

MARCELLO BOLOGNESI, MARIJA OBRADOVIC, NASSER ABU-ZEID,
MARCO PERESANI, ALESSIO FURINI, PAOLO RUSSO
& GIOVANNI SANTARATO

INTEGRAZIONE DI RILIEVI
LASERSCAN E FOTOGAMMETRICI CON
METODOLOGIE GEOFISICHE APPLICATA
AD UNA CAVITÀ PLEISTOCENICA
CON STRATIFICAZIONE ARCHEOLOGICA

ABSTRACT - BOLOGNESI *et al.*, 2015 - Integration of laser scan and photogrammetric survey with geophysical methodologies applied to a pleistocene cave with archeological stratification.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 265, 2015, ser. IX, vol. V, B: 21-30.

The Fumane Cave is located in a small valley just above Ca' Gottolo. It was discovered by Giovanni Solinas, and from 1988 are made systematic excavations which have identified a series of stratigraphic levels, to a height of almost 12 meters. This article presents a 3D geometric survey of entire Cave carried out with laser scanning and photogrammetry. The survey, aimed at building a three-dimensional digital model of the Cave, is set in a context of integrated survey, including geomatics, geophysics and archeology.

KEY WORDS - Photogrammetry, 3D digital model, Laser scanner, Integrated survey, Geomatics

RIASSUNTO - BOLOGNESI *et al.*, 2015 - Integrazione di rilievi laserscan e fotogrammetrici con metodologie geofisiche applicata ad una cavità pleistocenica con stratificazione archeologica.

La Grotta di Fumane si trova sul versante di una piccola valle poco sopra la località Ca' Gottolo. Fu scoperta da Giovanni Solinas, e dal 1988 vengono effettuati scavi sistematici che hanno permesso di individuare una lunga serie di livelli stratigrafici, per un'altezza di quasi 12 metri. In questo articolo viene presentato un rilievo geometrico 3D effettuato con scansione laser e fotogrammetria dell'intera Grotta di Fumane. Tale rilievo, finalizzato alla costruzione di un modello digitale tridimensionale della Grotta, si inserisce in un contesto di rilievo integrato, tra geomatica, geofisica ed archeologia.

PAROLE CHIAVE - Fotogrammetria, Modelli digitali 3D, Laser scanner, Rilievo integrato. Geomatica.

INTRODUZIONE

Già agli inizi del XX secolo, e soprattutto negli anni immediatamente successivi alla seconda guerra mondiale si sviluppò nella ricerca archeologica la tendenza all'utilizzo di metodi e tecniche non proprie di questa disciplina, ma prestate da altri settori di ricerca. In questo periodo ad esempio, risale la prima applicazione di fotogrammetria aerea, le cui riprese furono effettuate attraverso l'uso di un pallone aerostatico. Negli ultimi decenni la fotogrammetria ha subito una vera e propria rivoluzione che le ha permesso di avvicinarsi, in termini di qualità ed affidabilità alle tradizionali tecniche di rilievo come l'ormai nota scansione laser (BOLOGNESI *et al.* ⁽¹⁾). Un ruolo fondamentale per la crescita del settore è stata senza dubbio l'introduzione dei nuovi software di calcolo, che sfruttano gli algoritmi appartenenti alla computer vision per risolvere i problemi di triangolazione tipici della fotogrammetria classica. Tutto questo unito al continuo sviluppo della tecnologia (computer, fotocamere, droni) ha permesso a questa disciplina di trovare impiego ed applicazione in diversi campi di ricerca tra cui anche l'archeologia. Attraverso l'uso di una semplice fotocamera è infatti possibile ricostruire la geometria di un qualsiasi oggetto fotografato grazie ad un processo di ricostruzione noto con il termine di "structure from motion".

L'uso della fotogrammetria non fu l'unica tecnica ad essere utilizzata per scopi archeologici ma venne presto integrata con l'utilizzo di altre metodologie messe a punto per ricerche di tipo geologico e geofisico. L'integrazione con tali tecniche, soprattutto per l'identificazione di anomalie presenti nel sottosuolo, ha certamente contribuito ad ampliare le prospettive della ricerca archeologica, sia per quel che riguarda i contenuti, sia per quanto riguarda i metodi di indagine (PIRO *et al.* ⁽²⁾). Il lavoro presentato in questo articolo si inserisce proprio in un contesto di rilievo integrato, tra geomatica, geofisica ed archeologia. Il sito oggetto di studio è la famosa Grotta di Fumane (Fig. 1), situata in provincia di Verona, sulla vecchia strada che porta a Molina, nella Val dei Progni. Ancora oggi è considerata come uno dei siti più importanti della preistoria antica.

