



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento dei Beni Culturali: Archeologia, Storia dell'Arte, del Cinema e della Musica

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN STORIA, CRITICA E CONSERVAZIONE
DEI BENI CULTURALI
CICLO XXIX

**REMOTE SENSING E OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS:
METODOLOGIE DI APPROCCIO PER LA CREAZIONE DI STANDARD ARCHEOLOGICI**

Tesi redatta con il contributo finanziario della Provincia Autonoma di Bolzano

Coordinatore: Ch.ma Prof.ssa Vittoria Romani

Supervisore: Ch.mo Prof. Armando De Guio

Co-Supervisore: Ch.mo Prof. Giuseppe Salemi

Dottorando: Luigi Magnini

INDICE

RIASSUNTO/ ABSTRACT	pag. 7
1. INTRODUZIONE	pag. 9
PARTE I: MATERIALI E METODI	
2. LiDAR e Modelli Digitali di Elevazione	pag. 15
2.1 Storia e principi del metodo	pag. 15
2.2 Stato dell'arte e applicazioni archeologiche	pag. 20
2.3 Acquisizione dei dati	pag. 22
2.4 Processamento dei dati	pag. 28
2.5 Elaborazione dei dati	pag. 31
3. <i>Object-Based Image Analysis</i> (OBIA)	pag. 48
3.1 Definizione e stato dell'arte	pag. 48
3.2 Principi base del metodo	pag. 52
3.2.1 La segmentazione	pag. 53
3.2.2 La classificazione	pag. 60
PARTE II: CONTESTI D'INDAGINE	
4. Gli altopiani veneto-trentini	pag. 71
4.1 Millegrobbe, Bisele e Cima Campo	pag. 73
4.2 Il sito del Bostel in località Castelletto di Rotzo (VI)	pag. 75
5. La necropoli dell'Olmo di Nogara	pag. 81
5.1 Il materiale osteologico	pag. 83
5.1.1 I campioni indagati	pag. 85

6. La conca di Bressanone	pag. 88
---------------------------	---------

PARTE III: CASI DI STUDIO

7. I contesti di guerra	pag. 95
7.1 Riconoscimento automatico delle trincee	pag. 98
7.1.1 Descrizione delle <i>features</i>	pag. 98
7.1.2 Classificazione OBIA	pag. 100
7.1.3 Valutazione dei risultati	pag. 107
7.2 Riconoscimento automatico e quantificazione delle buche di bomba	pag. 108
7.2.1 Descrizione delle <i>features</i>	pag. 108
7.2.2 Classificazione OBIA sull'area test	pag. 111
7.2.3 Esportazione del <i>rule set</i>	pag. 114
7.2.4 Controllo sul campo	pag. 116
7.2.5 Valutazione dei risultati	pag. 118
8. Applicazione di tecniche di <i>image enhancement</i> e di classificazione <i>object-based</i> su modelli 3D di oggetti	pag. 121
8.1 Definizione ed esportazione dell'area d'indagine dal modello 3D	pag. 121
8.2 Integrazione di trattamenti LiDAR e modelli 3D di piccole superfici	pag. 125
8.3 Classificazione OBIA	pag. 128
8.4 Esportazione del <i>rule set</i> e verifica dei risultati	pag. 131
9. Creazione di modelli predittivi tramite un approccio <i>object-based</i>	pag. 136
9.1 Due contesti, una problematica comune	pag. 137
9.2 Creazione del <i>rule set</i>	pag. 143
9.3 Risultati e verifica sul campo	pag. 147
9.4 Applicazione e adattamento del <i>rule set</i> per un diverso contesto	pag. 150
9.5 Verifica dei risultati	pag. 155
10. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	pag. 179
11. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE	pag. 191

12. RINGRAZIAMENTI pag. 197

BIBLIOGRAFIA pag. 199

RIASSUNTO

Il campo del *remote sensing* ha vissuto un incredibile sviluppo negli ultimi anni per merito della crescente qualità e varietà dei sensori e dell'abbattimento dei costi strumentali. Le potenzialità archeologiche sono state ben presto evidenti. Finora, l'interpretazione dei dati è rimasta però prerogativa dell'operatore umano, mediata dalle sue competenze e dalla sua esperienza. Il progressivo aumento di volume dei *dataset* (cd. "*big data explosion*") e la necessità di lavorare su progetti territoriali ad ampia scala hanno reso ora indispensabile una revisione delle modalità di studio tradizionalmente impiegate in ambito archeologico.

In questo senso, la ricerca presentata di seguito contribuisce alla valutazione delle potenzialità e dei limiti dell'emergente campo d'indagine dell'*object-based image analysis* (OBIA). Il lavoro si è focalizzato sulla definizione di protocolli OBIA per il trattamento di dati tridimensionali acquisiti tramite *laser scanner* aviotrasportato e terrestre attraverso l'elaborazione di un variegato spettro di casi di studio in grado di esemplificare le possibilità offerte dal metodo in archeologia.

I risultati ottenuti hanno consentito di identificare, mappare e quantificare in modo automatico e semi-automatico le tracce del paesaggio di guerra nell'area intorno a Forte Luserna (TN) e il tessuto osteologico ricalcificato sui crani di due inumati della necropoli protostorica dell'Olmo di Nogara (VR). Infine, il metodo è stato impiegato per lo sviluppo di un modello predittivo per la localizzazione dei "punti di controllo" in ambiente montano, che è stato studiato per l'area occidentale dell'Altopiano di Asiago (VI) e in seguito riapplicato con successo nella conca di Bressanone (BZ).

L'accuratezza dei risultati, verificati di volta in volta tramite ricognizioni a terra, validazione incrociata tramite analisi da remoto e comparazione con i dati editi in letteratura, ha confermato il potenziale della metodologia, consentendo di introdurre il concetto di *Archaeological Object-Based Image Analysis* (ArchaeOBIA), per rimarcare le specificità delle applicazioni *object-based* nell'ambito della disciplina archeologica.

ABSTRACT

In recent years, the field of remote sensing experienced an incredible growth thanks to the increasing quality and variety of sensors and the reduction of instrumental costs. The benefits for archaeology were soon apparent. So far, data interpretation remains essentially a prerogative of the human operator and is mediated by his skills and experiences. The continuous increase of datasets volume, i.e. the Big Data Explosion, and the increasing necessity to work on large scale projects require an overall revision of the methods traditionally used in archeology.

In this sense, the research presented hereinafter contributes to assess the limits and potential of the emerging field of object-based image analysis (OBIA). The work focused on the definition of OBIA protocols for the treatment of three-dimensional data acquired by airborne and terrestrial laser scanning through the development of a wide range of case studies, used to illustrate the possibilities of the method in archeology.

The results include a new, automated approach to identify, map and quantify traces of the First World War landscape around Fort Lusern (TN, Italy) and the recalcified osteological tissue on the skulls of two burials in the protohistoric necropolis of Olmo di Nogara (VR, Italy). Moreover, the method was employed to create a predictive model to locate “control places” in mountainous environments; the simulation was built for the Western Asiago Plateau (VI, Italy) and then re-applied with success in basin of Bressanone (BZ, Italy).

The accuracy of the results was verified thanks to respectively ground surveys, remote cross-validation and comparison with published literature. This confirmed the potential of the methodology, giving reasons to introduce the concept of Archaeological Object-Based Image Analysis (ArchaeOBIA), used to highlight the role of object-based applications in archaeology.

1. Introduzione

Questo lavoro di dottorato nasce come tentativo di codifica di una metodologia di approccio *object-based* indirizzata alle specifiche necessità della ricerca archeologica.

Il campo della teleosservazione, così come quello della creazione di modelli tridimensionali, ha visto un notevole sviluppo in anni recenti grazie alla crescente qualità nella tecnologia dei sensori in termini di precisione, accuratezza e risoluzione spaziale. Nonostante il *near* e il *remote sensing* abbiano avuto grandissimi sviluppi in termini di riduzione del costo della strumentazione e disponibilità di dati (anche in relazione alle recenti tendenze di *open access* e *open data*), oltre a una progressiva e sempre più massiccia diffusione in archeologia (MUSSON *et alii*, 2005; CAMPANA, FORTE, 2006; PARCAK, 2009; LASAPONARA, MASINI, 2012; CHAVARRIA, 2015), una grande maggioranza delle applicazioni proposte in letteratura si affidano ancora all'*expertise* del singolo fotointerpretatore o a semplici processamenti d'immagine, non sempre sufficienti per una lettura del complesso palinsesto di tracce che segnano il paesaggio moderno.

Con l'avvento di sensori satellitari, aerei o terrestri ad altissima risoluzione e la necessità di elaborare enormi quantità di dati in tempi relativamente ridotti, le carenze di un approccio manuale all'elaborazione e all'interpretazione dei dati sono diventate evidenti. L'esigenza di identificare nuove metodologie operative ha spinto dunque a focalizzarci, durante questo progetto di ricerca, sulla cosiddetta *object-based image analysis* (OBIA).

Al contrario dei metodi per pixel, quelli basati su oggetti prevedono di segmentare l'immagine in regioni omogenee. In questo modo essi forniscono un migliore supporto per l'analisi d'immagine e consentono di sfruttare parametri formali, dimensionali, cromatici, tessiturali e relazionali per affinare i processi di classificazione.

Definiens eCognition, il primo software per OBIA, è stato commercializzato nel 2000 sulla base di una collaborazione tra il premio Nobel Gerd Binnig e un team di ricercatori della Definiens AG a Monaco di Baviera (BAATZ, SCHÄPE, 1999). Si tratta essenzialmente del predecessore di eCognition Developer, il programma che è stato impiegato nel corso del lavoro di seguito presentato¹.

Da allora numerosi lavori hanno confermato l'efficienza dell'approccio *object-based* rispetto a quello per pixel (es. BAATZ *et alii*, 2008). Questi sviluppi hanno portato alla nascita

¹ L'acquisto del software eCognition Developer 9.2 è stato possibile grazie ai fondi erogati dall'Università degli Studi di Padova in favore del Progetto Horus (DEOTTO *et alii*, cds; MAGNINI *et alii*, cds).

di un nuovo paradigma denominato *Geographic Object-Based Image Analysis* (GeOBIA), dove il prefisso Geo tende ad enfatizzare l'impiego per applicazioni geografiche (HAY, CASTILLA, 2008), in contrapposizione con quelle in campo medico e biologico.

La differenziazione delle diverse evidenze sul terreno (siano esse in superficie o sepolte e dunque riconoscibili solo tramite tracce residuali sul terreno del tipo *grass marks*, *soil marks et similia*) è una questione di estrema rilevanza per la ricostruzione del contesto storico, archeologico e ambientale di un dato territorio. Alcune strutture possono, però, presentare un elevato grado di ambiguità (o “equifinalità”/ “omeomorfismo”) nello stato finale del loro processo morfogenetico. La possibilità di servirsi di un'intelligenza artificiale appositamente addestrata fornisce quindi un fondamentale caposaldo per la riduzione dell'equivocità interpretativa. Come vedremo, tuttavia, i possibili usi in archeologia non si limitano all'analisi del territorio, ma coinvolgono anche gli studi a media (singolo reperto) e piccola (foto in stereomicroscopia e immagini al microscopio elettronico a scansione) scala.

Questa tesi intende dunque offrire una panoramica dei principi dell'OBIA, riassumere lo stato dell'arte in relazione alla problematica indagata e identificare le potenzialità e le problematiche dell'impiego di questa metodologia in ambito archeologico. In particolare, il lavoro si concentrerà sull'elaborazione e la classificazione automatica o semi-automatica di dati acquisiti tramite *Airborne Laser Scanner* (ALS) e *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Attualmente, infatti, le analisi *object-based* sviluppate nei domini delle scienze ambientali e forestali o del *risk management* (es. MAIER *et alii*, 2008) hanno quasi sempre sfruttato esclusivamente il dato altimetrico offerto o singole visualizzazioni dei modelli digitali di elevazione senza ricorrere alla combinazione delle numerose possibili tecniche di *image enhancement* in grado di meglio evidenziare determinate classi di anomalie e semplificare dunque il processo di classificazione.

Al fine di sfruttare la nutrita serie di visualizzazioni disponibili per i dati LiDAR, verrà impiegato un ampio parco software, comprensivo di prodotti *open source* e proprietari. Di seguito sono elencati, a livello indicativo, alcuni dei programmi selezionati e le rispettive caratteristiche:

- 1) ArcGIS/ QuantumGis: si tratta di software per la creazione di Sistemi Geografici Informativi, che in questo contesto saranno utilizzati per la prima elaborazione delle immagini, grazie ad algoritmi di pulitura ed equalizzazione, ma anche per la creazione di elaborazioni come la *solar radiation*.

2) Saga GIS: sebbene faccia parte a tutti gli effetti dei software GIS, Saga offre una vasta gamma di algoritmi specifici per le analisi territoriali assenti o solo marginalmente presenti negli altri software della stessa famiglia, come per esempio lo *sky-view factor*.

3) LiVT: acronimo di *Lidar Visualisation Toolbox*, è un software creato da Ralf Hesse (2010) che consente, partendo da un DEM, di creare diverse elaborazioni particolarmente adatte all'ambito archeologico. Attualmente è disponibile gratuitamente la versione beta 1.0.0.23 (la versione completa è in fase di ottimizzazione) che presenta ancora qualche limitazione nei formati letti ed esportati e nella gestione di dati di grandi dimensioni. È in ogni caso necessario un software GIS ausiliario per la visualizzazione dei risultati.

4) MeshLab: è un software *open source* di elaborazione di modelli tridimensionali creato dal CNR di Pisa. Questo sistema è orientato alla gestione e al processamento di *mesh* non strutturate di grandi dimensioni e fornisce una serie di strumenti per l'*editing*, la pulizia, il recupero, l'elaborazione, il *rendering* e la conversione di questo tipo di dati.

L'obiettivo del presente progetto è dunque quello di offrire spunti generali di metodo, anche attraverso l'esemplificazione dei risultati ottenibili. A questo scopo saranno presentati e discussi di tre casi di studio inediti riguardanti tre diversi potenziali campi di applicazione archeologica dell'*object-based image analysis*.

Nello specifico, sono state selezionate due aree e due reperti osteologici campione: gli Altopiani Veneto-Trentini (Altopiano dei Sette Comuni, VI e Altopiano di Vezzena/ Lavarone/ Luserna, TN) e la conca di Bressanone (BZ), e due crani rinvenuti nella necropoli protostorica dell'Olmo di Nogara (VR). Per questi contesti sono infatti disponibili tutte le informazioni pregresse indispensabili per la creazione di quel "modello mentale" che sta alla base della realizzazione di set di regole esportabili e applicabili in serie. Inoltre, per tutti i contesti sono disponibili modelli digitali (talvolta anche a diversa risoluzione) che costituiscono il bacino di dati necessario per le operazioni di studio da remoto.

In particolare, saranno presentati: 1) l'identificazione e la quantificazione delle tracce residuali del paesaggio di guerra (*warscape*) in località Millegrobbe, Cima Campo e Bisele,

sull'altopiano di Vezzena/ Luserna/ Lavarone², con particolare riferimento alle trincee e alle buche di bomba; 2) l'identificazione e la quantificazione del tessuto osteologico ricalcificato all'interno della ferita lasciata dalla trapanazione chirurgica dei crani di due individui rinvenuti nella necropoli della media e recente età del Bronzo dell'Olmo di Nogara³ (VR); 3) la creazione di un modello predittivo per l'identificazione dei punti di controllo in area montana, applicato prima nella zona orientale dell'Altopiano di Asiago e poi esportato nel contesto della conca di Bressanone⁴ (BZ).

L'ambito cronologico di interesse è dunque estremamente ampio poiché si colloca tra la protostoria, con particolare riferimento all'età del Bronzo, e l'epoca moderna (*conflict archaeology/ archaeology of us*) per quanto concerne lo studio delle tracce legate all'impatto bellico della Grande Guerra nella zona degli Altopiani.

L'elaborato prevede una prima parte dedicata ai materiali e ai metodi impiegati durante il lavoro, dove verranno presentati i principi dell'acquisizione e dell'elaborazione dei dati LiDAR (capitolo 2) e verranno esplicitate le basi teoriche e lo stato dell'arte in relazione all'*object-based image analysis*, elencando i vari metodi di segmentazione, classificazione, esportazione e le modalità di creazione del *rule set* (capitolo 3). I capitoli 4, 5 e 6 saranno dedicati all'inquadramento generale dei contesti archeologici indagati. La fase operativa (parte III) sarà dedicata ai tre casi di studio e comprenderà la definizione del problema, la descrizione delle evidenze da identificare, il processo di creazione del modello mentale, lo sviluppo dello specifico set di regole, la classificazione, l'esportazione e la discussione dei risultati. Verrà inoltre presentata per ogni specifico caso di studio una stima dell'accuratezza del metodo tramite, ove possibile, ricognizioni di superficie (*ground truth*) o tramite validazione incrociata dei risultati con tecniche complementari di *Remote Sensing* e comparazione con dati da letteratura (*remote truth/ published truth*).

Il capitolo 10 sarà dedicato alla discussione complessiva dei risultati, anche in relazione con dati bibliografici a scopo comparativo. Il capitolo 11 sarà infine riservato a una serie di note conclusive.

² Per l'inquadramento generale del sito si vedano PEARCE, DE GUIO, 1999; DE GUIO, ZAMMATTEO, 2005; DE GUIO *et alii*, 2013.

³ Per l'inquadramento generale del sito e dei reperti osteologici si vedano ZORZI, 1960; SALZANI, 2005; CANCI *et alii*, 2010.

⁴ Per l'inquadramento generale si faccia riferimento a PARNIGOTTO, 2010; TECCHIATI, 2010 e bibliografia ivi citata.

PARTE I: MATERIALI E METODI

2. LiDAR e Modelli Digitali di Elevazione

2.1 *Storia e principi del metodo*

Il LiDAR (acronimo di *Light Detection and Ranging*) è uno strumento di telerilevamento che permette di calcolare la distanza da una superficie misurando il tempo trascorso fra l'emissione di un impulso laser e la ricezione del segnale retrodiffuso (WEHR, LOHR, 1999). Questa metodologia di *remote sensing* risulta applicabile sia a livello del suolo (TLS: *Terrestrial Laser Scanner*) sia dall'alto (ALS: *Airborne Laser Scanner*) utilizzando sia supporti statici che in movimento (aerei, mongolfiere, dirigibili, droni ecc.). I sensori che utilizzano un emettitore di energia per irradiare il bersaglio da acquisire, come RaDAR e LiDAR, sono detti sensori attivi. Al contrario i sensori che utilizzano l'energia naturale emessa o riflessa dalla superficie del bersaglio, senza l'utilizzo di un emettitore, sono detti sensori passivi. Fanno parte di quest'ultima categoria tutti i tipi di fotografia senza l'utilizzo del flash, le immagini da satellite, quelle a infrarosso e nello spettro del termico, i dati multi e iper-spetttrali (LILLESAND, 2004).

Come gran parte delle tecnologie legate al controllo e alla mappatura del territorio, anche il LiDAR nasce in ambito militare/ navale a metà degli anni sessanta nell'accezione di *Airborne Laser Bathymetry* (ALB) con lo scopo di migliorare la localizzazione dei sommergibili (HANUS, 2012). Negli anni settanta, contemporaneamente allo sviluppo del LiDAR batimetrico, il concetto LiDAR si è esteso anche all'uso topografico per la misurazione di superfici terrestri.

Lo sviluppo di tale tecnologia ha subito una brusca battuta di arresto a causa dell'impossibilità di localizzare con precisione il sensore/ emettitore in relazione con un sistema di coordinate note. Nello specifico, era possibile calcolare la distanza tra una superficie e il ricevitore ma risultava poi impossibile avere il posizionamento geodetico di quest'ultimo ottenendo così solo misurazioni relative. Solo negli anni ottanta (e nei novanta per usi civili) grazie all'introduzione del sistema GPS (*Global Positioning System*) è stato possibile sfruttare il LiDAR in maniera ottimale (CRUTCHLEY, CROW, 2010).

Il primo tentativo di utilizzare tale tecnologia in campo archeologico risale agli anni ottanta in Costa Rica (MCKEE, SEVER, 1994), ma è solo a partire dalla metà degli anni novanta che tale tecnica verrà perfezionata e diffusa, soprattutto sulla spinta del mondo

anglosassone¹. Attualmente l'utilizzo dell'*airborne laser scanner* è incrementato notevolmente e si trova sfruttato in numerosi progetti di ricerca legati all'archeologia territoriale.

Nell'*airborne LiDAR* l'emettitore, montato su un aeroplano, produce un raggio laser che viene riflesso a contatto con la superficie (Fig. 2.1); parte del segnale riflesso ritorna alla fonte dove un sensore registra il tempo di percorrenza e calcola la distanza tra l'emettitore e il suolo. La posizione precisa dell'emettitore/ sensore è nota grazie a una combinazione di GPS e IMU (*Inertial Measurement Unit*) che permettono di ottenere una "nuvola di punti" tridimensionale già georeferenziata (PFEIFER, BRIESE, 2007). Grazie all'alto numero di punti misurabili per metro quadro (con le risoluzioni attuali si può arrivare ad avere più di 20 punti per metro quadro) è possibile mappare in 3D molto rapidamente e accuratamente ampi territori.



Fig. 2. 1 Componenti di un sistema LiDAR. Da HANUS, 2012.

¹ Il primo *survey* in Gran Bretagna è stato effettuato a opera della *Environmental Agency* nel dicembre 1996.

Le ragioni della grande importanza che il LiDAR ha assunto per l'archeologo negli ultimi anni vanno ricercate nella sua abilità nel penetrare le fronde degli alberi e restituire modelli digitali del terreno "ripuliti" da tutta la vegetazione (CAMPANA, 2009). Questo permette di individuare da remoto evidenze archeologiche anche in aree forestali o alberate, riducendo drasticamente i tempi di lavoro. Senza LiDAR, infatti, sarebbe necessario effettuare ricognizioni al suolo, estremamente più lunghe e dispendiose.

Bisogna comunque considerare che sono necessarie alcune condizioni ambientali specifiche affinché il LiDAR possa restituire una mappatura realistica del terreno al di sotto della copertura arborea. Innanzitutto la vegetazione non deve essere troppo fitta: è indispensabile, infatti, che siano presenti degli spiragli tra il fogliame affinché il laser possa arrivare al suolo attraverso tali varchi. Aree con copertura totale sono estremamente difficili da ricognire e anche in caso di riuscita il risultato sarebbe povero e poco affidabile (CRUTCHLEY, CROW, 2010). Bisogna inoltre pianificare le ricognizioni in periodi dell'anno con scarsa vegetazione come l'inizio dell'inverno (non deve però essere presente la neve) o l'inizio della primavera.

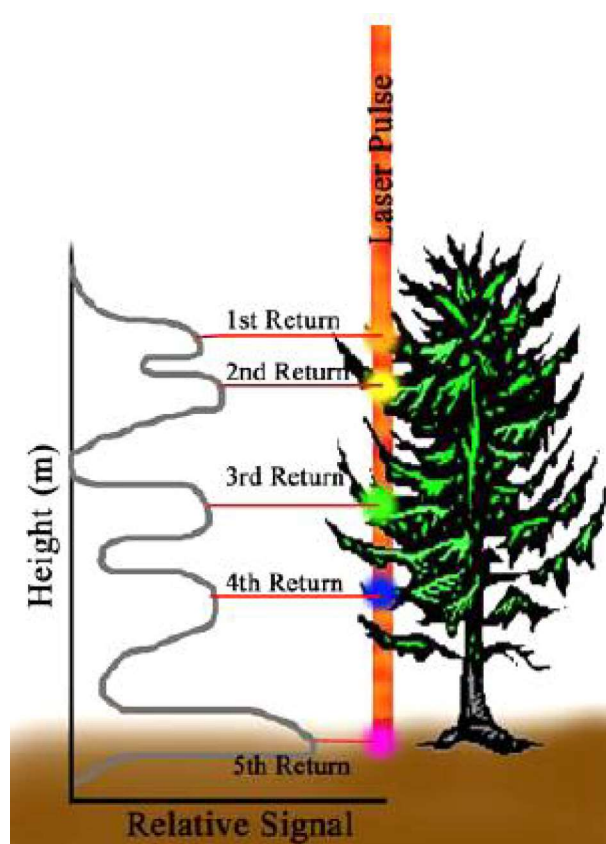


Fig. 2. 2 Schema esplicativo dei ritorni multipli del LiDAR.

In secondo luogo il numero di misurazioni per unità di area influisce pesantemente sulla capacità di penetrazione del LiDAR; per questa ragione gran parte delle radiazioni saranno riflesse dalle fronde salvo una piccola percentuale che colpirà il terreno. Quando il laser viene “indirizzato” verso il terreno, se qualcosa si interpone nel suo cammino (comprese le nuvole) parte della radiazione viene riflessa verso il sensore e forma il primo segnale di ritorno; il resto del raggio prosegue verso il suolo e se incontra altri ostacoli produce ulteriori ritorni finché non arriva a impattare il terreno o altre superfici che non gli permettono di continuare, ad esempio i tetti delle case (AUDEECHYA, PORWAL, 2013) (Fig. 2.2). In pratica nelle aree prive di vegetazione o con edifici il primo e l'ultimo ritorno coincidono, mentre nelle aree alberate il primo ritorno rappresenta generalmente la cima degli alberi mentre l'ultimo la superficie del suolo. Aumentando la risoluzione del LiDAR durante la mappatura di zone alberate è possibile almeno in parte aumentare la percentuale di punti riflessi direttamente dal suolo (HANUS, 2012). I primi e gli ultimi ritorni sono i più importanti: i primi vanno a formare il DSM (*Digital Surface Model*), gli ultimi servono per calcolare il DTM (*Digital Terrain Model*) (CRUTCHLEY, CROW, 2010).

Il DEM (*Digital Elevation Model*) o modello digitale di elevazione è un formato di immagine raster nel quale a ogni cella viene assegnato un valore di elevazione associato a una tonalità cromatica. Con tale termine si possono indicare sia DSM che DTM. Il DSM è un tipo di modello digitale di elevazione che comprende tutte le strutture presenti sul terreno, compresi edifici moderni e vegetazione. Al contrario il DTM mostra la superficie del suolo spoglia da vegetazione e costruzioni. Esistono diverse tecniche per rimuovere questi oggetti antropici e naturali dal modello ricostruttivo della superficie. Il procedimento più comune prevede di utilizzare degli algoritmi matematici per classificare la natura delle riflessioni dei diversi punti. Questa classificazione aiuta a rimuovere tutte le *features* che vengono stimate essere al di sopra della superficie attraverso il confronto con le altezze dei punti adiacenti. Per ottenere un DTM bisogna dunque utilizzare degli algoritmi che permettono di distinguere punti che effettivamente raggiungono il terreno da quelli che sono fermati dalle fronde degli alberi o dagli edifici (Fig. 2.3). Studi recenti si sono concentrati sulla comparazione dei risultati ottenibili con i diversi algoritmi di filtraggio presenti sul mercato (XUELIAN *et alii*, 2010). Tali studi suggeriscono che i migliori risultati in termini di dettaglio ottenuto in seguito alla rimozione della vegetazione si possono ottenere applicando l'algoritmo di *Progressive Densification* sviluppato da Axelsson (AXELSSON, 1999).

Da un punto di vista strettamente archeologico, le differenze tra un DSM e un DTM in campo aperto sono piuttosto scarse. È quindi preferibile utilizzare un DSM, poiché esso permette una più comoda identificazione delle *features* moderne. Va inoltre considerato che durante la creazione di un DTM è possibile che alcune delle evidenze archeologiche possano andare perdute a causa degli algoritmi di “*smoothing*” applicati. D’altro canto, l’utilità del DTM per le zone alberate è innegabile. Grazie alla capacità di penetrazione delle fronde arboree e all’applicazione di alcuni algoritmi di filtraggio è possibile ricostruire in maniera **verosimile** il profilo del suolo.

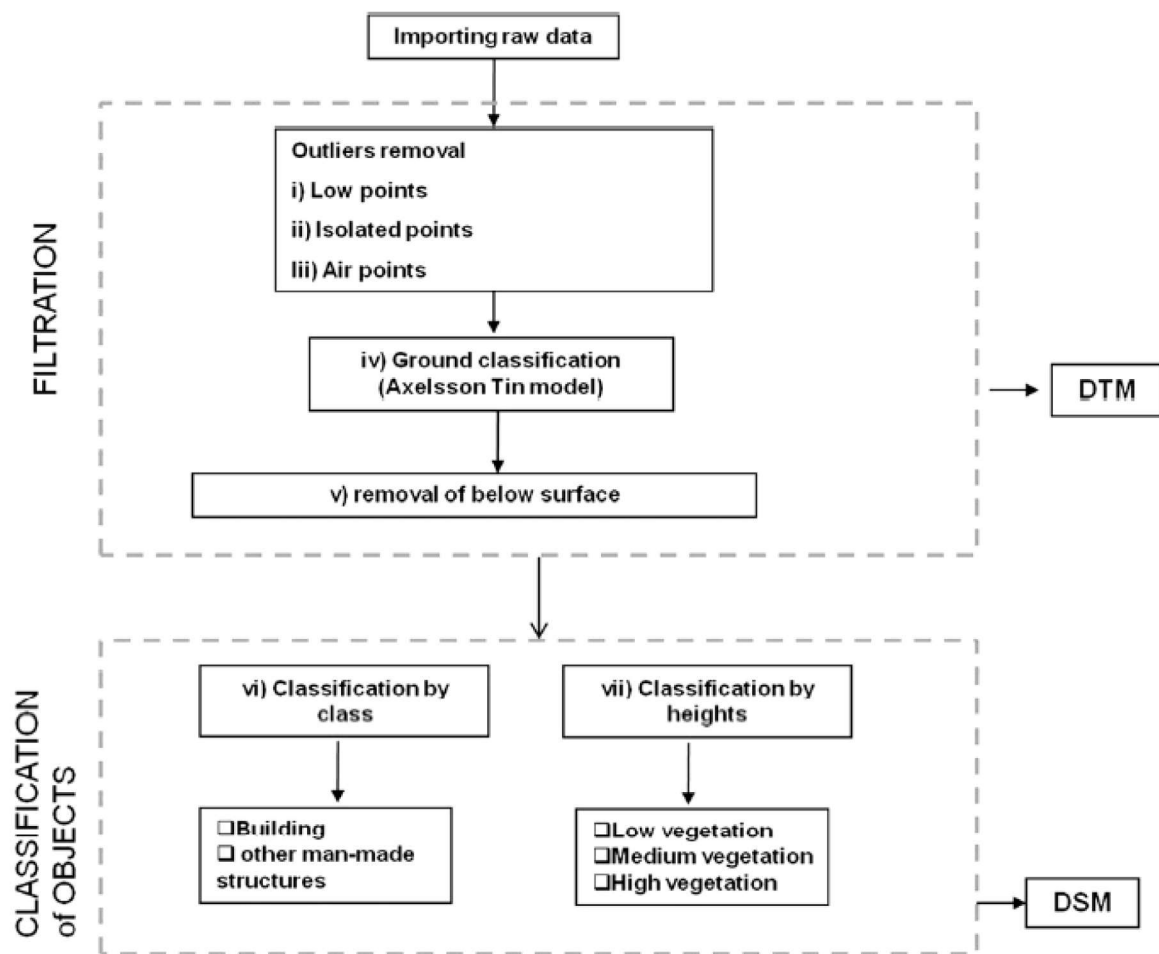


Fig. 2. 3 Diagramma di flusso della classificazione della *point cloud*. Da LASAPONARA *et alii*, 2011.

Con gli sviluppi tecnologici degli ultimi anni è stata messa a punto una nuova tecnica LiDAR chiamata *Full Waveform*. Questo sistema permette di ottenere l’intera gamma di echi di ritorno per ogni raggio laser emesso (LASAPONARA *et alii*, 2011). Tali parametri di riflessione forniscono informazioni essenziali sugli oggetti colpiti dai raggi. Una volta rielaborati i dati attraverso appositi software, essi vengono visualizzati su una curva

gaussiana. Questa metodologia è parzialmente ancora in fase di sviluppo ed esistono ancora pochi software che permettono di sfruttare compiutamente tutti i dati forniti dal *full waveform* LiDAR. A causa degli alti costi e delle estese tempistiche di rielaborazione dati, in genere questa tecnica viene utilizzata solo per aree fittamente alberate per cui tutta la mole di dati supplementari contribuisce in maniera critica alla possibilità di ottenere le informazioni ricercate (CRUTCHLEY, CROW, 2010). Oltre al risultato geografico espresso in coordinate x, y, z, il sensore del LiDAR registra anche l'intensità del segnale riflesso. Le differenti superfici colpite dal raggio reagiscono in maniera diversa e conseguentemente il segnale riflesso sarà caratteristico per le singole superfici. Con le dovute correzioni l'intensità del segnale può essere utilizzata per analizzare la riflettività delle superfici colpite e aiutare nell'interpretazione dei dati (BOYD, HILL, 2007). Le informazioni sull'intensità vengono tradotte in una serie di differenti tonalità che vanno a comporre un'immagine della superficie simile a un'ortofoto pancromatica alla stessa risoluzione. Bisogna comunque considerare che appartenendo in genere il raggio laser del LiDAR allo spettro del vicino infrarosso (NIR), la riflettività sarà diversa da quella ottenibile nello spettro del visibile. Ad esempio, siccome la clorofilla riflette il 50% circa nello spettro del vicino infrarosso e solo il 15% nello spettro del visibile, è molto più semplice individuare i *cropmarks* sul dato di intensità del LiDAR.

2.2 Stato dell'arte e applicazioni archeologiche

Le caratteristiche del LiDAR sono state sfruttate per la prima volta in ambito archeologico in Costa Rica su un'area coperta dalla foresta tropicale. Il progetto ha visto la collaborazione della NASA con l'Università del Colorado per lo studio di alcuni villaggi preistorici coperti di dieci differenti eruzioni vulcaniche e conservati al di sotto della coltre di cenere. Vengono effettuate due serie di voli sull'area e vengono acquisiti dati in diversi formati tra cui SAR (*Synthetic Aperture RaDAR*), LiDAR, fotografie nello spettro del visibile, immagini nello spettro dell'infrarosso e del termico. Combinando assieme le diverse tipologie di dato è stato possibile identificare strade e camminamenti nascosti dalla copertura arborea (MCKEE, SEVER, 1994).

A partire dai primi anni del ventunesimo secolo, grazie anche alla sempre maggiore disponibilità da parte degli uffici geografici nazionali a condividere i dati LiDAR acquisiti per

altri scopi, si è diffuso maggiormente l'utilizzo di questa tecnica di telerilevamento anche in ambito archeologico.

A partire dal 2001 durante lo studio del contesto di Stonehenge, l'utilizzo di dati LiDAR ha permesso di correggere la localizzazione di alcuni siti già noti con un'accuratezza di 15 cm, di identificare nuovi siti o nuove strutture antropiche come aggeri e fossati (HOLDEN *et alii*, 2002; SHELL, 2002; BEWELEY *et alii*, 2005). Negli anni successivi una serie di lavori sempre in ambito britannico su differenti territori campione ha permesso di ottimizzare le tecniche LiDAR in ambito archeologico e di confrontarle con quelle più tradizionali di aerofotografia. Nel 2006, nell'area collinare di Mendip Hills è stata effettuata una massiccia campagna di acquisizione e analisi di dati LiDAR. Combinando l'utilizzo di DSM per le aree non alberate e DTM per quelle alberate sono state evidenziate diverse strutture di natura archeologica come dei pozzi minerari, ma soprattutto il tratto di due strade romane (TRUSCOE, 2006; TRUSCOE, 2008; FIRTH, TRUSCOE, 2011). Sempre nel 2006, nel nord dello Yorkshire, in un'area apparentemente priva di *crop marks* è stato possibile individuare strutture antropiche visibili esclusivamente grazie allo studio della morfologia del terreno restituita dai modelli digitali di elevazione (POWESLAND, 2006; POWESLAND, 2007; PARCAK, 2009).

Tra i primi lavori che hanno dimostrato il potenziale del *Full Waveform* LiDAR, si segnala il progetto di ricognizione aerea portato avanti da Doneus e Briese (2006) in territorio austriaco. Durante la fase di rielaborazione dei dati, combinando le informazioni aggiunte dall'intera gamma di impulsi di ritorno del raggio, gli autori sono stati in grado di ottenere un DTM molto più accurato. Tramite questi nuovi dati, infatti, essi hanno potuto discriminare e dunque espungere dal modello anche la copertura arbustiva bassa, che può talvolta falsare la lettura dei dati. In questo modo sono state quindi individuate diverse evidenze di natura archeologica sotto la vegetazione, tra le quali si segnalano un castelliere dell'età del ferro, tracce di aratura fossili e una cinquantina di tumuli circolari (DONEUS, BRIESE, 2006).

Il lavoro estensivo svolto sulla foresta di Savernake ha permesso di testare il LiDAR su un'area ampia e fittamente alberata. La campagna di acquisizione ha prodotto una nuvola di punti a 50 cm di risoluzione dalla quale sono stati realizzati dall'Università di Cambridge sia il DSM che il DTM. I dati ottenuti dal LiDAR sono stati confrontati con quelli più tradizionali delle fotografie aeree. I risultati ottenuti hanno permesso di individuare diversi recinti di epoca preistorica e due tracciati stradali romani sotto la copertura arborea (CRUTCHLEY, 2008).

Con la diffusione sempre più ubiquitaria di questa tipologia di dato si sono sviluppate differenti tecniche di elaborazione dei modelli digitali di elevazione per enfatizzare maggiormente alcune caratteristiche rispetto ad altre. Queste tecniche verranno discusse più diffusamente nel paragrafo 2.5.

2.3 *Acquisizione dei dati*

Come per ogni altro progetto – sia esso di natura archeologica o meno – uno degli elementi più importanti prima di iniziare un lavoro è la consapevolezza degli obiettivi che si intendono raggiungere e la cognizione chiara dell'utilizzo che si vorrà fare dei dati LiDAR, ovvero dello scopo per cui essi sono stati selezionati rispetto alle altre possibili metodologie di lavoro.

Essendo questa tecnica di applicazione relativamente recente – quantomeno in ambito archeologico – è importante tenere a mente che essa può fornire risultati molto consistenti nelle giuste condizioni, così come può rivelarsi meno indicata qualora i presupposti ambientali non siano propizi e/o il record da indagare non sia dotato dei requisiti minimi per rispondere alla metodologia impiegata.

Durante la pianificazione bisogna innanzitutto considerare che il LiDAR non penetra nel sottosuolo. Se quindi gli oggetti di natura archeologica non sono emergenti o mediati da micromorfologie specifiche, il LiDAR registrerà soltanto la topografia generale dell'area di interesse (AUDEECHYA, PORWAL, 2013). È importante stabilire se si vuole utilizzare il LiDAR come risorsa primaria oppure come *layer* di sfondo da affiancare ad altri tematismi. Nel primo caso bisogna disporre di software, hardware e di un set di dati adeguato al tipo di ricerca da intraprendere. È necessario dunque disporre della strumentazione tecnica, ma anche di esperti per processare i dati e generare modelli digitali del terreno, oltre che di studiosi che abbiano familiarità con l'individuazione e l'interpretazione di *features* archeologiche da remoto.

Se, invece, il modello digitale della superficie viene utilizzato solo come sfondo, l'hardware e il software richiesti possono essere di qualità leggermente inferiore, ma ci sono da calcolare il tempo e le competenze per inserire il pacchetto di dati (LiDAR e non) all'interno di una piattaforma GIS.

Uno dei fattori che maggiormente influenzano in modo negativo l'impiego dei dati LiDAR e più in generale da remoto è l'attuale sfruttamento (e sovra-sfruttamento) del terreno che

può avere un impatto devastante sulle evidenze di natura archeologica e sulla loro visibilità (HANUS, 2012). Questa è la ragione per cui gran parte delle tracce archeologiche che si individuano da remoto si trovano in aree poco antropizzate a prato/ pascolo/ campo; il LiDAR può rivelarsi uno strumento estremamente utile in questo tipo di contesti.

Sebbene il riconoscimento da remoto delle evidenze sepolte e le campagne di ricognizione a terra si siano nel tempo mostrate estremamente importanti per l'individuazione delle aree archeologiche, e continuano a esserlo, la versatilità dei dati LiDAR può rivelarsi un utile strumento aggiuntivo. Questo è particolarmente vero nel caso delle aree a pascolo soggette ad aratura stagionale, uno dei tipi di ambienti più difficili da indagare perché le arature intaccano in alcuni casi anche profondamente le tracce archeologiche sepolte. Inoltre la presenza di erba piuttosto che di cereali restringe la possibilità di *cropmark* ai soli periodi di estrema siccità (CRUTCHLEY, CROW 2010). Comunque, nel caso siano presenti tracce anche solo residuali di infrastrutture antiche, pur estremamente erose o livellate, il LiDAR è uno strumento eccellente per poterle rintracciare e registrare.

La brughiera² è una tipologia di paesaggio dove il *survey* a terra risulta spesso difficoltoso e, a causa della sua tipica vegetazione, la raccolta dei dati è fortemente limitata a determinati periodi dell'anno. La programmazione della stagionalità di ogni ricognizione LiDAR è estremamente importante. È infatti possibile che, registrando i dati degli ultimi impulsi di ritorno durante l'autunno o l'inverno, siano visibili *features* al di sotto della coltre di arbusti. Durante gli altri periodi dell'anno quest'ultima sarebbe troppo fitta per essere penetrata dal raggio (CRUTCHLEY, CROW 2010).

Il paesaggio arativo attuale è quello che offre un migliore risultato per *survey* sistematici a terra e analisi di fotografie aeree verticali e/ o oblique. Nelle condizioni ottimali, esso può segnalare evidenze di attività passate sotto forma di *cropmark* e *soilmark*. Risulta invece essere il peggior tipo di paesaggio possibile per le ricognizioni LiDAR, perché il continuo passaggio dell'aratro tende a erodere e livellare metodicamente ogni traccia rimasta sul terreno. Anche in questo caso, però, il LiDAR è comunque in grado di rilevare alcune informazioni: infatti, sebbene le evidenze siano state spianate, rimangono comunque delle micromorfologie più o meno evidenti sulla superficie.

² Per brughiera si intende qui un habitat povero di humus, caratterizzato dalla presenza di suoli acidi e vegetazione a crescita bassa. Le brughiere in Italia sono tipiche del settentrione, soprattutto in aree con terreno pianeggiante o di modesta altitudine (alta Pianura padana), nei pressi dei pendii collinari e montuosi vicini alla pianura o in corrispondenza dei corridoi morenici delle Prealpi.

La capacità del LiDAR di analizzare aree piuttosto ampie e contestualmente la possibilità da parte dell'operatore di manipolare i dati al fine di incrementare notevolmente la visibilità dei dislivelli anche più lievi (*feature enhancing*), permette di registrare evidenze impossibili da riconoscere al suolo (CAMPANA, 2009). Invece, sebbene il LiDAR sia in grado di identificare con successo evidenze piuttosto estese come l'assetto agricolo dei campi, risulta meno convincente nella localizzazione di alcune tipologie di *features* discrete, in quanto esiste talvolta una concreta equivocità interpretativa/ percettiva tra le evidenze positive (ovvero emergenti dal suolo, i.e. tumuli/ recinzioni ecc.) e quelle negative (i.e. buche/ fossati ecc.).

La maggior parte dei siti individuati grazie ai *cropmark* non presenta sulla superficie alcuna traccia di espressione morfologica dell'evidenza sepolta, così i dati altimetrici del LiDAR risultano inutili nell'identificazione. Nonostante ciò il dato sull'intensità del segnale LiDAR, come già esposto, può portare diversi benefici nell'identificazione dei *cropmark*.

Le aree chiave in cui il LiDAR offre il suo massimo contributo sono quelle boschive. Mentre negli altri tipi di aree le ricognizioni aeree e quelle a terra hanno fortemente incrementato le nostre conoscenze anche nell'era precedente all'introduzione massiccia del LiDAR in archeologia, le zone boschive sono rimaste al di fuori di questo processo a causa della presenza di una fitta copertura arborea che rendeva impossibile l'individuazione da remoto degli oggetti di natura archeologica "nascosti" al di sotto di essa. Anche le ricognizioni a terra presentavano tutta una serie di problematiche e, prima dell'avvento del LiDAR, si trattava dunque di uno dei territori più difficoltosi su cui lavorare (OSWALD *et alii*, 2008).

L'avvento del LiDAR, con la sua capacità di "eliminare la vegetazione" e di mettere a nudo il suolo sottostante, ha portato grandi benefici. Tuttavia anche questa metodologia si è rivelata non del tutto priva di una serie di problematiche specifiche. Una delle maggiori difficoltà, infatti, risiede nel fatto che il LiDAR registra i dati senza differenziarli³. È quindi molto importante, dove possibile, recuperare fonti di informazioni alternative al LiDAR per agevolare l'interpretazione dei dati e poter operare una validazione incrociata. Questo è tanto più vero quando si considerano le zone boschive, dove è ancora più facile incontrare *features* facilmente confondibili con quelle di natura archeologica, come ad esempio un accumulo lineare di fronde o un addensamento di arbusti di andamento regolare (CRUTCHLEY, CROW 2010). A causa della natura stessa delle foreste, però, gran parte

³ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center, 2012

delle altre fonti non sono disponibili o non forniscono alcun dato utilizzabile. Così è di particolare importanza avere chiaro in mente le tipologie di evidenze ricercate e le loro caratteristiche. Bisogna inoltre considerare che esistono delle limitazioni tecnologiche relative al tipo di foresta in cui si vuole impiegare il LiDAR.

Per ottenere il massimo delle informazioni archeologiche in aree boschive, infatti, la ricognizione LiDAR andrebbe eseguita a una risoluzione maggiore rispetto a quella comunemente impiegata per le zone in campo aperto, onde minimizzare l'impatto del fogliame sul dato ricostruttivo finale (PFEIFER, BRIESE, 2007). Inoltre si consideri che l'inverno è il periodo ideale per avere il massimo della penetrazione da parte del raggio laser, soprattutto nei boschi di caducifoglie. Attualmente gran parte dei dati LiDAR disponibili sono stati registrati durante l'estate e hanno spesso una risoluzione troppo bassa per permettere analisi archeologiche accurate in ambienti boschivi (CRUTCHLEY, CROW 2010).

Essendo la buona riuscita di una ricognizione dipendente dalla capacità del raggio di penetrare la coltre vegetale, aree boschive ripopolate con alta densità di piante giovani e piantagioni di conifere ravvicinate riducono fortemente il potenziale del *survey* e impediscono la sua fruibilità. I migliori risultati, invece, sono ottenuti su foreste di latifoglie mature con poca vegetazione nel sottobosco, ad esempio faggete con piante di mirtillo, dove una ricognizione invernale assicurerebbe un'ottima mappatura del suolo (HANUS, 2012).

In condizioni ottimali la ricognizione può mostrare anche piccole differenze nella morfologia del terreno e rilevare diverse evidenze archeologiche. Tale metodologia risulta particolarmente efficace nella mappatura di evidenze lineari e anche di deboli terrapieni, molti dei quali sono estremamente difficili da vedere dal suolo. Se utilizzata su tipologie vegetative ottimali, si possono individuare anche evidenze archeologiche ed etnoarcheologiche discrete di più piccole dimensioni, come le carbonare. In ogni caso è bene tenere presente che il LiDAR non riesce a rilevare ogni singola tipologia di evidenza archeologica e non funziona in tutti i tipi di ambiente boschivo. Sebbene tale tecnologia funzioni su foreste di conifere mature, nelle quali sono stati individuati terrapieni lineari, cave e buche, su fitte piantagioni di giovani conifere la quantità di raggi che riesce a raggiungere il suolo si riduce sensibilmente. Inoltre, anche se la penetrazione delle fronde risulta agevole, non è detto che ciò valga anche per la vegetazione del sottobosco che – se densa e composta da rovi, felci, ginestre o agrifoglio – impedisce al raggio laser di raggiungere la “vera” superficie del terreno (CROW, 2007).

La conoscenza della vegetazione sulla quale si andrà a effettuare la ricognizione è dunque essenziale sia per la scelta delle aree da mappare, sia per un efficiente impiego delle risorse sia, infine, per un'attendibile interpretazione dei risultati.

Sebbene il LiDAR sia in grado di evidenziare *features* discrete come le carbonare, queste devono essere di almeno qualche metro di diametro. Inoltre non è detto che esso sia in grado di rilevare tutte le evidenze di quelle dimensioni: gli oggetti circolari di diametro inferiore ai 5 metri, infatti, potrebbero non essere riconosciuti a seconda della risoluzione impostata durante la campagna di acquisizione dati. Parte del problema per l'identificazione delle evidenze di piccole dimensioni sta nel fatto che, sebbene il LiDAR le abbia individuate, esse sono visualizzate solo in pochi pixel nell'immagine finale e possono essere confuse con rumore di fondo (CRUTCHLEY, CROW 2010).

Come già accennato, una delle questioni più importanti riguarda il fatto se i dati LiDAR debbano servire per mappare direttamente il territorio o come semplice *background* altimetrico per altre tipologie di immagini. Per ricognizioni in siti specifici può essere il caso di utilizzare immagini derivate dal LiDAR per preparare le basi di un *survey* sul campo. Questo permette di migliorare la pianificazione della ricognizione a terra, combinando fotointerpretazione e *survey*. In alternativa, le immagini derivate dal LiDAR possono fornire un utile *background* topografico sul quale impostare la ricognizione (PARCAK, 2009).

Questa tecnica è poi particolarmente utile per aree con un forte impatto paleoidrografico dove il LiDAR può essere un'eccellente risorsa per ottenere informazioni sulle caratteristiche ambientali antiche che aiutino nell'interpretazione e nella localizzazione di siti.

Bisogna inoltre tenere a mente che esistono altre fonti di informazioni topografiche che forniscono risposte di analogo livello qualitativo rispetto al LiDAR, come ad esempio il RaDAR e la fotogrammetria da fotografie aeree (ma anche attraverso tecniche di *computer vision* come la *Structure from Motion*). Tuttavia il LiDAR, nella maggior parte dei casi, è uno dei migliori supporti (insieme al RaDAR) per una ricognizione da remoto. Trasformare le coordinate numeriche LiDAR in una vera e propria mappa tridimensionale assicura un'analisi complessiva dei dati che permette di documentare le evidenze archeologiche.

La qualità dell'interpretazione e l'accuratezza metrica del LiDAR, insieme alle fotografie aeree e alle altre fonti, permettono di ottenere un alto livello di attendibilità del risultato. In questo modo la ricognizione sul campo può essere utilizzata solo per quelle aree o circostanze in cui il livello di affidabilità dei dati da remoto sia minore, come ad esempio per l'individuazione delle relazioni tra due evidenze distinte, o in aree con fitta vegetazione a

livello del suolo o dove la complessità del palinsesto necessita di una verifica a terra (*ground truth*) (HANUS, 2012).

In ogni caso è sempre bene, soprattutto per aree in campo aperto, esaminare tutte le fotografie aeree disponibili (recenti e storiche) per ottenere il massimo livello di informazioni possibile, in modo da integrare in una seconda fase e solo in caso di stretta necessità i più costosi dati LiDAR. In territori, invece, che presentano zone boschive alternate ad aree aperte, sarebbe consigliabile portare avanti in parallelo analisi di fotografie aeree e dati LiDAR (PARCAK, 2009).

