale) e il *Günz-Mindel*. Nei decenni successivi, nel 1930, Eberl aggiunse nuovi periodi glaciali: *Donau* e *Biber* e antecedenti al *Günz*.

Nel corso del tempo, nuovi studi hanno permesso di ipotizzare altri fattori scatenanti le glaciazioni e i periodi interglaciali, ovvero l'influenza delle variazioni dei *parametri orbitali*, detti anche *cicli di*

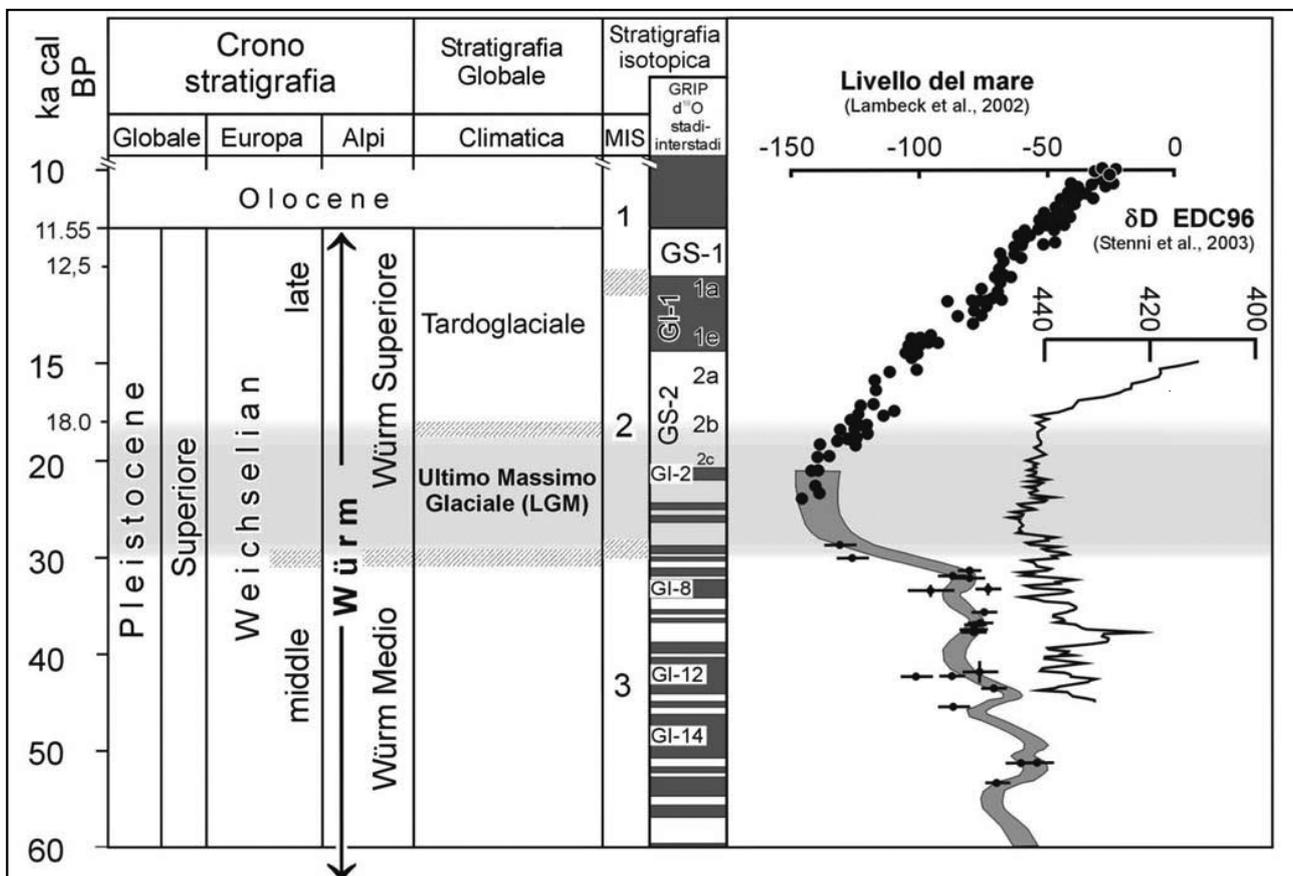


Fig. 4. Tavola stratigrafica relativa all'intervallo 60-10 ka cal BP, con l'inquadramento del Tardiglaciale.



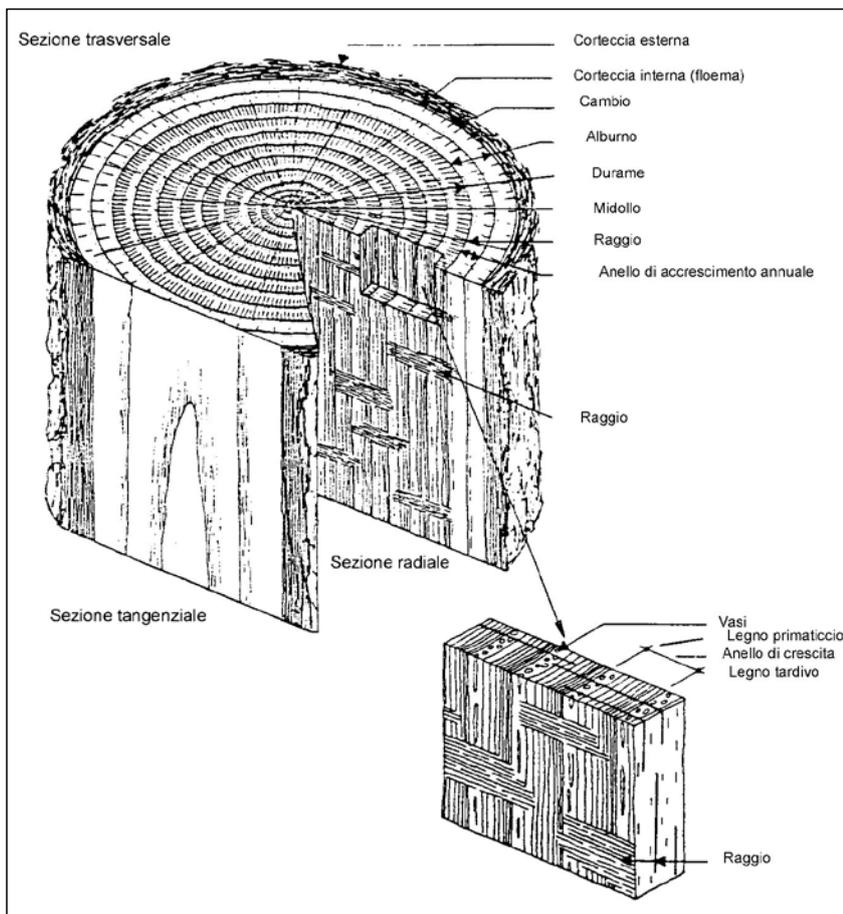


Fig. 6. Esempio esplicativo dell'analisi cronologica di un tronco di un albero.

15°C in più), circa 14.700 anni fa. In seguito, in corrispondenza della *Allerød*, si è avuta una flessione di 5°C. Lo scioglimento del ghiacciaio della Laurentide, all'inizio del *Dryas Recente*, circa 12.900 anni da oggi, ha causato l'immissione nell'Oceano Atlantico di grandi quantitativi

di acqua fredda; ciò ha comportato un'improvvisa degradazione climatica. La transizione fra *Dryas Recente* ed *Olocene*, datata a 11.650 anni da oggi, ha determinato un notevole rialzo della temperatura di circa 7 °C ed un aumento del 100% delle precipitazioni.

#### 1.1.4 L'olocene e la scala cronologica di riferimento

L'Olocene (Fig. 5), grazie alla datazione radiocarbonica di Mangerud si divide in cinque Periodi: *Preboreale*; *Boreale*; *Atlantico*; *Sub-boreale*; *Subatlantico*. Per l'Olocene, come per il *Pleistocene*, lo studio del decadimento isotopico ha permesso di ricostruire le variazioni climatiche oloceniche oltre che il rapporto tra  $^{16}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ , grazie a numerosi carotaggi nei ghiacciai artici ed antartici.

#### 1.2. Le tecniche di datazione assoluta (metodi incrementali e metodi radiometrici)

Nell'ambito delle Scienze della Terra, i metodi incrementali e i metodi radiometrici sono alla base delle datazioni assolute. I metodi incrementali riguardano i fenomeni che si susseguono con cadenza temporale fissa o prevedibile, come lo sviluppo degli anelli delle piante o l'accumulo di varve sul fondo dei laghi proglaciali (i limiti di questo metodo sono l'arco cronologico limitato e legato all'area geografica locale).

La *dendrocronologia*: è un particolare metodo di datazione assoluta che si basa sul computo degli anelli di accrescimento degli alberi (Fig. 6). Ogni anno si crea un doppio anello: uno chiaro interno (primaverile) e uno scuro esterno (estivo). Una volta che si delimitano gli strati, è possibile conoscere l'età delle pian-



Fig. 7. Varve di un lago ghiacciato.

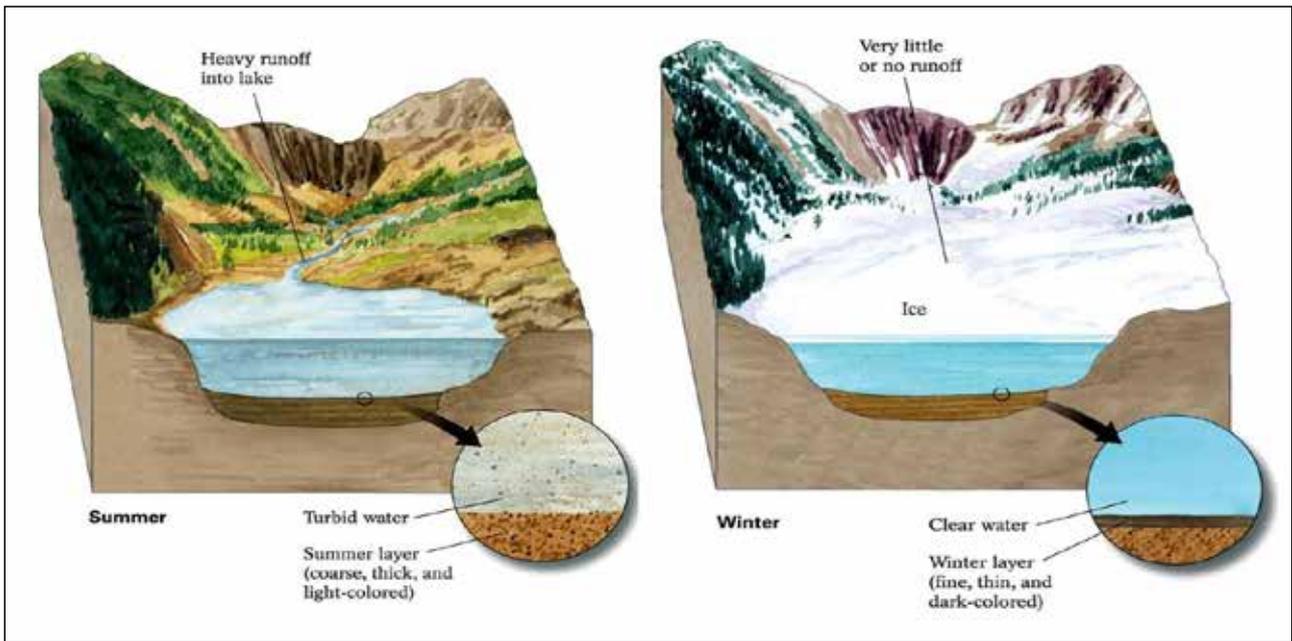


Fig. 8. Metodo di genesi delle varve glaciali.

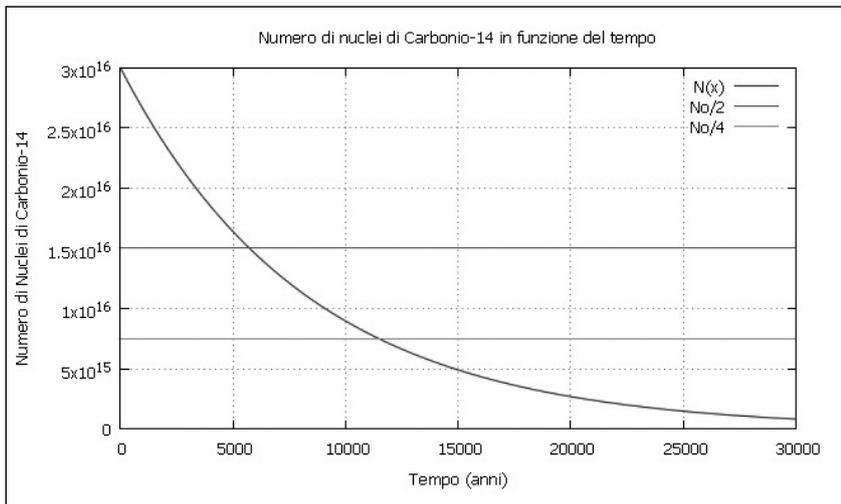


Fig. 9. Tavola cronologia degli intervalli di tempo ai quali applicare le diverse metodologie di datazione assoluta.

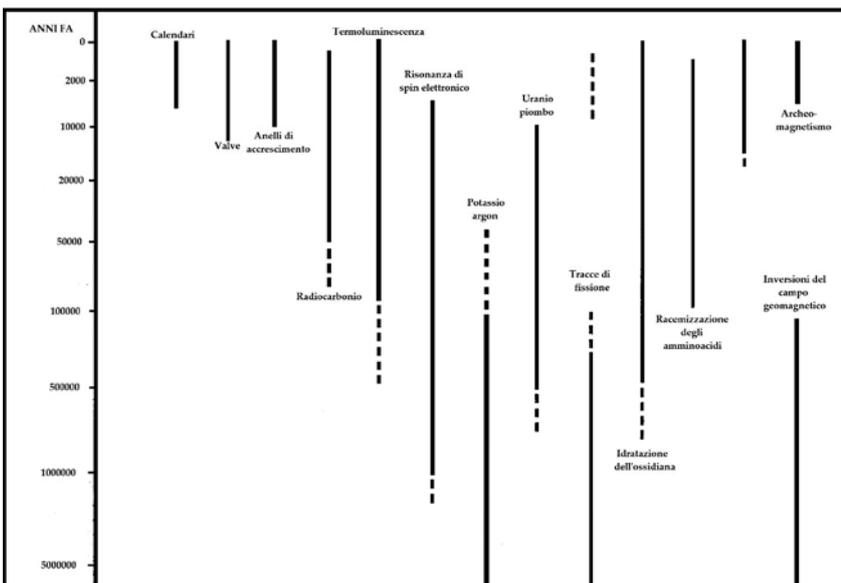


Fig. 10. Tempo (T/2) di decadimento del radiocarbonio. Datazione assoluta.

te, ricostruendone le fasi climatiche passate attraverso l'osservazione delle dimensioni e del colore: si riscontreranno anelli sottili e scuri nelle annate secche e/o con inverni abbastanza rigidi e anelli spessi e chiari nelle annate piovose e miti. Per ottenere una datazione più precisa e fino a qualche migliaio di anni, si possono confrontare gli anelli degli alberi presenti nella stessa zona.

*Le varve glaciali:* tutti i sedimenti che i ghiacciai trasportano nei laghi formano le varve, ovvero dei sottili strati doppi (uno strato grezzo e chiaro durante i periodi estivi e uno più fine e scuro in quelli invernali) (Fig. 7). Ognuno di questi strati contiene informazioni utili sulla piovosità e sull'ambiente, basandosi sui pollini delle piante; confrontando l'alternarsi dei livelli deposizionali si possono ottenere datazioni fino a 20.000 anni (Fig. 8).

I metodi radiometrici, sviluppati a partire degli anni '40, permettono di datare tutto il Quaternario e i materiali che si rinvergono in contesti geologici e archeologici (Fig. 9). La principale caratteristica di queste tecniche è il decadimento di alcuni isotopi radioattivi (*genitori*) che si modificano in altri isotopi, ma più stabili (*figli*). Il passaggio da isotopo *genitore* a isotopo *figlio* avviene in modo esponenziale mediante il cosiddetto "tempo di dimezzamento" o T/2 (il tempo utile affinché la quantità dell'elemento genitore si

dimezzi). Se si misura il numero di radioisotopi presenti nel campione, conoscendo il numero esatto all'origine e la costante di decadimento, si può determinare il momento in cui il decadimento ha inizio (Fig. 10). Si procederà, di seguito, a presentare i metodi più largamente diffusi.

**Uranio e derivati:** l'uranio è affine al calcio e si concentra in tutti i precipitati di questi composti: stalattiti, stalagmiti, travertini, calcari di natura biologica, ossa, gusci di gasteropodi e coralli. Due isotopi specifici dell'uranio sono soggetti a decadimento ( $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ ). Tra questi, il torio ( $^{230}\text{Th}$ ) e il protoattinio ( $^{231}\text{Pa}$ ) sono molto efficaci per la datazione di depositi quaternari: il primo ( $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$ ) consente di datare campioni tra 10.000 e 350.000 anni BP, mentre il secondo ( $^{235}\text{U}/^{231}\text{Pa}$ ) tra 5000 e 150.000 anni BP. Per la datazione dei coralli delle barriere oceaniche si usa il radioisotopo ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) con intervallo compreso tra 40.000 e 100.000 anni BP. È ovvio che il metodo risulti efficace unicamente se il campione da analizzare non contiene uranio detritico e se il campione non ha subito contaminazioni postdeposizionali alla chiusura dell'intero sistema.

**Il sistema potassio/argon:** questa tecnica si basa sul fatto che il potassio possiede un isotopo assai instabile,  $^{40}\text{K}$ , che, quando decade, si trasforma in  $^{40}\text{Ca}$  e  $^{40}\text{Ar}$ . Quest'ultimo, a differenza del  $^{40}\text{Ca}$ , è utilizzabile ed è utile per datare contesti stratigrafici databili a non oltre il Pleistocene Medio.

**Il radiocarbonio:** la tecnica del radiocarbonio è largamente usata sia in Geologia sia in Archeologia; nonostante le potenzialità e i limiti della datazione radiocarbonica è ormai diventato uno strumento indispensabile per "datare il passato". Dove si genera il radiocarbonio? Si crea ed è presente nell'alta atmosfera. I protoni bombardano l'azoto creando atomi di  $^{14}\text{C}$ . Questi, a causa della loro instabilità, si ritrasformano in azoto emettendo una particella, detta  $\beta$ , e un neutrino. Il carbonio radioattivo, legandosi agli atomi di ossigeno, diviene anidride carbonica, elemento che fa parte di ogni organismo vivente. Quando questo muore, il radiocarbonio intrappolato decade e si può misurare stabilendo l'età della morte dell'organismo. Il limite massimo della datazione è di 45.000 anni, ma l'introduzione dell'acceleratore di particelle ha ampliato il ventaglio cronologico e ha aumentato la precisione cronologica. Il metodo del radiocarbonio, per essere affidabile, richiede che la sua concentrazione debba essere costante nell'atmosfera, ma non è sempre possibile a causa di perturbazioni siderali e immissioni di carbonio artificiale nell'aria (gas industriali prodotti da aerei, l'esplosione delle bombe H). Per correggere il dato ci si è affidati alla *dendrocronologia*. Datando i singoli anelli di un albero con il radiocarbonio, si è potuto confrontarlo ad una scala incrementale e metterne in evidenza gli scostamenti per gli ultimi 100.000 anni.

Si è, dunque, ottenuta una sorta di curva di calibrazione che ha permesso di convertire le date radiocarboniche in anni calendario. Oltre a contaminazioni "artificiali" che possono condizionare una cronologia errata del campione, concorrono anche altri fattori quali, ad esempio, l'errata manipolazione del campione stesso al momento del prelievo o eventuali trasformazioni esterne che il carbonio, a causa del contesto in cui si trova il campione, subisce.

### 1.2.1 Ulteriori metodologie basate sulla radioattività

**La Termoluminescenza (TL):** il decadimento di alcuni atomi radioattivi causa un accumulo di elettroni all'interno delle imperfezioni dei reticoli cristallini. Gli elettroni, una volta liberati, si riscaldano emettendo energia luminosa che è possibile misurare. Quando termina il riscaldamento, il processo di decadimento si riavvia, permettendo una nuova misurazione. I due processi, misurando la differenza, permettono di determinare il tempo passato dal riscaldamento. È soprattutto utilizzata in Archeometria, per lo studio delle ceramiche.

**La luminescenza otticamente stimolata (OSL):** simile alla termoluminescenza, la misura si ottiene investendo il campione con un raggio di fotoni. Il metodo si applica a materiali che hanno subito una forte variazione di calore e si utilizza soprattutto in campo archeologico (ceramica da fuoco, pareti di forni, oggetti litici bruciati).

**La risonanza dello spin elettronico:** la tecnica, applicata agli speleotemi e al materiale osseo, prevede il computo degli elettroni che sono rimasti all'interno dei reticoli cristallini e prodotti dal decadimento radioattivo.

**Le tracce di fissione:** il radioisotopo  $^{235}\text{U}$ , disintegrandosi, provoca delle lesioni all'interno dei minerali che lo contengono. Queste tracce di fissione possono essere misurate, permettendo di calcolare il tempo passato dal riscaldamento così da mettere in correlazione eventi geologici o archeologici.

**Il paleomagnetismo:** è un sistema di correlazione stratigrafica che utilizza le proprietà fisiche di sedi-

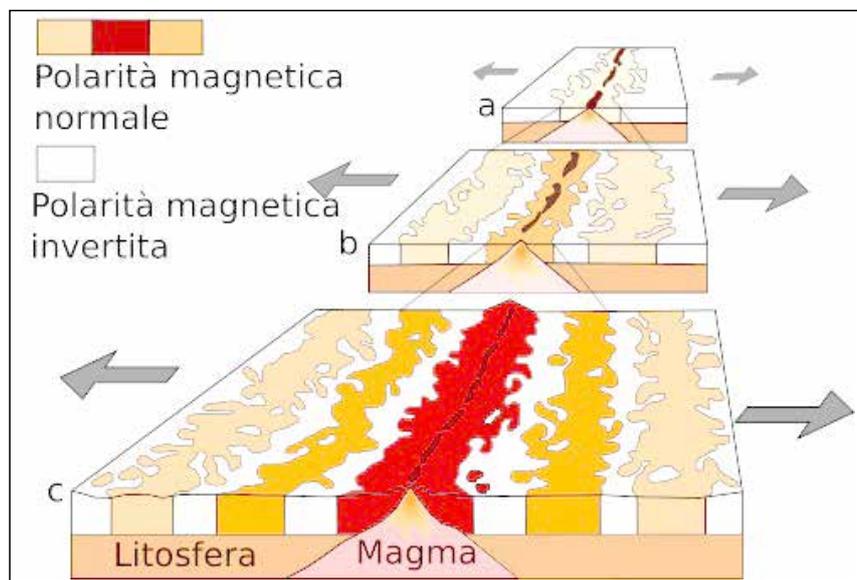


Fig. 11. Esempio di paleomagnetismo nei fondali oceanici.

menti e rocce che si riscaldano al di sopra del *punto di Curie*, registrando il campo magnetico vettoriale terrestre al momento della sedimentazione o del raffreddamento delle rocce stesse (Fig. 11).

La *racemizzazione degli amminoacidi*: gli amminoacidi sono dei composti organici presenti negli organismi viventi. Si differenziano in levogiri e destrogiri, a seconda di come si orientano nello spazio. Quando un organismo muore, gli amminoacidi levogiri cambiano orientamento in amminoacidi destrogiri, fin quando non raggiungono un equilibrio tra le due forme; in questo momento avviene la *racemizzazione degli amminoacidi*. Conoscendo la velocità del processo, è possibile determinare l'età del campione organico; questo metodo è utile per stabilire date relative su scala locale, come nella dendrocronologia.

### Bibliografia

BELL M. G., WALKER M. J. C. (1992), *Late Quaternary Environmental Change. Physical and Human Perspectives*, Longman, Singapore.

BRADLEY R. S. (1985), *Quaternary paleoclimatology. Methods of paleoclimatic reconstruction*, Allen & Unwin, Boston.

BRADLEY R. S. (1999), *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*, Academic Press, London.

BOWEN D. Q. (1978), *Quaternary Geology*, Pergamon Press, Oxford.

CASATI P. (1985), *Scienze della Terra. Elementi di geologia generale*, Clued, Milano.

CITA M. B., RYAN W. (1975), *Time scale and general synthesis*, in *Internal Report D.S.D.P.*, 13 (2), pp. 1405-1415.

CREMASCHI M. (2000), *Manuale di Geoarcheologia*, Laterza, Roma.

CROWLEY T. J., NORTH G. R. (1991), *Paleoclimatology*, Oxford University Press, New York.

EMILIANI C. 1955: *Pleistocene temperatures*, in *Journal of Geology*, 63, pp. 538-578.

FLINT R. F. (1971), *Glacial and Quaternary Geology*, John Wiley and Sons, New York.

GAIE S. G., HOARE P. G. (1991), *Quaternary Sediments*, Belhaven Press, London-New York.

GOUDIE A. (1992), *Environmental Change*, Clarendon Press, Oxford.

Ravazzi C. (2003), *An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events*, in *Il Quaternario*, 16 (1 bis), pp. 11-18.

LE ROY LADURIE E. (1971),

*Times of Feast, Times of Famine. A history of climate since the year 1000*, Doubleday, New York.

LOWE J. J., WALKER M. J. C. (1997), *Reconstructing Quaternary Environments*, Longman, London-New York.

LYELL C. (1830-1833), *The principles of Geology*, London.

LYELL C. (1863), *The Geological Evidences of the Antiquity of Man*, London.

MANNION A. M. (1991), *Global Environmental Change*, Longman, Singapore.

ROBERTS N. (1989), *The Holocene. An Environmental History*, Blackwell, Oxford.

SANESI G. (1977), *Guida alla Descrizione del Suolo*, C.N.R., Firenze.

SCHWEINGRUBER F. H., (1993), *Trees and wood in dendrochronology*, Springer.

SELBY M. J. (1985), *Earth's Changing Surface*, Clarendon Press, Oxford.

SHANE L., CUSHING E. J. (1991), *Quaternary Landscapes*, Bellhaven Press, London.

SUGDEN D. E., JOHN B. S. (1976), *Glaciers and Landscape*, Arnold, London.

VENTURINI C., (2006), *Evoluzione geologica delle Alpi Carniche, Un viaggio attraverso il tempo*, Edizioni del Museo Friulano di Storia Naturale, Udine.

## 2. La Sedimentologia

I sedimenti possono definirsi, semplicemente, come quei materiali che si depositano sulla superficie terrestre, nei diversi ambienti sedimentari; costituiscono ciò che sta alla base della Geoarcheologia. La stragrande maggioranza dei siti archeologici che conosciamo si trova in contesti sedimentari e le unità stratigrafiche che vengono scavate, sia di carattere geogenico sia antropogenico, sono di natura sedimentaria. Cosa occorre conoscere di un deposito sedimentario? La sua origine, le modalità di trasporto e il suo ambiente di deposizione (Fig. 12).

### 2.1 Tipologia dei sedimenti

I sedimenti possono essere classificati in tre tipi: *clastici*, *chimici* e *organici*. I primi, più diffusi, sono composti principalmente da frammenti di roccia; i sedimenti *clastici* sono terrigeni e si depositano grazie a fenomeni quali il vento (basti pensare alle dune di sabbia), l'acqua corrente (fiumi, ruscelli, rigagnoli) e

la forza di gravità (crolli, frane) (Fig. 13). La sabbia, il limo e l'argilla sono tipici esempi di sedimenti clastici. La litificazione di questi genera, ad esempio, l'arenaria, la siltite e lo scisto. È raro rinvenire la presenza di detriti vulcanici in contesti geoarcheologici, se non in siti prossimi ad aree vulcaniche; basti pensare a Pompei.

I sedimenti *chimici* sono quelli che si generano per precipitazione diretta della soluzione: ad esempio, i laghi nelle aree semiaride, a causa della forte evaporazione, presenteranno un numero elevato di minerali precipitati come l'alogenite, il gesso o calcite o aragonite. In ambienti quali le caverne, i sedimenti chimici sono molto diffusi e producono, in genere, fogli di carbonato di calcio (travertino), stalattiti o stalagmiti. Questi ultimi sono composti, generalmente, da calcite o aragonite, fosfati, nitrati o solfati.

I sedimenti *organici* sono composti essenzialmente da materiale biologico, nello specifico da materiale di origine vegetale; esempi

sono la torba o le argille delle aree paludose.

### 2.2 Caratteristiche dei sedimenti

I sedimenti clastici mostrano una serie di caratteristiche che possono essere descritte e interpretate. Queste caratteristiche includono la composizione, la tessitura e le strutture sedimentarie.

**Composizione:** i sedimenti sono composti da diversi tipi di minerali e di roccia. Nonostante l'ampia varietà di rocce e di minerali, questi si presentano, in maniera ripetuta, nei sedimenti. Un basso o alto valore, all'interno di questi, dipende dalla loro posizione e dall'età e, inoltre, la composizione complessiva di un sedimento può dipendere da processi secondari o successivi (agenti atmosferici, diagenesi) che determinano la precipitazione di minerali che cementano i grani dello stesso sedimento o che precipitano all'interno della massa sedimentaria creando noduli o concrezioni.

**Tessitura:** la tessitura fa riferimento alla granulometria del sedimento (di cui si parlerà nel capitolo sulla Pedologia), alle sue dimensioni e all'energia con il quale esso si è formato, all'orientamento e alla struttura dei grani (Fig. 14). Questa presenterà, per quel che riguarda il flusso deposizionale, la medesima direzione. Ad esempio, i ciottoli di forma allungata possono essere orientati

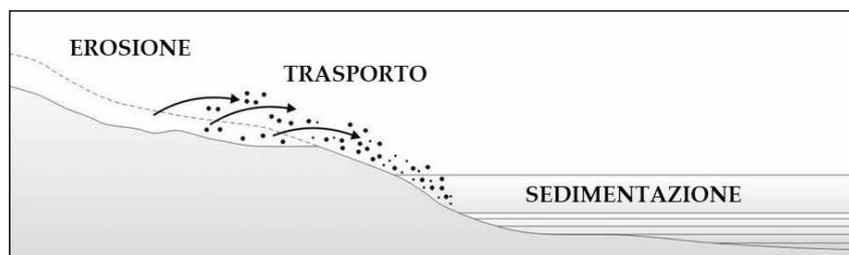


Fig. 12. Il processo di sedimentazione.

NOME GENERICO			DIMENSIONE	NOME		
GENERALE	CARBONATICO	QUARZO	CLASTI (ø)	CLASTI	SCIOLTO	LITIFICATO
Rudite (R)	(Lito-/Bio-) Calci-rudite Dolo-rudite	Quarzo-rudite	> 256 mm	Masso	Ammasso detritico molto grossolano	Conglomerato molto grossolano
			256 ÷ 64 mm	Blocco	Ammasso detritico grossolano	Megabreccia
			64 ÷ 4 mm	Ciottolo Grossolano	Ghiaia grossolana	Conglomerato grossolano
				Pietra	Pietrame	Breccia grossolana
				Ciottolo	Ghiaia	Conglomerato
			4 ÷ 2 mm	Scheggia	Pietrisco	Breccia
Granulo	Ghiaietta	Microconglomerato				
Arenite (A)	(Lito-/Bio-) Calcarenite Dolo-arenite	Quarzo-arenite	2 ÷ 1/16 mm	Granulo/Particella	Sabbia	Arenaria
Siltite (S)	(Lito-/Bio-) Calci-siltite Dolo-Siltite	Quarzo-siltite	1/16 ÷ 1/256 mm	Granulo/Particella/Lamella	Fango	Silt
Lutite (L)	(Lito-/Bio-) Calcilutite Dolo-lutite	Quarzo-lutite	< 1/256	Particella/Lamella/Micella	Argilla	Argillite

Fig. 13. Schema delle tipologie di rocce clastiche.

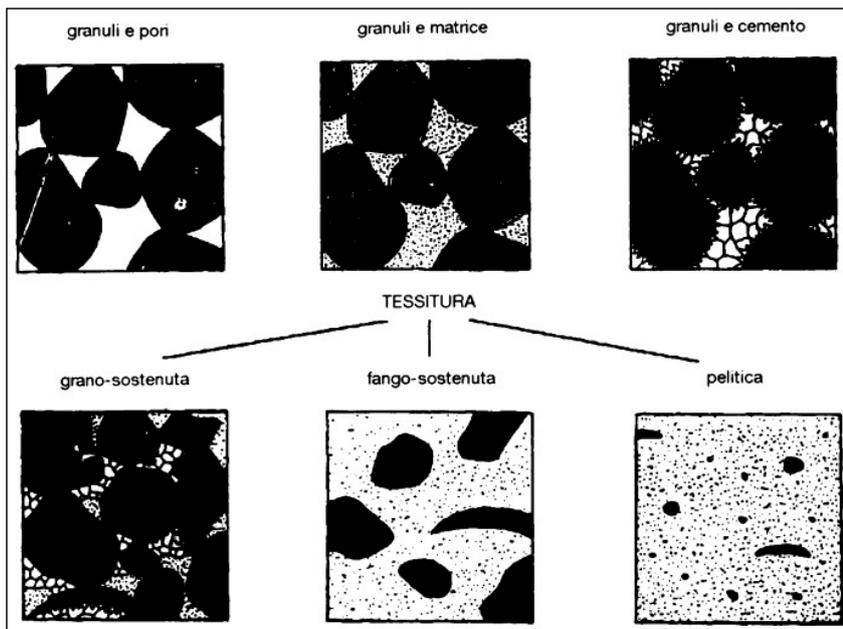


Fig. 14. Tessitura dei sedimenti.

nella stessa direzione, sia parallela sia perpendicolare, a seconda delle caratteristiche idrauliche creati nell'ambiente deposizionale. Le particelle granulometriche saranno comunemente orientate, parallelamente o perpendicolarmente, alla direzione del flusso. Quindi, osservando i clasti, si possono ricavare informazioni su durata e lunghezza dei percorsi seguiti che hanno determinato la posizione del sedimento. Un altro concetto legato alla tessitura è il *packing*; questo, a seconda della porosità e della permeabilità dei grani, descrive il modo di organizzazione degli stessi all'interno di un sedimento o una roccia sedimentaria.

**Strutture sedimentarie:** derivano dall'insieme dei diversi processi fisici, chimici, di trasporto e di deposito che subiscono i sedimenti. La struttura sedimentaria più semplice è lo *strato*, di cui si tratterà in seguito.

Le strutture sedimentarie possono definirsi primarie quando acquisite nel momento della sedimentazione e secondarie quando sono determinate dai mutevoli processi che si attuano a seguito del seppellimento in ambiente diagenetico o tettonico. Attraverso le strutture sedimentarie è possibile definire i processi di trasporto e di deposizione e come si sono susseguiti; questi non sono esclusivi di un ambiente specifico, ma si riscontrano in diversi contesti (strutture erosive, da deformazione, biogeniche, chimiche e diagenetiche). Identificare un processo non determina il riconoscimento di un antico ambiente sedimentario; occorre distinguere l'insieme dei processi che hanno dato origine a particolari strutture sedimentarie. Queste possono essere utilizzate per interpretare gli ambienti deposizionali e per studiare le paleocorrenti e la paleogeografia.

### 2.3 Strati e stratigrafia

La stratigrafia studia i corpi rocciosi sedimentari, associati o meno ad altri e analizza la forma, l'assetto, la distribuzione spaziale (sia verticale sia orizzontale) e cronologica degli orizzonti e i rapporti tra di essi. Iniziò a svilupparsi come disciplina già a partire dalla metà del 1700 ed è una, se non la più importante, delle discipline della geologia. Lo sviluppo verticale dei diversi livelli di sedimentazione, dal basso verso l'alto, determina il trascorrere del tempo geologico detto anche *principio di sovrapposizione stratigrafica* (Fig. 15). La stratigrafia si suddivide in molteplici campi di studio (Fig. 16), che tra loro si differenziano a seconda del criterio utilizzato per l'analisi dei materiali, ma quella che più si avvicina alla Geoarcheologia è la *stratificazione archeologica*.

### 2.4 La stratificazione archeologica e l'unità stratigrafica

La *stratificazione archeologica*, nonostante rientri tra le "norme generali" della sedimentazione geologica e delle sequenze sedimentarie (Fig. 17), è da considerarsi quasi a sé stante. Basti pensare alla scala di un sito archeologico e ai processi antropici che ne hanno disegnato e designato la fisionomia; i siti archeologici sono molto meno estesi rispetto ad un bacino sedimentario naturale e la loro antropizzazione può assumere connotazioni diversificate e del tutto opposte rispetto ad un ambiente naturale. Ad aver messo a punto una metodologia di analisi stratigrafica fu E. C. Harris, nei primi anni '80; grazie a lui, si è reso possibile descrivere la posizione geometrica spaziale dei sedimenti archeologici al fine di mettere in luce tutte le sequenze

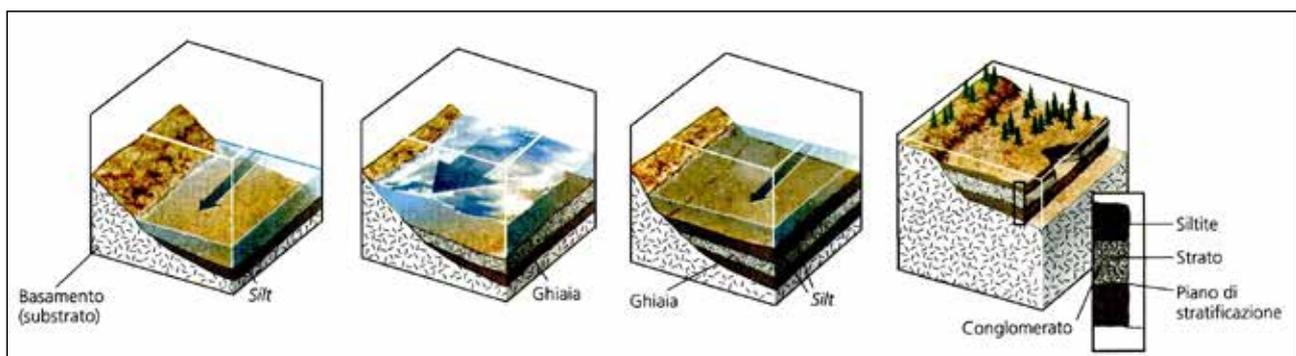


Fig. 15. Insieme dei processi che danno origine a strutture complesse, attraverso la sedimentazione degli strati.

CATEGORIE STRATIGRAFICHE	DENOMINAZIONE DELLE PRINCIPALI UNITÀ STRATIGRAFICHE	
<b>A. LITOSTRATIGRAFICHE</b>	Gruppo Formazione Membro Strato(i)	
<b>B. BIOSTRATIGRAFICHE</b>	Biozone: Cenozona o zona di associazione Zona di distribuzione (totale, locale, concomitante, parziale)	
<b>C. CRONOSTRATIGRAFICHE</b>	Eonetema Eratema Sistema Serie Piano Cronozona	Unità geocronologiche equivalenti  Eone Era Periodo Epoca Età Crono
<b>D. ALTRE CATEGORIE STRATIGRAFICHE</b> (mineralogiche, ambientali, sismiche, magnetiche ecc.)	Zona (con l'appropriato prefisso: sismozona ecc.)	

Fig. 16. Le diverse categorie stratigrafiche.

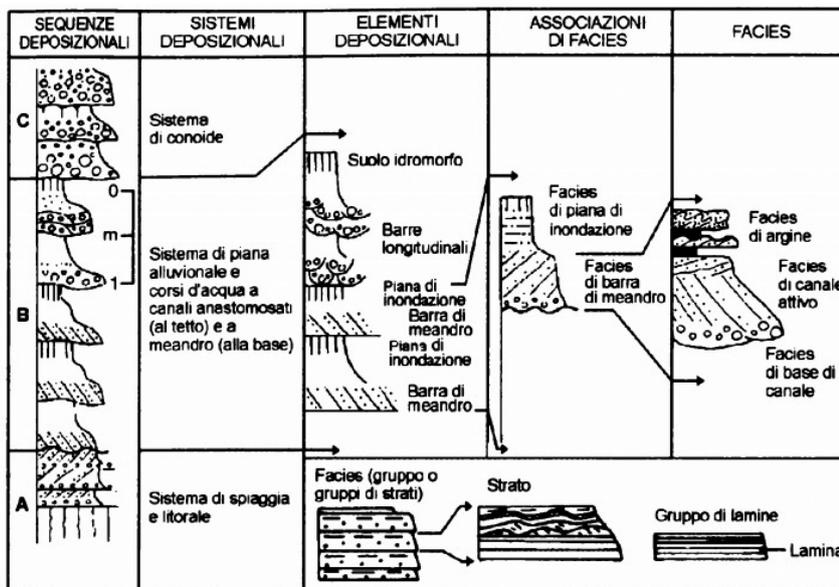


Fig. 17. Le sequenze sedimentarie geologiche.

stratigrafiche di un sito e fornendo una cronologia relativa. La stratificazione si genera attraverso processi di accumulo (*unità positive*) e processi di erosione (*unità negative*). Chi crea questi processi? L'uomo, principalmente, è colui che, attraverso la sua attività di costruzione, abbattimento e escavazione, si rende protagonista quasi assoluto del processo, anche se le unità stratigrafiche possono crearsi, a volte, in maniera involontaria e casuale (crollo di strutture, abbandono del sito). La stratificazione archeologica non è che la combinazione di *strati* che si creano grazie alla sedimentazione

e di *interfacce*, ovvero superfici che si collocano tra uno strato e un altro; l'interfaccia si potrebbe definire come una sorta di intervallo (sedimentario o anche derivante da una distruzione dello strato) tra i livelli di sedimentazione.

L'*unità stratigrafica*: è la testimonianza fisica, ma omogenea e diversa da altre, di un evento particolare con specifiche caratteristiche. Lo scavo archeologico permetterà poi di distinguere i rapporti cronologici tra i vari livelli (*strati* e *interfacce*). I diversi livelli fanno parte di un'unità stratigrafica globale denominata *fase*. Questa può essere

paragonata alla modalità di formazione della stratigrafia geologica. Come si rappresenta graficamente il rapporto tra le unità stratigrafiche? Ciò è possibile grazie al *matrix* (Fig. 18). Harris elaborò uno strumento grafico per leggere e visualizzare i rapporti di sovrapposizione, correlazione e uguaglianza tra le unità stratigrafiche, basandosi unicamente sui loro rapporti reciproci e non sui manufatti presenti all'interno di ogni strato. Il *matrix* è costruito partendo dalle unità stratigrafiche (US) più alte, quindi più recenti, proseguendo verso il basso (quelle più antiche). Lo schema si aggiorna man mano che lo scavo mette in luce nuovi livelli deposizionali. Le US sono indicate con un numero all'interno di un rettangolo e unite tra loro mediante linee verticali (per indicare rapporti di sovrapposizione) o orizzontali doppie (per indicare rapporti di uguaglianza). Si potrebbe considerare il *matrix* come una sintesi organica e razionale della documentazione archeologica (piante, sezioni, fotografie) e del diario di scavo; *diario* e *matrix* sono le due memorie storiche dell'azione distruttiva intrinseca dello scavo archeologico.

Finito lo scavo e, di conseguenza, terminato il *matrix*, le unità stratigrafiche si suddividono in *fasi* (gruppi di US) e *periodi* (gruppi di fasi) da associare ai manufatti archeologici rinvenuti negli strati al fine di determinarne le diverse cronologie di deposito. Le singole US vengono registrate attraverso l'utilizzo di apposite schede (*Schede US*); queste, insieme allo scavo stratigrafico e l'elaborazione del *matrix* fanno parte di un processo operativo attuato in tutti i cantieri archeologici. Questa metodologia è adatta anche in ambito geoarcheologico, soprattutto nella descrizione della campagna di indagine e della campionatura degli strati geologici

## 2.5 La facies e gli ambienti deposizionali di interesse geoarcheologico

Le *facies* rappresentano un gruppo di strati contraddistinti dalla forte similarità nella geometria esterna, nella loro organizzazione interna, nella litologia e nella composizione paleontologica. Anche se lo strato

resta l'unico elemento tangibile della sequenza sedimentaria, le *facies* facilitano l'analisi sedimentologica. Una *facies* sedimentaria si associa ad altre *facies*, non in modo casuale, ma in maniera peculiare e ricorrente. *Facies* uguali tra loro possono formarsi in ambienti differenti per il fatto che esse si sono prodotte grazie alla medesima azione di trasporto e deposizione, mentre caratteristica è la modalità in cui diverse *facies* si possano associare in specifici ambienti; importante, dunque, è saper riconoscere le molteplici *associazioni di facies*. Le fasi di rilevamento, analisi, classificazione e interpretazione delle successioni stratigrafiche si suddividono in diversi step: *esame del sedimento e individuazione precisa del luogo di affioramento delle sezioni stratigrafiche; individuazione e analisi dell'intervallo stratigrafico e riconoscimento delle discontinuità minori; misurazione geometrica e classificazione degli strati per facies; descrizione delle sequenze sedimentarie e cronologiche di facies; correlazione delle sequenze di facies; ricostruzione delle associazioni di facies; definizione degli elementi e dei sistemi di deposito; interpretazione dei meccanismi di sedimentazione, degli ambienti e dei sottoambienti di deposizione; interpretazione dell'evoluzione cronologica degli ambienti e delle cause che hanno determinato la sedimentazione* (clima, fattori biologici, movimenti tettonici).