Il primo scavo fu compiuto nel 1964 da Giovanni Solinas (PERESANI *et al.* ⁽³⁾), successivamente dal 1988 ad oggi, le campagne di scavo diventano sistematiche. La grotta ha uno sviluppo in lunghezza di circa 22 metri ed una profondità, misurata nel suo punto più lontano di circa 10 metri. Al

⁽¹⁾ BOLOGNESI, FURINI, RUSSO, PELLEGRINELLI & RUSSO, 2014; BOLOGNESI, FURINI, RUSSO, PELLEGRINELLI & RUSSO, 2015.

⁽²⁾ PIRO, MAURIELLO & CAMMARANO, 2000.

⁽³⁾ PERESANI, 2012.



Fig. 1 - Una visita della Grotta di Fumane.

suo interno si trova un deposito stratificato alto circa 12 metri, composto da diversi tipi di sedimenti tra cui sabbie, polveri, piccoli frammenti spigolosi e massi rocciosi più grandi caduti dalla volta e dalle pareti della grotta.

Il lavoro svolto presso la Grotta è stato caratterizzato principalmente da una serie di indagini di tipo geofisico condotte secondo l'applicazione di due metodologie specifiche: una tomografia elettrica (ERT, electrical resistivity tomography) e un'indagine di tipo NHVSR (nota anche come tecnica di Nakamura ⁽⁴⁾) per misurare il rumore sismico naturale a bassa frequenza presente nel sottosuolo. Al fine di conoscere la morfologia e la geometria esatta della Grotta e quindi fornire una corretta interpretazione dei dati ottenuti, è stato eseguito un rilievo completo dell'intero sito di scavo ed è stato prodotto un modello digitale tridimensionale dell'intera area. Da questo modello sono poi state estratte le sezioni su cui sono stati posizionati i risultati delle analisi geofisiche.

Tipicamente modelli di questo tipo si ottengono a seguito di un rilievo geomatico. Per farlo sono stati utilizzati due differenti approcci. In primo luogo è stato effettuato un rilievo laser scanner dell'intera Grotta. Successivamente, dove ritenuto opportuno, attraverso tecniche fotogram-

⁽⁴⁾ NAKAMURA, 1989.

metriche sono stati realizzati alcuni modelli digitali ad altissima risoluzione a completamento del lavoro. Nei paragrafi successivi si osservano le varie fasi del rilievo.

IL RILIEVO LASER-SCANNER

Uno scanner 3D come quello utilizzato per questo lavoro è in grado di ricostruire con estrema precisione lo spazio geometrico che lo circonda, registrando le coordinate tridimensionali dei punti che lo compongono in modo automatico e con una elevata densità. Generalmente sono classificati in base al principio che regola la misura della distanza. Gli approcci possibili sono tipicamente due: il calcolo del tempo di volo (T.o.F, time of flight) o della differenza di fase (PS, phase shift). Nel primo caso ad essere misurato è il tempo che trascorre tra l'istante in cui viene emesso l'impulso laser e il suo ritorno al sensore dopo essere ovviamente stato riflesso dall'oggetto in esame. Nel secondo caso invece viene misurata appunto la differenza di fase, confrontando la fase in uscita dell'onda emessa con quella ricevuta a seguito della riflessione sulla superficie dell'oggetto. Senza entrare nel merito delle due metodologie, possiamo affermare che nel primo caso è possibile raggiungere portate maggiori a scapito però della velocità di scansione, nettamente a favore della seconda. Esistono oggi strumenti in grado di analizzare per la misura della distanza entrambe le metodologie. Vengono definiti scanner ditanziometrici. Funzionano all'incirca come una stazione totale, cioè misurando la posizione di un punto nello spazio tramite le sue coordinate polari e la sua distanza. A differenza delle stazioni totali in cui il punto è scelto in maniera arbitraria dall'operatore, uno scanner opera in modo del tutto automatico, campionando lo spazio che lo circonda secondo un passo definito a priori. Al massimo è possibile limitarne il campo di azione riducendo ancora la velocità di scansione. Per il lavoro che andremo a presentare è stato utilizzato uno scanner LEICA C10 (misura la distanza secondo il principio del T.o.F). Come si può osservare dalle immagini (Figg. 2 e 3) la grotta presenta una struttura piuttosto intricata, non tanto per la sua conformazione naturale ma soprattutto per la serie di sovrastrutture che si trovano a ridosso della stessa.