Non esiste una risposta univoca sull'uso e l'interpretazione dei dati LiDAR. La loro efficacia è determinata dal tipo di ricerca che si intende svolgere e dalla strumentazione a disposizione. In alcuni casi potrebbe essere sufficiente avere una copia cartacea di un'elaborazione in *hillshade* da accompagnare a una ricognizione a terra, altre volte potrebbero servire dati LiDAR caricati su un GPS o un tablet. In ogni caso, quando ce ne sia la possibilità, la soluzione migliore è quella di caricare i dati su un hardware che permetta l'analisi e l'elaborazione in tempo reale per poter non solo visualizzare, ma anche manipolare le informazioni al fine di massimizzare il valore dell'interpretazione (CRUTCHLEY, CROW 2010).

L'aspetto che maggiormente determina l'utilità dei dati LiDAR e la loro funzione in campo archeologico è la visualizzazione dei dati stessi. Va specificato che quello che inizialmente può sembrare un'immagine in scala di grigio relativamente poco promettente può assumere tutto un altro aspetto dopo alcune elaborazioni base come l'equalizzazione. Considerando invece la possibilità di accedere ad hardware e software adeguati, il prodotto standard di una ricognizione col LiDAR è un file ASCII grid. Questo tipo di file può essere letto da un qualsiasi software GIS oppure da specifici software per la visione ed elaborazione tridimensionale dei moduli⁴. Senza l'utilizzo di software appositi per la visualizzazione e la modulazione dei dati, la "nuvola di punti" prodotta dal LiDAR risulta infatti fine a sé stessa.

⁴ Con il termine "tridimensionale" si intende una rappresentazione bidimensionale di dati tridimensionali. Una vera e propria visualizzazione tridimensionale dei dati è possibile solo grazie a strumentazioni autostereoscopiche ancora piuttosto costose e poco diffuse.

2.4 **Processamento dei dati**

Il risultato di una ricognizione LiDAR è un file ASCII in cui i punti saranno descritti secondo le coordinate x , y , z . Il LiDAR registra la distanza misurata dal laser, la direzione in cui quella distanza è stata misurata rispetto all'andamento dell'aereo e il tempo (cioè l'ora a cui quel particolare impulso è stato registrato). L'IMU registra l'assetto dell'aereo in ogni istante del volo: quindi fornisce 3 angoli di orientazione rispetto ad un sistema di riferimento ma non dà alcuna informazione sulla posizione. Il GPS registra la posizione dell'aereo durante tutto il volo ma non dà alcuna informazione sul suo assetto. Per ottenere le coordinate x , y , z del terreno si devono combinare i dati ottenuti tramite GPS, IMU e LiDAR.

I file ASCII sono particolari file di testo in cui i numeri inseriti nelle colonne rappresentano il valore delle singole coordinate x , y , z per ciascun punto e l'intensità (HANUS, 2012). I dati così ottenuti vengono definiti *raw* in quanto rappresentano i punti nello spazio esattamente come sono stati registrati dalla macchina. In altre parole i dati *raw* sono una serie di tabelle che riportano la x , la y , la z e l'intensità del segnale per tutti i punti⁵. È di fondamentale importanza poi allineare le griglie dei singoli passaggi della ricognizione per assicurare l'assenza di discontinuità tra le scansioni.

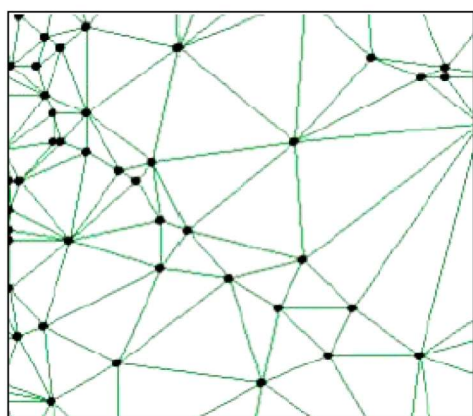
Il primo passaggio chiave dell'elaborazione dei dati è la creazione di un modello digitale del terreno partendo dalla cosiddetta "nuvola di punti", ovvero dall'insieme di tutte le coordinate x , y , z acquisite dal LiDAR. L'elemento fondamentale da tenere in considerazione sulle nuvole di punti è che queste sono composte da singoli punti nello spazio senza nessuna relazione tra loro ma che grazie alla densità permettono di definire degli oggetti (PFEIFER, BRIESE, 2007). In ogni caso anche se le nuvole di punti permettono un certo grado di riconoscibilità delle morfologie non è possibile creare ombre o altre tipologie di elaborazione che permettano di facilitare l'individuazione delle *features* d'interesse. D'altro canto la creazione di un modello 3D a partire dai dati numerici permette di visualizzare le informazioni in maniera più intuitiva e fornisce all'operatore la possibilità di applicare una serie di filtri, di effetti luminosi e di analisi superficiali come *hillshade* e *slope*.

Ci sono due modi per connettere i punti e creare delle superfici. Il primo, detto *Triangulated Irregular Network* (TIN) permette di conservare il valore z originale in tutti nodi formando delle facce triangolari continue e non sovrapposte (HANUS, 2012). È una rete basata sul sistema vettoriale dove i vertici dei triangoli sono punti LiDAR con valori x , y , z .

⁵ *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center, 2012.*

Mantenendo tutti i dati di partenza nella loro posizione originale come nodi, per la creazione della rete non vengono aggiunte o tolte informazioni con l'interpolazione. In questo modo il TIN mantiene inalterata l'accuratezza dei dati di input e forma una rete di triangoli irregolare che è poi la struttura di base sulla quale si andrà a creare la *texture* della superficie vera e propria (CRUTCHLEY, CROW, 2010). Il modello TIN come valore aggiunto permette inoltre di visualizzare i dati come *wire frame model* (visualizzazione della struttura dei triangoli senza la superficie).

La differenza con una superficie raster è che quest'ultima, a differenza del TIN, è archiviata in un formato *grid*. In questo caso ai punti viene sovrapposta una griglia di celle definite e a ogni cella viene assegnato come valore z quello del punto al suo interno. Avendo una disposizione regolare è possibile che alcune celle risultino prive di punti mentre in altre ce ne sia più di uno. Nel primo caso il valore z viene assegnato per interpolazione con i punti adiacenti, nel secondo viene fatta una media del valore z di tutti i punti presenti nella cella (di norma con "pesi" inversamente proporzionali alla distanza dal punto-griglia). La precisione della griglia è inversamente proporzionale alla dimensione della cella, ovvero più piccola sarà la cella e maggiore sarà la risoluzione dell'immagine. Siccome i dati sono interpolati, nella griglia è impossibile individuare oggetti con maggiore precisione rispetto alla dimensione della cella ed è per questo che bisogna prestare particolare attenzione durante la creazione di file raster. Se infatti la cella dovesse risultare di dimensioni maggiori rispetto la risoluzione originale ci sarebbe una perdita di informazioni, mentre in caso contrario si rischierebbe di falsare i dati attraverso un'interpolazione troppo massiccia (CRUTCHLEY, CROW, 2010).



A. Surface represented as a TIN



B. Surface represented as a raster (Grid)

Fig. 2. 4 Confronto tra rappresentazione della superficie in TIN e in raster. Da NOAA, 2012.

I benefici prodotti dal formato raster sono legati al fatto che esso offre maggiori possibilità di manipolazione rispetto al formato TIN; c'è inoltre da considerare che la sua grande diffusione dev'essere stata dettata soprattutto dalla maggiore semplicità di creazione⁶ (Fig. 2.4).

È possibile visualizzare dati LiDAR anche in formati immagine come .tiff e .jpeg, ma il loro utilizzo è limitato e non consente di sfruttare a pieno l'intero potenziale.

Gli elementi più importanti da tenere a mente quando si rielaborano dati LiDAR sono il formato del file, la risoluzione delle acquisizioni e la dimensione dell'area da indagare. Tutti questi fattori, insieme ad altri parametri che saranno esposti di seguito, vanno infatti a influire sulle dimensioni totali (in *kilobyte*) del file e sui tempi di lavoro. È comunque possibile ottenere un singolo file che comprenda tutti i dati anche per aree di diverse decine di chilometri quadrati, ma il peso elevato ne comprometterebbe l'utilizzo a meno di non disporre di server altamente performanti. Indipendentemente dal formato selezionato è quindi consigliabile suddividere i dati in sotto-blocchi di dimensione più limitata (ad es. di due per due chilometri quadrati).

Nelle misurazioni LiDAR ci sono due livelli di **accuratezza**: relativa e assoluta (AUDEECHYA, PORWAL, 2013). Quella relativa dipende direttamente dal sensore: il suo *range* tipico si attesta tra i 100 e i 150 millimetri, ma può essere migliorato fino a 70-80 millimetri. Le differenze relative rispetto a quelle assolute sono molto importanti per l'analisi archeologica in quanto permettono di individuare oggetti di interesse come fossati o riporti.

L'accuratezza assoluta viene fornita dal sistema GPS e da quello IMU che registrano la posizione precisa del sensore in un sistema geodetico o *datum*. Il sistema standard in cui i dati sono registrati è il WGS84; è comunque possibile trasformare tali coordinate in quelle di un altro sistema, anche se è da tenere in considerazione la possibilità di incorrere in potenziali distorsioni. Le differenze assolute e le distorsioni possono causare difficoltà nell'interpretazione e nella mappatura tra set di dati LiDAR adiacenti, oppure creare problemi in caso di verifica a terra tramite l'utilizzo di dispositivi con un livello di accuratezza superiore (ad esempio il GPS differenziale).

Oltre all'accuratezza, un altro parametro da tenere presente nelle misurazioni LiDAR come in tutte le altre tecniche di *remote sensing* è la **risoluzione**. Questo parametro, però, agisce sul LiDAR in maniera più complessa in quanto influisce su diversi stadi del processo. La risoluzione che viene utilizzata per visualizzare un dato raster è molto importante perché

⁶ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center, 2012

determina la dimensione degli oggetti che è possibile vedere (un po' come avviene per le fotografie aeree o da satellite); per quelli di natura strettamente archeologica il minimo standard corrente è un metro di risoluzione (CRUTCHLEY, CROW 2010).

La risoluzione originale del dato viene definita dal numero di punti per metro quadro e dal diametro del raggio laser quando colpisce la superficie (PFEIFER, BRIESE, 2007). Essendo il numero di punti per metro quadro una media, è possibile che, in una ricognizione descritta come “un punto per metro quadro”, la risoluzione vari all'interno dell'area misurata: si avranno quindi zone con densità di punti maggiore di un punto per metro quadro e zone in cui sarà inferiore. Pianificando adeguatamente la ricognizione aerea è possibile minimizzare i successivi problemi legati alla risoluzione. Per ricavare dati più attendibili in aree boschive è possibile effettuare una ricognizione a due punti al metro (0,5 m) e interpolare il dato fino a ottenere quattro punti per metro. Per avere maggiori possibilità di colpire il suolo al di sotto delle fronde si può allargare il diametro del raggio laser, mentre sovrapponendo le strisce di scansione del 65% si assicura una buona copertura e un discreto margine di *cross-validation*⁷. È anche possibile ottenere più punti aumentando i passaggi dell'aereo, ma questo andrebbe ovviamente a influire in modo pesante sui costi della campagna.

2.5 Elaborazione dei dati

In anni recenti, sono state sviluppate oppure mutate da altre discipline e successivamente adattate un sempre maggior numero di tecniche di visualizzazione dei modelli digitali di elevazione, per cercare di evidenziare al meglio le differenti *features* archeologiche (CHALLIS *et alii*, 2011). Di seguito verranno proposte alcune delle più comuni visualizzazioni applicabili ai modelli digitali di elevazione. Oltre a queste verranno, inoltre, presentate nel dettaglio anche elaborazioni meno diffuse, ma specificatamente utilizzate nei casi di studio esposti di seguito.

Hillshade

L'elaborazione LiDAR più conosciuta e di più facile interpretazione è l'immagine in **hillshade** (IMHOF, 1982) (Fig. 2.5). L'algoritmo calcola l'ombreggiatura per ogni cella della griglia basando i valori di illuminazione su un'ipotetica fonte luminosa (CHALLIS *et alii*, 2011). Uno dei benefici maggiori di questo trattamento è la possibilità di illuminare

⁷ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center, 2012

artificialmente l'immagine da ogni possibile angolazione, anche quelle impossibili in natura. Questa opzione, insieme alla possibilità di modificare l'altezza della fonte luminosa, permette all'operatore di visualizzare anche *features* che siano solo debolmente evidenti sul terreno. Tuttavia la possibilità di vedere le evidenze da una moltitudine di angoli diversi, anche variando la posizione dell'illuminazione, può causare anche una serie di problemi. Infatti è possibile, come accade sulle fotografie aeree, che quando un'evidenza sul terreno sia parallela alla direzione della luce non produca un'ombra, risultando così impossibile da localizzare (HANUS, 2012). Per ovviare a questo problema si possono creare diverse immagini con diversa incidenza della luce. Questo approccio può causare in alcune situazioni diversi disagi soprattutto nel caso si debbano avere copie fisiche delle immagini rielaborate oppure nel caso siano prese in esame aree piuttosto ampie. Il problema può essere risolto, quantomeno in parte, creando immagini composite grazie alle opzioni di trasparenza presenti su diversi software di elaborazione di immagini e di GIS (CRUTCHLEY, CROW, 2010) oppure utilizzando un algoritmo di "*hillshading from multiple directions*". Quest'ultimo trattamento permette di mappare su un'unica immagine differenti *hillshade* con angolazioni diverse. In questo modo è possibile visualizzare contemporaneamente tutte le evidenze presenti sull'immagine. L'utilizzo di questa tecnica può però causare problemi di correlazione e di visualizzazione della stessa evidenza più volte (KOKALJ *et alii*, 2013).

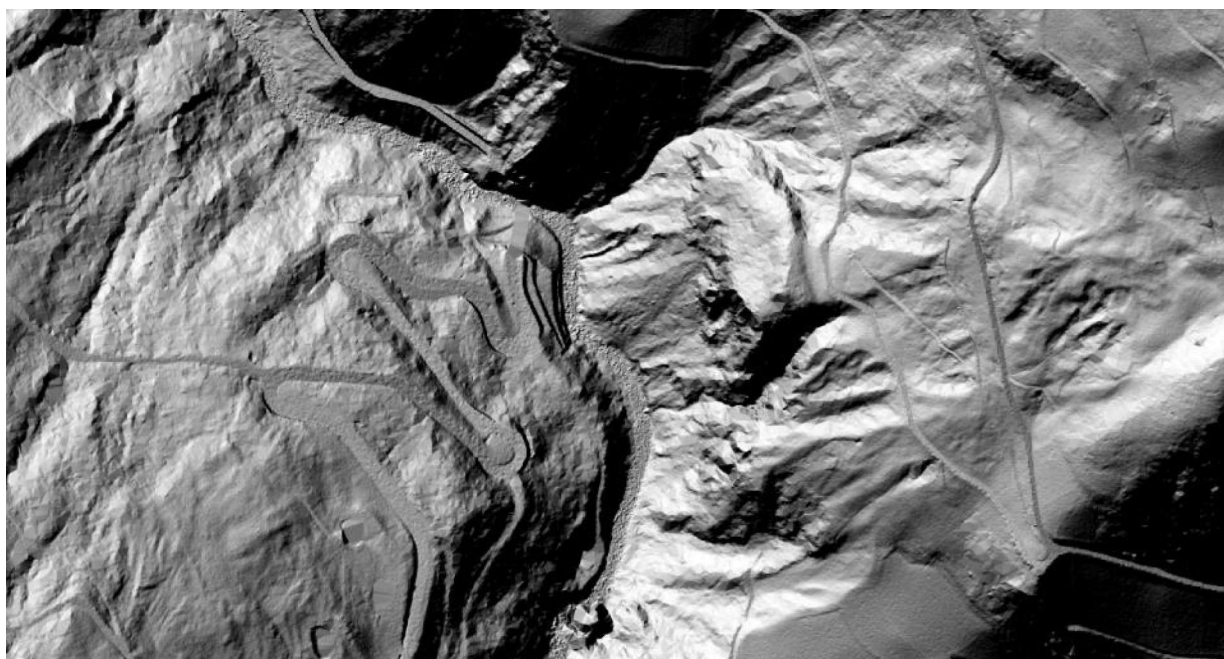


Fig. 2. 5 Esempio di trattamento in hillshade, sito di Sotciastel (BZ).

PCA (*Principal Component Analysis*)

I problemi di correlazione delle evidenze che affliggono l'utilizzo di molteplici *hillshade* possono essere superati utilizzando un metodo di statistica multivariata chiamato ***Principal Component Analysis* (PCA)**. Questo metodo viene ampiamente sfruttato in svariate discipline per semplificare gruppi di dati complessi. Avendo un set di variabili inter-correlate è possibile trasformarle in un nuovo set di variabili non correlate. Il nuovo set di variabili, dette componenti, avrà condensato nelle prime componenti estratte gran parte delle variazioni presenti nel *dataset* originale. Grazie a questo metodo è possibile sostituire un intero set di dati con un numero limitato di componenti.

Applicando quindi la *principal component analysis* a sedici differenti *hillshade* presi a intervalli angolari regolari tra 0 e 360 gradi è possibile ottenere nelle prime tre componenti la somma di buona parte delle informazioni contenute nei dati di partenza (circa il 95%). Questo permette quindi di creare un'unica immagine composita in falsi colori, con le prime tre componenti mappate sulle bande del rosso/ verde/ blu, per visualizzare contemporaneamente i dati provenienti da tutte le direzioni degli *hillshade* originali, massimizzando la percettibilità delle evidenze archeologiche (Fig. 2.6).

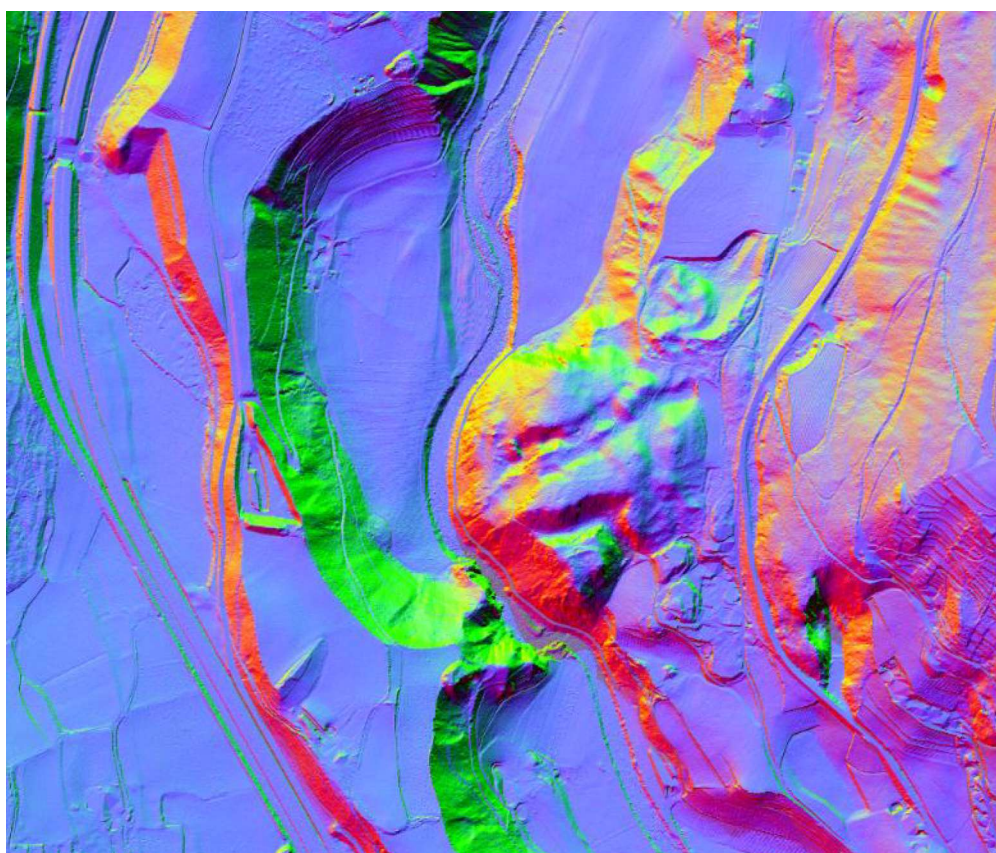


Fig. 2. 6 Esempio di *Principal Component Analysis* (PCA), sito di Nössing (BZ).

Ci sono però alcune problematiche legate a questo approccio: essendo la PCA una trasformazione matematica delle immagini originali è possibile che i dettagli specifici necessari per l'interpretazione archeologica possano essere mappati in alcuni casi sulle componenti secondarie (DEVERAUX *et alii*, 2008); in secondo luogo, sebbene un'immagine in *hillshade* sia di piuttosto semplice interpretazione, una PCA, con le diverse variazioni cromatiche e con ombre contrastanti, può essere ancora più complessa da interpretare soprattutto nella distinzione tra *features* positive e negative (CRUTCHLEY, CROW 2010). Tuttavia, alterando le diverse componenti sulle differenti bande spettrali, testando la tecnica su scene diversificate e confrontando i risultati con altre tecniche di visualizzazioni è possibile compensare questa tipologia di problematica.

Slope e Aspect

L'analisi ***slope*** permette di evidenziare il grado di pendenza di un modello digitale di elevazione. Il gradiente di pendenza viene calcolato come il massimo valore di cambiamento di elevazione tra ogni cella della griglia del modello e quelle adiacenti. Lo *slope* viene visualizzato come un'immagine in scala di grigi e i valori possono essere espressi o in gradi o in percentuale (CHALLIS *et alii*, 2011) (Fig. 2.7).

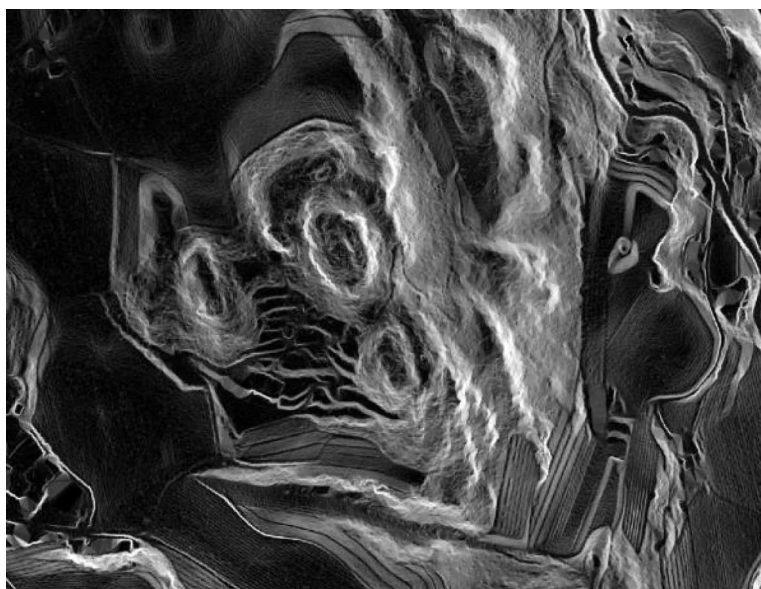


Fig. 2. 7 Esempio di *slope analysis*, sito di Kobaltbühel, Lana (BZ).

L'***aspect*** identifica la direzione della pendenza, calcolata basandosi sul tasso massimo di variazione del valore per ogni cella della griglia rispetto a quelle adiacenti. Il risultato di questa elaborazione è un raster in cui a ogni differente colore corrisponde una diversa direzione della pendenza calcolata ogni 45 gradi a partire dal nord e proseguendo poi in

senso orario fino a coprire tutti i 360 gradi (Fig. 2.8). Alle aree piatte che non hanno una direzione di pendenza viene assegnato un valore di -1 (BURROUGH, MCDONELL, 1998).

In generale i modelli *slope* e *aspect* sono tra i più semplici per generare mappe che forniscano una buona accuratezza a livello di localizzazione e di pendenza, ma non sono equiparabili ad altri modelli per l'identificazione di nuove evidenze. Sono perciò da considerare come un'ottima fonte di informazioni complementari associate ad altri tipi di trattamenti più performanti per il riconoscimento delle *features* (BENNETT *et alii*, 2012).

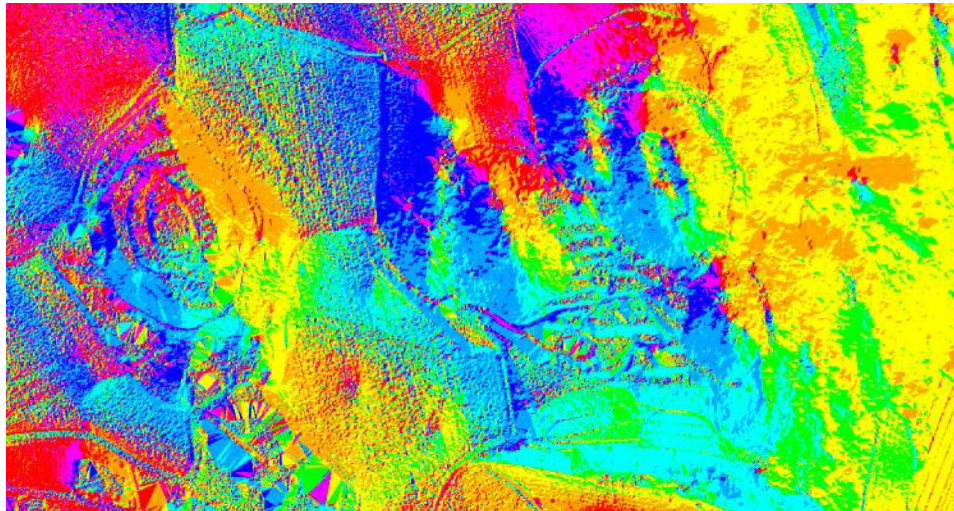


Fig. 2. 8 Esempio di *aspect*, sito di Kobaltbühel, Lana (BZ).

Local Relief Model

Il ***Local Relief Model (LRM)*** è un trattamento dei modelli digitali di elevazione che permette di visualizzare le differenze di elevazione locale su piccola scala dopo aver rimosso le morfologie del paesaggio su larga scala. Questo modello permette di aumentare considerevolmente la visibilità delle micromorfologie superficiali indipendentemente dall'angolo di illuminazione.

Questo modello parte dal presupposto che le strutture archeologiche sono generalmente caratterizzate da una leggera discontinuità morfologica di carattere positivo o negativo (a seconda del tipo di evidenza) rispetto all'andamento del terreno circostante. Le *features* di natura archeologica risultano perciò spesso appena accennate nelle visualizzazioni in *hillshade* e sono dunque poco visibili. Grazie all'applicazione del *Local Relief Model* è possibile superare in buona parte il problema della morfologia del paesaggio su larga scala, andando a estrarre le piccole elevazioni su scala locale tipiche del paesaggio archeologico (HESSE, 2010).

Verranno quindi di seguito elencati i passaggi per ottenere un LRM (HESSE, 2010) (Fig. 2.9):

- Si applica al DEM di partenza un filtro *low pass* che permette di smussare le elevazioni del modello creando una prima approssimazione del paesaggio su larga scala. Si possono in questa fase selezionare diverse tipologie di *low pass filter* che determinano la forma dell'area intorno alla cella di partenza sulla cui base si effettuerà il calcolo. È possibile modificare anche le dimensioni del *kernel*⁸ del filtro che andrà a influenzare la scala delle *features* evidenziate dal LRM.
- Si sottrae il modello smussato al DEM originale creando una prima approssimazione di *local relief model* detta *raw LRM* (NOVAK, 2014). In questo modello vengono conservate solo le micromorfologie topografiche e i microrilievi smussati dal filtro, mentre la morfologia del terreno su vasta scala viene eliminata. Questo primo modello, però, è influenzato pesantemente dal *low pass filter* applicato che tende a sovrastimare le caratteristiche micromorfologiche del terreno.
- Da quest'ultima elaborazione si estraggono le *zero-meter contour lines* ossia i contorni delle aree con elevazione pari a zero che equivalgono alle linee di discontinuità tra le anomalie positive e quelle negative.
- Lungo queste linee si estraggono dal DEM originale i valori di elevazione. Come risultato si ottengono quindi una serie di valori di elevazione che non coincidono con la micromorfologia del terreno presente sul *raw LRM*.
- Si crea quindi un nuovo DEM per interpolazione ricavato dai punti di elevazione estratti precedentemente. Questo modello digitale rappresenta esclusivamente la morfologia del paesaggio su vasta scala privato dei microrilievi e della micromorfologia presente nel *raw LRM*.
- Sottraendo infine quest'ultimo DEM creato da quello originale si ottiene un LRM privo di errori legati all'applicazione del *low pass filter* (in quanto in quest'ultimo modello non viene applicato).

⁸ Nell'elaborazione digitale delle immagini il *kernel* è una matrice di dimensioni variabili utilizzata per diverse tipologie di filtraggio delle immagini.

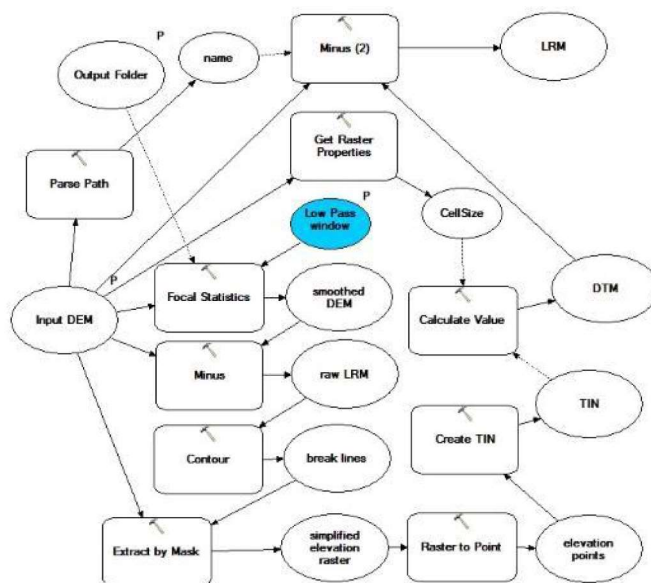


Fig. 2. 9 Schema di LRM realizzato in ArcGIS 9.2. Da NOVAK, 2014.

A modello ultimato è possibile identificare come evidenze positive o negative le convessità e le concavità naturali presenti sul terreno (HESSE, 2010); per una lettura più semplice è possibile applicare al modello una *palette* cromatica limitata a tre colori (Fig. 2.10).

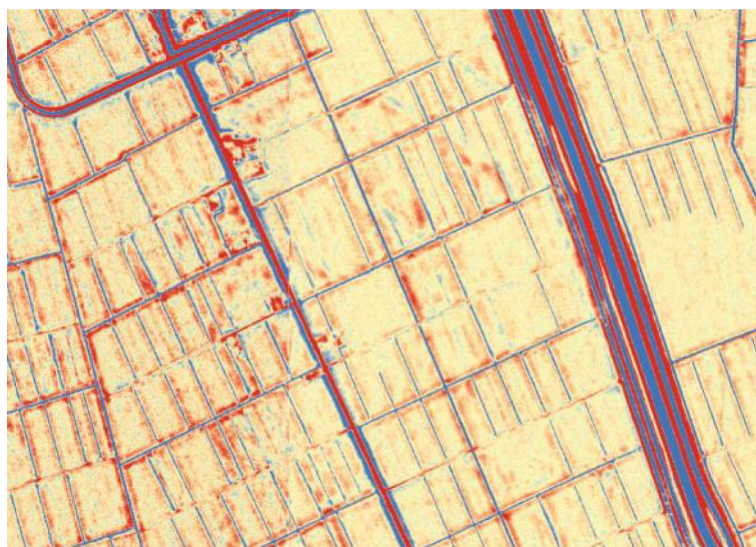


Fig. 2. 10 Esempio di *local relief model*, sito di Fondo Paviani, Legnago (VR).

Solar Radiation

A scala territoriale, la topografia è il maggior fattore che va a condizionare la distribuzione dell'irradiazione solare. L'altitudine, l'orientamento della superficie e i rilievi circostanti, infatti, possono influenzare pesantemente a livello locale il quantitativo di radiazione incidente (FU, RICH, 2000).

I modelli che calcolano l'irradiazione solare possono essere categorizzati in due classi. La prima tipologia, definita come *point-specific model*, calcola la quantità di insolazione per una singola località e tiene in considerazione la geometria dell'orientamento della superficie, il cielo visibile e la topografia locale. Questi modelli possono essere molto precisi per le aree interessate, ma sono difficilmente utilizzabili su larga scala. Al contrario i modelli basati sull'area forniscono l'irradiazione solare per un'intera area geografica, calcolando l'orientamento della superficie e gli effetti delle ombre attraverso i modelli digitali di elevazione.

Nel dettaglio, l'analisi **Solar Radiation** genera una visualizzazione emisferica verso l'alto (*viewshed*) per ogni punto del DEM. Questa visualizzazione emisferica viene utilizzata successivamente per calcolare il grado di insolazione di ogni punto del modello digitale per ogni periodo di tempo (Fig. 2.12). Questo calcolo viene inoltre integrato con le coordinate e l'altitudine dei singoli punti del DEM, l'orientamento della superficie, le ombre causate dai rilievi topografici circostanti, lo spostamento giornaliero e stagionale dell'angolo del sole e le attenuazioni atmosferiche.

L'irradiazione si origina dal sole: la topografia e altre evidenze di superficie modificano la quantità di raggi luminosi che raggiungono il suolo, anche a seconda della direzione di provenienza della luce nelle varie ore della giornata.

L'irradiazione solare può essere suddiviso in diretto, diffuso e riflesso. Generalmente l'irradiazione diretto è la componente principale dell'irradiazione totale, quello diffuso è la seconda componente, mentre quello riflesso – essendo una porzione molto piccola del totale – secondo molti studi può non essere considerato.

Poiché prende in considerazione un numero piuttosto esteso di parametri, la *solar radiation* si presenta come un'analisi piuttosto complessa. Si cercherà perciò di riassumere per punti i principali passaggi per il calcolo del modello:

- Si calcola la *viewshed* emisferica per ogni cella del modello digitale. Una *viewshed* è la distribuzione angolare dell'ostruzione celeste. È molto simile alla visualizzazione di una fotografia scattata verso l'alto con un obiettivo emisferico o *fish-eye*. La *viewshed* viene calcolata per ogni punto del modello digitale determinando il massimo angolo di ostruzione celeste, detto anche angolo dell'orizzonte, lungo un set di specifiche direzioni (DOZIER, FREW, 1990) (Fig. 2.11 A). Per le direzioni non indagate direttamente, l'angolo dell'orizzonte viene calcolato per interpolazione. Successivamente gli angoli dell'orizzonte vengono convertiti in un sistema di

coordinate emisferico che rappresenta in una griglia bidimensionale tutte le direzioni dell'emisfero tridimensionale. A ogni cella della griglia viene assegnato un valore che corrisponde al rapporto tra le direzioni del cielo visibile e quelle oscurate (Fig. 2.11 B). La posizione delle celle della griglia, espressa in righe e colonne, è definita sull'emisfero da un angolo zentiale riferito allo zenit e da un angolo azimutale rispetto al nord.

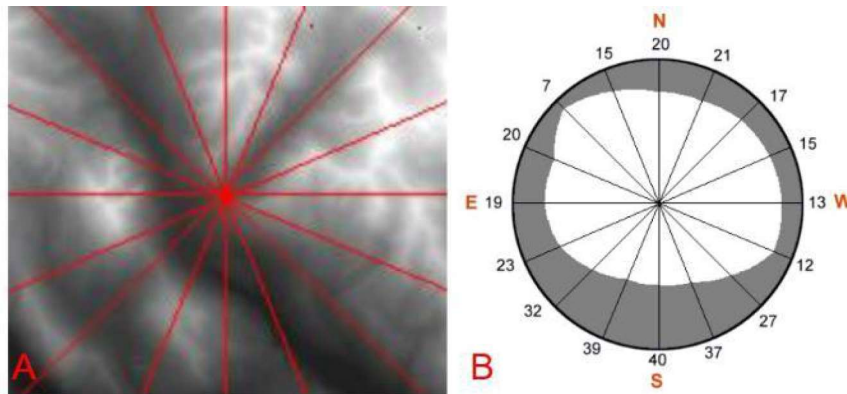


Fig. 2. 11 Calcolo della *viewshed* emisferica: A) gli angoli dell'orizzonte sono calcolati lungo uno specifico set di direzioni; B) schema del risultato di una *viewshed* per uno specifico punto: sono indicate le direzioni di cielo con visibilità maggiore rispetto a quelle oscurate. I numeri rappresentano i valori degli angoli dell'orizzonte. Da FU, RICH, 1999.

- Calcolo della mappa solare o *sunmap*. Il quantitativo di radiazione solare diretta originata da ogni direzione del cielo è rappresentata grazie alla creazione di una mappa solare nella stessa proiezione emisferica della *viewshed*. La mappa celeste descrive il movimento della terra rispetto al sole e la variazione nel tempo della sua posizione apparente. Nel dettaglio, il movimento del sole viene rappresentato da settori del cielo discreti, definiti dalla posizione apparente del sole a intervalli regolari di mezz'ora all'interno della giornata e mensili all'interno delle stagioni. La posizione del sole (angoli di zenit e azimut) viene calcolata basandosi su latitudine, giorno dell'anno e ora del giorno, usando formule astronomiche standard (la versione modificata da GATES nel 1980). Anche in questo caso gli angoli di zenit e azimut vengono proiettati in una griglia bidimensionale con la stessa risoluzione utilizzata per la *viewshed*. Vengono create due mappe solari, una per il periodo che intercorre tra il 22 dicembre e il 22 giugno e una secondo dal 22 giugno al 22 dicembre. A ogni settore del cielo della mappa solare viene assegnato un numero identificativo univoco. Per ogni settore vengono calcolati la durata temporale e gli angoli di zenit e azimut in relazione al suo baricentro.

- Calcolo della mappa celeste o *skymap*. Al contrario della radiazione diretta che si origina esclusivamente lungo il movimento apparente del sole, la radiazione solare diffusa si può originare da ogni direzione del cielo. La mappa celeste è costruita dividendo l'intero cielo in diversi settori definiti da divisioni secondo gli angoli di zenit e azimut. A ogni settore, come già avveniva per la mappa solare, viene assegnato un numero identificativo univoco. Viene infine calcolato l'angolo di zenit e di azimut del baricentro di ogni settore.
- Le tre mappe create (*skymap*, *sunmap* e *viewshed*) vengono infine sovrapposte. La porzione di cielo non oscurato per ogni settore della mappa celeste o della mappa solare, viene calcolato dividendo il numero delle celle non oscurate con il numero totale delle celle in quello specifico settore.
- Calcolo dell'irraggiamento solare diretto. Per ogni settore della mappa solare che non è completamente oscurato si calcola l'irraggiamento solare tenendo in considerazione la *gap fraction*⁹, la posizione del sole, l'attenuazione atmosferica e l'orientamento della superficie. Un semplice modello di trasmissione, che comincia con la costante solare e stima gli effetti atmosferici sulla base della trasmissività e sullo spessore della massa d'aria, è implementato usando la seguente equazione.

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,\alpha}$$

L'irraggiamento solare diretto totale (Dir_{tot}) relativo a una superficie posta a livello del suolo è equivalente alla somma dell'irraggiamento solare ($Dir_{\theta,\alpha}$) di ogni settore della mappa solare. L'irraggiamento solare diretto per ogni settore della mappa solare con baricentro nell'angolo di zenit θ e nell'angolo di azimut α viene calcolato usando la seguente equazione.

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{const} * \tau^{m(\theta)} * SunDur_{\theta,\alpha} * SunGap_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha})$$

Dove:

⁹ Il calcolo della *gap fraction* permette di stimare la struttura, il quantitativo e l'orientamento della copertura arborea. La *gap fraction* è la porzione di visuale non coperta dal fogliame che è possibile vedere guardando dal basso verso una specifica direzione.

S_{Const} è il flusso solare al di fuori dell'atmosfera alla media della distanza tra terra e sole, detta costante solare;

τ è la trasmissività dell'atmosfera (nella direzione dello zenit);

$m(\theta)$ è la lunghezza del cammino ottico relativo (ovvero misurato relativamente alla lunghezza del cammino allo zenit). Viene determinata dall'angolo di zenit solare e dall'elevazione sul livello del mare;

$SunDur_{\theta,\alpha}$ corrisponde al tempo rappresentato dai settori del cielo. Per quasi tutti i settori equivale all'intervallo giornaliero moltiplicato per l'intervallo orario. Per i settori vicini all'orizzonte la durata è calcolata usando la geometria sferica;

$SunGap_{\theta,\alpha}$ è la *gap fraction* per ogni settore della mappa solare;

$AngIn_{\theta,\alpha}$ è l'angolo di incidenza tra il baricentro del settore celeste e l'asse normale della superficie. L'effetto dell'orientamento della superficie viene tenuto in considerazione moltiplicando il coseno dell'angolo di incidenza.

- Calcolo dell'irradiazione solare diffuso. Per la radiazione diffusa generalmente vengono implementati il modello diffuso uniforme (*uniform diffuse model*) e il modello diffuso coperto standard (*standard overcast diffuse model*). In un modello diffuso uniforme la radiazione diffusa in arrivo è costante per tutte le direzioni celesti, mentre nel modello diffuso coperto standard, il flusso di radiazione diffusa varia a seconda dell'angolo di zenit. Entrambi questi modelli sono implementati nella *solar radiation analysis*. Per ogni settore del cielo la radiazione diffusa al suo baricentro è calcolata, integrati gli intervalli di tempo, e corretta dalla *gap fraction* e dall'angolo di incidenza, usando la seguente funzione.

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyGap_{\theta,\alpha} * Weight_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha})$$

Dove:

R_{glb} è la radiazione globale normale;

P_{dif} è la proporzione del flusso di radiazione globale normale che viene diffuso. Generalmente i valori si attestano intorno a 0,2 per il cielo sereno e oscillano tra 0,6 e 0,7 in presenza di cielo molto nuvoloso;

Dur è l'intervallo di tempo per le analisi;

$SkyGap_{\theta,\alpha}$ è la *gap fraction* per ogni settore celeste;

$Weight_{\theta,\alpha}$ è proporzionale alla radiazione diffusa originatasi in uno specifico settore celeste in relazione a tutti i settori;

$Angln_{\theta,\alpha}$ è l'angolo di incidenza tra il baricentro del settore celeste e la superficie intercettata.

La radiazione solare diffusa totale (Dif_{tot}) viene calcolata attraverso la somma delle radiazioni solari diffuse ($Dif_{\theta,\alpha}$) di ogni settore della mappa celeste:

$$Dif_{tot} = \sum Dif_{\theta,\alpha}$$

- Calcolo dell'irradiamento solare globale. L'irradiamento globale ($Global_{tot}$) viene calcolato sommando l'irradiamento diretto e diffuso di tutti i settori. Questo procedimento viene ripetuto per tutte le aree sulla superficie topografica così da produrre una mappa di irradiamento solare per l'intera area di studio.

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot}$$

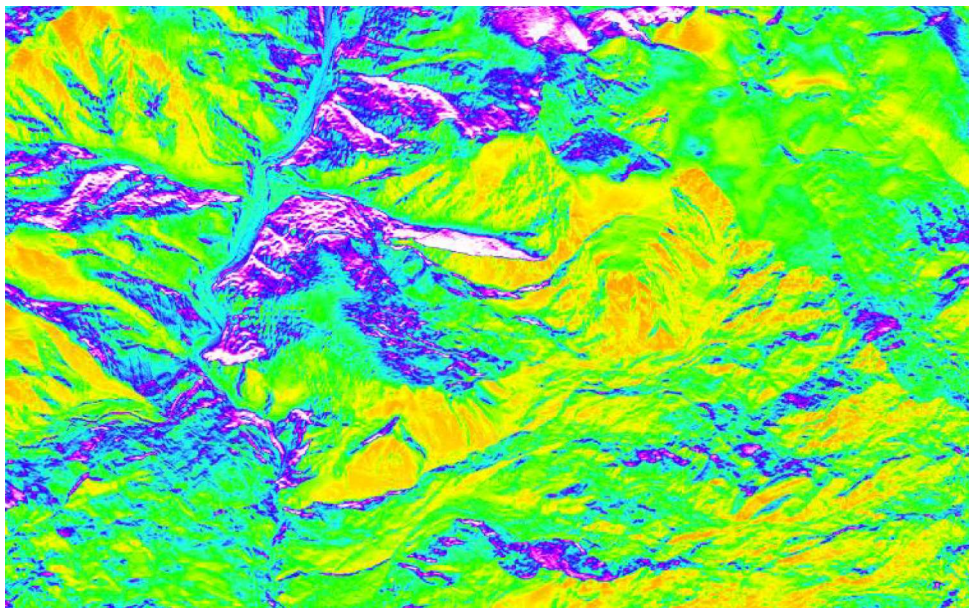


Fig. 2. 12 Esempio di solar radiation analysis, sito di Sotciastel (BZ).

Openness

L'**openness** è stata definita dai suoi ideatori come un nuovo metodo per determinare “il grado di dominio e di chiusura di un luogo su una superficie irregolare” (YOKOYAMA *et alii*, 2002).

Questo trattamento permette di determinare il valore di *openness* lungo il profilo di almeno otto direzioni per ogni punto del modello digitale con una distanza radiale definita. Partendo dai singoli punti del DEM vengono calcolate le ampiezze massime possibili dell'angolo di zenit (*openness* positiva) (Fig. 2.13) e di nadir (*openness* negativa) (Fig. 2.14) lungo tutti i profili. Il valore medio dell'ampiezza massima di tutti gli angoli di zenit equivale all'*openness* positiva, mentre la media dell'ampiezza massima degli angoli di nadir definiscono l'*openness* negativa. I valori derivati possono variare a livello teorico in un *range* compreso tra 1 grado e 179 gradi; le superfici piatte avranno un valore di *openness* di 90 gradi (DONEUS, 2013).

La decisione della lunghezza della distanza del raggio influenza la dimensione del kernel per il calcolo dell'*openness* su ogni cella della griglia e di conseguenza anche le dimensioni delle *features* evidenziate. Un raggio di piccole dimensioni permetterà di visualizzare variazioni locali e micromorfologiche, un raggio più lungo al contrario andrà a evidenziare caratteristiche topografiche su più ampia scala (DONEUS, 2013).

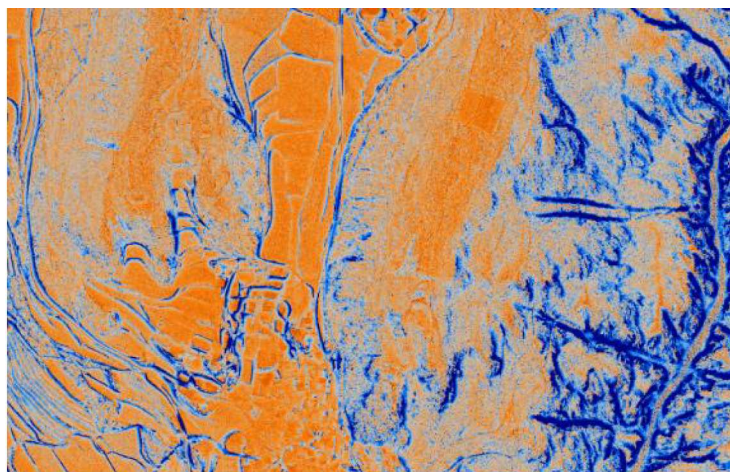


Fig. 2. 13 Esempio di *openness* positiva, area archeologica di Elvas (BZ).

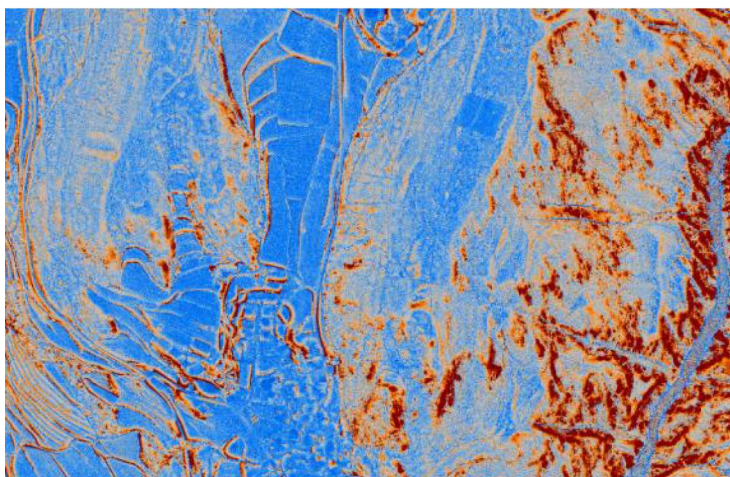


Fig. 2. 14 Esempio di *openness* negativa, area archeologica di Elvas (BZ).

Local Dominance e Cumulative Visibility

La **Local Dominance** si basa sulla determinazione della dominanza locale di ogni punto del modello. La luminosità di ogni pixel corrisponde al dominio che può avere un ipotetico osservatore posizionato in ogni punto del modello digitale, dove per dominio si intende l'ampiezza dell'angolo di visione che l'osservatore posizionato sul terreno riesce a vedere all'interno di una data area (Fig. 2.15). Sul modello, le zone sopraelevate risulteranno più chiare rispetto alle zone ribassate o pianeggianti.

I parametri regolabili da prendere in considerazione nel calcolo sono il raggio minimo e massimo (poiché si ottengono la riduzione del rumore e una migliore rappresentazione delle strutture diffuse aumentando il raggio minimo), l'incremento di distanza (aumentando il valore si riduce il tempo di calcolo), la risoluzione angolare e l'altezza dell'osservatore virtuale sulla superficie terrestre. La risoluzione angolare specifica in questo caso la spaziatura angolare delle linee radiali lungo cui viene eseguito il calcolo (HESSE, 2013).

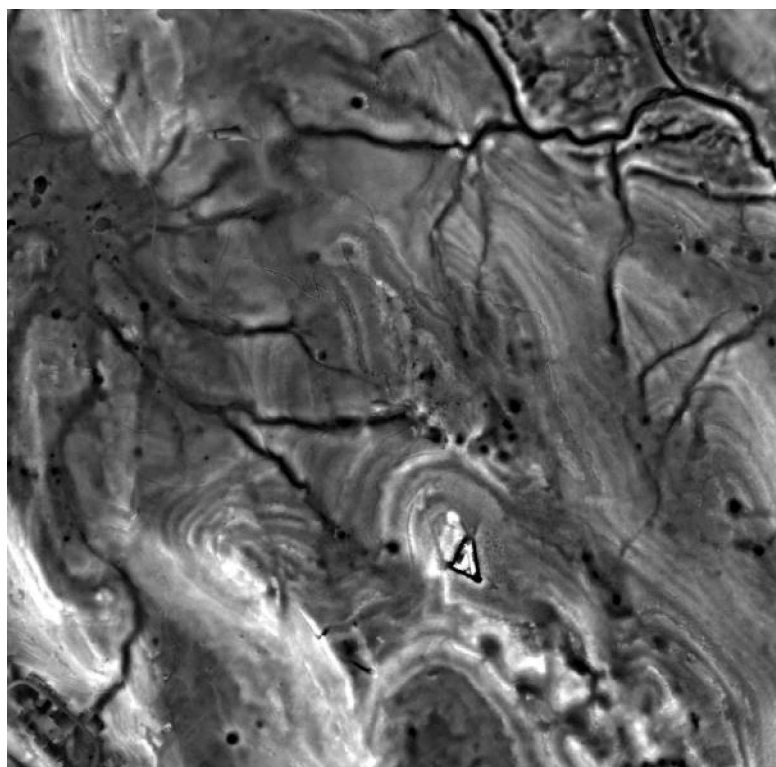


Fig. 2. 15 Esempio di *local dominance analysis*, area di Millegrobbe (TN).