Quali sono i siti archeologici in cui è maggiormente possibile individuare le *facies* di interesse geoarcheologico? Sicuramente i siti rinvenuti in ambienti di natura deposizionale alluvionale, lacustre (si pensi alle palafitte) e eolica.

**Ambienti deposizionali alluvionali:** i sistemi deposizionali dell'ambiente alluvionale (Fig. 19) si differenziano in conoidi alluvionali e piane alluvionali (*piane di fiume anastomosato; piane a canali intrecciati; piane di fiume meandriforme*). Le conoidi alluvionali si generano allo sbocco dei fiumi quando questi giungono in pianura e includono tre porzioni: apicale, intermedia e basale. Dalla porzione di origine, quella apicale, si diramano diversi canali instabili in direzione della porzione di base, ovvero verso la piana alluvionale.

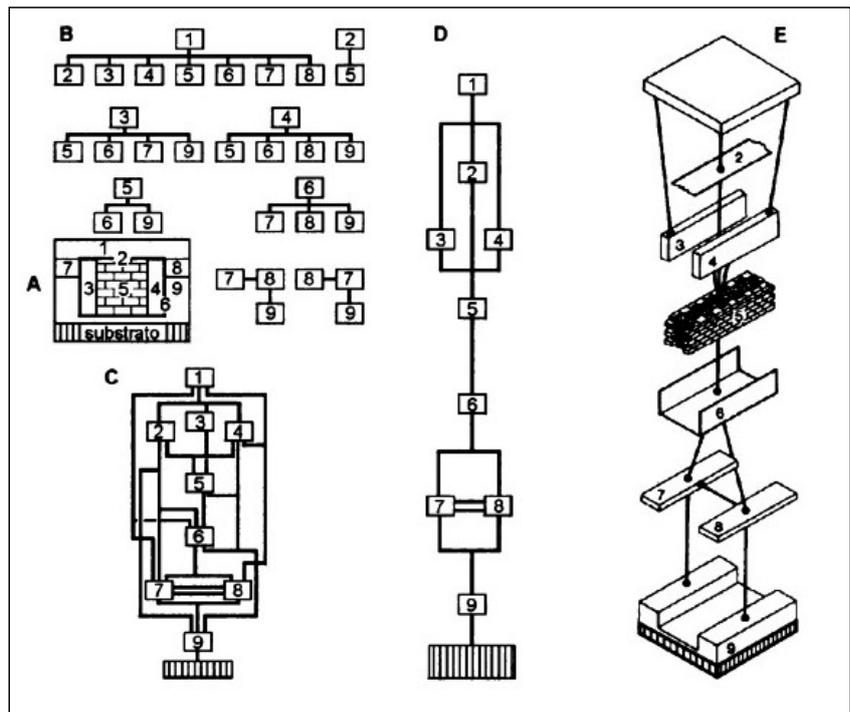


Fig. 18. Esempio di *matrix* archeologico. Sequenza stratigrafica dello scavo (A); Rapporti di sovrapposizione e equivalenza tra gli strati (B); intera casistica di tutti i rapporti (C); sintesi di C e A (D); visualizzazione in tre dimensioni dell'intera sequenza stratigrafica archeologica (E).

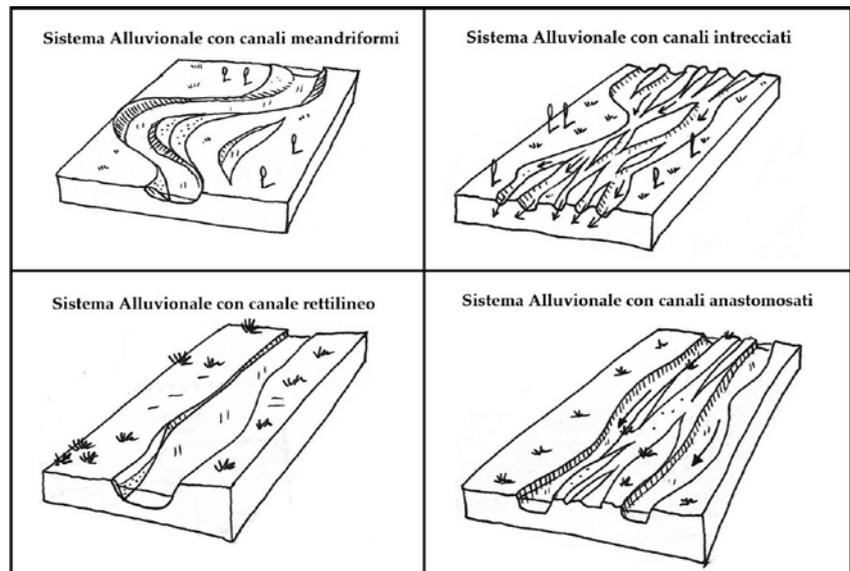


Fig. 19. Schematizzazione degli ambienti e dei sistemi deposizionali alluvionali.

vionale. La conoide trasporta con sé materiale grossolano, fango e detriti, ha la forma di un ventaglio che corrisponde a un tronco di cono con sezione trasversale a forma di lente. L'organizzazione interna di una conoide presenta una serie di corpi allungati con stratificazione spessa e irregolare. Le associazioni di *facies* sono costituite da ghiaie disorganizzate alternate a depositi di ghiaia e fango che si concentrano nella porzione apicale. Argille ciottolose

e ghiaie si trovano nella porzione intermedia, mentre ghiaie e sabbie nella porzione basale.

**Ambienti deposizionali lacustri:** questo tipo di ambiente si distingue per la molteplice varietà di sottoambienti (lago, spiaggia, delta-conoide, contesto eolico) e si sviluppa grazie a contesti morfologici e tettonici diversi tra loro (Fig. 20). Ad esempio, un lago di piccole dimensioni avrà differenze di formazione rispetto ad un lago di dimensioni maggiori; il

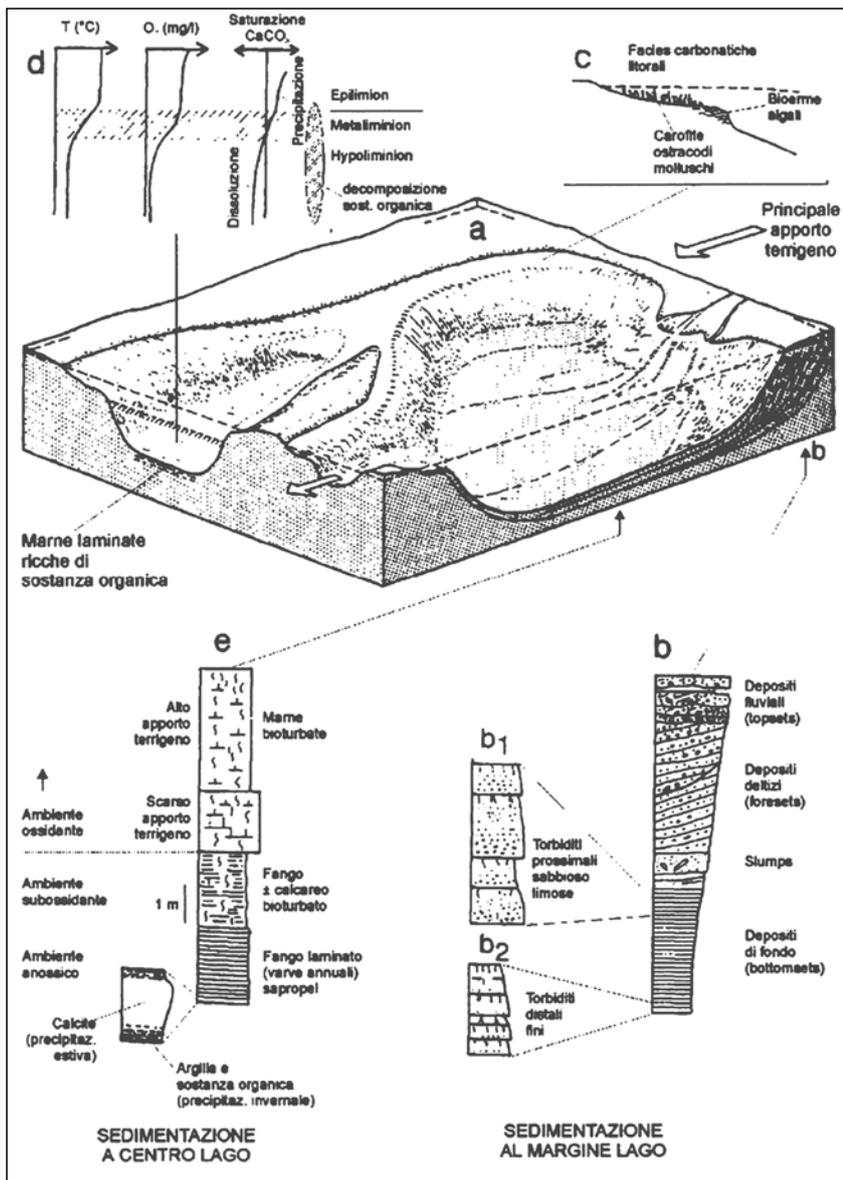


Fig. 20. Esempio di ambienti deposizionali lacustri.

primo, infatti, si sviluppa nell'ambito di piane alluvionali, costiere e in aree glaciali, mentre il secondo, di solito, per cause tettoniche. Per entrambi, anche se diversi per metodo di formazione, si individua il centro del bacino, all'interno del quale avvengono i veri e propri processi lacustri. Questi sono definiti dalla decantazione di numerose particelle della colonna d'acqua, secondo la salinità, la stratificazione di densità e la temperatura. In contesti lacustri, dominano i corpi sedimentari con geometrie tubolari e irregolari, caratterizzati da sedimenti terrigeni fini (limo-argillosi), alternati a corpi clastici più grossolani (sabbia e ghiaia). Le associazioni di *facies* sono costituite da sabbie fini e torbiditiche, sabbie grossolane e sabbie grossolane e ghiaie di fiume.

*Ambienti deposizionali eolici:* l'ambiente si genera grazie all'attività dei venti, in particolare modo nei luoghi dove questi hanno modo e tempo di poter esercitare la loro azione: ambienti privi di vegetazione e aridi quali spiagge, pianure costiere e fluvio-glaciali. Grazie all'attività dei venti si possono formare dune separate da depressioni interdunali in ambienti costieri o dune separate da piane pietrose in aree desertiche. Il processo eolico, paragonato alla trazione acquatica, avviene per saltellamento nel caso della sabbia o per sospensione nel caso del limo. Negli ambienti eolici, si sviluppano elementi nastriformi, allungati e lenticolari (orientati parallelamente o trasversalmente alla direzione dei venti) intervallati da piane di deflazione o da livelli pelitici deposti in

aree acquitrinose. Le associazioni di *facies* sono costituite da sabbie fini arrotondate, mentre le concrezioni si sviluppano in corrispondenza delle radici delle piante. Le *facies* delle piane di deflazione sono residuali e composte da ciottoli, granuli e sabbie miste a limo argilloso (Fig. 21).

## Bibliografia

- BARHAM, A. J., MACPHAIL, R. I. (1995), *Archaeological Sediments and Soils. Analysis, Interpretation and Management*, Institute of Archaeology, University College, London.
- BARKER P. (1981), *Tecniche dello scavo archeologico*, Longanesi, Milano.
- BOSELLINI A., MUTTI E., RICCI LUCCHI F. (1989), *Rocce e successioni sedimentarie*, Utet, Torino.
- BROTHWELL D., HIGGS E. (1971), *Science in Archaeology*, Thames and Hudson, London.
- BUTZER K. W. (1964), *Environment and Archaeology*, Chicago University Press, Chicago.
- BUTZER K. W. (1982), *Archaeology as human ecology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- CARANDINI A. (1991), *Storie dalla Terra*, Einaudi, Torino.
- CAZZELLA A. (1989), *Manuale di archeologia*, Laterza, Roma-Bari.
- CLARK J. G. D. (1957) *Archaeology and Society*, Methuen, London.
- CLARKE D. L. (1978), *Analytical Archaeology*, Methuen, London.
- COKUTT, S. N. (1987), *Archaeostratigraphy: a Geoarchaeologist's Viewpoint*, in *Stratigraphica Archaeologica*, 2, pp. 11-18.
- COLLINSON J. D., THOMPSON D. B. (1989), *Sedimentary structures*, Chapman and Hall, London.
- CREMASCHI M. (1989), *Gli Apporti delle Scienze della Terra in Archeologia per la Ricostruzione degli Ambienti del Passato*, in *Atti della XXVII Riunione Scientifica Istituto Italiano Preistoria e Protostoria*, Ferrara, pp. 339-356.
- CREMASCHI M. (1990), *Geoarcheologia: Metodi e Tecniche delle Scienze della Terra nella Ricerca Archeologica*, in MANNONI T., MOLINARI A. (a cura di), *Scienze in Archeologia, Quaderni del Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti-Sezione Archeologia*, Università di Siena, pp. 395-422.

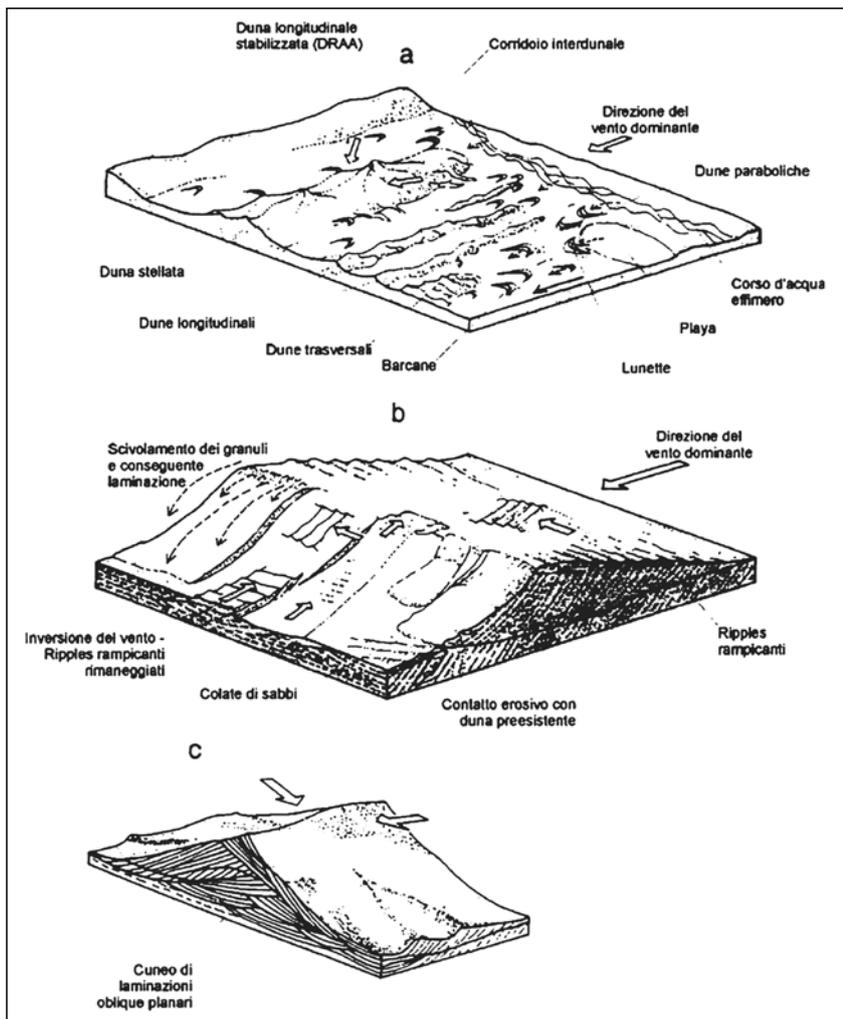


Fig. 21. Esempio di ambienti deposizionali eolici.

CREMASCHI M. (2000), *Manuale di Geoarcheologia*, Laterza, Roma.

DEVOTO G. (1985), *Geologia applicata all'Archeologia*, NIS, Roma.

EINSELE G. (1992), *Sedimentary Basins*, Springer Verlag, Stuttgart.

EVANS, J. G. (1978), *An Introduction to Environmental Archaeology*, Cornell University Press, Ithaca.

GÉ T., COURTY M. A., MATTHEWS W., WATTEZ J. (1993), *Sedimentary Formation Processes of Occupation Surfaces*, in GOLDBERG

P., NASH D. T., PETRAGLIA M. D. (a cura di), *Formation Processes in Archaeological Context, Monographs in World Archaeology*, 17, Prehistory Press, Madison, Wisconsin, pp. 149-164.

HARRIS E. C. (1983), *Principi di Stratigrafia Archeologica*, Nuova Italia Scientifica, Roma.

HERZ N., GARRISON E. G. (1998), *Geological Methods for Archaeologist*, Oxford University Press, Oxford-New York.

HOLLIDAY V. T. (1992), *Soils in Archaeology*, Smithsonian Institution Press.

HOLLIDAY V. T., STEIN. K. (1989), *Analytical techniques in archaeological sediments*, in *Geoarchaeology*, 4, pp. 347-358.

JENNY H. (1941), *Factors of Soil Formation*, McGraw-Hill, New York.

KRUMBEIN W. C., SLOSS L. L. (1963), *Stratigraphy and sedimentation*, Freeman, San Francisco.

KUKAL Z. (1971), *Geology of recent sediments*, Academic Press, London.

MACPHAIL R. I., COURTY M. A., GOLDBERG P. (1989), *Soils and micromorphology in Archaeology*, Cambridge University Press, Cambridge.

RAPP G. JR., GIFFORD J. A. (1985), *Archaeological Geology*, Yale University Press, New Haven-London.

RAPP G. JR., HILL C.L. (1998), *Geoarchaeology*, Yale University Press, New Haven-London.

READING H. G. (1996), *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*, Blackwell Science, Oxford.

REINECK H. E., SINGH I. B. (1980), *DEPOSITIONAL SEDIMENTARY ENVIRONMENTS*, Springer Verlag, Stuttgart.

RICCI LUCCHI F. (1970), *Sedimentografia*, Zanichelli, Bologna.

RICCI LUCCHI F. (1980), *Sedimentologia*, 3 voll., Clueb, Bologna.

RETAILLACK G. J. (1990), *Soils of the past*, Unwin-Hyman, London.

SANESI G. (1977), *Guida alla Descrizione del Suolo*, C.N.R., Firenze.

SELLEY R. C. (1978), *Ancient sedimentary environments*, Chapman and Hall, London.

### 3. La Pedologia

La Pedologia è la scienza che studia il suolo, il quale è soggetto a continue e costanti modifiche che si attuano attraverso i *processi pedogenetici* (*soil formation processes*) (Fig. 22). In Archeologia, i suoli hanno un ruolo importantissimo perché l'attività antropica influisce in maniera primaria sulla superficie terrestre e le prove documentarie che i dati archeologici ci lasciano si collocano, di solito, a pochi metri di profondità nel suolo e si inseriscono in un contesto pedogenetico, sedimentario e stratigrafico. Conoscere i suoli e la Pedologia è indispensabile per chi si avvicina alla Geoarcheologia. È, quindi, intuibile che per studiare i suoli occorre un approccio non convenzionale rispetto a quello utilizzato per rocce e sedimenti e che è specifico per la Pedologia.

#### 3.1. Definizioni di suolo e sue trasformazioni

Il suolo è un corpo naturale che si origina dal disfacimento e dalla trasformazione del substrato roccioso o *roccia madre* (*parental material*), il quale subisce innumerevoli processi fisici, chimici e biologici. Le caratteristiche del suolo dipendono da fattori esogeni ed endogeni e, infatti, in natura ne troviamo diversi, ma anche in uno stesso suolo possono avvenire trasformazioni repentine. Ciò vuol dire che il suolo non è un elemento fisso o statico, ma dinamico.

Il suolo può essere costituito da granelli di sabbia e frammenti di roccia di dimensione variabile, da materiale organico in disfacimento (sia vegetale sia animale), da vuoti che si generano tra i minerali stessi nel momento della loro aggregazione e dai colloidali che si distinguono in colloidali *minerali* (argille e silicati) e colloidali *organici* (humus).

È da sottolineare che non tutto il suolo partecipa in maniera "attiva" al processo di trasformazione; sono infatti i colloidali organici e inorganici a giocare questo ruolo. Queste sostanze, infatti, determinano la percentuale di acqua, minore o maggiore, che un suolo può assorbire e favoriscono la creazione di strutture minerali. L'*humus*, insieme

all'argilla, costituisce la vera azione assorbente del suolo.

#### 3.1.1 Profili e orizzonti del suolo (tipologia e proprietà degli orizzonti)

La gravità, in un suolo, agisce sul

movimento dell'acqua e dei componenti, creando variazioni più o meno importanti degli strati. Queste variazioni si individuano lungo la verticale e i suoli più antichi si possono suddividere in fasce orizzontali

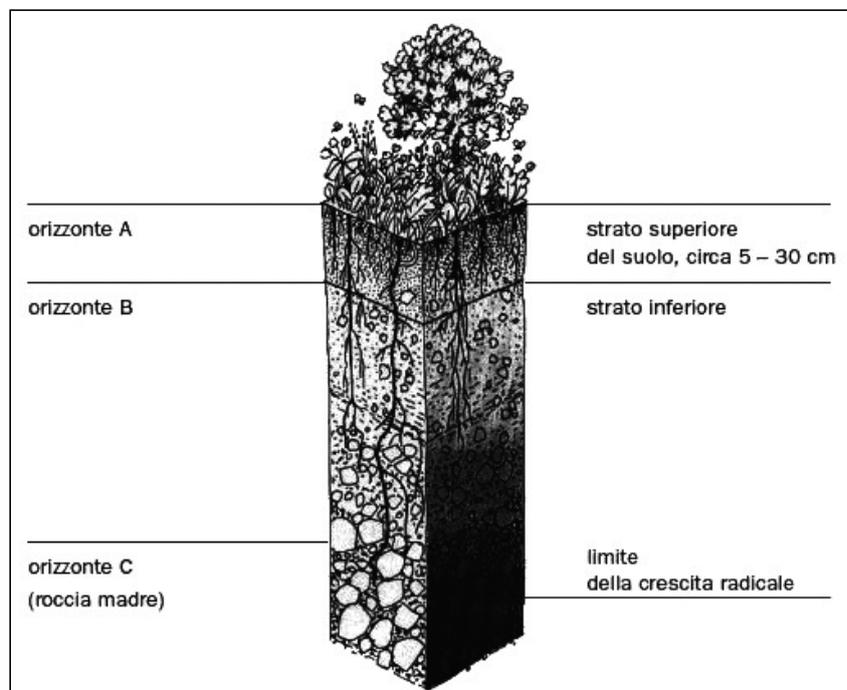


Fig. 22. Schema dei processi e dei profili pedogenetici, con indicazione degli orizzonti.

- |    |   |
|----|---|
| a  | presenza di materiale organico fortemente decomposto        |
| b  | orizzonte sepolto   |
| c  | presenza di concrezioni e noduli                            |
| d  | orizzonte con alta densità apparente                        |
| e  | presenza di materiale organico a decomposizione intermedia  |
| f  | presenza di ghiaccio (in permanenza)                        |
| ff | permafrost  |
| g  | gley-riduzione e rimozione del ferro                        |
| h  | accumulo illuviale di sostanza organica                     |
| i  | presenza di materiale organico leggermente decomposto       |
| j  | accumulo di jarosite (prodotto di alterazione della pirite) |
| jj | evidenze di crioturbazioni                                  |
| k  | accumulo di carbonati                                       |
| m  | cementazione o indurimento                                  |
| n  | accumulo di sodio   |
| o  | accumulo residuale di sesquiossidi                          |
| p  | disturbo da coltivazione                                    |
| q  | accumulo di silicio   |
| r  | orizzonte di roccia alterata                                |
| s  | accumulo illuviale di sesquiossidi e materia organica       |
| ss | presenza di slickensides (superfici di scivolamento)        |
| t  | accumulo di argilla   |
| v  | caratteristiche di plintite                                 |
| w  | sviluppo di colore e/o di struttura                         |
| x  | caratteristiche di fragipan (compattazione)                 |
| y  | accumulo di gesso   |
| z  | accumulo di sali più solubili del gesso                     |

Fig. 23. Tabella degli orizzonti secondo il *Soil Survey Staff* del 1998.

con il nome di orizzonti del suolo o *orizzonti pedologici*. Esaminando una sezione verticale di una scarpata, ad esempio, si riescono ad individuare svariati orizzonti che si differenziano per composizione chimica, mineralogica, colore e composizione. Più orizzonti formano il cosiddetto *profilo*. Nel 1998, è stata definita una convenzione internazionale per la lettura e la denominazione degli orizzonti, dal *Soil Survey Staff* (Fig. 23). Questo documento prevede che gli orizzonti debbano essere letti dall'alto verso il basso e indicati con lettere e numeri (ad esempio A, B, C, D). Questi sono identificati da lettere maiuscole, prefissi e suffissi alfanumerici: *Orizzonti O* (orizzonti organici in superficie); *Orizzonti A* (orizzonti minerali in superficie o al di sotto dell'Orizzonte O); *Orizzonti E* (orizzonti minerali, caratterizzati da perdita di materiale quale argilla, ferro, alluminio, al di sotto di un Orizzonte O o di un Orizzonte A); *Orizzonti B* (orizzonti minerali, caratterizzati dall'azione di *processi pedogenetici*, al di sotto di un Orizzonte O o di un Orizzonte A o di un Orizzonte E); *Orizzonti C* (orizzonti

minerali, caratterizzati da una debole alterazione del deposito. Infatti, la roccia madre è intaccata minimamente da processi trasformativi); *Strati R* (rocce litoidi, spesso dure e compatte oppure sciolte, che costituiscono la roccia madre inalterata. Si pongono al di sotto di tutti gli orizzonti). Per quel che riguarda i suffissi, questi indicano: *discontinuità litologiche o granulometriche* (A-E-2B); *particolari caratteri dell'orizzonte* (Af-Bm-Cq); *suddivisioni verticali di un orizzonte* (A-B1-C2). Per poter classificare i suoli vi è la necessità di stabilire dei criteri. La classificazione francese del 1967 (CPCS) rappresenta l'esempio più concreto e si basa sul riconoscimento dei processi genetici, articolandosi in dodici classi. La *Soil Taxonomy*, del 1975, è la classificazione elaborata dal Servizio Pedologico Statunitense, organizzata per gerarchie e basata sull'identificazione empirica dei singoli profili del suolo, con proprietà e caratteristiche proprie. Queste sono suddivise in sei livelli di gerarchia: *ordini* (11), *sottordini*, *grandi gruppi*, *sottogruppi*, *famiglie* e *fasi*. Questo sistema utilizza delle

*chiavi tassonomiche* nelle quali ci si può riferire a caratteristiche diagnostiche codificate. Così facendo, ad ogni suolo, attraverso le chiavi tassonomiche, è possibile attribuire un codice univoco. La classificazione FAO-UNESCO del 1974, ma rivista in seguito nel 1994, è una fusione tra la CPCS e la *Soil Taxonomy*.

Gli orizzonti si possono distinguere attraverso la *struttura* o *stato di aggregazione*, la *tessitura* (o *granulometria*), il *colore*, la *porosità*, le *concrezioni*, la *consistenza*, il *pH* e i *carbonati* e le cosiddette *figure pedologiche*.

La *struttura* o stato di *aggregazione*: quando le diverse particelle del suolo si aggregano fra loro formano la *struttura*; questa dipende soprattutto dal comportamento dei colloidali. Quando essi sono dispersi, la struttura è detta *elementare*, mentre quando si riuniscono la struttura si definisce *grumosa*. Infatti, il suolo si scinde in unità elementari o *aggregati*. Le unità sono separate da linee naturali caratterizzate da una loro specifica forma, dimensione e grado di aggregazione. Quest'ultimo indica la tendenza delle unità elementari o aggregati ad organizzarsi. Minore sarà l'adesione degli aggregati, minore sarà la loro aggregazione e di conseguenza, maggiore sarà l'adesione degli aggregati, più solida sarà la loro unione o aggregazione. Se gli aggregati sono assenti, il suolo si può considerare incoerente. Le dimensioni degli aggregati (granulari, poliedrici, prismatici, angolari) sono: *molto fini*, *fini*, *medie*, *grandi*, *molto grandi* (Fig. 24). La porosità, l'aerazione e la permeabilità del suolo incidono sulla grandezza degli aggregati.

La *tessitura* (o *granulometria*), fa riferimento alla dimensione (ripartizione e diametro) delle particelle costituenti il suolo. I diversi tipi di tessitura sono definiti a seconda del rapporto quantitativo tra sabbia, argilla e limo e tutte le loro particelle inferiori a 2 mm. All'interno di un suolo possono riscontrarsi particelle superiori a 2 mm: tutte quelle comprese tra 2 mm e fino a 25 cm costituiscono lo *scheletro*, mentre quelle oltre i 25 cm sono definite estranee e non vengono considerate nella definizione della tessitura. Questa,

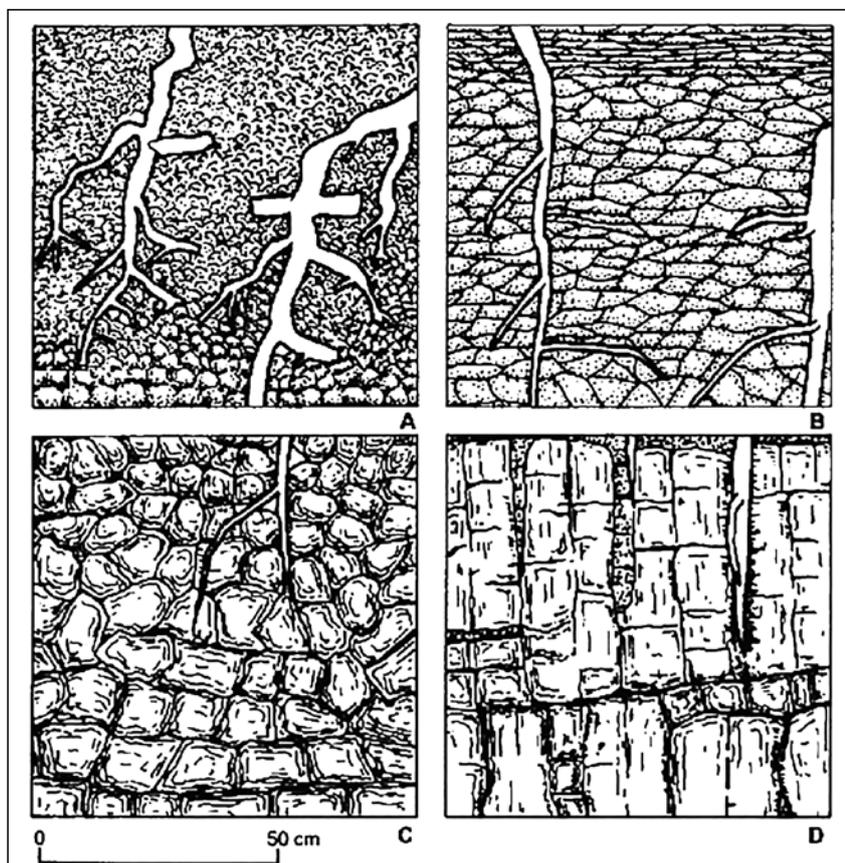


Fig. 24. Classificazione dei suoli aggregati: granulare (A); lamellare/lenticolare (B); poliedrica subangolare e angolare (C); prismatica (D).

Diametro delle particelle in $\phi$	Diametro delle particelle in mm	Definizione		
	> 256	Masso	Boulder	Rudite
256-	128	Ciottolo molto grossolano	Cobble	
128-	64	Ciottolo grossolano	Cobble	
64-	32	Ciottolo medio-grossolano	Pebble	
32-	16	Ciottolo medio	Pebble	
16-	8	Ciottolo medio-fine	Pebble	
8-	4	Ciottolo fine	Pebble	Arenite
4-	2	Granulo	Granule	
2-	1	Sabbia molto grossolana	Very coarse sand	
1-	1/2	Sabbia grossolana	Coarse sand	
1/2-	1/4	Sabbia media	Medium sand	
1/4-	1/8	Sabbia fine	Fine sand	
1/8-	1/16	Sabbia molto fine	Very fine sand	Pelite
1/16-	1/32	Silt grossolano	Coarse silt	
1/32-	1/64	Silt medio	Medium silt	
1/64-	1/128	Silt fine	Fine silt	
1/128-	1/256	Silt molto fine	Very fine silt	
	<1/256	Argilla	Clay	

Fig. 25. Tabella Granulometrica Udden-Wentworth.

inoltre, influenza l'umidità, l'areazione e la produttività di un orizzonte. La scala di riferimento per la misura delle particelle (sabbia, argilla e limo) è quella di Udden-Wentworth, modificata appositamente in base alle norme dell'International Soil Science Society (Fig. 25). La sabbia si divide in molto grossa, grossa, media, fine, molto fine (2 mm-0,063 mm). Il limo si divide in grosso, medio, fine, molto fine (0,0063 mm-0,002 mm). L'argilla è inferiore a 0,002 mm.

Il colore: è tra gli indicatori più importanti per distinguere un orizzonte da un altro e può dare informazioni sulla sua formazione e composizione. Quarzo, calcare, ges-

so sono presenti nei suoli bianchi; humus e solfuri nei suoli marroni o nerastri; ossidi di ferro e ematite nei suoli rossastri. L'utilizzo delle tavole Munsell del 1954 ci permette, grazie a tre valori, di determinare il colore di un orizzonte: Hue (colore dominante), Value (luminosità relativa) e Chroma (saturazione) (Fig. 26).

La porosità: la permeabilità del suolo di lasciarsi attraversare dall'acqua è collegata alla porosità del terreno che indica il volume degli spazi vuoti presenti nell'orizzonte. Questi vuoti si distinguono in pori e micropori (Fig. 27).

Le concrezioni: sono le concentrazioni di carbonato di calcio, ossidi di ferro, manganese che si presentano come grani e noduli induriti

La consistenza: influenzata dalla presenza dell'acqua, è la resisten-

za alla deformazione e alla frattura. Questa deve essere misurata sul terreno o in laboratorio affinché il campione mantenga le sue proprietà. Così facendo, si può stabilire se l'orizzonte possa aderire ad altri corpi (orizzonte adesivo), se possa deformarsi e mantenere la nuova forma (orizzonte plastico) o se possa sciogliersi o rompersi.

Il pH e i carbonati: il pH del suolo rappresenta la concentrazione di ioni H<sup>+</sup>. Un suolo risulta acido con pH compreso tra 4 e 7, mentre uno alcalino ha un pH tra 7 e 9. Un campione di suolo, trattato con HCl diluito 1:5, si stima in base all'intensità dell'effervescenza che emette. È una valutazione empirica che stima il contenuto in carbonati fino ad un massimo del 10%. Maggiore è l'effervescenza, più alta sarà la percentuale di carbonati.

Le figure pedologiche: sono quegli elementi, risultanti da processi pedogenetici passati o presenti, che si osservano a occhio nudo o con una lente d'ingrandimento e che si collocano all'interno del suolo, sulla superficie delle unità elementari o all'interno dei pori.

### 3.1.2 I fattori pedogenetici e la pedogenesi

La formazione degli orizzonti o pedogenesi deriva dall'azione di fattori quali il substrato geologico, il tempo, il clima, la morfologia, e la vegetazione.

Il substrato: substrati costituiti da elementi grossolani, di diversa com-

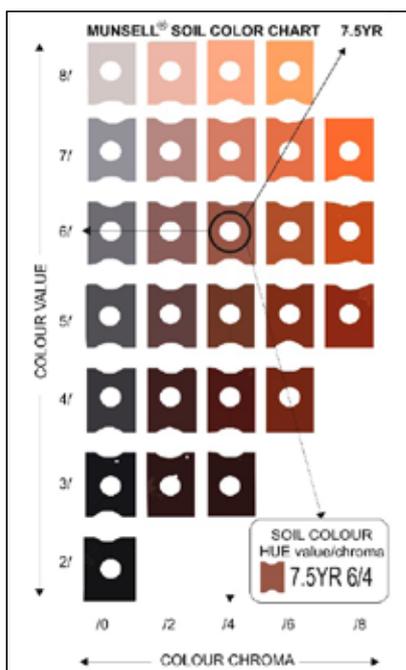


Fig. 26. Soil Colour Munsell per la Geologia con la tabella relativa dei colori.

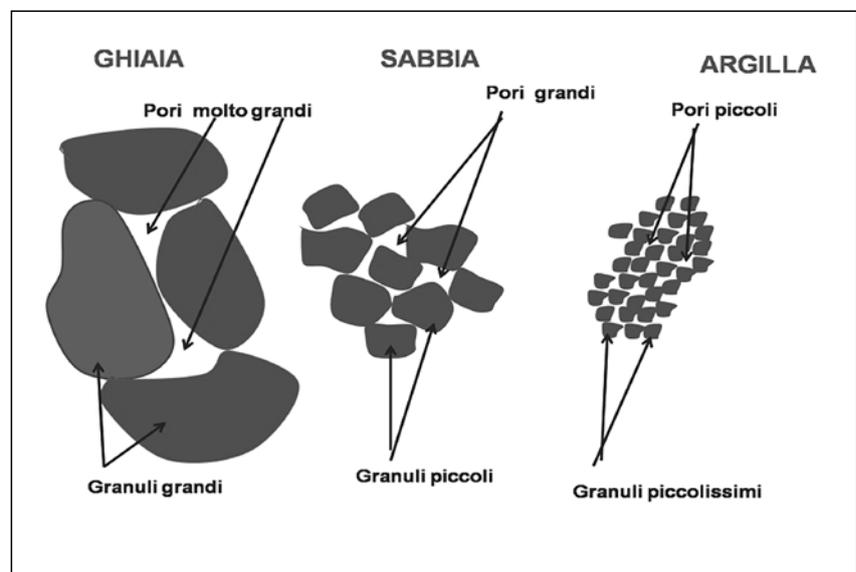


Fig. 27. Differenza di porosità tra ghiaia, sabbia e argilla.

posizione chimica e permeabili, favoriscono la pedogenesi. La pioggia, infatti degrada le rocce eterogenee e, attraverso la permeabilità, permette l'eluviazione. Dallo stesso substrato possono anche originarsi suoli completamente diversi mediante i vari processi pedogenetici.

Il *tempo*: il suolo antico ha un profilo pedologico molto ben sviluppato e non subisce alterazioni, rispetto ad un suolo giovane. Questo vuol dire che l'orizzonte ha raggiunto equilibrio con l'ambiente (a seconda del substrato, del clima e dell'azione dell'uomo) ovvero il suo *climax*.

Il *clima*: temperatura e precipitazioni influenzano la pedogenesi. La temperatura agisce in due modi: favorisce la degradazione meteorica e affretta la decomposizione della materia organica. Le piogge condizionano i processi di eluviazione: questa, attraverso l'acqua, facilita l'attività biologica e il processo di scambio tra ioni e colloidali argillosi

La *morfologia*: laddove l'acqua piovana tende ad infiltrarsi scarsamente nel suolo in condizioni di maggiore pendenza della superficie, avremo suoli con spessore molto sottile. Invece, in zone pianeggianti o subpianeggianti, le acque di dilavamento si muovono meno velocemente rispetto a zone di rilievo e i suoli hanno uno spessore maggiore.

La *vegetazione*: la flora modifica il microclima e la sua decomposi-

zione favorisce l'origine dell'humus. Nelle prime fasi della pedogenesi, i batteri, le alghe, i licheni e i funghi si nutrono dei minerali fino a decomporli, prima attraverso la produzione di acidi organici e acido carbonico e poi in base alla loro capacità di assorbimento di acqua. Anche i batteri hanno un ruolo nella pedogenesi del suolo, contribuendo alla decomposizione della materia organica, mentre le piante scambiano col suolo le sostanze chimiche presenti nella biosfera attraverso le radici, influenzando in questo modo anche sulla formazione dell'humus.

I *fattori pedogenetici* si possono relazionare alla dimensione del suolo secondo la formula di Jenny (intorno agli anni 40 del '900), dal nome dello scienziato svizzero Hans Jenny:  $s = f(c, o, r, p, t)$ . Il suolo (s) è costituito da una serie di fattori quali il clima (c), gli organismi (o), il rilievo (r), la roccia madre o il parental material (p) e il tempo (t). Venti anni dopo la perfezionò:  $s, v, a = f(L_0, P_x, t)$  dove l sta per (proprietà dell'ecosistema), s (proprietà del suolo), v (proprietà della vegetazione), a (proprietà della vita animale),  $L_0$  (valore delle proprietà al tempo zero o inizio della pedogenesi),  $P_x$  (potenziali di flusso) e t (età dell'intero sistema).

### 3.1.3 I processi pedogenetici

Il suolo subisce continuamente scambi di energia e materia e questi

condizionano i processi di trasformazione e orientamento all'interno del suolo stesso (Fig. 28).

Nei suoli sono presenti corpi solidi costituiti da sostanze organiche (in particolare humus), da argille minerali e ossidi e idrossidi di ferro e alluminio: tra queste sostanze si possono stabilire "ponti" che danno luogo a *composti argillo-humici*, o *complesso di scambio*, che rappresenta uno dei principali meccanismi con cui il suolo trattiene e mette a disposizione delle piante e dei microrganismi elementi e microelementi.

È poco comune che un processo pedogenetico possa agire da solo. I principali processi pedogenetici sono: l'*addizione*, la *traslocazione*, la *trasformazione*, la *rimozione di materiali organici ed inorganici*. Tra i fattori di addizione abbiamo: l'*arricchimento* (aggiunta di materiali o aumento della loro concentrazione residuale), la *cumulizzazione* (accumulo, a causa dei fenomeni eolici e idrici, di materiali sul suolo), il *litterin* (accumulo in superficie di sostanza organica, ovvero formazione della "lettiera", una mistura di resti vegetali e animali in decomposizione). Tra i fattori di traslocazione abbiamo: l'*eluviazione* (decadimento ed uscita di materiali da una parte del profilo), l'*illuviazione* (aumento ed ingresso di materiali in una parte del profilo, per cui si hanno orizzonti illuviali), la *decalcitazione*

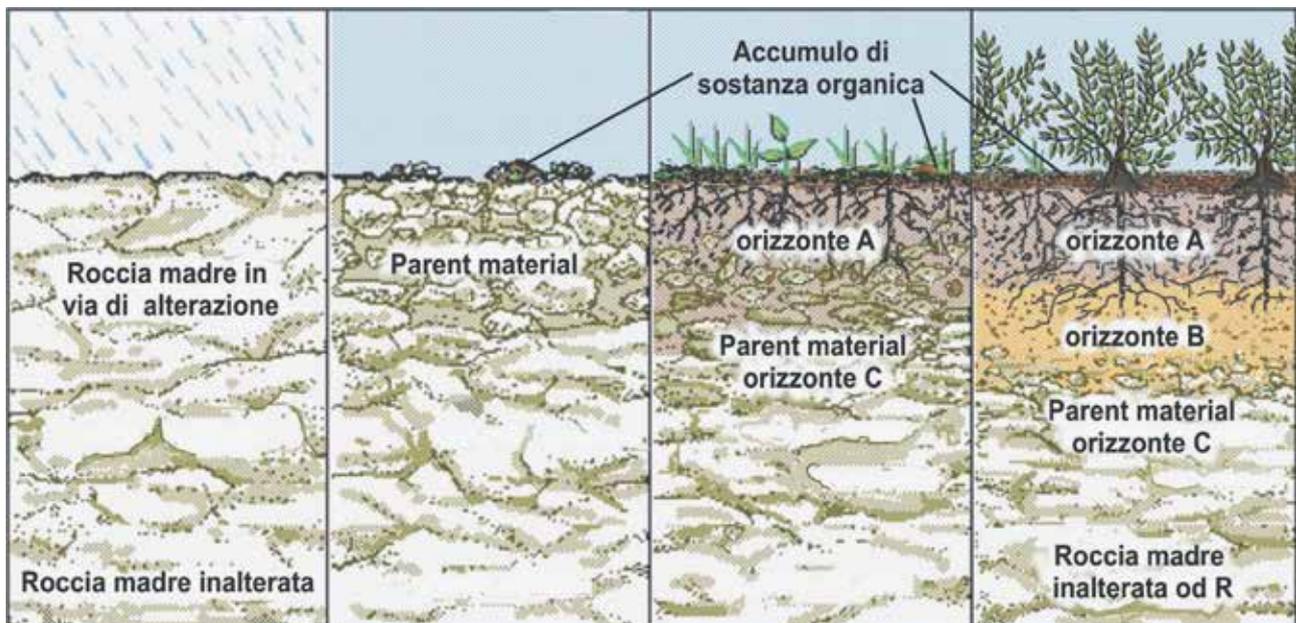


Fig. 28. Evoluzione del suolo, in base al susseguirsi di fattori pedogenetici.