Le occlusioni e i due diversi livelli sono senza dubbio gli aspetti più critici per quanto riguarda il rilievo, pertanto per ottenere un modello dettagliato dell'intera Grotta senza zone d'ombra è stato necessario operare su più stazioni e spesso in spazi ristretti. Prima di iniziare la fase di scansione vera e propria che ha richiesto circa una giornata di lavoro è stato importante materializzare a terra una serie di punti aventi coordinate note. Tali punti



Figg. 2 e 3 - Nelle immagini della Grotta si possono osservare le sovrastrutture presenti quali ponteggi, coperture, scale e camminamenti artificiali. In fase di rilievo sono stati preventivamente rimossi.

rappresentano i vertici della nostra rete di inquadramento, fondamentale se si vuole utilizzare un unico sistema di riferimento. Il rilievo di questi punti è semplice, basta disporre di una stazione totale. Per il nostro lavoro è stata utilizzata una Leica TS06.

In totale sono state eseguite 11 scansioni da 11 punti di stazione diversi (Figg. 4 e 5). Una volta in laboratorio le singole scansioni sono state unite in un unico sistema di riferimento così da formare il modello dell'intero sito.

Al termine del rilievo il prodotto che si ottiene è un insieme molto grande di punti chiamato "nube di punti" che sarà la base per qualsiasi elaborazione futura. La gestione di questi punti è affidata ad appositi software che ci permettono di visualizzare ed elaborare la scansione effettuata. Lo scanner rileva tutto ciò che lo circonda compresa tutta la serie di sovrastrutture presenti sulla scena, tra cui riconosciamo ponteggi, travi, assi per la pavimentazione teli e persino la copertura degli alberi esterni. Estrarre delle sezioni da una nube del genere comporta diverse difficoltà, pertanto prima di procedere è necessario eseguire un'importante operazione di pulizia della nube. È necessario dunque eliminare dalla scansione tutti quei dettagli ritenuti superflui ai fini del rilievo. Si ricorda ancora una volta infatti come lo scopo principale sia quello di ottenere un modello tridimensionale della Grotta e pertanto esclusivamente della superficie fisica del terreno. Solo a quel punto si potranno estrarre le sezioni interessate dalle indagini geofisiche in maniera tale da avere un profilo stratigrafico corretto su cui posizionare i risultati di tali indagini.



Figg. 4 e 5 - Alcuni punti di stazione del rilievo eseguito tramite laser scanner.

IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Come si osserva dalle immagini relative alla nube di punti da scanner (Fig. 6), la risoluzione con cui sono state eseguite le scansioni ci consente sicuramente di estrarre la geometria e posizione corretta di tutti i punti appartenenti alla superficie fisica della Grotta, ma restano di difficile interpretazioni alcuni dettagli di dimensioni ridotte. In alcuni casi come si osserva anche nelle zone più buie della Grotta lo scanner attribuisce il colore verde ai punti rilevati in quanto non è in grado di rilevarne la giusta cromia. Negli altri punti si ottengono comunque tonalità molto tenui rispetto il loro colore naturale. Con l'uso della fotogrammetria è possibile integrare il rilievo laser scanner, arricchendolo di particolari rilevati con risoluzione molto più elevata e con il rispetto delle mappe cromatiche presenti. Sono stati eseguiti per questo scopo una serie di rilievi fotogrammetrici che successivamente sono stati integrati nel sistema di riferimento assoluto e inseriti nella scansione eseguita in precedenza così da ottenere un unico modello della Grotta. Per il rilievo fotogrammetrico è sufficiente una fotocamera digitale compatta, opportunamente calibrata. In questo caso è stata utilizzata una Canon Eos 7D.

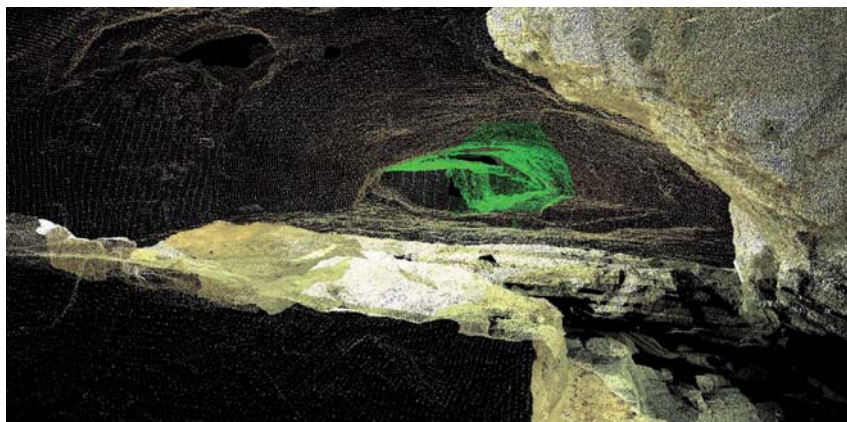


Fig. 6 - Una visita della nube di punti “pulita” della Grotta.