La **Cumulative Visibility** permette di calcolare una mappa di visibilità cumulativa. Viene calcolata la visibilità per ogni punto del modello digitale all'interno di un'area determinata da un valore minimo e massimo di raggio, selezionato dall'utente. Per il calcolo della visibilità vengono tenuti in considerazione l'altezza di un osservatore virtuale e l'altezza del bersaglio.

I valori dei pixel risultanti restituiscono la percentuale dell'area osservabile da un osservatore di altezza nota intorno a bersaglio ad una determinata quota dal suolo in un determinato intervallo di distanza (HESSE, 2013) (Fig. 2.16).

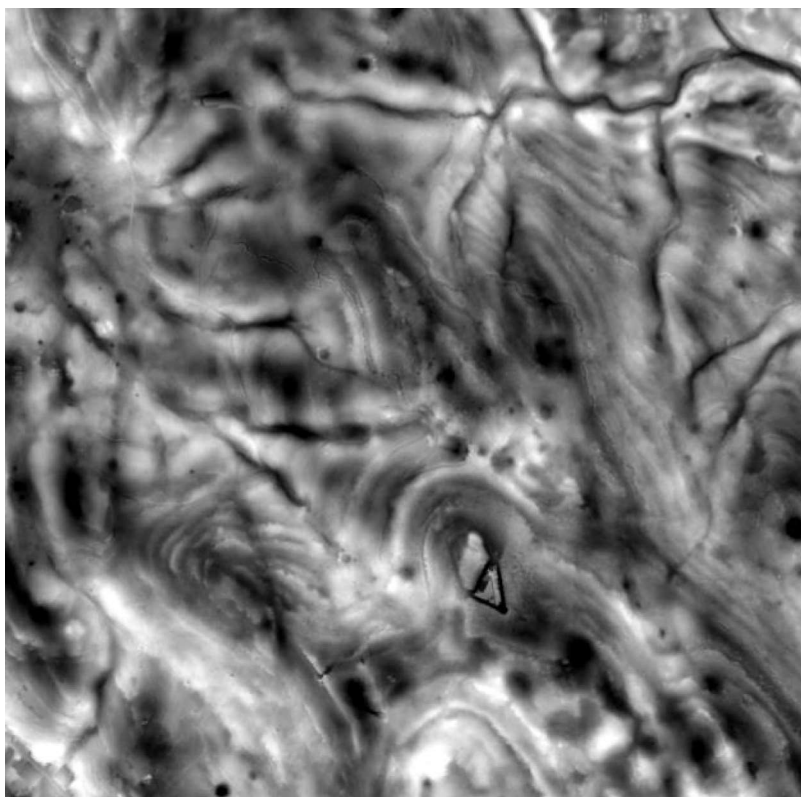


Fig. 2. 16 Esempio di *cumulative visibility*, area di Millegrobbe (TN).

Sky-View Factor

L'abilità dei sensori LiDAR di registrare dati in 3D ad alta risoluzione permette di calcolare lo ***Sky-View Factor*** (SVF) da modelli digitali del terreno. Lo *sky-view factor* si basa sulla modellazione dell'illuminazione diffusa e, più nello specifico, si considera un'illuminazione che provenga in modo omogeneo da tutte le direzioni dall'alto. Esso modella, cioè, l'illuminazione per ogni punto del DEM come un emisfero uniformemente illuminato al di sopra del singolo punto (HESSE, 2013) (Fig. 2.17). Lo *sky-view factor* è la misurazione della porzione di cielo visibile da uno specifico punto sulla superficie e fornisce un parametro non dimensionale compreso tra 0 (visuale oscurata) e 1 (visuale completamente libera) (KIDD, CHAPMAN, 2012) (Fig. 2.18).

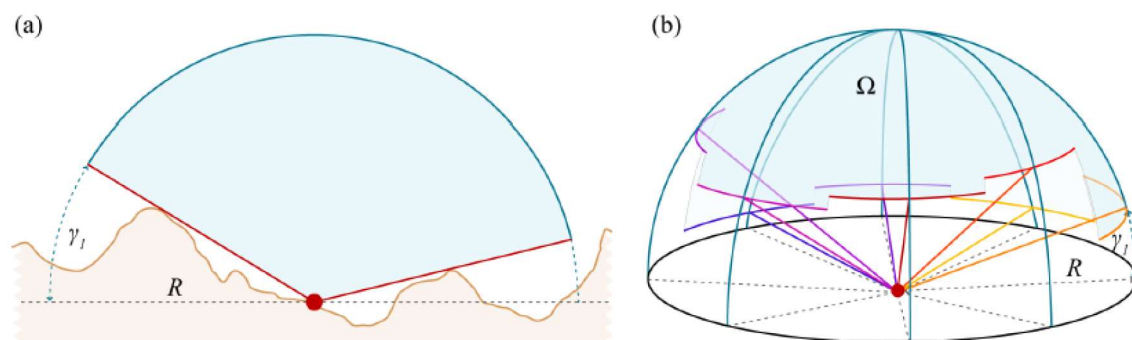


Fig. 2. 17 Rappresentazione principio di funzionamento dell'algoritmo *sky-view factor*. Da ZAKSEK *et alii*, 2011.

Il calcolo avviene prendendo in considerazione tutti gli oggetti fisici che vanno a influenzare la visibilità dell'emisfero celeste, in primo luogo sui 180° dell'angolo piano e in seconda battuta sui 360° dell'angolo solido. Ad eccezione di evidenze molto profonde o molto strette, la porzione di cielo occlusa dalla topografia sovrastante risulta molto scarsa, così gran parte dei pixel avrà uno *sky-view factor* compreso tra 0,7 e 1. Oltre a informazioni di natura topografica, lo *sky-view factor* fornisce una stima sulla radiazione solare diffusa: aree con un alto indice di *sky-view factor* riceveranno molta più radiazione solare diffusa con il cielo sereno rispetto ad aree dove è possibile vedere solo una piccola porzione di cielo (ZAKSEK *et alii*, 2011).

I parametri che influenzano maggiormente lo *sky-view factor* sono il numero delle direzioni da considerare e la dimensione massima del raggio in cui calcolare l'elaborazione. Oltre a questi fattori, sono da tenere in considerazione anche la risoluzione del modello digitale di partenza ed eventuali elaborazioni di immagini del tipo *vertical exaggeration* e *histogram stretch*. L'utilizzo, infatti, di queste due tecniche di pre-processamento dei dati porta notevoli benefici nell'individuazione di evidenze topografiche poco profonde normalmente non visibili su *sky-view factor* "normali", ma incrementa notevolmente il rumore di fondo (HESSE, 2013).

Dal punto di vista archeologico questo tipo di elaborazione consente di individuare tutta una serie di evidenze topografiche depresse piuttosto strette o profonde come pozzi minerari, doline, buche di bomba *et similia*, ma anche resti di strutture in alzato, soprattutto riferibili a vani chiusi, in quanto la testa di tali evidenze risulterà maggiormente esposta rispetto ai punti circostanti ostacolati dalla presenza della struttura stessa.

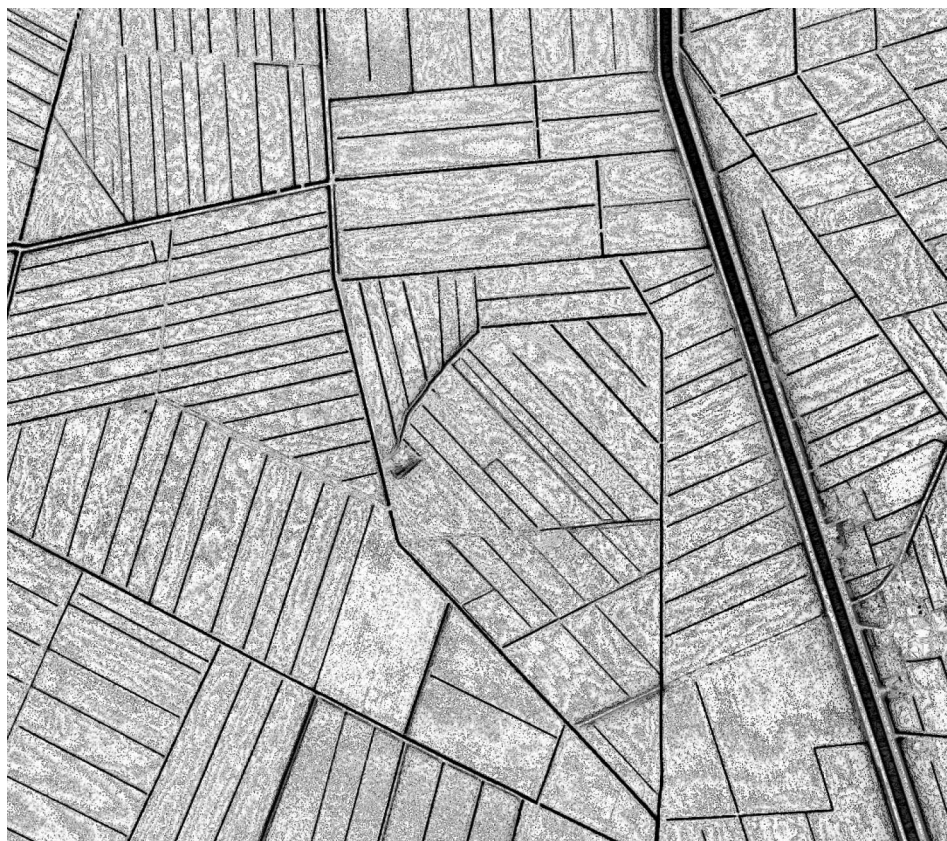


Fig. 2. 18 Esempio di *sky-view factor*, sito di Castello del Tartaro, Cerea (VR).

3. Object-Based Image Analysis (OBIA)

3.1 Definizione e stato dell'arte

L'*object-based image analysis* (anche nota con l'acronimo OBIA) è stata originariamente sviluppata per scopi medici e di monitoraggio urbanistico-territoriale. L'OBIA è una tecnica d'indagine in grado di fornire strumenti automatici per l'analisi di dati, anche ad altissima risoluzione spaziale o temporale. Essa consente infatti di descrivere le immagini¹ attraverso caratteristiche spettrali, tessiturali, spaziali e topologiche (LANG, 2008). Questa tecnica offre un quadro metodologico per l'interpretazione di classi complesse definite da proprietà spaziali, spettrali, strutturali e gerarchiche attraverso un approccio *machine-based* (BENZ *et alii*, 2004; BURNETT, BLASCHKE, 2003; HAY *et alii*, 2003).

Il concetto di OBIA è diventato di interesse diffuso all'interno delle scienze GIS a partire dal 2000 quando uscì sul mercato Definiens eCognition, il primo software commerciale dedicato. L'*object-based image analysis* si fonda su algoritmi di segmentazione, di *edge-detection* e di classificazione già sviluppati a partire dagli anni settanta e ottanta per applicazioni nell'ambito del *remote sensing*. Tuttavia, la comparsa di questa metodologia e la sua progressiva diffusione hanno consentito di approfondire il rapporto tra GIScience, oggetti-immagine e loro caratteristiche descrittive, oltre ad avere offerto una nuova prospettiva per le analisi EO (*Earth Observation*) e per lo studio a multirisoluzione del paesaggio. Blaschke e colleghi (2008) hanno identificato il fine ultimo dell'OBIA non tanto della creazione di nuovi algoritmi di segmentazione sempre più performanti, ma nello sviluppo di un'intelligenza basata su informazioni di tipo geografico, per arrivare – auspicabilmente – a una *object-recognition* di tipo automatico.

Nel 2008 Hay e Castilla hanno proposto di introdurre il termine GeOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*) per differenziare il lavoro svolto in ambito geografico/territoriale rispetto agli impieghi della medesima metodologia in altre discipline, tra cui si possono segnalare le scienze biomediche, l'astronomia, la microscopia e la *computer vision*. Gli autori definiscono la *Geographic Object-Based Image Analysis* come: “una sotto disciplina della *Geographic Information Science* (GIScience) volta a sviluppare metodi automatici per partizionare immagini telerilevate in oggetti-immagine significativi, e valutare le loro caratteristiche attraverso scale spaziali, spettrali e temporali, in modo da generare

¹ Il termine “immagini” va in questo caso inteso nel senso che contraddistingue il termine inglese “imagery”, difficilmente traducibile in italiano.

nuove informazioni geografiche in formato GIS-ready” (HAY, CASTILLA, 2008). La questione terminologica sull'utilizzo dei termini OBIA e GeOBIA è tutt'ora dibattuta in letteratura. Hay e Castilla (2008) sono tra i promotori della variante GeOBIA in quanto sostengono che in questo modo sia più chiara la relazione della disciplina con la GIScience e il *remote sensing*. Tuttavia l'utilizzo sempre più frequente della metodologia anche in ambiti diversi dagli studi territoriali rende questa variante in alcuni casi troppo restrittiva. D'altra parte, l'utilizzo del termine GeOBIA identifica univocamente l'ampia comunità scientifica di utilizzatori delle metodologie OBIA in ambito territoriale consentendo un confronto dialettico e l'organizzazione di convegni e conferenze dedicate².

Hay e Castilla hanno, inoltre, formalizzato i principi su cui si basa la *geographic object-based image analysis*, in particolare: 1) i dati sono geo-centrici; 2) il metodo è in grado di gestire più sorgenti di dati contemporaneamente; 3) è basata sulla delineazione preventiva di oggetti-immagine; 4) è una metodologia multiscala, che consente di trattare contemporaneamente oggetti di diversa dimensione, risoluzione e localizzazione; 5) è “contestuale”, ovvero in grado di tenere in considerazione dati riguardanti le informazioni e gli attributi circostanti; 6) il suo alto grado di adattabilità e personalizzazione permette l'inclusione di elementi della sfera cognitiva umana e delle reti gerarchiche (HAY, CASTILLA, 2008).

I primi approcci di *remote sensing object-oriented* risalgono agli inizi degli anni duemila, fondamentalmente a opera di Blaschke (BLASCHKE *et alii*, 2000). Già dal 2003 gli studi OBIA si sono notevolmente diffusi nell'ambito delle scienze forestali, portando risultati eccellenti nella mappatura della copertura arborea (DORREN *et alii*, 2003; HEYMAN *et alii*, 2003); ad esempio Herrera e coautori sono stati in grado di classificare i singoli alberi in campo aperto di una zona ad alta densità forestale della Costa Rica (HERRERA *et alii*, 2004). Questa tecnica ha inoltre consentito di risolvere i problemi legati all'effetto “sale e pepe” tipico delle classificazioni ottenute con il metodo per pixel, come dimostrato dal gruppo di lavoro di Yu (YU *et alii*, 2006) e si è rivelata estremamente utile per l'elaborazione di dati LiDAR (MAIER *et alii*, 2008).

La “1st International Conference on Object-Based Image Analysis” tenutasi a Salisburgo nel 2006 è stata la prima vera e propria occasione di confronto internazionale sulla disciplina e ha ospitato un totale di 175 autori da 24 differenti stati. In quel contesto è stato

² Dal 2008 il termine GeOBIA ha sostituito il termine OBIA anche nella biennale conferenza dedicata al tema. L'ultima edizione si è svolta dal 14 al 16 settembre 2016 a Enschede, nei Paesi Bassi con oltre 140 partecipanti provenienti da 35 diversi paesi.

immediatamente chiaro che l'OBIA non era relegato a un unico dominio applicativo. In particolare, i lavori hanno confermato le potenzialità del metodo di affrontare con successo dati-immagine sempre più complessi, sia in termini di risoluzione spaziale e temporale, o di complessità cognitiva (e ri-cognitiva) o di dimensione dell'area di indagine. I domini applicativi dei diversi contributi si estendevano dall'uso del suolo, alle scienze forestali, all'agricoltura, allo studio degli insediamenti e delle infrastrutture, alla geologia, all'ecologia (LANG, BLASCHKE, 2006); in quell'occasione non è stato presentato alcun intervento di argomento archeologico. Il primo contributo di questo tipo presentato alla conferenza GeOBIA è stato quello di Sevara e Pregesbauer nel 2014. Sebbene non sia il primo esempio di applicazione delle tecniche OBIA all'archeologia, gli autori evidenziano l'esigenza di un approccio *object-oriented* per approfondire le peculiarità dei singoli contesti archeologici, considerando per il riconoscimento delle tracce non una semplice variabile (come ad esempio la geometria fisica) ma un insieme di attributi caratteristici dell'oggetto dell'indagine (SEVARA, PREGESBAUER, 2014).

Anche in ambito urbano tale approccio ha fornito ragguardevoli risultati nella mappatura delle aree a diverso grado di urbanizzazione, come nel lavoro di Chen, che ha raggiunto esiti estremamente incoraggianti lavorando su dati ASTER della città di Beijing (CHEN *et alii*, 2007). Si segnala, inoltre, per la qualità dei risultati raggiunti, il progetto di classificazione degli "oggetti urbani" a diversa scala pubblicato da Jacquin nel 2008 (JACQUIN *et alii*, 2008).

Per quanto concerne le ricerche relative alla *damage analysis* e al *risk management*, un approccio OBIA è stato sperimentato – tra l'altro – per l'individuazione delle aree colpite da tornado, dimostrando un maggiore grado di accuratezza di questa tecnica rispetto alla foto-interpretazione tradizionale (MYINT *et alii*, 2008), ma anche per il riconoscimento delle regioni idro-geologicamente instabili (VAN DE SANDE *et alii*, 2003) e per monitorare terreni a rischio di smottamento in Corea (PARK, CHI, 2008).

Corbane e il suo team, infine, hanno sviluppato una procedura basata sulla teleosservazione di dati radiometrici e spaziali per la classificazione dell'idrologia superficiale sulla base di una tipologia di elementi idrografici predefinita (CORBANE *et alii*, 2008). Addink e Kleinhans si sono concentrati invece sullo sviluppo di una procedura di riconoscimento automatico dei meandri fluviali, non solo attivi ma anche inattivi o fossili, per comprendere le dinamiche di sviluppo dei fiumi, nel caso specifico del Gange (ADDINK,

KLEINHANS, 2008). Si segnala che questo tipo di approccio può essere particolarmente interessante a livello comparativo per lo studio delle idrografie fossili antiche.

Nel 2014, a disciplina ormai matura, Blaschke e un nutrito gruppo di esperti pubblicano uno dei contributi più significativi del settore sintetizzando dal punto di vista teorico e pratico la reale importanza dell'approccio *object-based* e fornendone una panoramica completa dalle origini all'attualità. Gli autori focalizzano l'attenzione sul concetto di paradigma (secondo la definizione di KUHN, 1962) e sull'importanza del GeOBIA come tale.

A partire dal 2009 gli articoli su riviste scientifiche internazionali relative all'OBIA e al GeOBIA sono più che quadruplicate, passando da circa 150 articoli a più di 600 (BLASCHKE, 2010). Inoltre l'uscita di edizioni speciali di importanti riviste internazionali dedicate interamente all'argomento (tra cui *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *Journal of Spatial Science*, *Remote Sensing* ecc.), workshop e conferenze, monografie, attivazione di insegnamenti universitari, dottorati di ricerca, oltre all'utilizzo di tale metodologia presso agenzie private e pubbliche amministrazioni dimostrano la sempre maggiore importanza che questa disciplina sta assumendo in ambito scientifico.

L'OBIA è stata impiegata in archeologia solo in pochissime occasioni, gran parte delle quali successive all'attivazione di questo progetto di dottorato, nel tardo 2013. È possibile citare il lavoro pionieristico di Verhagen and Drăgut (2012), mirato alle analisi di predittività sulla base della classificazione dei landforms, o i nostri studi pilota intrapresi a partire dal biennio 2010-2011 (MAGNINI, 2010-2011; MAGNINI, 2013-2014;) dedicati all'analisi d'immagine *object-based* su evidenze etno-archeologiche (malghe e pozze d'alpeggio, DE GUIO *et alii*, 2013) e su *soil* e *crop mark* della bassa pianura veronese. Quest'ultimo lavoro è stato presentato nel 2013 alla 41^{esima} conferenza della CAA (*Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*) a Perth, in Australia, e successivamente pubblicato negli atti del convegno nel 2015 (De Guio *et alii*, 2015). Il già citato contributo di Sevara e Pregesbauer (2014) hanno poi sottolineato l'importanza della sperimentazione OBIA in campo archeologico con un approccio teoretico, mentre Pregesbauer (*et alii*, 2014) l'ha applicata alla classificazione delle anomalie magnetiche. Infine, la metodologia è stata testata da Sevara e colleghi (2016) in contrasto con un approccio basato sui pixel e impiegata per l'identificazione e la quantificazione dei *mound* in Freeland *et alii* (2016).

3.2 Principi base del metodo

Le analisi *object-based* sono fondamentalmente suddivisibili in due step sequenziali: 1) la segmentazione (o regionalizzazione); 2) la classificazione basata su regole (*rule-based classification*), per rendere esplicite le proprietà geometriche e spettrali, ma anche quelle spaziali e relazionali, necessarie a soddisfare il modello mentale per l'identificazione di geo-oggetti significativi (LANG, 2008) (Fig. 3.1). Questi due fasi principali possono essere ripetute in sequenza per tutte le occorrenze necessarie (BENZ *et alii*, 2004). Questo tipo di approccio è stato definito da Baatz e colleghi (2008) come *object-oriented image analysis*, per sottolineare la differenza dall'*object-based image analysis* in senso proprio.

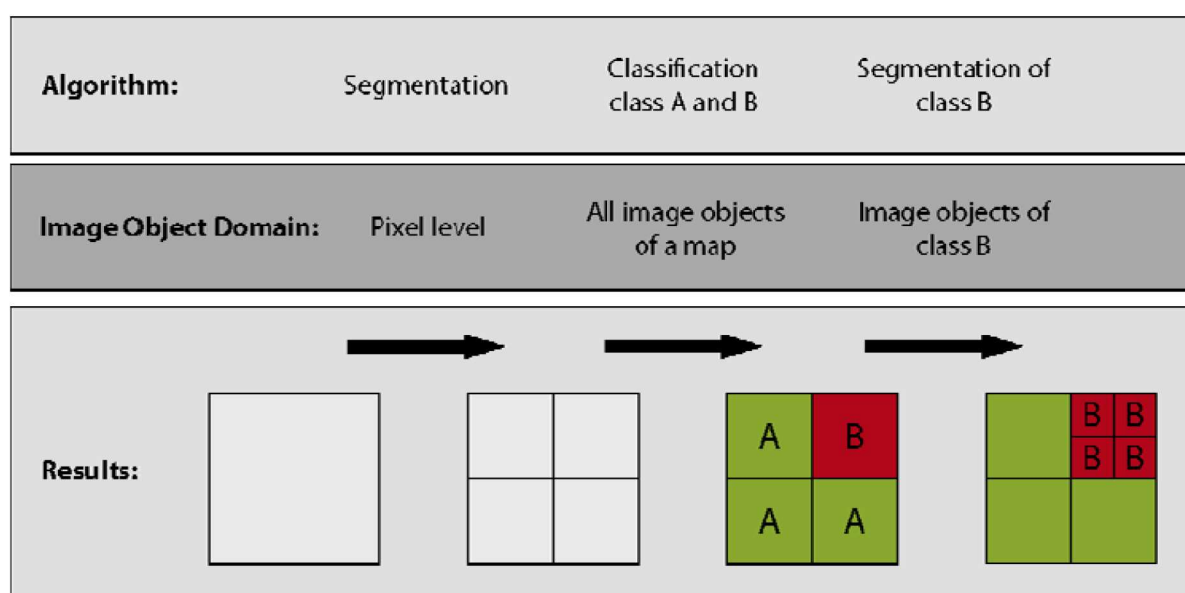


Fig. 3. 1 Rappresentazione dei principi base della metodologia OBIA. Da User Guide eCognition 9.2.

Secondo gli autori, entrambi gli approcci hanno in comune una prima fase di segmentazione atta alla creazione di “oggetti primitivi” ma, se con la *object-based image analysis* questi oggetti sono “immutabili” e costituiscono i mattoni base per la classificazione, con l'*object-oriented image analysis* è possibile alternare procedure di segmentazione a procedure di classificazione per rimodellare gli “oggetti primitivi” iniziali al fine di ottenere oggetti-immagine maggiormente coincidenti agli oggetti reali e, di conseguenza, una classificazione finale più accurata (BAATZ *et alii*, 2008) (Fig. 3.2). Attualmente in letteratura la distinzione proposta da Baatz *et alii* non ha avuto grande successo, tanto che i due vocaboli vengono spesso utilizzati come sinonimi. Più spesso, però, entrambe le procedure sono descritte semplicemente con la locuzione *object-based image analysis*. All'interno di questo lavoro di dottorato il termine *object-based image analysis* verrà usato

indipendentemente dalla complessità e dall'alternarsi delle fasi di segmentazione-classificazione; il termine *object-oriented image analysis* invece verrà utilizzato esclusivamente secondo la definizione proposta da Baatz e coautori (2008).

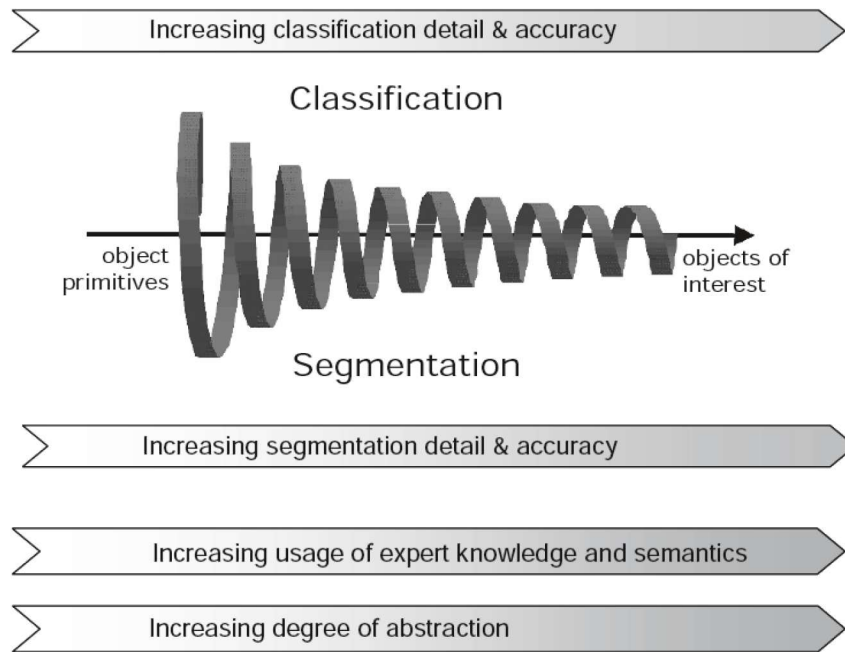


Fig. 3. 2 Schema della procedura di analisi object-oriented. Da BAATZ *et alii*, 2008.

3.2.1 La segmentazione

Gli oggetti-immagine sono il mattone fondamentale dell'*object-based image analysis*. Questo significa che l'unità concettuale del processo non è più rappresentata da singoli pixel (o voxel, in un sistema di coordinate tridimensionali), ma da oggetti-immagine omogenei e dalle loro relazioni.

Il termine segmentazione identifica una serie di operazioni logiche e matematiche operate allo scopo di ottenere gruppi omogenei e significativi di pixel a partire dai dati-immagine. Questo processo permette dunque di creare, modificare, tagliare, ingrandire o restringere gli oggetti-immagine. Semplificando, la segmentazione suddivide l'immagine in molteplici oggetti grezzi, che possono quindi essere ulteriormente editati, gerarchizzati e classificati. Le procedure di segmentazione possono essenzialmente essere suddivise a seconda del loro impiego: esse possono infatti essere utilizzate per la generazione degli oggetti primari a partire dai singoli pixel o per la creazione di oggetti secondari attraverso il ri-

processamento di oggetti-immagine già esistenti, attraverso una procedura iterativa (BAATZ *et alii*, 2008).

La segmentazione è una procedura che ha iniziato ad affermarsi tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 (HARALICK, SHAPIRO, 1985), quando sono stati introdotti e resi disponibili numerosi differenti algoritmi di partizionamento dell'immagine (PAL, PAL, 1993). I metodi tradizionali di segmentazione sono comunemente suddivisi in tre diverse categorie: 1) *pixel-based*; 2) *edge-based* e 3) *region-based* (SINGH *et alii*, 2011). Anche se disponibili, i metodi di segmentazione furono utilizzati solo raramente per la classificazione di dati territoriali; la maggior parte degli algoritmi sviluppati, infatti, riguardavano applicazioni nell'ambito delle scienze dei materiali (BLASCHKE *et alii*, 2004). Fino a pochi anni fa, la scelta della segmentazione iniziale era un passaggio critico di tutto il percorso di analisi. Attualmente, invece, le problematiche legate a questa prima fase sono assai meno stringenti grazie alla migliorata adattabilità degli algoritmi e dei software di analisi. In svariati lavori recenti, infatti, vengono impiegate segmentazioni iniziali più flessibili, che vengono poi ricalibrate durante gli step successivi per definire con maggiore dettaglio gli oggetti-immagine o le regioni dell'immagine, nel caso la specifica classificazione lo richieda (BLASCHKE *et alii*, 2014).

Le procedure di segmentazione riducono la complessità dell'immagine partizionandola in regioni discrete, in relazione alle loro caratteristiche di omogeneità spaziale, spettrale, tessiturale e topologica, attraverso l'aggregazione di pixel prossimali. Nel momento in cui questi oggetti primitivi diventano "significativi" per l'operatore in relazione ai parametri impostati nella segmentazione (*shape*, *compactness* e scala, cfr. *infra*), allora possono essere considerati come veri e propri oggetti-immagine. Secondo Lang (2008) gli oggetti-immagine sono essenzialmente delle porzioni di immagine create da un algoritmo di segmentazione e successivamente mediate attraverso una valutazione umana. Un oggetto-immagine può quindi essere interpretato come insieme unitario. Al suo interno, i singoli pixel sono riuniti in base a caratteristiche di omogeneità reciproca e di eterogeneità rispetto ai pixel presenti negli oggetti-immagine circostanti. Ciascun oggetto-immagine rappresenta dunque un'area specifica all'interno di una scena e contiene tutte le informazioni su quella porzione di spazio.

Il pixel è la più piccola unità che compone le immagini digitali; le sue dimensioni sono determinate dal sensore e dalla geometria del modello. Ad ogni pixel viene associato un numero digitale che rappresenta la media di diverse classi spettrali presenti all'interno

dell'area coperta dal pixel stesso (BLASCHKE *et alii*, 2014). Essendo il pixel una unità di base, esso può essere interpretato secondo il suo comportamento spettrale, in termini di aggregazione di *end-members* spettrali o ancora in termini di relazione con i pixel adiacenti (*neighborhood*), ma non troverà mai corrispondenza nel mondo reale. Al contrario, gli oggetti-immagine possono, in specifici casi, corrispondere a geo-oggetti, ovvero a entità realmente esistenti. Superare il limite dell'approccio per pixel e produrre oggetti-immagine significativi apre nuove prospettive per l'analisi di immagine automatica basata su set di regole: gli oggetti-immagine, infatti, possono essere classificati utilizzando un *range* molto più ampio di caratteristiche tra cui quelle spaziali, dimensionali o quelle di relazione (LANG, 2008).

Le segmentazioni multi-scala (ovvero quelle che permettono di creare oggetti-immagine di dimensioni differenti) sono spesso state collegate con la teoria gerarchica (LANG, 2002). Questo accostamento è stato proposto in considerazione del fatto che le segmentazioni multi-scala hanno a che fare con l'organizzazione gerarchica delle informazioni. La teoria gerarchica presuppone la possibilità di suddividere ogni sistema complesso in unità meno complesse (SIMON, 1973). Le immagini, tuttavia, sono solo una possibile rappresentazione di questi sistemi. Ciò che realmente collega la teoria gerarchica con la segmentazione multi-scala è la tipologia di approccio alla complessità, il processo mentale di modellazione e suddivisione e la capacità di integrare la nostra conoscenza attraverso questo approccio (LANG, 2008). Così ogni oggetto-immagine creato con una segmentazione multi-scala è connesso con gli altri in maniera che ciascuno si inserisca in un preciso contesto, in modo che siano sempre identificabili le relazioni con gli oggetti vicini e, in maniera gerarchica, con gli oggetti di livello maggiore (*superobjects*) e con quelli di livello inferiore (*sub-objects*). Ogni oggetto immagine può possedere un solo *superobject*, ma un numero potenzialmente illimitato di *sub-objects*.

Esistono numerosi algoritmi di segmentazione per partizionare l'immagine in regioni omogenee per analisi di tipo *object-based*. Tra i più comuni possono essere citati la segmentazione a scacchiera (*chessboard segmentation*), la segmentazione a quadtree (*quadtree-based segmentation*), la segmentazione a soglia multipla (*multi-threshold segmentation*) e la segmentazione a multirisoluzione (*multiresolution segmentation*) (Fig. 3.3).

La segmentazione a **scacchiera** presuppone un approccio di tipo *top-down*³. Si tratta della tipologia di segmentazione con algoritmo più semplice, che permette di suddividere l'immagine o porzioni dell'immagine in quadrati tutti uguali di dimensione predefinita. È anche possibile utilizzare questo tipo di funzione quale base per una successiva segmentazione di diverso tipo, qualora l'immagine da analizzare sia particolarmente complessa. È possibile settare la dimensione dei quadrati in base alle specifiche necessità d'indagine.

La segmentazione a **quadtree** è anch'essa di tipo *top-down*. Essa comporta la suddivisione ricorsiva dell'immagine in quadrati, come nel caso precedente, ma consente la coesistenza di oggetti-immagine di diverse dimensioni. Allo scopo di definire il limite per l'inclusione (o l'esclusione) in ciascun poligono è sufficiente variare il parametro di scala (*scale parameter*). Utilizzando questo tipo di segmentazione, le aree particolarmente omogenee danno luogo a quadrati di dimensioni maggiori, mentre quelle eterogenee risultano più fittamente suddivise.

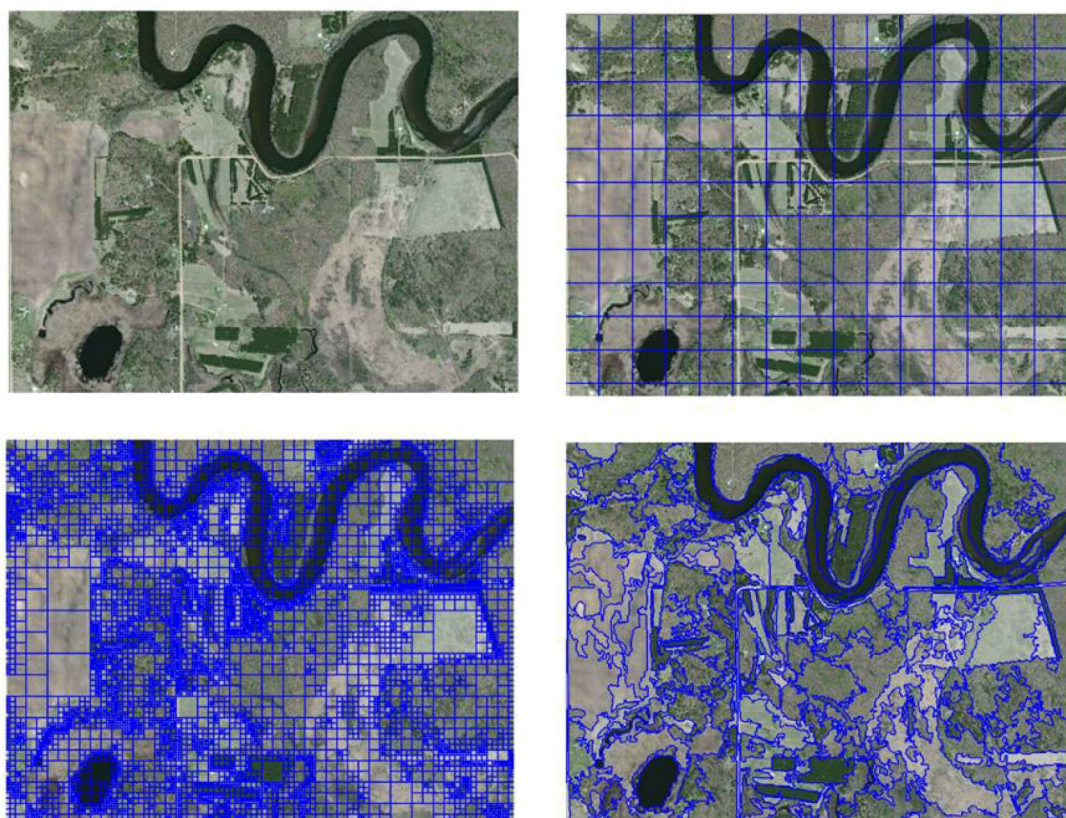


Fig. 3. 3 Comparazione di tre opzioni di segmentazione offerte da eCognition Developer; a partire da in alto a sinistra: A) ortofoto; B) ortofoto con segmentazione a scacchiera; C) ortofoto con segmentazione a *quadtree*; D) ortofoto con segmentazione a multirisoluzione.

³ Le segmentazioni di tipo *top-down* creano oggetti-immagine partendo da oggetti di dimensioni maggiori.

L'algoritmo di segmentazione a **soglia multipla** divide l'immagine e classifica i risultanti oggetti-immagine sulla base di una soglia impostata su un valore definito del pixel. Questo algoritmo risulta essere il più utilizzato tra quelli del tipo *top-down*, perché permette all'utente di definire la soglia critica. Può, inoltre, essere sfruttato in combinazione con l'algoritmo soglia automatica (*automatic threshold*) per ottenere un risultato auto-adattivo. La soglia può essere determinata per un'intera scena o per singoli oggetti-immagine; questo permette, dividendo l'insieme di pixel selezionato in due sotto-insiemi, di incrementare al massimo l'eterogeneità. L'algoritmo utilizza una combinazione di metodi basati su istogrammi e la misurazione dell'omogeneità della segmentazione a multirisoluzione per calcolare la soglia con cui suddividere il set selezionato di pixel in due sotto-insiemi.

La segmentazione a **multirisoluzione** (BENZ *et alii*, 2004) fa parte della categoria delle segmentazioni *bottom-up*⁴ e consente di unire tra loro gruppi di pixel o oggetti-immagine già esistenti per crearne di nuovi. Essenzialmente la procedura identifica singoli pixel generatori (chiamati *seeds*) e li unisce con quelli prossimali, basandosi su criteri spettrali e spaziali di omogeneità reciproca. È possibile modificare in qualunque momento i parametri di scala nella finestra di dialogo "*Edit Process*". Valori di scala elevati danno come risultato oggetti-immagine di dimensioni maggiori, mentre valori minori creano unità più piccole.

Il criterio di omogeneità intrinseca impiegato della segmentazione a multirisoluzione (e utilizzato anche nella segmentazione a soglia multipla) misura quanto è omogeneo o eterogeneo un oggetto-immagine al suo interno. Tale parametro può essere definito come la combinazione delle proprietà geometriche e spettrali degli oggetti-immagine iniziali (anche del singolo pixel, se si identifica come domino iniziale quello del pixel) e di quelli risultanti dopo la procedura di fusione. L'omogeneità del colore si basa sulla deviazione standard dei toni spettrali. L'omogeneità geometrica si basa sulla deviazione dalla compattezza della forma. Il criterio di omogeneità può essere pesato dall'utente andando a variare i parametri di *shape* e *compactness* presenti nella finestra di dialogo "*Edit Process*": il parametro *shape* può assumere un valore fino a 0,9. Questo valore determina quanto la forma vada a influenzare la segmentazione rispetto al colore. Ad esempio se *shape* viene impostato a 0,7 allora il parametro colore risulterà essere 0,3. Allo stesso modo il valore che viene dato a *compactness* va a influenzare quello di *smoothness* (Fig. 3.4).

⁴ Le segmentazioni di tipo *bottom-up* permette di assemblare assieme pixel o oggetti-immagine preesistenti al fine di creare oggetti-immagine più grandi.

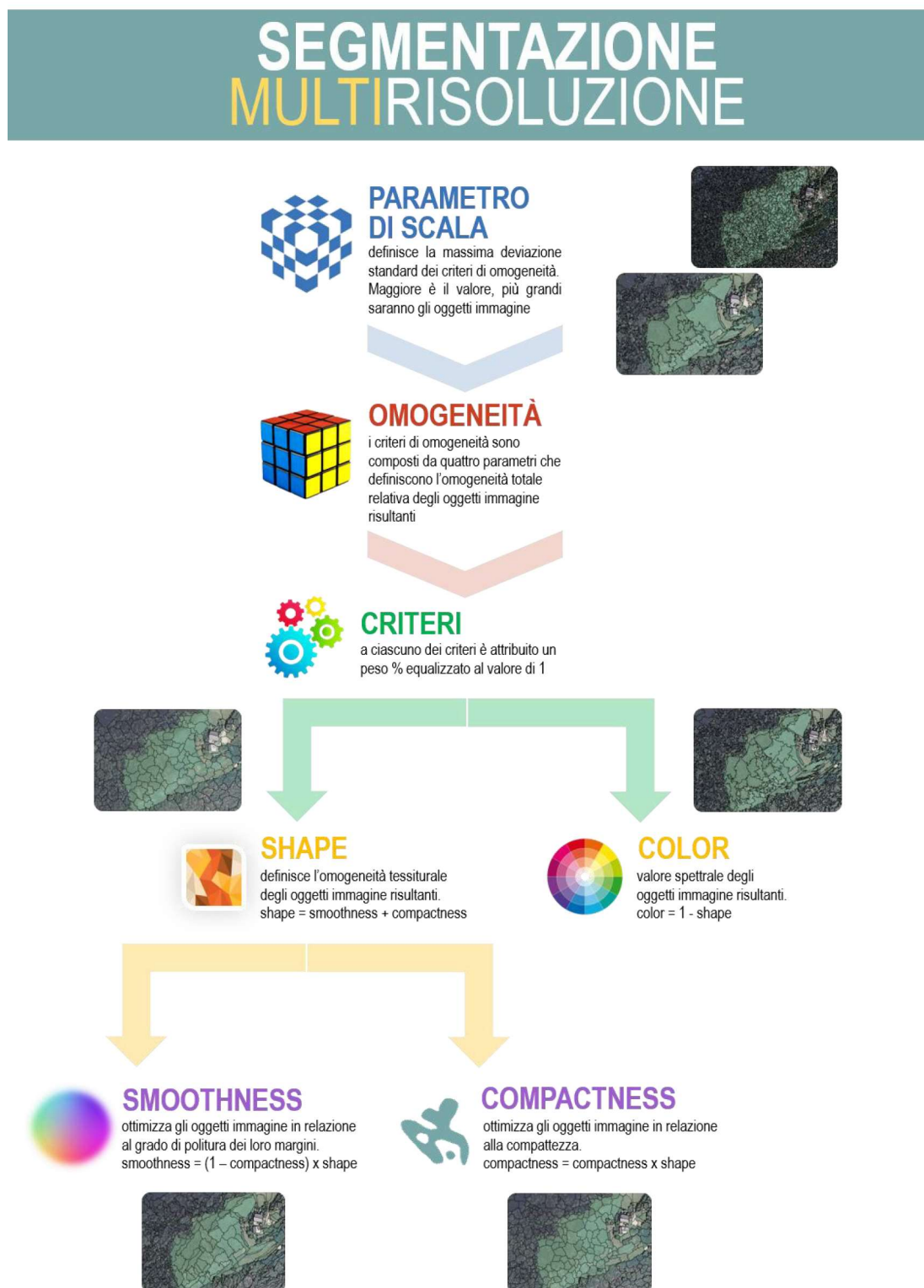


Fig. 3. 4 Schema del processo concettuale di applicazione della segmentazione a multirisoluzione.

Questo tipo di segmentazione offre un risultato finale più puntuale, ma al contempo è lenta e più laboriosa da applicare. Da ciò discende l'importanza di selezionare l'algoritmo più adatto caso per caso. Di fatto l'algoritmo di multirisoluzione divide l'immagine in poligoni,

massimizzando allo stesso tempo l'eterogeneità reciproca e l'omogeneità interna (BAATZ, SHAPE, 2000). Come detto, si tratta essenzialmente di una tecnica *bottom-up* (ovvero dal basso verso l'alto) che aggrega i singoli pixel per creare oggetti immagine di maggiori dimensioni.

Fin dalle prime esperienze OBIA nel campo dell'archeologia è stato chiaro che la segmentazione del tipo a multirisoluzione, con parametri di scala, di *shape* e di *compactness* variabili era l'opzione ottimale per analizzare i paesaggi archeologici.

Va comunque sottolineato che gli algoritmi di segmentazione *bottom-up* hanno difficoltà a delineare con precisione regioni che presentano una certa omogeneità di fondo su cui è però sovrapposto un pattern regolare, come nel caso dei frutteti o di aree che presentino ripetuti avvallamenti e rilievi a distanza ravvicinata. La cosiddetta "problematica del frutteto" (LANG, LANGANKE, 2006) è una delle limitazioni più consistenti delle segmentazioni di tipo *bottom-up* e si presenta quando si cerca di assegnare a un'area geografica un confine concettuale diverso rispetto a quello "reale". Considerando un frutteto visto da una foto aerea, dove è presente un pattern regolare di alberi da frutto inseriti in una "matrice" erbosa, affiancato da un prato con la stessa firma spettrale della matrice del frutteto, l'occhio umano, al contrario della macchina, riesce a tracciare una linea di demarcazione tra il prato in senso stretto e la zona a frutteto. La ragione per cui un uomo riesce a riconoscere questa demarcazione sta nel modo stesso l'essere umano percepisce l'eterogeneità. Nel 1977 Navon stabilì che la visione umana prima decompone l'intera scena per poi ricostruirla: le routine di segmentazione *bottom-up*, invece, partono dal singolo pixel per andare a creare aggregati finché non viene identificata una soglia di discontinuità specifica. Difficilmente, quindi, questo tipo di approccio sarà in grado di imitare i processi della visuale umana, partendo da un'analisi globale del pattern di insieme per poi procedere sui dettagli. Questa stessa problematica è frequente anche nelle applicazioni OBIA in ambito archeologico, poiché le discontinuità di interesse sono spesso inserite in pattern molto più complessi come le parcellizzazioni agrarie, che vanno spesso a confondere il reale pattern delle tracce archeologiche. Anche senza considerare le situazioni più critiche in cui un archeologo si può trovare ad operare, esistono molteplici situazioni che presentano caratteristiche e problematiche analoghe a quelle del frutteto, come ad esempio le aree interessate dalla presenza di necropoli, di tumuli o di scavi clandestini, per citare alcuni esempi.

Per superare le limitazioni riscontrate nel metodo "puro", in letteratura viene proposta l'introduzione di tecniche ibride. Questo significa implementare in contesti complessi l'uso

complementare di tecniche di delineazione automatica per le unità di base, insieme all'intervento di un interprete umano per un grado di aggregazione di alto livello (LANG, 2008).

3.2.2 La classificazione

Il passo successivo, chiamato **classificazione**, consiste nel raggruppare gli oggetti-immagine in categorie tenendo in considerazione i loro attributi in termini di forma, colore, *texture* e/o posizione relativa ad altri oggetti. Come già accennato il processo di *object-based image analysis* è ciclico e a una prima fase di classificazione può seguire un'ulteriore segmentazione per raffinare i criteri di ricerca. Grazie a questa natura iterativa, il processo è fortemente adattabile e permette la creazione di diverse categorie di classi da domini differenti e con significati specifici. La modellazione della classe consente all'operatore di trasformare i contenuti della scena in informazioni utilizzabili secondo le sue esigenze. In questa fase del processo è dunque possibile integrare le informazioni utili per l'analisi con dati geo-spaziali, come modelli digitali di elevazione e dati vettoriali specifici (particelle amministrative, idrografia ecc.).

Prima che gli oggetti-immagine possano essere distinti in diverse tipologie attraverso la classificazione è necessario valutare le loro caratteristiche. Queste caratteristiche, denominate *object-features*, possono essere intrinseche dell'oggetto (come la forma, le dimensioni o il colore), oppure possono essere derivate dalla relazione dell'oggetto con il contesto circostante, come la posizione relativa o il contrasto rispetto agli altri oggetti-immagine (BAATZ *et alii*, 2008). L'identificazione di oggetti attraverso la visione umana, infatti, si basa essenzialmente sulla combinazione di questi fattori e in particolare di forma, dimensione, colore, *texture*, presenza di ombre e associazione tra oggetti (BLASCHKE *et alii*, 2014).

La generazione di risultati comparabili o migliorativi rispetto la percezione umana è talvolta considerato come l'esito finale di un processo di analisi object-based. Questo risultato, tuttavia, è niente affatto banale e può, inoltre, essere problematico da quantificare numericamente ed emulare. La percezione umana si basa su una complessa procedura di filtraggio dei segnali rilevanti rispetto al rumore, un processo selettivo di informazioni dettagliate in parte basato sull'esperienza. Sebbene la *Computer Vision* abbia fatto grandi progressi negli ultimi anni, le potenzialità della visione umana sono ancora lungi dall'essere

effettivamente raggiunte. Alcuni dei processi biofisici sottesi sono noti, come ad esempio la struttura e il funzionamento della retina o quello delle reazioni cerebrali, però manca un quadro d'insieme per la comprensione dell'intero processo legato alla percezione visiva umana (LANG, 2005). Lang, studiando la relazione tra la percezione dell'immagine e la sua interpretazione, e utilizzando il concetto di esperienza nel contesto dell'analisi di immagine, suggerisce che è possibile utilizzare contemporaneamente più di un modello per ricavare dati significativi da un'immagine (LANG *et alii*, 2004).

Per migliorare l'estrazione automatica di oggetti è dunque necessario imitare quanto più possibile la percezione umana, traducendo in un linguaggio-macchina il modello mentale sotteso al riconoscimento delle evidenze oggetto di indagine. Come evidenziato dalla natura soggettiva della percezione umana, non esiste un'unica via per raggiungere lo scopo: sono infatti possibili una moltitudine di approcci differenti ad un unico problema. La conoscenza, poi, gioca un ruolo fondamentale nel processo di interpretazione dei dati telerilevati (CAMPBELL, 2002). L'essere umano fruisce di un enorme bagaglio di nozioni implicite o esplicite, che entrano in gioco per l'interpretazione delle immagini. Questa conoscenza implicita, legata anche all'istintualità, si associa inoltre alle informazioni assimilate attraverso studi specifici o all'esperienza diretta. Così il fotointerpretatore esperto può riconoscere alcune tipologie di evidenza istantaneamente, mentre per altre deve confrontare l'impressione visiva con l'esperienza e con casi di studi analoghi riletti in chiave interpretativa.