(diminuzione di  $\text{CaCO}_3$  o decarbonatazione), la *calcitazione* (precipitazione di  $\text{CaCO}_3$  o carbonatazione), la *salinizzazione* (accumulo di sali di  $\text{CaCO}_3$ ), la *desalinizzazione* (rimozione di sali di  $\text{CaCO}_3$ ), l'*alchilazione* (saturazione del processo di scambio di un suolo con Na), la *dealchilazione* (desaturazione del complesso di scambio di un suolo con Na), la lisciviazione *lessivage* (trasporto delle argille e di minerali ed elementi chimici da un orizzonte superiore ad un altro), la *pedoturbazione* (rimescolamento del suolo) e la *leucizzazione* (decolorazione del suolo superficiale). Tra i fattori di trasformazione abbiamo l'*alterazione* (dissoluzione graduale della frazione minerale e organica del suolo), la *sintesi* (formazione di argille e di componenti umiche), l'*umificazione* (alterazione della sostanza organica in humus), la *paludizzazione* (accumulo di torbe in ambienti umidi),

la *fermentazione* (mineralizzazione parziale della sostanza organica), la *brunificazione* (modifica del colore a causa del rilascio di ferro dei minerali presenti nel terreno e/o maggiore assorbimento di composti del ferro bruni), la *rubefazione* (modifica del colore a causa dell'assorbimento o colorazione di composti di ferro rossi), la *ferruginazione* (modifica del colore a causa dell'arricchimento e/o assorbimento di goethite).

Tra i fattori che riguardano rimozione di materiali organici ed inorganici abbiamo l'*erosione* (asportazione di materiali degli orizzonti). Esistono anche processi pedogenetici che possono includere più fattori contemporaneamente come la *podzolizzazione* (spostamento di ferro o di sostanze organiche in profondità e di quarzo o altri minerali inalterabili in superficie), la *laterizzazione* (spostamento di silice in profondità e di elementi calcarei in superficie),

la *melanizzazione* (colorazione nera, a causa dell'humus, dell'orizzonte superficiale), la *gleyzzazione* (cambio del colore dell'orizzonte, a causa della riduzione del ferro, in ambienti sommersi o semi sommersi).

### 3.2. I paleosuoli e il ruolo della pedogenesi nella formazione dei depositi archeologici

Secondo la definizione di Ruhe, del 1956, si intende, per *paleosuolo*, un suolo sepolto o relitto che si è formato nel passato e riconoscibile grazie al profilo o alla sua posizione geomorfologica, nel caso esso sia connesso ad antiche superficie topografiche. È possibile distinguere i paleosuoli in: *sepolti*, *relitti* e *originati da processi pedogenetici*.

Il *paleosuolo sepolto* è detto anche geosuolo o suolo fossile (Fig. 29). È un corpo pedogenetico incluso in successione stratigrafiche, ovvero coperto da strati sedimentari molto spessi. Il *paleosuolo relitto* è un suolo che si è generato a seguito di processi pedogenetici del passato e non più in evoluzione (Fig. 30). Il *paleosuolo originato da processi pedogenetici* è quello che contiene al suo interno più processi pedogenetici avvenuti in tempi diversi e questi si possono suddividere in paleosuoli *policiclici* (suoli costituiti da processi pedogenetici che si sono susseguiti nel medesimo substrato pedogenetico), *composti* (suoli che si sono composti a partire da due depositi sedimentari diversi e ben distinti con fasi pedogenetiche indipendenti l'una dall'altra), *complessi* (suoli originati da due o più depositi interessati singolarmente da una fase pedogenetica indipendente) e *vetusuoli* (Fig. 31) (detti suoli antichi, di notevoli dimensioni, condizionati e soggetti ad agenti meteorici e, di conseguenza, ancora oggi attivi). Non è così semplice datare i paleosuoli e capirne il grado di evoluzione, ma esistono dei metodi come ad esempio l'*indice di sviluppo del suolo* (confronto tra le proprietà del suolo e quelle del substrato), la *profondità del fronte di decarbonatazione* (che aumenta nel tempo), i *rapporti tessiturali* (si pongono in relazione i rapporti tra le diverse frazioni granulometriche), l'*indice di alterazione* (si basa sul confron-



Fig. 29. Paleosuolo sepolto.



Fig. 30. Paleosuolo relitto.



Fig. 31. Esempio di Vetusuolo.

to tra gruppi di minerali stabili e instabili), l'indice di arrossamento (si raggiunge combinando aritmeticamente le numerazioni secondo il colore dei codici di Munsell), il ferro attivo (rapporto tra il ferro amorfo e il ferro cristallino all'interno del suolo) e la percentuale residua degli elementi (indice di stabilità chimica che si ottiene mettendo a confronto gli elementi stabili negli orizzonti pedologici rispetto al loro substrato pedogenetico).

In Geologia, ma soprattutto in Archeologia, i suoli e, in particolare, i paleosuoli sono una potenziale sorgente di informazioni. Molti studiosi suggeriscono di utilizzare i depositi come marker stratigrafici, mentre altri come indicatori paleo-ambientali. Proprio in questa direzione, le sezioni pedostratigrafiche, che si sono create e sviluppate su stratificazioni geomorfiche stabili e con tracce di antropizzazione, sono utilissime per comprendere in maniera più precisa i processi genetici e le condizioni climatiche che hanno portato all'evoluzione del territorio durante il Quaternario. Elementi quali fattori favorevoli, un deposito archeologico cronologicamente inquadrato e la presenza di uno strato deposizionale evoluto possono spingere il geoarcheologo ad uno studio pedologico dettagliato di un

sito archeologico. Ed è così che la pedostratigrafia e la paleopedologia possono essere di estremo aiuto, sia per i geologi sia per gli archeologi, nell'interpretare le sezioni stratigrafiche di un paleosuolo antico. Immaginiamo una concomitanza fra paleosuoli, depositi quaternari e reperti archeologici; questi ultimi saranno importantissimi per poter datare e inquadrare cronologicamente e stratigraficamente i paleosuoli.

#### Bibliografia

BIRKELAND P. W. (1974), *Pedology, Weathering and Geomorphological Research*, Oxford University Press, London.

BONNEAU M., SOUCHIER B. (1979), *Constituants et Propriétés du Sol*, in *Pédologie*, 2, Masson, Paris.

BOS R. H. G. SEVINK J. (1975): *Introduction of gradational and pedomorphic features in descriptions of soils*, in *Journal of Soil Science*, 26, pp. 223-233.

BUTLER B. E. (1959), *Periodic phenomena in Landscapes as a basis for Soil Studies*, in *Soil Publication*, 14, CIRSO.

CORNWALL I. W. (1958), *Soils for the Archaeologist*, Phoenix House, London.

CREMASCHI M. (2000), *Manuale di Geoarcheologia*, Laterza, Roma.

DOUGLAS L. A., THOMPSON M.

L. (1985), *Soil Micromorphology and Soil Classification*, in S.S.S.A. *Special Publication*, 15.

DUCHAUFOR P. (1977), *Précis de Pédologie*, Masson, Paris.

DUCHAUFOR P. (1983), *Pédologie 1: Pédogenèse et Classification*, Masson, Paris.

DUCHAUFOR P. (1995), *Pédologie. Sol, Végétation, Environnement*, Masson, Paris.

ERHART H. (1967), *La genèse des sols en tant que phénomène géologique*, Masson et cie, Paris.

FAO-UNESCO (1994), *Soil Map of the World. Revised Legend with Corrections*, International Soil Reference and Information Center, Wageningen.

FAVI E., COSTANTINI E. A. C. (1991), *Pedologia applicata alla valutazione del territorio*, in Cremaschi M., Rodolfi G. (a cura di), *Il suolo*, Carocci, Roma, pp. 319-370.

FITZPATRICK E. A. (1980), *Soils*, Longman, London-New York.

HODGSON J. M. (1976), *Soil Survey Field Handbook. Describing and Sampling Soil Profiles*, in *Soil Survey Technical Monograph*, 5, Harpenden.

KUBIÈNA W. L. (1938), *Micro-pedology*, Collegiate Press, Ames, Iowa.

MACRAE S. (1991), *Pedologia pratica*, Zanichelli, Bologna.

## 4. La Micromorfologia

La *Micromorfologia* fa parte del settore della Pedologia e si occupa dello studio dei suoli in sezione sottile e in particolare è utile per indagare i processi di alterazione dei minerali e di formazione del suolo. La *Micromorfologia* associata all'Archeologia, alla descrizione del terreno e ad altre metodologie di laboratorio, consente di ipotizzare informazioni sui processi pedogenetici e sull'ambiente di formazione dei depositi archeologici, sugli agenti e sui processi responsabili della sua genesi e delle possibili modificazioni, naturali o artificiali, successive all'origine del deposito. La *Micromorfologia* è utilizzata come strumento aggiuntivo nel caso in cui non è immediato stabilire la cronologia di un deposito archeologico complesso; in Geoarcheologia, invece, ha due specifiche applicazioni: per le ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali e per i processi di formazioni dei siti archeologici e degli strati (analisi delle figure pedologiche e di specifiche attività antropiche).

### 4.1 La campionatura, le sezioni sottili e la schedatura

Alla base della Micromorfologia, vi è lo studio dei campioni di suolo, attraverso i quali riusciamo a determinare la sua genesi.

#### 4.1.1. La campionatura e le sezioni

I campioni da utilizzare per l'analisi microstratigrafica non devono

subire alterazioni durante il loro prelievo, in maniera tale che tutti gli elementi che costituiscono il suolo conservino la loro posizione deposizionale originale. Il campione, oltre a non subire alterazioni esterne, deve mantenere il suo orientamento originale (la disposizione spaziale dei diversi strati è fondamentale per stabilire i rapporti temporali fra gli stessi e per carpirne i processi evolutivo-genetici); questo è indicato con una freccia posta in direzione della superficie topografica, se possibile incisa sul campione stesso e scritta sul box che lo contiene. Il suolo, per sua genesi, è incoerente e friabile; per questo motivo deve essere sezionato attraverso una procedura specifica, ovvero la preparazione delle *sezioni sottili*. La procedura consiste, in prima istanza, nella messa in sottovuoto del campione, così da saturarne la porosità e per fissarne ogni particella mediante l'utilizzo di resine sintetiche (poliestere, resine epossidiche, metil-metacrilato) che devono essere incolore e isotrope. Una volta che queste si sono cementificate (dopo circa 4-5 settimane), è possibile tagliarle, smerigliarle e lucidarle. Considerato il costo elevato dell'uso di resine sintetiche, è consigliabile prelevare pochi campioni e in maniera corretta.

Un metodo è quello della *semplice estrazione*; utilissima nei casi di suoli molto duri. Si procede estraendo il campione senza creare fratture o lesioni, si imballa nella carta, si sigilla e si etichetta. Un secondo

metodo è quello dell'estrazione attraverso l'utilizzo di *bende di gesso* umide, per poter lavorare meglio sul campione estratto. Il metodo più utilizzato è quello delle *scatole di Kubierna* (Fig. 32); sono piccoli box metallici in acciaio, aperti su due lati. La scatola, mediante pressione sulla superficie da analizzare, permette di estrarre una porzione di campione intatta. Occorre ripulire i bordi con una cazzuola (non devono essere presenti tracce di suolo esterno al box), sigillare e etichettare la scatola. L'uso delle scatole di *Kubierna* non si può applicare agli strati rocciosi.

Una volta tagliato il campione, si ottengono le *sezioni sottili*: queste sono costituite da lamine molto sottili che si montano e si fissano su dei vetrini. Le sezioni possono essere coperte da un ulteriore vetrino o rimanere scoperte (in questo modo sono più delicate, ma è possibile effettuare sul campione dei trattamenti speciali per specifiche analisi). Le dimensioni di una sezione sottile sono variabili: 28x48 mm (*sezione petrografica*); 90x60 mm (*sezione ¼ mammut*); 120x90 mm (*sezione ½ mammut*); 180x120 mm (*sezione mammut*). Come si osservano le sezioni sottili? Grazie al *microscopio petrografico*. Questo è lo strumento fondamentale per lo studio delle sezioni sottili; il campione si poggia sul suo tavolino girevole e viene osservato attraverso due filtri polarizzati, detti *Nicols*, posti lungo il percorso della luce. Uno sotto al polarizzatore e l'altro sopra l'analizzatore del tavolino. Se le due lenti sono parallele tra loro, l'osservazione della sezione sottile avviene in *luce polarizzata*, mentre se sono disposte perpendicolarmente si parla di osservazione in *luce incrociata*.

#### 4.1.2 Schede, sistema descrittivo dei costituenti in micromorfologia e loro interpretazione

Come si descrivono le sezioni sottili? Esiste una metodologia precisa? Le sezioni sottili si descrivono attraverso la stesura di schede schematizzate che sono soggettive da operatore ad operatore, in base alla sua esperienza e alle sue conoscenze. Non esiste, dunque, una scheda canonica, ma una scheda indicativa con le principali informazioni de-



Fig. 32. Metodo di estrazione del campione con le scatole di *Kubierna*.

scrittive che occorrono per dare una identità ad un campione e per indicare da cosa è costituito. La prima norma fu suggerita da Brewer nel 1976; nel 1985, grazie a Bullock e altri studiosi, fu proposta una codificazione internazionale (l'*Handbook for Soil Thin Section Description*). Queste norme non sono utilizzabili in ambito geoarcheologico, perché sono fatte *ad hoc* per i suoli e non per i depositi archeologici. I primi tentativi, in questa direzione, sono stati compiuti nel 1989 da Courty, Golberg e Macphail.

Quali sono le informazioni base di una scheda descrittiva (Fig. 33) e come si identificano i costituenti di un campione? Sicuramente la *dimensione*, la *frequenza*, la *forma*, la *rugosità*, l'*orientamento* e la *distribuzione* per ogni classe di individui (*di base*, rispetto ad altri individui dello stesso tipo; *riferita*, rispetto a specifici riferimenti; *relativa*, rispetto a individui di tipo differente). Un costituente di un campione si può analizzare su tre diversi livelli di accuratezza: *descrizione*, *comparazione* e *misura*.

L'*Handbook for Soil Thin Section Description* fa un elenco dei concetti principali del sistema descrittivo. La *fabric* è l'organizzazione totale e complessiva di un suolo che si esprime

me mediante la struttura spaziale di tutti i suoi componenti, la forma, la dimensione e la frequenza.

Per quel che riguarda la Geoarcheologia, sono specifiche alcune applicazioni come ad esempio la *genesì del suolo* (la Micromorfologia è fondamentale per identificare le figure pedologiche e i processi che ne hanno determinato la loro origine), la *ricostruzione paleoambientale* (il paleosuolo rappresenta il racconto storico del processo di superficie) e la *ricostruzione dei processi di formazione dei siti* (grazie all'utilizzo del microscopio e alla lettura stratigrafica dei depositi archeologici si è riusciti a riconoscere le tracce delle attività antropiche e a escludere le attività postdeposizionali di origine naturale).

#### 4.2 Aspetti micromorfologici dei processi genetici

Diversi sono gli aspetti micromorfologici dei processi genetici, di seguito elencati.

*Traslocazione di argilla*: le particelle argillose si accumulano all'interno degli orizzonti argillosi e in sezione sottile si contraddistinguono da rivestimenti e/o riempimenti di argilla sulla superficie o all'interno dei vuoti. Al microscopio si vedranno delle striature ortogonali alla

laminazione, separate dalla *massa di fondo*. I minerali contenuti nelle argille e la presenza di ossidi caratterizzeranno il colore del suolo.

*Precipitazioni di carbonati*: sono delle figure pedologiche costituite da cristalli di calcite diffusi nella matrice su diversi livelli.

*Alterazione geochimica spinta*: questo processo si verifica quando nel suolo mancano minerali alterabili e si trova argilla non illuviale, di colore rossastro, in quantità superiore al 15%.

*Alterazione pedologica moderata*: si genera quando l'orizzonte è caratterizzato da una aggregazione poliedrica fine e dalla presenza di granuli minerali in via di alterazione.

*Podzolizzazione*: nelle sezioni sottili, sulla superficie dei granuli, si riconoscono rivestimenti di materia organica e ossidi di ferro con fratture perpendicolari (Fig. 34).

*Vertisolizzazione*: i suoli sono caratterizzati dalla presenza di superfici di frizione, mentre i vuoti sono planari; le figure pedologiche sono distorte, non incorporate nella *massa di fondo* e i noduli sono precisi e rotondeggianti.

*Idromorfia*: questo processo investe i materiali interessanti da fenomeni di ristagno delle acque e dà origine ad una *massa di fondo* con colori scuri e saturi, dalla presenza di rivestimenti e noduli e un suolo composto da ossidi di ferro.

*Materiali vulcanici*: gli orizzonti creatisi durante fenomeni vulcanici hanno una notevole porosità e, di conseguenza, una microstruttura granulare e spugnosa, a seconda

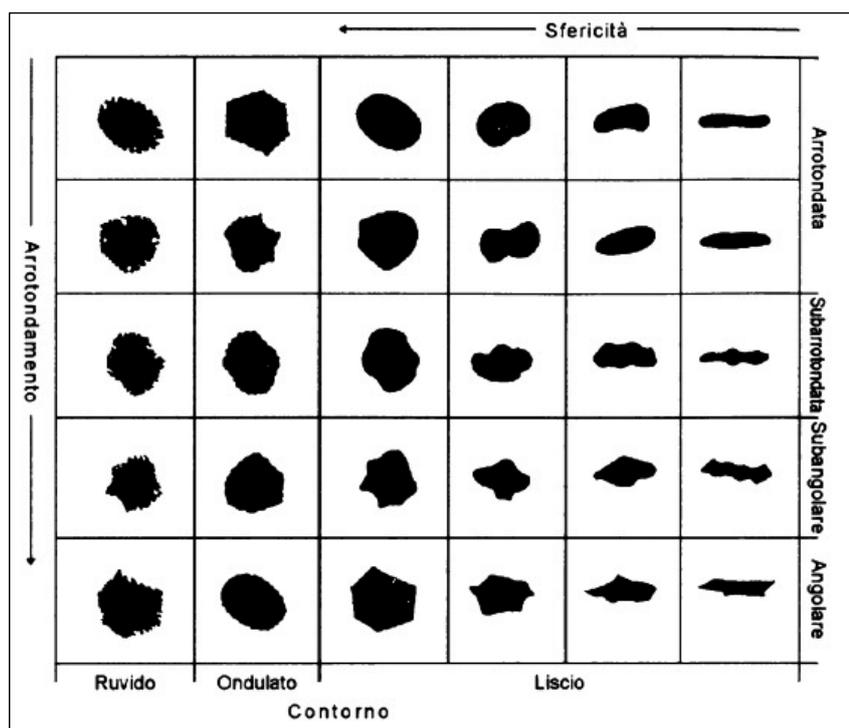


Fig. 33. Diagramma che illustra la stima della forma, l'arrotondamento, la sfericità e rugosità delle particelle.



Fig. 34. Strati di suolo podzolizzato.

dei casi. Le figure pedologiche sono rare.

#### 4.3. La micromorfologia per la ricostruzione paleoambientale e per lo studio dei depositi archeologici. Le superfici di occupazione

Da quanto descritto fino ad adesso, gli orizzonti, come in un database, raccolgono tutte le variazioni ambientali che hanno determinato la creazione dei suoli. In particolare modo, l'alternarsi di fasi glaciali e interglaciali ha dato origine, rispettivamente a suoli ricchi di vegetazione e a suoli aridi e più soggetti, quindi, ad erosione. Sulla determinazione degli orizzonti, non incidono unicamente fenomeni di origine naturale, ma anche fenomeni di natura antropica come la deforestazione, l'agricoltura e l'attività di cava. Questi cambiamenti nel suolo possono essere studiati e compresi attraverso la Micromorfologia; le cosiddette *figure micromorfologiche*, caratterizzate da processi di degradazione, sono molto importanti per la ricostruzione paleoambientale come ad esempio quelle *stimolate dal gelo*, dall'*illuviazione grossolana* e dall'*aridificazione*. Ultime, ma non meno importanti, sono le *figure relitte* e le *croste calcaree*.

Le *figure stimulate dal gelo*: l'acqua, quando la temperatura diminuisce, si distribuisce al suolo su una superficie piatta e parallela a quella topografica. L'acqua passa da uno stato liquido ad uno solido, con la creazione di piccole lenti di ghiaccio di pochi mm (*ice lensing*). Questo causerà la deposizione sul fondo di lenti di materiale fine, mentre in superficie troveremo materiale grossolano. Al disgelo, il materiale grossolano ricoprirà, come con un rivestimento (*capping*), il materiale fine. Le figure stimulate dal gelo sono utilissime per studiare i fenomeni di gelo e disgelo legate ai periodi glaciali e interglaciali.

*L'illuviazione grossolana*: queste figure, costituite da limo e sabbia fine, possono muoversi all'interno del profilo per gravità e sono simbolo di instabilità dell'orizzonte. In questo caso, i rivestimenti grossolani si alternano ai rivestimenti di natura argillosa, con conseguente alternarsi di condizioni di degradazione e stabilità.

*L'aridificazione*: questo processo si verifica nelle aree desertiche, dove gli orizzonti hanno subito diversi cicli di condizioni umide alternate allo sviluppo di aree vegetate. Questo alternarsi ha determinato la formazione del suolo in condizioni aride e iperaride. Nonostante gli effetti dell'aridificazione, alcuni livelli di suolo resistono e sopravvivono ed è possibile osservarli, a livello microscopico, attraverso rivestimenti limoso-argillosi che si sovrappongono a rivestimenti argillosi delle fasi umide.

*Le figure relitte*: Brewer, nel 1964, classifica tre tipologie di figure relitte: *litorelitti*, *pedorelitti* e *papulae*. I primi sono frammenti di roccia del substrato che si aggiungono al suolo; i secondi sono frammenti di suolo preesistente che si sono integrati nella *massa di fondo* di suoli nuovi; le *papulae* sono, invece, frammenti di argilla che si sono inglobati nel suolo.

*Le croste calcaree*: testimoniano uno stato di indurimento di materiale carbonatico e si formano per risalita capillare delle acque che portano, in superficie, sali disciolti al momento dell'evaporazione. Le *croste calcaree* indicano delle fasi di aridità più o meno elevata.

In ambito archeologico e più prettamente geoarcheologico, la *Micromorfologia* è stata utilizzata a partire dagli anni '50, sia in macro-contesti sia in micro-contesti, dove per macro-contesti si intende l'intervento dell'uomo su larga scala (disboscamento, pratiche agricole, attività di cavatura), mentre i micro-contesti sono legati all'attività dell'uomo su piccola scala (legate alla presenza di siti archeologici). Anche nella micromorfologia applicata all'archeologia, esistono *figure micromorfologiche* che aiutano a comprendere meglio diversi fenomeni: quelle legate all'*uso del suolo*, ad *attività nei siti abitativi* e ai *focolari*.

*Figure micromorfologiche legate all'uso del suolo* (Fig. 35): la deforestazione, grossomodo, è una pratica diffusa dal Neolitico e per l'Italia Settentrionale, nel Calcolitico. Con l'agricoltura, il suolo e le sue condizioni divennero essenziali, se non vitali, per lo sviluppo delle comunità rurali. Attraverso l'Etnoarcheologia e la comparazione tra le attività umane condotte in passato e quelle condotte in epoca moderna, è stato possibile riconoscere lo *slash and burn* (sradicamento delle piante e il taglio con incendio del materiale legnoso) praticato in età Preistorica e Protostorica. Su macro-scala è stato possibile riconoscere le buche circolari di forma irregolare, carat-

teristiche di un focolare domestico attuale (D).

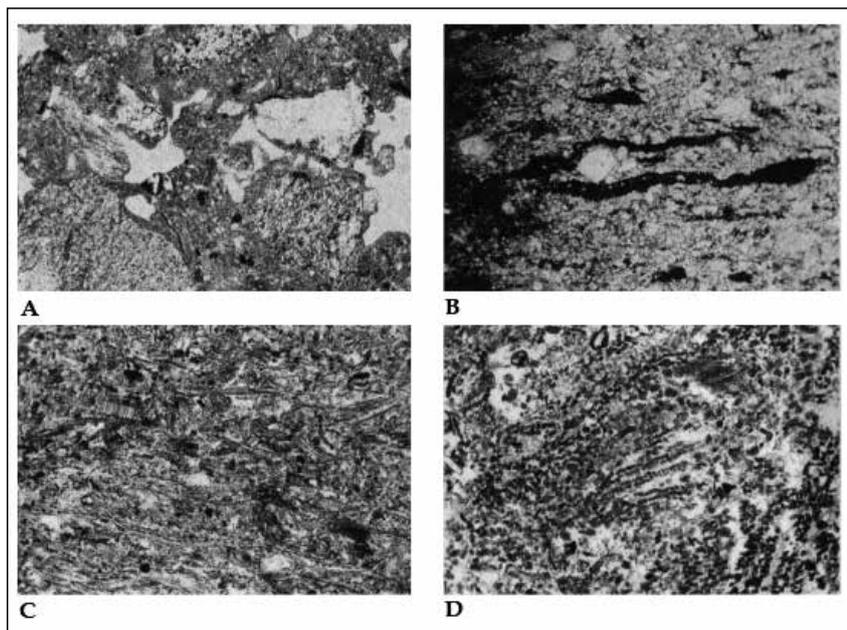


Fig. 35. Rivestimenti grossolani microlaminati collegati ad attività agricole (A); Sottili livelli planari costituiti da fitoliti isorientati (estinti) e sferuliti calcitici (B); Microfotografia di un accumulo di fitoliti e di fibre vegetali carbonizzate, disposti in sottili livelli planari, pertinente a paglia e foraggio combusto (C); Microfotografia di un livello di cenere appartenente ad un focolare domestico attuale (D).

terizzate da un riempimento composto da frammenti di suolo bruciati e tracce di ceppaie incendiate. Arature e livellamento del terreno sono più complessi da riconoscere; un elemento diagnostico che aiuta a comprendere se un terreno è stato lavorato o meno è la concimazione, in uso dall'Età del Bronzo. L'analisi al microscopio delle sezioni sottili è utilissima per distinguerne le modalità: infatti, la presenza di *litorelitti*, frammenti di ceramica e resti vegetali, fitoliti e cenere (connessi all'incendio di stoppie di cereali) ci aiuta a capire se un terreno ha subito modifiche chimiche e fisiche legate alla concimazione del suolo.

*Figure micromorfologiche legate ad attività nei siti abitativi:* la micromorfologia ha dato un forte contributo nello studio dei depositi in grotta e in siti all'aperto. Questi livelli deposizionali interpretati, inizialmente, come focolari o livelli di frequentazione del sito, contenevano coproliti e resti vegetali legati all'accumulo del foraggio e all'allevamento di animali. Lo studio delle sezioni sottili ha messo in evidenza i residui fecali degli erbivori, rappresentati da frammenti di piante non digerite, sostanze organiche amorphe, cereali e graminacee. I coproliti dei bovini e degli equini presentano elementi silicei, mentre quelli dei capriovini contengono cristalli di calcite di forma sferica.

I focolari sono diffusissimi in tutti i siti archeologici di ogni epoca; è impossibile non incontrarne nel corso di uno scavo archeologico. Tuttavia non è sempre immediato riconoscere la natura di un focolare (domestico, pastorale, agricolo, artigianale). È qui che la micromorfologia entra in gioco, grazie all'analisi dei prodotti di combustione contenuti all'interno del focolare, che ha permesso di dividere i focolari in tre tipologie: *focolari domestici*, *focolari pastorali* e *focolari artigianali*.

I *focolari domestici*: attraverso lo studio delle sezioni sottili, è stato

possibile identificare questa tipologia di focolare, grazie alla presenza di aggregati calcici di forma cubica, derivanti dalla combustione di arbusti diversi, carboni di legna, ossa e tracce di materiale organico cotto.

I *focolari pastorali*: si rinvencono negli strati sedimentari di grotte e ripari e sono caratterizzati dalla presenza di foraggio combusto con lo scopo di disinfettare l'area dedicata allo stanziamento pastorale degli animali da allevamento durante i periodi di non utilizzo.

I *focolari artigianali*: sono dei focolari misti con tracce di combustione di legna, arbusti, coproliti, ceramica.

Non si può non fare un accenno alle *superfici di occupazione*. Nella stratificazione archeologica sono quegli elementi che si prestano maggiormente alla lettura delle tracce comportamentali. Dal punto di vista micromorfologico basti pensare alle superfici d'abitato costituite da materiali riportati (battuti pavimentali, piani di calpestio), strati di crollo, di riporto e di colluvio. Le superfici d'abitato sono composte da tre strati: *attivo*, *reattivo* e *passivo*. Questi si manifestano attraverso processi di *ridistribuzione*, *compattazione* e *accumulo*.

## Bibliografia

BREWER R. (1964), *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, John Wiley and Sons, New York.

BULLOCK P. (1985), *The role of Micromorphology in the study of Quaternary Soil Processes*, in BOARDMAN J. (a cura di), *Soils and Quaternary Landscape Evolution*, John Wiley and Sons, New York, pp. 45-68 e pp. 117-166.

BULLOCK P., FEDOROFF N., JONGERIUS A., STOOPS G., TURSINA T. BABEL C. (1985), *Handbook for Soil Thin Section Description*, Wayne Research Publication, Albrighton.

BULLOCK P., MURPHY C. P. (1981), *Soil Micromorphology, 2: Soil*

*Genesis*, AB Academic Publishers, Dordrecht.

BUTLER B. E. (1959), *Periodic phenomena in Landscapes as a basis for Soil Studies*, in *Soil Publication*, 14, CIRSO.

CARTER S. P., DAVIDSON D. A. (1998), *An evaluation of the contribution of soil micromorphology to the study of ancient agriculture*, in *Geoarchaeology*, 13, 6, pp. 535-549.

COURTY M. A., GOLDBERG P., MACPHAIL R. (1989), *Soils and micromorphology in archaeology*, Cambridge University Press, Cambridge.

CREMASCHI M. (2000), *Manuale di Geoarcheologia*, Laterza, Roma.

DOUGLAS L. A., THOMPSON M. L. (1985), *Soil Micromorphology and Soil Classification*, in S.S.S.A. *Special Publication*, 15.

FEDOROFF N., BRESSON L. M., COURTY M. A. (1987), *Soil Micromorphology, Proceedings of VII International Working Meeting on Soil Micromorphology*, Association Française pour l'Etude du Sol, Paris.

FEDOROFF N., COURTY M. A. (1987), *Morphology and Distribution of Textural Features in Arid and Semiarid Regions*, in FEDOROFF N., BRESSON L. M., COURTY M. A. (a cura di), *Soil Micromorphology, Proceedings of VII International Working Meeting on Soil Micromorphology*, Association Française pour l'Etude du Sol, Paris, pp. 213-219.

JONGERIUS A., RUTHERFORD G. K. (1979), *Glossary of Soil Micromorphology*, Pudoc, Wageningen.

MURPHY C. P. (1986), *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*, AB Academic Publishers, Berkhamsted.

SOIL SURVEY STAFF (1975), *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Survey*, in *Agricultural Handbook*, 436, U.S. Agriculture Department, Washington.

SOIL SURVEY STAFF (1998), *Keys to Soil Taxonomy*, United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, Washington.

## 5. La Geomorfologia

### 5.1. Definizione, processi e forme del terreno

La *Geomorfologia* si occupa della descrizione e dell'interpretazione dei processi e delle forme della Terra che l'hanno delineata nel corso dei millenni, ricostruendo il paesaggio emerso e quello sommerso nella sua evoluzione cronologica. La superficie terrestre è modellata secondo

dei *processi endogeni*, interni alla litosfera, e *processi esogeni*, propri dell'atmosfera, dell'idrosfera e della biosfera. La *tettonica*, la *sismicità* e il *magmatismo* sono gli agenti endogeni responsabili della superficie terrestre *grezza* che viene poi modellata dagli agenti esogeni, ovvero l'*atmosfera*, l'*acqua*, il *vento*, gli *organismi* e l'*uomo*. Gli agenti endogeni sono responsabili della tettonica a placche, della genesi dei rilievi

montuosi, degli scudi, delle fratture e delle regioni vulcaniche, mentre i responsabili del loro modellamento sono gli agenti esogeni. Come avviene il modellamento del paesaggio? Si compie attraverso l'*erosione dei rilievi*, il *trasporto dei sedimenti* e la loro *sedimentazione* in aree con minore energia del rilievo. L'efficacia del modellamento è influenzata da alcuni fattori (*struttura geologica*, *forme del rilievo preesistente*, *clima*, *flora*, *tempo*) che danno origine a *sistemi attivi* (alvei, scarpate) e *sistemi passivi* (*forme relitte* e *forme fossili*). I sistemi attivi sono relativamente recenti e sviluppati nel Quaternario, mentre i sistemi passivi sono molto più antichi.

Le *forme del terreno* sono condizionate anzitutto dalla struttura geologica. Il *vulcano*, ad esempio, è frutto dell'accumulo di colate laviche e della ricaduta al suolo delle rocce piroclastiche; queste possono essere espulse da crateri e da fratture della crosta terrestre (Fig. 36). La morfologia e la pericolosità di un vulcano dipendono dalla fluidità, dalla quantità e dalla composizione del magma e dalla potenza dell'eruzione che lo ha generato. La deformazione duttile della roccia, attraverso pieghe *anticlinali* e *sinclinali*, dà origine alla formazione dei *rilievi montuosi* (Fig. 37). I rilievi più alti si trovano in prossimità delle pieghe anticlinali, mentre i rilievi più bassi sono in prossimità delle pieghe sinclinali. Può accadere che, a causa di attività erosiva, i rilievi alti diventino bassi, mentre quelli più bassi, grazie alla sedimentazione, diventino alti (si tratterebbe di *inversione del rilievo*). Una forte e continua erosione può portare allo spianamento delle catene montuose (*penepiano*). La deformazione fragile delle rocce è causata dal movimento delle dislocazioni tettoniche lungo dei piani di discontinuità che prendono il nome di *faglie*. Queste si sviluppano in sistemi sia locali che regionali, dando origine a *Graben* (fosse) e *Horst* (pilastrini tettonici). La litologia delle rocce superficiali e affioranti condiziona i processi erosivi, ma questi sono condizionati a loro volta dalla fratturazione meccanica delle rocce; ad esempio, le rocce "in rilievo" erano, in origine, delle rocce dure,

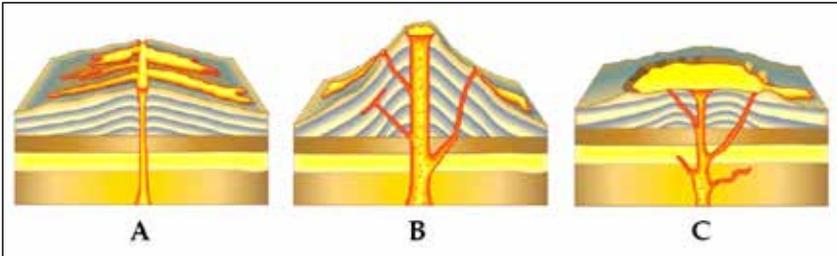


Fig. 36. Tipi di vulcano: lineare (A), stratovulcano (B), a scudo (C).

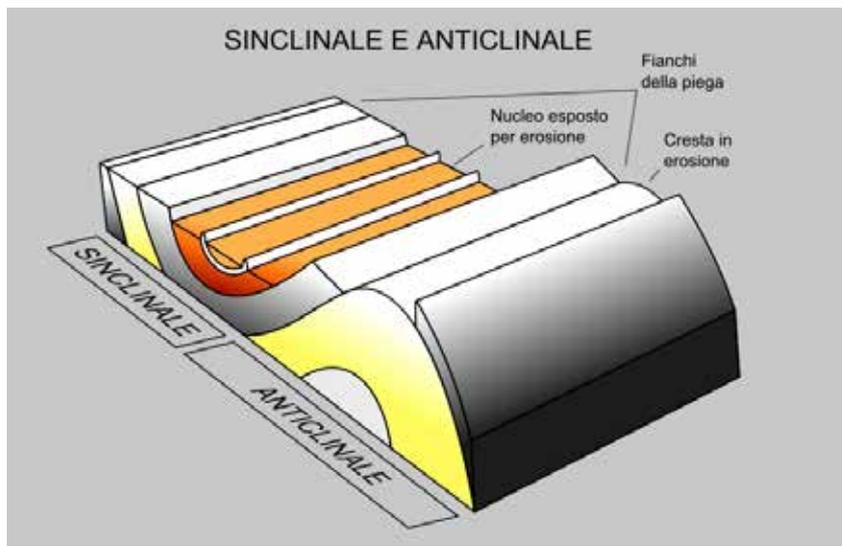


Fig. 37. Deformazione anticlinale e sinclinale dei rilievi rocciosi.



Fig. 38. Mesa di Monte Perda 'e Liana, in Barbagia, Sardegna.

mentre rocce “erose o depresse” erano delle rocce più tenere. I *plateau* e le *mesas* (Fig. 38) sono banchi di roccia resistente all'alterazione che giacciono su rilievi tabulari. Occorre sottolineare che gli agenti atmosferici provocano delle modifiche di carattere fisico (*disgregazione*) e chimico (*alterazione*) sulle rocce. L'insieme delle modifiche fisiche e chimiche è detto *disfacimento meteorico*. Dalla disgregazione e alterazione delle rocce (che possono avvenire anche per ruscellamento, azione del vento e gravità) si formano l'*eluvio* (quando il materiale rimane nel posto) e il *colluvio* (se il materiale subisce un trasporto), che sono coltri superficiali di sedimenti che ricoprono il substrato roccioso. Su questa pellicola si sviluppa il suolo che conosciamo. Il *crioclastismo* o *gelivazione* è il processo meccanico più caratteristico e si verifica grazie alla pressione che il ghiaccio, derivante dal congelamento dell'acqua sulle pareti e sulle fessure, esercita sulle rocce. La cristallizzazione dei sali all'interno di fessure o pori è detto *processo aloclastico*; il *termoclastismo* e l'*idroclastismo* sono processi che riguardano, rispettivamente, contrazioni generate da escursione termiche e l'alternarsi di periodi di umidificazione e essiccazione. Uno dei processi più importanti di disfacimento delle rocce è quello *carsico* (dalla zona del Carso)

o di *soluzione delle rocce carbonatiche*. L'affioramento di rocce solubili, piogge e la presenza di fessure e pori nella roccia, tali da consentire l'infiltrazione delle acque, e il clima sono fattori indispensabili per la genesi di un paesaggio carsico (Fig. 39). Dal disfacimento carsico hanno origine, ad esempio, le *cavità ipogee* (in origine dei vuoti asciutti dove l'acqua si infiltra durante le precipitazioni o li sommerge completamente o in parte) e le *doline* (depressioni subcircolari a forma di imbuto, di forma concava e/o piatta) (Fig. 40).

La gravità è la causa principale dello spostamento di settori di suolo, roccia, dello scorrimento delle acque e del ghiaccio. Questi processi, detti di *denudazione*, degradano (per erosione e smantellamento) e aggradano (per accumulo e colmamento delle depressioni) la superficie. I cosiddetti *debris flows* sono processi combinati causati da movimenti in massa di detrito. I materiali che non si sono consolidati si dispongono o lungo i pendii o ai suoi piedi, secondo il loro *angolo di riposo*. Un versante roccioso può essere soggetto a degradazione da frana, che si manifesta con movimenti di materiali rocciosi in massa o sciolti. Le frane, a causa della gravità e anche del clima, degradano in termini quantitativi i rilievi e creano nuovi paesaggi, modificandone l'aspetto e l'assetto. Tra i movimenti di

materiale roccioso in massa vanno menzionati la *reptazione* (*creep*) e il *soliflusso*.

L'acqua e la massa sedimentaria che trasporta con sé generano modifiche consistenti sul paesaggio, creando *valli fluviali* e *pianure alluvionali*. Le valli fluviali sono il risultato di un processo erosivo, sia fluviale sia di versante; i corsi d'acqua, approfondendosi, creano valli i cui versanti sono resi instabili a causa dell'*erosione lineare* (incisione dell'alveo) o dell'*erosione laterale* (divagazione dell'alveo). La valle fluviale avrà un profilo trasversale a forma di V. I depositi sedimentari trasportati dai fiumi danno origine a *conoidi di deiezione* (hanno forma di cono e si creano a causa della diminuzione della pendenza allo sbocco di un fiume pedemontano o di un fiume secondario nella valle), *pianure alluvionali* (più conoidi di deiezione creano la superficie di una piana alluvionale) e *delta* (concentrazione di sedimenti trasportati dai fiumi nei pressi della zona di sbocco sul mare). Può capitare che un corso di un fiume eroda pianure alluvionali esistenti, creando delle *terrazze fluviali alluvionali*. Non esiste solamente l'erosione delle acque fluviali; le onde del mare e le correnti ad esso associate creano processi di erosione, trasporto e sedimentazione. Questi processi sono condizionati anche dalle caratteri-



Fig. 39. Interno delle Grotta di San Michele Arcangelo a Civitella del Tronto, Teramo.



Fig. 40. La Dolina di Monticchio, L'Aquila.



Fig. 41. Falesia di Riva di Solto, Bergamo.

stiche batimetriche dei fondali che cambiano nel tempo sia per motivi climatici (sviluppo o scioglimento dei ghiacciai) sia per motivi tettonici (sollevamento o abbassamento

delle aree costiere). L'energia delle onde del mare ha una forte azione erosiva sulle coste rocciose e dà vita alle *falesie* (Fig. 41), dette anche *ripe di erosione*; l'erosione può addi-

rittura farle arretrare. Questo fenomeno di disgregazione superficiale può generare grotte marine e cavità orizzontali sulle falesie, dette *solchi di battente*. Molte grotte marine, an-

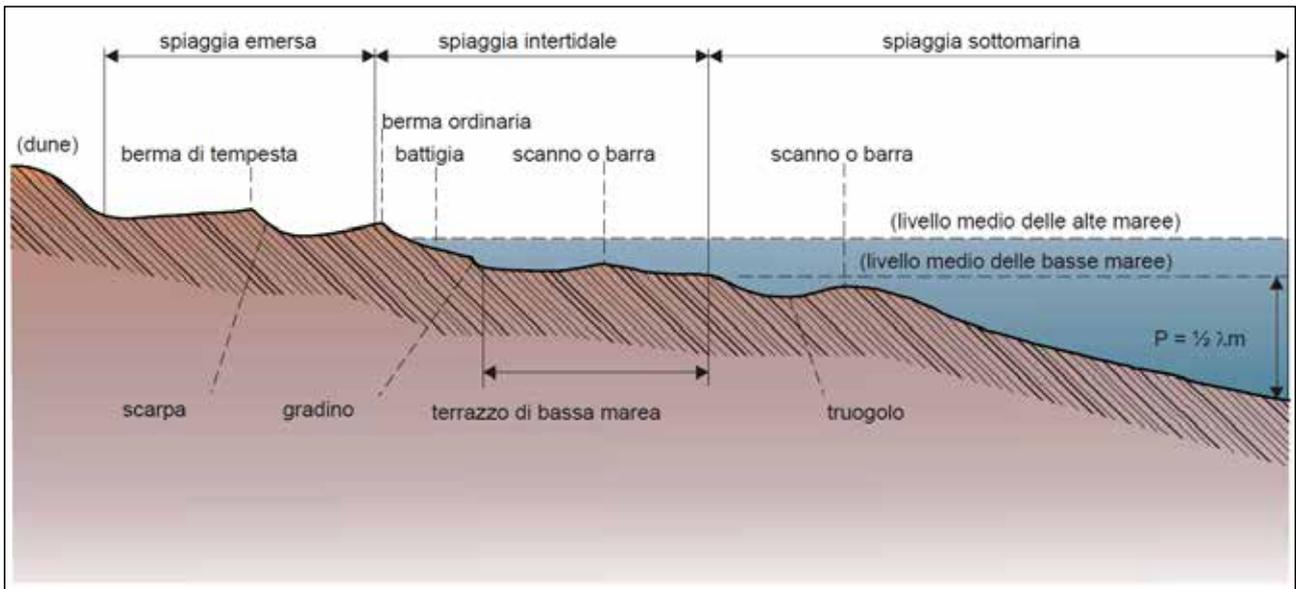


Fig. 42. Rappresentazione schematica della spiaggia (da CASTIGLIONI 1979).