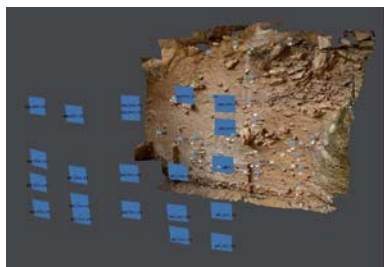


Fig. 7 - Orientamento delle immagini e creazione della nube di punti.



Fig. 8 - Dettaglio del modello 3D della parete, generato partendo dalla nube di punti.

Le fasi del rilievo fotogrammetrico si possono suddividere essenzialmente in tre momenti principali: la calibrazione della camera, l’acquisizione delle immagini (ovvero il rilievo vero e proprio) e la restituzione del modello digitale.

La calibrazione della fotocamera è una fase preliminare da eseguire in laboratorio. In fotogrammetria classica era sempre necessario eseguirla prima di effettuare il rilievo vero e proprio, ora, con l’introduzione dei nuovi software di restituzione può anche essere gestita a posteriori in quanto i parametri interni della camera sono stimati durante la fase di ricostruzione dell’intero blocco fotogrammetrico. Tuttavia è ancora una fase importante e necessaria se si vogliono ottenere modelli corretti e precisi della realtà che ci circonda. La calibrazione ha infatti lo scopo unico di calcolare i cosiddetti parametri interni della fotocamera che sono lunghezza focale, posizione del centro di presa nel sistema di riferimento immagine e i coefficienti del

polinomio di distorsione (diverso per ogni fotocamera). Una volta noti tali parametri è possibile correggere gli errori causati dalla distorsione, attraverso un ricampionamento delle immagini da utilizzare e quindi stimare la corretta posizione dei punti immagine. A questo punto si può procedere con la fase successiva, il rilievo.

La fase di rilievo consiste proprio nello scattare numerose fotografie della zona oggetto di studio variando di volta in volta la posizione della fotocamera. I principi che regolano il processo di *structure from motion* si basano su quelli già noti della stereo-fotogrammetria. Per risolvere le equazioni che regolano il problema è necessario osservare da più punti di vista (in questo caso da più immagini, almeno in due) lo stesso punto oggetto. Solo allora sarà possibile attraverso un processo noto come triangolazione stimare la posizione reale del punto attraverso la proiezione di tutti i punti immagine che lo ritraggono. Fondamentale è dunque il cosiddetto ricoprimento tra le immagini, cioè la sovrapposizione tra immagini consecutive. Esistono degli schemi per ottenere un ricoprimento sufficiente tra le immagini e sono quelli tipici della aereofotogrammetria che prevedevano ricoprimenti minimi del 60%. Oggi si prescinde leggermente da queste rigide regole l'unica cosa rimasta davvero importante è avere blocchi di immagini sovrapponibili in maniera da garantire un ricoprimento completo dell'oggetto. Per ottenere una buona restituzione e dunque un modello affidabile dell'oggetto che si sta rilevando è sempre consigliabile l'acquisizione di un numero elevato di foto, magari ridondante, così da poter scegliere a posteriori quelle migliori. Avendo a disposizione le immagini necessarie, ed essendo noti i parametri di orientamento interno della fotocamera utilizzata si può procedere con la creazione del modello digitale.

La restituzione, ultima fase del lavoro è ormai completamente affidata ai software di calcolo. Le immagini da trattare e la mole di calcoli da eseguire è tale che senza i moderni software sarebbe impensabile ottenere questo genere di risultati. Gli oggetti che al termine della ricostruzione si possono ottenere sono molteplici, ma tutti hanno origine ancora una volta dalla nube di punti, è la base di ogni successiva elaborazione. Si possono poi estrarre ortofoto, o come nel nostro caso dei veri e propri modelli tridimensionali texturizzati.

I modelli così ottenuti sono tutti geometricamente corretti, manca loro una scala, o meglio un sistema di riferimento. Per assegnarlo è sufficiente conoscere le coordinate di alcuni punti, riconoscerli nelle immagini utilizzate e riprocessare la nube creata in prima approssimazione. In questo modo si ottiene un modello scalato e orientato e sul quale è possibile controllare gli errori residui sui punti di coordinate note.