Per un'intelligenza artificiale (AI) esistono solo due tipologie di conoscenza, quella procedurale e quella strutturale. La conoscenza procedurale gestisce le funzioni computazionali specifiche e il suo risultato finale è un set di regole. La conoscenza strutturale, caratterizzata da una forte componente semantica, permette di stabilire dei collegamenti tra l'oggetto-immagine e le evidenze specifiche (nel nostro caso archeologiche) presenti nel mondo reale (LANG, 2008). Spesso, infatti, le evidenze di interesse sono costituite da oggetti complessi composti al loro interno da regioni omogenee (unità elementari) caratterizzate da una specifica disposizione reciproca. Questo assetto è una caratteristica strutturale vera e propria e richiede precise condizioni relazionali per realizzarsi.

Per organizzare la conoscenza in modo strutturato, è possibile impiegare i cosiddetti sistemi di organizzazione della conoscenza, anche noti come *knowledge organizing systems* o più semplicemente con l'acronimo KOS (ZENG, CHAN, 2004; TUDHOPE,

LYKKE NIELSEN, 2006). Nell'analisi delle immagini, le reti semantiche (*semantic networks*) forniscono una modalità strutturata per la rappresentazione della conoscenza tramite l'impiego del concetto di ereditarietà (*inheritance concept*), che è parte fondamentale dell'approccio *object-oriented* (BLASCHKE *et alii*, 2014).

Le procedure di OBIA sono inoltre supportate dall'uso della *Cognition Network Technology* (BINNIG *et alii*, 2002), che fornisce il quadro generale di riferimento per il riconoscimento di specifiche classi definite dall'utente e delle loro caratteristiche spaziali. Una *cognition network* controlla dunque il sistema, le definizioni e le modalità di rappresentazione delle classi di interesse. Rappresenta, inoltre, il presupposto per un sistema di classificazione basato su regole esplicite e quindi controllabile e trasferibile. Tuttavia gestire e formalizzare in un sistema di regole la conoscenza e l'intuito di un fotointerpretatore esperto risulta pressoché impossibile, nonostante esistano i mezzi e le strutture cognitive per sintetizzare le conoscenze empiriche in regole formali di natura statistico-quantitativa. Tradurre l'esperienza di un operatore in conoscenza procedurale e strutturale rimane una sfida aperta nell'ambito dello sviluppo di sistemi di intelligenza artificiale, specialmente considerata la moltitudine di soluzioni possibili generata dalla soggettività della percezione umana (LANG, 2008). Il meta-linguaggio *Cognition Network Language* (CNL), che permette di impostare i set di regole all'interno dell'ambiente software eCognition Developer, offre comunque un'ampia gamma di strumenti e algoritmi per affrontare anche l'analisi di classi complesse (BAATZ *et alii*, 2008). Sebbene, infatti, spesso la creazione di un *rule-set* richiede un impegno temporale e cognitivo importante, la possibilità di trasferire il medesimo modello e applicarlo in serie consente di controbilanciare l'equazione a vantaggio dell'automazione dei processi di classificazione.

Esistono quattro diverse possibili alternative per procedere con il riconoscimento delle evidenze sepolte e più in generale la fotointerpretazione archeologica, ciascuna delle quali con un grado di interazione uomo-macchina crescente e con problematiche interpretative specifiche. Di seguito, sulla scia di quanto proposto dallo scrivente nel contributo con De Guio e Bettineschi (DE GUIO *et alii*, 2015), saranno utilizzate le seguenti definizioni: 1) procedura manuale/ visuale; 2) procedura semi-manuale; 3) procedura semi-automatica; 4) procedura automatica.

Se escludiamo la prima tipologia di analisi basata sull'esperienza del fotointerpretatore, i tre approcci rimanenti e presentati qui di seguito (Fig. 3.5) si basano tutti sull'*object-based image analysis* e sull'utilizzo di un software dedicato, in questo caso eCognition Developer.

Essi prevedono un ruolo sempre crescente dell'intelligenza artificiale nel processo di individuazione delle evidenze archeologiche e dunque un valore euristico e comparativo sempre maggiore dei risultati raggiunti.

Il processo **semi-manuale** prevede una fase preventiva di segmentazione, secondo parametri selezionati dall'utente, e una successiva fase di classificazione durante la quale vengono manualmente evidenziati solo quegli oggetti-immagine che l'operatore ritiene pertinenti alle evidenze archeologiche di interesse. Questa metodologia, sebbene dipenda ancora abbondantemente dall'esperienza del fotointerpretatore, offre un fondamento obiettivo su cui impostare l'analisi: la forma degli oggetti-immagine è infatti generata automaticamente dal software sulla base delle proprietà dell'immagine. Questa procedura consente di ottenere risultati piuttosto soddisfacenti e dettagliati con tempistiche relativamente ristrette, ma ovviamente non consente la creazione di *rule-set* riutilizzabili e trasferibili. In questo caso manca interamente il secondo pilastro metodologico su cui si basa l'OBIA, ovvero la modellazione di classi complesse basata sul trasferimento della conoscenza. L'utente evidenzia gli oggetti-immagine, ma non traduce la sua conoscenza in un set di regole.

Allo scopo di classificare le evidenze archeologiche attraverso una procedura **semi-automatica** o **automatica** è essenziale conoscere le loro caratteristiche (forma, colore, dimensioni ecc.) e riconoscere le peculiarità che consentono di identificarle rispetto al contesto di pertinenza e a eventuali evidenze equifinali. Questo significa che l'operatore deve costruirsi un modello mentale dei risultati attesi attraverso una fase preliminare di studio e analisi del paesaggio, al fine di individuare quali algoritmi, *object-features* e parametri possono risultare più utili per il caso di studio di interesse. In altre parole, durante la selezione dei parametri di classificazione e la creazione di un *rule-set*, l'intelligenza artificiale deve essere guidata e istruita dalla conoscenza umana.

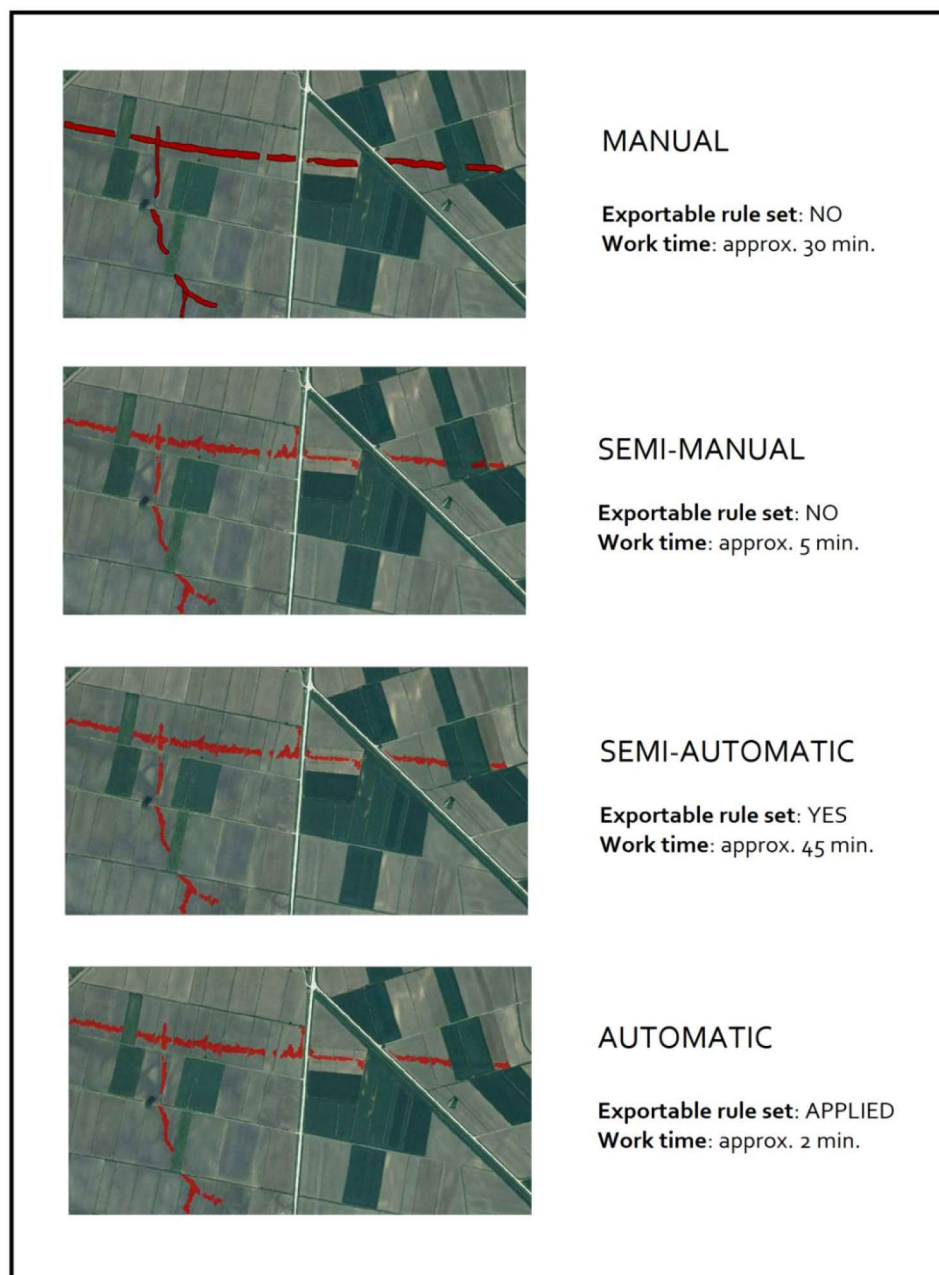


Fig. 3. 5 Comparazione di risultati e tempistiche per il riconoscimento del tracciato stradale antico a Ponte Moro attraverso: A) ricognizione manuale; B) ricognizione semi-manuale; C) ricognizione semi-automatica; D) ricognizione automatica.

Il software può poi applicare in maniera iterativa ciascun *rule-set* costruito attraverso la procedura semi-automatica per un numero illimitato di volte a diversi casi studio (o dati-immagine) che possiedano però caratteristiche fisiche, di scala, antropogeniche e geografiche simili: è il passaggio cruciale da una foto-interpretazione di tipo semi-automatico a una di tipo automatico. Resta evidente che quest'ultimo approccio implica una serie di

rischi, il cui impatto deve essere valutato sulla base del rapporto costi/ benefici e sulla base della complessità del progetto.

L'intero processo di analisi d'immagine OBIA è imperniato sul concetto di trasformazione, in termini di codifica e decodifica, della conoscenza. Durante la formalizzazione di un modello mentale per il riconoscimento di una determinata classe, le conoscenze dell'operatore vengono progressivamente enucleate e convertite in linguaggio macchina. In questo modo la conoscenza relativa alla classe di interesse si arricchirà ad ogni nuovo progetto. In particolare analizzare scene incognite consentirà di valutare l'affidabilità del *rule-set* ed eventualmente modificarlo allo scopo di renderlo applicabile anche su contesti diversi da quello generatore. In definitiva, il trasferimento di conoscenza stimola la creazione di nuovi set di regole e il miglioramento di quelli già esistenti (LANG, 2008).

La forma e la dimensione, ovvero le caratteristiche geometriche, insieme al colore, costituiscono dei parametri distintivi intuitivi, ma di grande rilevanza, per la classificazione degli oggetti. La forma definisce un'evidenza in relazione ai suoi contorni, mentre il colore veicola le specifiche proprietà spettrali di ogni singola banda. La classificazione per-pixel sfrutta fondamentalmente le proprietà spettrali per riconoscere gli oggetti. Se i pixel di una determinata classe condividono le stesse, univoche, proprietà spettrali la classificazione risulterà facilmente piuttosto accurata. Nel caso, però, in cui due classi condividano simili caratteristiche spettrali, la classificazione risulta decisamente più complessa.

Si consideri, ad esempio, di voler identificare un paleoalveo o un tracciato stradale antico in un contesto agricolo moderno: entrambe le strutture presentano caratteristiche ben precise e agevolmente riconoscibili da un fotointerpretatore esperto attraverso esperienza e conoscenze pregresse. Una volta segmentato, però, il paleoalveo o la strada saranno composti da diversi oggetti-immagine, in quanto il "rumore di fondo" causato dall'orientamento agricolo attuale e delle strutture moderne influisce significativamente sulla segmentazione. Tutti gli oggetti-immagine che compongono l'evidenza archeologica analizzata (sia essa il paleoalveo o il tracciato stradale) presentano caratteristiche esplicitabili in set di regole (conoscenza procedurale); osservando figura 3.6 si può notare come la tipologia di coltura in atto influenzi pesantemente le caratteristiche spettrali degli oggetti-immagine di interesse, così come la parcellizzazione agraria ne condiziona le caratteristiche geometriche. Risulta quindi indispensabile trovare soluzioni alternative per riuscire a creare un modello mentale efficace e poterlo poi tradurre in set di regole parametrizzabile.



Fig. 3. 6 Area di Ponte Moro (VR), i cerchi colorati indicano due porzioni della stessa struttura archeologica (una strada dell'età del Bronzo) caratterizzata da *corp marks* in due differenti tonalità cromatiche.

L'approccio OBIA offre varie soluzioni nel caso in cui le proprietà spettrali non siano sufficienti a identificare univocamente le classi di interesse. In particolare, esso consente di sfruttare le caratteristiche geometriche e relazionali degli oggetti. Per la fotointerpretazione di una scena, ad esempio, spunti interessanti vengono forniti anche da *object-features* come la levigatezza (*smoothness*) e la rugosità (*roughness*). In un paesaggio naturale o comunque scarsamente urbanizzato, le transizioni tra classi avvengono generalmente in modo più graduale rispetto a contesti con forte impatto antropico attivo. Questi cambiamenti graduali possono causare dei problemi in un processo di classificazione che prevede decisioni di tipo booleano (BLASCHKE *et alii*, 2014). Sfruttando il parametro di *texture* è possibile risolvere queste problematiche. Con il termine *texture* ci si riferisce a particolari frequenze di cambiamento nelle tonalità e alla loro organizzazione spaziale (HAY, NIEMANN, 1994). Nell'approccio per pixel le informazioni derivanti dalla *texture* si ottengono sfruttando un kernel di forma e dimensione fissa. Un metodo più informativo di sfruttare la *texture* è quello di costruire un modello basato sull'interazione spaziale tra gli oggetti-immagine prossimali (POWERS *et alii*, 2012).

In questo tipo di approccio, l'automatismo viene di norma percepito come lo scopo finale del processo di produzione del *rule set*, così come per molte altre tecniche di computer-analisi. Con l'aumentare della complessità della scena e delle evidenze da estrarre, però, è necessario prestare particolarmente attenzione a fornire al sistema delle informazioni

mediate attraverso l'esperienza dell'operatore, che siano facilmente traducibili in linguaggio macchina. L'approccio è dunque per sua stessa natura interdisciplinare: per modellare le classi in base alle loro caratteristiche spaziali, strutturali e spettrali non basta avere competenze informatiche, ma occorre anche un'ottima conoscenza dell'area da indagare, dei supporti a disposizione e delle evidenze da estrarre.

I metodi *object-based*, dunque, integrano le attuali competenze dell'ambito del *remote sensing* (anche archeologico), ma senza andare a scalzare le metodologie di classificazione precedentemente in uso. L'impiego combinato dell'OBIA con altre tecniche di analisi d'immagine più affermate consente di incorporare le competenze e le conoscenze acquisite in altri campi all'interno del processo decisionale di classificazione *object-based*: in questo senso un ruolo significativo rivestono le esperienze di fotointerpretazione manuale, quelle di approccio statistico alla classificazione per pixel e quelle connesse all'identificazione semi-automatica di evidenze a partire da dati ad alta risoluzione (LANG, 2008).

PARTE II: CONTESTI D'INDAGINE

4. Gli altopiani veneto-trentini

Passo Vezza è un valico alpino posto a 1402 m sul livello del mare che mette in comunicazione l'altopiano di Vezza, Luserna e Lavarone (in provincia di Trento) con l'Altopiano di Asiago (in provincia di Vicenza) (Fig. 4.1). Si tratta di un'area relativamente pianeggiante dove si susseguono numerosi dossi prativi perlopiù adibiti al pascolo del bestiame.

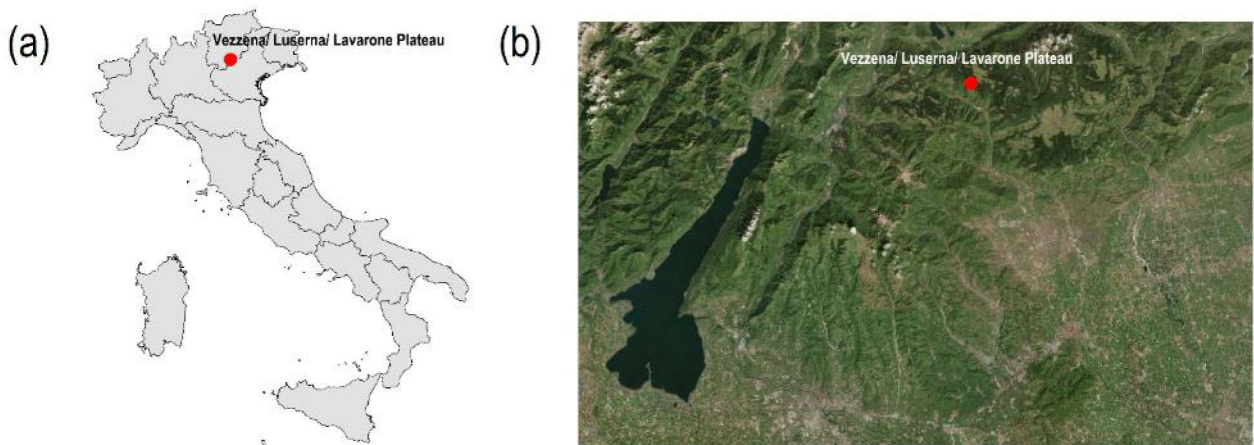


Fig. 4. 1 Localizzazione geografica dell'Altopiano di Vezza/ Luserna/ Lavarone.

La zona costituiva frontiera politica già nel 1605 quando segnava il confine dell'antica Federazione dei Sette Comuni. Successivamente, dopo il Congresso di Rovereto, Vezza passò in territorio trentino e il nuovo confine dei Sette Comuni si spostò più a est, a Termine, una piccola località a circa 3 km di distanza, dove ancora nel 1915 segnava la frontiera fra il Regno d'Italia e l'Impero Austro Ungarico (BARETTA, MARCHETTO, 1997). Proprio per questa ragione a cavallo del Primo Conflitto Mondiale tra Folgaria e Vezza furono erette sette fortezze, di cui restano oggi evidenti tracce sul terreno.

Il suolo, essenzialmente calcareo pur con frequenti inclusioni silicee, è fessurato da numerose spaccature che costituiscono nell'insieme un complesso carsico con formazioni sotterranee – grotte e voragini – molto rilevanti (BARBIERI, 1993). La maggior parte di queste cavità naturali (chiamate nel dialetto locale i *loch*) si apre in superficie con imboccature circolari da cui dipartono gallerie pressoché verticali, talvolta assai profonde. A queste stesse condizioni idro-geologiche si devono anche le doline, una forma di carsismo superficiale legata alla dissoluzione del carbonato di calcio contenuto nelle rocce (SAURO, 2003; HAPKA, WENGER, 1997).

Nonostante l'elevata piovosità annuale, la zona è piuttosto povera di sorgenti attive e stabili. L'area comprende principalmente risorgive che si caricano d'acqua nei mesi invernali o in conseguenza di abbondanti precipitazioni, dando vita ad acquitrini o "terreni molli" che possono formarsi sia nei boschi che nei pascoli (MARTELLO, 1993). Da ciò deriva l'importanza che nel territorio in esame hanno sempre avuto le strutture artificiali per l'abbeveraggio del bestiame.

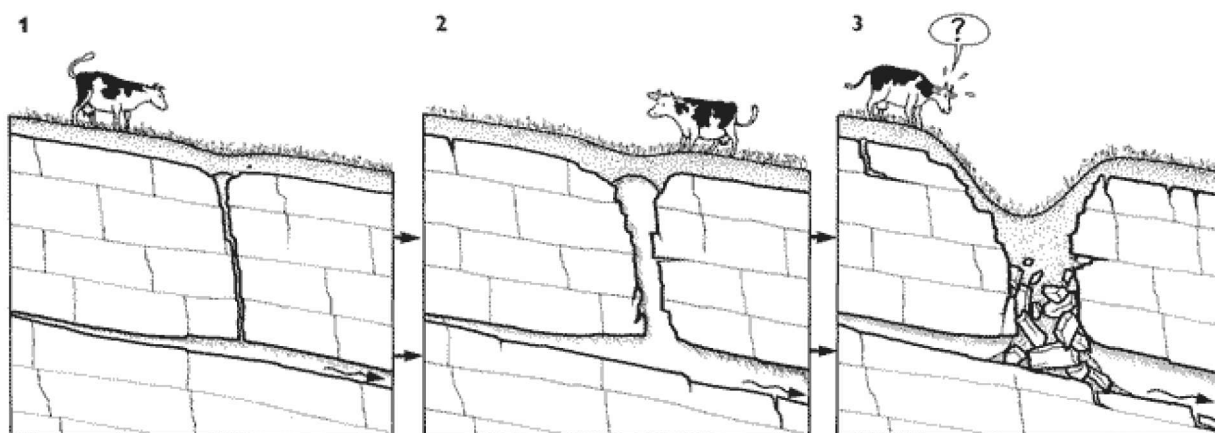


Fig. 4.2.2.1) infiltrazione dell'acqua nelle rocce calcaree attraverso delle piccole fessurazioni; 2) ingrandimento progressivo delle fessurazioni; 3) sprofondamento improvviso o graduale del terreno superficiale e formazione della dolina. Immagine tratta da HAPKA, WENGER, 1997.

Il pascolo, con le malghe e le pozze d'alpeggio, costituisce senza dubbio uno degli ambienti tipici del paesaggio di montagna ed è il contesto ove più visibilmente si manifesta la plurisecolare trasformazione operata dall'uomo sul territorio attraverso il disboscamento – avvenuto già a partire da epoca antica –, le bonifiche annuali del fondo, la creazione dei sentieri di transumanza etc. (APOLLONI, 1993). In molti pascoli sono anche tuttora visibili tracce della prima guerra mondiale: le buche di bomba e granata, oltre ai solchi a serpentina delle trincee e dei camminamenti.

La sporadica presenza di faggi all'interno dei ben più numerosi boschi ad abete (rosso e bianco) è indizio dell'importanza che questi alberi hanno avuto nel territorio di Millegrobbe, e più in generale degli altopiani, fino all'inizio del secolo scorso. Le faggete erano un tempo assai più frequenti e numericamente consistenti rispetto a quanto oggi si potrebbe pensare; i tagli periodici, però, sommati alla devastazione dei bombardamenti nel corso delle due Grandi Guerre, ne hanno progressivamente ridotto l'abbondanza e hanno lasciato tracce profonde al suolo, che ha da tempo assunto la classica fisionomia a *trous/ monticules*, ovvero con fosse a monte e riporti a valle legati allo strappo dei ceppi d'albero rimasti al suolo a seguito di episodi di deforestazione.

Il rimboschimento dopo il primo e il secondo conflitto mondiale ha privilegiato l'abete, assai più redditizio: il faggio infatti, al contrario dell'abete i cui usi sono molteplici, non rivestiva particolare interesse economico, se si esclude l'aspetto strettamente legato al combustibile¹.

4.1 Millegrobbe, Bisele e Cima Campo



Fig. 4. 3 Ortofoto dell'area di studio, localizzata a cavallo tra i comuni di Lavarone e Luserna (TN).

La conca di Millegrobbe è situata sul limitare Est degli altipiani di Lavarone, Luserna e Folgaria (Fig. 4.3). Si tratta di un ampio pianoro prativo caratterizzato da terrazzi naturali, oggi sede di infrastrutture per il turismo sportivo invernale.

¹ Il faggio aveva svolto invece un ruolo fondamentale fino all'inizio del Novecento per quanto riguarda l'alimentazione delle carbonare, assai diffuse nella conca di Millegrobbe e nella limitrofa località di Bisele (BONATO, RIGONI, 1987).

Le più antiche tracce di frequentazione dell'area risalgono allo scorcio tra Bronzo Recente e Finale (XII-XI sec. a.C. circa), datazione alla quale risalgono numerose testimonianze archeologiche (tra le altre forni, crogioli, scorie) connesse alla pratica metallurgica per la lavorazione del rame. Stupisce però, a questo riguardo, la totale assenza di minerali cupriferi nell'area (PEARCE, DE GUIO, 1999).

L'etnografia insegna – e l'archeologia conferma – che tra i fattori più importanti nella selezione di siti a scopo abitativo o produttivo le caratteristiche fisiche e le potenzialità economiche del territorio avevano importanza fondamentale: tra i principali elementi di interesse si possono senza dubbio annoverare la presenza di serbatoi idrici, di fonti alimentari oltre che l'esistenza – all'interno dell'area di approvvigionamento del sito (*catchment area*) – di tutta una serie di materie prime indispensabili all'economia di villaggio.

Il paradosso sopra richiamato deve essere messo in relazione all'esistenza di una complessa catena metallurgica, che doveva essere costituita da almeno cinque diversi momenti: 1) estrazione; 2) arricchimento; 3) arrostitimento e fusione del rame; 4) produzione di leghe di bronzo; 5) getto di fusione e creazione degli oggetti finiti. In particolare le scorie rinvenute a Luserna sono state attribuite a tre diverse fasi di lavorazione: *slagging*, *matting* e *smelting* (ADDIS *et alii*, 2016).

Per quanto concerne il periodo e l'area in esame studi recenti hanno portato a ipotizzare una de-localizzazione dei segmenti produttivi dell'arrostitimento/riduzione primaria, motivata da numerosi fattori: da un lato l'ingente disponibilità di legame, derivato dalle faggete, dall'altro la presenza di un ottimo fondente naturale (i noduli di selce nelle formazioni calcaree del Biancone) e delle risorse agro-pastorali necessarie al sostentamento dei metallurghi (DE GUIO, 2005). Un ruolo fondamentale dovettero giocare anche la posizione strategica della zona degli altopiani, che favoriva i rapporti sia con l'area padana sia con quella alpina, e l'instaurazione di proficue relazioni confinarie con gli abitanti dell'Alta Valsugana (ove sono noti giacimenti di solfuri di rame) e della piana di Vezzena.

Per l'età del Ferro si è ipotizzato una frequentazione saltuaria, a carattere stagionale, legata alle pratiche della pastorizia e dell'alpeggio. L'epoca romana e medievale furono invece caratterizzate da uno sfruttamento intensivo di tutte le risorse boschive e dal potenziamento delle pratiche pastorali (FINCATI, GIRARDI, 1999).

Uno dei momenti cardine nella storia degli Altopiani è stato l'arrivo, attorno all'anno Mille, di gruppi di coloni provenienti da area bavarese alla ricerca di nuove terre da coltivare, bonificare e disboscare. Queste famiglie, una volta stanziatesi stabilmente nell'area, vissero

in una sorta di isolamento forzato, dovuto all'asperità dei luoghi, e ciò permise la conservazione della loro lingua originaria, il Cimbri, insieme agli usi e ai costumi tradizionali (CASTALDINI, 2003).

Gli Altopiani, da sempre zona di confine, vissero il periodo più drammatico della loro esistenza tra il 1915 e il 1918, in concomitanza con lo scoppio e il decorso della Grande Guerra. Essa infatti ha lasciato nel territorio in esame, frontiera politica e zona di scontro diretto tra gli eserciti in lotta, tracce pressoché indelebili e profonde cicatrici.

A Luserna il conflitto iniziò ufficialmente già il 25 maggio 1915, quando il forte noto come "il Padreterno" (per la sua pretesa inespugnabilità) fu attaccato dall'artiglieria italiana, che scaricò non meno di cinquemila proiettili di diverso calibro sull'edificio nell'arco di soli tre giorni (cfr. capitolo 7.2).

Nei mesi seguenti gli austriaci chiesero e ottennero cannoni più potenti, tanto che con pochi colpi piazzati di un obice da 30,5 centimetri riuscirono a mettere fuori uso prima forte Verena, poi Forte Campolongo e nel volgere di breve tempo gran parte delle postazioni contigue (LIBER, LEITEMPERGHER, KOZLOVIC, 1988).

Nell'agosto del 1915 le truppe italiane sferrarono un attacco di fanteria presso il Basson (Vezzena) al fine di sfondare le linee nemiche e aprire la strada verso Trento. L'impresa si rivelò però disperata: le difese austro-ungariche risposero al fuoco e oltre mille soldati furono uccisi sotto i colpi nemici.

Nonostante i numerosi scontri, da quel momento le postazioni restarono pressoché immutate fino all'arrivo della prima neve. Fu nel maggio del 1916 che le offensive ripresero con ancora maggior vigore: iniziò infatti dagli altopiani dei Fiorentini e di Folgaria l'avanzata degli austriaci, che nel volgere di qualche settimana si spinsero fino a conquistare il Monte Pasubio.

La conclusione della *Strafexpedition* corrispose in gran parte anche al termine della guerra nella zona degli altopiani, in quanto il fronte principale si spostò nella regione più orientale dell'arco alpino e lì vennero decise le sorti del conflitto.

4.2 Il sito del Bostel in località Castelletto di Rotzo (VI)

Bostel è il nome di un promontorio sito in località Castelletto nel comune di Rotzo (VI) sul limitare occidentale dell'Altopiano di Asiago. Si tratta di un ampio pianoro prativo proteso a strapiombo verso la confluenza della Val d'Assa con la Val d'Astico (Fig. 4.4). Tale

localizzazione è strategica, poiché offre un'ottima visibilità verso gli sbocchi vallivi a meridione e consente dunque di assicurare un controllo diretto delle vie di comunicazione tra l'area planiziaria e pedemontana e quella alpina.

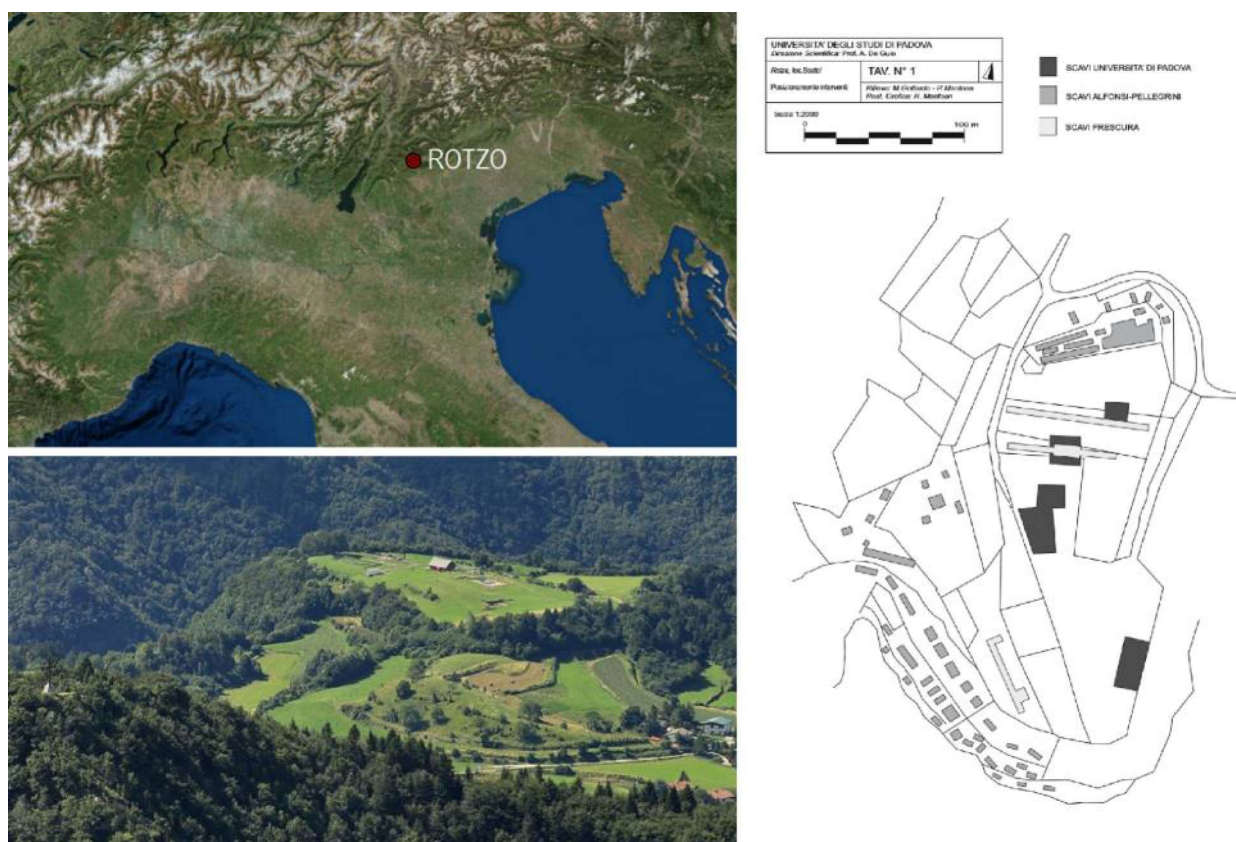


Fig. 4. 4 Sopra, localizzazione del sito del Bostel di Rotzo (VI) nel contesto dell'Italia settentrionale; sotto, immagine dall'alto dell'area archeologica; a destra, localizzazione degli scavi condotti sul pianoro del Bostel, con indicazione dei settori indagati dall'Università di Padova e dagli interventi precedenti.

Il sito archeologico fu scoperto nel 1781 a opera dell'abate Agostino dal Pozzo, nato a Rotzo nel 1732, insigne studioso dell'epoca e fervido appassionato di storia locale. La sua famiglia, infatti, possedeva dei terreni nell'area del Bostel e in tali appezzamenti di terra, racconta il Dal Pozzo (1820, ristampato 1910), "l'aratro incappava tratto in pietre per lo più mobili e coperte", tanto che fu necessario operare una bonifica fino alla profondità di un piede e mezzo (ovvero circa 45-50 cm) per poter adibire i campi alla coltivazione della patata. Durante questi lavori di sistemazione, gli operai si imbatterono nelle murature di numerosissime casette distrutte e poi interrato: si tratta della prima evidenza di un abitato pre-romano sull'Altopiano dei Sette Comuni.

Dal Pozzo mette in luce, inoltre, numerosi materiali archeologici e almeno due sepolture in cista litica. L'eco di tali rinvenimenti perdura nel tempo tanto che Giuseppe Pellegrini, docente dell'Università di Padova e Soprintendente alle Antichità a partire dal 1907,

programmerà per il 1912 una campagna d'indagine sistematica nell'ambito del suo progetto di ricostruzione complessiva della storia e dell'archeologia del Veneto antico.

Le indagini furono affidate ad Alfonso Alfonsi, allora responsabile del Museo di Este, che operò una serie di trincee esplorative sulla sommità e intorno alle pendici del Bostel, senza andare a intaccare l'area centrale del pianoro che si considerava come "già frugata" secondo quanto riportato dal Molon (1880). Tra i rinvenimenti più significativi si segnala la cosiddetta "sala del trono", un'abitazione a pianta rettangolare di circa 4 x 8 m, caratterizzata dalla presenza di un grosso macigno inzeppato che Pellegrini (1915-1916) interpreta come capanna del capo villaggio, anche in relazione alla sua ubicazione sul sommo del promontorio. Recenti rinvenimenti di confronto hanno tuttavia permesso di ipotizzare una funzione di tipo cultuale per la struttura.

Gli scavi riprendo poi, dopo oltre un cinquantennio, a opera di GiovanBattista Frescura, assistente presso la Soprintendenza alle Antichità delle Venezie, che lascia nei suoi diari di scavo significative testimonianze del metodo di lavoro adottato e dei rinvenimenti effettuati.

In particolare, vengono aperte tre lunghe trincee che portano all'individuazione e all'indagine sistematica di almeno una seconda abitazione semi-interrata, oggi denominata "settore A" o "casetta Frescura".

L'abitazione si trova al centro di un piccolo avvallamento del pianoro, in una zona che pare incassata tra due linee di terrazzamento antico, isoorientate rispetto alla struttura (MAGNINI *et alii*, cds). L'edizione complessiva dei dati di scavo si deve al lavoro di revisione e aggiornamento operato da Leonardi e Ruta Serafini (1981), che consente oggi di fornire delle ipotesi interpretative rispetto alle tecniche costruttive e alla cronologia dell'abitazione.

A partire dal 1993 l'Università di Padova ha ripreso i lavori sotto la direzione scientifica del prof. Armando De Guio. Le attività di scavo sono state precedute da una campagna non invasiva di prospezioni geofisiche condotta da Ermanno Finzi del Dipartimento di Geoscienze (DE GUIO, FINZI 1995) che ha consentito di identificare le aree più significative per l'apertura di nuovi settori di scavo. Sono state così individuate le strutture C1 e C2, ubicate in prossimità del centro del promontorio.

Lo scavo ha rivelato la presenza di due costruzioni allineate (Fig. 4.5), aventi un lato corto in comune. Si tratta di casette a pianta rettangolare di notevoli dimensioni (6 x 9 m circa), con funzioni diversificate. Il materiale rinvenuto ha infatti permesso di ipotizzare una funzione prettamente artigianale per la struttura C1, dove si sono rinvenuti fornelli circolari

per la cottura della ceramica e scarti di produzione. La struttura C2 sembra aver avuto, invece, vocazione prevalentemente abitativa (DE GUIO *et alii*, 2011).

Il ritrovamento di un tesoretto in lingottini di bronzo rinvenuto nel doppio fondo di un dolio nel vano sotto-scala della casetta C2, associato alle diffuse tracce d'incendio che paiono interessare l'intero villaggio, contribuiscono a ipotizzare un abbandono repentino, che è possibile ascrivere alla fase di romanizzazione.



Fig. 4. 5 Foto ripresa da drone DJI Phantom 2 delle strutture abitative C1 (in basso) e C2 (in alto).

Gli scavi degli anni 2014-2016 si sono invece concentrati sul settore D, un'area al limitare del parco archeologico che conserva testimonianza della più antica fase di frequentazione del Bostel, datata al Bronzo Finale. Si tratta di un settore particolarmente complesso, poiché

sconvolto da tagli e riporti per la sistemazione agraria del pianoro, tuttavia le ricerche degli ultimi anni hanno permesso di localizzare anche una nuova struttura abitativa del Secondo Ferro, di cui è in corso d'indagine il vano di accesso gradinato (Fig. 4.6)².

Le abitazioni del Bostel sono tutte costruite secondo il modello retico, ovvero a partire da uno scasso quadrangolare nel deposito morenico su cui si impostano delle murature a secco costituite da grossi blocchi di pietra squadratati in modo approssimativo, di diverse misure, disposti in sovrapposizione con corsi non regolari. L'alzato doveva essere costituito da travature lignee (parzialmente?) intonacate e da una copertura in materiale stramineo, come indicato dalla disposizione delle lastre litiche a livello del piano di calpestio (che dovevano costituire le basi d'appoggio delle travi portanti), oltre che dal rinvenimento di legno carbonizzato emerso a più riprese entro le strutture. Per la casetta scavata dal Frescura è stato possibile comprendere il sistema costruttivo delle pareti realizzate con tecnica "a cassone", un doppio ordine di travi in legno giustapposte orizzontalmente in modo da lasciare un'intercapedine riempita di pietrame e terriccio selezionati. Il pavimento delle case doveva essere costituito da un assito ligneo, oppure da terriccio misto a ghiaie pressate.



Fig. 4. 6 Fotografia in corso di scavo del vano di accesso gradinato identificato nella porzione settentrionale del settore D.

² I dati degli scavi 2014-2016 sono ancora inediti e vengono riportati a titolo preliminare. Le indagini sono state condotte con la direzione scientifica del prof. Armando De Guio e la conduzione operativa dello scrivente.

L'accesso avveniva attraverso delle scale che si affacciavano su un piccolo ambiente esterno generalmente con pianta a gomito. La porta era in legno: nelle abitazioni C1 e C2, e nella struttura A sono state anche rinvenute chiavi e maniglie in ferro che permettono di ricostruire il tipo di serratura impiegato.

In definitiva il villaggio del Bostel di Rotzo si connota come un insediamento d'altura stanziata, ubicato in un'area di cerniera tra l'ambito culturale propriamente veneto della pianura e della pedemontana e la *facies* retica stanziata nel comparto alpino trentino-atesino. Dal punto di vista cronologico, i materiali parlano di una prima frequentazione sporadica databile intorno all'XI-X sec. a.C. e di un insediamento vero e proprio attivo durante la Seconda età del Ferro, fra la fine del V e il II sec. a.C..

5. La necropoli dell'Olmo di Nogara

L'Olmo è una frazione posta a ovest rispetto al comune di Nogara (VR). Il paese è situato circa trenta chilometri a sud del capoluogo veronese ed è pertanto inserito nel contesto geografico delle Valli Grandi Veronesi (Fig. 5.1).

Tra il 1936 e 1937, in occasione dell'impianto di un nuovo vigneto su un lungo dosso fluviale vengono effettuati i primi rinvenimenti di tombe nella zona (SIGNORATI, 1968). Le prime notizie sulla presenza di una necropoli, però, non si avranno fino al 1960 a opera di Zorzi, il quale sostiene nel suo volume sulla Preistoria Veronese che “nel sepolcreto di Nogara, in contrada Olmo, si rinvennero scheletri distesi in nuda terra, accompagnati da grandi e pesanti spilloni di bronzo a testa tronco-conica, incisi, e da qualche ago crinale più sottile e leggero, dello stesso metallo, a tre occhielli abbastanza comune nelle palafitte gardensi” (ZORZI, 1960). Successivamente Renato Peroni riprende le notizie relative alla necropoli e la attribuisce alla *facies* di Povegliano sulla base degli spilloni rinvenuti (PERONI, 1963).



Fig. 5. 1 Localizzazione dell'Olmo di Nogara (VR) nell'ambito del nord Italia.

Al 1987 si data una prima, seppur breve, campagna di scavo diretta dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici del Veneto nell'area del vecchio vigneto. In quell'occasione furono rinvenute 19 tombe e i resti di altre sepolture sconvolte dai lavori agrari che avevano nel

tempo interessato l'area. Tra il 1990 e il 1997, a seguito di alcuni lavori di lottizzazione, vennero effettuati diversi interventi sistematici di scavo a sud della strada statale padana al fine di studiare nel dettaglio le aree rimaste inalterate della necropoli protostorica. Ulteriori indagini sono state condotte poi nel 2002 a seguito della ristrutturazione degli edifici di Corte Serraglio (SALZANI, 2005). Infine gli scavi del 2009 hanno portato in luce un'ennesima inumazione maschile di un armato con spada (CANCI *et alii*, 2010).

Il sito, localizzato su un dosso fluviale sulla sponda destra di un paleoalveo del Tartaro, è stato frequentato continuativamente dal Neolitico fino al Medioevo, sebbene l'episodio principale rimane quello della già citata necropoli della media e recente età del Bronzo.

La necropoli del Bronzo Medio-Recente, estesa per un'area di circa 400 m di lunghezza e 35 m di larghezza, si sviluppa su tre delle sei aree di scavo, ovvero i cosiddetti settori A, B e C. La disposizione delle tombe su un'area tanto estesa differenzia la necropoli dell'Olmo rispetto alle altre necropoli coeve dello stesso ambito geografico, dove le sepolture sono condensate in uno spazio ristretto e spesso si sovrappongono tra loro. A causa dell'ampia estensione della zona interessata dalle sepolture e della presenza di strade e altre strutture moderne, non è possibile stabilire se l'uso funerario era continuativo e senza interruzioni in tutta l'area interessata dalla necropoli oppure se erano presenti zone prive di tombe. L'esistenza, in tutti e tre i nuclei principali della necropoli, di tombe riferibili alle varie sotto-fasi del Bronzo Medio-Recente, tuttavia, avvalorare l'ipotesi di un policentrismo del contesto. Inoltre la presenza di sepolture molto differenziate sia dal punto di vista sociale, che di genere (rapporto maschi/ femmine) e di età confermerebbe la presenza di nuclei distinti e coevi di sepolture, riferibili con ogni probabilità a gruppi diversi forse legati al loro interno da un legame di parentela.

All'interno della necropoli convivono sia tombe a incinerazione, sia sepolture a inumazione con una netta preponderanza per quest'ultimo rituale (61 incinerati contro i 456 inumati). Le tombe a cremazione, identificate nelle aree B e C (Fig. 5.2), non mostrano un particolare ordine all'interno della necropoli andando a disporsi in modo casuale (fa eccezione solo un nucleo nella zona meridionale dell'area C). L'urna, generalmente un vaso biconico o ovoidale con copertura a ciotola, era deposta sul fondo di una buca poco fonda e di piccole dimensioni. A causa della scarsa profondità delle fosse, diverse tombe sono andate distrutte o danneggiate durante i lavori agricoli che hanno interessato l'area. All'interno delle urne non è stato trovato alcun corredo ad accompagnare le ossa combuste del defunto.

Le tombe a inumazione hanno una forma rettangolare o leggermente ovale, e sono sufficientemente ampie da contenere comodamente il defunto che era generalmente deposto disteso, con la testa dritta o reclinata su un lato e con le braccia lungo i fianchi o appoggiate sul ventre. Alcuni indizi, come la regolarità delle pareti della fossa e le tracce di legno carbonizzato, fanno ipotizzare la possibile presenza di una cassa lignea almeno per alcuni inumati.

All'interno della necropoli sono inoltre documentate tombe bisome, pratica che interessa sia sepolture di adulti, sia di adulti con neonati/ bambini; sono state anche trovate tombe a rituale misto con urne cinerarie deposte nella stessa fossa di un inumato. Questa eventualità potrebbe attestare la coesistenza e non la contrapposizione dei due rituali, qualora il dato stratigrafico sia confermato. La presenza di un biritualismo funebre in Italia settentrionale tra Bronzo Medio e Recente è attestata solo nel territorio compreso tra l'Adige e il Mincio: le altre *facies* confinanti e coeve, come quella terramaricola a sud del Po, sono invece caratterizzate dall'esclusività del rito crematorio. Nel corso dell'età del Bronzo Recente anche l'area nord padana precedentemente interessata dal fenomeno del biritualismo inizia ad adottare in maniera sempre più frequente la pratica dell'incinerazione dei defunti.

Di particolare rilevanza è la presenza, tra gli elementi di corredo, di spade in ben 44 tombe. In 11 casi su 16 la spada è associata anche a un pugnale. Tutte le sepolture con spada sono associabili a individui maschili adulti o senili.

5.1 Il materiale osteologico

Gli studi paleopatologici sui resti umani della necropoli dell'Olmo di Nogara sono stati possibili grazie al buono stato di conservazione di un campione sufficientemente ampio e diversificato di scheletri. Sono state analizzate 174 inumazioni anatomicamente complete che hanno permesso di ricostruire un quadro sullo stato di salute generale della popolazione scheletrica della necropoli (CANCI *et alii*, 2005).

Di particolare interesse sono due scheletri maschili su cui sono state identificate tracce di tubercolosi ossea, che ha deformato e parzialmente eroso le colonne vertebrali dei soggetti. Sebbene si tratti di una delle più antiche testimonianze di questa malattia, la cui insorgenza è legata allo stretto contatto con gli animali allevati (in particolare i bovini), alle scarse condizioni igieniche e all'elevata densità abitativa, è importante sottolineare come questa malattia solo raramente coinvolga la parte scheletrica dell'organismo.

Conseguentemente è possibile ipotizzare una maggiore diffusione di tale malattia all'interno della popolazione dell'Olmo di Nogara (CANCI *et alii*, 2010).

Circa un terzo dei soggetti esaminati presentava patologie articolari. Oltre alla colonna vertebrale, che è il distretto scheletrico maggiormente interessato, sullo scheletro appendicolare si segnalano episodi di osteoartrite sulle articolazioni del ginocchio, dell'anca e un caso di eburneazione dell'articolazione metacarpo-falange prossimale del pollice. Le probabili cause di queste condizioni vanno ricercate, oltre che in patologie specifiche come ernie, negli stress biomeccanici a cui la specifica articolazione era interessata, nella postura dei soggetti e nella degenerazione dovuta all'età (CANCI *et alii*, 2005).

L'aspetto più interessante e più rilevante per il successivo caso di studio presentato in questa tesi di dottorato sono i traumi inflitti a seguito di episodi bellici e i successivi interventi chirurgici. Circa il 10% degli individui maschili presenta sia sullo scheletro che sul cranio tracce di solchi rettilinei, distacco di schegge di osso, depressioni o perforazioni del tessuto osseo dovute a traumi inflitti. Le differenti tipologie di ferite sono confrontabili, per dimensioni e tracce relative, con il coevo armamento guerriero presente anche nelle tombe della stessa necropoli dell'Olmo di Nogara.

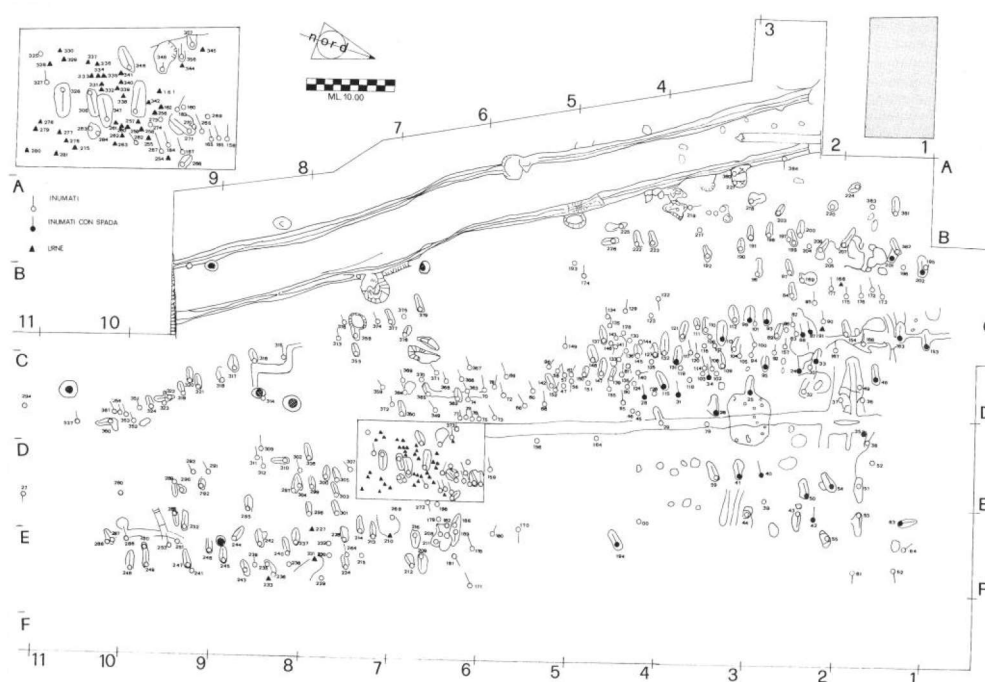


Fig. 5. 2 Planimetria dell'area C della necropoli da cui provengono i due campioni indagati.