Fig. 43. Particolare della spiaggia di Su Tingiosu, a San Vero Milis, Oristano.



Fig. 44. Reg. Deserto pietroso di Sturt, Australia.

tropizzate in antico, si trovano al di sopra del livello del mare. Spesso si pensa all'azione del mare in termini

di erosione, ma poco a quello che il mare può costruire: la *spiaggia*. Questa è composta da sabbia, ghia-

ia e si trova al di sopra del livello di bassa marea (la spiaggia emersa e la spiaggia intertidale sono costituite dal *terrazzo di bassa marea*, dalla *berma ordinaria* e dalla *berma di tempesta*) (Fig. 42). La spiaggia può essere lunga moltissimi km e intervallata da promontori rocciosi, falesie e insenature (Fig. 43).

Le zone aride e prive di vegetazione sono soggette all'azione modellatrice del *vento* e a tutti i fenomeni ad esso connessi. Il vento compie la sua azione erosiva (*deflazione eolica*), asportando la costituente sabbio-limosa dei depositi superficiali e accumulando, al suolo, clasti grossolani. Le aree sottoposte a deflazione eolica generano i deserti rocciosi (*reg* o *serir*) (Fig. 44) e rocce dalla caratteristica forma allungata nella direzione del vento dominan-

te (*yardang*) (Fig. 45). Il vento può addirittura creare alvei interdunari in aree desertiche sabbiose, caratterizzate da dune (*edeyn, erg*). Queste,

anche se “mobili”, possono essere antichissime (Fig. 46). Nei deserti semiaridi ha origine il *loess*, un tipico deposito eolico di tessitura limo-

sa e che viene trasportato dal vento per distanze abbastanza ampie. Si è già fatto riferimento all’azione erosiva dell’acqua, ma non del ghiaccio,



Fig. 45. Gli *Yardang* di deserto di Dasht-e Lut, Iran.



Fig. 46. I calanchi di Atri, Teramo.

o meglio dei *ghiacciai*. Questi costituiscono degli *agenti geomorfologici esogeni morfoclimatici*. Il ghiacciaio possiede una massa di movimento con una energia specifica; questa massa si muove sul substrato roccioso e trasporta detriti (materiali scavati sul fondo e sulle pareti del ghiacciaio, valanghe, crollo dalle pareti). Esistono due tipi di ghiacciai: *caldi* (con temperatura prossima al punto di fusione) e *freddi* (con temperatura al di sotto della temperatura di fusione). Per i ghiacciai caldi, l'acqua basale incrementa l'erosione, mentre per i freddi avviene una deformazione del substrato. L'*abrasione*, o levigatura, e l'*escavazione* sono i due processi principali dell'erosione glaciale (Fig. 47). Le striature, la smussatura e l'arrotondamento della superficie topografica sono chiare

tracce dell'abrasione glaciale; questa dà origine a collinette dette a *dorso di balena* e ai *truogoli*, ovvero le valli glaciali (generate da valli fluviali preesistenti). L'escavazione dà luogo a forti depressioni nella roccia, sradicamento e distacco. Il limite superiore dell'erosione glaciale è caratterizzato da creste acuminata di ghiaccio (*trimline*).

Le *valli glaciali* presentano un profilo longitudinale, caratterizzato da depressioni, confluenze e gradoni (*riegel*) e uno trasversale, a forma di U. Le *valli glaciali sospese* sono valli minori affluenti della valle principale e nascono da un approfondimento della valle principale e hanno la caratteristica forma di un anfiteatro romano, detto *circo*. La disposizione di più valli sospese crea complessi vallivi glaciali molto particolari: i

circhi su fianchi opposti con creste a lama di coltello (*arêtes*); circhi che, interagendo tra loro, danno vita ad una valle dolce curva (*col*); tre o più circhi con orientamenti diversi a formare dei rilievi di forma piramidale (*horn*). Altra forma caratteristica creata dall'erosione glaciale è la *morena*. La massa di detriti che i ghiacciai trasportano e lasciano alla fronte e alle estremità delle lingue glaciali formano le morene, ovvero ripetute espansioni dei ghiacciai stessi e avvenute nel corso del Pleistocene.

### 5.2 La geomorfologia antropogenica e i suoi processi applicati alla ricerca archeologica

Oltre ai processi endogeni ed esogeni, si può annoverare un terzo processo, ovvero quello antropogenico inteso come azione dell'uomo nelle vesti di agente modificante. L'uomo ha da sempre intuito le potenzialità dei luoghi, ma anche i suoi limiti; proprio per questi motivi, ha adattato il terreno alle proprie esigenze abitative, sociali, culturali, politiche ed economiche. All'azione dell'uomo sulla natura si è interessata la *geomorfologia antropogenica* o *antropogeomorfologia*: questo nuovo settore delle Scienze Geologiche è rivolto ad un periodo che inizia nel momento in cui l'uomo ha iniziato a manomettere pesantemente il rilievo terrestre fino all'attualità: questa nuova epoca geologica è stata defi-



Fig. 47. Striature di abrasione. Rocce montonate a Entracque, Cuneo.



Fig. 48. Le Latomie di Siracusa.



Fig. 49. Grotte degli Sbariati di Zungri, a Vibo Valentia.

nita *Antropocene*, facendola seguire all'Olocene. I processi antropogenici si possono dividere in *diretti* (attività estrattive, sbancamenti, bonifiche, rilievi artificiali e bacini idrici) e *indiretti* (frane causate da escavazione profonda, disboscamento, abusivismo edilizio in aree non sicure, pascolo eccessivo). Le più antiche evidenze archeologiche che testimoniano l'intervento dell'uomo sulle forme del paesaggio sono legate all'uso del fuoco per la caccia e la deforestazione. Quest'ultimo è un pro-

cesso tipico del Neolitico che provoca l'erosione del suolo, il quale non riceve più protezione dalla coltre vegetale e, quindi, è esposto all'azione eolica e al ruscellamento superficiale. È possibile distinguere le *forme del terreno*, originate dall'uomo, in tre categorie: *forme di scavo*, *di accumulo* e *idrauliche*. Le *forme di scavo* sono, ad esempio, le cave (le *Latomie di Siracusa*) (Fig. 48), gli insediamenti rupestri (*Grotte degli Sbariati di Zungri*, a Vibo Valentia) (Fig. 49), le tombe rupestri (*San Liberatore a*

*Majella*, a Serramonacesca, Pescara) (Fig. 50), le tagliate etrusche (Fig. 51) o gli spianamenti. In diversi casi, molti centri urbani nascondono nel sottosuolo cavità ipogee artificiali legate alla presenza di acqua o di catacombe, come quelle ebraiche di Roma. Le *forme di accumulo* sono, ad esempio, i tumuli (*Necropoli della Banditaccia di Cerveteri*) e le discariche di materiale archeologico (*il Monte Testaccio a Roma*). Le *forme idrauliche* sono connesse ad operazione di divisione territoriale, smaltimento, canalizzazione e drenaggio dell'acqua (peschiere, centuriazioni romane (Fig. 52), cunicoli, acquedotti come quelli di *Pesaro* e *Venafro* di cui si tratterà nella seconda parte, nel capitolo sulla Geofisica). Anche le attività di bonifica del suolo per poterlo rendere "abitabile" sono da considerarsi elementi di modifica sostanziale del territorio. Tutto ciò che è legato alla geomorfologia, oltre ad essere osservato sul campo, deve essere esaminato in maniera più approfondita e integrata, per poter essere rappresentata analiticamente. Uno strumento fondamentale, derivante da questo concetto, è la *Carta Geomorfologica*, ovvero carte tematiche costruite attraverso carte topografiche di base (tavolette



Fig. 50. Tombe rupestri di San Liberatore a Majella a Serramonacesca, (PE).



Fig. 51. Agro Falisco, tagliata etrusca.



Fig. 52. Immagine satellitare della centuriazione nell'area di Bagnara di Romagna (RA).

IGM e tavole CTR), immagini tele-rilevate (satellitari, aeree, da drone) e rilevamenti geomorfologici. Sono dei documenti di sintesi della genesi del paesaggio: da questi si può estrapolare la cronologia, l'origine delle forme, il tipo di depositi, i dati morfometrici e morfogenetici. L'uso di colori e di tematismi aiuta la comprensione della carta. È possibile realizzare la carta tramite l'utilizzo di software per la messa a punto di Sistemi Informativi Geografici o GIS (*Geographic Information System*), dei quali si tratterà nel primo ca-

pitolo della seconda parte dedicata alle metodologie tecnologiche per la Geoarcheologia.

### Bibliografia

BARTOLINI C. (1992), *I fattori geologici delle forme del rilievo. Lezioni di geomorfologia strutturale*, Pitagora, Bologna.

BINTLIFF J. (1992), *Interaction between archeological sites and Geomorphology*, in *Cuaternario y Geomorfologia*, 6, pp. 5-20.

BIRKELAND P. W. (1974), *Pedology, Weathering and Geomorpho-*

*logical Research*, Oxford University Press, London.

BIIDEL J. (1982), *Climatic Geomorphology*, Princeton University Press, Princeton.

CAMBI F. (2015), *Manuale di archeologia dei paesaggi. Metodologie, fonti, contesti*, Carocci, Roma.

CASTIGLIONI G. B. (1979), *GEOMORFOLOGIA*, Utet, Torino.

CREMASCHI M. (2000), *Manuale di Geoarcheologia*, Laterza, Roma.

CUGNO A. S., PISERÀ R. (2021), *Zungri. Studio di un villaggio rupestre medievale nel territorio di Vibo Valentia*, in *Studia Archaeologica*, 245, L'Erma di Bretschneider, Roma.

FAIRBRIDGE R. W. (1968), *Encyclopedia of Geomorphology*, Reinhold, New York.

GISOTTI G. (2018), *Geomorfologia antropogenica, con particolare riguardo ai rapporti con l'archeologia*, in *Geologia dell'Ambiente*, 2, Roma, pp. 2-17.

GISOTTI G. (2020), *Geologia per archeologi. Forme del terreno e civiltà antiche*, Carocci Editore, Roma.

LENA G. (2020), *Viaggio geoarcheologico attraverso la Calabria*, Rubbettino, Soveria Mannelli.

LENA G., MASTROIANNI D. (2021), *Geositi e geomorfositi. E i geoarcheositi?*, in *Geologia dell'Ambiente*, 1, Roma, pp. 2-17. pp. 3-15.

MIALL A. D. (1981), *Analysis of fluvial depositional systems*, in *American Association Petroleum Geology*, in *Educational Course Notes*, 20.

MIALL A. D. (1996), *The geology of fluvial deposits*, Springer Verlag, Stuttgart.

MICATI E. (2000), *San Liberatore a Majella, Serramonacesca (PE)*, in *Eremiti d'Abruzzo, guida ai luoghi di culto rupestri*, Pescara, Carsa Edizioni, pp. 33-36.

PANIZZA M. (1978), *Geomorfologia Applicata*, Nuova Italia Scientifica, Roma.

PANIZZA M. (1992), *Geomorfologia*, Pitagora, Bologna.

SUMMERFIELD M. A. (1991), *Global Geomorphology*, Longman, London.

TOZZI P. (1987), *Memorie della terra, storia dell'uomo*, La Nuova Italia, Firenze.



## **PARTE SECONDA**

# **METODI E TECNOLOGIE DI INDAGINE**



## I. Il GIS e le Analisi Spaziali per la Geoarcheologia

### 1.1 I Sistemi Informativi Geografici (GIS) e le analisi spaziali

Il Sistema Informativo Geografico (GIS) è un sistema o un insieme di applicazioni che fornisce informazioni di carattere geografico e collegabile al territorio. Più tecnicamente, un GIS è un sistema modulare utile nel gestire, analizzare e visualizzare dati, numerici e alfanumerici, di contenuto geografico-spaziale. Il suo ambito di applicazione, oggi, è ampiamente diffuso in tantissimi campi sia per “rappresentare” i territori sia per “raccontarli” (Fig. 53). I sistemi GIS sono applicati nell’ambito di progetti legati a survey e scavi archeologici, all’Archeologia del Paesaggio e anche in Geoarcheologia. L’obiettivo principale del GIS è quello di creare dei modelli di dati elaborabili, affinché l’utente finale possa interagire con il sistema attraverso delle interrogazioni; il processo di interrogazione dei dati deve avere un rapporto sia gerarchico sia logico in modo tale da desumere nuovi dati che scaturiranno dall’integrazione di quelli già presenti nel sistema. L’interrogazione è chiamata *query*; attraverso la *query* si ha la possibilità di interrogare il sistema associando archivi alfanumerici, dati descrittivi e tabelle (*banche dati*) a numerose basi

cartografiche, tematismi, foto aeree, cartografie storiche (*dati raster e dati vettoriali*); il sistema risponde attraverso i cosiddetti *field*, i campi che sono presenti nei database numerici e alfanumerici.

Il GIS può rispondere sia a *interrogazioni verticali* (partendo dai dati alfanumerici) sia a *interrogazioni orizzontali* (partendo dai dati cartografici georeferenziati). Nel primo caso si avranno risposte visualizzate sui diversi campi del database (numeri, tematismi, classi di testo), nel secondo caso si visualizzeranno elementi delle finestre cartografiche (punti, linee, poligoni). Per esempio, è possibile ricercare e visualizzare tutti i siti archeologici che si trovano nei pressi di cave di arenaria, rispetto a siti limitrofi con cave di calcare. La risposta dipende sempre dal tipo di *query* che si sottopone al sistema. Attraverso la *sovrapposizione* e la *visualizzazione* è possibile raffigurare in trasparenza tutti i dati spaziali georeferenziati (verticali e orizzontali); in questo modo, soprattutto in Geoarcheologia, si possono ricostruire i rapporti tra le attività umane e il territorio in relazione all’altimetria dei terreni, alla geomorfologia, alla vegetazione, per ricostruire il paleoambiente e il paesaggio antico e per la creazione di modelli predittivi, postdittivi e per identificare nuovi insediamenti. Grazie al GIS è possibile elaborare i dati georeferenziati

attraverso le *analisi spaziali* e le *analisi statistiche*, creare modelli digitali del terreno (DTM o DEM) interpolando i dati e rappresentandoli in tre dimensioni per poi svolgere analisi in ambienti tridimensionali. Il DEM (*Digital Elevation Model*) o DTM (*Digital Terrain Model*) è rappresentato da una matrice di punti in cui, per ogni coordinata *x* e *y*, è associata una quota altimetrica. La rappresentazione del modello dipende dalle tecniche di interpolazione che si utilizzano. Al variare dell’algoritmo di interpolazione, è possibile ottenere diversi modelli geometrici con lo scopo di rappresentare, ad esempio, rilievi, pendenze e versanti.

La caratteristica fondamentale del GIS è quella della *georeferenziazione* dei dati. Cosa vuol dire georeferenziare un dato? Significa attribuire ad ogni elemento le sue coordinate spaziali assolute che, quindi, non seguono un sistema di riferimento casuale, ma un sistema di coordinate geografiche in cui quel dato è realmente collocato nello spazio, ma non in scala. La *scala* rappresenta il rapporto di una lunghezza misurata su carta e la misura corrispondente sul terreno. In una scala 1:5000, tipica della Carte Tecniche Regionali (CTR), 1 cm sulla carta corrisponderà a 5000 cm sul terreno. Una delle potenzialità del GIS è proprio quello di integrare dati georeferenziati a più scale nello stesso spazio di rappresentazione. Entrando nello specifico, i dati, come precedentemente accennato, si suddividono in due categorie: *raster*, *vettoriali* (Fig. 54) e *alfanumerici*.

*Dati raster*: il raster è un formato orizzontale di rappresentazione grafica sotto forma di griglia, dove ogni cella o *pixel* ha uno specifico attributo, di solito numerico (da 0 a 255). Nel GIS i dati raster sono disponibili in formato cartaceo e in seguito vengono acquisiti mediante scansione digitale (maggiore è la risoluzione, maggiore sarà la visualizzazione e l’accuratezza). In Geoarcheologia, un dato raster può essere una fotografia di una sezione esposta, un ortofotopiano, una immagine satellitare, un rilievo o una pianta di documentazione di scavo, una cartografia topografica, una carta geologica. Il *pixel* di una fotogra-

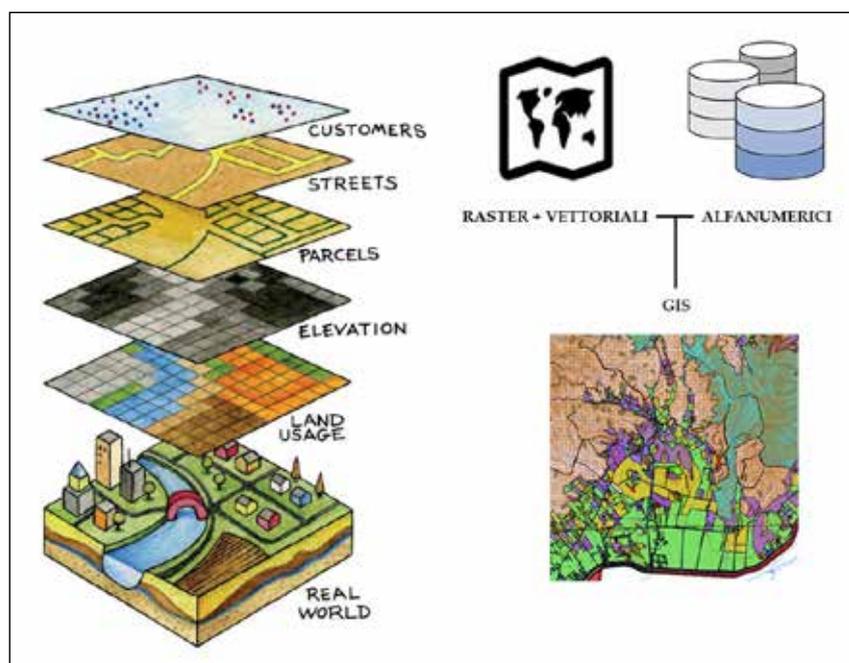


Fig. 53. Il GIS e la sovrapposizione dei diversi livelli (raster, vettoriali).

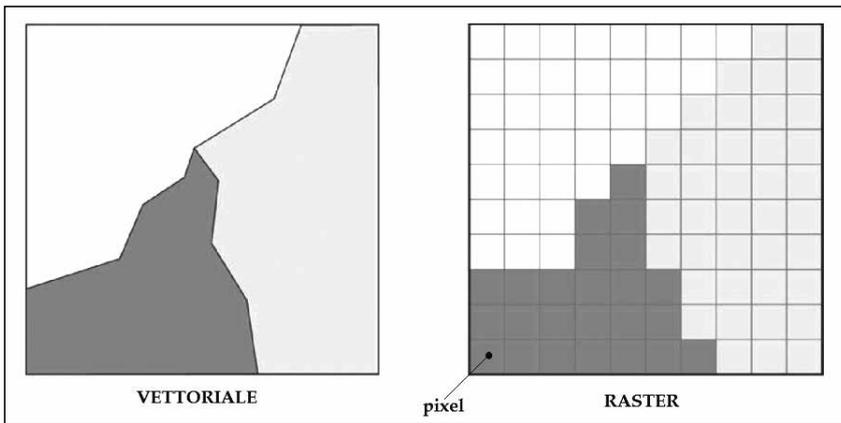


Fig. 54. Differenza tra dato raster e vettoriale, con indicazione del pixel.

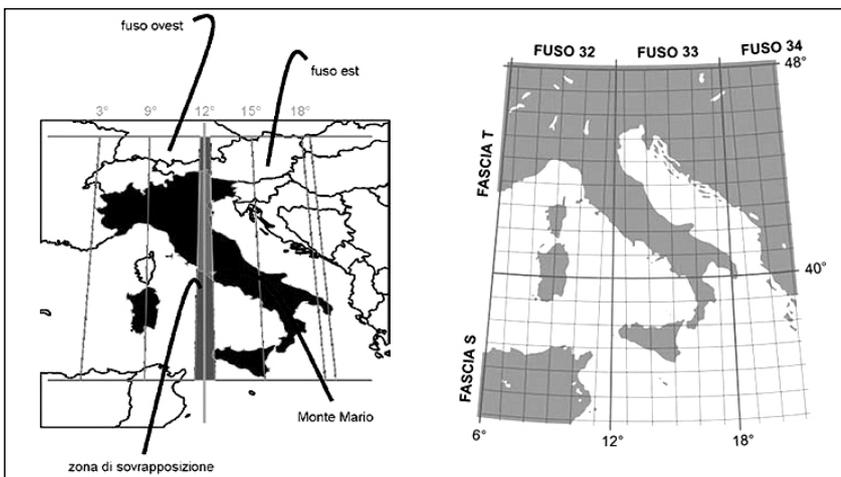


Fig. 55. A sinistra, l'Italia, nel sistema Gauss-Boaga con riferimento Monte Mario. A destra l'Italia e i suoi fusi UTM (32, 33, 34).

fia aerea, ad esempio, rappresenta un'informazione relativa al colore dello stesso *pixel*, mentre il *pixel* di un raster DEM georeferenziato contiene informazioni relative all'altimetria e alle coordinate geografiche di quel punto specifico. Tipici dati raster sono: JPEG, TIFF, RLC, ECW, BIP, GRASS, GRID.

**Dati Vettoriali:** il dato vettoriale, sempre di formato orizzontale, fornisce informazioni geometriche semplici basate su formule matematiche per rappresentare immagini. Il punto è l'elemento più semplice e ha coordinate  $x$  e  $y$ . Oltre al punto, vi è la linea e elementi più complessi come il cerchio, il poligono, le superfici. Il dato vettoriale, a differenza del raster, se zoomato, non perde di definizione. In Archeologia, come nella Geoarcheologia, il dato vettoriale è importante per visualizzare, elaborare e interrogare gli elementi caratterizzanti di un territorio quali le curve di livello, i fiumi, i contorni dei laghi, le linee di costa, le strade, i

centri abitati e le singole abitazioni. Anche i dati ottenuti dal GPS e dalla stazione totale sono di carattere vettoriale. Tipici dati vettoriali sono: CAD, GPS, DXF, SHP.

**Dati Alfanumerici:** tutte le classificazioni, gli elenchi, i cataloghi, se organizzati in tabelle e in appositi database o banche dati, costituiscono i dati alfanumerici. Di solito non sono georeferenziati, ma possono esserlo se interpolati con dati raster. Un esempio può essere quello di una banca dati di campioni di suolo, con accezione pedologica, che non ha elementi di posizionamento; però il database con i singoli campioni è legata a singoli contesti di estrazione e ad una scheda descrittiva. Di conseguenza, esiste già una relazione tra campione, contesto e scheda. Così facendo, il singolo campione avrà, all'incirca, una sua collocazione geografica nel sistema GIS.

Tutti i dati (raster, vettoriali, alfanumerici), per comunicare tra loro, devono essere interpolati, ma per

avere una maggiore precisione geografica devono essere posizionati nello spazio nella maniera corretta. Il GIS lavora in coordinate geografiche assolute e per poter lavorare, interrogare, analizzare ed elaborare, occorre servirsi di un sistema di coordinate piane o proiettate (il sistema cartesiano) o di un sistema di proiezione. Le proiezioni rappresentano la superficie della terra su di un piano; quelle convenzionate sono quelle di Bonne per i planisferi, la piano rettangolare, la piano quadrata, la piano a maglie trapezie, la *Universale Traversa di Mercatore* o UTM. Tra i sistemi di proiezione più utilizzati, detti geodetici, per georeferenziare le aree più piccole, vi sono, appunto, l'UTM, la Gauss-Boaga e la Lambert. Tutti i sistemi di proiezione presentano delle leggere distorsioni nella trasformazione delle coordinate e, quindi, non esiste un sistema di proiezione ideale. È possibile che nella messa a punto di un GIS, si debbano utilizzare dati provenienti da sistemi di proiezione diversi; ad esempio integrare una cartografia storica con una ufficiale (con coordinate ufficiali native) e dati GPS (*Global Positioning System*), di solito in WGS 84. Per rendere i dati comunicabili tra loro, questi si devono riproiettare nelle medesime coordinate reali per creare un sistema unico. Ciò è possibile grazie ai cosiddetti *parametri di trasformazione*.

Occorre sottolineare che ad ogni proiezione corrisponde un sistema di riferimento che si utilizza per calcolare le coordinate. Nel sistema UTM, ad esempio, si utilizzano regioni specifiche con un sistema di coordinate ortogonali all'interno di ogni fuso: l'Italia è tra i fusi 32, 33, 34. Nel sistema Gauss-Boaga, il riferimento è il meridiano di Monte Mario, a Roma (Fig. 55). Nell'ambito di uno scavo archeologico e, quindi, di un contesto in micro-scala, si utilizzano sistemi di rilevamento relativi ( $x, y$ ) per poi riconvertirli in sistemi di coordinate geografiche. Nel caso, invece, di un'attività in macro-scala come il survey topografico, si adoperano il GPS o le stazioni totali, convertendo, per esempio in UTM, le coordinate geografiche. Nel caso del GPS il sistema di riferimento adottato è il WGS84, sviluppato

dal DMA (Defence Mapping Agency) degli Stati Uniti.

Esistono due tipologie di GIS: il GIS *inter-sito* il GIS *intra-sito*. Il GIS *inter-sito* primo interessa il paesaggio archeologico nel suo contesto, ovvero l'analisi in macro-scala del territorio e dei sistemi insediativi attraverso l'evoluzione diacronica del paesaggio stesso grazie all'interpolazione di foto aeree, cartografia, immagine da satellite. Il GIS *intra-sito* è utilizzato su contesti in micro-scala, ovvero lo scavo archeologico, nell'ambito di contesti più dettagliati.

### 1.1.2 Le analisi spaziali

Nel corso degli ultimi anni, le applicazioni GIS sono state investite da uno sviluppo esponenziale e migliorativo di algoritmi che hanno permesso di utilizzare le *analisi spaziali* per lo studio evolutivo dei contesti su macro-scala (GIS *inter-sito*) e su micro-scala (GIS *intra-sito*). Ogni analisi, non va dimenticato, è influenzata sia da *dati indiretti* (DEM, fotografie aeree, curve di livello) sia da *dati diretti* (ricognizione archeologica, GPS, campionatura dei suoli). Meno sviluppate sono le *analisi statistiche*. La *analisi spaziali*, dunque, sono simulazioni che servono a rappresentare e interpretare il paesaggio archeologico, attraverso le relazioni spaziali e diacroniche che esistono e coesistono tra elementi antropici, naturali, ambientali e socio-economici; *distribuzione dei siti, scelte strategiche e morfologiche, gerarchie spaziali, percorsi, confini,*

*elementi distintivi del territorio, visibilità, percezione, mappe mentali e modelli predittivi*. Tra le analisi elencate, quella più particolare e complessa è il *modello predittivo*; come anticipa il termine, è un modello che permette di prevedere l'estensione geografica, economica, sociale e politica di un territorio, l'estensione di uno o più siti archeologici non ancora noti o investigati e/o di ricostruire contesti paleoambientali.

Gli studi e le ricerche che si possono considerare propedeutiche allo sviluppo delle analisi spaziali del GIS sono da collocarsi agli inizi degli anni '60 con la nascita della cosiddetta *New Archaeology*. Colin Renfrew, agli inizi degli anni '70, per studiare i megaliti di Stonehenge, utilizzò la tecnica dei *Poligoni di Thiessen*. Egli tracciò i territori di un centro in base alla metà della sua distanza dai centri più vicini, realizzando una sorta di mappa gerarchica del paesaggio basata su relazioni di potere e di influenza tra insediamenti principali e periferici; quindi, la grandezza dei territori di pertinenza dipendeva dalla distanza media calcolata rispetto alla posizione geografica (Fig. 56). Nel caso di Stonehenge, i megaliti erano i punti di pertinenza principali e gli indicatori territoriali primari per tutte le comunità secondarie limitrofe. Gli anni '70 sono contraddistinti, in Archeologia, dall'uso dei *modelli*, ovvero dei meccanismi che connettono osservazione e idee teoriche. La cosiddetta *Central Place Theory*, elaborata da Christaller negli anni

'30, nell'analisi della distribuzione dei centri maggiori e minori della Germania Meridionale, fu utile per la creazione di un modello regolare costituito da una cellula esagonale di *central places*, ordinati secondo una gerarchia organizzata su tre livelli: di traffico, di mercato e amministrativo. L'elaborazione di questo modello dimostrò l'esistenza di una autorità centrale importante per l'influenza del territorio e per la pianificazione delle risorse. Un'altra tipologia di analisi, legata allo sfruttamento delle risorse come elemento selettivo principale, è la *Site Catchment Analysis* che studia la distribuzione delle aree di sfruttamento economico rispetto alla localizzazione delle aree di insediamento. Questo tipo di analisi è detta anche del *bacino di cattura* del sito, ovvero quello spazio territoriale pertinente a un sito preistorico e riconoscibile attraverso i dati paleoambientali, faunistici, pedologici, geologici, l'uso e la destinazione economica dei suoli. Ricerche condotte sul popolamento rurale dell'Italia Meridionale, da parte di Higgs e Vita negli anni '90, stabilirono, grazie alla *Site Catchment Analysis* che l'area interessata da un eventuale insediamento preistorico, sfruttata per la raccolta la caccia, poteva distare a due ore di cammino dall'insediamento e un'ora di cammino dalle aree utilizzate per la coltivazione. I *poligoni di Thiessen*, la *Central Place Theory* e la *Site Catchment Analysis* si inseriscono tra le analisi più utilizzate per la ricostruzione delle società preistoriche; tra queste è possibile annoverare un'altra analisi, ma non concentrata sulla centralità gerarchica/economica di un sito, ma sul *potenziale di mobilità*; lo sviluppo insediativo si poteva calcolare in base a motivi legati all'ecologia, all'ambiente, alla demografia e alla geografia. Il GIS ci aiuta in questo con la creazione di terminologie adatte (*core, buffer zone*). Per fare un esempio concreto, il territorio era il *core* e corrispondeva ad una pianura o una vallata, all'interno della quale si installavano gli insediamenti più importanti, mentre la *buffer zone* corrispondeva all'area montana. Gli scambi che avvenivano tra il *core* e la *buffer zone* determinavano una forte coesione sociale tra gli insedia-

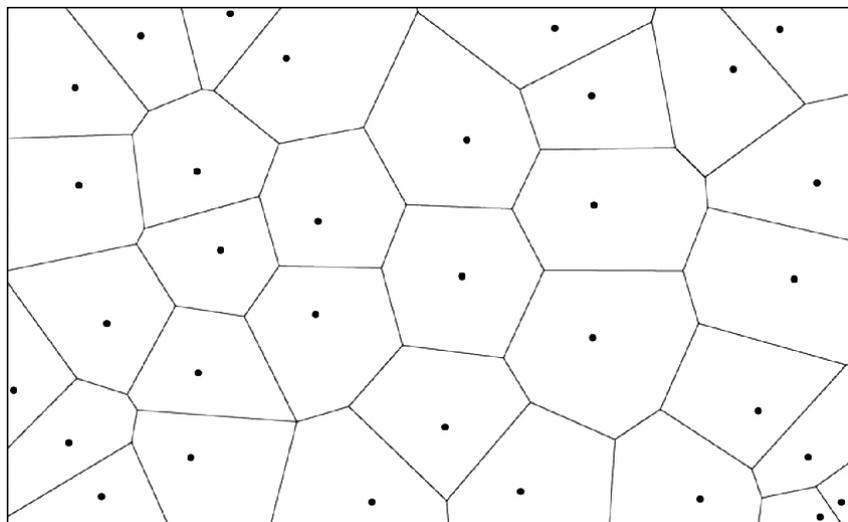


Fig. 56. Visualizzazione in GIS dei poligoni di Thiessen.

menti della pianura o della vallata dove non c'era necessità di mobilità, mentre una minore stratificazione sociale avveniva nelle aree montane, con limiti demografici e ambientali inesistenti o quasi. La *Cost Surface Analysis* (l'analisi dei costi di percorrenza) e la *Cost Distance Analysis* (analisi dei costi di distanza) sono analisi spaziali del movimento e vanno oltre la *Site Catchment Analysis*, poiché interagiscono con altri fattori quali l'Antropologia, la Geografia, la Sociologia, la Filosofia, ecc. Questa tipologia di analisi è la sola che permette di calcolare gli spostamenti umani all'interno di un territorio specifico interagendo con tutti i fattori che potevano condizionare le scelte topografiche e, di conseguenza, quelle insediative. Quali sono i fattori da considerare? Il tempo che si impiegava per ricoprire una certa distanza (da sito a sito, da sito a corso d'acqua); i percorsi standard; in che modo si praticavano i percorsi. Prima di tutto, è indispensabile fare affidamento a un *DTM* che rappresenti, al meglio, il territorio nell'antichità (per rendere "antico" un *DTM* "moderno", occorrerà modificare le curve di livello in seguito ad una dettagliata analisi micromorfologica e pedogenetica del suolo). Al *DTM*, si aggiungono i tematismi raster e vettoriali come quelli paleoambientali (suoli, idrografia, vegetazione, limiti) e antropologici (elementi simbolici, sacri, punti di osservazione). Attraverso il *GIS* e l'inserimento di attributi o indici di percorrenza, si calcolano le distanze e le direzioni preferenziali che porteranno alla ricostruzione di un percorso ideale, ad esempio ad una distanza favorevole da un corso d'acqua o in un'area boschiva che consentiva al "camminatore" di avere un campo visuale ottimale sul paesaggio. Però è utile sottolineare che non è sufficiente la sola morfologia di un paesaggio per tentare di giustificare le potenzialità di uno spostamento, ma questo è influenzato soprattutto da regole politiche, da limiti insediativi, amministrativi o sacri (come quelli sanciti dai santuari di confine nella delimitazione degli ambiti amministrativi del periodo italico e pre-romano). La *viewshed analysis* (analisi di visibilità) è una

tra le analisi spaziali più utilizzate nello studio dell'evoluzione del paesaggio. Wheatley, nel 1995, afferma che per visibilità si intende quello che attiene al campo visuale dell'uomo; le analisi di visibilità, dunque, calcolano queste distanze sulla base dei caratteri morfologici e ambientali del paesaggio. Nello studio di un paesaggio archeologico, per fare un esempio, sono utilissime per comprendere le relazioni fra siti e insediamenti, di solito di altura, e se da un sito noto riesco a determinarne la presenza di uno non noto, mediante l'osservazione diretta, ovvero l'*intervisibilità* (la relazione spaziale fra siti all'interno del paesaggio). A livello informatico, una *viewshed* è una griglia e, al suo interno, ogni cella o *pixel* ha un valore di visibilità. Questo valore indica il numero esatto di punti di osservazione da cui si rileva l'orizzonte prescelto. Nel corso degli anni le analisi di visibilità si sono evolute attraverso l'utilizzo di modelli di *percettività* (utilizzo dei tre sensi: vista, udito e odorato), di *mobilità* (utilizzo di un modello dinamico che nasce dal movimento tra osservatore e paesaggio osservato, prevedendo punti di vista diversi dello stesso punto di osservazione) e di *dinamicità* (il paesaggio può cambiare a seconda delle stagioni e del clima, quindi non è detto che un sito o un elemento fisico del paesaggio si possano osservare sia d'estate sia d'inverno).

La *Trend-surface Analysis* (analisi di orientamento o tendenza di superficie) è utilizzata nei survey

archeologici e in contesti *intra-sito*. L'obiettivo è di individuare gruppi o classi di "oggetti" (ad esempio abitati principali, impianti produttivi, edifici religiosi) su una superficie, in base a specifici indici topografici discriminanti (confini insediativi e/o di carattere geomorfologico). Così facendo, una situazione apparentemente casuale può avere una sua logica distributiva. Queste analisi, basate sul metodo della misurazione dei "minimi quadrati", si suddividono in *logistiche* e *lineari*. Le prime si utilizzano per modelli che si basano sulla posizione di siti archeologici, mentre le seconde si basano sul peso totale della ceramica raccolta da ogni quadrato casuale. Cosa si ottiene grazie a queste analisi? Nel caso di *analisi logistiche*, si avranno dei grafici di probabilità associati alla presenza di siti archeologici di un territorio; nel caso di analisi lineari si avranno dei grafici con la concentrazione di specifici reperti o in un determinato territorio o in un'area di uno scavo archeologico.

## 1.2. Esempi e casi studio

Sono molteplici i casi studio riguardanti l'uso del *GIS* in contesti geoarcheologici. Uno tra questi è quello del giacimento paleolitico di Isernia, *La Pineta* (Fig. 57); uno dei siti preistorici più importanti d'Europa, poiché il sito documenta reperti, stratigrafie e suoli che risalgono a circa 700.000 anni fa (Fig. 58). Lo scavo ha soprattutto riguardato la documentazione dei reperti e delle paleosuperfici, inizialmente studiate



Fig. 57. Localizzazione geografica del sito di Isernia La Pineta.

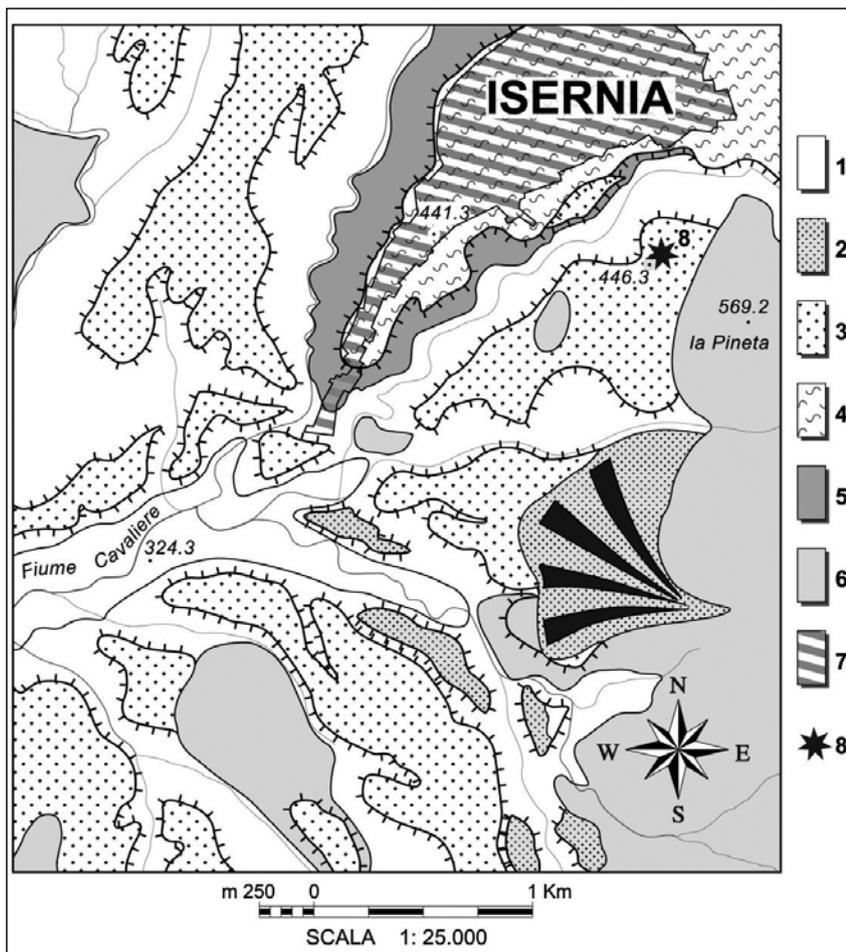


Fig. 58. Stratigrafia del sito di Isernia, La Pineta: Unità principale (da U1 a U5) e paleosuoli sepolti (S1 e S2).

con metodologie classiche, ma in seguito affiancate da fotogrammetria e tecniche digitali (Fig. 59). Altro esempio, della fine degli anni '90, è il Progetto Terramare (*An inventory of the Terramare in the central Po Plain: physiographic context, stratigraphic and structural characteristics, state of preservation*). Il progetto ha previsto la ricostruzione tematica del paesaggio archeologico della pianura centrale dell'Emilia Romagna nel corso dell'Età del Bronzo e Recente, attraverso la costruzione di un GIS multidisciplinare e l'integrazione di modelli 2D e 3D (siti, scavi, geomorfologia, tematismi territoriali e paleoambientali). La novità del sistema GIS realizzato è stata la creazione di mappe di superficie 3D, raster e vettoriali, come base per i modelli di elevazione delle Unità Stratigrafiche e come, overlay, la planimetria delle stesse US e di altri elementi tematici. La *terrामara di Montale*, a Castelnuovo Rangone, in provincia di Modena è uno dei tanti esempi di come il GIS sia stato utile per la ricostruzione, in tempo reale, dello scavo (Figg. 60-61). Il progetto per eccellenza può essere considerato quello del SITAR, il Sistema Infor-

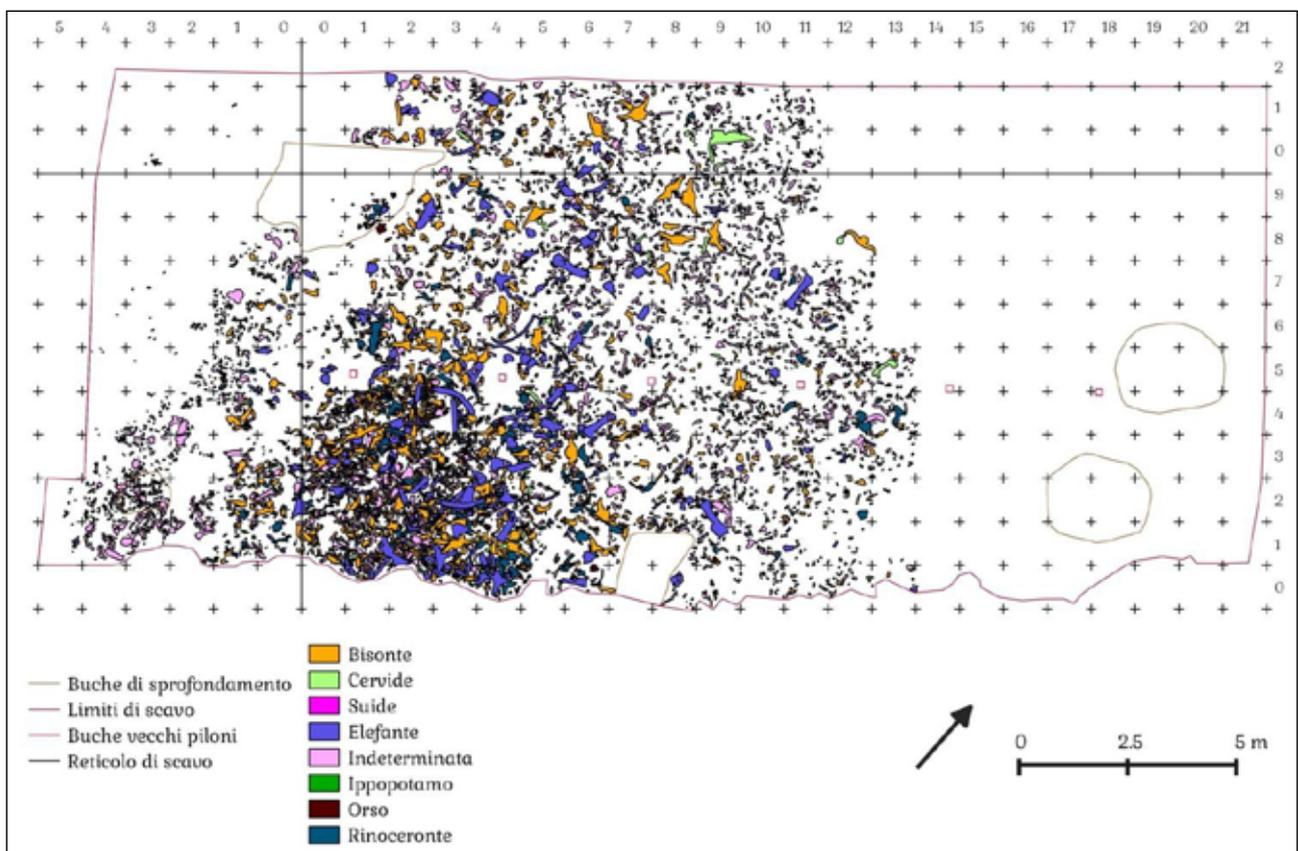


Fig. 59. Isernia La Pineta, strato 3a. Distribuzione dei resti faunistici suddivisi per specie.