CONCLUSIONI

Al termine del rilievo e delle sue successive elaborazione è stato finalmente possibile estrarre le sezioni su cui sono state eseguite le indagini geofisiche (M. Obradovic ⁽⁵⁾). Vettorializzando le nubi di punti sono state estratte 11 sezioni che intersecano il sedimento principale della Grotta. In Fig. 9 si possono osservare i risultati di tali indagini (immagine gentilmente concessa da M. Obradovic).

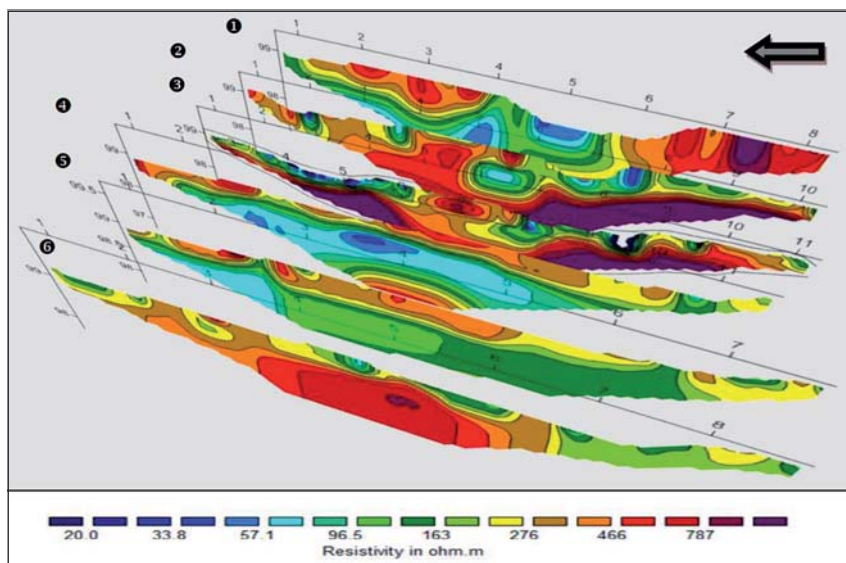


Fig. 9 - Rappresentazione pseudo-tridimensionale dei profili stratigrafici estratti tramite tomografia elettrica ERT.

Da un punto di vista geomatico non sono state utilizzate tecniche innovative dal momento che le scansioni laser, così come la fotogrammetria dei vicini, sono oggi all'ordine del giorno per chi si occupa di rilievo del territorio. Invece l'aspetto più interessante è sicuramente rappresentato dall'integrazione delle diverse tecniche di misura, sia geometriche che geofisiche. Tale integrazione, infatti, porta a disporre di un potente strumento di analisi, del tutto innovativo e particolarmente efficace nelle discipline facenti capo all'archeologia.

⁽⁵⁾ OBRADOVIC, ABU ZEID, BIGNARDI, BOLOGNESI, PERESANI, RUSSO & SANTARATO, 2015.

BIBLIOGRAFIA

- BOLOGNESI M., FURINI A., RUSSO V., PELLEGRINELLI A. & RUSSO P., 2014 - Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry - *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, pp. 113-119.
- BOLOGNESI M., FURINI A., RUSSO V., PELLEGRINELLI A. & RUSSO P., 2015 - Testing the low-cost RPAS potential in 3D cultural heritage reconstruction, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W4, pp. 229-235.
- PIRO S., MAURIELLO P. & CAMMARANO F., 2000 - Quantitative Integration of the Geophysical Methods for Archaeological Prospection. *Archaeological Prospection*, 7, pp. 203-213.
- PERESANI M., 2012 - Fifty thousand years of flint knapping and tool shaping across the Mousterian and Uluzzian sequence of Fumane cave. *Quaternary International*, 247, pp. 125-150.
- NAKAMURA Y., 1989 - A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report Of RTRI*, p. 30.
- OBRADOVIC M., ABU ZEID N., BIGNARDI S., BOLOGNESI M., PERESANI M., RUSSO P. & SANTARATO G., 2015 - *High Resolution Geophysical and Topographical Surveys for the Characterisation of Fumane Cave Prehistoric Site, Italy. Near Surface Geoscience 2015 - 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, At Tourin (Italy), Volume: Mo 21 B07.

Marcello Bolognesi, Alessio Furini Paolo Russo - Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, Italy.

Marija Obradovic, Marco Peresani - Dipartimento di Studi Umanistici, Università degli Studi di Ferrara, Italy.

Nasser Abu-Zeid, Giovanni Santarato - Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, Italy.