Oltre a ferite inflitte nell'ambito di scontri armati, sono state riconosciute anche tracce legate a interventi chirurgici o terapeutici per i feriti. Tre soggetti (tombe 50, 54 e 95) presentano perforazioni molto regolari di forma circolare o sub-circolare sulla volta cranica,

probabilmente relative a interventi chirurgici tesi a diminuire la pressione intracranica e a pulire la ferita a seguito di un trauma. All'interno della lesione è possibile constatare la rigenerazione del tessuto osseo che indica la sopravvivenza dei soggetti a seguito dell'intervento. La trapanazione cranica, pratica diffusa già in epoca preistorica, veniva eseguita con strumenti di selce o metallici (a seconda dell'epoca) per rimuovere i frammenti di osso presenti all'interno di una ferita e facilitare la guarigione del soggetto. Sebbene inizialmente a questa pratica dovesse essere attribuita una valenza principalmente magico-religiosa, la perizia di esecuzione riscontrata sui soggetti dell'Olmo di Nogara è indizio di una buona conoscenza dell'anatomia umana e della funzione medica dell'intervento (CANCI *et alii*, 2010).

5.1.1 I campioni indagati

Lo studio effettuato ha interessato alcuni campioni osteologici provenienti da due tombe della necropoli dell'Olmo di Nogara. Di seguito sarà fornita la localizzazione e la descrizione della sepoltura e le condizioni dei resti scheletrici.

Tomba 50

Area C

Settore D2

Sepoltura a inumazione in fossa rettangolare con angoli smussati, pareti verticali, fondo piatto, lunghezza di 2,5 m e larghezza di 0,95 m. Lo scheletro è stato rinvenuto a una quota inferiore di 116 cm rispetto al piano di calpestio attuale.

L'inumato era disteso sul fondo della fossa con la testa reclinata, le braccia lungo il corpo e le gambe parallele.

Il corredo era composto da una tazza carenata con fondo ombelicato e ansa lunata ad estremità espanse posta sul lato destro del cranio, oltre a una spada a base semplice di tipo *Sauerbrunn* deposta obliquamente sul petto del defunto con la terminazione della punta in corrispondenza del bacino.

Lo scheletro è stato rinvenuto essenzialmente completo, anche se il cranio risulta gravemente deformato a causa di una compressione *post mortem*. L'altezza del soggetto è stata calcolata basandosi sulle misurazioni di sei ossa lunghe ed è pari a 159,4 cm. Doveva trattarsi di un soggetto maschile adulto, di età matura.

Lungo la sutura coronale, tra il frontale e il parietale destro, è presente una depressione regolare legata a un episodio di trapanazione chirurgica effettuato attraverso la tecnica dell'abrasione. L'intervento si era reso necessario a causa di una ferita inflitta da una punta metallica. La cicatrizzazione della ferita testimonia una lunga sopravvivenza del soggetto all'operazione.

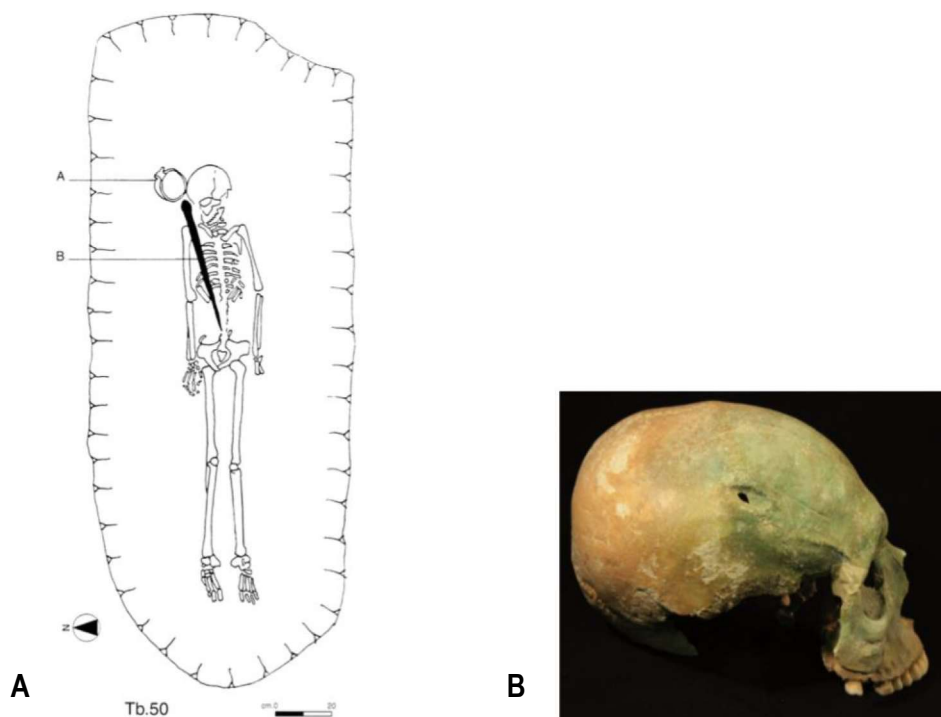


Fig. 5. 3 A) Planimetria della tomba 50; B) Visione laterale destra del cranio della tomba 50. Lungo la sutura coronale si può notare la depressione ellittica esito della trapanazione cranica.

Tomba 54

Area C

Settore D2

Sepoltura a inumazione in fossa rettangolare con angoli smussati, pareti verticali, fondo piatto, lunghezza di 2,5 m e larghezza di 1,30 m. Lo scheletro è stato rinvenuto a una quota inferiore di 110 cm rispetto al piano di calpestio attuale.

L'inumato era disteso con la testa reclinata sulla spalla destra e appoggiata su un piccolo ciottolo, le braccia lungo il corpo e le gambe convergenti unite in corrispondenza del ginocchio.

Il corredo era composto da una spada a lingua da presa di tipo *Boiu Ib* deposta sopra il braccio del defunto con l'impugnatura all'altezza del volto.

Lo scheletro non è completo, ma i vari distretti ossei appaiono comunque ben rappresentati. L'altezza del soggetto, calcolata sulle misurazioni di sette ossa lunghe, è risultata pari a 163,8 cm. Si trattava di un adulto maturo di sesso maschile.

Il cranio, di notevoli dimensioni, presenta diverse lesioni: una depressione ellittica sul lato sinistro del frontale, altre tre depressioni localizzate sulla parte posteriore del parietale sinistro. Due di queste presentano la perforazione della volta cranica, in tutte e tre le ferite è possibile riconoscere la cicatrizzazione del tessuto osseo che permette di ipotizzare la sopravvivenza del soggetto agli interventi di trapanazione chirurgica.

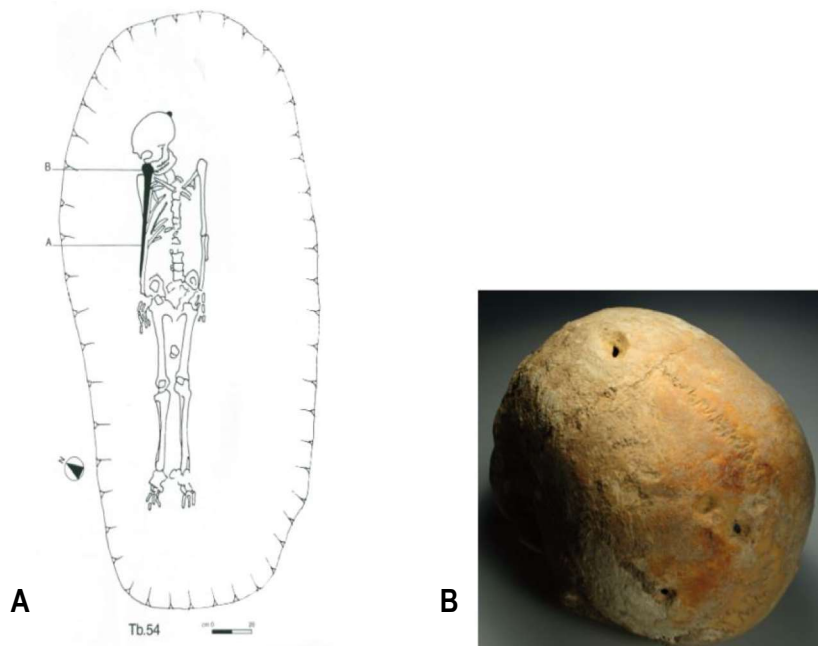


Fig. 5. 4 A) Planimetria della tomba 54; B) Visione occipitale del cranio della tomba 54. Si possono notare tre fori circolari sulla parte posteriore del parietale e uno ellittico sul lato sinistro del frontale.

6. La conca di Bressanone

La conca di Bressanone (BZ) è situata in Val d'Isarco, una delle vallate principali dell'Alto Adige, in corrispondenza della confluenza tra l'Isarco e la Rienza (Fig. 6.1). L'area è generalmente protetta dai venti freddi del nord, poiché si chiude a imbuto verso settentrione. Il fiume scorre verso sud attorniato da vaste terrazze di origine glaciale, costituite da grandi depositi di materiale morenico. Il fondovalle pianeggiante è oggi fittamente insediato, mentre permangono sui versanti aree solo parzialmente antropizzate, caratterizzate da uno sfruttamento agricolo o a prato/ pascolo, oppure da una densa copertura boschiva. Il piano montano inferiore è contraddistinto da boschi di pino silvestre; con l'aumentare dell'altitudine prevalgono gli abeti rossi, ma sono presenti anche il pino cembro e il larice.



Fig. 6. 1 Localizzazione della conca di Bressanone nell'ambito dell'arco alpino.

Durante l'età del Bronzo gli insediamenti sembrano concentrati a mezza costa, su terrazzi ben esposti, o sui piccoli colli che emergono dal fondovalle (PARNIGOTTO, 2010). Questa scelta locazionale oggi non può più essere semplicisticamente associata a necessità difensive, come in più occasioni sostenuto da Egger (1943), ma va letta in prospettiva diacronica nel quadro del popolamento, dello sfruttamento del territorio, dell'economia e dei contatti commerciali che caratterizzano le varie fasi dell'età del Bronzo e del Ferro atesine.

In particolare, devono quantomeno essere tenuti in considerazione la possibilità di sfruttare le risorse agro-ecologiche del paesaggio montano, per cui possiamo parlare di vera e propria silvicoltura, oltre che le potenzialità di controllo sulla viabilità valliva.



Fig. 6. 2 Visione dall'alto del colle su cui insiste il sito di Nössing (Bronzo Antico). Da PARNIGOTTO, 2001.

Per quanto riguarda l'antica e la media età del Bronzo, la conca di Bressanone pare interessata da un popolamento sparso, volto allo sfruttamento di diversi ambiti ecotonali. I siti abitativi individuati sono generalmente caratterizzati da estensioni piuttosto ridotte (fig. 6.2), che tuttavia dovevano interessare – anche se in modo non intensivo – un più ampio *near-site* adibito alla coltivazione e al pascolo. Nel quadro del popolamento dell'area, va inoltre considerata una possibile specializzazione degli insediamenti, anche in funzione economica, militare o di controllo. Tecchiati (2010) interpreta in tal senso alcune coppie di siti ubicati a controllo delle idrovie, delle strettoie o dei punti di passaggio obbligati nella conca di Bressanone e più in generale nel territorio atesino (Fig. 6.3).

Un aspetto di grande rilevanza, su cui tuttavia mancano ancora dati stringenti per una panoramica generale, è la stagionalità degli insediamenti d'altura, anche e soprattutto in relazione ad eventuali specifiche funzionalità economiche o strategiche. In questo senso solo studi di dettaglio che per ciascun contesto tengano in considerazione aspetti climatico-ambientali, locazionali, ma anche dati paleobotanici e archeozoologici potranno offrire un quadro complessivo della problematica.



Fig. 6. 3 Panoramica dell'area di Cornale. Da PARNIGOTTO, 2001.

A partire dalla tarda età del Bronzo, il numero di insediamenti ubicati nel fondovalle inizia a crescere. Pare particolarmente significativo che il progressivo avvicinamento alle grandi vie di comunicazione e di trasporto fluviali, che aprono da un lato verso la Val d'Adige e l'ambito padano e dall'altro verso il passo del Brennero e il mondo transalpino, avvenga tra il XIV e il X sec. a.C., in concomitanza la nascita e l'evoluzione della facies Luco/ Laugen, espressione prettamente locale la cui cultura materiale si trova poi diffusa dal Veneto alla Carinzia (DONADEL, 2012; MARZATICO, 2012). La frequentazione stabile del fondovalle deve avere presentato in prima istanza notevoli ostacoli naturali legati alla presenza di aree acquitrinose da bonificare, alla necessità di irreggimentare le acque onde evitare alluvioni in caso di piene e all'esigenza di contenimento dei versanti per evitare fenomeni franosi in occasione di eventi meteorologici di forte entità. La creazione di tali infrastrutture complesse va di pari passo con l'affermarsi di società sempre più articolate in grado di gestire e coordinare lavori su ampia scala: si potrebbe quasi dire che questo nuovo modello di sfruttamento del territorio procede nella stessa traiettoria evolutiva di quanto avviene nel mondo terramaricolo, pur calato nelle specifiche contingenze ambientali del mondo alpino.

Allo scorcio del II millennio la conca di Bressanone appare caratterizzata da un popolamento concentrato nelle fasce pianeggianti a ridosso del fondovalle, con un numero ridotto di abitati probabilmente da riferirsi a fenomeni di concentrazione e selezione dell'insediamento (PARNIGOTTO, 2010). Questa situazione sembra legata a una progressiva presa di coscienza delle potenzialità e delle problematiche del territorio,

associata a un miglioramento nella gestione delle risorse collettive e a uno sfruttamento differenziato dei diversi ambienti vallivi. L'assetto dell'area doveva essere esteso, a questo punto, sia in senso verticale che in senso orizzontale, con insediamenti di maggiori dimensioni lungo i pianori perifluviali e gruppi di abitazioni sparse lungo i pendii, associate a campi coltivati, fienili e recinti per il bestiame interconnessi da strade, sentieri e guadi.

Al principio dell'età del Ferro il numero degli abitati subisce una ulteriore, drastica contrazione, probabilmente associata anche a un calo demografico (TECCHIATI, 2010). Si formano in questo periodo abitati di maggiori dimensioni, da cui dipendono una serie di siti minori, temporanei, volti allo sfruttamento economico di una determinata nicchia ambientale o economica. È solo a partire dal VI sec. a.C., con l'affermarsi della facies Fritzens/Sanzeno, che si assiste alla ripresa dell'insediamento e alla creazione di veri e propri centri proto-urbani. A Bressanone particolare rilevanza rivestono i dati emersi dagli scavi archeologici in località Elvas, Stufles e Rosslauf, che permettono di inquadrare la presenza di strutture abitative seminterrate su modello retico, costruite prevalentemente in legno intonacato con la tecnica a *Blockbau*, circondate da coltivi e dunque inserite in un contesto produttivo (TECCHIATI, RIZZI, 2014). I rinvenimenti di beni di prestigio come il vasellame in bronzo, un'epigrafe in caratteri nord-etruschi, dei resti di botti probabilmente contenenti vino (Fig. 6.4) parlano di una società stratificata, con *élites* in grado di accumulare e detenere la ricchezza.



Fig. 6. 4 Bressanone, abitato in località Rosslauf. Le botti al momento dello scavo (da TECCHIATI, RIZZI, 2014).

Oltre a questi tre contesti, tutti coevi e probabilmente facenti capo a gruppi (parentelari?) diversi, il quadro insediativo della conca di Bressanone alle soglie del Secondo Ferro si caratterizza per la presenza di due ulteriori insediamenti posti al margine settentrionale (Sciaves) e meridionale (Albes) dell'area, probabilmente in funzione di controllo della viabilità, ma con marcata connotazione produttiva.

PARTE III: CASI DI STUDIO

CASE STUDY 1

Keywords: GeOBIA; LiDAR processing; Sky-View Factor; mappatura, quantificazione e monitoraggio delle evidenze belliche; Archeologia della Guerra; Primo Conflitto Mondiale.

7. I contesti di guerra

Tra maggio il 25 e il 28 maggio 1915, i Forti italiani di Verena e Campolongo (VI) hanno attaccato la fortificazione austriaca di Cima Campo in uno degli eventi più drammatici della Grande Guerra lungo la linea fortificata dell'altopiano di Vezzena/ Luserna/ Lavarone e Folgaria (Fig. 4.3).

Dopo tre giorni d'attacco senza sosta, il comandante Emanuel Nebesar si arrese, temendo l'esplosione dei depositi di carburante. La decisione fu respinta dalle altre fortificazioni austriache e dopo il gesto simbolico di un volontario che ritirò la bandiera bianca, Forte Luserna fu rioccupato dagli austriaci fino all'offensiva del maggio 1916, quando il fronte si spostò (HENTZSCHEL, 2008).

Numerose fonti storiche testimoniano l'enorme impatto del Primo Conflitto Mondiale nella zona, che fu completamente trasformata dalla costruzione di forti, trincee, baraccamenti e piazzole da artiglieria e dallo scoppio di svariate migliaia di cariche esplosive. Le Memorie di Augusto Tommasini (1923), funzionario presso il Tribunale di Guerra di Trento, parlano di "non meno di cinquemila proiettili [...], in particolare pezzi da 280".



Fig. 7. 1 Targa commemorativa posta sul memoriale nei pressi di Forte Cima Campo/ Luserna (TN).

Nella targa sul memoriale costruito nel 1918 (Fig. 7.1) nei pressi di Forte Luserna sono elencate le principali fasi di attacco, nonché il tipo e il numero di proiettili usati. Si legge: “dal 23 maggio 1915 al 20 maggio 1916 il forte ha subito 3 principali attacchi [...] ed è stato colpito con un totale di 200 proiettili da 30 cm, 8100 da 28 cm e circa 16000 da 15 cm”¹.

Ora, a cento anni di distanza, i resti materiali della Prima Guerra Mondiale si trovano a vari stadi dei processi post-deposizionali e post-abbandono, che coinvolgono una crescente perdita di informazioni e trasformazioni spaziali, fisiche e funzionali. Numerose fonti di impatto – dalla riforestazione, alla pedogenesi, dal saccheggio dei recuperanti alla creazione di infrastrutture turistiche – ostacolano il corretto riconoscimento delle evidenze belliche a tal punto che esse possono essere facilmente confuse con diversi elementi naturali o antropici. Tale superficie archeologica, già intrinsecamente fragile, è ora particolarmente “equivoca” e lo scenario di guerra deve dunque essere isolato, individuato, riconosciuto, valorizzato e protetto utilizzando le più avanzate pratiche scientifiche, intellettuali ed etiche.

Negli ultimi due decenni l'archeologia della Prima Guerra Mondiale ha iniziato a imporsi come un campo fiorente, come dimostra l'abbondante letteratura specializzata (per una panoramica generale si vedano, tra gli altri, SAUNDERS, 2002; NOVOTNY, 2009; NICOLIS *et alii*, 2011). Libri e riviste esprimono un crescente interesse per la cultura materiale (SAUNDERS, 2003; 2012), gli scavi archeologici e le ricognizioni di superficie (FRASER, BROWN, 2007; ROBERTSHAW, KENYON, 2008; DESFOSES *et alii*, 2009), l'antropologia fisica (JANKAUSKAS *et alii*, 2011; LE BAILLY *et alii*, 2012; GAUDIO *et alii*, 2013), le prospezioni geofisiche (MASTERS, STICHELBAUT, 2009) e il telerilevamento (STAL *et alii*, 2010; KAIMARIS, 2011; HESSE, 2014; GHEYLE *et alii*, 2016; MLEKUŽ *et alii*, 2016; STICHELBAUT *et alii*, 2016).

Quest'ultimo approccio, combinato a geofisica e *survey* a terra, sembra offrire le migliori opportunità per individuare, proteggere e monitorare il patrimonio della Prima Guerra Mondiale nella direzione del “*minimum tillage*” o di una politica di riduzione dell'impatto archeologico (“*no-collection policy*”).

I paesaggi contemporanei sono caratterizzati da un processo evolutivo complesso, le cui tracce palinestiche possono essere estremamente difficili da distinguere. Le tecniche di telerilevamento possiedono intrinseche capacità di *object/ pattern/ scenery recognition* e un

¹ Traduzione in italiano dall'originale tedesco “*Das Werk war in der Zeit von 23. Mai 1915 bis 20. Mai 1916 3 grossen Beschiessungen ausgesetzt. 1. Beschiessung 23. Mai 1915 bis 19. Juni 1915. 2. Beschiessung 15. Aug. 1915 bis 28. Aug. 1915. 3. Beschiessung 9. April 1916 bis 20. Mai 1916. In Summe fielen auf das Werk 200 – 30 cm, 8100 – 28 cm und zirka 16000 – 15 cm Geshosse*”.

potenziale predittivo e discriminatorio estremamente elevato che può contribuire a migliorare la comparabilità dei dati analitici, ridurre le tempistiche di elaborazione dei dati ed evitare errori e preconetti che possono influenzare la classica fotointerpretazione archeologica (HALLIDAY, 2013).

Le metodologie *object-based* sono sempre più frequentemente impiegate in campo teleosservativo proprio a questo scopo. Si darà dunque di seguito dato conto di due casi di studio di applicazioni OBIA all'ambito dell'Archeologia della Guerra: il primo focalizzato sull'identificazione delle tracce residuali delle infrastrutture belliche lineari oggi presenti nell'area denominata "ex trincee" (Fig. 7.2), mentre il secondo volto alla classificazione e alla quantificazione del numero di buche di bomba identificabili da dati LiDAR nell'area circostante a Forte Luserna.

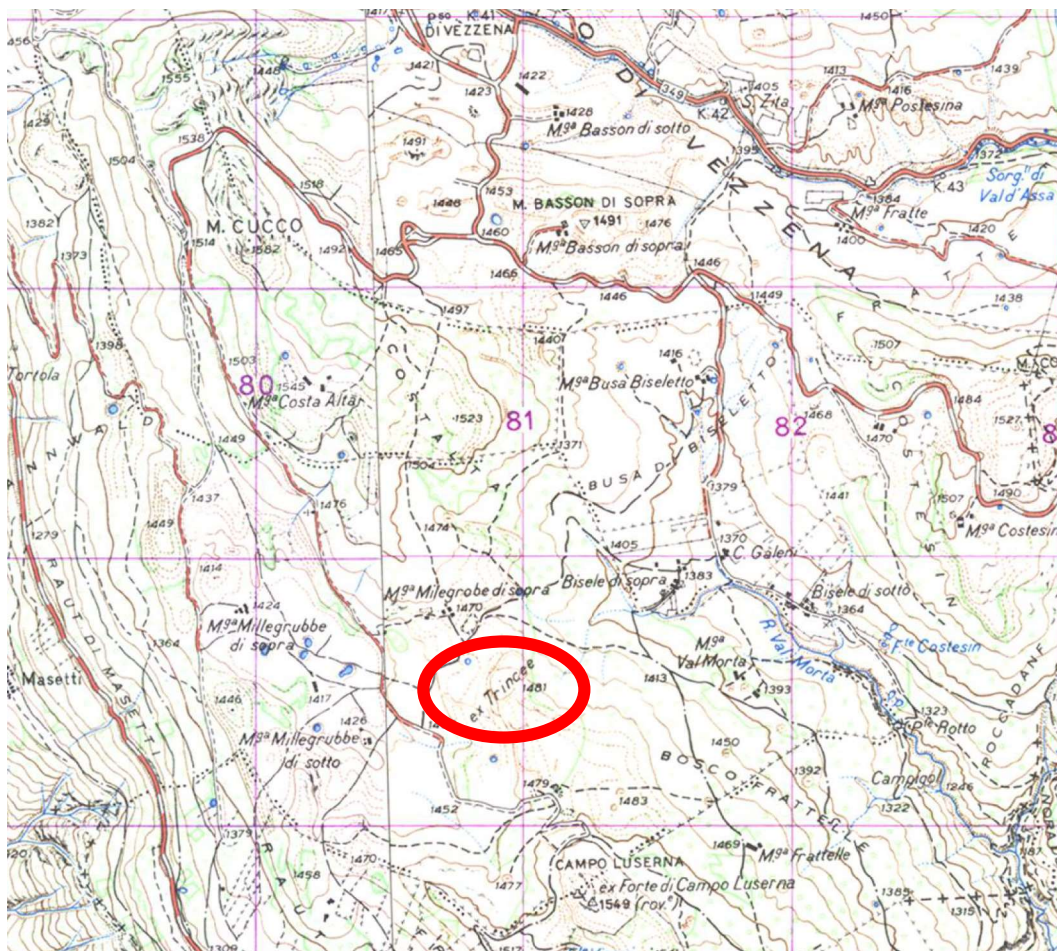


Fig. 7. 2 Carta Tecnica Regionale 1:10000 della Provincia Autonoma di Trento dell'area di indagine.

I dati LiDAR per questo studio sono stati acquisiti tra ottobre 2006 e febbraio 2008, con una griglia di celle 1x1 m, nel corso di una campagna di mappatura dell'intera Provincia di Trento (Fig. 7.3). Tutti i dati GPS sono basati sul sistema di coordinate UTM-WGS84. Il DTM

è liberamente disponibile sul Portale Cartografico della Provincia Autonoma di Trento con una licenza Creative Commons.

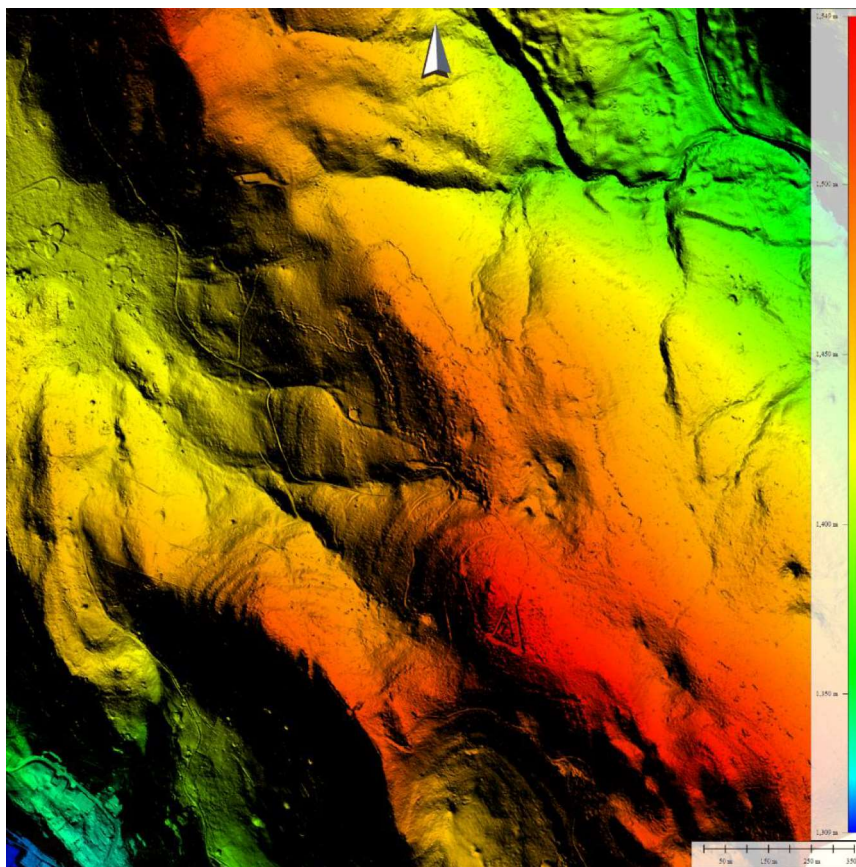


Fig. 7. 3 Modello digitale del terreno con risoluzione a 1 m dell'area di indagine.

7.1 *Riconoscimento automatico delle trincee*

7.1.1 *Descrizione delle features*

Le trincee sono uno degli elementi simbolo della Prima Guerra Mondiale e sono intrinsecamente legate a un'altra innovazione bellica di quel periodo, ovvero i bombardamenti su ampia scala. La costruzione di chilometri di trincee e i successivi bombardamenti hanno segnato in modo indelebile il paesaggio coinvolto. I comandi militari hanno ordinato durante i primi mesi di guerra lo scavo di linee di trincea continue per aree vastissime: tra il Canale della Manica e il confine svizzero, ad esempio, furono realizzati 760 km di trincee (KEEGAN, 1998).

Spesso, lo scavo di queste strutture durante le fasi iniziali della guerra ha intaccato un già presente e complesso palinsesto di evidenze archeologiche, talvolta con risultati anche

devastanti, come nel caso della trincea che corre lungo tutto il lato sud-est del sito protostorico del Bostel di Rotzo che ha asportato gran parte delle strutture presenti lungo i limiti dell'abitato (DE GUIO *et alii*, 2011) (Fig. 7.4). In altri casi, invece, esse hanno contribuito a esporre importanti finestre stratigrafiche che sono state sfruttate per lo studio di contesti sepolti altrimenti non individuabili (DE GUIO, BETTO, 2005).



Fig. 7. 4 Bostel di Rotzo, settore E: trincea della Prima Guerra Mondiale che ha intaccato la stratigrafia della seconda età del Ferro.

Alcuni tratti di trincee della Prima Guerra Mondiale sono stati ricostruiti, talvolta in maniera poco coerente con il percorso originale, per conservare la memoria del devastante impatto del conflitto sul territorio europeo. Salvo questi esempi di conservazione selettiva e “memorialista”, gran parte delle strutture in esame ha subito un graduale processo di obliterazione per cause naturali, in aree marginali e non ancora intaccate dall'urbanizzazione, e antropiche, soprattutto in zone ad alto sviluppo sociale ed economico. I diversi “stati di conservazione” delle trincee comportano uno sforzo maggiore per la mappatura attraverso metodologie di riconoscimento semi-automatico e lo studio si presenta ancor più impegnativo nel caso in cui diverse porzioni della stessa trincea presentino caratteristiche di residualità molto diversificate.

In origine, queste strutture si presentavano come lunghi e stretti fossati scavati nel terreno con forma a zig-zag, aventi dimensioni di circa due metri di profondità, altrettanto di larghezza e con un'estensione che poteva andare da pochi metri a diversi chilometri (BETTO, 2004); attualmente, però, queste caratteristiche sono solo parzialmente utilizzabili per mappare efficacemente tale tipologia di strutture a causa delle trasformazioni post-

deposizionali di cui si è precedentemente accennato. Inoltre, la presenza nell'area di indagine di evidenze con un alto grado di equifinalità come strade moderne, sentieri e mulattiere, obbliga a un approccio focalizzato non solo sulle caratteristiche morfologiche e formali ma anche su quelle di tipo relazionale.

7.1.2 Classificazione OBIA

L'area denominata "ex-trincee" si estende tra la strada che conduce a Malga Millegrobbe fino ai piedi del colle Cima Campo che ospita Forte Luserna. La zona è caratterizzata da un breve tratto di trincea "recuperata", ma attualmente comunque in uno stato di conservazione non ottimale, e dalla presenza di altri numerosi tratti di trincea in parte sepolti, in parte coperti dagli alberi e in parte visibili, nonché dalla forte presenza di buche di bomba. L'area si presenta inoltre per buona parte della sua estensione coperta da vegetazione boschiva.



Fig. 7. 5 Ortofoto del 1999 (CGR Parma), risoluzione 1 m. La freccia indica l'unica porzione di trincea visibile su ortofoto.

A causa di tali problematiche, la scelta del supporto da utilizzare è stata essenzialmente obbligata: si è optato per un DTM derivato da LiDAR con risoluzione a terra di 1x1m; In questo specifico caso, infatti, le ortofoto non forniscono alcun supporto in quanto la porzione di trincea non coperta dalla vegetazione è di estensione molto limitata (Fig. 7.5).

Considerata la morfologia concava della struttura, al modello digitale sono stati applicati i quattro trattamenti meglio in grado di evidenziare questa caratteristica. I primi due modelli realizzati sono stati rispettivamente l'*openness* positivo (Fig. 7.6 A) e quello negativo (Fig. 7.6 B) attraverso il software Saga GIS. I parametri selezionati sono piuttosto bassi per mettere in risalto strutture di dimensioni contenute. Così la dimensione del raggio è stata impostata su 20, mentre per il numero di settori su cui calcolare gli angoli è stato scelto il valore di 16.

Successivamente è stato creato un *Local Relief Model* (Fig. 7.6 C) con il software ArcGIS 10.2 utilizzando un filtro *low pass* circolare con, anche in questo caso, un raggio di 20 pixel. L'ultimo trattamento selezionato è lo *Sky-view Factor* (Fig. 7.6 D): si sono selezionati come parametri 20 di *maximum search radius* e 16 come numero di settori lungo cui effettuare le misurazioni. Anche in questo caso il software utilizzato è stato Saga GIS.

Su tre delle quattro elaborazioni selezionate (fa esclusione l'*openness* negativa), le aree facenti parte della trincea sono caratterizzate da un colore più scuro, che contraddistingue la natura concava della *feature*, e da una forma leggermente allungata.

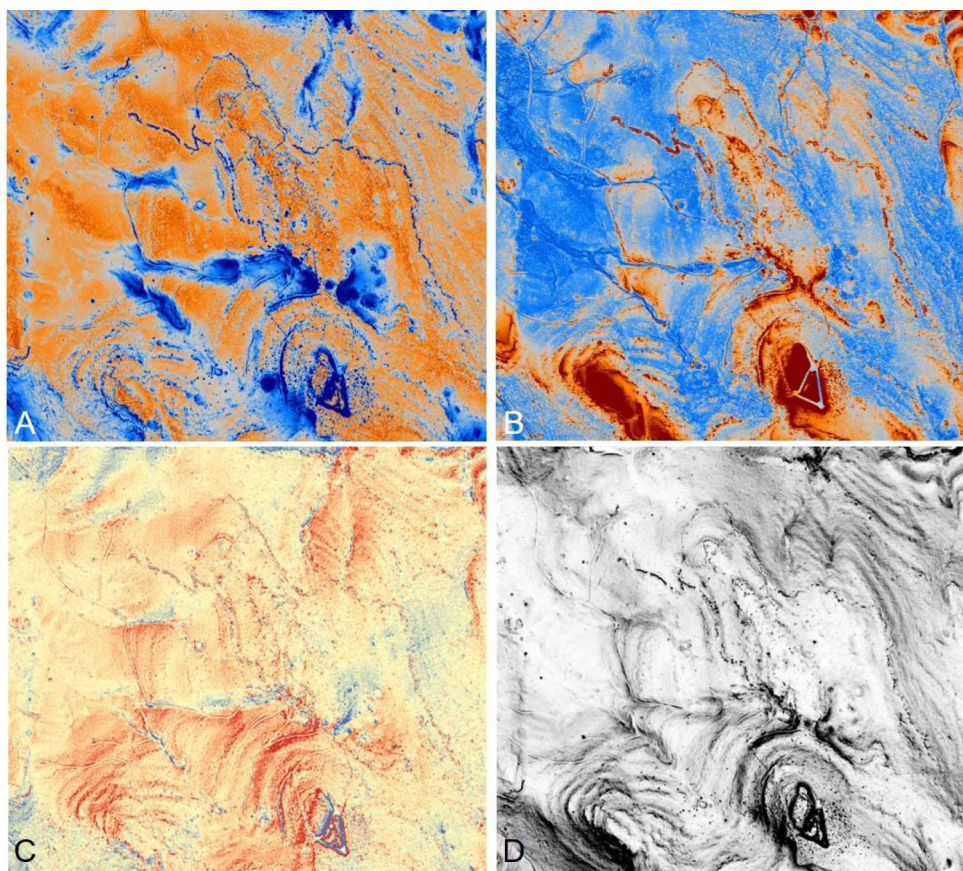


Fig. 7. 6 Area “ex-trincee”: A) *openness* positiva del DTM con risoluzione a 1 m; B) *openness* negativa del DTM con risoluzione a 1 m; C) *local relief model* del DTM con risoluzione a 1 m; D) *sky-view factor* del DTM con risoluzione a 1 m.

All'interno dell'areale studiato sono presenti pendii con marcate curve di livello e terrazzamenti. Queste evidenze non connesse col paesaggio di guerra si trovano localizzate solamente lungo gli acclivi, marginalmente rispetto alla località "ex-trincee", ma possono comunque confondere e alterare la classificazione. Si è così deciso di operare con un approccio *object-oriented* secondo la definizione data da Baatz e colleghi, ovvero alternare più fasi di segmentazione e di classificazione all'interno di uno stesso progetto per incrementare la precisione del risultato finale (BAATZ *et alii*, 2008). Così, una volta caricati i quattro supporti in ambiente eCognition Developer, è stata effettuata una prima segmentazione a multirisoluzione con un parametro di scala piuttosto ampio (250) seguita da una prima classificazione per isolare le aree acclivi non interessate dal trinceramento (Fig. 7.7 A). A tale scopo è stata data una minore rilevanza in fase di segmentazione ai *layer* dell'*openness*, che non permettono di visualizzare le pendenze (DONEUS, 2013), e è stato utilizzato il parametro luminescenza (*object feature "brightness"*), che viene calcolata facendo una media su tutti e quattro i *layer* caricati, per classificare aree di colore scuro e piuttosto ampie (Fig. 7.8).

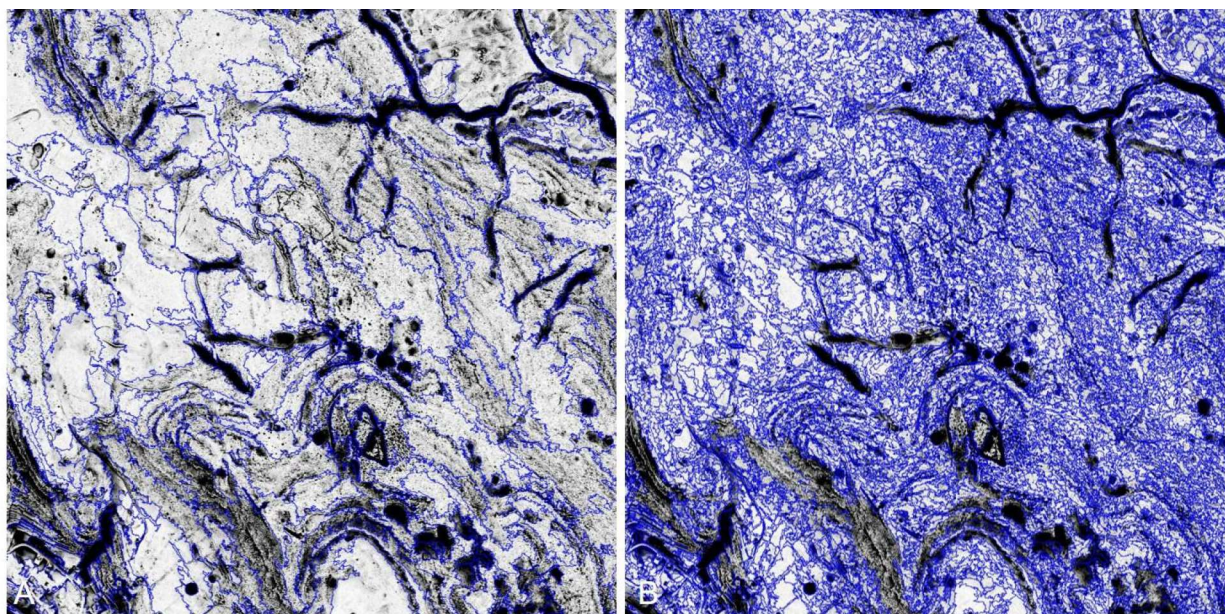


Fig. 7. 7 Area "ex-trincee", segmentazione a multirisoluzione dei 4 trattamenti in Fig. 7.6: A) parametro di scala 250; B) parametro di scala 40 sulle aree non in pendenza.

Una volta isolate le zone di pendio, è stata applicata una nuova segmentazione a multirisoluzione sulle aree pianeggianti, ovvero tutte le parti dell'immagine non classificate in precedenza. I parametri di questa seconda segmentazione sono stati settati in maniera diversa rispetto a quella precedente; innanzitutto il parametro di scala selezionato è molto più ridotto (40) per partizionare la scena in oggetti-immagine di dimensioni coerenti con le

misure dei segmenti di trincea (Fig. 7.7 B). Si è inoltre deciso di dare maggior peso in fase di segmentazione al *layer* dell'*openness* positiva rispetto alle altre tre elaborazioni in quanto quest'ultima era l'unica che mostrava un sufficiente dettaglio nel descrivere la trincea pur in diversi stati di conservazione.

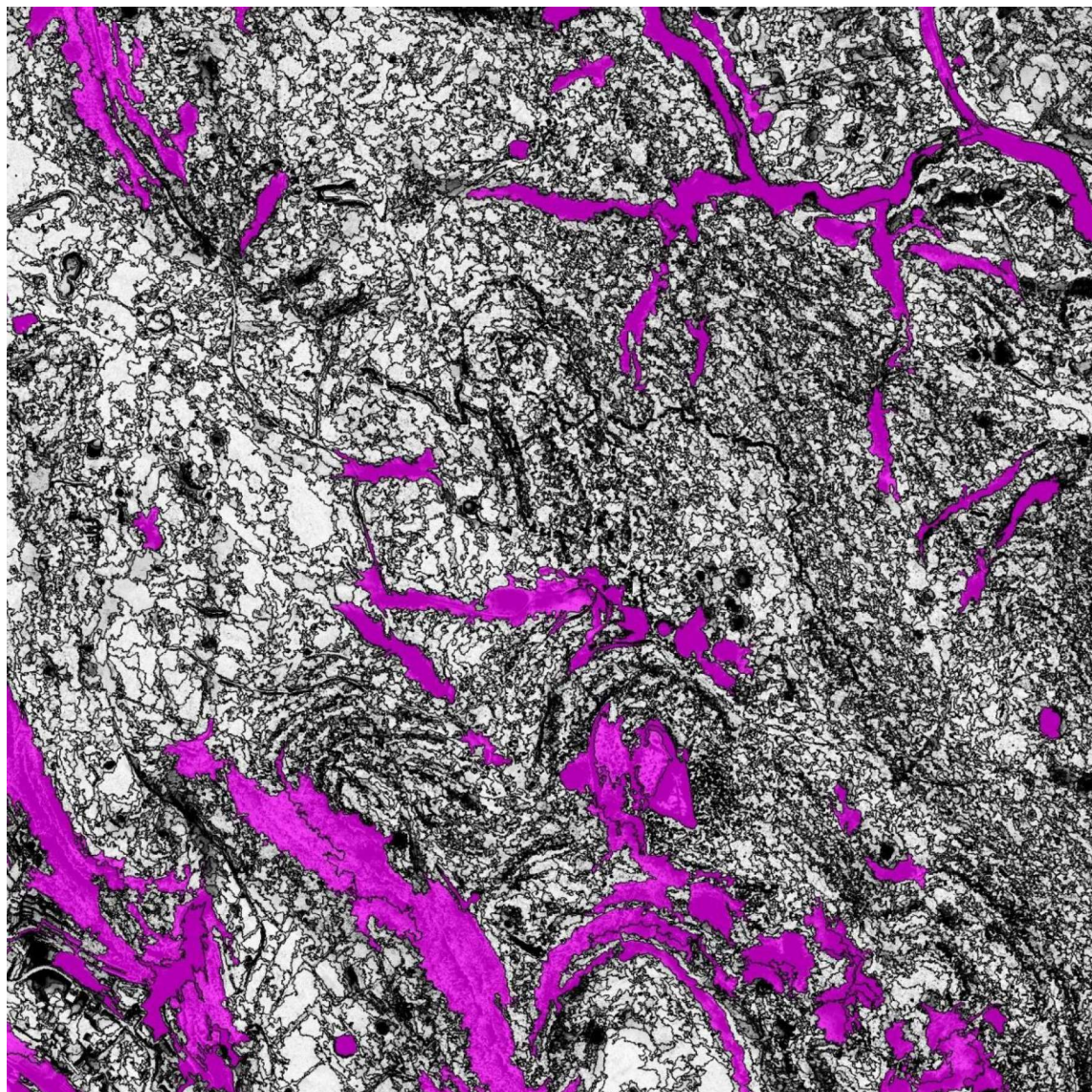


Fig. 7. 8 Area “ex-trincee”, classificazione preliminare delle morfologie topografiche con segmentazione a multirisoluzione: in viola le zone a pendio con parametro di scala a 250; le aree non classificate con parametro di scala a 40.

La prima caratteristica utilizzata per l'individuazione della trincea è legata alla morfologia concava della struttura stessa: così, sono stati ascritti alla classe “trincea” tutti gli oggetti-immagine che avessero valori compresi tra 1 e 47, pari al quinto più basso sul valore totale (242), sul *layer* dell'*openness* positiva (Fig. 7.9 A). Questo primo passaggio già di per sé permette di identificare in modo relativamente accurato il tracciato della trincea, ma le porzioni di pendio non totalmente escluse nella fase precedente, i limiti di alcune strade e

strutture moderne e alcune pozze d'alleggio rientrano ancora nella classificazione. Sebbene la trincea non conservi più la sua continuità strutturale originale, è stato comunque applicato un algoritmo di *merge region* per fondere insieme gli oggetti-immagine prossimali facenti parte della classe "trincea". Grazie a questa procedura, nel passaggio successivo è stato possibile escludere dalla classificazione gli oggetti che avessero un'area troppo grande per far parte della trincea. L'utilizzo dell'*object feature* "mean" sul *layer* dello *Sky-view factor* ha permesso di ridurre ulteriormente, all'interno della scena, i falsi positivi localizzati lungo le zone di pendio.

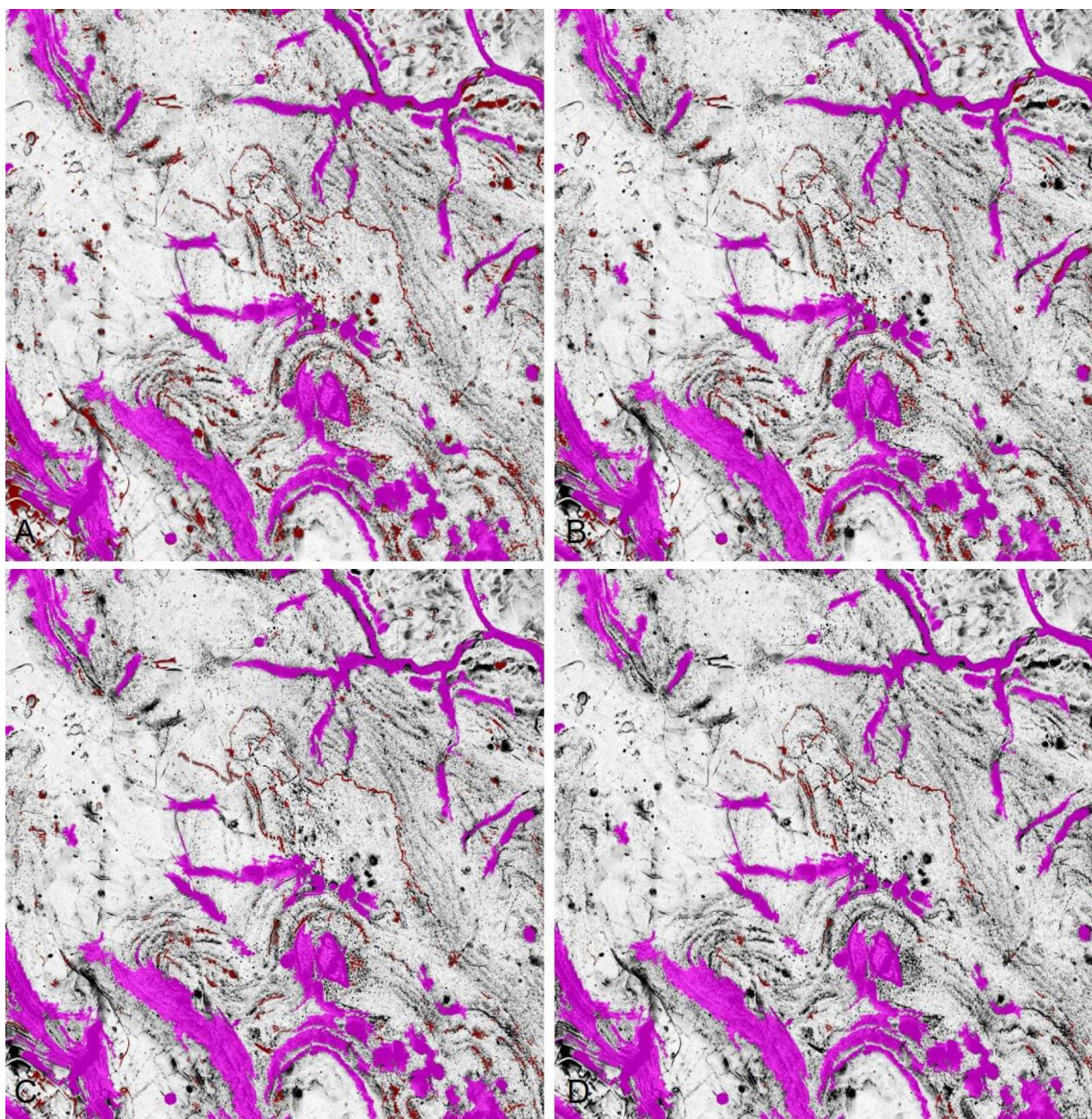


Fig. 7. 9 Area "ex-trincee". In viola le aree di pendio, in rosso processo di classificazione delle trincee con applicazione delle seguenti *object-features*: A) *mean* sul *layer* dell'*openness* positiva; B) *mean* sul *layer* dello SVF e roundness; C) deviazione standard sul *layer* dello SVF, distanza dalla classe "trincea" e distanza dalla classe "pendio"; D) *mean* sul *layer* del LRM.

In questo *rule set*, le pozze d'alpeggio di piccole/ medie dimensioni risultano anch'esse comprese nella classificazione poiché presentano caratteristiche comparabili a quelle finora considerate per l'individuazione delle trincee, ovvero un'area limitata e un profilo concavo. Per raffinare l'identificazione delle trincee è stato applicato l'*object feature* "roundness" per rimuovere dagli oggetti classificati quelli che avessero una rotondità piuttosto marcata: in questo modo si sono esclusi dalla classificazione gli oggetti-immagine relativi alle pozze d'alpeggio (Fig. 7.9 B). Successivamente è stata utilizzata la deviazione standard sul *layer* dello SVF per migliorare ulteriormente la classificazione, soprattutto in relazione alle zone acclivi. Se si osservano, infatti, gli oggetti-immagine realmente appartenenti alla trincea, si nota che essi appaiono internamente molto disomogenei sul *layer* dello SVF; per questa ragione la deviazione standard risulta più alta rispetto al valore medio su questo specifico *layer* (Fig. 7.10). In fase di segmentazione, infatti, i pixel sono stati aggregati dando maggior peso all'*openness* positiva, che permetteva di meglio definire il profilo della trincea. Lo SVF, invece, mostrava maggiori dettagli puntuali, ma non offriva una visione d'insieme adeguata per la classificazione della struttura. Gli oggetti-immagine classificati non pertinenti alla trincea hanno, però, maggiore omogeneità spettrale anche sul *layer* dello SVF poiché non presentano i dettagli e le discontinuità che tale visualizzazione mette in evidenza.