*mativo Territoriale Archeologico di Roma.* Alla base del progetto, in continua evoluzione, vi è la realizzazione di un sistema che mette al centro il paesaggio come attore indiscusso di fattori antropici e ambientali in continua sinergia dinamica e temporale (Fig. 62). L'interazione tra processi antropici e fenomeni naturali è fondamentale. Un'iniziativa di rilevanza internazionale e recentissima è il progetto *ERC nEU-Med* condotte nella Val di Cornia, a cavallo tra il 2017 e il 2018, dall'Università di Siena. L'area della Toscana meridionale tirrenica relativa alle Colline Metallifere è divenuta un laboratorio dove poter sperimentare protocolli di analisi interdisciplinare sul campo, in collaborazione fra archeologi, chimici e geologi. Grazie all'utilizzo mirato del GIS e all'uso combinato analisi fisico-chimiche, delle ricognizioni di superficie, dello scavo archeologico e alle metodologie proprie dell'Archeologia dei Paesaggi e della Geoarcheologia, è stato possibile evidenziare la contaminazione da metalli pesanti nel terreno,

in relazione allo studio del paesaggio storico-minerario e metallurgico che ha caratterizzato il comprensorio sin dall'epoca protostorica. La condizione discriminante del progetto è stata la creazione di griglie di analisi a copertura sistematica della fascia di territorio compresa tra il limite della laguna, indicato dalla car-

tografia storica, e il cordone dunale interno compreso tra le aree umide e quelle asciutte. La segnalazione precisa delle evidenze archeologiche, insieme alle analisi chimiche, ha permesso di realizzare una cartografia di dettaglio della Val di Cornia, caratterizzata da dune, aree umide e interdunali. L'elemento multid-

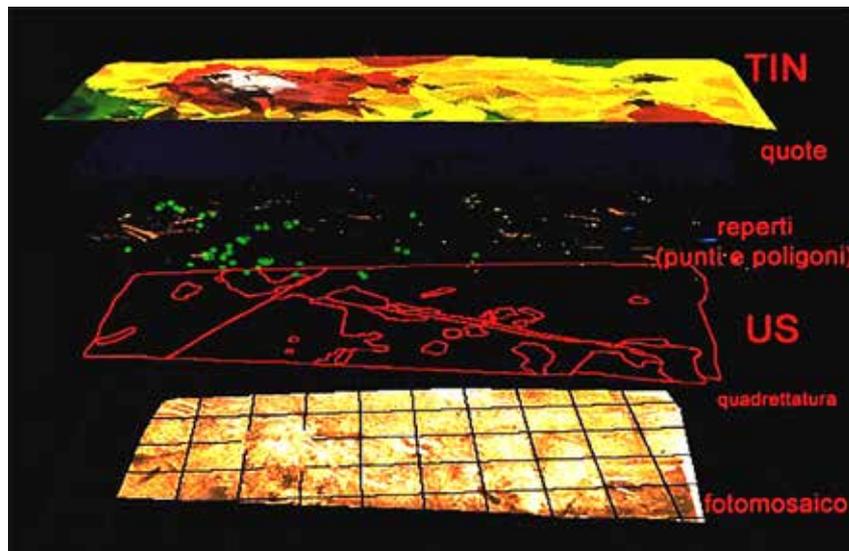


Fig. 60. Schema esemplificativo della costruzione del GIS in tempo reale.

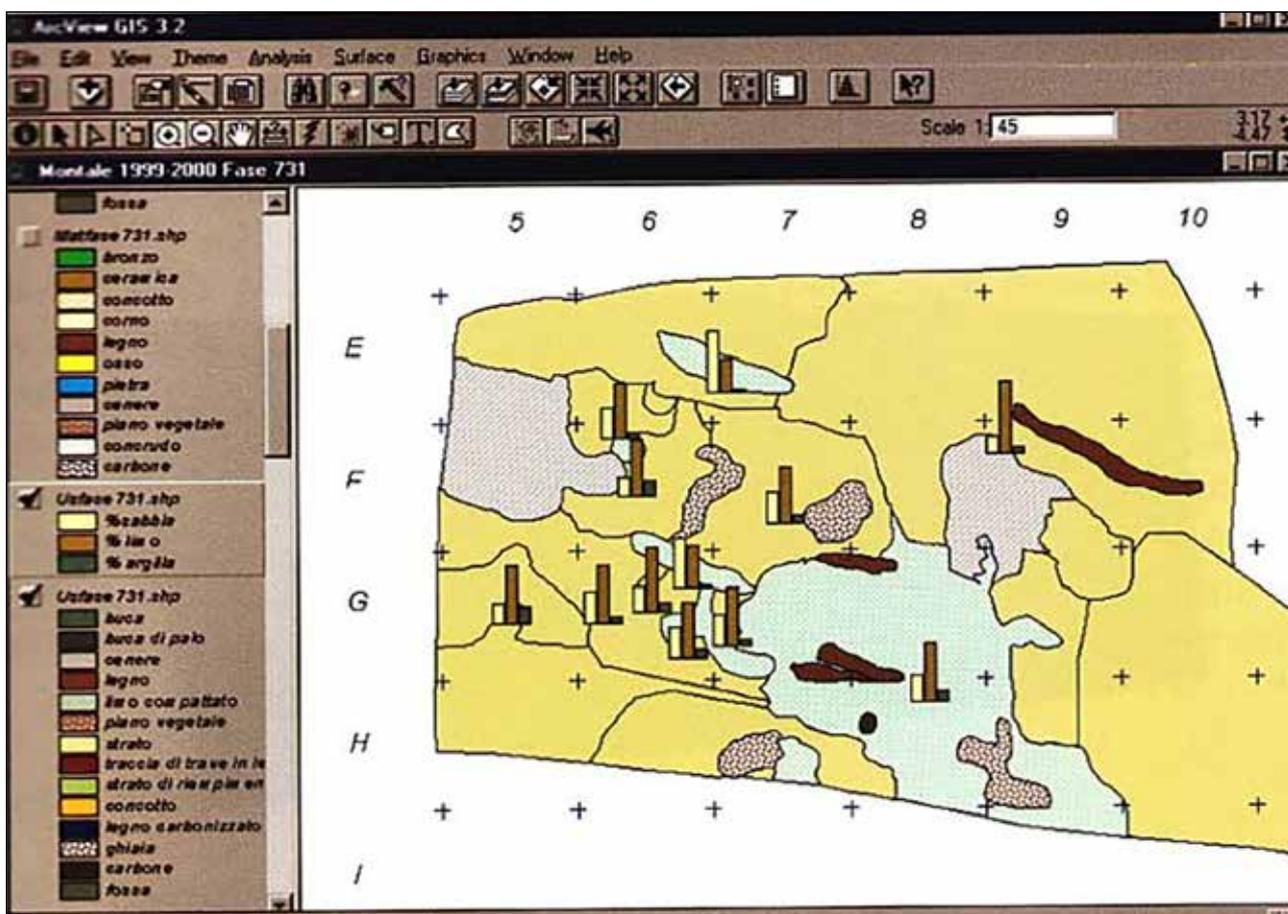


Fig. 61. Planimetria con la rappresentazione e l'indicazione spaziali delle Unità Stratigrafiche di fase con caratterizzazione delle granulometrie.

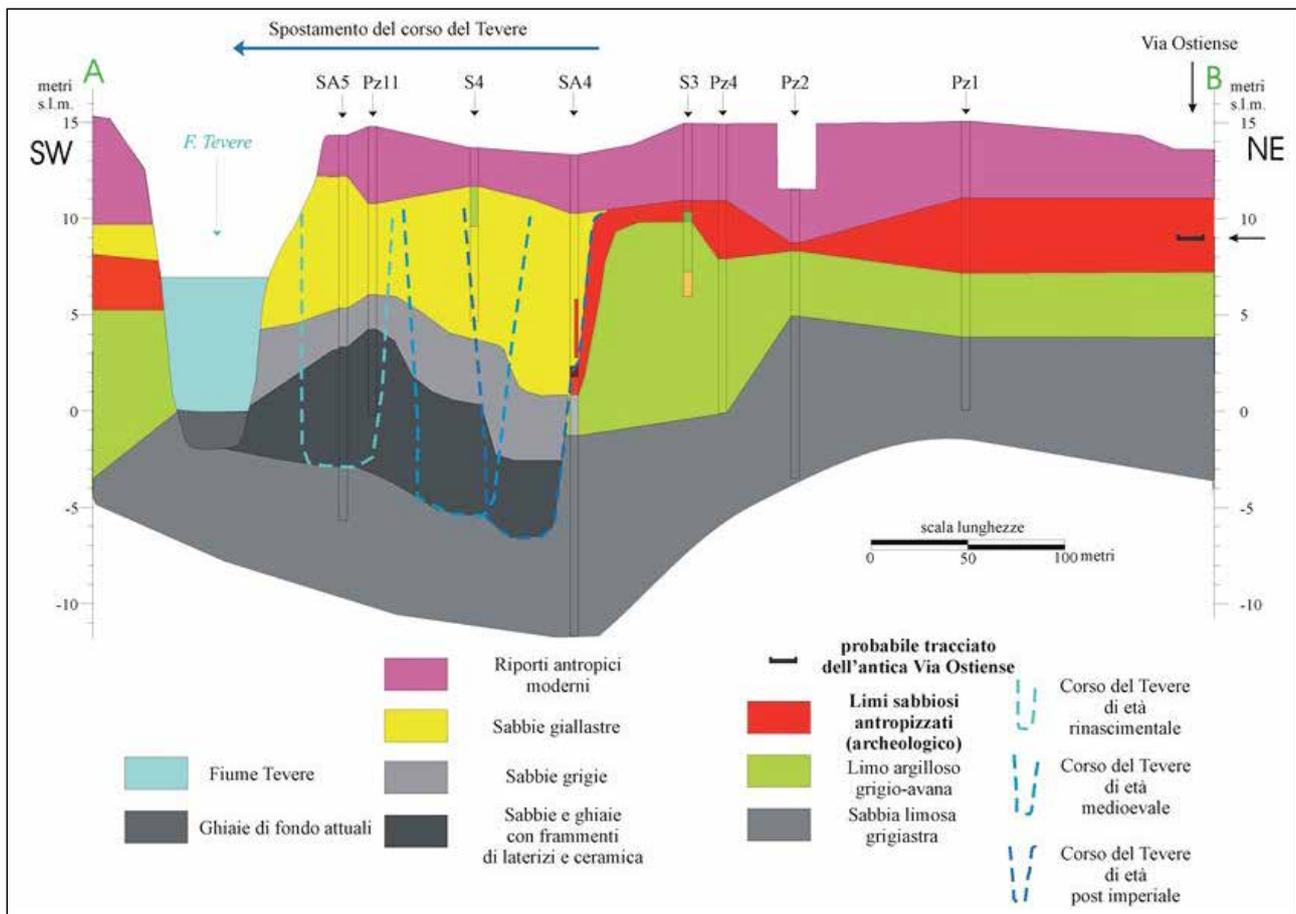


Fig. 62. Esempio di ricostruzione, sulla base di dati geoarcheologici, dello spostamento del corso del Tevere in età storica lungo la via Ostiense.

sciplinare del progetto ha consentito una ricostruzione più accurata delle dinamiche di mutamento e adattamento del paesaggio, definendo quali elementi chimici potevano configurarsi come direttrici principali dell'attività antropica in un determinato periodo (Fig. 63). Il GIS è uno strumento di conoscenza che integra un vasto ventaglio di conoscenze per analisi sempre più particolareggiate del paesaggio, come nel caso della ricostruzione delle caratteristiche paleoambientali (Fig. 64) dell'antico bosco della *Partecipanza Agraria di Nonantola*, a Modena, sempre in Emilia Romagna, attraverso indagini geoarcheologiche, sedimentologiche, palinologiche e carpologiche. In quest'area, le fonti medievali collocavano la *Selva Gena* o *Zena*, un grande spazio boschivo di pertinenza dell'abbazia di S. Silvestro di Nonantola. La ricerca è nata da una domanda che si sono posti gli studiosi, ovvero se la *Selva Gena* o *Zena* esisteva già in epoca romana e dove sarebbe passata, quindi, la via che, secondo l'*Itinerarium Antonini*,

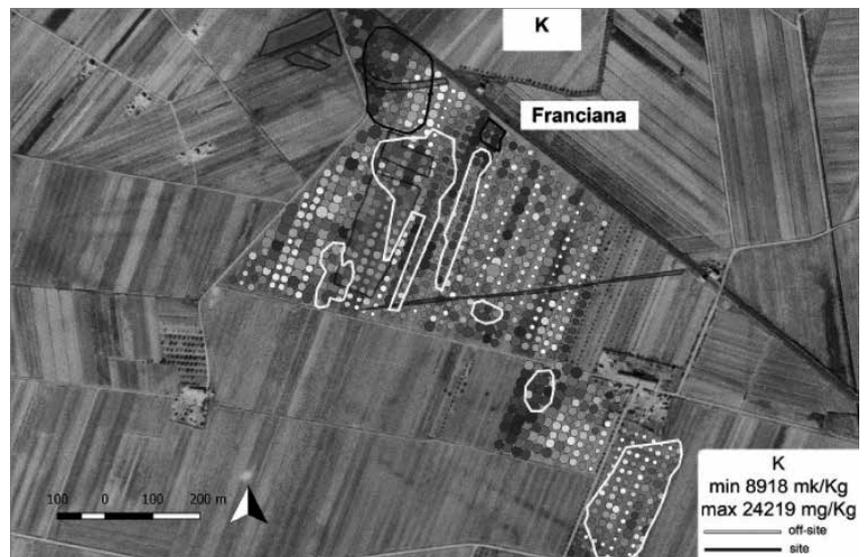


Fig. 63. Località Franciana con i valori di potassio (K), su ortofotocarta. I valori sono restituiti in scala di grigio, dal valore minimo assoluto (in bianco) al valore massimo assoluto (in nero).

collegava Nonantola a *Vicus Serninus*, odierna Guisa Pepoli. Lo studio ha, dunque, seguito un iter specifico: un inquadramento geomorfologico dell'area attraverso 29 carotaggi (Fig. 65); l'analisi del carotaggio NO31, effettuato all'interno di quello che doveva configurarsi come il cuore

del Bosco della *Partecipanza*; l'indagine archeobotanica delle antiche foreste planiziali dell'Emilia Romagna e di diverse aree precise del modenese. Come primo elemento, i dati archeologici hanno confermato che, molto probabilmente, il bosco non sarebbe potuto esistere

in età romana, considerata l'assenza di materiali archeologici, a parte la presenza di un pozzo rinvenuto fortuitamente, nel 1880, e datato genericamente all'età romana, nei pressi meridionali del paleoalveo medievale *Panaro-Scoltenna*. La morfologia a dossi e depressioni dell'area di indagine corrispondeva ad una precisa e costante sequenza litologica superficiale: zone di canale, argine e rotta delimitavano l'estensione laterale dei dossi ed erano caratterizzate dall'affioramento di sabbie limose; le granulometrie tendevano ad assottigliarsi, passando definitivamente a limi o ad argille. L'analisi delle granulometrie ha consentito di stabilire che ad una profondità compresa tra i 2.75 e i 3.30 m dal piano di campagna giacevano *facies* di ventaglio di rotta distale, mentre il suolo da 2,75 m a salire era appartenente a *facies* di piana inondabile (Fig. 66). Dal punto di vista del quadro vegetale, le analisi archeobotaniche hanno stabilito l'esistenza di un'area aperta con piccoli nuclei boschivi sparsi di querceti (nocciolo) e boschi igrofilo (ontano nero). Al bosco igrofilo erano associati, dunque, aree umide non molto estese, ma con la presenza di bacini abbastanza profondi; questi ospitavano la ninfea bianca, la brasca, il millefoglio bianco e la lenticchia d'acqua. Alla vegetazione locale, si univa quella antropica delle colture cerealicole (grano e orzo), della canapa, della vite e del noce, mentre dai boschi antropici/naturali il castagno. Le analisi non hanno risolto la questione della presenza della Selva Gena o Zena citata dalle fonti, ma ha restituito comunque un quadro paesaggistico caratterizzato da modesti raggruppamenti forestali di querceto e di bosco igrofilo, non agibile da parte dell'uomo, perché intervallato da zone umide e acquitrinose. I dati raccolti non hanno risposto alle domande degli studiosi, ma hanno fornito ulteriori risposte in un'ottica di ridimensionamento dell'ipotesi di una selva boschiva fitta presente nel VIII secolo d.C., come menzionava la fonte medievale in merito alla donazione di *Astolfo* a *Lopicino*, del 752 d.C., e ad *Anselmo*, del 753 d.C.; gli stessi studiosi hanno ipotizzato che la selva era, plausibilmente, uno spazio aper-

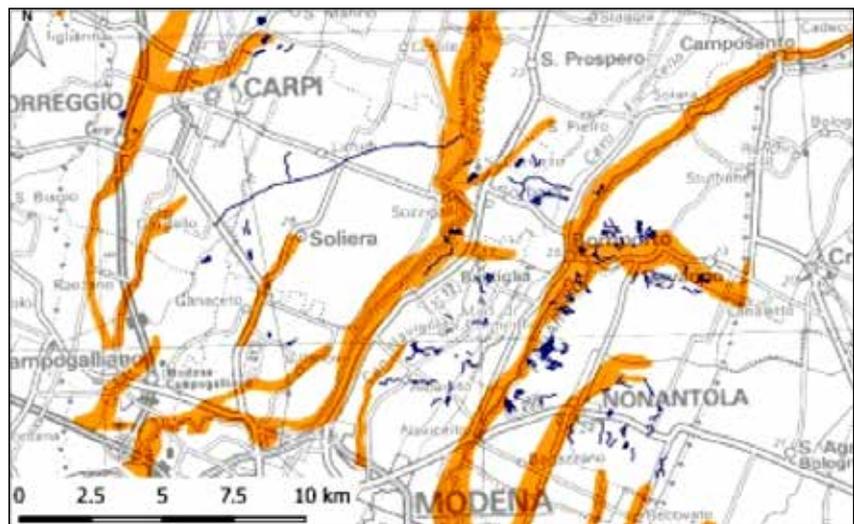


Fig. 64. Posizionamento dei paleosuoli relitti in territorio modenese.

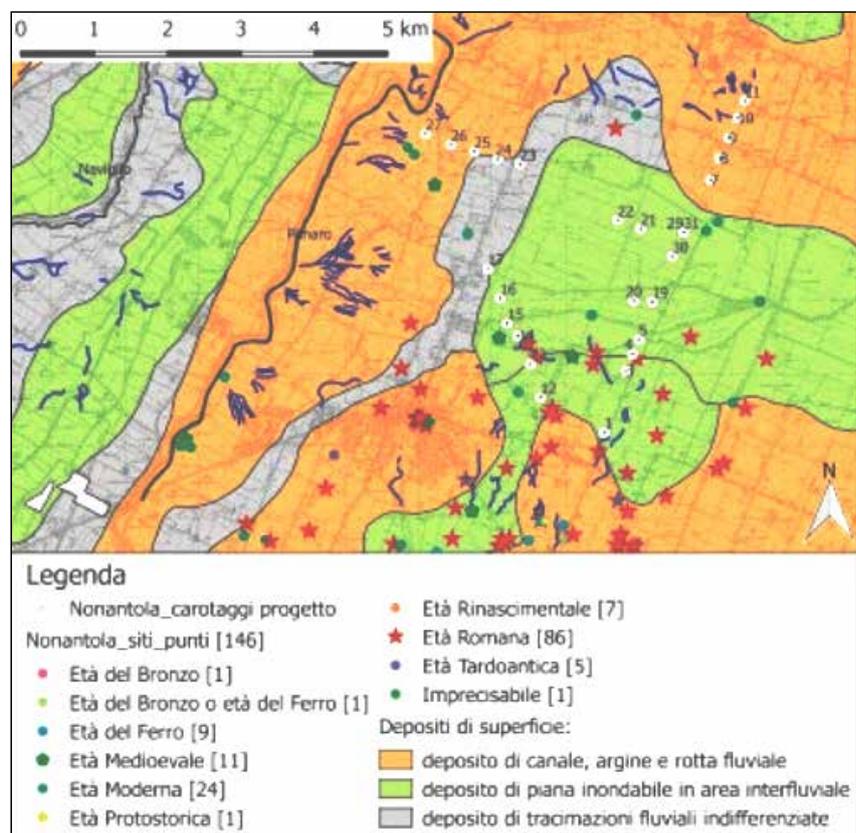


Fig. 65. Posizionamento dei carotaggi, della paleogeografia e della litologia del suolo.

to impervio, inospitale, con boschi sparsi alternati a zone acquitrinose.

### Bibliografia

ALLEN K. M. S., GREEN S. W., ZUBROW E. B. W. (1990), *Interpreting Space: GIS and Archaeology*. London Taylor & Francis.

ASHMORE W., KNAPP A. B. (1999), *Archaeologies of Landscape. Contemporary Perspectives*. Oxford, Blackwell.

BIALLO G. (2002), *Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici*,

Milano.

BOGDANI J. (2009), *GIS per l'archeologia*, in Giorgi E. (a cura di) *Groma 2. In profondità senza scavare. Metodologie di indagine non invasive e diagnostica per l'archeologia*, Bradypus, Bologna, pp. 421-438.

BURROUGH P. A. (1986), *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Clarendon Press.

CANDELATO F., CARDARELLI A., CATTANI M., LABATE D., PELLECAANI G. (2002), *Il sistema informativo*

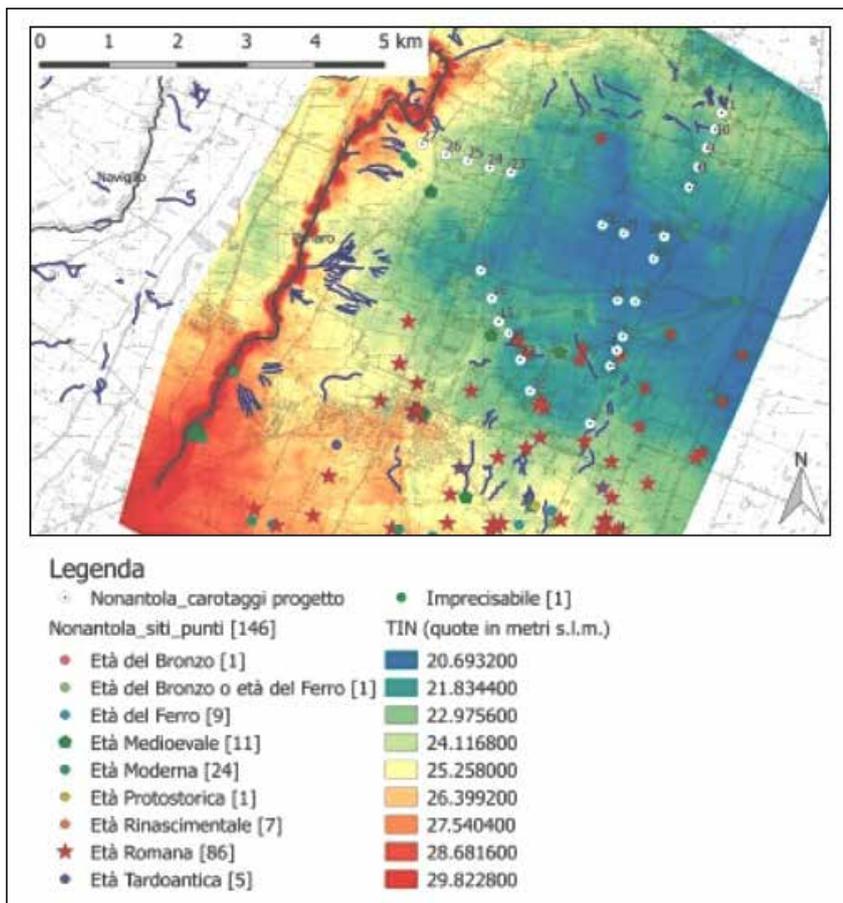


Fig. 66. Risultato delle datazioni dei campioni dei carotaggi (NO3195, NO31325, NO31290).

dello scavo della terramara di Montale (Castelnuovo Rangone-MO), in PERETTO C., *Analisi informatizzata e trattamento dati delle strutture di abitato di Età Preistorica e Protostorica in Italia*, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze, pp. 257-270.

CHADWICK A. J. (1979), *Settlement simulation*, in RENFREW C., COOKE D. (a cura di), *Transformations: mathematical Approaches to Culture Change*, New York, Academic Press, pp. 237-255.

CHAPMAN H. (2000), *Understanding wetland archaeological landscapes: GIS, environmental analysis and landscape reconstruction; pathways and narratives*, in LOCK G. (a cura di), *Beyond the Map. Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press, pp. 49-59.

CLARKE D. L. (1972), *Models in Archaeology*. London, Methuen.

CLARKE D. L. (1977), *Spatial Information in Archaeology*. London. Academic Press.

CLARKE D. L. (1998), *Archeologia analitica*, Edizione Italiana,

Electa.

CREMASCHI M., FERRETTI A., FORTE M. (1994), *Tecniche digitali e di visualizzazione in geoarcheologia: il caso di studio della terramara S. Rosa di Poviglio (RE)*, in *Archeologia e Calcolatori*, 5, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 305-316.

CREMASCHI M., FORTE M. (1999), *Reconstructing a fossil landscape by remote sensing and GIS applications: sites, virtual models and territory during the middle bronze age in the po plain (Northern Italy)*, in *Archeologia e Calcolatori*, 10, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze pp. 207-226.

CURRY M. R. (1998), *Digital Places. Living with geographic information technologies*, London, Routledge.

DALLAI L., VANESSA V. (2019), *Nuovi approcci allo studio del paesaggio storico: il progetto ERC nEU-Med e le indagini multidisciplinari condotte nella bassa val di Cornia*, in *Archeologia Medievale*, XLVI, *Cultura materiale. Insediamenti. Territorio*, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 179-197.

DUECKER K. (1979), *Land Resource Information Systems: a Review of Fifteen Years' Experience*, in *Geoprocessing*, Volume 1, Numero 2, pp. 105-128.

DJINDJIAN F. (1998), *GIS usage in worldwide archaeology*, in *Archeologia e Calcolatori*, 9, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 19-30.

D'ANDREA A. (2003), *Analisi spaziale intra-site. Soluzione GIS per lo scavo archeologico*, in *Archeologia e Calcolatori*, 14, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 329-335.

FARINETTI E. (2011), *Il Sitar tra archeologia e geoarcheologia. L'interazione dei dati antropici e ambientali nella progettazione iniziale del sistema*, in Serlorenzi M., *Sitar. Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma*, Atti del Convegno, Roma 26 ottobre 2010, Iuno Edizioni, Roma, pp. 115-122.

FORTE M. (2000), *Archaeology and virtual micro-topography: the creation of DEMs for reconstructing fossil landscapes by Remote Sensing and GIS applications*, in LOCK G. (a cura di), *Beyond the map. Archaeology and spatial technologies*, Oxford, IOS Press, pp. 199-213.

FORTE M. (2002), *I Sistemi Informativi geografici in Archeologia*, I Quaderni di MondoGis, MondoGis Editore, Roma.

FORTE M., ANCONETANI P., CAVALLINI C., FERIOLI V., MILLIKEN S., PERETTO C. (1995), *Le paleosuperfici di Isernia La Pineta: progetto per uno studio computerizzato*, in *Atti dell'XI Congresso degli Antropologi italiani, Isernia, 13-16 settembre*, pp. 117-128.

GIBSON J. (1999), *Un approccio ecologico alla percezione visiva*, Il Mulino, Bologna, 1999.

GILLINGS M., MATTINGLY D., VAN DALEN J. (2000), *Geographical Information Systems and Landscape Archaeology*, Gillins Wheatley, London.

GILLINGS M., WHEATLEY D. (2000), *Vision, perception and GIS: developing enriched approaches to the study of archaeological visibility*, in LOCK G., *Beyond the Map. Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press, pp. 1-27.

GILLINGS M., WHEATLEY D.

- (2002), *Spatial technology and archaeology: the archaeological applications of GIS*, London.
- HAGEMAN J. B., BENNETT D. A. (2000), *Construction of Digital Elevation Models for Archaeological Applications*, in WESTCOTT K. L., BRANDON R. J. (a cura di), *Practical applications of GIS for archaeologists. A predictive modeling kit*, London, Taylor & Francis.
- HAGGETT P. (1965), *Locational Analysis in Human Geography*, London, E. Arnold.
- HARRIS T. M. (1986), *Geographic Information System Design for Archaeological Site Information Retrieval*, in LAFLIN S. (a cura di), *Computer Applications in Archaeology*, Birmingham, University of Birmingham, pp. 148-161.
- HARRIS T. M., LOCK G. R. (1996), *Multi-dimensional GIS: Exploratory approaches to spatial and temporal relationships within archaeological stratigraphy*, in KAMERMANS H., FENNEMA K. (a cura di), *Interfacing the past: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, CAA95, *Paleohistoria* 28, Leiden, pp. 307-316.
- HIRSCH E. (1995), *Landscape: Between Place and Space*, in HIRSCH E., O'HANLON M. (a cura di), *The Anthropology of Landscape. Perspectives on Place and Space*, Oxford, Clarendon Press.
- HODDER I., ORTON C. (1976), *Spatial Analysis in Archaeology. New Studies in Archaeology*. Cambridge. Cambridge University Press.
- JOHNSON G. A. (1972), A Test of Utility of Central Place Theory in Archaeology, in UCKO P. J., TRINGHAM R., DIMBLEBY G. W. (a cura di), *Man, Settlement and Urbanism*, Duckworth, London, pp. 769-775.
- KAMERMANS A. (2000), *Land evaluation as predictive modelling: a deductive approach*, in LOCK G. (a cura di), *Beyond the Map. Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press, pp. 124-146.
- KVAMME K. L. (1983), *Computer Processing Techniques for Regional Modelling of Archaeological Site Locations*, in *Advances in Computer Archaeology*, 1, pp. 26-52.
- KVAMME K. L. (1988), *Development and testing of quantitative models*, in JUDGE W. J., SEBASTIAN L. (a cura di), *Quantifying the Present and Predicting the Past: Theory, Method and Application of Archaeological Predictive Modelling*, Denver, U.S. Department of the Interior, US Bureau of Land Management, pp. 324-428.
- KVAMME K. L. (1994), *GIS Graphics vs. Spatial Statistics: How do They Fit Together?*, in *Archaeological Computing Newsletter*, 38, pp. 3-4.
- KVAMME K. L. (1995), *Imaging the Past: Remote Sensing and Geographic Information Systems*, in *Context*, 11 (3-4), pp. 1-5.
- KVAMME K. L. (1996) *Geographic Information Systems*, in ELLIS L. (a cura di) *Archaeological Method and Theory: An Encyclopedia*, New York, Garland Press.
- LEMBO G. (2014), *Metodologie informativi applicate agli scavi archeologici. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze e Tecnologie Digitali per l'Archeologia e i Beni Culturali, XXVII Ciclo*, Università degli Studi di Ferrara.
- LOCK G. (2000), *Beyond the Map. Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press.
- LOCK G., HARRIS T., 1992, *Visualizing spatial data: the importance of geographic information systems*, in REILLY P., RAHTZ S. P. Q. (a cura di) *Archaeology and the Information Age: A Global Perspective*, London, Routledge, pp. 81-96.
- MOSCATI P. (1998), *Application in Italian Archaeology*, in *Archeologia e Calcolatori*, 9, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 191-236.
- MOSCATI P., TAGLIAMONTE G. (1998), *Methodological Trends and Future Perspectives in the Application of GIS in Archaeology*, in *Archeologia e Calcolatori*, 9, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 9-268.
- PETRIE L., JOHNSON J., CULLEN B., KVAMME K. (1995), *GIS in Archaeology. An Annotated Bibliography*, Sydney University Archaeological Methods Series, 1995.
- PERETTO C. (1991), *Le industrie litiche del giacimento di Isernia La Pineta*, Isernia, Iannone Editore.
- PERETTO, C., TERZANI, C., CREMASCHI, M. (1983), *Isernia La Pineta: un accampamento più antico di 700.000 anni*, Calderini Editore, Bologna.
- RENFREW C., BAHN P. (1995), *Archeologia* (traduzione italiana), Bologna, Zanichelli, 1995.
- RUCCO A. A., BOSI G., TORRI P., MAZZANTI M., ACCORSI C. A., PELLEGRINI S., LUGLI S. (2019), *Geoarcheologia nel territorio di Nonantola (MO): studio morfologico, sedimentologico e archeobotanico dell'area dell'antica Selva Zena*, in *Archeologia Medievale*, XLVI, *Cultura materiale. Insedimenti. Territorio*, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 157-177.
- SIART C., FORBRIGER M., BUBENZER O. (2018), *Digital Geoarchaeology. New techniques for Interdisciplinary Human Environmental Research*, Springer.
- VAN LEUSEN M. (1993), *Cartographic modelling in a cell-based GIS*, in ANDRESEN J., MADSEN T., SCOLLAR I., (a cura di), *Computing the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, CAA92 Conference, Aarhus, Aarhus University Press, pp. 105-124.
- VAN LEUSEN M. (1999), *Viewshed and Cost Surface Analysis using GIS (Cartographic Modelling in a Cell-Based GIS II)*, in BARCELO J. A., BRIZ I., VILA A. (a cura di), *New Techniques for Old Times. CAA98 Conference. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 26th Conference, Barcelona, March 1998. BAR International Series 757*. Oxford, pp. 215-223.
- WESTCOTT K. L., BRANDON R. J. (2000), *Practical applications of GIS for Archaeologists. A Predictive Modeling Kit*, London, Taylor and Francis, 2000.
- WHEATLEY D., GILLINGS M. (2000), *Vision, perception and GIS: developing enriched approaches to the study of archaeological visibility*, in LOCK G. (a cura di), *Beyond the Map. Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press, pp. 1-27.

## 2. Tecniche di Remote Sensing per la Geoarcheologia

Con il termine *Remote Sensing* si indica la scienza che studia tutte le tecniche e le metodologie di acquisizione, elaborazione e interpretazione che consentono di studiare fenomeni o oggetti senza la necessità di un contatto tangibile. La disciplina tocca molteplici ambiti e le sue

origini risalgono alla metà del XIX secolo e sono in perenne evoluzione. Il *Remote Sensing* o *Telerilevamento* utilizza immagini o dati numerici rilevati da *aerei*, *satelliti*, *droni* o *sonde spaziali*. Considerata la vastità delle tecniche, andiamo a conoscere, in sintesi, le principali. In ordine cronologico, la prima in assoluto è la *fotografia aerea*. Tra i pionieri non possiamo non citare Crawford e

Bradford, Boni, Alfieri, Lugli, Castagnoli, Schiemdt e Adamesteanu. Le ricerche legate alla fotografia aerea ebbero un notevole sviluppo grazie al numeroso materiale aerofotografico prodotto, per scopi militari, nel corso della Seconda Guerra Mondiale. I più recenti studi condotti, grazie all'utilizzo della fotografia aerea, in archeologia, sono legati a diversi Centri di Fotogrammetria Finalizzata presenti presso la Seconda Università di Napoli, ora Università della Campania "Luigi Vanvitelli", l'Università di Siena e l'Università del Salento. La *fotografia aerea* permette di osservare direttamente il paesaggio con lo scopo di interpretarne i cambiamenti e le persistenze, di documentarlo e di verificare tutto ciò che si è potuto osservare direttamente sul suolo. Esistono due tipi di fotografia aerea: *verticale* e *obliqua*. Dalla loro combinazione è possibile colmare limiti delle singole tecniche di ripresa (Fig. 67). La differenza tra *verticale* e *obliqua* è nella modalità di acquisizione: la prima è scattata mantenendo l'asse della camera fotografica ortogonale al piano del terreno, permette di avere una visione sinottica del territorio ed è adatta per ricognizioni aeree su macro-scala; la seconda è scattata con una precisa angolatura della camera fotografica rispetto al piano del terreno, consente di catturare specifiche porzioni del territorio ed è adatta per osservare il terreno con migliori condizioni di visibilità, luce e leggibilità (Fig. 68). Possiamo considerare la fotografia aerea verticale come *strumento di indagine* e la fotografia aerea obliqua come *strumento di controllo*.

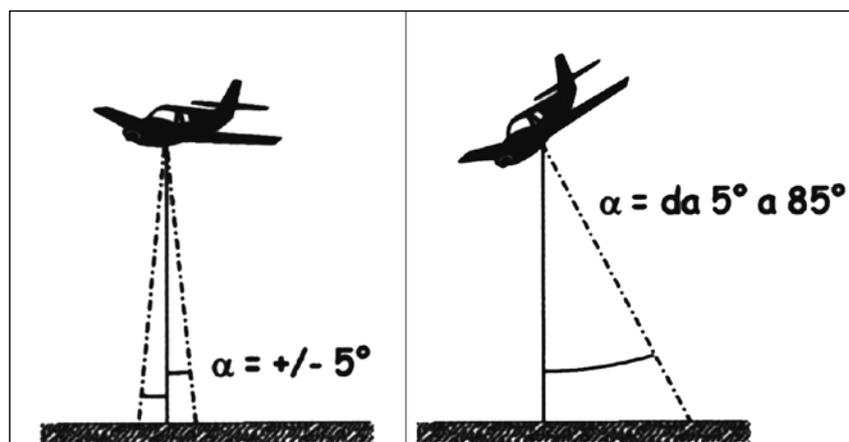


Fig. 67. Differenza nell'acquisizione tra foto aerea e foto obliqua.

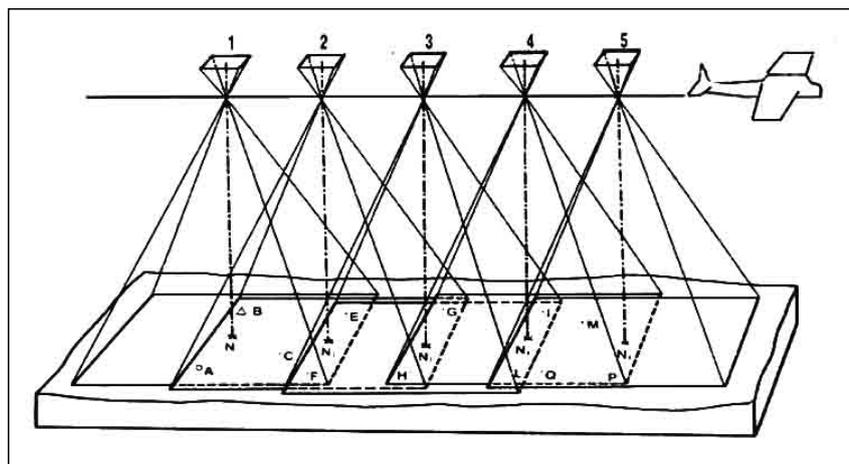


Fig. 68. Tecnica di acquisizione aerofotogrammetrica, con sovrapposizione dei fotogrammi.

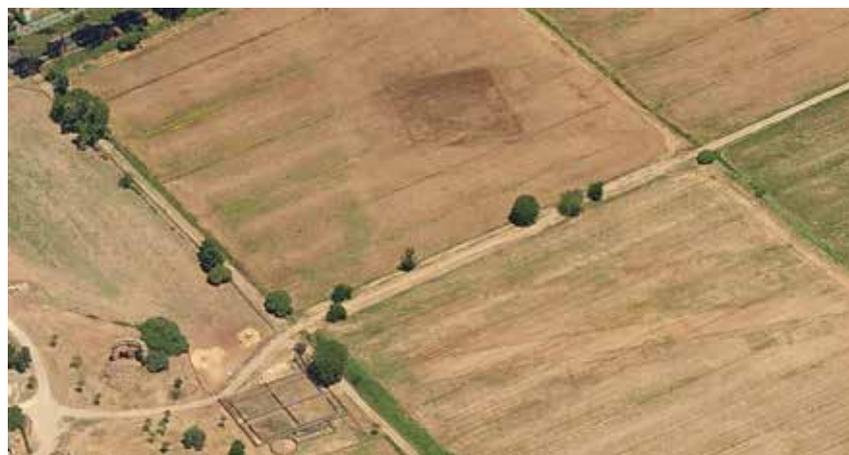


Fig. 69. Area di Portus, Ostia. Edificio sepolto, evidenziato dalla differenza di colore data dalla diversa umidità del suolo (*soilmark*).

La peculiarità delle fotografie aeree, per lo studio del paesaggio, è l'individuazione dei *segni del paesaggio*, soprattutto nelle colture o nei terreni privi di copertura vegetativa. È qui che entrano in gioco le *tracce*. Queste sono classificate secondo la scuola inglese in *soilmark* (Fig. 69), *cropmark* (Fig. 70), *earthwork* (Fig. 71) e *tracce da sopravvivenza* (Fig. 72). Il *Soilmark* è visibile attraverso le variazioni di colore visibili su suolo, privo di copertura vegetativa, che trattengono e/o rilasciano umidità o che riflettono la luce. Il *cropmark* (Fig. 70), grazie alla variazione del

colore e/o della crescita vegetativa dovuto alla presenza di elementi di natura archeologica sepolti, si divide in *positivo* o *negativo*: il primo si verifica in condizioni di differenza di crescita vegetativa, esempio verde su giallo, dove la coltura spicca per colore e dimensioni a causa di suolo profondo e, quindi, più umi-

do (fossati, paleovalvei); il secondo è l'esatto opposto, dove la presenza di elementi sepolti (muri, strutture ipogee, edifici) crea uno stress vegetativo notevole, esempio giallo su verde, con conseguente insufficienza di umidità del suolo. L'*earthwork* si riscontra alla variazione dell'altimetria della coltura vegetativa dovuta

alla presenza di terrapieni, fossati, buche; questa classe di tracce è visibile solo all'alba e al tramonto, in condizioni di luce radente).

Le *tracce da sopravvivenza* sono gli elementi antichi che persistono e sopravvivono all'antropizzazione moderna, mimetizzandosi nel tessuto paesaggistico attuale. A supporta-



Fig. 70. Ostia Antica. Regio III. La differente crescita vegetativa (*cropmark*) mette in luce il complesso organizzativo della tessuto topografico.



Fig. 71. San Salvatore Telesino, (BN). *Insulae* dell'antica città romana di Telesia, evidenziate grazie alla luce radente (*earthwork*) che ha enfatizzato la differenza altimetrica nella crescita vegetativa.



Fig. 72. Teramo vista dall'alto con i resti del teatro, dell'anfiteatro e della suddivisione ortogonale della città.



Fig. 73. Firenze, vista dal satellite.



Fig. 74. Roma, immagine satellitare all'infrarosso *RapidEye*.

re il lavoro interpretativo dell'archeologo e del geoarcheologo è l'utilizzo delle *immagini satellitari*, soprattutto di ultima generazione, che in determinate circostanze si rivelano utili nell'analisi e nella ricostruzione del paesaggio (Fig. 73). Le immagini da satellite (ad esempio *Quickbird-2*, *Ikonos-2*, *Landsat*, *SPOT*, *SPIN-2*, *Sentinel-2*, *Sentinel-3*) costituiscono un grande strumento di supporto per il telerilevamento aereo, soprattutto nel caso in cui, per motivi legati alle leggi sugli spazi aerei, non è possibile effettuare voli di ricognizione. Uno strumento di facile utilizzo per tutti gli utenti nella visualizzazione immediata di immagini satellitari è, certamente, *Google Earth*.

Esistono altre tecniche di *Remote Sensing* per l'esplorazione aerea del paesaggio, ovvero l'utilizzo di *sensori pancromatici* (utilizzano tutta la banda dello spettro visibile e hanno un'alta risoluzione spaziale), *multispettrali* (utilizzano da 3 a 7 bande dello spettro, tra cui le bande dell'RGB e hanno una bassa risoluzione spaziale pari a  $> 1$  m), *iperspettrali* (utilizzano un numero superiore al centinaio di bande dello spettro, hanno una larghezza di

banda intorno a  $0,1-0,2 \mu\text{m}$  e bassa risoluzione spaziale) e *LiDAR*. Grazie ai primi tre, è possibile acquisire un'ampia porzione dello spettro elettromagnetico, dal blu all'infrarosso termico (Fig. 74), registrando le informazioni su un numero notevole di bande, attraverso lo spettro. Il *LiDAR* è un grande laser scanner in grado di rilevare la morfologia del terreno con estrema precisione. Qual è la risoluzione di questi dati? Può essere *spaziale* (la dimensione corrisponde ad un *pixel* nell'immagine rilevata), *spettrale* (la larghezza delle bande spettrali in cui l'immagine è registrata), *radiometrica* (il numero delle diverse intensità della radiazione che il sensore è in grado di riconoscere) e *temporale* (il tempo che il satellite o l'aereo impiega per sorvolare di nuovo un punto specifico). Nel *Remote Sensing*, esistono due grandi gruppi di sensori, quelli *passivi* e quelli *attivi*. I sensori passivi non emettono energia propria, ma sfruttano la radiazione naturale di sorgenti esterne e, quindi, possono rilevare l'energia dei corpi esterni in funzione della loro temperatura o luminosità. Ad esempio, il *radiometro* è un sensore passivo,

perché misura l'energia che proviene da una o più sorgenti esterne (il sole nella banda del visibile, il terreno nelle bande dell'infrarosso termico). Una macchina fotografica senza flash sfrutta la luce del sole nella banda del visibile e si comporta come un sensore passivo.