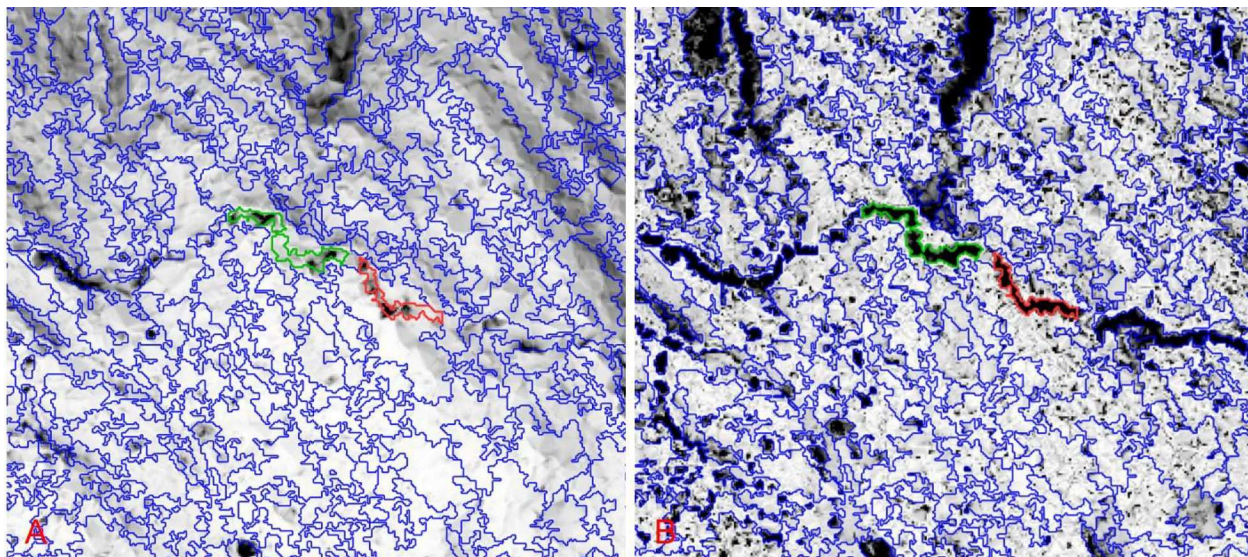


Fig. 7. 10 Confronto tra oggetti-immagine visualizzati sullo SVF (A) e quelli visualizzati sull'*openness* positiva (B). In verde e in rosso due porzioni di trincea.

I passaggi successivi hanno visto l'applicazione di *object features* di tipo relazionale tra oggetti-immagine. Originariamente, infatti, la trincea doveva essere una lunga struttura continua che si snodava per svariati chilometri in difesa del fronte. Oggi essa appare suddivisa in diversi segmenti generalmente poco distanziati che permettono, tuttavia, di

riconoscere l'andamento e il profilo. Il *rule set* ha tenuto in considerazione tale configurazione non continuativa, sfruttando per la classificazione il rapporto di vicinanza che intercorre tra gli oggetti-immagine appartenenti alla classe trincee. Lo stesso procedimento è stato applicato mettendo in relazione gli oggetti-immagine della classe “trincea” con quelli della classe “pendio” per assimilare a questa seconda classe eventuali zone scoscese (generalmente artefatti legate alle curve di livello dovute alla risoluzione del dato LiDAR di partenza) erroneamente classificate come trincee (Fig. 7.9 C). In seguito è stato possibile eliminare dalla classificazione *outliers* appartenenti a bordi di edifici moderni, di strade e di sentieri, andando a operare sul *layer* del LRM (Fig. 7.9 D).

Il passaggio finale, da considerarsi più come una pulizia del “rumore” dello specifico caso di studio piuttosto che facente parte del *rule set* vero e proprio, ha permesso di raffinare la classificazione operando sui *layer* dell'*openness* negativa e, nuovamente, su quella positiva e sul rapporto di vicinanza tra oggetti-immagine della classe “trincea” (Fig. 7.11).

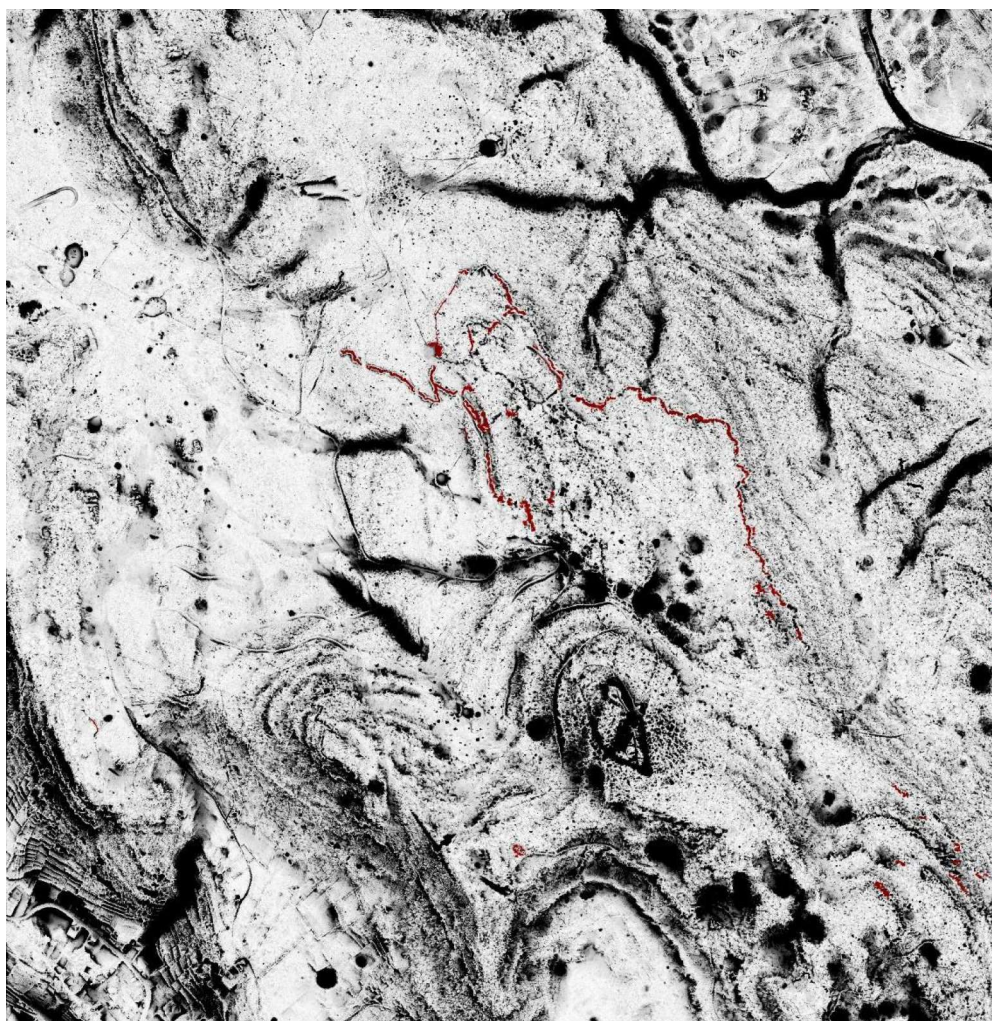


Fig. 7. 11 Area “ex-trincee”, in rosso classificazione finale della trincea.

7.1.3 Valutazione dei risultati

La procedura sopra descritta per la mappatura semi-automatica delle trincee fornisce da un lato un esempio efficace di utilizzo combinato di diverse tecniche di *remote sensing*. Dall'altro dimostra come l'individuazione automatica o semi-automatica di strutture archeologiche residuali risulti spesso complessa e poco immediata. A tal riguardo, la riapplicazione totalmente automatica dei *rule set*, così come pure l'utilizzo di modelli mentali semplici, sono ostacolati dalla necessità di confrontarsi con contesti i cui processi formativi hanno condizionato in maniera univoca e peculiare l'esito morfologico finale delle strutture. Nello specifico del caso di studio appena analizzato, una delle caratteristiche principali delle trincee è il loro alto rapporto di lunghezza/ larghezza, poiché esse sono strutture generalmente lunghe e con una larghezza piuttosto ridotta. In questo caso di studio, tuttavia, non è stato possibile sfruttare l'*object feature* specifica offerta dal software (*length/ width*) a causa dell'irregolarità di alcuni tratti di trincea, soprattutto nelle zone di intersezione da cui si dipartono più rami in direzioni opposte (Fig. 7.12).

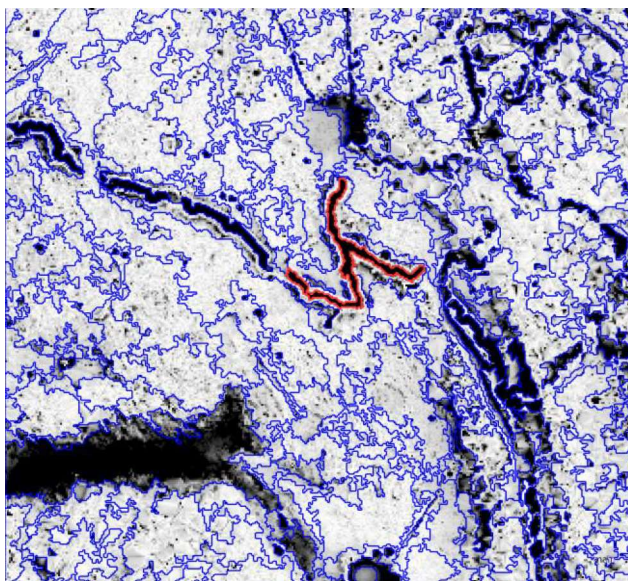


Fig. 7. 12 Area “ex-trincee”, in rosso si evidenzia una porzione di trincea con rapporto lunghezza/ larghezza basso (valore 1,016).

I controlli a terra effettuati nel maggio 2015 hanno permesso di valutare le differenze morfologiche tra i diversi segmenti di trincea nella zona più occidentale dell'areale indagato, sia in campo aperto sia al di sotto della coltre vegetazionale. Dalla ricognizione è stato possibile distinguere tre diversi stati di conservazione, apprezzabili anche se solo parzialmente nelle elaborazioni LiDAR. Il primo gruppo, situato nell'area più occidentale interessata dai controlli, comprende pochi segmenti di trincea “restaurata” in campo aperto

per una lunghezza complessiva intorno ai 200 m. È l'unica porzione visibile chiaramente anche da fotografie aeree e, sebbene verta in uno stato di abbandono, conserva le caratteristiche morfologiche e dimensionali tipiche dell'evidenza che risultano ben riconoscibili anche sul modello digitale. Anche la seconda tipologia si sviluppa in campo aperto ma, non essendo restaurata ed essendo per buona parte riempita di materiale di risulta, conserva solamente un piccolo dislivello morfologico apprezzabile sia sul campo che sul modello digitale. Questo tratto si localizza lungo una fascia nord-sud tra la prima e la terza porzione di trincea per una lunghezza di circa 150 m; da remoto è individuabile grazie alla regolarità del suo andamento. Il terzo segmento, interamente coperto da una vegetazione non eccessivamente fitta, è il più esteso e corre in due direzioni per una lunghezza di diversi chilometri. Il primo ramo parte dal vertice più orientale della prima categoria e si sviluppa in direzione nord/ nord-ovest sud/ sud-est verso il crinale settentrionali di Forte Cima Campo. Il secondo ramo, sempre direzionato nord-ovest sud-est, comincia in corrispondenza del vertice più settentrionale del secondo tratto e corre lungo tutta l'area pianeggiante a difesa del forte. Entrambi i rami presentano le stesse caratteristiche morfologiche, anche se il controllo a terra ha interessato solo limitati segmenti di ogni ramo. Si tratta di porzioni di trincea non intenzionalmente obliterate di cui restano visibili, sia da terra che da remoto, solo le parti non interessate dalla presenza di vegetazione. In generale questi frammenti di trincea hanno una lunghezza media minore rispetto a quelli degli altri due gruppi e una profondità piuttosto variabile.

Anche in condizioni molto diversificate, l'efficacia ricognitiva dei dati LiDAR al di sotto della copertura boschiva, i trattamenti specifici per aumentare la visibilità delle evidenze morfologiche e l'approccio *object-oriented*, hanno consentito una mappatura rapida, efficace e conforme al modello mentale proposto dall'operatore, riducendo al minimo *bias* ed errori di interpretazione soggettivi.

7.2 Riconoscimento automatico e quantificazione delle buche di bomba

7.2.1 Descrizione delle features

In riferimento alla definizione proposta da Passmore e colleghi (2014), Millegrobbe e l'area intorno a Forte Luserna possono essere descritte come "*landscapes of bombing*", ovvero "paesaggi di bombardamenti". Depressioni derivanti da colpi di artiglieria e mortaio

sono, infatti, una delle morfologie che caratterizzano la zona. La posizione, il numero e le dimensioni delle buche di bomba sono elementi chiave per definire l'estensione del campo di battaglia e per monitorare la conservazione del *warscape* locale.

Tuttavia, nonostante le loro caratteristiche peculiari, i crateri da artiglieria possono essere facilmente fraintesi su immagini da remoto a causa della loro somiglianza con altre depressioni circolari tipiche degli ambienti montani, come ad esempio *trous avec monticules* (legati allo sradicamento degli alberi), pozze d'alpeggio, resti di carbonaie abbandonate, ghiacciaie e doline (DE GUIO *et alii*, 2013).

Nel tentativo di identificare un metodo di classificazione automatica, era necessario selezionare dei parametri che fossero in grado di descrivere specificamente le depressioni circolari legate alla guerra. A questo proposito, abbiamo considerato i risultati di una serie di indagini sul campo focalizzate su più di un centinaio di buche di bomba della Grande Guerra sul massiccio del Grappa (Prealpi Venete, Italia). Il lavoro prendeva in considerazione diametro massimo, massima profondità (circa tra 0,5 a 2 m) e differenza di livello tra le due estremità; questi valori sono stati misurati, tabulati e confrontati per ottenere una classificazione generale delle evidenze analizzate (CELI, 1991). In particolare, l'autrice ha proposto una suddivisione sulla base del diametro massimo: 1) inferiore a 2 m; 2) dai 2 ai 5 m; 3) tra 5 e 10 m (con rare eccezioni di 15 m).

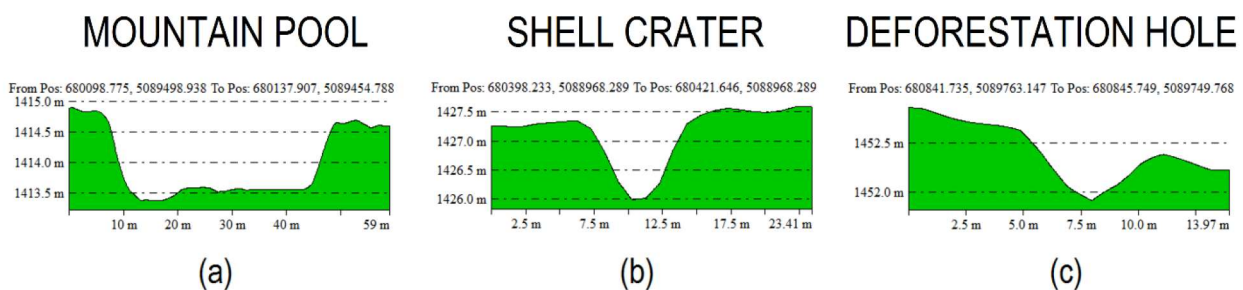


Fig. 7. 13 Sezioni di (a) pozza d'alpeggio, (b) buca da bomba, (c) *trous avec monticules* presenti nell'area di indagine.

Hupy e Schaetzl (2006; 2008) riportano risultati simili nel loro studio sulla "*bombturbation*", una forma di disturbo del suolo derivata dall'impatto di munizioni esplosive. In particolare, essi registrano una correlazione tra calibro dei proiettili e dimensioni delle depressioni risultanti, precisando che i proiettili da 70 mm producono crateri di meno di 1 metro di diametro, mentre munizioni con calibro di 420 mm possono creare depressioni larghe anche 10 metri e profonde svariati metri. Le buche di bomba della Prima Guerra

Mondiale possono dunque essere discriminate dalle altre depressioni circolari presenti nel territorio montano sulla base di questi valori.

Tutte le altre evidenze simili, infatti, sono generalmente caratterizzate da dimensioni, profondità o sezione diversi (Fig. 7.13): le pozze d'alpeggio hanno un fondo piatto e un diametro variabile tra 7 e 60 m, ma solitamente compreso tra 10 e 30 m. I resti di carbonaie sono anch'essi piatti, ma profondi solo 20-30 cm, mentre ghiacciaie possono raggiungere 2 o addirittura 3 m di profondità, ma sono generalmente piuttosto strette per conservare costante la temperatura all'interno.

I *trous avec monticules* sono spesso simili alle buche di bomba in termini di dimensioni, ma presentano del terreno di ributta (solitamente verso valle) creato durante lo sradicamento dei ceppi. Viceversa, le buche di bomba hanno un cordolo perimetrale prodotto dallo spostamento del materiale espulso al momento dell'impatto, ma in questo caso il bordo è relativamente concentrico e di larghezza uniforme.

Doline e inghiottitoi, d'altra parte, sono molto difficili da riconoscere dai crateri di origine bellica. Celi (1991) e Sauro (1993) hanno infatti dimostrato che oltre il 50% delle buche di bomba situate in ambienti carsici stanno attivamente evolvendo in doline.



Fig. 7. 14 Sky-view factor (*maximum search radius 10 m; number of search directions 8*) del DTM con risoluzione di 1 m dell'area di indagine.

7.2.2 Classificazione OBIA sull'area test

La classificazione di geo-oggetti su immagini telerilevate è una questione di modelli mentali e di esperienza. I dati di letteratura discussi nella sezione precedente sono stati il punto di partenza per identificare le *object-features* più adatte a caratterizzare e dunque identificare le buche di bomba.

Un primo esperimento di classificazione è stato eseguito su un'area test in località Millegrobbe (0.6x0.6 km, Fig. 7.15 A).

Lo SVF è stato calcolato usando l'algoritmo presente sul software SagaGIS (BÖHNER et alii, 2006; BÖHNER, ANTONIC, 2009). Considerata la dimensione relativamente piccola delle evidenze di interesse (cfr. sopra), si è deciso di impostare un *maximum search radius* basso con valore di 10 m (ovvero nel caso specifico 10 pixel). Secondo quanto suggerito da Zakšek e coautori (2011), abbiamo inoltre scelto un parametro di 8 per il *number of search directions* (Fig. 7.14). Come già ricordato, la visualizzazione SVF crea un'immagine in scala di grigi, in cui il nero corrisponde a nessuna visibilità e il bianco alla visibilità di tutto l'emisfero celeste sovrastante (ZAKŠEK et alii, 2011). In questo tipo di visualizzazione, le buche di bomba spiccano come puntini di colore grigio scuro o nero, di dimensioni medio-piccole.

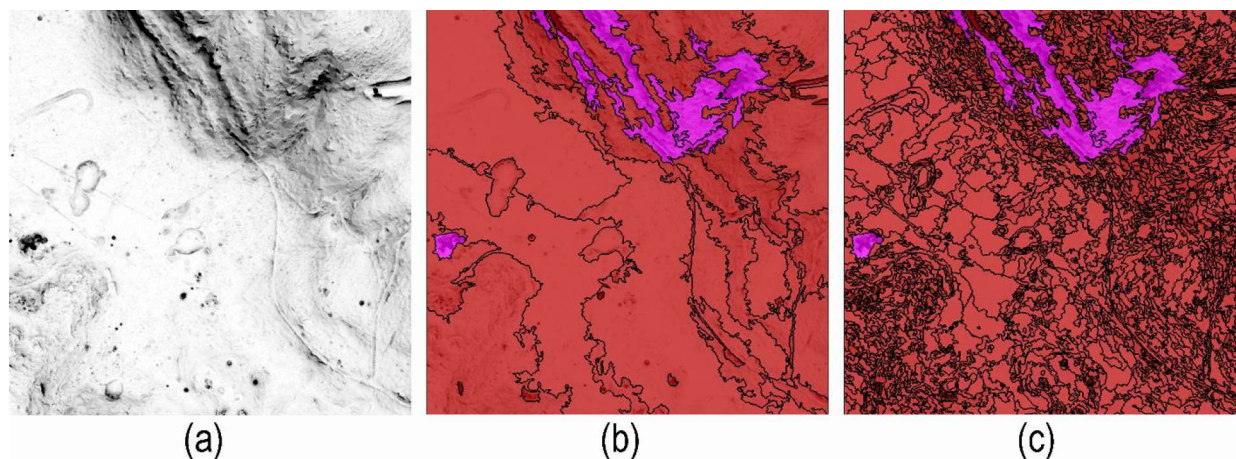


Fig. 7. 15 Millegrobbe: A) *sky-view factor*; B) classificazione preliminare della morfologia con segmentazione a multirisoluzione, parametro di scala 200. In rosso la classe "campo aperto"; in viola la classe "pendio"; C) classificazione preliminare della morfologia con segmentazione a multirisoluzione con differenti parametri di scala. In rosso la classe "campo aperto" con parametro di scala di segmentazione 20; in viola la classe "pendio" con parametro di scala di segmentazione 200.

Anche le zone di pendenza sono caratterizzate dalla presenza di oggetti immagine simili a causa del riconoscimento delle curve di livello in relazione alla risoluzione dei dati LiDAR di partenza. In quelle zone, la fitta vegetazione ha anche creato una maggiore concentrazione di artefatti che potrebbero compromettere la corretta classificazione. Al fine

di evitare interpretazioni errate, si è innanzitutto operata una classificazione generale delle pendenze e delle aree piane. A questo scopo, è stata utilizzata una segmentazione a multirisoluzione con un parametro di scala elevato (200) e impiegato le proprietà spettrali e dimensionali degli oggetti-immagine per selezionare quelli che avessero contemporaneamente bassi valori di “*mean*” sul *layer* dello *sky-view factor* (ovvero una pendenza elevata) e un’area piuttosto ampia. In questo modo, sono stati classificati i grandi oggetti-immagine scuri come “pendenze” e tutto il resto come “campo aperto” (Fig. 7.15 B; 7.16 B).

In seguito è stato impiegato un secondo livello di segmentazione sulla classe “campo aperto” con un parametro di scala 20, per ottimizzare la definizione degli oggetti-immagine in base alle necessità della ricerca (Fig. 7.15 C; 7.16 C). Anche per questa seconda parte del progetto è stato scelto l’algoritmo di segmentazione a multirisoluzione incluso nel software eCognition Developer 9.2 (Trimble Navigation Ltd). La selezione dei parametri di segmentazione è stata basata su un processo *trial and error* riferito a un gruppo di depressioni inequivocabilmente identificate al suolo come buche di bomba. Come risultato di queste prove, sono stati applicati i seguenti valori: scala 20, *shape* 0.1, *compactness* 0,5 (Fig. 7.16). L’uso di un parametro di scala basso è giustificato dalla piccola dimensione delle strutture da identificare e per evitare una ulteriore sotto-segmentazione della scena.

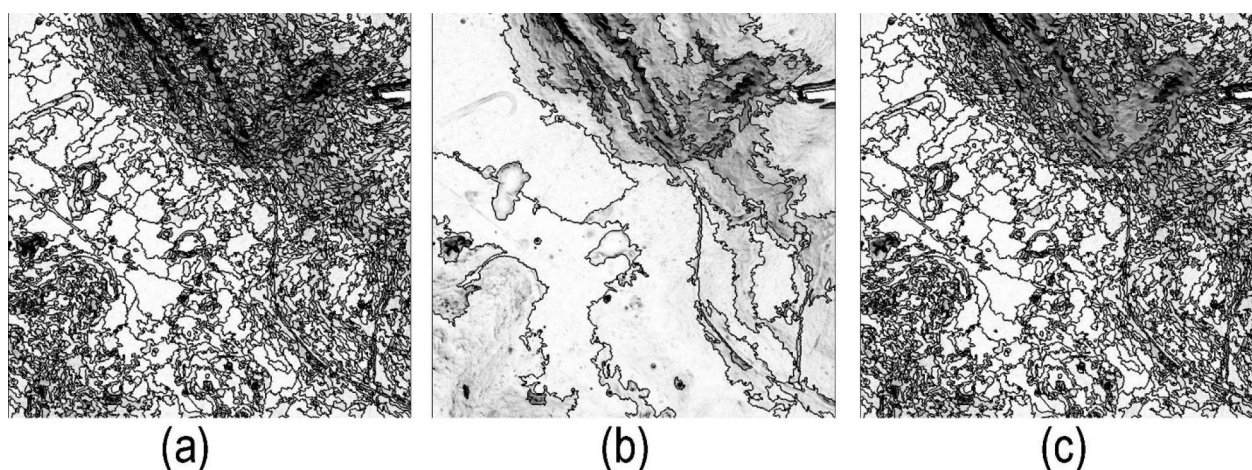


Fig. 7. 16 Millegrobbe, segmentazione a multirisoluzione con vari parametri di scala: A) 20, B) 200; C) 200 per le zone acclivi e 20 per le aree in campo aperto.

Successivamente, sono state impiegate *features* formali e morfologiche per identificare la classe “buche di bomba”. La caratteristica forma circolare è uno dei parametri di identificazione più efficienti per depressioni legate alla guerra, quindi abbiamo impiegato l’*object-feature* “*roundness*” nel primo *step* di classificazione (Fig. 7.17 A). Considerata la dimensione media dei crateri da artiglieria, si è successivamente optato per la *feature* “*area*”

per rimuovere dalla classe “buche di bomba” tutti gli oggetti di dimensioni non conformi all’indagine. Nonostante l’ampia variabilità del raggio delle buche di bomba, abbiamo scelto un valore soglia per l’area di 81 metri quadrati (diametro di circa 10 m) per evitare una parziale sovrapposizione con le pozze d’alpeggio (Fig. 7.17 B). Inoltre, è stata impiegata l’*object feature* “*length/ width*” (rapporto tra lunghezza e larghezza) per eliminare gli oggetti-immagine allungati che non sono relazionati allo scenario di guerra (Fig. 7.17 C). Infine, è stato utilizzato l’algoritmo “*merge region*” per fondere gli oggetti-immagine prossimali classificati e, successivamente, è stata ripetuta l’intera sequenza di *object-features* finora applicate variando leggermente i parametri di *roundness* e di *length/ width* per raffinare ulteriormente il *rule set* (Fig. 7.17 D).

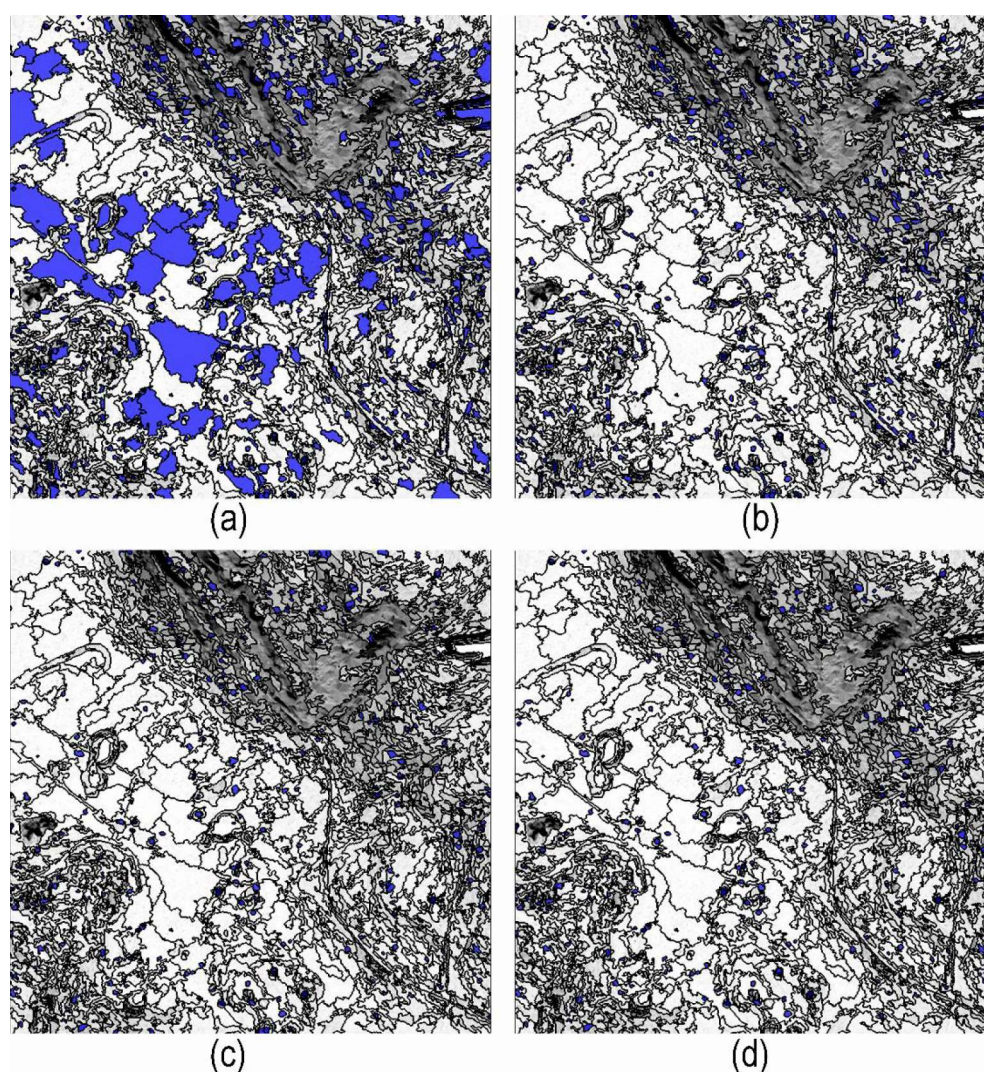


Fig. 7. 17 Millegrobbe, processo di addestramento della classificazione per il riconoscimento delle “buche di bomba” (in blu). Applicazione delle *object features*: A) *roundness*, B) *area*, C) *length/ width*, D) classificazione finale.

A questo punto sono stati classificati con successo 263 oggetti-immagine su un totale di 1699 come possibili buche da bomba. I parametri utilizzati nel progetto sono riassunti in tabella 7.1.

<i>Multiresolution segmentation: scale 200, shape 0.1, compactness 0.5</i>		
Object feature	Value	Class
1 mean Level 1	≤ 139	SLOPE
2 area Level 1	> 620 pixel	
3 unclassified		OPEN FIELD
<i>OPEN FIELD multiresolution segmentation: scale 20, shape 0.1, compactness 0.5</i>		
Object feature	Value	Class
4 OPEN FIELD, roundness	≤ 1	shell CRATERS
5 SHELL CRATERS, area	≥ 81 pixel	unclassified
6 SHELL CRATERS, lenght-width	> 1.751	unclassified
<i>shell CRATERS merge region</i>		
Object feature	Value	Class
7 SHELL CRATERS, lenght-width	> 1.751	unclassified
8 SHELL CRATERS, roundness	> 1.093	unclassified
9 SHELL CRATERS, area	≥ 95 pixel	unclassified

Tab. 7. 1 Valori dei parametri di segmentazione e di classificazione per il *rule set* "buche di bomba" proposto.

7.2.3 Esportazione del rule set

Successivamente, è stato applicato automaticamente il set di regole di cui al paragrafo precedente su un'area di circa 4 chilometri quadrati che comprende Cima Campo, Bisele e Millegrobbe (Fig. 7.18; 7.19 e 7.20).

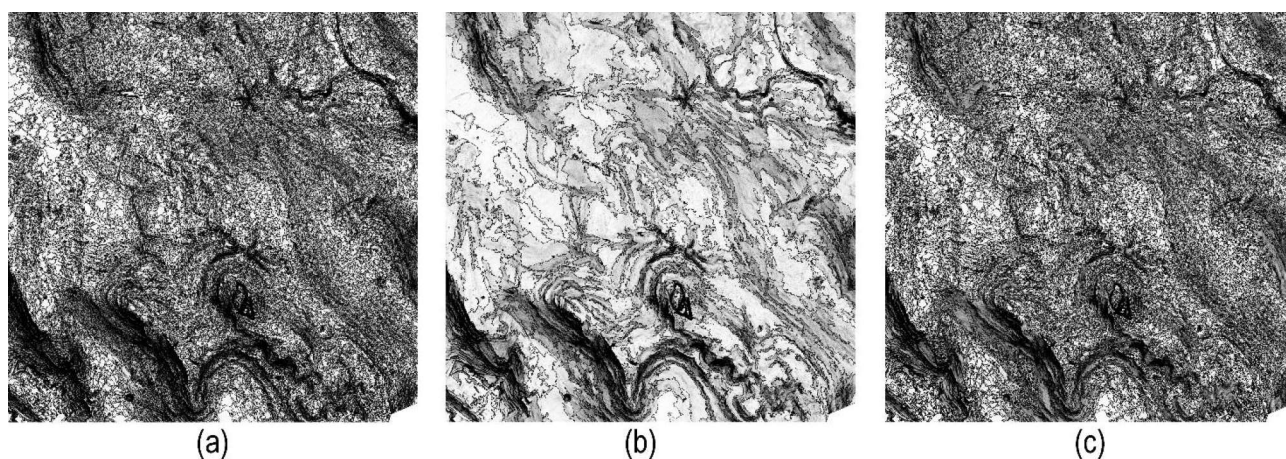


Fig. 7. 18 Area d'indagine completa, segmentazione a multirisoluzione con vari parametri di scala: A) 20, B) 200; C) 200 per le zone acclivi e 20 per le aree in campo aperto.

Il processo ha portato all'identificazione di circa 3700 possibili buche di bomba, su un totale di 22751 oggetti-immagine (Fig. 7.20).

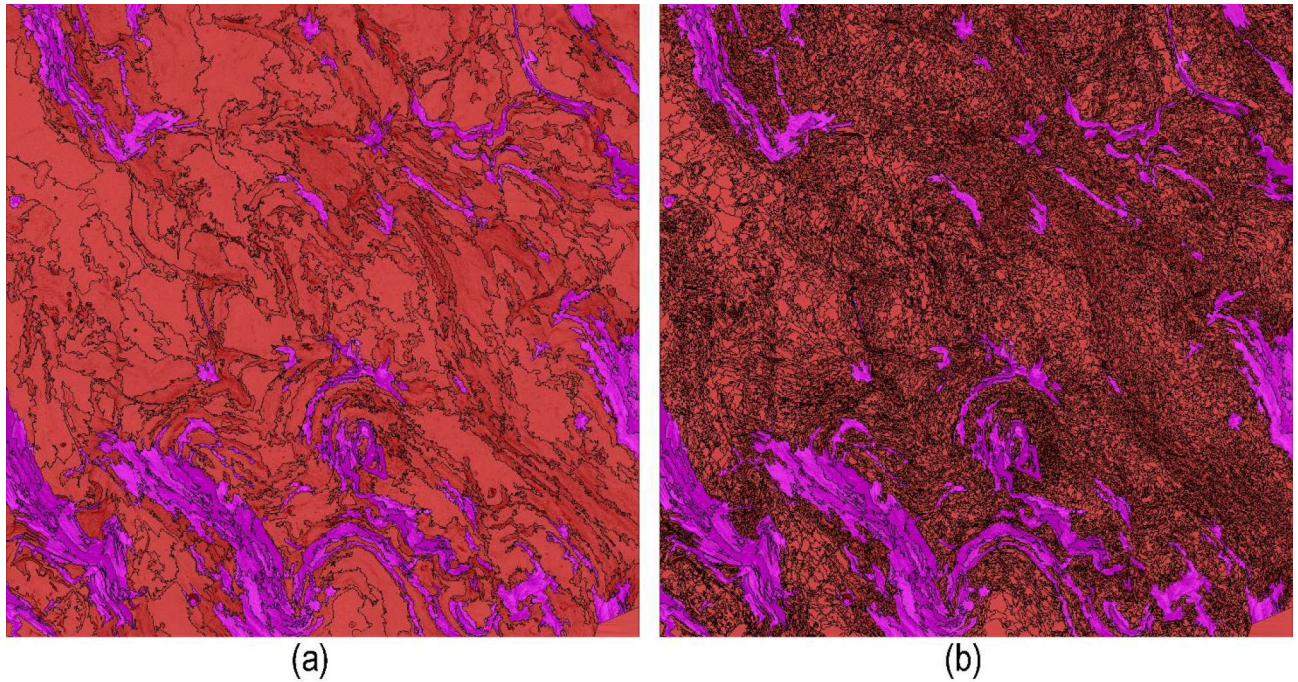


Fig. 7. 19 Area d'indagine completa: A) classificazione preliminare della morfologia con segmentazione a multirisoluzione, parametro di scala 200. In rosso la classe "campo aperto"; in viola la classe "pendio"; B) classificazione preliminare della morfologia con segmentazione a multirisoluzione con differenti parametri di scala. In rosso la classe "campo aperto" con parametro di scala di segmentazione 20; in viola la classe "pendio" con parametro di scala di segmentazione 200.

La possibilità di trasferire un sistema di classificazione da una zona ad un'altra è problematico, dal momento che diversi sensori, dati di partenza, procedure di processamento e caratteristiche ambientali possono impedire la comparabilità dei dati risultanti. Tuttavia, è possibile applicare le stesse regole di classificazione in areali simili o all'interno della stessa area nel tempo, qualora i dati grezzi e il protocollo analitico siano coerenti: è un passaggio cruciale in termini di risparmio di tempo e di potenzialità nel monitoraggio del paesaggio. Questo tipo di automazione controllata è particolarmente utile quando si lavora su progetti ad ampia scala, perché accelera il processo di rilevazione delle caratteristiche e supporta la relativa fotointerpretazione.

Nel nostro caso, la possibilità di applicare lo stesso insieme di regole in futuro sarà di fondamentale importanza per monitorare la progressiva trasformazione in termini di dimensioni e quantità delle buche di bomba residue, oltre che per individuare strategie per preservare il labile patrimonio della Prima Guerra Mondiale.

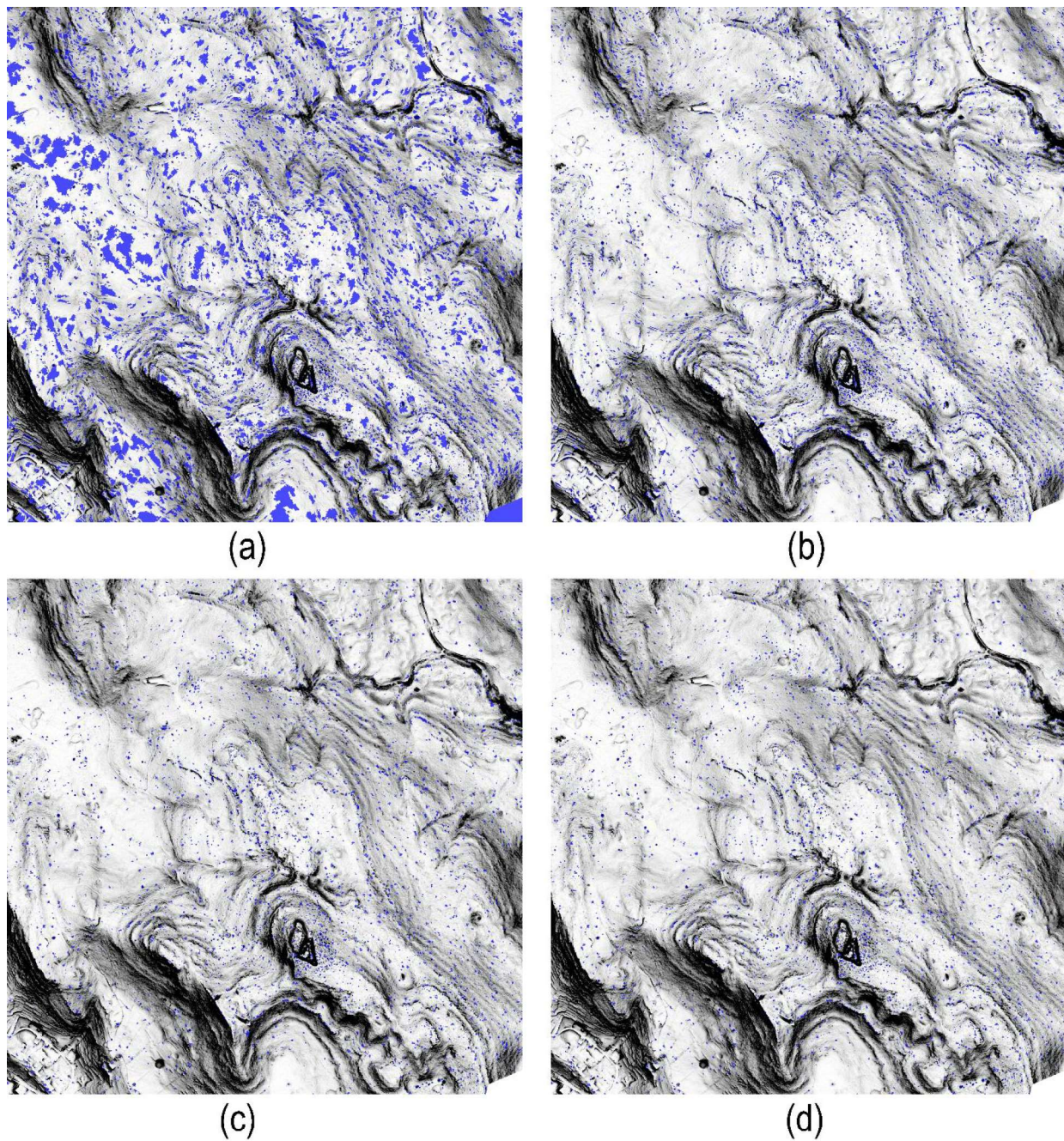


Fig. 7. 20 Area d'indagine completa, applicazione automatica del *rule set* per il riconoscimento delle "buche di bomba" (in blu). *Object features* impiegate: A) *roundness*, B) *area*, C) *length/ width*, D) classificazione finale.

7.2.4 *Controllo sul campo*

Due regioni campione dell'area analizzata sono state indagate tramite ricognizioni sistematiche al suolo allo scopo di valutare l'affidabilità del metodo (Fig. 7.21). Il controllo a terra ha avuto luogo nel maggio 2015 e ha monitorato tutte le buche di bomba all'interno

delle aree test. Tutti i crateri da artiglieria, sia quelli identificati automaticamente tramite OBIA, sia quelli non riconosciuti dal nostro set di regole, sono stati mappati e misurati. Il lavoro sul campo ha permesso anche di scartare un piccolo gruppo di oggetti-immagine classificati, ma che non corrispondevano a vere buche di bomba.

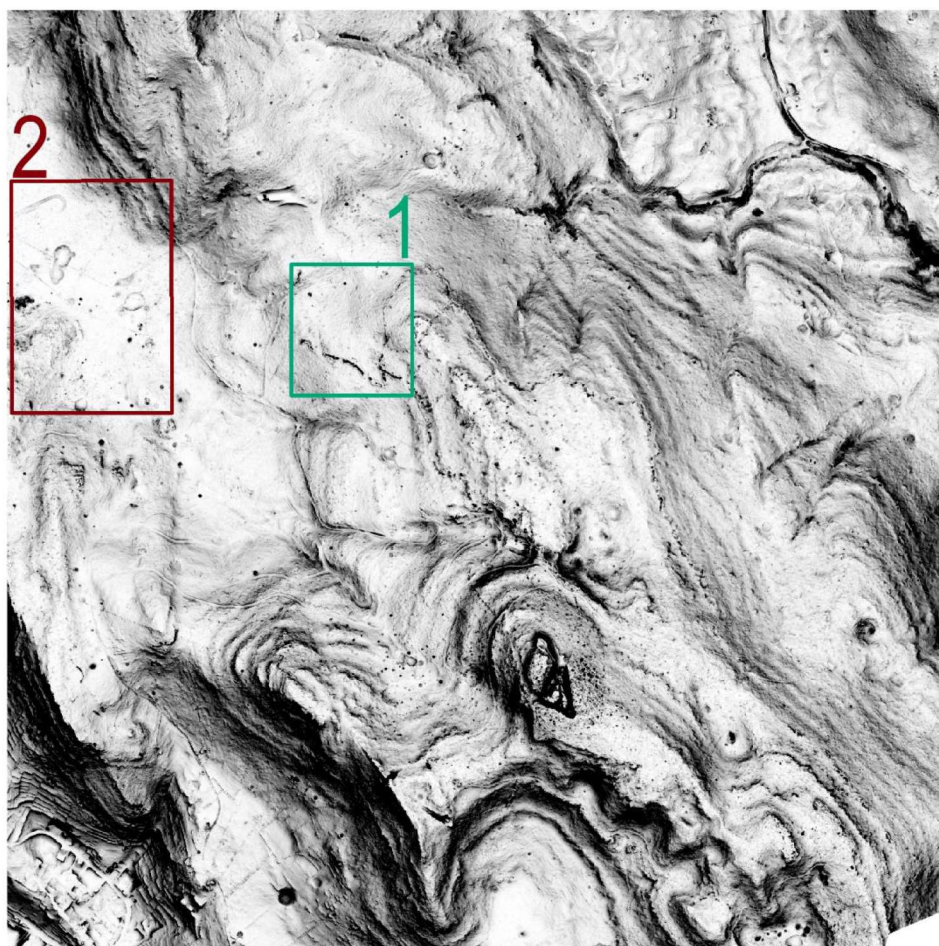


Fig. 7. 21 Localizzazione delle due aree test per il controllo a terra dei risultati sulla visualizzazione SVF.

L'area test 1 si trova in campo aperto e conserva ancora importanti tracce di trincee della Prima Guerra Mondiale, oltre a un cospicuo impatto dei relativi bombardamenti. 79 possibili buche di bomba identificate con la procedura proposta sono state controllate a terra: 70 di loro sono stati effettivamente confermati, mentre 9 sono stati attribuite a porzioni sub-circolari, residuali di trincea. L'indagine ha anche identificato 5 crateri aggiuntivi: di questi, tuttavia, solo 3 superano i 2 m di diametro e hanno una profondità apprezzabile nei dati LiDAR originali, tanto da essere effettivamente visualizzabili nelle immagini SVF.

L'area test 2 si trova a cavallo tra campi aperti e pendii boscosi e non conserva altre tracce della Grande Guerra ad eccezione dei crateri da artiglieria. Tuttavia, si trovano frequentemente pozze d'alpeggio e *trous avec monticules*. In questa regione sono stati

rilevati automaticamente 120 possibili depressioni legate alla guerra e solo 15 di esse sono state scartate al termine del controllo a terra. Sono anche state identificate 4 nuove occorrenze: una di esse era troppo piccola per essere rilevata (meno di 2 m di diametro e molto superficiale), considerando la risoluzione dei nostri dati LiDAR, 2, invece, hanno un diametro compreso tra 2 e 8 m, mentre una ha dimensione maggiore di 8 m. Quest'ultima buca non è stata identificata a causa del “*decision tree*” impiegato nella classificazione; come già notato, la parziale sovrapposizione delle classi dei crateri da artiglieria e delle pozze d'alpeggio ha portato a scartare oggetti-immagine con aree maggiori di 80 metri quadrati, che statisticamente sarebbero caduti nella classe delle pozze. In questo caso specifico il risultato è una perdita di informazioni che, tuttavia, era inevitabile a causa delle caratteristiche del paesaggio locale.

7.2.5 Valutazione dei risultati

L'affidabilità del modello di classificazione *object-based* proposto sembra incoraggiante, soprattutto considerando la natura residuale delle strutture e la presenza diffusa di elementi equivoci che potrebbero compromettere la corretta identificazione.



Fig. 7. 22 Esempi di buche di bomba riscontrate durante la ricognizione: A) identificata dal *rule set*; B) non identificata dal *rule set*.

La tabella 7.2 dà conto del numero di errori di commissione e di omissione accertati grazie alle verifiche sul campo. A questo proposito va notato che una piccola percentuale dei crateri omessi non era effettivamente visibile nello SVF a causa della risoluzione spaziale del DTM di partenza. Inoltre, la scarsa profondità e il profilo smussato di alcune delle depressioni identificate (profondità compresa tra 15 e 30 cm, vedi Fig. 7.22) non ha permesso allo SVF di evidenziare tali anomalie terra. In ogni caso, gli errori di commissione sono stati la

porzione più considerevole delle inesattezze riscontrate. La maggior parte di esse è legata alla presenza di artefatti creati durante la raccolta dei dati e l'elaborazione iniziale, che sono più frequenti nelle zone dei pendii boscosi. Questo è il motivo per cui il loro numero è leggermente più elevato nella seconda area test.

I valori riportati in tabella 2 consentono anche di proporre una standardizzazione approssimativa del numero di bombe realmente identificate a Millegrobbe, Bisele e Cima Campo con il metodo proposto. A partire da una quantità non calibrata di 3700 occorrenze, ora possiamo ipotizzare che sono ancora presenti nella zona circa 3420 depressioni legate alla guerra. Tuttavia, questo valore stima come unità singola *cluster* di buche che sono state fuse con l'algoritmo di *merge region*.

	Test Area 1	Test Area 2	Total
<i>Image-objects classified as "shell craters" with the proposed rule set</i>	79	120	199
<i>Image-objects confirmed as "shell craters" after the survey</i>	70	105	175
<i>Commission errors</i>	9	15	24
<i>Shell craters omitted by the rule set classification</i>	5	4	9
<i>Total number of shell craters identified during the survey</i>	75	109	184

Tab. 7. 2 Totale delle buche di bomba identificate durante la ricognizione a terra nelle due aree test. Gli errori di commissione e omissione sono riportati in relazione al numero totale di oggetti-immagine classificati come "buche di bomba" dal *rule set*.

I veri positivi rilevati dall'approccio descritto possono essere calcolati moltiplicando il numero totale di oggetti-immagine classificati come crateri in tutta l'area di studio (3700) con il rapporto tra gli oggetti-immagine confermati nelle aree test (175) e gli oggetti-immagine classificati come buche di bomba nelle aree di studio (199), che restituisce un valore di 3250. Ciò significa che l'87,8% degli oggetti-immagine classificati corrisponde a geo-oggetti realmente presenti sul terreno. Tenendo conto sia degli errori di commissione (circa 12%) sia di quelli di omissione (circa 4%), il tasso medio di successo è circa dell'84%.

L'accuratezza del metodo è quindi molto elevata, considerato che al giorno d'oggi le tracce a terra dei crateri più piccoli sono evanescenti, se non scomparse, ma tuttavia si adatta molto bene a quanto riportato da fonti storiche sulla zona di Cima Campo. In particolare, mentre quasi la metà dei crateri creati da proiettili da 280 e 300 mm sono stati probabilmente identificati, quelli più piccoli relativi a munizioni da 70 o 150 mm sono andati completamente persi a causa delle trasformazioni post-deposizionali e della risoluzione del modello digitale del terreno di partenza. Crateri associati con l'esplosione di artiglieria pesante e mortai da 450 mm sono stati omessi anch'essi in una certa misura quando si

trattava di buche con aree superiori a 80 metri quadrati, per evitare di includere nella classificazione le pozze d'alpeggio.

Nonostante le problematiche discusse, questo è un metodo veloce e affidabile per rilevare, riconoscere e mappare le buche di bomba in aree montane. Il set di regole proposto è uno strumento esportabile che può essere utilizzato in altri “paesaggi di bombardamento”, a condizione che venga eseguita una calibrazione localmente sensibile sui valori di segmentazione e delle *object-features* soprattutto in caso di variazioni considerevoli nei dati di partenza o nel loro processamento.

CASE STUDY 2

Keywords: OBIA; TLS; 3D data processing; antropologia fisica; quantificazione del tessuto osteologico ricalcificato.

8. Applicazione di tecniche di *image enhancement* e di classificazione *object-based* su modelli 3D di oggetti

8.1 Definizione ed esportazione dell'area d'indagine dal modello 3D

Il seguente caso di studio è teso a testare le metodologie finora illustrate, caratteristiche dell'analisi territoriale, anche su dati acquisiti tramite Laser Scanner Terrestre (TLS) di oggetti di piccole dimensioni. L'obiettivo, dunque, è quello di ridurre la scala d'indagine e valutare l'efficacia delle tecniche di *image enhancement* di dati LiDAR topografici ottenuti con ALS anche su modelli 3D di reperti di dimensioni ridotte. Tale possibilità è offerta dall'analogia esistente tra le modalità di acquisizione dei due sensori: entrambi, infatti, basano l'acquisizione dei dati sulla misurazione del tempo intercorso tra l'emissione di un impulso laser e il suo ritorno che consente di ricavare la distanza tra il ricevitore e il bersaglio. Le coordinate tridimensionali così ottenute vanno a formare la nuvola di punti dalla quale si ricavano le informazioni relative alla morfologia/ topografia dell'oggetto/ territorio (OPITZ, 2012).

Lo sviluppo in anni recenti di sempre nuovi algoritmi di *image enhancement* nell'ambito del *remote sensing* è stato di grande aiuto per enfatizzare le micro-morfologie e distinguere in maniera molto più chiara rispetto al passato evidenze archeologiche e tracce sul terreno (DONEUS, 2013; HESSE, 2013; STULAR *et alii*, 2012). Attualmente l'applicazione di algoritmi di esaltazione d'immagine su modelli digitali di elevazione è una pratica piuttosto diffusa in diversi ambiti di ricerca, tuttavia la possibilità di mutuare tecniche per l'analisi del paesaggio anche per modelli 3D di piccoli oggetti può portare a un incremento qualitativo e quantitativo delle informazioni ricavabili in relazione all'oggetto reale.

Come campione su cui testare l'applicabilità di tale metodologia sono stati selezionati due crani (Fig. 8.1) rinvenuti nelle tombe a inumazione di armati della necropoli della tarda età del Bronzo dell'Olmo di Nogara (VR). I resti ossei considerati in questo caso di studio presentano diverse ferite subcircolari causate da colpi di spada alla testa. Sul modello digitale tali lesioni si presentano come fori irregolari con, in alcuni casi, parte del tessuto osteologico ricalcificato all'interno della ferita lasciata dalla trapanazione chirurgica.

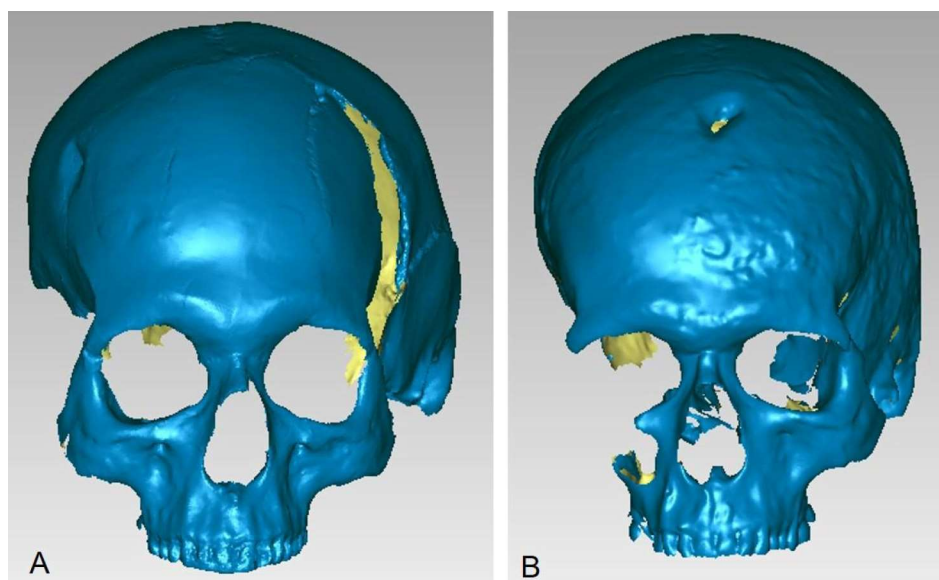


Fig. 8. 1 Modelli tridimensionali dei due crani analizzati: A) cranio della tomba 50; B) cranio della tomba 54 (elaborazioni di Emanuela Faresin).

L'identificazione (presenza o assenza) e la quantificazione di questo tessuto è fondamentale per stabilire il tasso di mortalità ed eventualmente l'aspettativa di vita del soggetto sopravvissuto all'operazione. Una ferita subcircolare situata sul lato destro del cranio 50, tra l'osso parietale e quello frontale, è stata selezionata come test su cui sviluppare un *rule set* in grado di evidenziare e quantificare il tessuto osseo ricalcificato (Fig. 8.2 A). Il cranio 54, invece, presenta tre ferite distribuite sul retro dell'osso parietale sinistro, due nella zona alta vicino alla sutura sagittale e una più in basso. Un'area test che comprenda tutte e tre le ferite fungerà da "terra incognita" su cui testare il *rule set* esportato e riapplicato automaticamente (Fig. 8.2 B).

L'acquisizione del modello digitale tridimensionale dei due crani è stato oggetto di una recente tesi di dottorato (FARESIN, 2015) e dunque in questa sede verranno riportati solo i dati più significativi per il presente lavoro. Per l'acquisizione dei dati è stata utilizzata una base rotante graduata allo scopo di minimizzare le sovrapposizioni e spostare l'oggetto con rotazioni regolari e costanti mantenendo invariata la distanza tra l'oggetto e il sensore. L'acquisizione, a media risoluzione, è avvenuta con un laser scanner a triangolazione ottica

Konica Minolta VI-910 ogni 30° fino ai 360°. Le morfologie più complesse e di dettaglio, come le lesioni subcircolari e quelle da arma da taglio, sono state rilevate tramite un sistema Laser Scanner a braccio mobile Faro ScanArm V3.

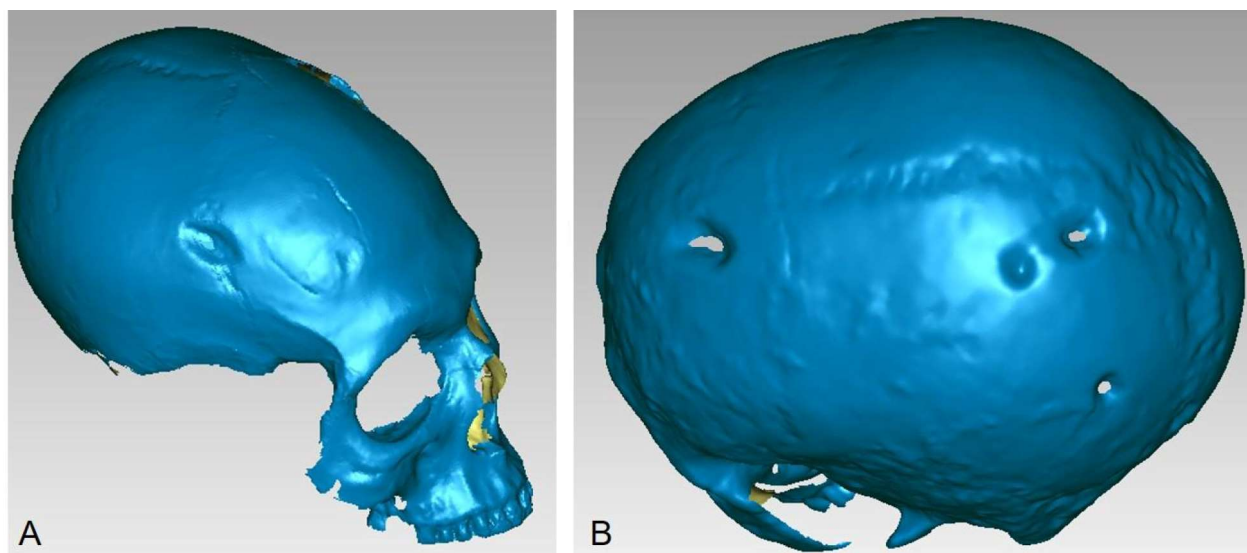


Fig. 8. 2 Modelli tridimensionali dei due crani: A) visione laterale del cranio della tomba 50 che mostra la trapanazione in esame; B) visione superiore del cranio della tomba 54, la zona occipitale mostra le tre trapanazioni indagate (elaborazioni di Emanuela Faresin).

Nella fase di post-processamento le scansioni adiacenti sono state allineate, inizialmente attraverso una procedura manuale di individuazione dei punti omologhi sulle aree di sovrapposizione tra le diverse scansioni e successivamente attraverso una procedura automatica volta ad allineare perfettamente le due acquisizioni. Una volta completata la fase di allineamento e raffinati i modelli per minimizzare eventuali imprecisioni, le diverse scansioni sono state unite per ottenere un primo modello dell'intero oggetto. Il passaggio successivo ha previsto un'ulteriore raffinazione del modello volta a eliminare artefatti e anomalie e a interpolare piccoli vuoti. Il modello finale viene, infine, realizzato attraverso la tecnica del *multisensor data fusion* che permette di fondere assieme dati ottenuti da sensori diversi e a risoluzioni diverse ottenendo un modello a multirisoluzione.

Prima di trattare il modello tridimensionale di un reperto con tecniche sviluppate per il trattamento di dati geografici come i DTM, è necessario risolvere due problematiche: 1) l'impossibilità delle piattaforme GIS e, più in generale, di buona parte dei software deputati all'analisi di immagini e dati georeferenziati di gestire oggetti 3D "reali" (voxel); 2) la necessità di operare su un modello "pseudo-geografico".

Per ovviare a questi problemi è necessario inizialmente sezionare il modello dell'oggetto completo in singole parti significative per poter analizzare le differenti aree di interesse come se fossero una superficie geografica. Questo tipo di approccio non è dissimile da quanto già avviene per l'analisi dei modelli digitali di elevazione; infatti, ogni analisi geografica avviene su aree selezionate più o meno vaste dell'intero pianeta che va considerato come l'oggetto completo. Successivamente è necessario impostare un punto di vista zenitale delle singole parti ritagliate in modo da ottenere dei modelli digitali ortorettificati delle singole aree. Una volta ottenuto questo risultato è possibile processare i modelli ottenuti come un qualsiasi DEM sviluppato per analisi territoriale.

Dal punto di vista pratico, quindi, il primo passaggio prevede di estrapolare dal modello originale una porzione coerente con le specifiche necessità delle analisi successive. La morfologia sferica del reperto ha reso necessario selezionare un'area relativamente ridotta attorno alla ferita del cranio 50, poiché un'eccessiva curvatura avrebbe potuto creare problemi in fase di elaborazione dell'immagine. A livello operativo si è, quindi, deciso di esportare il file in formato .stl e attraverso MeshLab trasformarlo in .xyz. Le più comuni estensioni dei dati acquisiti tramite Laser Scanner, infatti, non sono supportate dalla maggior parte dei software GIS e di *image enhancement*.

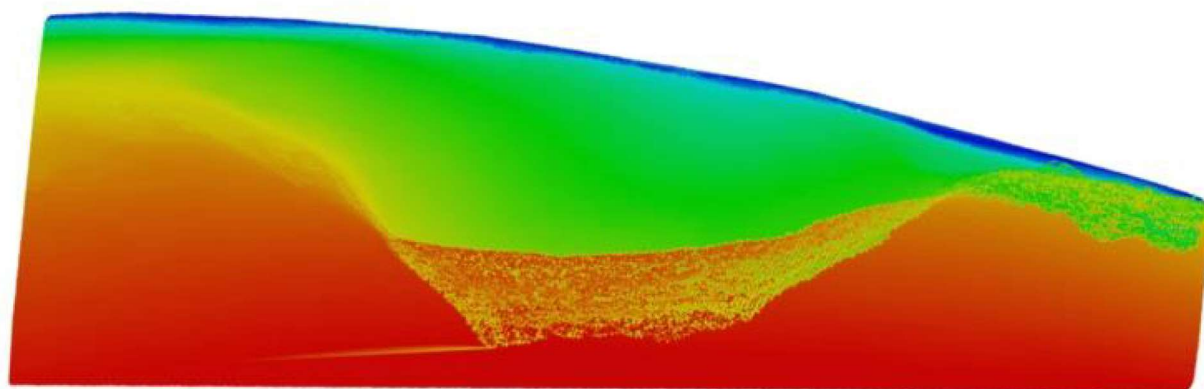


Fig. 8. 3 Prima prova di importazione della porzione del cranio 50 selezionata in ambiente GIS. Si può notare come la lesione venga visualizzata in sezione.

La prima problematica riscontrata in fase di importazione dei dati in ambiente GIS è stata l'impossibilità per questa tipologia di software di gestire dati 3D reali (voxel); ciò causava una visualizzazione scorretta, che mostrava la ferita in sezione (Fig. 8.3). Data l'assenza di coordinate assolute si è dovuto procedere a cambiare il punto di vista dell'immagine andando a "ortorettificarla" manualmente in ambiente MeshLab. Si è infine convertito il file .xyz in formato ASCII attraverso il software GlobalMapper in maniera da poter trattare la superficie selezionata del cranio 50 come un modello digitale del terreno (Fig. 8.4 A).

Il cranio 54 è stato trattato con la stessa procedura con la differenza che si è scelta un'area più ampia che permettesse di includere tutte e tre le lesioni presenti (Fig. 8.4 B), in modo da ampliare la statistica comparativa per la riapplicabilità del *rule-set*.

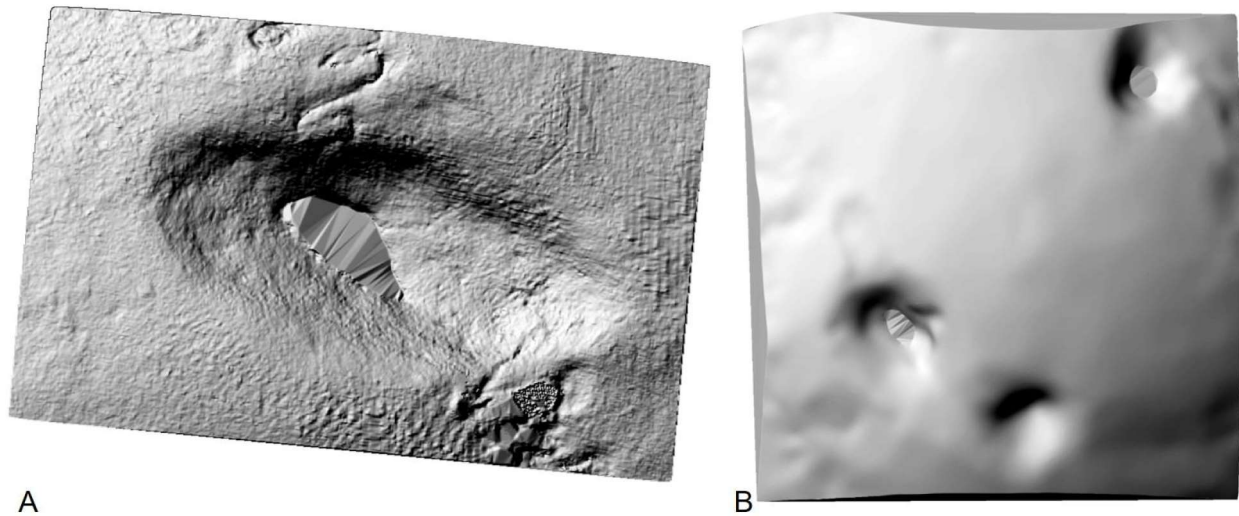


Fig. 8. 4 Modelli digitali ombreggiati delle porzioni di cranio selezionate: A) cranio 50; B) cranio 54.

8.2 Integrazione di trattamenti LiDAR e modelli 3D di piccole superfici

Una volta ottenuto il modello utilizzabile in ambiente GIS sono stati applicati diversi trattamenti di immagine come l'*hillshade*, lo *slope*, l'*openness* e lo *sky-view factor*.

L'approccio base è consistito nell'applicazione al modello di algoritmi di illuminazione artificiale da direzioni multiple. Questa tecnica permette di visualizzare sulla stessa immagine gran parte delle anomalie morfologiche presenti sulla superficie analizzata e di minimizzare la perdita di informazioni dovuta alla presenza di ombre. In questo senso i risultati migliori sono stati ottenuti applicando l'analisi delle componenti principali (PCA) di 16 o più differenti *hillshade* al modello. L'applicazione dell'algoritmo di *hillshade* da direzioni multiple, invece, pur utile in talune circostanze, è – come noto – afflitto dal problema della replicazione delle anomalie morfologiche (DEVEREUX *et alii*, 2008) e quindi non è stato considerato.

Il primo trattamento applicato al modello digitale della ferita del cranio 50 è stato una PCA di 16 differenti *hillshade* presi ogni 22,5 gradi in angolo azimutale e mantenendo costante l'inclinazione verticale dell'angolo a 45 gradi. La rappresentazione in falsi colori, mappando sui *layer* del rosso, del verde e del blu (RGB) le prime tre componenti (componenti

principali), permette di visualizzare contemporaneamente gran parte delle informazioni presenti sui 16 *hillshade* originali.

Un altro trattamento piuttosto comune, ma con interessanti implicazioni per i casi di studio in esame è lo *slope* o calcolo della pendenza. Questo tipo di elaborazione crea un'immagine in toni di grigio dove vengono evidenziate le celle che presentano la maggiore variazione in relazione a quelle circostanti. Nei casi di studio selezionati questa visualizzazione risulta particolarmente utile in quanto il tessuto osteologico cicatriziale tende a ricalcificarsi verso l'interno del cranio con un diverso angolo di pendenza rispetto alla superficie originale. Nello specifico del cranio 50, però, essendo la ricalcificazione abbondante, il solo trattamento *slope* mette in evidenza le aree di inflessione rispetto alla superficie e quelle a forte pendenza e quindi non è sufficiente per evidenziare interamente il tessuto cicatriziale osseo (Fig. 8.5).

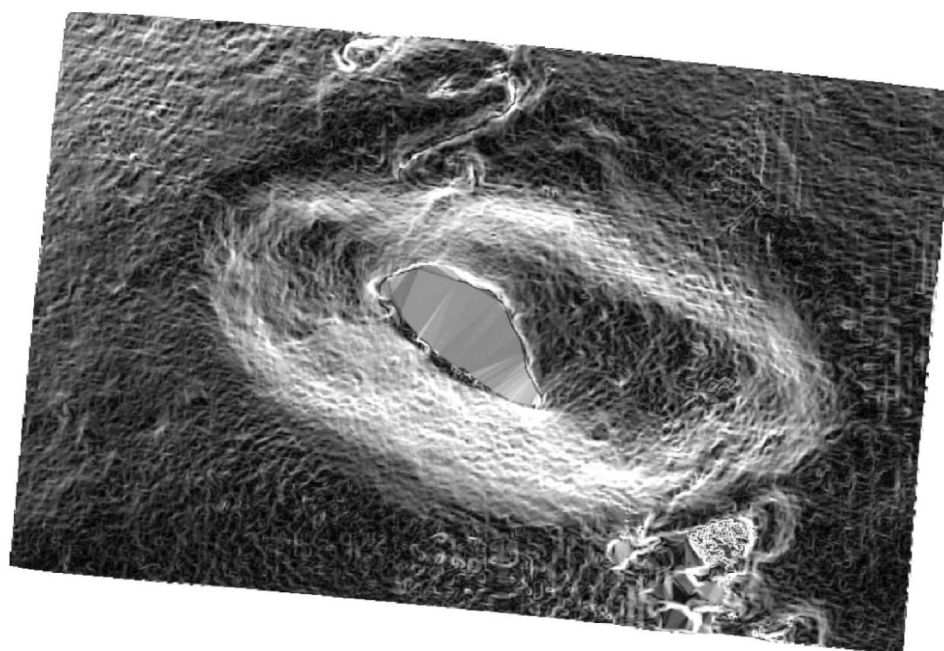


Fig. 8. 5 Trattamento di *slope analysis* del modello digitale della trapanazione del cranio 50.

Un secondo trattamento sempre associato alla pendenza è l'*aspect* che, per ogni cella del modello digitale, calcola la direzione della pendenza ogni 45°. Nei due casi di studio in esame questo tipo di trattamento non ha fornito risultati utili, in quanto un'evidenza chiusa come un foro non presenta un'unica direzionalità preferenziale, ma tende a essere convergente verso il centro da tutte le possibili direzioni.

Gli ultimi due trattamenti applicati al modello tridimensionale della ferita del cranio 50 sono l'*openness* positiva e negativa. Entrambi consentono di delineare sia le concavità che

le convessità del modello e sono prive di errori dovuti alla direzionalità dell'algoritmo in quanto calcolano il più ampio angolo possibile in azimuth e in nadir per ogni cella lungo almeno otto direzioni. Il valore finale di α è il risultato rispettivamente dalla media degli angoli in azimuth per l'*openness* positiva e dalla media degli angoli in nadir per l'*openness* negativa (DONEUS, 2013). Entrambe le elaborazioni sono particolarmente interessanti per lo scopo del lavoro, in quanto definiscono con precisione la parte di tessuto ricalcificato (*openness* positiva Fig. 8.6 A) e forniscono un buon grado di differenziazione rispetto alla porzione di sutura coronale presente nel modello (*openness* negativa Fig. 8.6 B).

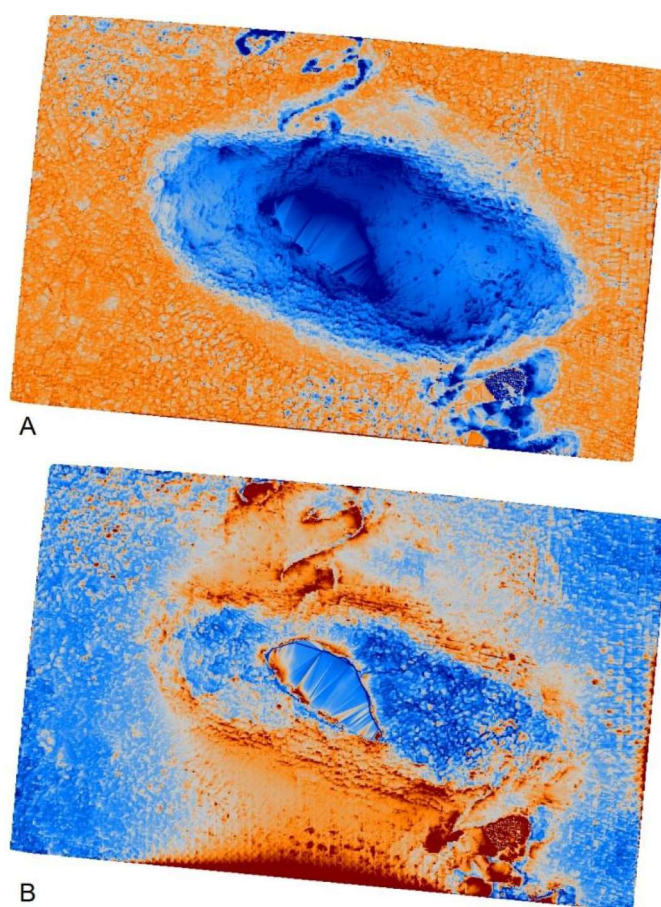


Fig. 8. 6 Trattamenti di *openness* del modello digitale della trapanazione del cranio 50: A) *openness* positiva; B) *openness* negativa.

Dopo aver applicato diversi trattamenti al modello 3D e averli analizzati preliminarmente dal punto di vista autoptico è stato chiaro che impiegare un unico trattamento nell'elaborazione del *rule set* non fosse risolutivo. Oltre al modello 3D originale, sono perciò state selezionate le tre elaborazioni più promettenti per tentare di identificare automaticamente il tessuto osseo ricalcificato all'interno delle ferite craniali attraverso un

approccio d'indagine *object-based*. La scelta è ricaduta sullo *slope*, sull'*openness* positiva e su quella negativa.

I tre trattamenti sono stati importati in ambiente eCognition per elaborare un *rule set* significativo e riapplicabile per essere sfruttato in altri casi di studio.

8.3 Classificazione OBIA

I quattro modelli di partenza sono stati caricati in eCognition Developer. A questo punto, il primo passaggio per ogni analisi di tipo *object-based* è la segmentazione. L'algoritmo di segmentazione selezionato per l'analisi è quello a multirisoluzione, che permette di suddividere l'immagine in oggetti-immagine omogenei e coerenti al loro interno. Il parametro di scala adottato è di 45. Il valore è stato selezionato tramite un approccio *trial and error* allo scopo di ottenere una segmentazione che garantisse un adeguato grado di dettaglio per l'area interessata dalla ferita e dalla sutura coronale e assicurasse, invece, la creazione di un numero relativamente limitato di oggetti-immagine nel resto del cranio (Fig. 8.7). In fase di segmentazione il colore è stato considerato quale parametro principale, in quanto i trattamenti caricati forniscono le informazioni attraverso una *palette* cromatica in toni di grigio.

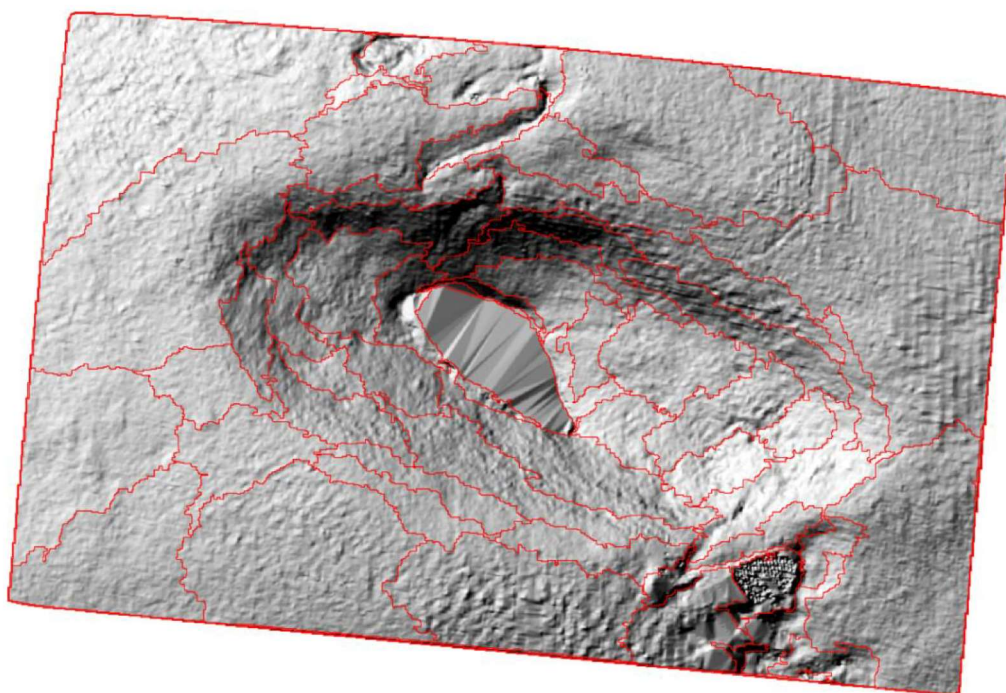


Fig. 8. 7 Modello digitale della lesione del cranio 50 con applicata la segmentazione a multirisoluzione (*scale parameter 45; shape 0,1; compactness 0,6*).

La prima fase di classificazione ha visto l'esclusione dalla classe "tessuto ricalcificato" dei cosiddetti valori "*no data*" creatisi durante la preparazione del modello digitale. Per eliminare questi "artefatti" dalla classificazione si è agito sull'omogeneità della *texture* grazie all'algoritmo di Haralick (HARALICK *et alii*, 1973). Queste anomalie, infatti, si presentano molto più regolari e omogenee al loro interno ed è quindi molto facile escluderle dalla classificazione (Fig. 8.8).

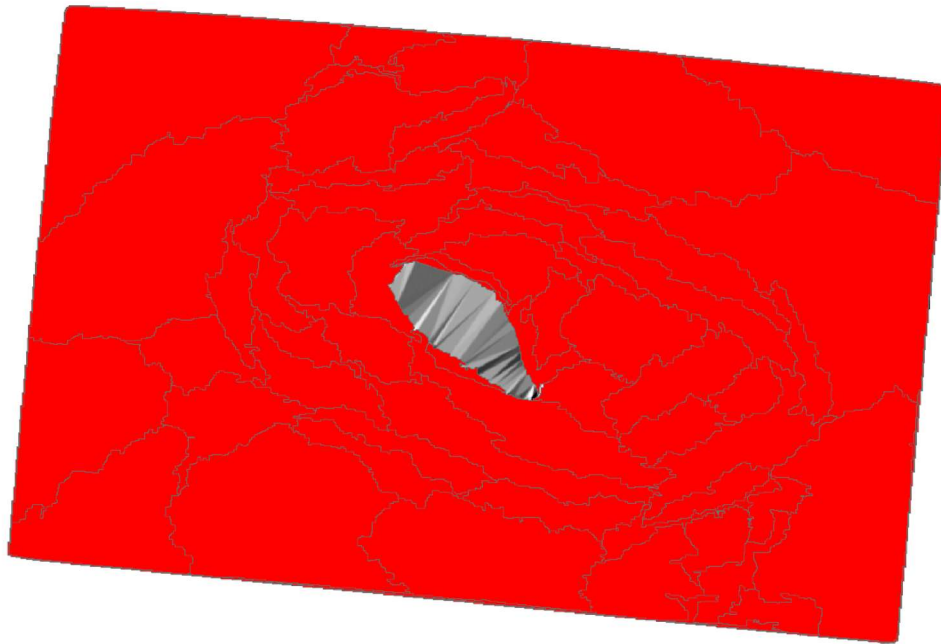


Fig. 8. 8 Primo passaggio della classificazione volto a eliminare gli "artefatti" in corrispondenza del foro del cranio 50 (*Texture Homogeneity all direction*)

Per identificare le aree ribassate del modello, quelle cioè che sono interessate alla trapanazione e alla ricalcificazione del tessuto, si è operato sui due trattamenti di *openness*. Le zone ribassate sono caratterizzate da valori minimi di *openness* positiva, ovvero una scarsa ampiezza media dell'angolo di zenit ma, contemporaneamente, da alti valori di *openness* negativa, ovvero un'elevata ampiezza media dell'angolo di nadir (Fig. 8.9). Il secondo passaggio di classificazione ha dunque preso in considerazione questi parametri. Ciò ha consentito di includere nella classificazione tutte le aree anche solo leggermente ribassate rispetto alla superficie media del cranio, partendo dai punti perimetrali di inflessione (limiti della trapanazione).

Essendo la ferita del cranio 50 situata tra l'osso parietale e quello frontale lungo la sutura coronale, nella classificazione risultava compresa anche parte della sutura stessa, che condivide simili caratteristiche con le ferite in esame. Si è perciò deciso di inserire un ulteriore parametro distintivo all'interno del *rule set* per aumentare l'accuratezza della

classificazione e ottenere una quantificazione più precisa. A differenza della trapanazione, le suture craniche presentano una deviazione standard del *range* micromorfologico molto più alta essendo molto più “irregolari”; si è così deciso di utilizzare questo ulteriore parametro specifico per ottimizzare la classificazione. Infine, è stato applicato un algoritmo di *merge region* per fondere tutti gli oggetti-immagine prossimali in un unico oggetto-immagine e poter così calcolare con precisione l'area del tessuto osseo ricalcificato all'interno della ferita (Fig 8.10). Il valore ottenuto è risultato essere pari a 218,4 mm².

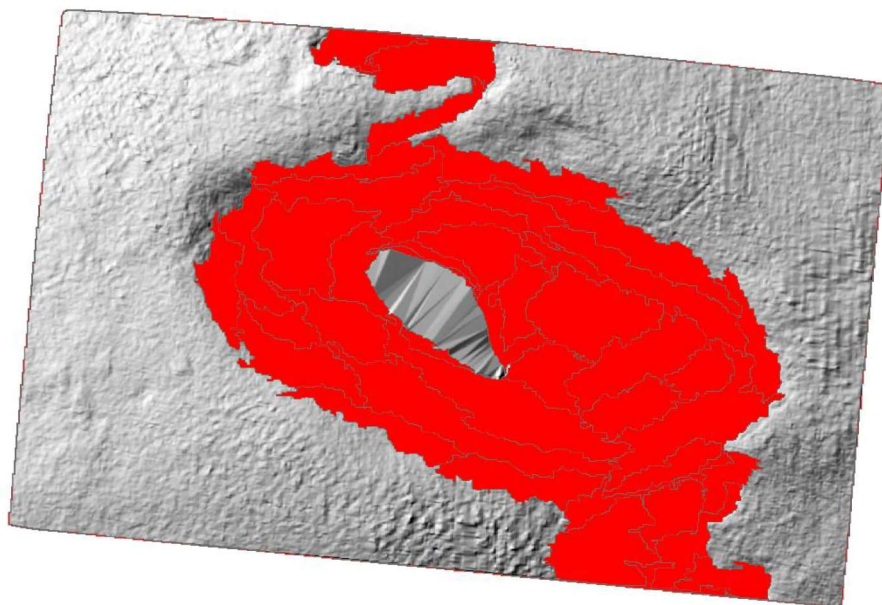


Fig. 8. 9 Secondo passaggio della classificazione: è stata utilizzata l'*object feature mean* sul *layer* dell'*openness* positivo (valori bassi) e su quello dell'*openness* negativo (valori alti).

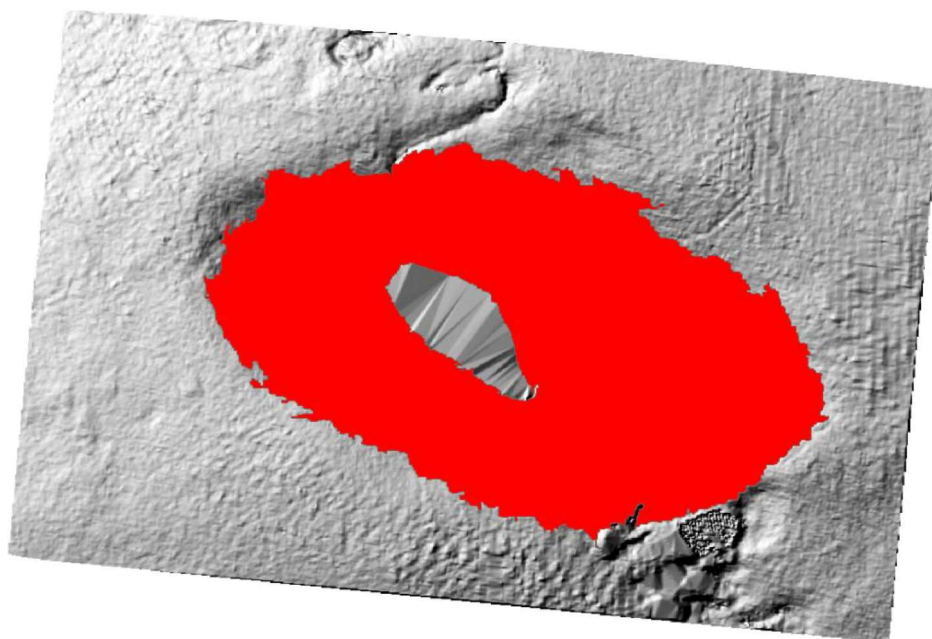


Fig. 8. 10 Ultimo passaggio della classificazione: è stata utilizzata la deviazione standard sul *layer* dello *slope* e un algoritmo di *merge region*.

8.4 Esportazione del rule set e verifica dei risultati

L'area esportata dal modello del cranio 54 è di dimensioni maggiori rispetto a quella del reperto 50, in quanto era necessario includere tutte e tre le ferite selezionate. Ciò ha implicato una leggera concavità del modello da analizzare, che ha fatto assumere alle lesioni una prospettiva leggermente diversa rispetto a quella ortogonale del primo caso di studio (Fig. 8.4 B).

Le procedure di esportazione e riapplicazione del *rule set* precedentemente creato hanno incluso l'importazione del modello digitale, dei trattamenti già elencati, lo *slope* (Fig. 8.11), l'*openness* positiva e negativa (Fig 8.12), del cranio 54 e la preparazione di un nuovo progetto in ambiente eCognition Developer. Secondariamente è stato caricato ed eseguito automaticamente il medesimo *rule set*.

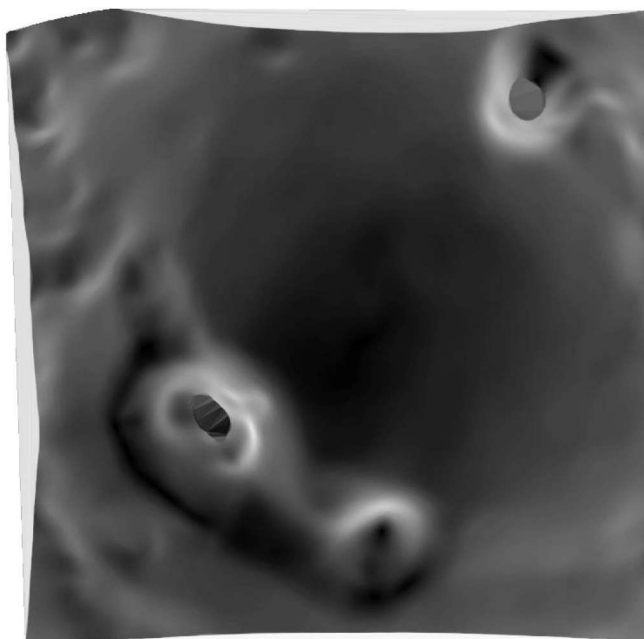


Fig. 8. 11 Trattamento di *slope analysis* del modello digitale delle lesioni del cranio 54.

La classificazione risultante non ha permesso di assegnare alla classe “tessuto ricalcificato” alcun oggetto-immagine, sebbene i supporti di partenza utilizzati siano stati tipologicamente analoghi. Per comprendere le motivazioni di questa differenza di risultato tra i due casi di studio, è stato riprodotto singolarmente ciascuno dei passaggi del *rule set*. Già in fase di segmentazione sono stati notati problemi di scala. Ciò è dovuto alla differente risoluzione dei modelli 3D dei due diversi crani analizzati. Nel modello digitale del cranio 50 era stata selezionata un'area pressoché piana di dimensioni ridotte, dove una parte

considerabile della superficie era occupata dalla lesione (circa un terzo); al contrario, il modello digitale del cranio 54 presentava una superficie convessa di dimensioni notevolmente più grandi¹ in cui le ferite erano localizzate in posizioni decentrate e quindi non perfettamente ortogonali al punto di presa. Ma la differenza più significativa riguarda la dimensione della cella della griglia. I dati relativi al cranio 50 presentano una cella più piccola e quindi con una risoluzione spaziale maggiore rispetto a quelli del cranio 54. Questa differenza è dovuta alla scelta di utilizzare la tecnica del *multisensor data fusion* per unire dati provenienti da sensori differenti e ottenere così un modello a multirisoluzione.

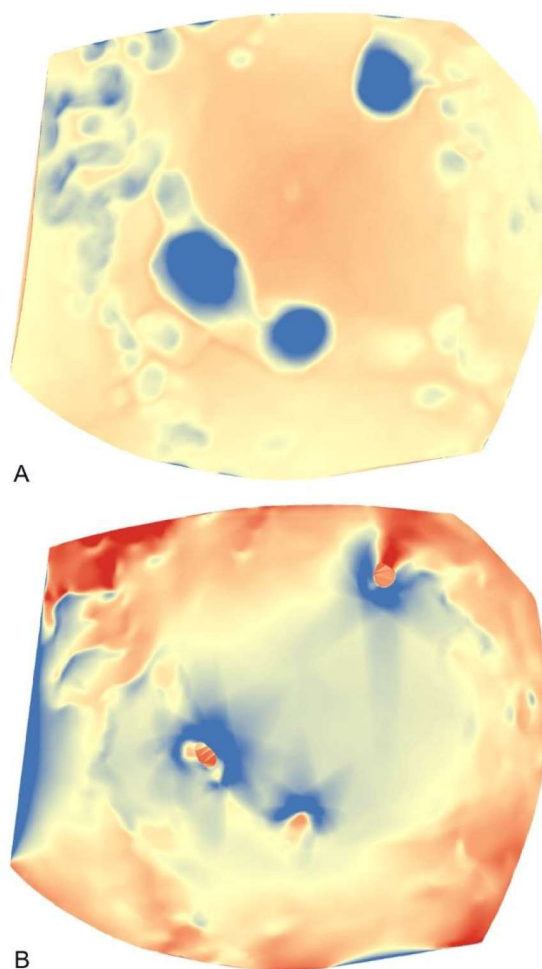


Fig. 8. 12 Trattamenti di *openness* del modello digitale delle lesioni del cranio 54: A) *openness* positiva; B) *openness* negativa.

Si è deciso, così, di mantenere invariato il modello mentale sotteso all'individuazione del tessuto osseo rimarginato ma di tarare i parametri per renderli utilizzabili nello specifico caso di studio. Questo tipo di approccio è notevolmente meno dispendioso per tempo e per mole

¹ Lunghezza massima area cranio 54: 96,2 mm; lunghezza massima area cranio 50: 34,2 mm; larghezza massima area cranio 54: 86,6 mm, larghezza massima area cranio 50: 21,2 mm

di lavoro da eseguire in quanto permette di utilizzare le stesse caratteristiche e gli stessi algoritmi già testati sul cranio 50 variando esclusivamente il valore di soglia impostato.

All'interno delle opzioni relative alla segmentazione a multirisoluzione è stato variato solo il parametro di scala, portandolo da 45 a 35 (Fig. 8.13). Questo consente di ottenere una classificazione più precisa e di ovviare in buona parte al problema del cambio di risoluzione spaziale tra i due modelli. Il nuovo parametro di scala (y_i) è stato calcolato utilizzando una proporzionalità inversa tra la dimensione della cella del modello del cranio 50 pari a 0,0376 (x), il parametro di scala adottato per la segmentazione pari a 45 (y) e la dimensione della cella del modello del cranio 54 pari a 0,0479 (x_i):

$$x \times y = x_i \times y_i$$

Il risultato ottenuto dalla proporzione per il parametro di scala da adottare sulla nuova segmentazione è di 35,3 che è stato arrotondato per difetto a 35.

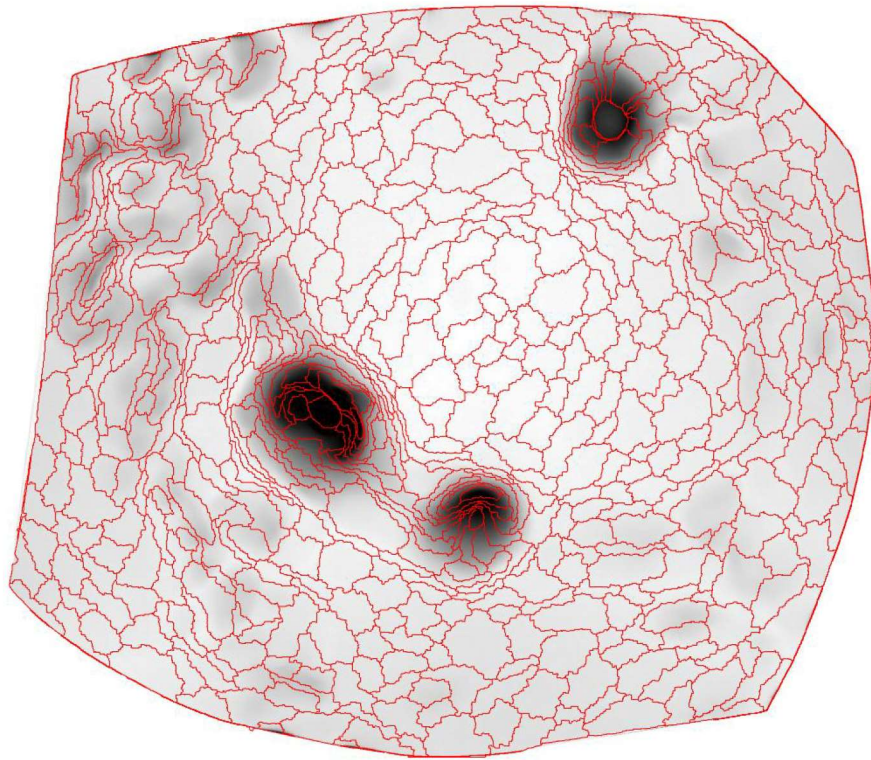


Fig. 8. 13 Modello digitale della lesione del cranio 54 con applicata la segmentazione a multirisoluzione (scale parameter 35; shape 0,1; compactness 0,6).

Conseguentemente è stato necessario variare i parametri di soglia dell'omogeneità della *texture* e della media (*mean*) sul layer dell'*openness* positivo. La soglia della prima caratteristica risultava troppo restrittiva per il nuovo modello e quindi è stata alzata per renderla utilizzabile anche in questo secondo caso di studio. Il valore del secondo parametro, invece, si adattava discretamente bene al nuovo caso di studio anche senza

apportare alcuna modifica; si è comunque deciso di abbassare leggermente la soglia per ottenere un risultato finale migliore. In questo secondo caso di studio non è stato necessario andare a operare sulla deviazione standard per discriminare le suture craniche dalla trapanazione perché nessuna di esse era inclusa nell'area campione selezionata. L'applicazione finale dell'algoritmo di *merge region* ha permesso anche in questo secondo caso di fondere assieme gli oggetti-immagine classificati prossimali e di conseguenza di quantificare la superficie di tessuto osteologico cicatrizzato di due delle tre ferite. La terza lesione, essendo quella più decentrata, ha subito maggiormente l'influsso delle distorsioni dovute alla convessità del modello che non ha permesso di definire con un unico oggetto-immagine il tessuto ricalcificato (Fig. 8.14). Rimane comunque possibile quantificare il dato sommando le aree dei due oggetti-immagine interessati. Il risultato numerico del tessuto ricalcificato all'interno delle tre trapanazioni è rispettivamente di 103,78 mm² per la lesione più spostata verso sinistra sulle immagini, di 69,40 mm² per quella centrale e, sommando i due oggetti-immagine che la compongono, di 69,83 per quella localizzata in alto a destra.

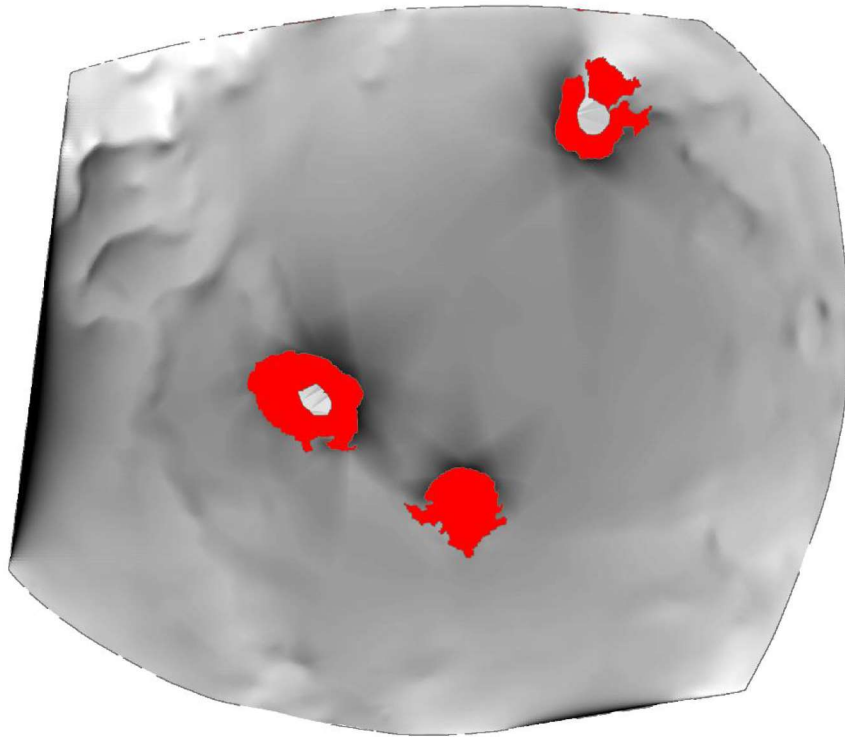


Fig. 8. 14 Applicazione automatica del rule set "tessuto ricalcificato" sul modello digitale delle lesioni del cranio 54.

La possibilità di riapplicare in maniera automatica il *rule set* creato per il cranio 50, pur ricalibrando lievemente i parametri, ha permesso di ottimizzare tempistiche e mole di lavoro, consentendo semplicemente di agire su pochi valori per ritarare la classificazione. Inoltre, l'utilizzo di tecniche di *image enhancement* nate per applicazioni teleosservative su modelli

tridimensionali di piccoli oggetti apre interessanti possibilità per l'indagine delle micromorfologie dei reperti archeologici. Oltre alle lesioni, infatti, sarà in prospettiva possibile indagare anche le tracce d'uso e di degrado o le tecniche di produzione impiegate per determinate classi di materiale², fornendo una metodologia oggettiva per la quantificazione e dunque la comparazione delle diverse anomalie morfologiche identificate.

² Un ulteriore approccio sperimentale è stato testato da Armando De Guio e dallo scrivente in un intervento dal titolo "Una mole adrianea: numismatica e mass-data recognition" al I Workshop Internazionale di Numismatica e nuove metodologie d'indagine "Tic Tac: Tomography, Image Processing, Surface And Bulk Characterization, Technologies, Archaeology And Coins" (Padova, 3-4 novembre 2016).

CASE STUDY 3

Keywords: GeOBIA; predictive modeling; LiDAR processing; solar radiation; slope; local dominance; classificazione dei “siti di controllo” in area alpina.

9. Creazione di modelli predittivi tramite un approccio *object-based*

I modelli predittivi sono dei procedimenti che consentono di creare, testare e validare un modello per predire l'attendibilità di un risultato sulla base di tutti i dati e le conoscenze disponibili (GEISSER, 1993; KUHN, JOHNSON, 2013; DE GUIO, 2015a). Questi modelli sono strumenti che consentono di proiettare *pattern* e relazioni conosciute in uno spazio e un tempo sconosciuti. Progettare un modello predittivo significa dunque sviluppare uno strumento matematico-statistico in grado di generare una predizione accurata di un evento o un processo. Nell'analisi predittiva sono disponibili numerosi metodi di modellazione, dalla *machine learning* all'intelligenza artificiale, alla statistica. In questo specifico caso verrà applicato un metodo definito come *classification tree analysis*, in cui il risultato dell'analisi predittiva coincide con la classe risultante dal processo di classificazione (BREIMAN *et alii*, 1984; QUINLAN, 1986; ROKACH, MAIMON, 2008).

Una delle prime definizioni di modello predittivo per applicazioni archeologiche viene data nel 1986 da Kohler e Parker, i quali affermano che: “I modelli predittivi di localizzazione tentano di predire, come minimo, la posizione dei siti archeologici o dei materiali in una regione, basandosi sia su campioni di quella regione sia su nozioni fondamentali del comportamento umano” (KOHLER, PARKER, 1986).

Attualmente esistono due principali linee di sviluppo dei modelli predittivi in archeologia. La prima, maggiormente legata agli interessi della collettività, è quella di consentire una migliore protezione del patrimonio culturale e di limitare le spese per i lavori pubblici nell'ambito di una sempre più diffusa archeologia preventiva. Lo scopo, in questo caso è fondamentalmente quello di localizzare a priori siti archeologici ancora sconosciuti a scopo di tutela e programmazione paesaggistico-territoriale. La seconda invece, molto più legata alla ricerca in senso stretto, ha lo scopo di conoscere e comprendere il rapporto tra l'uomo

e ambiente in prospettiva diacronica (KAMERMANS, 2004). L'assunto base per la creazione di modelli predittivi a scopo archeologico è che gli insediamenti antichi tendono a localizzarsi in un ambiente con caratteristiche favorevoli allo sviluppo umano (WARREN, ASH, 2000). Il rapporto tra uomo e ambiente dipende in buona parte dalle caratteristiche del paesaggio e da come l'uomo abbia saputo percepire e sfruttare queste caratteristiche in antichità. Si può quindi affermare che determinate aree, in base alle loro caratteristiche specifiche (prossimità a bacini idrici, a risorse alimentari o materiali economicamente significative, a vie di comunicazione terrestri o acquatiche ecc.), risultano maggiormente attrattive per la frequentazione antropica rispetto ad altre (VERHAGEN *et alii*, 2010).