I sensori attivi sfruttano e registrano l'energia elettromagnetica, dopo che questi hanno illuminato la scena essi stessi, riprendendo la zona d'interesse. La macchina fotografica che usa il flash è un sensore attivo; il flash colpisce la scena e il sensore attivo invia un segnale che illumina l'area interessata dal campo visivo del sensore; tutto quello che viene registrato dal sensore ritorna indietro (il *RADAR* e il *LiDAR* inviano un fascio di radiazioni, registrano il segnale di ritorno dopo che questo ha raggiunto il terreno e ha "registrato" la superficie). Il *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*) è una tecnica di Telerilevamento "attivo" per l'esecuzione di rilievi territoriali ad altissima risoluzione (Fig. 75). Il rilievo effettuato con il *LiDAR* avviene attraverso una scansione aerea con laser scanner montato su un aereo. Il laser scanner è composto da

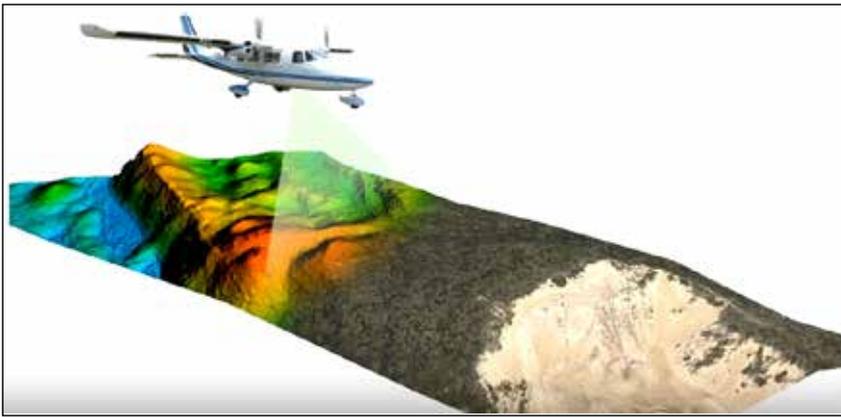


Fig. 75. Scansione LiDAR aerea.

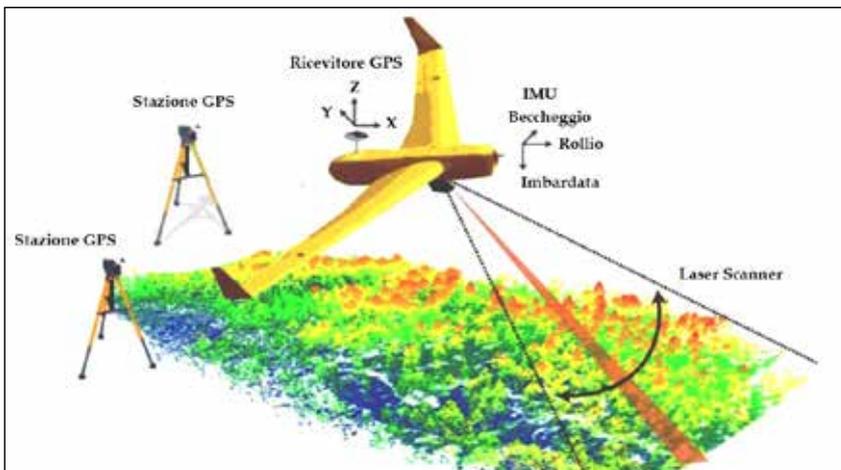


Fig. 76. Funzionamento di una scansione LiDAR con stazione GPS a terra, triangolando il mezzo aereo nello spazio attraverso il GPS e la stazione inerziale (IMU), montanti a bordo del mezzo aereo.

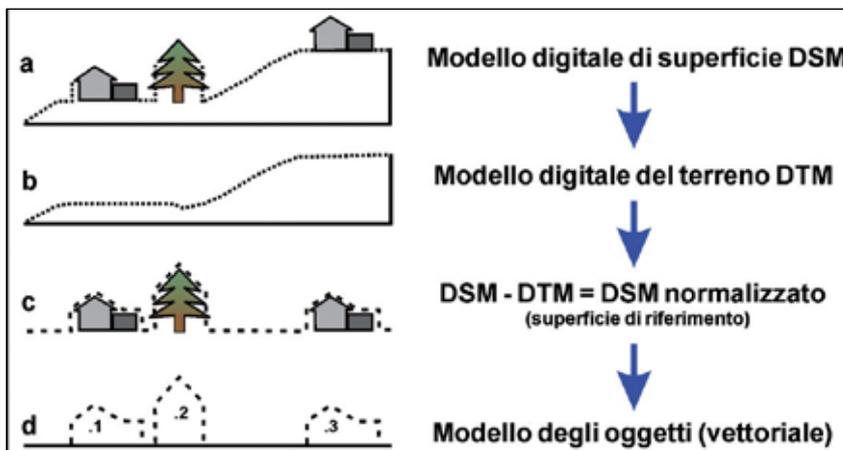


Fig. 77. Differenza LiDAR tra DTM, DSM e DSM normalizzato.

un trasmettitore (un *laser*), un ricevitore (un *telescopio*) e da un sistema di acquisizione dati. La grande potenzialità di questa tecnica è sia la velocità di acquisizione sia l'elevata risoluzione del dato. Quando è nata la tecnologia *LiDAR*? Si è sviluppata a partire dalla fine degli anni '70 negli Stati Uniti e, da oltre 20 anni, si utilizza in maniera più diffusa soprattutto nel monitoraggio costiero,

nell'analisi del rischio, nelle valutazioni ambientali (discariche tombate), per il rilievo di elettrodotti e condotte, per il monitoraggio della attività estrattive e per l'identificazione di siti archeologici, soprattutto di altura, all'interno di fitte aree boschive. Come funziona il sistema *LiDAR*? Il laser scanner (distanziometro laser) emette un impulso laser ad alta frequenza, circa 25 kHz,

che viene deviato, perpendicolarmente alla traiettoria prevista, da uno specchio che ruota. Il sensore non fa altro che misurare l'intensità del segnale riflesso e la quota del terreno; più precisamente la differenza di tempo che intercorre tra il segnale emesso e quello riflesso. Il *GPS* e l'*INS* (*Inertial Navigation System*) o *IMU* installati a bordo dell'aereo servono per determinare la posizione dello stesso nello spazio e il suo orientamento in tempo reale. Alcune stazioni *GPS* posizionate a terra, nell'area interessata dal rilievo aereo, sono necessarie per correggere la posizione dell'aereo nel corso dell'elaborazione dei dati (Fig. 76). Grazie al *LiDAR* è possibile ottenere un rilievo dell'area indagata, grazie alla creazione di una nuvola di punti  $(x,y,z)$  che contiene, al suo interno, un valore  $(I)$  di intensità riflessa. Analizzando i punti riflessi, è possibile osservare un ritorno multiplo del segnale; il *LiDAR* riesce a penetrare, in presenza di vegetazione, al di sotto di essa generando un segnale riflesso con più livelli. Attraverso l'elaborazione e il filtraggio (*automatico* o *manuale*) della nuvola di punti si ottengono il *DTM* (Modello Digitale del Terreno), il *DSM* (Modello Digitale di Superficie) e il *DSM-DTM*, ovvero un modello *DSM* normalizzato (Fig. 77).

### 2.1 Esempi e casi studio

Riportiamo di seguito alcuni casi studio che hanno coinvolto l'uso integrato di immagini aeree (da satellite, aereo e drone) e dati *LiDAR* per lo studio di contesti paleoambientali antichi. Uno di questi è quello del territorio a sud della Laguna di Venezia che, nel corso del tempo, ha subito innumerevoli trasformazioni morfologiche a causa dell'azione energetica delle acque alle foci dei fiumi Brenta, Bacchiglione, Adige e Po. L'analisi della cartografia storica, di immagini aeree e satellitari hanno permesso di ricostruire, grazie alla loro lettura integrata e montata all'interno di un *GIS*, il palinsesto cronologico del settore meridionale della Laguna di Venezia; questa fascia di pianura costiera denotava delle caratteristiche abbastanza variabili: terreni agricoli a -4 m dal livello del mare nel settore cen-

tro-occidentale e che tendevano ad aumentare, tra 0 e 2 m slm, lungo la zona del litorale. I fiumi Brenta e Bacchiglione attraversavano a N l'area di indagine e, entrambi, hanno fortemente condizionato l'evoluzione geomorfologica e sedimentologica di questo tratto di pianura. I dossi

limoso-sabbiosi, alternati a terreni organici o argilloso-limosi hanno permesso di riconoscere la disposizione delle direttrici fluviali estinte, identificando le progressive fasi di avanzamento del litorale avvenute nel corso dell'Olocene. Le fotografie aeree (Figg. 78-79) e satellitari

(Fig. 80) hanno evidenziato i limiti geomorfologici e le strutture attive sul territorio, come anche le diverse variazioni tessiturali del suolo, fondamentali per riscontrare la presenza di paleoalvei e delle antiche linee di costa; i paleoalvei appaiono come fasce sinuose di colore chiaro all'e-

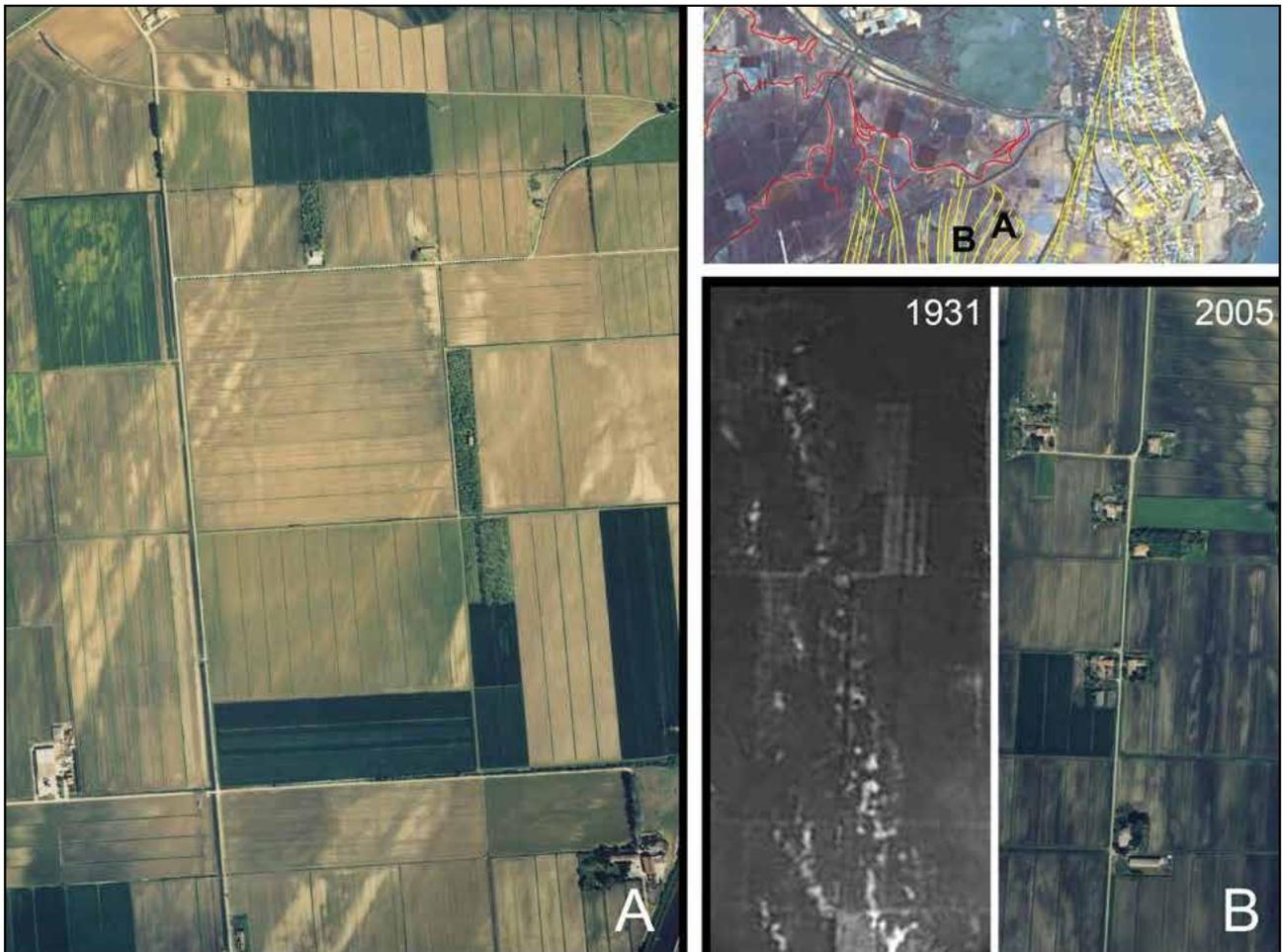


Fig. 78. Tracce antiche linee di costa (A) con i cordoni litoranei evidenziate da strisce chiare (*soilmark*); confronto tra foto aerea del 1931 e foto aerea del 2005 (B). Nella prima i cordoni sono evidenti, nella seconda sono quasi del tutto scomparsi.



Fig. 79. Tracce di paleoalvei da *soilmark*.

sterno e scure all'interno, mentre le linee di costa hanno l'aspetto di strisce lunghe, sottili e continue che appaiono chiare per il potere riflettente dei sedimenti. L'uso di immagini satellitari *Quickbird* e del *LiDAR*, integrate alle fotografie aeree, è stato di fondamentale supporto nello studio e nel riconoscimento dell'antico paleoalveo del *Fiume Serchio*, compreso nel territorio delle provincie di Lucca, Pisa e Pistoia. Dopo l'Eocene, caratterizzato dall'orogenesi ap-

penninica, i fenomeni distensivi del periodo miocenico hanno generato una serie di bacini intermontani tra cui la depressione tettonica chiamata *Graben del Serchio*. All'interno di questa depressione si sono sviluppati una serie di bacini lacustri che, nel Villafranchiano, hanno subito processi di sedimentazione e colmata. Nel Pliocene Inferiore, l'attuale pianura fu occupata da un vasto bacino lacustre di origine tettonica, poi oggetto di una notevole sedimen-

tazione. Nel Pleistocene Superiore si registrò un notevole fenomeno di sollevamento ad E e, in contemporanea, l'innalzamento del fiume Arno permise allo stesso di dividersi: il bacino venne alluvionato e modellato dal paleoalveo del fiume *Auser* (nome antico del Fiume Serchio) ad E, mentre ad O trovò uno sbocco indipendente fino a giungere a N di Lucca e, poi, proseguì per Pisa. Diversi innalzamenti del fiume Serchio e impaludamenti della

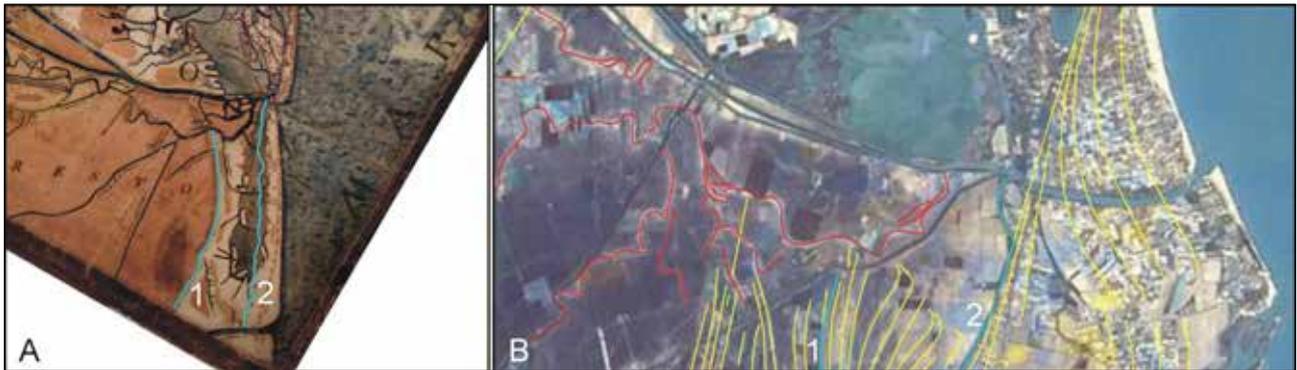


Fig. 80. Confronto tra la fascia costiera in una cartografia del 1556 e l'assetto odierno. Linee rosse: paleoalvei. Linee gialle: direzioni degli antichi cordoni litoranei.

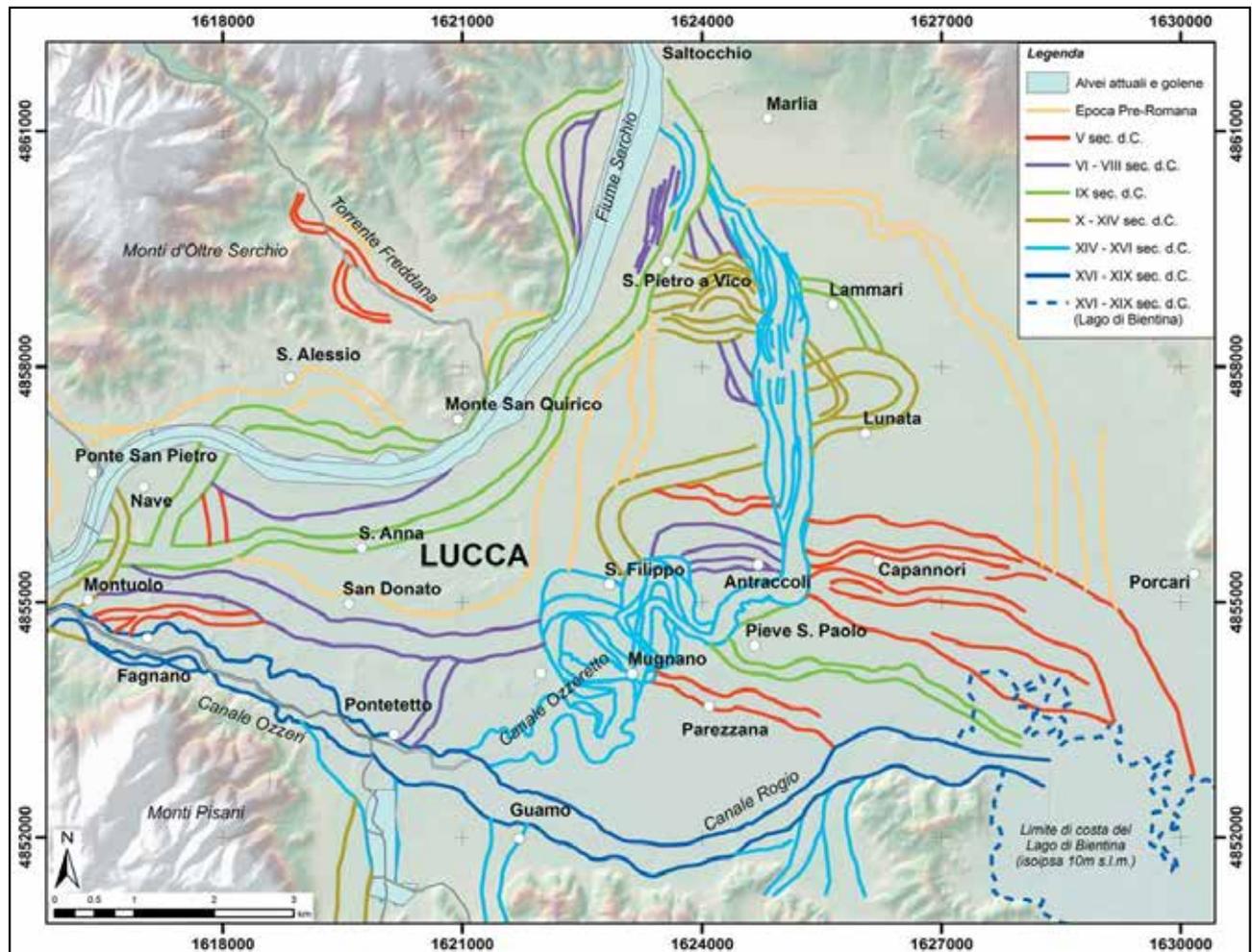


Fig. 81. Fotointerpretazione dei paleoalvei del Fiume Serchio, su DTM.

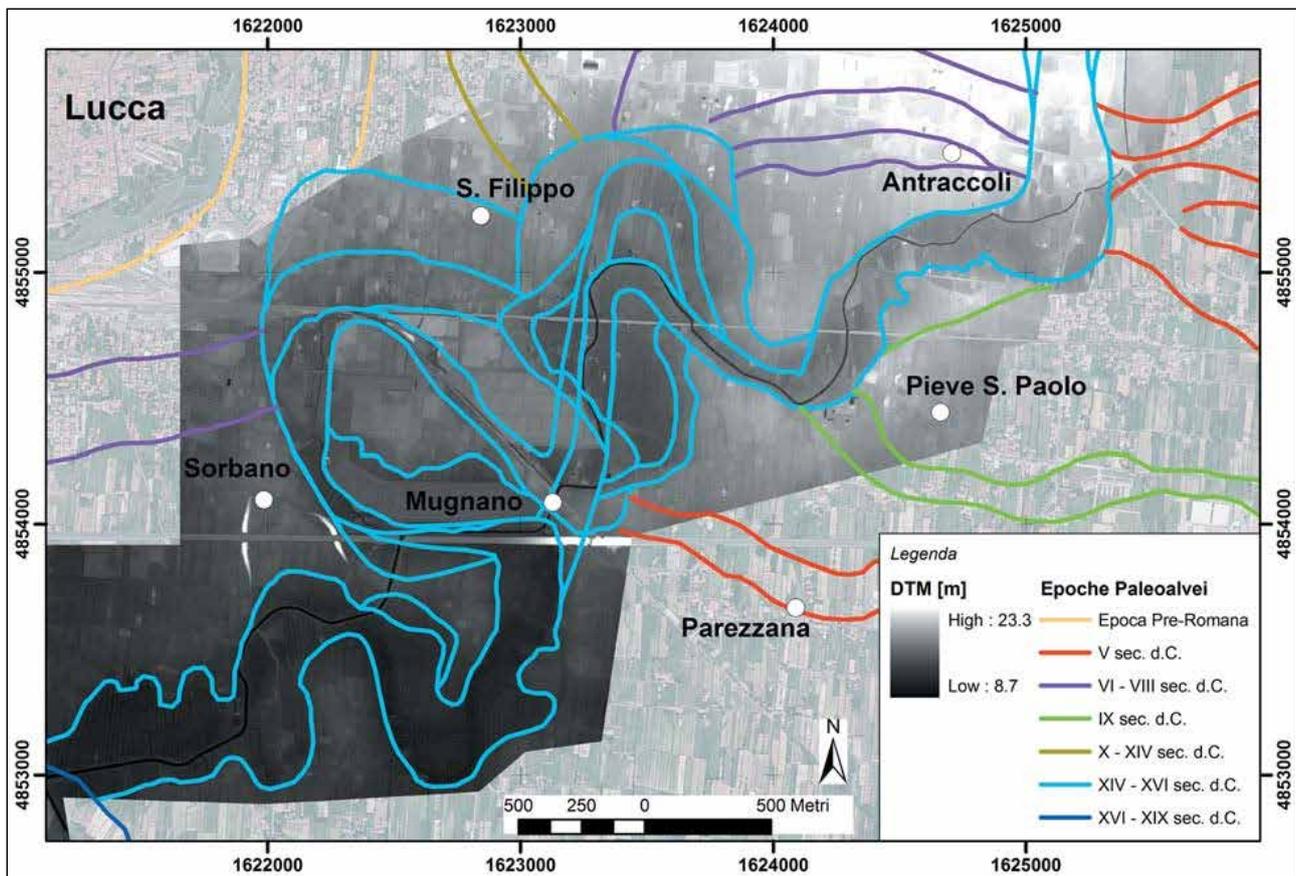


Fig. 82. DTM-LiDAR con sovrapposizione dei palealvei del Fiume Serchio.

piapura avvennero tra il XII secolo a.C. e il Medioevo, comportando uno stravolgimento e un mutamento continuo del paesaggio. Al fine di studiare il paesaggio sono state utilizzate, a fianco delle fotografie aeree storiche, i dati satellitari e LiDAR. L'interpretazione delle foto aeree (Fig. 81), lo studio monoscopico multi-spettrale delle immagini Quickbird, delle ortofoto, insieme alle quote calcolate dal DTM-LiDAR (Fig. 82) hanno permesso la ricostruzione, a grande scala, del paleodrenaggio del Fiume Serchio dal XII secolo a.C. fino al secolo scorso. Esemplari, per l'individuazione dei palealvei, sono gli studi condotti per la ricostruzione dei paesaggi storici padovani della pianura sud-orientale dei Colli Euganei (Fig. 83) e dei paesaggi d'altura del Trentino (Fig. 84), mediante l'uso e l'elaborazione dei dati LiDAR.

L'uso del LiDAR ha pienamente dimostrato come le moderne tecnologie di telerilevamento consentono di realizzare accurate analisi geomorfologiche qualitative e quantitative sia per scopi cartografici sia per la pianificazione territoriale. L'elaborazione integrata e la comparazione

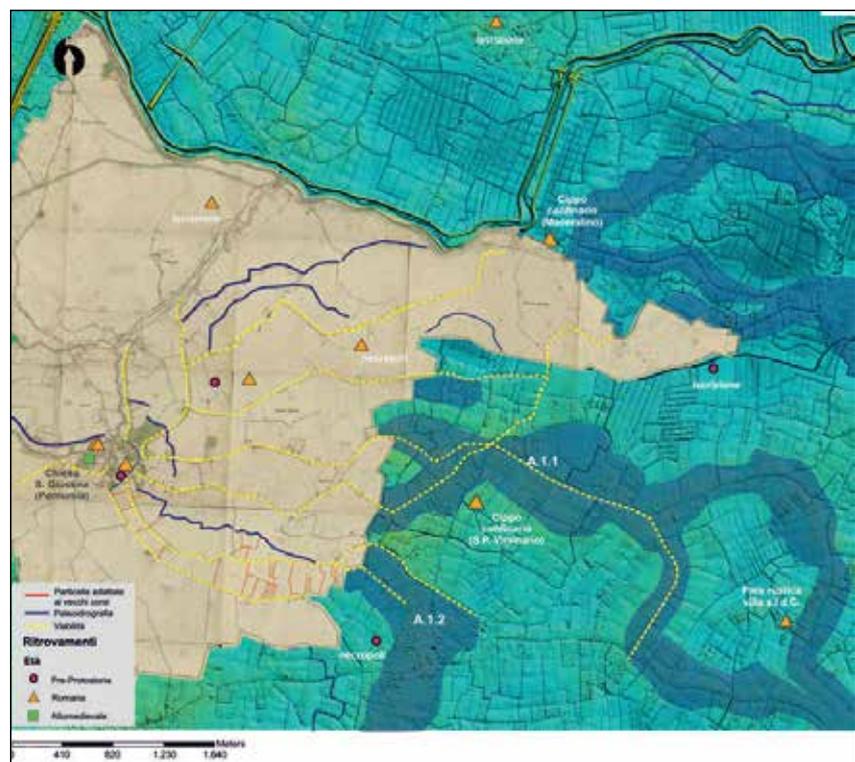


Fig. 83. Colli Euganei. Area di Pernumia. DTM LiDAR con sovrapposizione del catasto, evidenze archeologiche, paleoidrografia e viabilità adattate ai vecchi corsi fluviali.

di immagini provenienti da diversi satelliti (SPOT, ALOS AVNIR-2 e TERRA ASTER) hanno consentito di individuare tracce di palealvei e

antiche zone umide, altrimenti invisibili con la sola indagine geomorfologica, della Pianura di Pisa; il lavoro è avvenuto applicando differenti

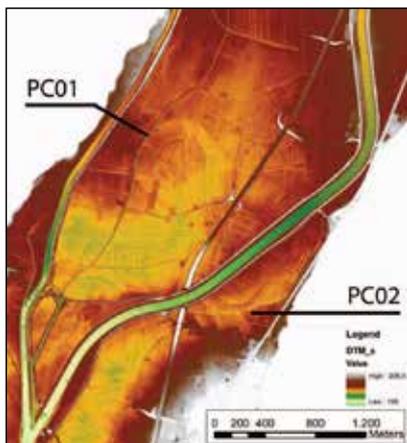


Fig. 84. Valle San Rocco. Valle dell'Adige. PC01 e PC02 indicano gli antichi paleovalvei dell'Adige.

composizioni di bande in falsi colori (*colour composite*), enfatizzando le singole bande dello spettro e la trasformazione dell'intero dataset multispettrale. I risultati hanno dimostrato l'esistenza della corrispondenza tra le forme evidenziate sulle immagini satellitari e quelle precedentemente rilevate, grazie alle sole tecniche di analisi geomorfologica, nell'ambito del progetto di ricerca MAPPA (Fig. 85). L'analisi delle immagini SPOT, attraverso l'uso della banda SWIR, ha avuto un notevole riscontro nella validazione di molte paleotracce (Fig. 86), identificate attraverso la fotointerpretazione, e di molte zone umide rilevate attraverso l'analisi morfometrica.

### Bibliografia

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

BANNING E. B. (2002), *Archaeology Survey*, New York.

BECK A., PHILIP G., DONOGHUE D., GALIATSATOS N. (2002), *Evaluation of integrated high and medium scale satellite imagery to archaeology in semi-arid environments*, in *Proceedings of the Conference Space Applications for Heritage Conservation*, European Space Agency, Strasbourg.

BEWLEY R. (2005), *Aerial Archaeology. The first century*, in BOURGEOIS J., MEGANCK M. (a cura di) *Aerial Photography and Archaeology 2003. A century of information*, GHENT.

BEWLEY R., DONOGHUE D., GAFFNEY V., VAN LEUSEN M., WISE A. (1999), *Archiving Aerial Photog-*



Fig. 85. Area NO di Pisa. Paleosuoli evidenziati grazie al *colour composite* 321 RGB dell'immagine SPOT5. La terza banda (*infrarosso vicino*) è indicata dal colore rosso, la seconda banda (*rosso*) in verde, e la prima banda (*verde*) in blu.

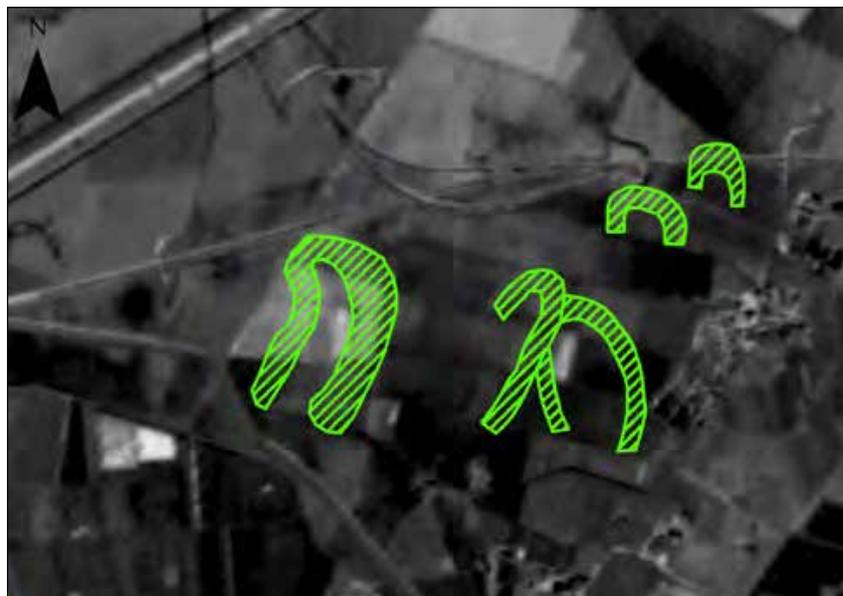


Fig. 86. Paleovalvei grazie all'indice NDVI calcolato su dati ASTER del Maggio 2005. Questo indice serve a distinguere le diverse condizioni vegetative delle colture.

*raphy and Remote Sensing Data. A Guide to Good Practice*, Oxford.

BINI M., CAPITALI M., PAPPALARDO M., POCOBELLI G. F. (2011), *Vecchi e nuovi dati dalla fotointerpretazione aerea*, in ANICHINI F., FABIANI F., GATTIGLIA G., GUALANDI M. L. (a cura di), MAPPA. Metodologie Applicate alla Predittività del Potenziale Archeologico, 1, Pisa, pp. 313-156.

BINI M., KUKAVIC M., PAPPALARDO M. (2012), *Interpretazioni di immagini satellitari della Pianura di Pisa*, in *MapPapers* 5-II, pp. 212-222.

CAMBI F. (2000), *Diagnostica Archeologica*, in FRANCOVICH R., MANACORDA D. (a cura di) *Dizionario di Archeologia*, Bari, pp. 122-133.

CAMBI F. (2003), *Introduzione all'Archeologia dei Paesaggi. Fonti e diagnostica*, Roma.

CAMPANA S. (2004), *Le immagini da satellite nell'indagine archeologica: stato dell'arte, casi studio, prospettive*, in CERAUDO G., PICCARRETA F. (a cura di), *Archeologia Aerea: studi di Aerofotografia Archeologica*, 1, Roma, pp. 279-299.

CAMPANA S., FORTE M. (2001), *Remote Sensing in Archaeology*, Firenze.

- CAMPANA S., MUSSON C., PALMER R. (2005), *In volo nel passato*, Firenze.
- CAMPANA S., PRANZINI E. (2001), Il Telerilevamento in Archeologia, in CAMPANA S., FORTE M. (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, Firenze, pp. 17-62.
- CARTER D. J. (1986), *The Remote Sensing Sourcebook*, London.
- CERAUDO G., PICCARRETA F. (2000), *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologia, tecniche, applicazioni*, Bari.
- CIAVOLA P., PERINI L., LUCIANI P. ARMAROLI C. (2006), *Il rilievo Lidar della costa dell'Emilia Romagna: uno strumento per la valutazione dell'impatto delle mareggiate sulle zone costiere e per la caratterizzazione della morfodinamica delle spiagge*, in *Hydrogeo, La Rivista Bimestrale di Tecnica, Cultura e Scienze del Territorio*, Febbraio 2006, Maggioli Editore, pp. 18-25.
- COLECCHIA A., FORLIN P. (2013), *Visibilità e interpretazione del record archeologico in aree d'altura. le potenzialità del LiDAR DTM*, in pp. ANGELUCCI D. E., CASAGRANDE L., COLECCHI A., ROTTOLI M. (a cura di), *Apsat 2. Paesaggi d'altura del Trentino. Evoluzione naturale e aspetti culturali*, SAP, Società Archeologica s.r.l., Mantova, pp. 41-60.
- COLWELL R. N. (1983), *Manual of remote sensing*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia.
- DEVEREUX B. J., AMABLE J. S., CROW P., CLIFF A. D. (2005), *The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies*, in *Antiquity*, 79-305, pp. 648-660.
- DONOGHUE D. N. M. (2001), *Multispectral Sensing in Archaeology*, in CAMPANA S., FORTE M. (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, Firenze, pp. 181-192
- FORTE M., GUIDAZZOLI A., (1991), *Fotointerpretazione aerea digitale e archeologia*, in *Pixel*, 10, pp. 11-14.
- GILLESPIE A. R., KAHLE A. B., WALKER R. E. (1986), *Color enhancement of highly correlated images. Decorrelation and HSI contrast stretch*, in *Remote Sensing of Environment*, 20, pp. 209-235.
- HAMPTON, J. (1985), *The Mapping of Archaeological Evidence from Air Photograph*, London.
- HOLDEN N., HORNE P., BEWLEY R. (2001), *High-resolution digital airborne mapping and archaeology*, in BEWLEY R., RACZKOWSKI W. (a cura di), *Aerial Archaeology. Developing Future Practice*, Amsterdam, IOS Press, 2001.
- JACQUES C., LE GORGEU J. P., STARGARDT J., TERRASSE M. (1988), *L'apport du satellite SPOT a l'archéologie du paysage*, Paris.
- MARCOLONGO B. (2000), *Telerilevamento*, in FRANCOVICH R., MANACORDA D. (a cura di), *Dizionario di Archeologia*, Bari, pp. 333-336.
- MASTROIANNI D. (2019a), *Da Bing Maps alla cartografia archeologica finalizzata di Ostia Antica. L'utilizzo dell'algoritmo Spline di ArcMap*, in *Archeomatica*, 4, Anno 9, Roma, pp. 6-12.
- MASTROIANNI D. (2019b), *L'aerofotointerpretazione archeologica per una nuova ipotesi ricostruttiva della città romana di Telesia (Benevento, Campania)*, in *Archeologia e Calcolatori*, 30, Edizioni all'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 273-288.
- MASTROIANNI D. (2016), *Il contributo di Bing Maps per lo studio della città di Ostia Antica*, in *Archeomatica*, 3, Anno 6, Roma, pp. 6-10.
- MAXWELL G. (1984), *The Impact of Aerial Reconnaissance Archaeology*, London.
- RILEY D. N. (1982), *Aerial Archaeology in Britain*, Aylesbury.
- RIZZETO F. (2014), *Carte storiche e foto aeree nello studio dell'evoluzione geomorfologica delle pianure costiere: il territorio a sud della Laguna di Venezia*, in *Atti della 18esima Conferenza Nazionale ASITA*, 14-16 ottobre 2014, Firenze, pp. 1053-1060.
- SALVINI R., GUASTALDI E., COSCINI N., DEL SEPPIA N. (2006), *Ricostruzione del paleovalveo del fiume serchio (Lucca, Italia) tramite rilievi lidar, foto aeree ed immagini quick bird*, in *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 19 (2), pp. 299-310.
- SARABIA, BAUTISTA J. (2017), *L'acqua come elemento generatore dei paesaggi storici nella pianura sud-orientale dei Colli Euganei*, in BROGIOLO G. P., (a cura di) *Progetti di Archeologia*, SAP, Società Archeologica s.r.l., Mantova, pp. 69-88.
- SIART C., FORBRIGER M., BUBENZER O. (2018), *Digital Geoarchaeology. New techniques for Interdisciplinary Human Environmental Research*, Springer.
- TUCKER C. J. (1979), *Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation*, in *Remote Sensing of the Environment*, 8, pp. 127-150.

### 3. Tecniche di Laser Scanning per la Geoarcheologia

Sono da considerarsi scanner tridimensionali tutti gli strumenti che riescono ad acquisire le coordinate spaziali di un'area geografica o di uno specifico oggetto, in maniera automatica e con un'elevata velocità di esecuzione. Il principio base del Laser Scanner è il seguen-

te: lo strumento invia un raggio o un fascio di luce sulla superficie dell'oggetto e analizza il segnale di ritorno. Quest'ultima fase è quella più importante del processo di scansione ed è diversa a seconda del Laser Scanner: in alcuni modelli, la distanza tra il sensore e l'oggetto da indagare si calcola basandosi sul *tempo di volo (time of flight)*, ovvero il tempo che il segnale emesso dal

sensore impiega per ritornare (Fig. 87). Altri sensori scanner si basano sul principio della triangolazione del segnale (Fig. 88) (nel caso del Laser Scanner 3D). Perché lo strumento si definisce scanner? Questa accezione deriva dal risultato e dall'acquisizione del dato che avviene attraverso criteri di organizzazione simili agli strumenti di scansione tradizionale, come quello che succede in uno scanner piano da tavolo. Alcuni scanner, oltre alle coordinate spaziali ( $x, y, z$ ), integrano i dati con la *riflettanza* (la porzione di luce incidente che una superficie è in grado di riflettere). Cosa accade quando il raggio laser dello scanner colpisce una superficie? Si ottiene la cosiddetta *nuvola di punti* (Fig. 89): il tempo e la differenza di fase sono convertiti in misure di distanza tra l'origine del segnale, ovvero il punto esatto in cui si trova il Laser Scanner, e gli oggetti colpiti dal raggio. È possibile misurare i punti nello spazio secondo una griglia ordinata. Questa si crea, in tempo reale, grazie allo spostamento regolare del laser che, ruotando su sé stesso, scansiona regolarmente la superficie indagata. Si avrà un'immagine di riflettanza 2D e ogni *pixel* avrà una coordinata  $x, y$  e  $z$ . Le diverse tipologie di Laser Scanner avranno delle differenze nell'accuratezza di misura, nella distanza dell'acquisizione e nella risoluzione della nuvola di punti; oggi non esiste strumento in grado di soddisfare questi requisiti in un'unica soluzione. Occorre trovare il giusto compromesso tra acquisizione, dimensione e qualità dei dati che dovranno essere elaborati, luogo in cui si effettua la scansione. Sono diversi i fattori che concorrono alla scelta e all'utilizzo del Laser Scanner: *accuratezza; velocità di acquisizione; risoluzione; range di misura; lunghezza d'onda del segnale* (che può essere affetto da disturbi esterni quali luce solare e umidità); *riflettività della superficie; campo visivo dello scanner; dotazione di camere interne o esterne allo strumento; facilità o difficoltà nel trasporto* (il sito da scansionare può trovarsi in pianura, lungo una parte rocciosa o in cima ad un monte non facilmente raggiungibile); *tipo di alimentazione* (batterie o corren-

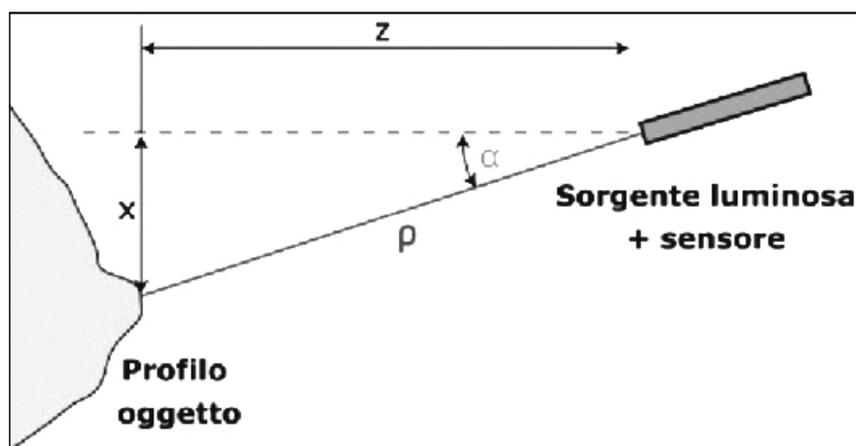


Fig. 87. Laser Scanner a tempo di volo (TOF - Time of flight)

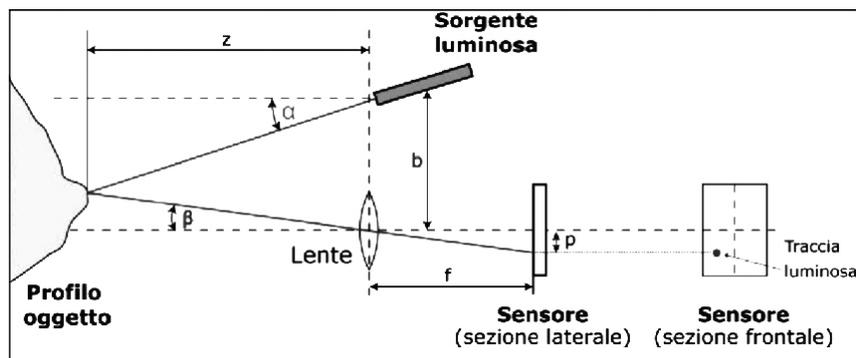


Fig. 88. Laser Scanner 3D a triangolazione, con emissione di un singolo spot di luce laser.



Fig. 89. Nuvola di punti di una parete rocciosa.

te elettrica); *software di acquisizione e elaborazione*. Importante, per ottenere un risultato ottimale, è la strategia di acquisizione del dato. Il Laser Scanner terrestre è uno strumento topografico che consente di rilevare un dato oggetto ed è opposto al rilievo tradizionale: riduce i tempi di acquisizione in campagna, consente di rilevare oggetti complessi e difficili da misurare per motivi oggettivi (ad esempio fronti rocciosi o pareti ipogee molto alte (Fig. 90) e, quindi, difficili da raggiungere) e abbatte eventuali errori umani. Questa semplificazione nella procedura di lavoro non deve far dimenticare l'approccio relativo alla fase progettuale dell'intervento di acquisizione: un sopralluogo approfondito, una battuta fotografica nel caso il Laser Scanner non disponga di una camera fotografica integrata e la disposizione di eventuali *target* per georeferenziare le fotografie sulla nuvola di punti. Come prima cosa vanno stabilite la *tipologia di oggetto* (dimensione, luogo, complessità) e il *risultato finale*. Una volta stabiliti i criteri adatti, si può procedere con le fasi di progettazione: ad esempio, si possono effettuare scansioni laser da posizioni differenti per poi interpolarle, attraverso l'uso di *target* posizionati a terra o sulla superficie da rilevare per una corretta georeferenziazione dei dati laser o per ottenere la loro unione. Come si elaborano i dati? Il dato che si ottiene, a seguito delle operazioni di scansione, è una nuvola di punti, ovvero un insieme di punti ognuno con coordinate tridimensionali ( $x, y, z$ ) rispetto al punto 0, costituito dalla posizione del laser scanner. L'operazione di elaborazione della nuvola di punti si ottiene grazie al software in dotazione con lo strumento, altri software commerciali o open source e seguono uno schema preciso, di seguito sintetizzato: *allineamento e georeferenziazione; filtraggio e elaborazione preliminare; unione di tutte le scansioni; ricampionamento; generazione delle superfici; ottimizzazione del modello 3D* (Fig. 91); *texturizzazione del modello 3D* (Fig. 92); *visualizzazione del modello 3D; estrazione delle informazioni geometriche*. In fase di elaborazione possiamo integrare

dati derivanti da campagna fotografica terrestre e aerea (tramite fotocamera e voli mirati con un drone).

### 3.1. Il Laser Scanner 3D per la documentazione e l'analisi geomorfologica

In ambito geologico e geomorfologico, le superfici da rilevare, spesso e volentieri, sono molto estese e di dimensioni notevoli. Per questo motivo, occorre effettuare numerose scansioni in modo da poter ricoprire totalmente l'area oggetto di indagine. Al fine di ottenere una nuvola di punti uniforme, generata da tutte le nuvole di punti delle singole scansioni, questa deve essere roto-traslatata in un sistema di riferimento detto *di progetto*: questo può essere

integrato con dati geospaziali provenienti da misurazioni effettuate con *stazione totale* o *GPS*. Per unire le scansioni si ricorre ai *tie-points*, ovvero punti specifici le cui coordinate, derivanti dal sistema di riferimento del laser scanner, coincidono con quelle dei *target* posti sulla superficie, ad esempio, di una falesia o un fronte roccioso. Una volta posizionate tutte le scansioni, si deve eliminare il *rumore*, ovvero lo scostamento irregolare di punti rispetto alla superficie (questi si verificano a causa di vibrazioni dello strumento durante l'acquisizione o condizioni non ottimali di luce). È possibile eliminare anche elementi che non sono utili per la ricostruzione dell'oggetto di indagine, ma che



Fig. 90. Nuvola di punti densa (*dense cloud*) della Grotta di Cocceio, Bacoli, Campania.

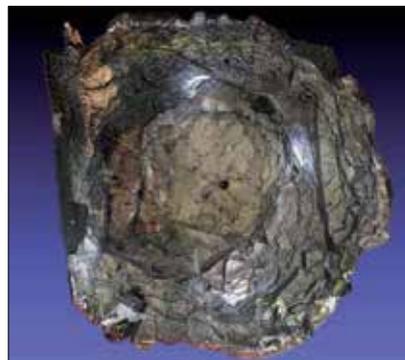


Fig. 92. Modello 3D texturizzato della Grotta del Cocceio.

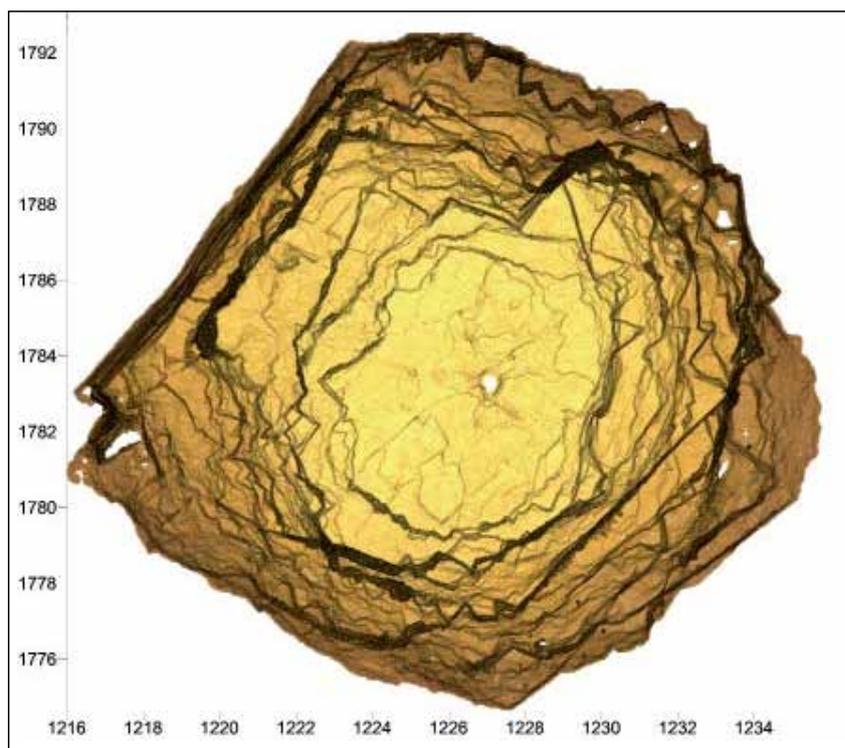


Fig. 91. Modello 3D della Grotta del Cocceio.

fanno parte del paesaggio (tralicci, staccionate, persone). In pratica, attraverso l'utilizzo di software specifici, si eliminano i punti che non sono utili per ricostruire la superficie. Una volta unite le scansioni, si procede al *ricampionamento*, ovvero la regolarizzazione dei punti che si ottiene riducendo il loro numero complessivo, così da conseguire un

dato più omogeneo e più gestibile in termini di visualizzazione e gestione del modello tridimensionale. La fase di visualizzazione e gestione del modello ha inizio con la sua generazione che si svolge automaticamente mediante software. La nuvola di punti, filtrata e ricampionata, subisce un processo di triangolazione mediante la creazione di una maglia

continua di triangoli che descrivono la superficie geometrica, ottenendo un dato vettoriale (un *DTM* o delle *mesh poligonali*). Il *DTM* non è consigliato per le superfici rocciose, a differenza delle *mesh poligonali*; queste rappresentano meglio la morfologia di qualsiasi elemento, ma sono più complesse da elaborare e, infatti, il loro utilizzo è limitato

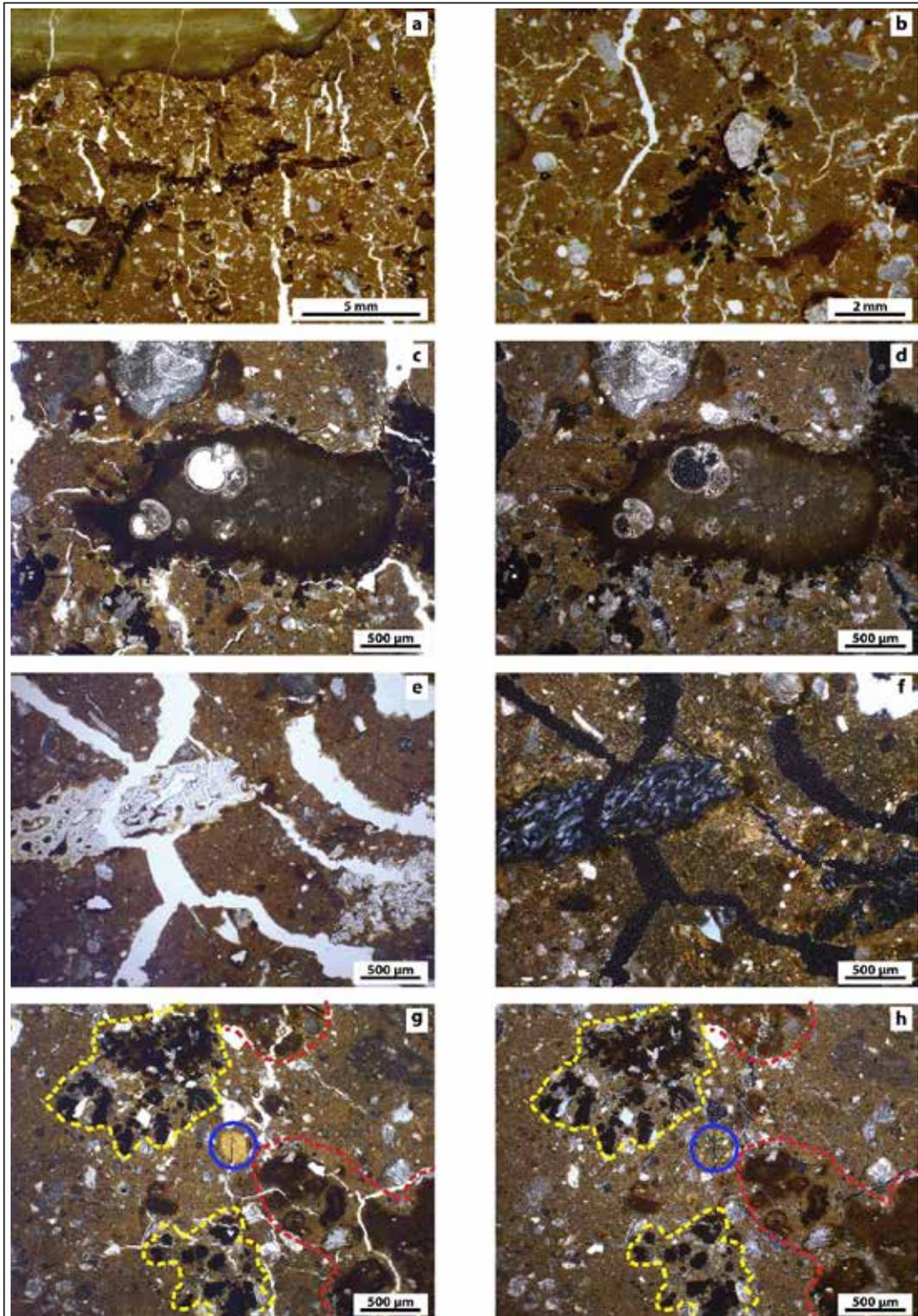


Fig. 93. Valle Giumentina. Analisi micromorfologiche condotte sulle stratigrafie e sul materiale faunistico. Particolare del paleosuolo ABF-33.

a specifiche porzioni di superficie ove occorre mantenere un elevato grado di dettaglio. Il modello può presentare dei buchi, delle piccole aree meno dense di punti o settori di *rugosità*. Grazie al processo di *ottimizzazione* del modello è possibile risolvere, ma non sempre, le irregolarità tramite un *lisciamento* (*smoothing*) della superficie. Nel caso lo *smoothing* non fosse sufficiente a eliminare le irregolarità delle *mesh*, si ricorre alla *texturizzazione* del modello, ovvero la sovrapposizione delle fotografie direttamente sulle *mesh*. Questo processo migliora il contenuto informativo del dato, applicando immagini 2D sulla geometria 3D. Nella ricostruzione di siti e/o elementi naturali, due sono gli aspetti più significativi: *riproduzione dettagliata delle superfici e rappresentazione multipla di diversi livelli informativi* (metrici e qualitativi). Questi due aspetti sono importanti per il geoarcheologo, soprattutto perché è possibile estrarre una serie di requisiti di carattere geometrico e dimensionale dal modello di rappresentazione tridimensionale (*modello multi-scala; modello multi-risoluzione; modello multi-scala/multi-risoluzione*).

### 3.1.2 Il modello tridimensionale per le indagini geomorfologiche e geoarcheologiche

I caratteri geomorfologici e geoarcheologici di un territorio includono tutta una serie di informazioni che sono utili per una lettura analitica sui cambiamenti di uno o più siti; in questo modo, si creano le condizioni utili per una migliore tutela e salvaguardia degli stessi. Le informazioni si estraggono dai modelli geomorfometrici, per poi essere successivamente rielaborati in modelli fisico-matematici deterministici o probabilistici. Dal modello vettoriale 3D è possibile estrarre le seguenti informazioni: distanze, volumi, percorsi e traiettorie attraverso l'analisi di polilinee, poligoni e curve. Per determinare elementi rocciosi instabili, fratture e rugosità della superficie sarà necessario individuare sul modello, mediante misure ed elaborazioni *ad hoc*, le *linee di discontinuità* che, spesso, coincidono con varianti nelle cur-

vature in prossimità di due elementi che appaiono scostanti nella loro geometria. Un'ulteriore categoria di informazioni è quella pertinente alla caratterizzazione dinamico-spaziale dei settori instabili di una superficie che risulta visibile grazie alla realizzazione di modelli di previsioni riguardanti eventuali distacchi di massi, determinando, nel limite del possibile, la traiettoria di caduta. Questa previsione si verifica mediante la realizzazione di profili topografici orizzontali e verticali.

### 3.2 Esempi e casi studio

Il Laser Scanner 3D si è rivelato molto utile in contesti di scavo geoarcheologico. Un esempio è il caso del sito di *Valle Giumentina*, ad Abateggio, Pescara. Il sito archeologi-

co, condotto e scavato da un team italo-francese dell'Ecole Française di Roma, è inquadrabile nel Pleistocene Medio. Lo scavo ha messo in luce ben nove livelli geoarcheologici, caratterizzati dalla presenza di reperti litici e faunistici. Il sito di Valle Giumentina, a 740 m s.l.m., si trova in una posizione tanto particolare quanto pericolosa. La sua stratigrafia, composta da depositi lacustri e paleosuoli con migliaia di manufatti litici, è composta da strati di colore diverso e pertinente ad un momento specifico della storia geologica della valle. Grazie allo scavo e ad analisi micromorfologiche (Fig. 93), è stata riconosciuta una sequenza stratigrafica contraddistinta da 40 m di depositi quaternari (Fig. 94), compresi i nove depositi archeologici, per

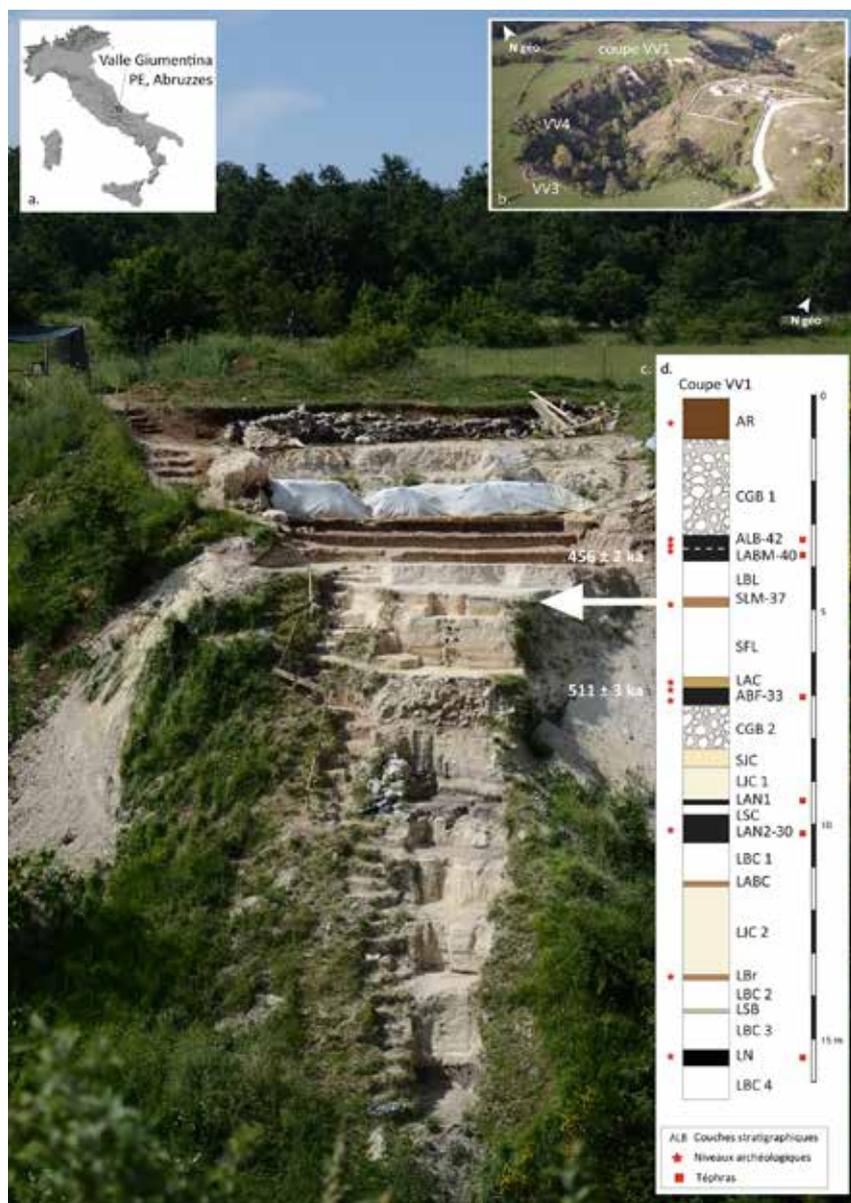


Fig. 94. Il sito di Valle Giumentina, con la suddivisione della stratificazione verticale.

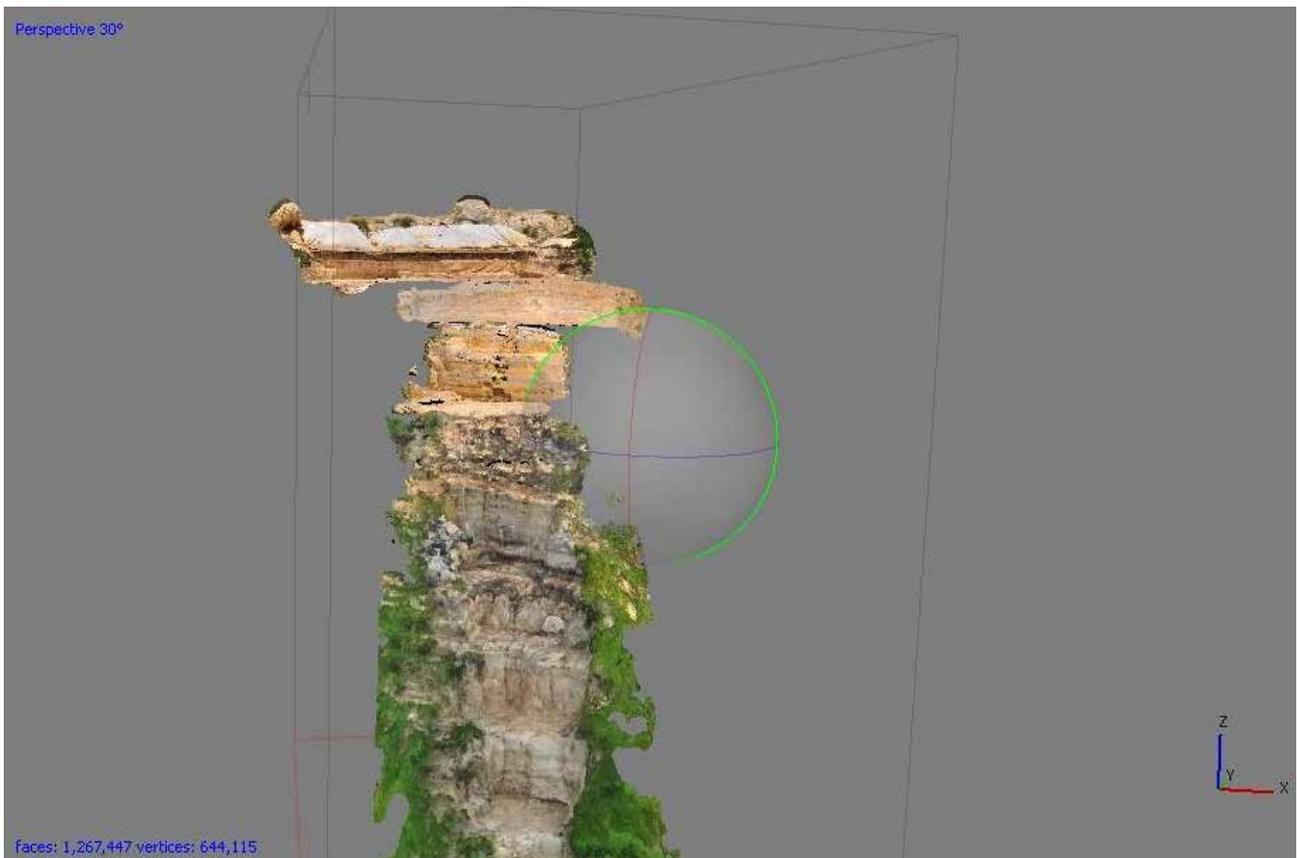


Fig. 95. Texture della nuvola di punti del sito di Valle Giumentina.



Fig. 96. Nuvola di punti del costone roccioso della Valle dei Templi di Agrigento. Sulla sommità il tempio di Giunone.

un intervallo di tempo che sfiora i 300.000 anni di presenza antropica. Perché si è reso utile l'uso del Laser Scanner 3D? Il sito, che con il suo contesto si candida a caso studio per il *Paleolitico Europeo*, soffre di un problema legato alla sua conserva-

zione nel tempo: è un sito esposto lungo un declivio e soggetto a piogge, neve, vento e fenomeni di erosione a causa della pendenza dei bacini fluviali. Il solo modo per poter conservare le informazioni, per analizzare lo stato di conservazione e il suo

livello di degrado nel tempo, è stato quello, nel 2016, di realizzare un modello tridimensionale mediante l'integrazione e la sovrapposizione di una scansione con laser scanner e una campagna di fotogrammetria terrestre a distanza ravvicinata (Fig.

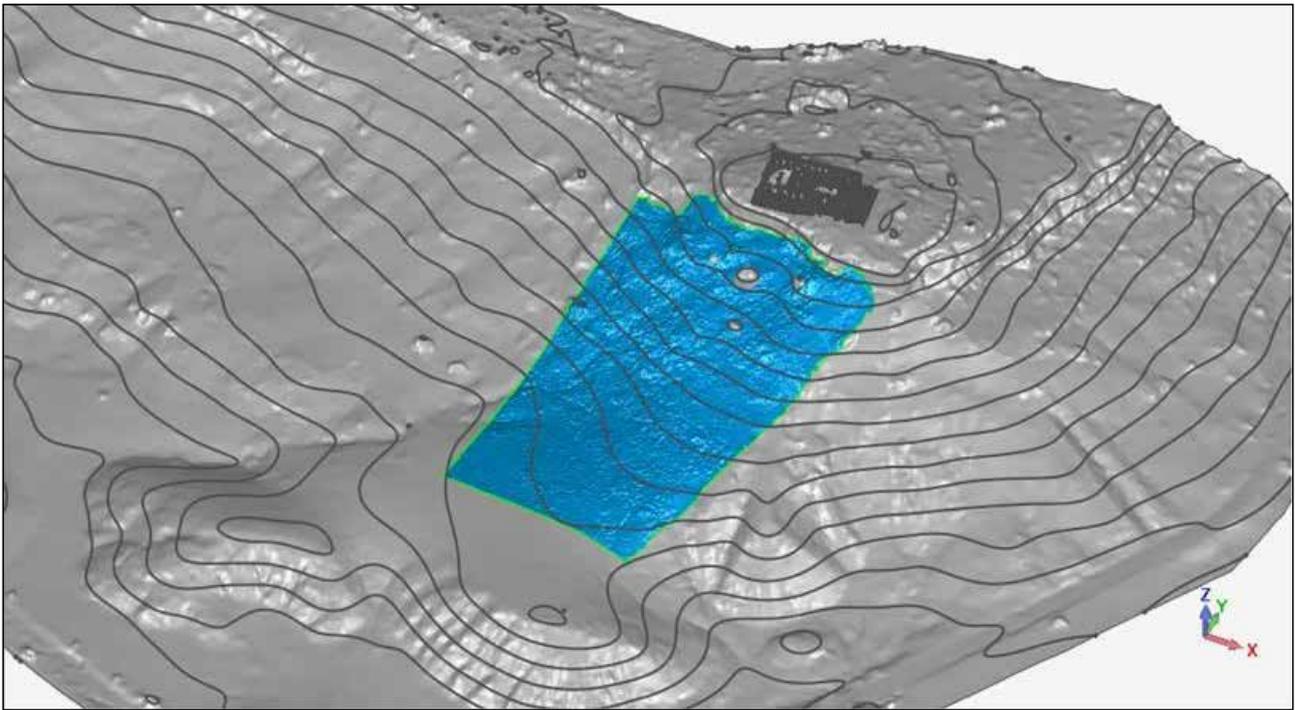


Fig. 97. Sovrapposizione del modello 3D del versante, grazie all'interpolazione dai dati laser scanner, sul DTM dell'intero crinale della Valle dei Templi, ottenuto dalla fotogrammetria aerea.

95). Un secondo esempio, ma non unicamente relativo all'utilizzo del laser scanner 3D per motivi di tutela di un contesto geoarcheologico, è quello del rilievo di un versante roccioso instabile, sulla cui sommità si erge il *tempio di Giunone* nella Valle dei Templi, ad Agrigento (Fig. 96). Il parco comprende una serie di strutture archeologiche che si concentrano lungo un crinale roccioso a SE del moderno centro abitato di Agrigento. Così, nel 2008, è stata effettuata una scansione per due distinti motivi: per testare le potenzialità dello strumento e per realizzare un modello multi-scala e multi-risoluzione; quest'ultimo finalizzato alla completa interpretazione degli aspetti geomorfologici dell'area e per analisi specifiche riguardanti l'evoluzione e le eventuali dinamiche di distacco dei blocchi rocciosi rispetto al pianoro sommitale occupato dal tempio di Giunone. Geologicamente, l'area è contraddistinta da un lungo costone EO, formato da una stratigrafia databile al Pleistocene e denominata *Formazione di Agrigento*. Questa è composta, dal più recente al più antico, da limi argillo-sabbiosi, sabbie marnose e calcareniti. Queste ultime evidenziano numerosi segni di discontinuità, a causa di infiltrazioni e fenomeni di erosione, che generano distacchi di

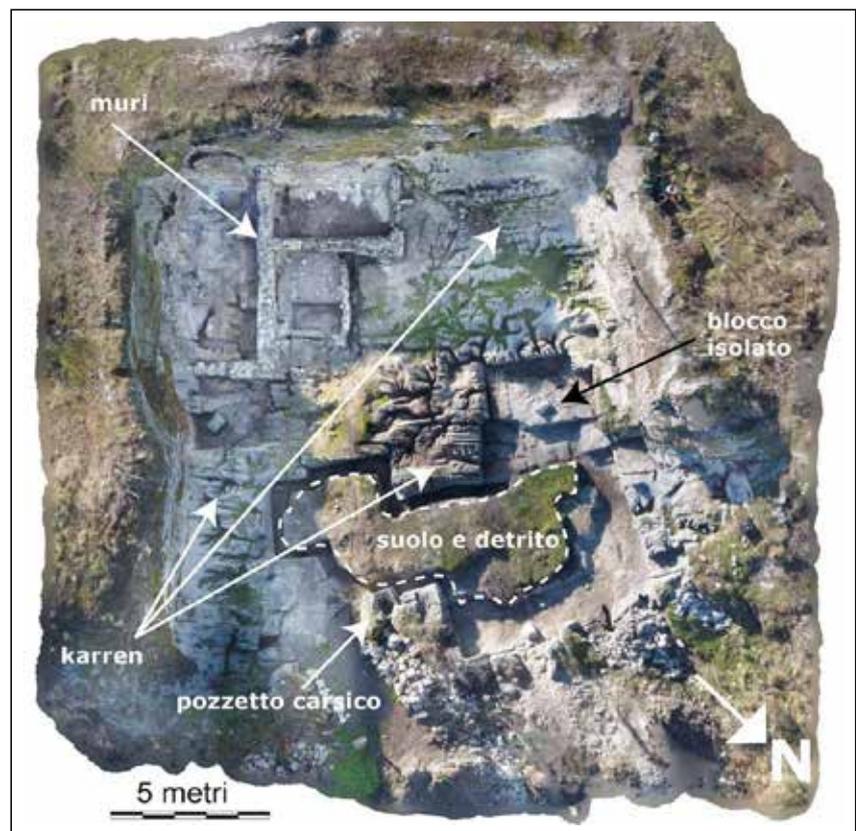


Fig. 98. Ortofoto da drone del sito di cava Ca' Castellina, Monte Mauro, Emilia Romagna.

grossi blocchi di calcarenite e proprio in prossimità del costone del tempio di Giunone. Allo stato attuale non vi sono segni di pericolo immediato, ma l'analisi tridimensionale del contesto rappresenta un tema utile per una prevenzione futura di mitigazione del rischio e per adotta-

re adeguate operazioni di contenimento del sito (Fig. 97).

Un altro esempio di integrazione tra analisi geomorfologica, archeologia e rilievo tridimensionale giunge dall'Emilia Romagna e, più precisamente, dal sito archeologico della cava di Ca' Castellina, a circa

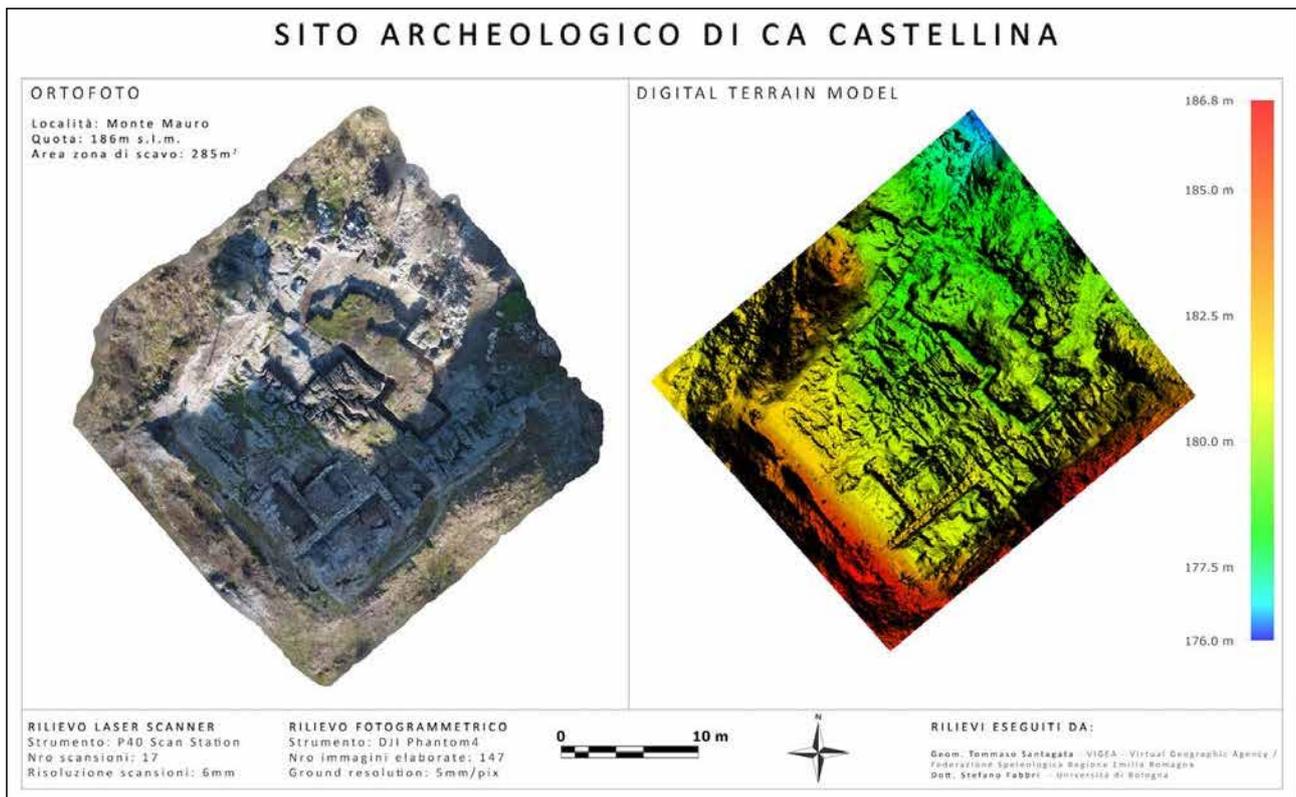


Fig. 99. Comparazione tra l'ortofoto da drone e il DTM creato integrando le foto da drone e il rilievo con Laser Scanner 3D.

340 m slm, posta lungo una strada sterrata che sale in direzione di Monte Mauro (Fig. 98). Gli scavi archeologici hanno portato alla luce numerosi blocchi e gradoni di estrazione di età romana, chiara evidenza dell'attività estrattiva fin dall'antichità, una struttura di età Moderna e una cospicua quantità di manufatti inquadrabili tra l'età del Ferro e l'età Moderna. Nei pressi della cava sono state rinvenute alcune grotte riferibili all'Ultimo Glaciale e all'Ultimo Interglaciale e i ruderi di un castello medievale; la datazione di un frustolo di carbone, a contatto con il gesso nel piano di cava e coperto da un deposito detritico successivo, ha permesso di inquadrare la frequentazione dell'area tra il IV e il II secolo a.C., in piena romanizzazione. La cava sembra, quindi, essere stata abbandonata subito dopo l'arrivo dei romani nell'area, per poi essere riutilizzata nel XVI secolo come insediamento. Per comprendere più dettagliatamente il contesto, sono stati eseguiti un rilievo laser scanner affiancato da una battuta di fotogrammetria aerea da drone (Fig. 99). I dati ottenuti hanno permesso di scoprire numerosi elementi che, ad una prima analisi, erano sfuggiti o erano poco chiari. Il sito occupava

una superficie di 285 mq, con dislivello NS di 8 m; nel punto più a S era stata scoperta una parte di cava coperta da detriti, una costruzione a blocchi e un sistema di canalizzazione delle acque. Il pavimento della cava era ricoperto da un consistente strato di detriti e questo ha permesso che rimanesse inalterato, e cristallizzato nel tempo, al momento dell'abbandono del sito, mentre le aree scoperte hanno subito un processo di dissoluzione del gesso con conseguente abbassamento delle superfici rocciose, smussamento degli spigoli e presenza di *karren* (formazione di solchi di dissoluzione). Il rilievo 3D (laser scanner/drone) ha consentito di distinguere, in maniera chirurgica, l'attività antropica da quella naturale e, quindi, di ricavare le misure precise sia dei blocchi di estrazione di età romana sia delle forme di erosione e corrosione delle acque meteoriche (Fig. 100).

#### Bibliografia

ALBA M., RONCORONI F., SCAIONI M. (2009), *Monitoraggio di pareti rocciose con terrestrial laser scanning*, in *Atti della 13esima Conferenza Nazionale ASITA, 1-4 dicembre, 2008*, Bari, pp. 65-70.

ANGELINI A., GABRIELLI R.

(2013), *Laser Scanning e Photo Scanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3d di beni Architettonici ed archeologici*, in *Archeologia e Calcolatori*, 24, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 379-394.

BARRILE V., MEDURI G. M. (2008), *Impiego della tecnologia laser scanner per monitoraggi e controlli territoriali*, in *Atti del Convegno Nazionale SIFET, 18-20 giugno 2007*, Sorrento, pp. 19-24

BITELLI G., GIRELLI V. A., REMONDINO F., VITTUARI L. (2006), *Surface modelling of complex archaeological structures by digital close-range photogrammetry*, in CAMPANA S., FORTE M., (a cura di) *From Space to Place: 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, Proceedings of the 2nd International Workshop* (CNR, Rome, 2006), Oxford, pp. 321-326.

BORNAZ L. (2006), *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in Crosilla F., Dequal S., (a cura di), *Laser scanning terrestre, Atti del corso, La tecnica del laser scanning terrestre, Udine 2004*, CISM, Udine, pp. 1-18.

BUCKLEY S. J., SCHWARZ E., TERLAKY V., HOWELL J. A., ARNOTT R. W. C. (2009), *Terrestrial laser scanning combined with photogrammetry*

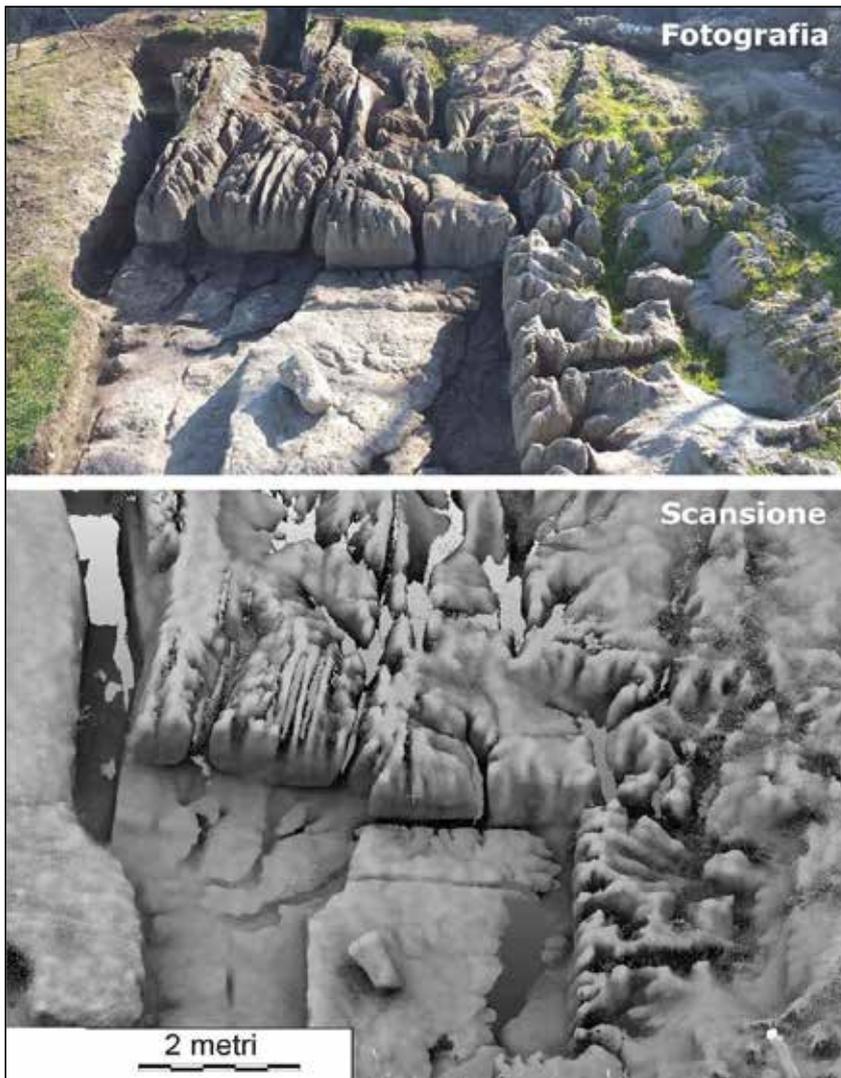


Fig. 100. Fotografia e nuvola di punti (da laser scanner) dell'area intatta della cava. Da notare le docce carsiche tra la copertura detritica e la roccia gessosa. L'acqua di queste proveniva dal sovrastante campo carreggiato.

for digital outcrop modelling, in *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38 (3/W8), pp. 75-80.

CAMPANA S., FRANCOVICH R. (2006), *Laser Scanner e GPS, Paesaggi Archeologici e tecnologie Digitali, I Workshop, Grosseto, 4 marzo 2005*, Edizioni All'Insegna Del Giglio, Firenze.

COTECCHIA V. (1996), *Geotechnical degradation of the archaeological site of Agrigento*, in *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites Symposium, 3-4 ottobre, 1995*, Napoli, pp. 101-107.

D'ANDREA A., *Il rilievo archeologico con il laser scanner: luci e ombre*, in *Vesuviana*, 2, 2011, Pisa-Roma, pp. 193-218.

DI SALVO F. (2014), *Il laser*

*scanner terrestre e la tecnologia full waveform per la modellazione tridimensionale in ambito geologico*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie, Ciclo XXIX – SSD ICAR/06 (Topografia e Cartografia), Università degli Studi di Palermo.

FUSCO M., VALENTINI R., D'ANDREA A. (2018), *Tecniche integrate per la documentazione tridimensionale del sito di Valle Giumentina (Abruzzo, Italia)*, in *Applicazioni tecnologiche allo studio di contesti paleolitici e mesolitici italiani, Incontri Annuali di Preistoria e Protostoria*, 4, Firenze, pp. 77-79.

HARRIS T. M., (1988), *Digital Terrain Modelling and Three Dimensional Surface Graphics for Landscape and Site Analysis in Archaeology and Regional Planning*, in

RUGGLES C. L. N., RAHTZ S. P. Q. (a cura di), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR International Series 393, British Archaeological Reports, Oxford University Press, pp. 161-170.

NICOUD E., VILLA V., GUIBERT-CARDIN J., DAVTIAN G. (2020), *Valle Giumentina (Abruzzo, Italia), huitième mission: étude des comportements techno-économiques au Pléistocène moyen*, in *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*.

PAGANO M., PALMA B., PARISE M., RUOCCO A. (2018), *Analisi geostutturale su nuvola di punti acquisita con laser scanner 3d: applicazione alla Grotta del Cocceio, Bacoli (Campania, Italia)*, in in BOZZANO F., DI LORETO E., NISIO S., PARISE M. (a cura di), *Atti del Convegno Nazionale, Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione*, Roma, 1 dicembre 2017, Supplemento al n. 4/2018 di *Geologia dell'Ambiente*, Roma, pp. 201-208.

SANTAGATA T. FABBRI S., CHIARINI V., DE WAELE J. (2019), *Rilievi tridimensionali e osservazioni geomorfologiche nell'antica cava di Ca' Castellina (Gessi di Monte Mauro)*, in *I Gessi di Monte Mauro, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, II, 34, Roma, pp. 529-538.

SELVINI A., GUAZZETTI F. 2000, *Fotogrammetria generale*, Torino.

SGRENZAROLI M., VASSENA G. (2007), *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Brescia, Starrylink.

SMITH M. J., PAIN C. F. (2009), *Applications of remote sensing in geomorphology*, in *Progress in Physical Geography*, 33, 4, pp. 568-582.

SIART C., FORBRIGER M., BUBENZER O. (2018), *Digital Geoarchaeology. New techniques for Interdisciplinary Human Environmental Research*, Springer.

STERLACCHINI S, SALVI F., SIRONI S., ZANCHIA A. (2008), *Ricostruzioni geologiche tridimensionali: metodologie ed esempi di applicazioni*, in *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 78, Roma, pp. 277-288.

## 4. Le analisi geofisiche per la Geoarcheologia

Le tecniche di Telerilevamento sono da considerarsi, a tutti gli effetti, metodologie di analisi non invasive (aeree); a queste si aggiungono le indagini non invasive (terrestri) del sottosuolo. Grazie a queste ultime si ha la possibilità di comprendere il deposito sedimentario geologico o archeologico nella sua estensione e nel suo spessore senza intaccarlo. I sistemi più innovativi di acquisizione ed elaborazione delle informazioni sono diversi, ma non tutti applicabili ad ogni contesto. Ecco perché occorre comprendere bene potenzialità e limiti degli strumenti. In cosa consiste la *Geofisica*? La geofisica è la scienza che studia la Terra dal punto di vista fisico-chimico ed è chiamata *fisica terrestre*; ha iniziato a svilupparsi nel XIX secolo, ma solamente negli ultimi cinquanta anni si è affermata come metodologia di analisi indispensabile. Tra i pionieri della Geofisica, tra gli anni '40 e gli anni '50, vanno menzionati Atkinson, Martin, Clarke, Aitken e Hall. Per l'Italia va menzionato Linington per la Sezione Italiana Prospezioni Archeologiche della Fondazione Lerici del Politecnico di Milano.

### 4.1 I metodi di indagine geofisica (GPR, elettrico, sismico, gravimetrico e magnetometrico)

Le metodologie geofisiche consentono di indagare il terreno attraverso la sua *misura della variazione fisico-chimica* (natura, dimensioni, elementi pieni, elementi vuoti). Questa variazione si chiama *anomalia*. I sistemi geofisici si dividono in *attivi e passivi*. I primi effettuano la *misura di specifiche proprietà fisiche del terreno energizzandolo*, mentre i secondi *misurano le grandezze fisiche intrinseche del terreno senza, quindi, energizzare le sue proprietà*. Tra i sistemi attivi utilizzati in Geoarcheologia possiamo annoverare il *metodo GPR* o *georadar*, il *metodo elettrico* o *geoelettrico* e il *metodo sismico*, mentre tra quelli passivi il *metodo gravimetrico* e il *metodo magnetometrico*.

Il *metodo GPR* (*Ground Penetrating Radar*) o *georadar*: questo metodo, attraverso l'emissione di onde

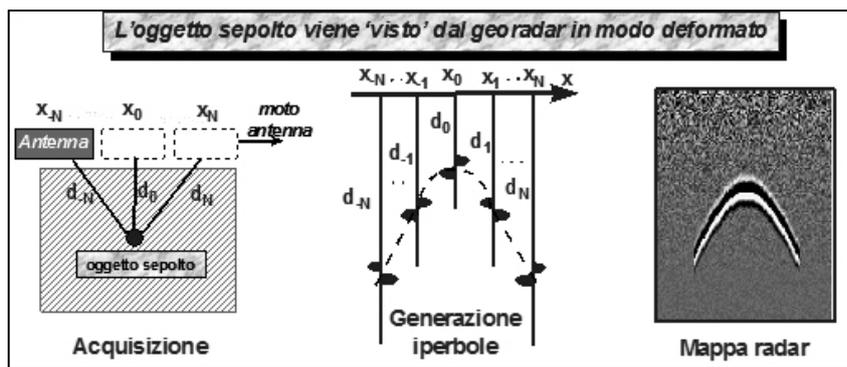


Fig. 101. Schema esplicativo del funzionamento del metodo GPR.

elettromagnetiche, permette di ottenere, in tempo reale, la scansione radiostratigrafica del terreno. Queste vengono trasmesse al suo interno mediante un impulso e si analizzano i fenomeni di riflessione e rifrazione che le onde subiscono quando incontrano elementi di discontinuità geometrica nel terreno (Fig. 101). Lo strumento è composto da due elementi: un'unità di controllo per immagazzinare e visualizzare i dati e una o più antenne (con canali e frequenze diverse in MHz a seconda dello strumento) che trasmettono gli impulsi elettromagnetici nel sottosuolo per poi riceverli. Lo strumento viene fatto scorrere sulla superficie da indagare, seguendo degli allineamenti sul terreno e ognuno di questi viene registrato, in tempo reale, nell'unità centrale (Fig. 102). Questa registra un profilo radar che rappresenta il sottosuolo in sezione. Interpolando più profili radar, si ottiene una restituzione planimetrica e, addirittura, elaborazioni 3D tramite appositi software.

Il *metodo elettrico* o *geoelettrico*: si fonda sulla resistenza che ogni corpo contrappone al passaggio di elettricità, detta *resistività elettrica*. Lo strumento, attraverso degli elettrodi che si fissano al terreno, misura le variazioni del campo elettrico che si induce, in maniera artificiale, nel terreno (Fig. 103). Registra le variazioni che i corpi nel sottosuolo potrebbero produrre se caratterizzati da una diversa resistività elettrica. I terreni permeabili e che trattengono l'umidità, ad esempio quelli argillosi, avranno una resistività bassa e restituiranno anomalie negative, mentre superfici impermeabili o solide, ad esempio rocce o strutture sepolte, avranno una resistività alta



Fig. 102. Il georadar.

e restituiranno anomalie positive. È possibile ottenere sia sezioni o *tomografie verticali* del sepolto sia sezioni o *tomografie orizzontali* delle quote dei livelli del terreno.

Il *metodo sismico*: si basa sullo studio della propagazione delle onde sismiche sia naturali sia generate artificialmente. La propagazione delle onde dipende dall'elasticità dei terreni. Le onde sismiche viaggiano nel sottosuolo attraverso elementi sepolti e subiscono, sulle superfici di discontinuità geologica, fenomeni di *riflessione, rifrazione e diffrazione*. La velocità di propagazione di un impulso sismico muta a seconda del tipo di terreno o a seconda degli elementi di disturbo nello stesso, cambiando le caratteristiche elastiche. I principali metodi di prospezione sismica si avvalgono di *onde riflesse*, delle *onde rifratte* o del *rumore ambientale*. Mediante lo studio dei sismogrammi e l'individuazione dei tipi di onda, è possibile ricondurre

alla disposizione geometrica e alle proprietà elastiche di elementi sepolti presenti al di sotto della zona di indagine.

Il *metodo gravimetrico*: con questo metodo si misurano le variazioni del campo gravitazionale terrestre con l'obiettivo di localizzare masse che hanno una densità superiore o inferiore al materiale circostante (Fig. 104).

Il *metodo magnetometrico*: si basa sulla misurazione indiretta delle variazioni localizzate del CMT (*Campo Magnetico Terrestre*) o del suo gradiente. Queste anomalie registrano la differenza tra la cosiddetta *suscettibilità magnetica rimanente* di elementi sepolti e la *suscettibilità magnetica media* del terreno che contiene questi elementi (Fig. 105). Questa suscettibilità varia in base allo stress termico degli elementi stessi (ceramica, fornaci, focolai, aree combuste). Lo strumento che misura la suscettibilità è il magnetometro e può essere di tre tipi: a *protoni*; *fluxgate* e ad *assorbimento ottico*. I primi due sono più semplici nell'utilizzo, mentre il terzo è più costoso, ma più rapido nell'acquisizione.

#### 4.2 Esempi e casi studio

In contesti geoarcheologici, di solito, non si usa una tecnica geofisica specifica, ma l'integrazione di due o più metodi di indagine; in questo modo, è possibile ricavare un quadro



Fig. 103. Il metodo geoelettrico. La strumentazione con gli elettrodi fissati al suolo.



Fig. 104. Il metodo gravimetrico.



Fig. 105. Prospezioni magnetometriche in corso.

sinottico dell'area oggetto di ricerca. Indagini non invasive integrate possono essere applicate, ad esempio, per il censimento e la catalogazione di cavità di origine antropica, come nel caso dell'area de Il Piano, sull'Isola d'Elba, in Toscana. Nel corso degli ultimi decenni, nell'area di fondovalle compresa nel territorio di Rio Marina, all'Isola d'Elba, si sono verificati alcuni affossamenti in prossimità di un complesso di grotte, tra cui la Grotta di San Giuseppe,

pertinente alla formazione del Calcere Cavernoso. L'obiettivo della ricerca era di ottenere un modello geologico e idrogeologico dell'area per comprendere le cause dei numerosi sprofondamenti; i depositi alluvionali quaternari che riempivano questa enorme depressione prendono il nome di formazione delle Breccie di Rialbano e la Grotta di San Giuseppe è la più conosciuta e importante. L'origine di questa grotta è dovuta, probabilmente, ad

una paleofrana, dove grandi massi costituiscono le pareti, creando delle concamerazioni. La grotta, a forma di imbuto, è stata sede, nel III millennio a.C., di un'ampia area sepolcrale, con ricchi corredi riferibili alla cultura di Rinaldone e circa 80 resti scheletrici appartenenti a numerosi individui. La Grotta di San Giuseppe è considerata come uno dei più importanti siti dell'Eneolitico italiano. L'area della ricerca era stata interessata da attività di cedimento strutturale del terreno nel 2008 e nel 2013; in quest'ultimo anno si decise di intervenire con una campagna diagnostica con l'obiettivo di ricostruire l'andamento del sottosuolo interessato da questi fenomeni. La campagna è stata caratterizzata da carotaggi, prove di permeabilità, 6 tomografie geoelettriche e 10 sondaggi geognostici di distruzione del nucleo. Nel caso specifico delle prospezioni *microgravimetriche*, queste hanno permesso di realizzare un quadro geologico in 3D del sottosuolo sia nella località Il Piano sia nel settore E dell'isola (Fig. 106), mentre le prospezioni *geoelettriche* ERT 2D e 3D hanno consentito di determinare se i terreni a bassa densità e a bassa resistività fossero la causa o meno dell'origine dei cedimenti strutturali del sottosuolo

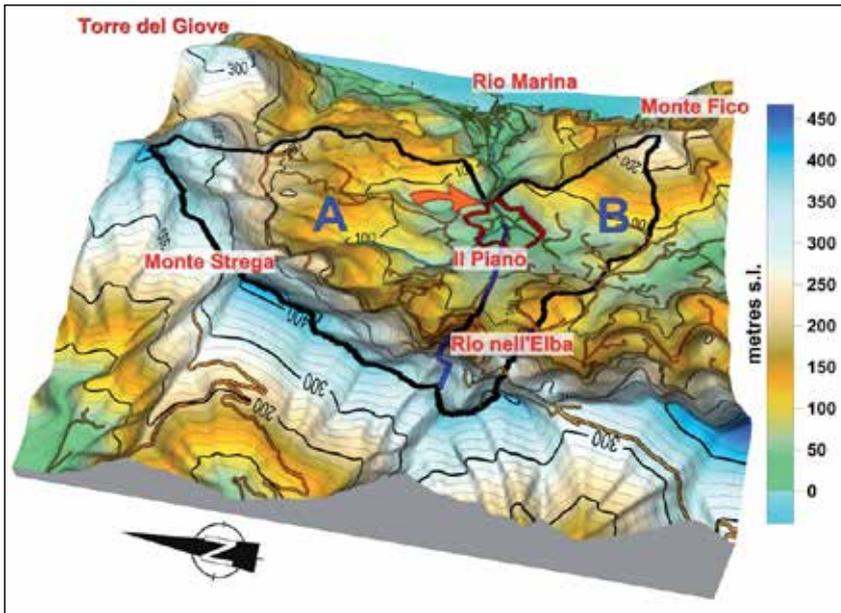


Fig. 106. Il Piano. Isola d'Elba. Carta delle Anomalie residue con metodo microgravimetrico (Metodo di Griffin-raggio 30m) con la rappresentazione dei corsi d'acqua.

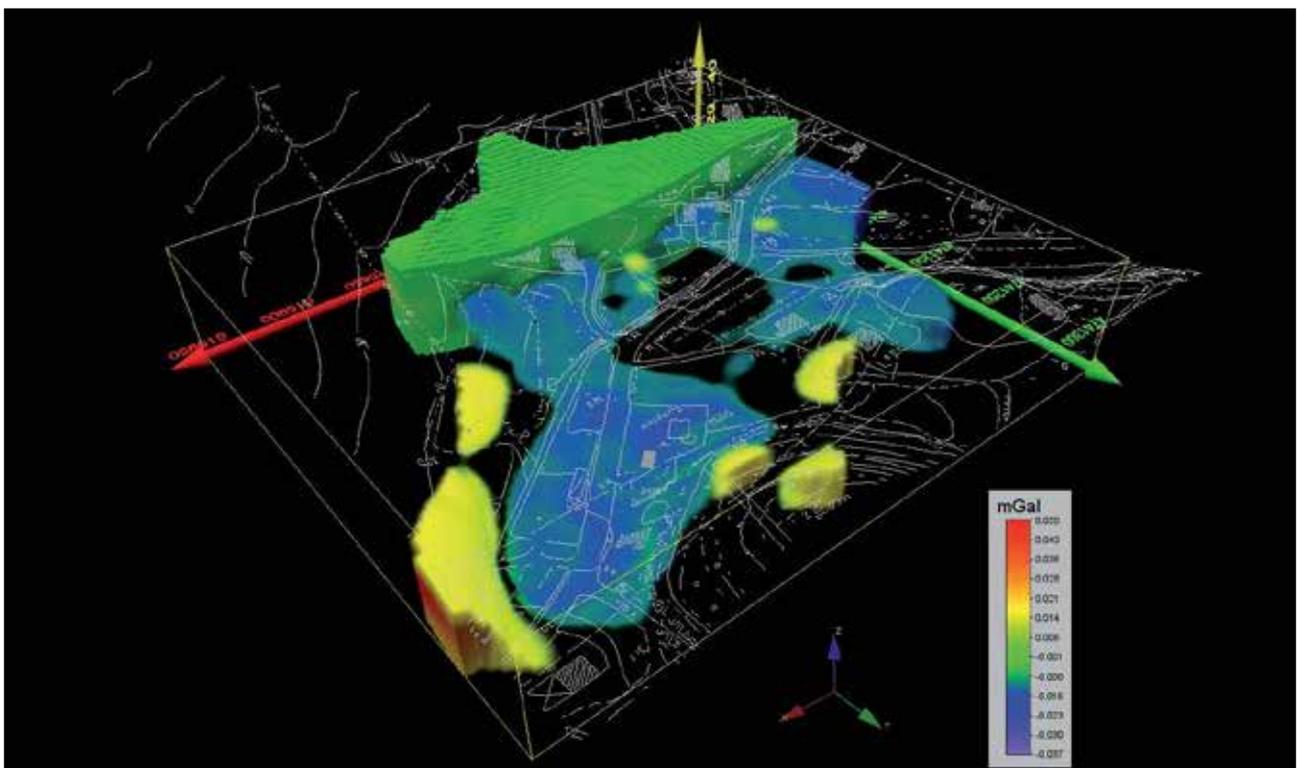


Fig. 107. Modello tridimensionale della distribuzione spaziale delle anomalie di gravità.

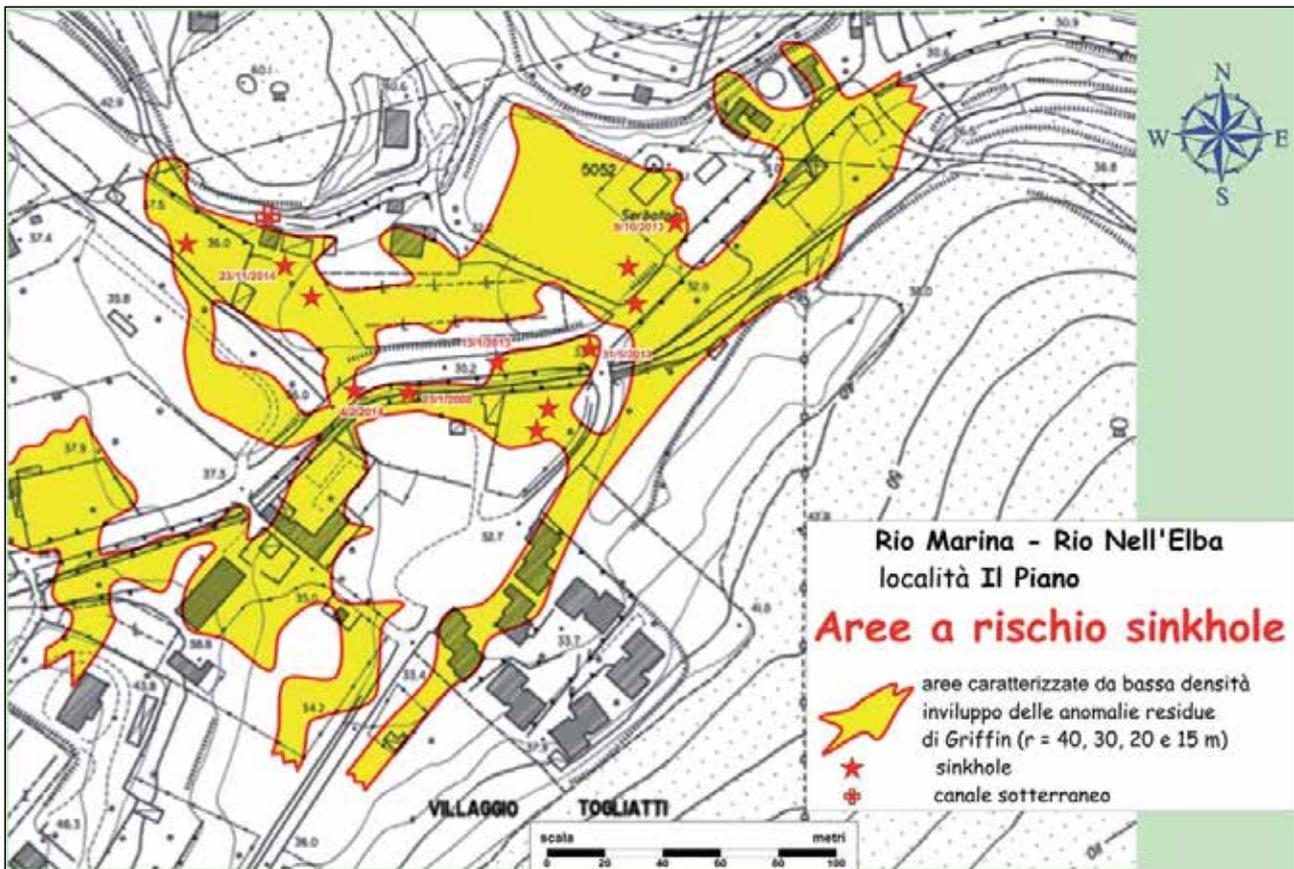


Fig. 108. Mappa delle aree a rischio.

(Fig. 107). È stato possibile, grazie all'integrazione dei metodi geofisici insieme a quelli geognostici, redigere una carta del rischio dell'area e un censimento delle cavità presenti, determinando la genesi della formazione degli sprofondamenti (Fig. 108): questi, infatti, erano causati non dal pompaggio dell'acqua della falda carsica, bensì da processi erosivi che avvenivano nella copertura sedimentaria per le forti piogge che inducevano una sovrappressione di acqua all'interno della falda carsica. L'erosione era, dunque, provocata dalla circolazione dell'acqua piovana in subalveo, ovvero nel punto in cui l'acqua sotterranea aumentava la portata e la velocità.

Un altro esempio di come l'integrazione delle metodologie geofisiche sia essenziale come supporto per attività di ricerca geoarcheologica preventiva è quello dell'acquedotto romano di Pesaro-Novilara. Opera di grande ingegneria idraulica, inquadrabile tra il II e il I secolo a.C., è lungo 10 km ed è tra i pochi a vantare la continuità ininterrotta di fornire acqua ancora oggi. Negli ultimi 30-40 anni è stata sottolineata la mancanza di manutenzione

dell'opera, soprattutto considerando il fatto che fornisce l'acqua all'intera città di Pesaro. Inoltre l'incuria stava conducendo verso un danneggiamento progressivo dell'acquedotto romano. Nel 2010 è stato condotto uno studio sulle eventuali interferenze tra un ramo dell'acquedotto e il nuovo tracciato della A14. Avendo come base di partenza un accurato recupero delle fonti antiche e cartografiche, insieme ad una ricognizione dei cunicoli, si ha avuto modo di costruire una mappa dei vari percorsi e delle canalizzazioni dell'acquedotto; a questa si è affiancata una campagna geofisica estensiva, di rilievo sotterraneo dei cunicoli e uno studio di dettaglio idrogeologico. Le indagini geofisiche, nello specifico, hanno riguardato l'individuazione dei cunicoli con 17 tomografie elettriche e 2 scansioni GPR e un'indagine di carattere idrogeologico con 3 tomografie elettriche. Il risultato finale fu quello di delimitare due aree principali di interferenza tra il tracciato dell'acquedotto e le opere di costruzione e ampliamento della A14, così da fornire al committente dell'opera tutte le indicazioni necessarie per prevenire un eventuale

danneggiamento della struttura di epoca romana in corso d'opera.

Per l'acquedotto romano di Venafro, città sannitica posta al crocevia tra Lazio e Campania, le indagini geofisiche (GPR, *geoelettrica*, *magnetometria*) sono state fondamentali per localizzare i punti in cui la struttura non restituiva indizi superficiali e che, quindi, giaceva ad una profondità maggiore rispetto al piano di campagna: sono stati individuati tratti scavati nella roccia e pavimentati con bipedali e pozzi circolari per le ispezioni (Fig. 109).

Uno studio microgravimetrico è stato condotto nell'area del porto antico di Terracina, in provincia di Latina, costruito dall'imperatore Traiano. L'indagine geofisica ha consentito di individuare una struttura di circa 400 m di diametro, parzialmente sepolta sotto il moderno porto-canale. Il bacino di Traiano, protetto da due moli curvi e separati da un ampio ingresso verso il mare aperto, nel corso del Medioevo fu riempito, dopo l'abbandono del porto, da sedimenti marini e alluvionali. L'analisi microgravimetrica (Fig. 110) ha evidenziato un'anomalia di

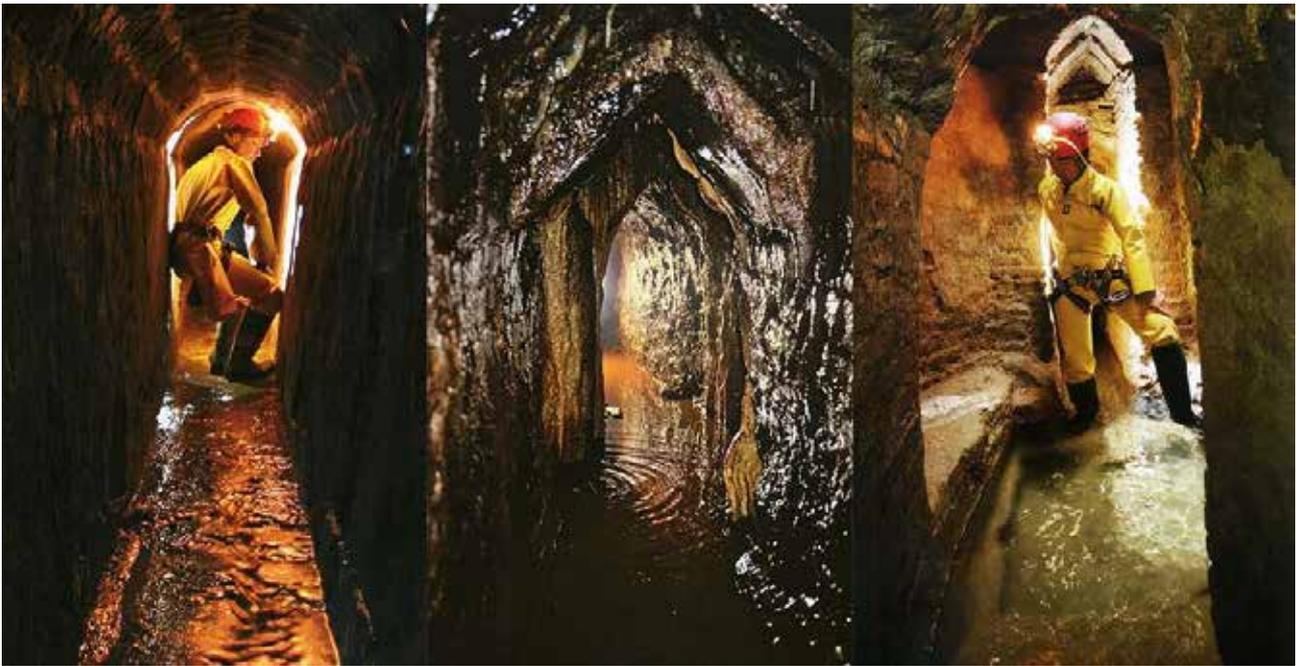


Fig. 109. Acquedotto di Pesaro-Novilara. Ispezione dei cunicoli individuato grazie alle prospezioni geofisiche.

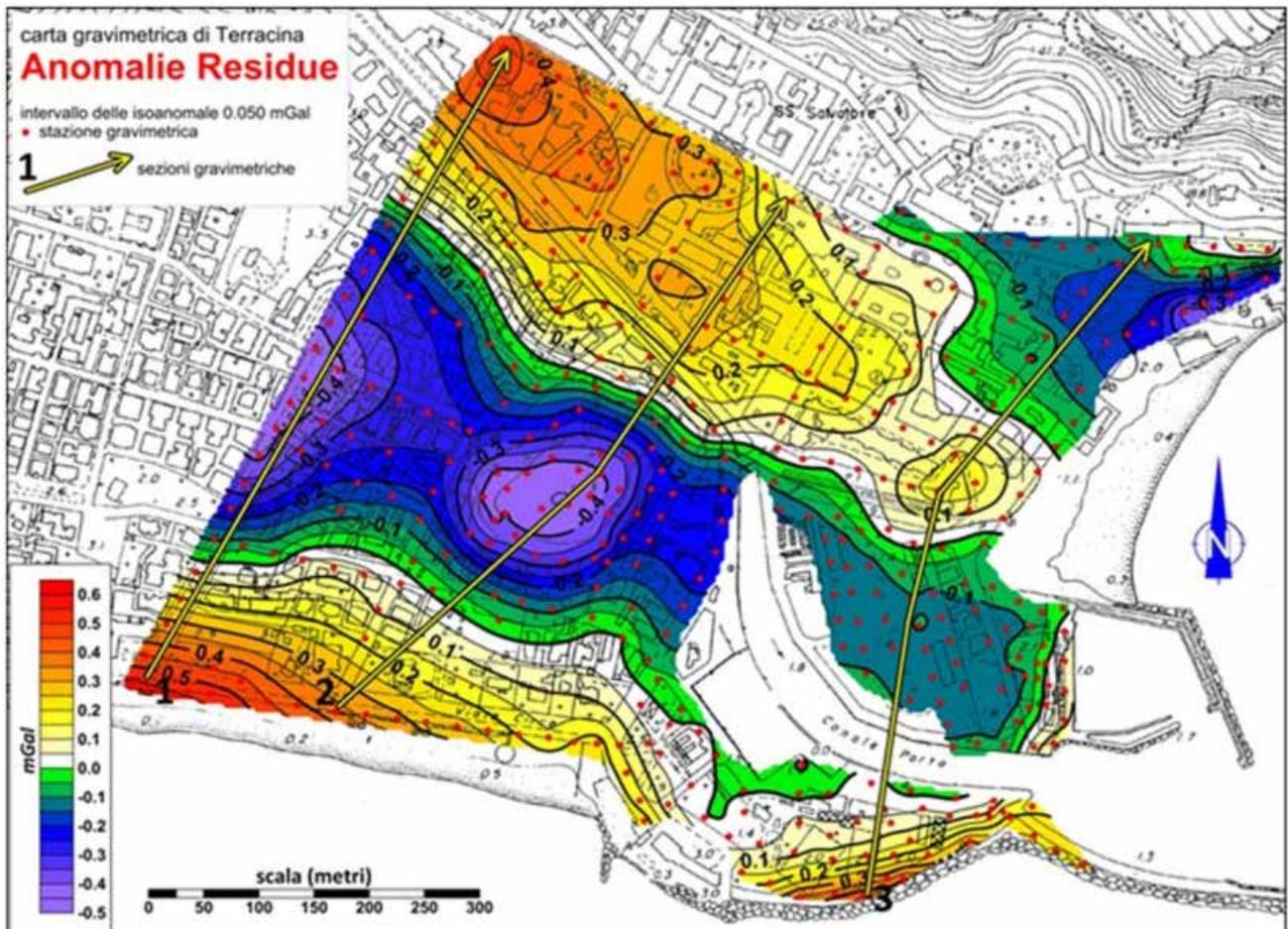


Fig. 110. Località il Montone, Terracina. Carta delle Anomalie Residue. Ubicazione dei profili gravimetrici.

200x100 m circoscritta nell'area della collina di Montuno o Montone (Fig. 111) e pertinente ad un sistema di cavità sepolte e ignote, molto probabilmente gli *horrea*. La scelta di effettuare una campagna gravime-

trica, rispetto ad altre metodologie geofisiche e tralasciando l'ipotesi di integrazione tra di esse, è stata dettata dal contesto di indagine, fortemente urbanizzato, nel quale il rapporto tra il segnale e il rumore

avrebbe condizionato, in negativo, l'esito del risultato. L'area di studio è stata coperta con oltre 390 stazioni gravimetriche con una spaziatura di circa 25 m, insieme ad una rete di controllo costituita da 14 capisaldi



## Bibliografia

- ASPINALL A., GAFFNEY C., SCHMIDT A. (2008), *Magnetometry for Archaeologists*, Lanham.
- BECKER H. (1996), *Archaeologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik*, München.
- BECKER H., FASSBINDER J. W. E. (2001), München.
- BEVAN B. W. (1998), *Geophysical Exploration for Archaeology: An Introduction to Geophysical Exploration*, in *Midwest Archaeological Center Special Report*, 1.
- DABAS M., DELÉTANG H., FERDIÈRE A., JUNG C., ZIMMERMANN W. H. (2006), *La prospection*, Paris.
- CAMPANA S., PIRO S. (2009), *Seeing the unseen. Geophysics and Landscape Archaeology*, *Proceeding of the XV<sup>th</sup> International Summer School*, London.
- CARROZZO M. T. (2006), *Il contributo della Geofisica ai Beni Culturali: alcune esperienze nel Salento*, in *Rendiconti dell'Accademia Nazionale delle Scienze dei XL*, *Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*, 124, Vol. XXX, P., II, Aracne, Roma, pp. 187-204
- CLARK A. (1990), *Seeing beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*, London.
- CONYERS L. B. (2004), *Ground Penetrating Radar for Archeology*, Wlanut Creek.
- DI NEZZA M., DI FILIPPO M., CECCHINI F., MARGOTTINI S., DE MARTINO C., PAZZI V., CARLÀ T., BARDI F., MARINI F., FONTANELLI K., INTRIERI E., FANTI R. (2018), *Censimento e catalogazione delle cavità di origine antropica mediante prospezioni geofisiche integrate nell'area de "Il Piano" (Isola d'Elba, Italia)*, in BOZZANO F., DI LORETO E., NISIO S., PARISE M. (a cura di), *Atti del Convegno Nazionale, Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione*, Roma, 1 dicembre 2017, Supplemento al n. 4/2018 di *Geologia dell'Ambiente*, Roma, pp. 81-90.
- DI NEZZA M., DI FILIPPO M., CECCHINI F., DE MARTINO C., MARGOTTINI S. (2020), *Il "Montone" di Terracina, una cavità nascosta*, in *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 107, Roma, pp. 297-316.
- FINZI E., PIRO S. (1991), *Geofisica per l'archeologia*, Quaderni dell'ITABC, Roma.
- GAFFNEY C., GATER J. (2003), *Revealing the buried past. Geophysics for Archaeologists*, Stroud.
- GENNARI E., PACITTI P. (2017), *L'acquedotto romano di Pesaro-Novilara: conoscere, tutelare e valorizzare*, in FIORE A., GISOTTI G., LENA G., MASCIOCO L. (a cura di) *Atti del Convegno Nazionale, Tecnica di Idraulica Antica*, Roma, 18 novembre 2016, Roma, pp. 96-102.
- PASQUINUCCI M., TRÉMENT F. (2000), *Non-destructive techniques applied to landscape archaeology*, Oxford.
- PIRO S. (2000), *Integrazione di metodi geofisici ad alta risoluzione per l'indagine nei siti archeologici*, in CAMPANA S., FORTE M. (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, Firenze, pp. 273-296.
- TOMEIO P. (2017), *Tecnica idraulica nell'area di Venafro (Isernia)*, in FIORE A., GISOTTI G., LENA G., MASCIOCO L. (a cura di) *Atti del Convegno Nazionale, Tecnica di Idraulica Antica*, Roma, 18 novembre 2016, Roma, pp. 265-271.
- SCHERIFF R. E. (1984), *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, Tulsa, Oklahoma.
- SCHMIDT A. (2002), *Geophysical data in archaeology: a guide to good practice*, AHDS, Guides to Good Practice, Oxford.
- SCOLLAR I. (1974), *Interactive processing of geophysical data from archaeological sites*, in *Computer Applications in Archaeology*, Birmingham, Centre for Computing and Computer Science, University of Birmingham, pp. 75-80
- SIART C., FORBRIGER M., BUBENZER O. (2018), *Digital Geoarchaeology. New techniques for Interdisciplinary Human Environmental Research*, Springer.



## GLOSSARIO

**acceleratore di particelle:** è una macchina il cui obiettivo è di produrre fasci di ioni o particelle subatomiche cariche (elettroni, positroni, protoni, e antiprotoni) e, in seguito, farli collidere tra loro ad elevata energia cinetica sotto forma di urti.

**algoritmo:** schema o procedimento sistematico di calcolo.

**alogeno:** elemento non metallico appartenente al penultimo gruppo del sistema periodico (composto da fluoro, cloro, bromo, iodio e astato).

**altimetria:** attività che riguarda la tecnica e gli strumenti per la determinazione della quota di un punto rispetto ad una superficie di riferimento o della differenza di quota fra due punti (*dislivello*).

**anticlinale:** opposta alla sinclinale, è una piega degli strati rocciosi della crosta terrestre, convessa verso l'alto.

**archeobotanica:** si occupa dello studio dei reperti botanici delle ere più antiche.

**Archeologia del Paesaggio:** disciplina che studia i paesaggi e il loro stratificarsi, utilizzando fonti, metodologie e procedure diverse.

**Archeometria:** si occupa dello studio scientifico, attraverso analisi di laboratorio, dei materiali (lapidei, ceramica, vetro, metalli, pigmenti, coloranti, leganti, organici) di cui i beni storici, archeologici, artistici e architettonici sono composti e dei contesti naturali in cui tali beni si sono conservati nel corso del tempo.

**arenaria:** roccia sedimentaria psammitica, costituita da granuli di quarzo, feldspato e mica cementati da una matrice argillosa, calcarea o silicea.

**atomo:** è la struttura nella quale la materia è organizzata in unità fondamentali che costituiscono gli elementi chimici che, aggregandosi in molecole, caratterizzano le sostanze chimiche.

**attività di cava, cavatura:** operazione di scavo, escavazione.

**batimetria:** ramo dell'oceanografia che si interessa del rilevamento della profondità, della sua rappresentazione grafica, della forma dei fondali oceanici e lacustri.

**bipedale:** dal lat. *Bipedale*, mattone cotto usato dagli antichi Romani, il cui nome deriva dalle sue dimensioni (60 × 60 cm).

**BP:** prima del tempo presente o BP. Espressione inglese pertinente alla scala del tempo usata in Geoarcheologia, geologia e altre discipline scientifiche.

**calcare:** roccia sedimentaria il cui componente principale è rappresentato dalla calcite.

**campo gravitazionale:** campo di forze conservativo o campo associato all'interazione gravitazionale.

**cartografia storica:** si occupa di descrivere l'evoluzione delle carte geografiche, delle forme e dei metodi per la loro rappresentazione.

**colata lavica:** massa di lava che fuoriesce da un vulcano in eruzione e scorre lungo un pendio.

**coprolite:** termine derivante dal greco *kópros* (sterco) e *lithos* (pietra) e indica un escremento fossilizzato.

**curva di livello:** curva che unisce punti con quota uguale. Per uguale si intende la distanza verticale dal piano di riferimento al quale è stato attribuito quota 0; se sono sopra il livello del mare si chiamerà isoipsa, al contrario isobata.

**database:** archivio di dati strutturato in modo da organizzare, in maniera ragionata, le informazioni e per lo svolgimento di ricerche complesse. Il database relazionale è un archivio in cui le informazioni sono organizzate in tabelle interrelate, che consentono ricerche e aggiornamenti incrociati, tramite un'interrogazione incrociata.

**disboscamento:** eliminazione della vegetazione arborea in un'area boschiva o forestale.

**elettrodo:** conduttore che trasporta corrente o che crea un campo elettrico in un mezzo.

**Eneolitico:** periodo di transizione fra l'età della pietra e l'Età del Bronzo.

**Etnoarcheologia:** disciplina che studia la cultura materiale delle popolazioni contemporanee utilizzando la metodologia archeologica.

**fluxgate:** dispositivi a stato solido, senza parti in movimento che lavorano in un ampio intervallo di tem-

peratura.

**foraggio:** insieme di materie che fungono da alimento agli animali domestici erbivori.

**foresta planiziale:** foresta mista in pianura, con prevalenza di querce e con specie rustiche indigene (olmo campestre, acero campestre, frassino maggiore).

**fossile:** in origine, il termine era legato a qualsiasi tipo di materiale estratto dalla crosta terrestre. Nella sua accezione moderna, indica impronte o resti di piante o di animali (estinti o esistenti) o dei loro prodotti che si sono conservati negli strati della crosta terrestre.

**gasteropodo:** classe di molluschi viventi che ha avuto, per numero e varietà di specie, il maggior successo evolutivo.

**Giurassico:** secondo periodo dell'Era Mesozoica (detto anche *Giura* e *Giurese*), caratterizzato dalla presenza di Ammoniti, Belemniti, da numerosi Rettili e da una flora di clima caldo con grande sviluppo delle Conifere.

**Google Earth:** software che visualizza immagini virtuali della Terra, attraverso immagini satellitari ottenute dal telerilevamento terrestre, fotografie aeree e dati topografici memorizzati in una piattaforma GIS.

**interpolazione:** processo di manipolazione dell'informazione spaziale al fine di estrarre nuova informazione e significato dall'informazione originale.

**magma:** massa di silicati fusi (parzialmente o completamente), contenente gas disciolti. Questa massa si colloca entro la crosta terrestre e può intrudersi, allo stato fuso, nelle fratture della litosfera. Il magma, se si solidifica all'interno della crosta terrestre, genera le *rocce intrusive*; se si espande in superficie (in ambiente aereo o subacqueo) genera le *rocce effusive*.

**MHz (megahertz):** mega (M) prefisso pari a un milione, hertz (Hz) unità di misura della frequenza nel Sistema Internazionale.

**Miocene:** periodo geologico dell'era cenozoica compreso fra l'Oligocene

e il Pliocene, caratterizzato dall'avanzata del mare e dallo sviluppo dell'Orogenesi alpina.

**Neutrino:** particella subatomica elementare, appartenente al gruppo dei leptoni e alla famiglia dei fermioni, di massa piccolissima con carica elettrica nulla.

**nicol:** lente conoscopica che prende il nome del suo creatore, William Nicol, inventore del prisma polarizzatore omonimo.

**nodulo:** nodo, massa o grumo irregolarmente arrotondato di un minerale o di un aggregato minerale o di grappolo minerale.

**orogenesi:** insieme dei fenomeni geologici che portarono alla formazione delle catene montuose.

**palafitta:** insediamento abitativo, tipico del Neolitico e dell'Età del Bronzo, di capanne poste su un tavolo orizzontale, in legno, sostenuto da pali infissi verticalmente sul fondo di un lago, lungo le sue sponde o sul fondo di una palude.

**paleocorrente:** corrente tipica di uno specifico ambiente sedimentario, cui si deve il trasporto e il deposito di materiale detritico

**Paleogeografia:** branca appartenente alla geologia e alla geografia, che si occupa della ricerca delle forme e delle caratteristiche dei continenti e dei bacini marini in ere geologiche passate.

**pixel:** unità minima convenzionale della superficie di un'immagine digitale. Il termine è la contrazione di "Picture Element", cioè "elemento di immagine".

**polline:** insieme delle cellule germinali maschili, o *granuli pollinici*, delle piante.

**protone:** particella subatomica composta dotata di carica elettrica positiva.

**Punto di Curie:** Temperatura di transizione tra lo stato ferromagnetico e quello paramagnetico o valore oltre il quale un materiale magnetico perde questa sua proprietà per diventare paramagnetico.

**quota:** distanza verticale rispetto al livello medio del mare.

**Radioisotopo:** sono radionuclidi (isotopi radioattivi) di uno stesso elemento chimico.

**resina sintetica:** materiale viscoso, di aspetto simile alla resina vegeta-

le, capace di indurirsi a freddo o a caldo.

**riflessione:** fenomeno che si verifica quando un fascio di radiazioni elettromagnetiche incide sulla superficie di separazione tra due mezzi trasparenti aventi diverso indice di rifrazione. Una parte di questo fascio viene rinvia nel mezzo da cui ha origine il raggio incidente, tracciando, con la normale alla superficie, un angolo uguale a quello del raggio incidente stesso, ma con una diversa direzione di propagazione.

**rifrazione:** fenomeno che si verifica quando un fascio di radiazioni elettromagnetiche incide sulla superficie di separazione tra due mezzi trasparenti. Una parte del fascio la attraversa e viene trasmessa nel secondo mezzo, dove forma, con la normale alla superficie, un angolo diverso da quello di incidenza e si propaga lungo una diversa direzione.

**rilievo:** parte della superficie terrestre che emerge al disopra delle pianure o dal fondo dei bacini marini e oceanici.

**Rinaldone:** è un fenomeno culturale o *facies* culturale di carattere funerario che si diffuse in Toscana, nel Lazio centro-settentrionale, nelle Marche e in Umbria nell'Eneolitico, tra la metà del IV e il III millennio a.C.

**roccia piroclastica:** rocce clastica composta da frammenti rocciosi prodotti ed espulsi da eruzioni vulcaniche esplosive.

**salinità:** rapporto tra la massa di sale contenuta in una data quantità di acqua e la quantità di acqua stessa.

**sinclinale:** opposta all'anticlinale, è una piega degli strati rocciosi della crosta terrestre concava verso l'alto.

**scavo archeologico:** asportazione fisico di terreno per riportare alla luce monumenti od oggetti.

**speleotema:** deriva dal greco e vuol dire *deposito in grotta*. È un deposito minerale secondario formatosi in grotta, tipico delle zone carsiche.

**spettro elettromagnetico:** insieme di tutte le possibili frequenze della radiazione elettromagnetica. Convenzionalmente, l'intero spettro è suddiviso nella parte di spettro visibile e in quelle a frequenza minore e maggiore dello spettro visibile.

**Spin elettronico:** Lo spin, o mo-

mento angolare intrinseco, di un elettrone, è una quantità che descrive un momento angolare meccanico classico basato sul movimento rotazionale di una massa. Lo spin dell'elettrone è anche direttamente collegato ad argomenti come il magnetismo o il ferromagnetismo.

**stalagmite:** concrezione calcarea a forma di colonna che s'innalza dal pavimento, tipica delle grotte carsiche.

**stalattite:** concrezione calcarea a forma di colonna che pende dal soffitto, tipica delle grotte carsiche.

**stoppia:** residui di una coltura erbacea rimasti dopo il taglio o la mietitura.

**survey archeologico** (*ricognizione archeologica o di superficie*): è un tipo di indagine, di carattere preliminare, sistematica o no, rivolta all'individuazione di aree di interesse archeologico.

**target:** etichetta con riferimento a scacchiera, utilizzato per ambito fotogrammetrico, aerofotogrammetrico e di rilievo in generale per georeferenziare le immagini attraverso punti noti, come gli stessi target.

**temperatura:** proprietà fisica che registra il trasferimento di energia termica da un sistema ad un altro.

**torba:** deposito composto da resti vegetali sommersi e impregnati d'acqua che, a causa dell'acidità dell'ambiente, non si decompongono totalmente. Una torba può contenere diverse tipologie di materiale organico come carcasse di insetti e di altri animali.

**travertino:** roccia sedimentaria calcarea di tipo chimico.

**Triassico:** il Triassico o Trias, è il primo periodo del Mesozoico o Era Secondaria, compreso tra 252,2±0,5 e 201,3±0,2 milioni di anni fa, tra il Permiano e il Giurassico.

**Uranio:** Elemento chimico radioattivo (numero atomico 92, peso atomico 238,03, simbolo *U*) e metallo tenero e duttile appartenente al gruppo degli attinidi.

**versante:** ciascuno dei due fianchi di un rilievo collinare o montuoso.

**Villafranchiano:** fase terminale del Terziario, corrispondente al periodo di transizione tra il Pliocene e il Pleistocene.



### **DAVIDE MASTROIANNI**

Archeologo e PhD in Topografia Antica. Cultore della Materia in Archeologia dei Paesaggi presso l'Università di Siena. Direttore Scientifico della rivista "Stratigrafie del Paesaggio". Coordinatore Nazionale dell'Area Tematica Geoarcheologia della Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA). Vice Presidente SIGEA Calabria e coordinatore regionale.



### **GIUSEPPE GISOTTI**

Geologo, ha insegnato Scienza del suolo e Geografia dell'ambiente e del paesaggio. E' stato dirigente del Servizio Geologico d'Italia. E' Presidente onorario della Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA). Consulente tecnico per Pubbliche amministrazioni e per la Magistratura, ha collaborato con archeologi nelle ricerche in alcuni siti archeologici italiani. Studioso di interazioni tra l'attività umana e l'ambiente, è considerato un antesignano della materia. Per Carocci editore ha pubblicato, fra l'altro, "La fondazione delle città. Le scelte insediative da Uruk a New York" (2016) e "Geologia per archeologi. Forme del terreno e civiltà antiche" (2020).

Finito di stampare nel mese di Gennaio 2021  
dalla Sagraf srl  
Z.I. Capurso (Ba)

Aggiornato Dicembre 2021

Giuseppe Gisotti

# Geologia per archeologi

*Forme del terreno  
e civiltà antiche*



Carocci  editore

Gioacchino Lena

## **Viaggio geoarcheologico attraverso la Calabria**



**RUB3ETTINO**

La **Sigea - Società Italiana di Geologia Ambientale**, è un'associazione scientifica e culturale, senza fini di lucro, fondata nel maggio 1992 e riconosciuta dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare come "associazione di protezione ambientale a carattere nazionale" con decreto 24 maggio 2007 (G.U. n. 127 del 4/6/2007). Sono soci Sigea geologi, architetti, ingegneri, agronomi, forestali, archeologi, geografi e cultori della geologia ambientale.

**La Sigea**

- Stampa e invia ai soci la rivista Geologia dell'Ambiente
- Pubblica sul sito web gli atti dei convegni come supplementi digitali della rivista Geologia dell'Ambiente, liberamente scaricabili
- Favorisce il progresso, la valorizzazione e la diffusione dei temi di protezione ambientale
- Promuove il confronto interdisciplinare e plurisetoriale
- Opera sull'intero territorio nazionale
- Organizza attività didattiche, convegni, escursioni di studio e campagne di sensibilizzazione per la sostenibilità dello sviluppo



Scansiona il Qr code e scarica gratuitamente i supplementi digitali di Geologia dell'Ambiente. Segui le nostre attività dal sito web [www.sigeaweb.it](http://www.sigeaweb.it) e dalla pagina di Facebook