Senza entrare nel merito del dibattito scientifico relativo all'affidabilità dei modelli predittivi in ambito archeologico, tema già oggetto di numerosi contributi dedicati (WHEATLEY, GILLINGS, 2002; WHEATLEY, 2003; VANLEUSEN, AMERMANS, 2005; VERHAGEN, 2007; KAMERMANS, VANLEUSEN, VERHAGEN, 2009), il caso di studio presentato vuole essere un esempio di applicazione delle tecniche OBIA per la creazione di modelli predittivi mirati. In particolare, il modello predittivo progettato non è volto a individuare tutti i possibili siti archeologici all'interno degli areali indagati, ma intende identificare solo alcuni specifici contesti caratterizzati da una posizione privilegiata (in termini di dominanza, pendenza ed esposizione solare), sfruttando alcune variabili specifiche. La gestione delle vie di transito e il controllo sul territorio circostante, infatti, hanno rivestito un ruolo fondamentale nelle scelte locazionali dei gruppi umani fin da epoca pre-protostorica.

9.1 *Due contesti, una problematica comune*

Le caratteristiche dell'*object-based image analysis* rendono questo tipo di metodologia particolarmente adatta alla creazione di modelli predittivi di tipo *classification tree*. L'OBIA, infatti, consente di analizzare e classificare un *range* molto ampio di dati differenti (sia raster ottenuti attraverso sensori attivi e passivi, ma anche vettoriali) e permette di implementare un ampio e variegato spettro di variabili nel *rule set* di classificazione. Il continuo sviluppo in ambito archeologico, e non solo, di tecniche di visualizzazione sempre più raffinate per dati da remoto fornisce un ottimo punto di partenza per la progettazione di modelli sempre più complessi e articolati.

La scelta dell'areale e della problematica da affrontare si è inserita nell'ambito dello studio del sito archeologico del Bostel di Rotzo e del territorio circostante a opera della cattedra di

Tecniche di Scavo e Ricognizione di Padova (prof. Armando De Guio). Sin dal 1993 il villaggio del Bostel è stato infatti oggetto di ricerche da parte dell'Università degli Studi di Padova. Questo caso di studio ha come obiettivo l'indagine dell'area circostante all'abitato protostorico, con particolare riferimento al comparto occidentale dell'Altopiano di Asiago per un'estensione di circa 52 km² (Fig. 9.1). Tra le ragioni che hanno spinto a testare questa metodologia va anche annoverato il ritrovamento fortuito di un piano di calpestio con tracce di focatura che ha restituito numerosi reperti ceramici della Seconda età del Ferro associabile a quella presente sul Bostel proprio all'interno dell'areale preso in considerazione nel caso di studio in discussione¹. Il contesto è stato rinvenuto durante dei lavori pubblici per l'allargamento di un tracciato stradale in località Campolongo ed è stato successivamente indagato nell'ambito di un intervento di archeologia di salvataggio fortemente voluto dalla Soprintendenza Archeologica del Veneto.

Il modello predittivo è stato progettato allo scopo di individuare in maniera automatica i “*control places*” presenti nell'area di indagine, soprattutto sui crinali protesi verso la Val d'Assa e la Val d'Astico, importanti vie di comunicazione che collegano la pianura veneta con l'area alpina trentino-atesina.

Il modello proposto mira a determinare in modo oggettivo la reale “dominanza” del sito del Bostel di Rotzo, da sempre considerato come una postazione di controllo sulla Val d'Assa e sulla Val d'Astico. La presenza del villaggio ha costituito, inoltre, un termine di confronto per la creazione del modello stesso. Durante la segmentazione, infatti, è stato impiegato uno *shape file* che definiva con precisione il perimetro ad oggi noto del villaggio, tuttavia in fase di classificazione sono stati impiegati dei parametri e dei valori generali, senza tenere in considerazione le specifiche caratteristiche dell'abitato del Bostel. In questo modo è stato possibile valutare concretamente e in modo obiettivo l'assunto di partenza in relazione alla localizzazione del sito in posizione dominante.

¹ Trattandosi di un rinvenimento relativamente recente, i dati specifici sul contesto risultano al momento di stesura della tesi ancora totalmente inediti. Alcune note preliminari sono state presentate dall'ispettore di Soprintendenza di zona, la dott.ssa Benedetta Prosdocimi, durante il workshop “L'Archeologia incontra l'Altopiano” del 27 agosto 2016 presso il Museo Archeologico di Castelletto di Rotzo.

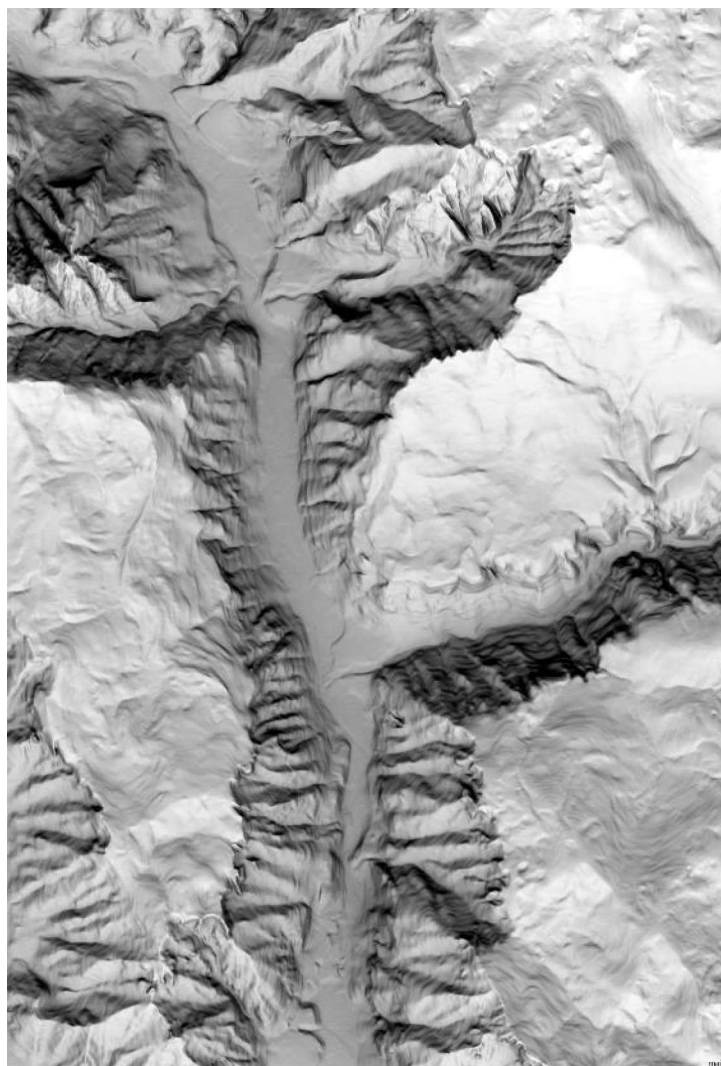


Fig. 9. 1 Modello digitale di elevazione ai 5 m di risoluzione ombreggiato (hillshading); areale di indagine, Val d'Astico e Altopiano di Asiago occidentale.

Il secondo contesto selezionato su cui testare l'esportazione del *rule set* è il territorio circostante al sito d'altura dell'antica età del Bronzo di Nössing², nella conca di Bressanone (BZ) (Fig. 9.2). Il villaggio fu scoperto da Adrian Egger nel 1912 e divenne oggetto di tre distinte campagne di scavo da parte dell'Istituto di Archeologia dell'Università degli Studi di Padova negli anni compresi tra il 1966 e il 1969 (POLACCO *et alii*, 1968). Si tratta di uno degli insediamenti più noti del Bronzo Antico atesino.

² Il lavoro si inserisce nell'ambito della revisione dei dati del sito da parte del dott. Umberto Tecchiati dell'Ufficio Beni Archeologici della Provincia Autonoma di Bolzano.

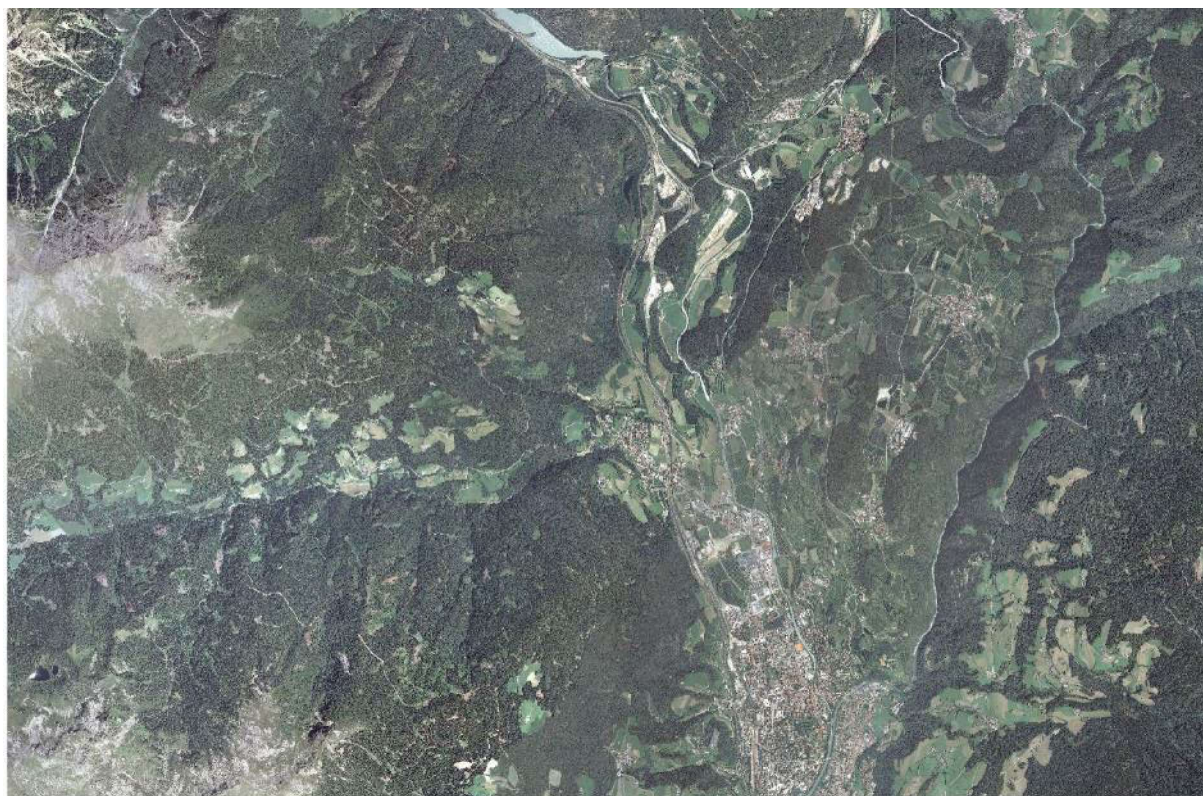


Fig. 9. 2 Ortofoto del 2011 della Provincia Autonoma di Bolzano con risoluzione spaziale di 50 cm; areale di indagine, conca di Bressanone settentrionale.

Nössing si può inquadrare come un abitato d'altura fortificato; l'estensione del villaggio è piuttosto ridotta (nell'ordine di 0,3 ettari), ma tipologicamente esso appare particolarmente simile all'insediamento parzialmente coevo di Albanbühel e quello di Sotciastel (TECCHIATI, 1998a). La sua posizione geografica, a controllo della confluenza del fiume Isarco nella conca di Bressanone, risulta favorevole dal punto di vista strategico, collocandosi a controllo della parte mediana e settentrionale della Val d'Isarco e con un posizionamento privilegiato anche per il controllo dell'imbocco della Val Pusteria. Il dosso su cui insiste l'insediamento si stacca di circa 65 metri dalla piana alluvionale del fiume Isarco risultando particolarmente erto sui pendii orientali, occidentali e meridionali e rendendo possibile l'accesso al sito solo dal lato settentrionale, fortificato attraverso un possente muro di sbarramento (TECCHIATI, 1998b).

Lo scopo del lavoro è quello di testare il modello predittivo creato per l'areale veneto dell'Altopiano di Asiago occidentale anche sulla conca di Bressanone e valutarne l'efficacia nell'identificazione del sito di Nössing come "*control place*". Inoltre, la massiccia presenza di siti archeologici noti in letteratura e dislocati lungo la vallata fornisce un confronto ottimale per testare il modello su "terra incognita". In particolare, i risultati ottenuti con il modello predittivo ideato per identificare i "punti di controllo" verranno comparati con i siti presenti

sul *geodatabase* relativo alle aree archeologiche³ messo a disposizione dalla Provincia Autonoma di Bolzano (Fig. 9.3).

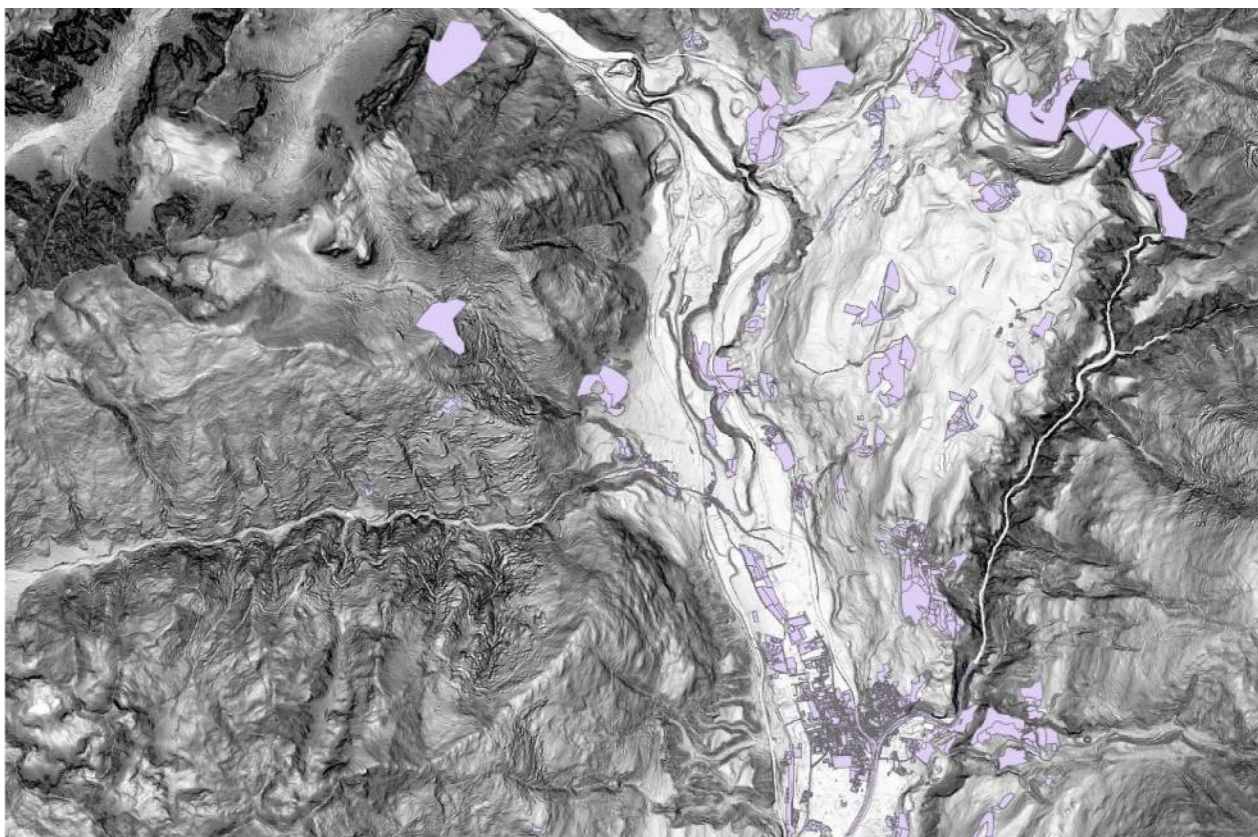


Fig. 9. 3 Trattamento di *slope analysis* del modello digitale del terreno con risoluzione di 2,5 m con sovrapposto lo *shape file* dei rinvenimenti archeologici; conca di Bressanone settentrionale.

Al fine di consentire una più efficace esportazione del lavoro, come dato di partenza è stato impiegato il modello digitale di elevazione (DEM) con risoluzione di 5 m, che è disponibile per l'intero territorio nazionale. Il modello mentale volto alla localizzazione dei punti di controllo ha considerato i seguenti parametri:

- 1) l'irradiazione solare. Una buona esposizione è infatti fondamentale per un insediamento stanziale, per superare i rigidi inverni alpini;
- 2) la dominanza locale. Essenzialmente si è andati a valutare qual è la visibilità, e dunque quanto territorio è possibile controllare, da ogni punto del modello tridimensionale. Alti valori di dominanza sono generalmente caratteristici degli abitati d'altura e di strutture di controllo come castelli ed edifici religiosi;
- 3) la pendenza. Per consentire lo sviluppo di strutture permanenti la ripidezza del pendio deve essere relativamente ridotta. I gruppi umani potevano di volta in volta indirizzare le scelte locazionali in aree naturalmente pianeggianti, oppure trasformare aree

³ I dati sono liberamente accessibili all'indirizzo web: <http://geocatalogo.retecivica.bz.it/geocatalog/#/>

particolarmente significative tramite infrastrutturazioni come terrazzamenti o spianamento di aree sommitali.

Al modello digitale di elevazione sono state applicate tre differenti elaborazioni che hanno fornito la base di partenza per l'implementazione del modello predittivo. Nel dettaglio, sono stati realizzati: a) una *solar radiation*, che permette di calcolare la quantità di radiazione solare per ogni punto del DEM durante tutto l'arco dell'anno (Fig. 9.4 A); b) una *local dominance*, che calcola il dominio sul territorio circostante per ogni punto del modello digitale (Fig. 9.4 B); c) una *slope analysis*, che consente di rappresentare l'andamento della pendenza in un set di dati di elevazione (Fig. 9.4 C).

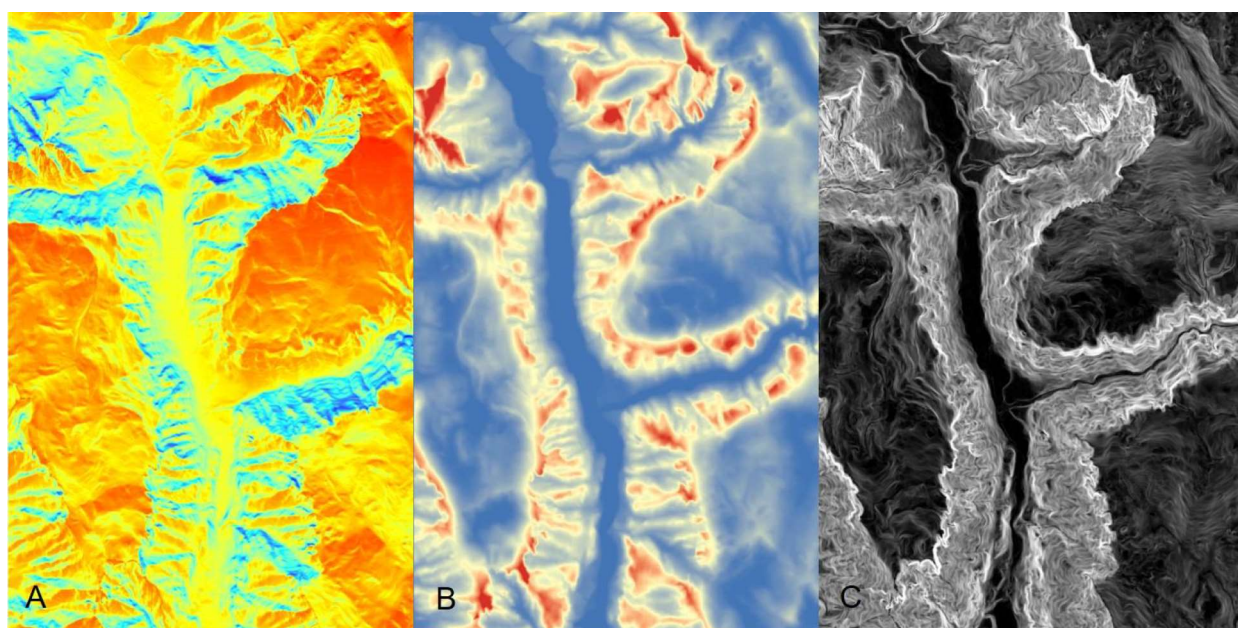


Fig. 9. 4 Modello digitale di elevazione ai 5 m di risoluzione dell'area della Val d'Astico e dell'Altopiano di Asiago occidentale: A) *solar radiation analysis*; B) *local dominance*; C) *slope analysis*.

Sebbene in letteratura l'algoritmo più citato e consigliato per questo tipo di analisi sia la *cumulative visibility*, la scelta in questo caso è ricaduta sulla *local dominance*, poiché quest'ultimo algoritmo tiene in considerazione già in partenza un parametro fondamentale per il territorio in analisi, ovvero l'ampiezza dell'angolo di osservazione. Sono stati tuttavia effettuati dei test anche utilizzando la *cumulative visibility*, che comunque presentava una serie di problematiche, in quanto restituiva valori di visibilità molto alti anche per aree interne all'Altopiano, la cui dominanza generale sul territorio e soprattutto sulle vallate non era particolarmente significativa (Fig. 9.5 A). Anche aumentando notevolmente il raggio massimo di analisi la situazione non veniva completamente risolta, quindi si è deciso di lavorare sulla *local dominance* che risultava più adatta al tipo di indagine (Fig. 9.5 B).

Il quantitativo di irradiazione solare è stato calcolato con l'algoritmo di Rich e colleghi del 1994 e successivamente modificato da Fu e Rich nel 2000. Si è scelto di procedere calcolando l'irradiazione solare sull'intero territorio in analisi a intervalli mensili regolari e mappando poi il risultato su un'unica immagine. Il risultato è stata una mappa in falsi colori dove per ogni area del modello era visibile il quantitativo di irradiazione solare calcolato sull'intero anno (Fig. 9.4 A).

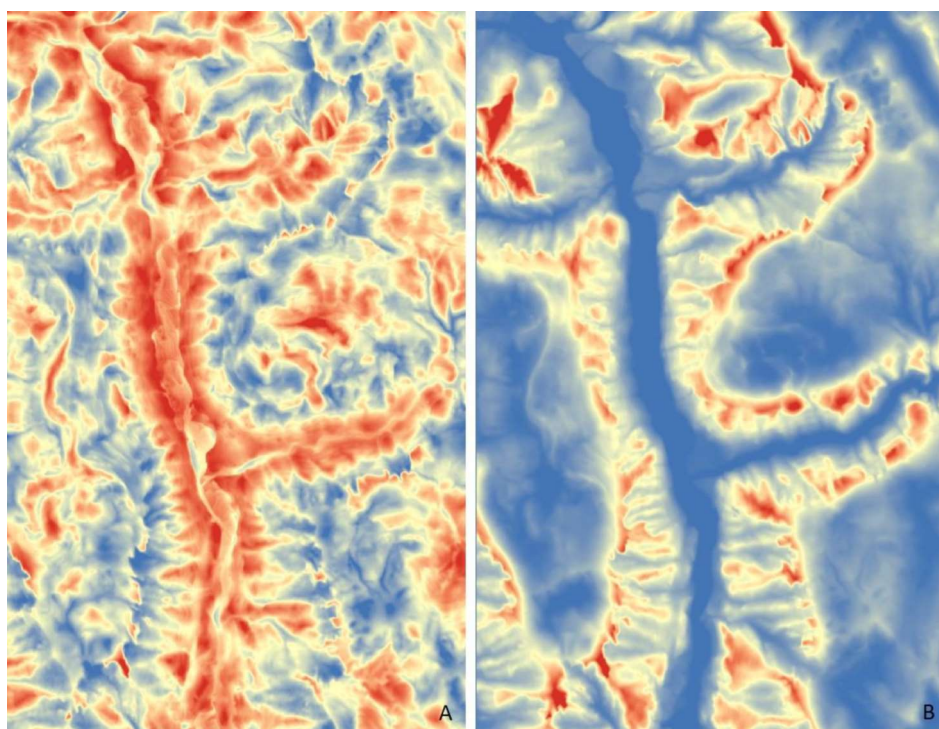


Fig. 9. 5 Modello digitale di elevazione ai 5 m di risoluzione dell'area della Val d'Astico e dell'Altopiano di Asiago occidentale: A) *cumulative visibility*; B) *local dominance*.

9.2 Creazione del rule set

La fase successiva ha previsto la creazione vera e propria del modello predittivo tramite un approccio *object-based* alla classificazione, partendo dai dati noti e da quelli elaborati *ad hoc*.

Come file di input sono stati utilizzati i risultati delle tre elaborazioni precedentemente citate e uno *shape file* con il perimetro del sito del Bostel di Rotzo. I dati sono stati caricati in un ambiente per analisi OBIA (eCognition Developer) e visualizzati come un'immagine RGB, mappando la *solar radiation* sul *layer* del rosso, la *local dominance* sul *layer* del verde e lo *slope* sul *layer* del blu. Successivamente, l'immagine è stata partizionata in oggetti-immagine attraverso una segmentazione a multirisoluzione (Fig. 9.6). Sin dalle prime fasi

del progetto si è deciso di realizzare due *rule set* differenti in maniera da poter confrontare eventuali differenze nei risultati. Per entrambi i progetti è stato selezionato l'algoritmo di segmentazione a multirisoluzione, ma sono stati impostati parametri diversi: nel primo caso si è scelto di ponderare equivalentemente tutti e tre i *layer*, mentre nel secondo caso è stato dato un peso inferiore al *layer* dello *slope*. I parametri di scala, forma e compattezza invece sono stati rispettivamente settati su 1200, 0,1 e 0,6. Il *layer* tematico del perimetro del sito è stato tenuto in considerazione per entrambe le segmentazioni. Il valore elevato del parametro di scala è dovuto alle dimensioni dell'area di indagine: infatti, con un parametro più basso l'immagine sarebbe stata sovra-segmentata e dunque più difficilmente trattabile col metodo in esame.

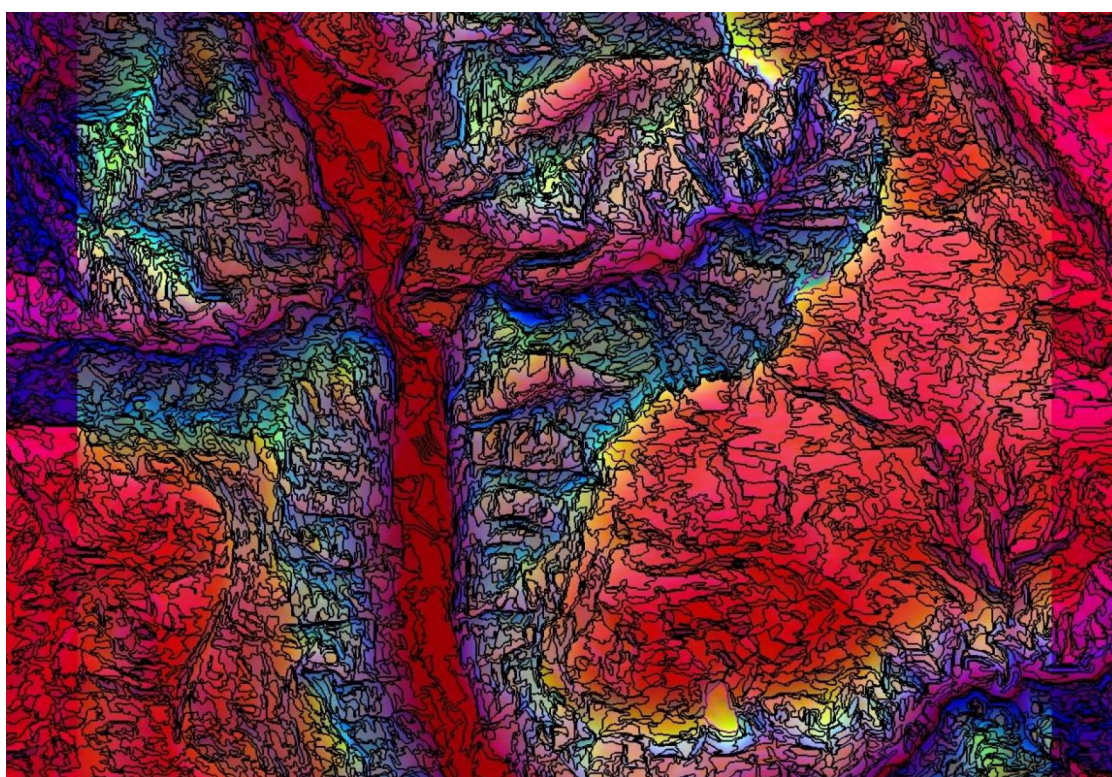


Fig. 9. 6 Segmentazione a multirisoluzione delle tre elaborazioni del DEM in fig. 9.4 visualizzate come un'immagine RGB: *layer* rosso – *solar radiation*; *layer* verde – *local dominance*; *layer* blu – *slope*.

Il “modello mentale” sotteso alla realizzazione del modello predittivo prevede la classificazione di tutti quegli oggetti-immagine che presentino alti valori di *solar radiation* e *local dominance*, ma bassi valori di *slope*; in questo modo vengono classificate solamente aree sufficientemente pianeggianti per permettere lo sviluppo di un punto di controllo strutturato, che più facilmente può aver lasciato tracce visibili sul terreno. I primi due passaggi di classificazione sono stati identici per entrambi i modelli: si sono inizialmente classificati tutti gli oggetti-immagine che avessero un valore piuttosto alto di irradiazione

solare (*mean layer 1* ≥ 1285123 su un valore massimo totale di 1515807) e successivamente, filtrando esclusivamente le aree già classificate, gli oggetti-immagine che avessero valori alti di *local dominance* (*mean layer 2* > 55 su un valore massimo totale di 80) (Fig. 9.7 A e B). Durante il terzo passaggio i due *rule set* prendono strade differenti: nel primo si sono esclusi dalla classificazione tutti gli oggetti-immagine aventi un valore di *slope* minore di 30 gradi (*mean layer 3* < 30) (Fig. 9.7 C) e, dopo l'applicazione dell'algoritmo *merge region* per la fusione degli oggetti prossimali classificati in un unico oggetto-immagine, è stata introdotta la variabile area per eliminare tutte le aree troppo piccole per il possibile sviluppo di un contesto strutturato (area $< 2000 \text{ m}^2$) (Fig. 9.8).

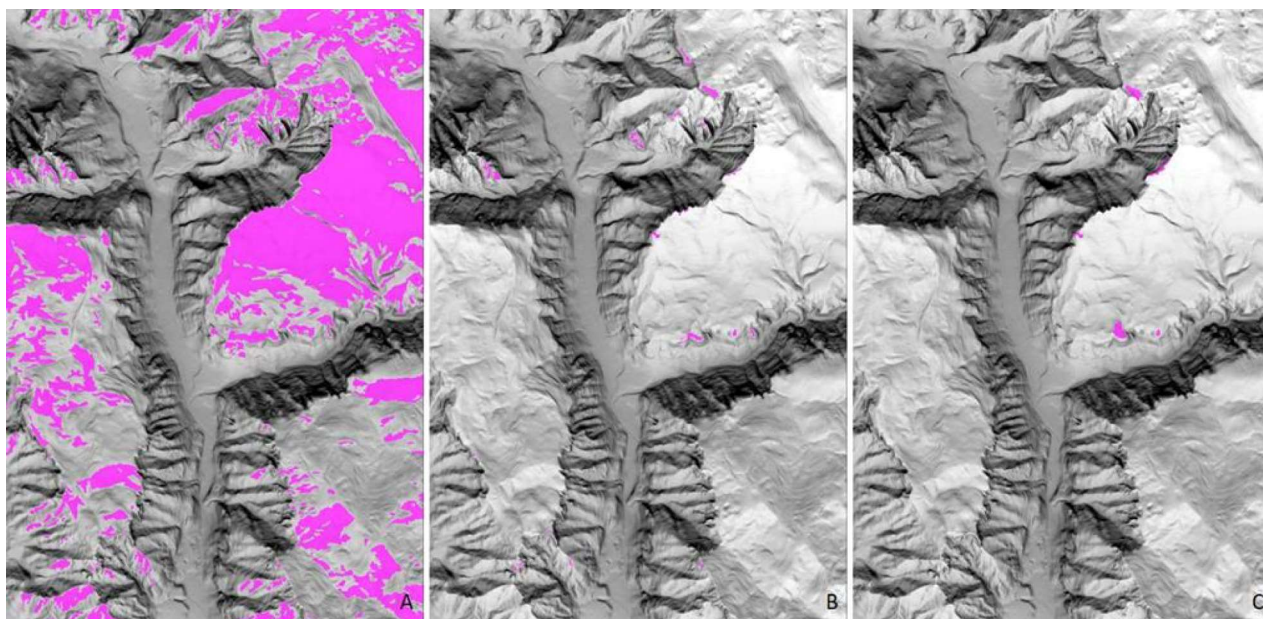


Fig. 9. 7 Tre passaggi di classificazione *object-based*, *rule set 1*: A) classificazione di oggetti con alti valori di *Solar Radiation*, B) classificazione di oggetti con alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance*, C) classificazione finale (alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance* e bassi valori di *Slope*).

Nel secondo modello invece è stato utilizzato un parametro di *slope* più contenuto che ha favorito le aree più pianeggianti in fase di classificazione (*mean layer 3* < 20) rendendo di fatto non necessario l'utilizzo della variabile dimensionale area per escludere dal *rule set* le zone con una bassa pendenza, ma praticamente troppo piccole per uno sfruttamento antropico articolato (Fig. 9.9).

Per entrambi i *rule set*, infine, è stato utilizzato un algoritmo relazionale tra oggetti-immagine che ha permesso di ampliare e meglio definire le aree individuate dal modello. Nel dettaglio si è scelto di includere nella classificazione finale quegli oggetti-immagine che condividessero con gli oggetti classificati (o *parent process objects* - PPO) almeno il 30% del perimetro totale (*Rel. border to class.* $> 0,3$ su un valore totale massimo di 1).

Per finire è stato applicato nuovamente un algoritmo di *merge region* che ha permesso di fondere tutti gli oggetti-immagine prossimali classificati. Quest'ultimo passaggio risulta particolarmente importante qualora sia necessario quantificare i parametri dimensionali delle aree classificate o il numero degli oggetti-immagine individuati.

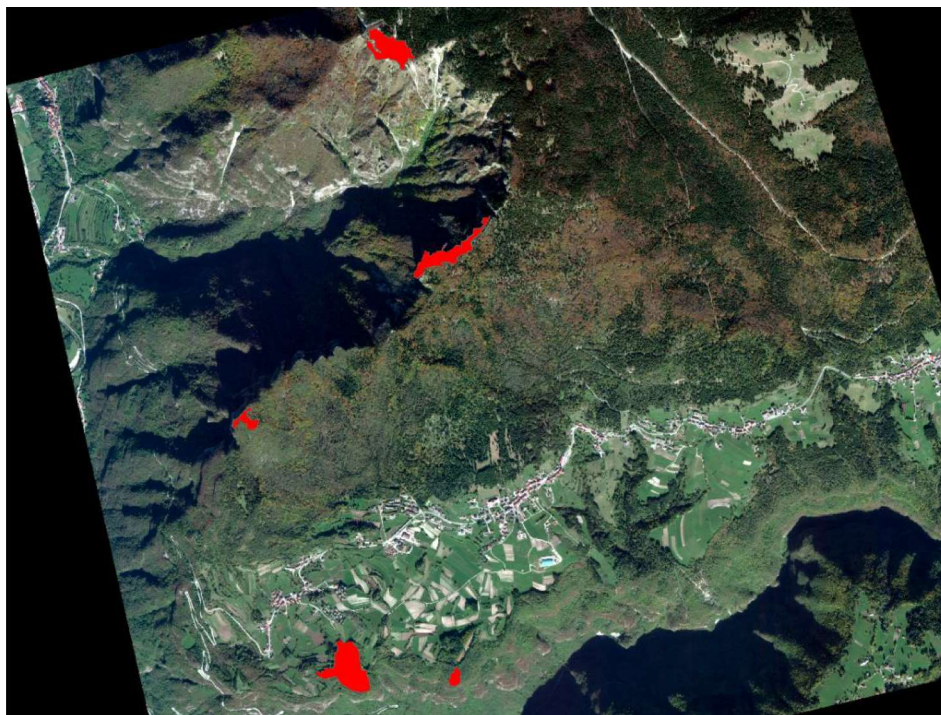


Fig. 9. 8 Primo modello predittivo dei “control places” mappato su un’immagine multispettrale WV2 dell’area dell’altopiano di Asiago occidentale. In rosso le aree individuate dal modello.

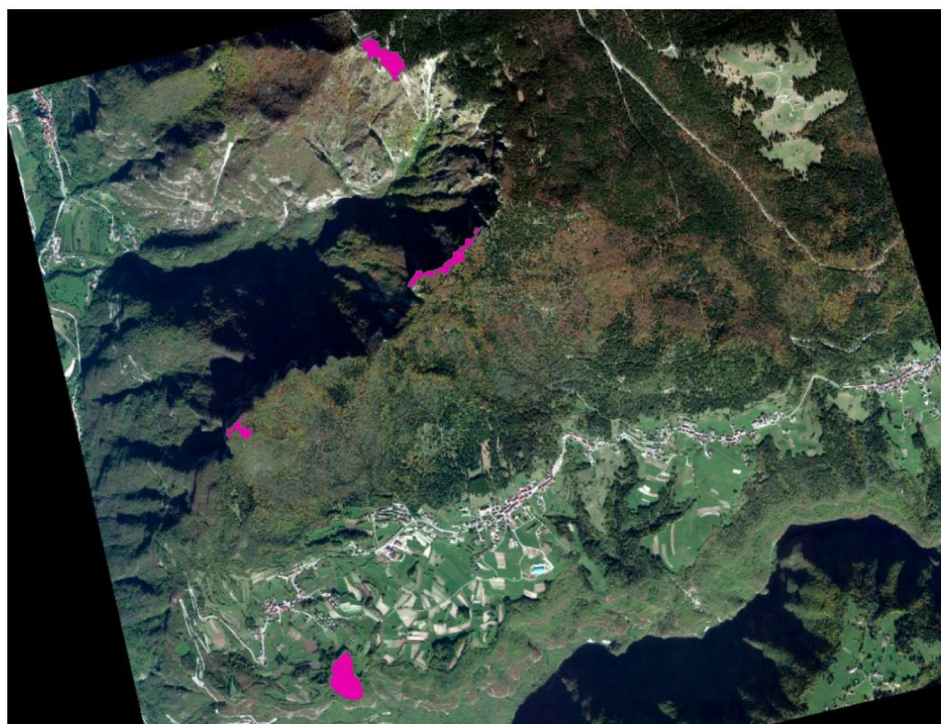


Fig. 9. 9 Secondo modello predittivo dei “control places” mappato su un’immagine multispettrale WV2 dell’area dell’altopiano di Asiago occidentale. In viola le aree individuate dal modello.

9.3 **Risultati e verifica sul campo**

I risultati dei due modelli sono in buona parte sovrapponibili, con però alcune sostanziali differenze. Quattro aree sono state identificate in entrambi i modelli, mentre il primo *rule set* classifica un singolo areale aggiuntivo. Le procedure di verifica dell'attendibilità dei modelli sono state suddivise in due fasi: una prima verifica da remoto attraverso l'utilizzo di fotografie aeree storiche e immagini satellitari multispettrali (WorldView 2 a 8 bande) e una seconda con ricognizione a terra mirata alle zone d'interesse.

Il primo risultato, già verificabile da remoto, è la presenza del sito protostorico del Bostel di Rotzo tra le aree individuate da entrambi i modelli. Se da un lato ciò conferma la propensione di controllo dell'abitato sul territorio circostante, dall'altro il modello viene a sua volta validato dall'inclusione del villaggio tra le aree classificate poiché conferma un dato già empiricamente ipotizzato. Il sito più a nord, invece, coincide con l'area occupata da Forte Campolongo, uno dei più importanti forti italiani a controllo della Val d'Astico e del confine durante la Prima Guerra Mondiale. È quindi possibile confermare anche il secondo areale come "*control place*" dell'Altopiano occidentale, anche se ovviamente di diversa cronologia. Le altre due aree sono coperte da una fitta vegetazione e risulta impossibile verificare con certezza da remoto eventuali presenze archeologiche senza il conforto con dati LiDAR ad alta risoluzione. È comunque possibile formulare alcune considerazioni generali. L'area più a est è una zona pianeggiante a ridosso della cima Spitz di Rotzo (circa 1350 m sul livello del mare), la sua posizione ha alti valori di dominanza sul territorio circostante, ma l'altitudine e l'esposizione alle intemperie la rendono poco adatta per un insediamento protostorico. È invece probabile la presenza anche in questo caso di strutture legate alle Grande Guerra. La seconda area, anche se meno estesa, condivide caratteristiche molto simili al Bostel di Rotzo. Infatti, pur avendo alti valori di dominanza, la presenza di cima Obergrubele a nord protegge maggiormente la zona dalle correnti.

Oltre a queste quattro aree, il primo modello include anche una quinta zona denominata Groementeche; si tratta di un promontorio situato a est rispetto al Bostel di Rotzo, che si affaccia direttamente sulla Val d'Assa. Sebbene l'area sia scarsamente vegetata non è stato possibile individuare alcuna struttura visibile da remoto.

Si è proceduto quindi a una verifica sul campo delle tre aree individuate dai modelli di cui non si aveva un riscontro certo attraverso il *remote sensing*. La ricognizione ha avuto luogo nel giugno 2016 ed è proceduta da nord verso sud.

La prima area, quella localizzata nei pressi di cima Spitz di Rotzo, ha rivelato sin da subito un grande potenziale. Già diverse centinaia di metri prima di arrivare era possibile vedere un'imponente infrastrutturazione relativa alla Prima Guerra Mondiale con muri di contenimento, piazzole per le mitragliatrici, baraccamenti e postazioni difensive. Arrivati sul luogo indicato dal modello ci si è trovati davanti uno spiazzo per il posizionamento di artiglieria pesante con la presenza di una trincea colmata (Fig. 9.10 A) e un grosso muro di contenimento per livellare il terreno (Fig. 9.10 B). La visibilità era eccellente, anche considerato che nessun albero occupava la visuale (Fig. 9.10 C). Affacciandosi verso il pendio si potevano scorgere buona parte della Val d'Astico, il sito di Forte Campolongo (Fig. 9.10 D), quello del Bostel e parzialmente anche la nostra seconda meta di indagine. Oltre alla tipologia infrastrutturale, anche diversi manufatti hanno confermato la cronologia del sito alla Grande Guerra: sono infatti stati rinvenuti diversi metri di filo spinato, ogive, bossoli e schegge di bombe.



Fig. 9. 10 Ricognizione sul campo, località nei pressi di Spitz Rotzo: A) trincea della Prima Guerra Mondiale in stato di abbandono; B) muro di contenimento di una piazzola da artiglieria della Prima Guerra Mondiale; C) visuale dal ciglio della piazzola verso la Val d'Astico; D) Forte Campolongo visto dalla piazzola.

La seconda area ricognita è situata a sud-ovest di punta Obergrubele e condivide con il Bostel di Rotzo caratteristiche simili sia per quota che per visibilità. Arrivati sulla zona

individuata dal modello è stato subito chiaro come l'area fosse stata spianata "recentemente" per permettere la salita di alcuni automezzi sfruttati per il trasporto del legname (Fig. 9.11 A). Il pianoro infatti è interessato attualmente dalla pratica del taglio selettivo della vegetazione con presenza di ceppaie e trucioli e segatura di legno al suolo. Si è provato a effettuare un piccolo saggio nel sottobosco e a sfruttare finestre stratigrafiche esposte per valutare la stratigrafia del sito, ma la presenza di massi di grossa pezzatura intervallati da vuoti della matrice (Fig. 9.11 B) hanno reso impossibile fare ipotesi relative a un ipotetico sfruttamento dell'area in antico. In questo caso il modello ha individuato un areale ad alto potenziale, ma la situazione attuale non permette di effettuare ulteriori indagini.



Fig. 9. 11 Ricognizione sul campo, località nei pressi di punta Obergrubele: A) area spianata artificialmente da mezzi pesanti con tracce di taglio selettivo; B) affioramento superficiale di massi di grossa pezzatura.

L'ultimo contesto indagato è quello del Groementech, localizzato sul pianoro direttamente a est del Bostel e collegato ad esso attraverso un sentiero il cui primo impianto non è precisabile. La zona è nota nelle leggende e nelle storie popolari (MARTELLLO, 2014) per essere un luogo magico legato a rituali stregoneschi e di natura satanica (anche sul Bostel di Rotzo esistono leggende simili: si narra fosse un luogo di ritrovo per le streghe che vi celebravano Sabba e rituali simili). L'area, oltre ad avere caratteristiche ambientali comparabili a quelle del vicino sito protostorico del Bostel ha evidenziato la presenza di due lastre di pietra infisse nel terreno in posizione sub-verticale (Fig. 9.12). Non è stato possibile datare questa "struttura", sebbene la memoria storica locale sostiene che le pietre siano lì "da sempre". Nonostante siano ubicate in proprietà privata, non sono ancora state rimosse o abbattute. La posizione e la vicinanza al sito ne hanno suggerito una possibile estensione per la pratica di culti religiosi, ma la totale assenza di materiale antropico (con l'eccezione di qualche sporadico frammento ceramico non diagnostico) e l'impossibilità di eseguire

saggi di controllo della stratigrafia non permettono ad oggi di avanzare ipotesi ponderate. Non è comunque possibile escludere che il modello rifletta anche aree riferite alla sfera cognitivo-proiettiva e culturale, che sono frequentemente associate a particolari caratteristiche topografiche come cime, passi e variazioni di pendenza repentine (ad es. santuari sommitali, Passfunde e Brandopferplätze) come ben testimoniato in letteratura (STEINER, 2010).



Fig. 9. 12 Ricognizione sul campo, località Groementeche: lastre di pietra infisse nel terreno in posizione sub-verticale.

Il caso di studio qui presentato, nonostante le problematiche connesse alle costrizioni geografiche e all'impossibilità di indagare con campagne di scavo sistematico o di prospezioni geofisiche le aree identificate, offre uno spunto interessante per valutare le potenzialità e l'affidabilità che la tecnologia OBIA può offrire anche nella realizzazione di modelli predittivi applicati all'archeologia. Sfruttando la natura interattiva e l'ampia adattabilità offerta dal metodo, nonché la possibilità di elaborare tipologie di dati diversi contemporaneamente è possibile creare innanzitutto modelli esportabili e riutilizzabili in differenti areali geografici e in secondo luogo ampliare il numero di variabili da considerare per raffinare ulteriormente il modello.

9.4 **Applicazione e adattamento del rule set per un diverso contesto**

Una volta verificata l'affidabilità del *process tree* sull'areale dell'Altopiano di Asiago si è deciso di testare lo stesso *rule set* su un'area che presentasse caratteristiche simili dal punto di vista archeologico e geografico, e di cui si disponesse di dati e conoscenze pregresse adeguate alla verifica dei risultati. La scelta è ricaduta dunque su un'area della Val d'Isarco

di poco meno di 110 km² compresa tra i comuni di Bressanone, quello di Varna, quello di Naz-Sciaves, quello di Luson, quello di Rodengo, quello di Fortezza e quello di Rio di Pusteria (Fig. 9.2).

Il lavoro è stato suddiviso in due fasi: una prima di riadattamento e applicazione del *rule set* “*control places*” sulla nuova area *test*; una seconda, definita “*remote truth*”, di confronto e controllo dei risultati ottenuti con il *geodatabase* dei siti archeologici della zona e con ortofoto e modelli digitali a maggiore risoluzione.

Il DTM della zona d'indagine è stato trattato, come nel caso precedente, con le tre elaborazioni precedentemente citate, ovvero la *solar radiation*, lo *slope* e la *local dominance* mantenendo invariato il settaggio dei parametri (Fig. 9.13).

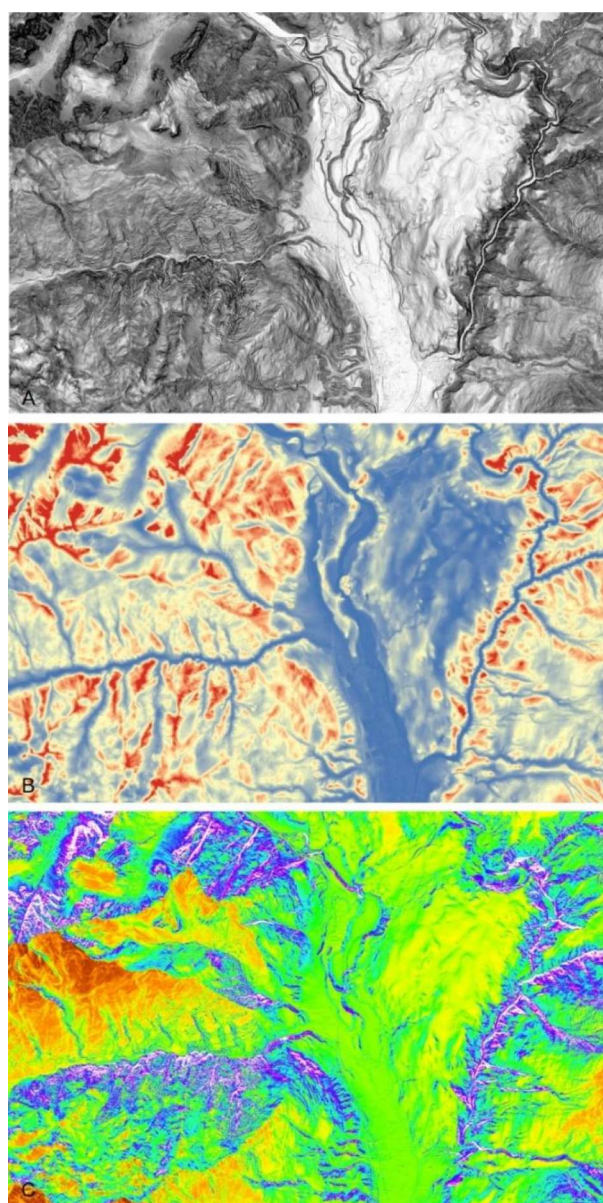


Fig. 9. 13 Modello digitale di elevazione ai 2,5 m di risoluzione dell'area della conca di Bressanone settentrionale: a) *slope analysis*; b) *local dominance*; c) *solar radiation analysis*.

Prima di riapplicare automaticamente il *rule set* creato è stato necessario operare su alcuni dei parametri per meglio calibrare la procedura e ottimizzare i risultati. Va innanzitutto considerato che il modello digitale del terreno (DTM) disponibile per l'Alto Adige ha una risoluzione spaziale di 2,5 m, dunque migliore rispetto a quello esistente per l'area veneta, che era ai 5 m. Essendo il parametro di scala della segmentazione a multirisoluzione inversamente proporzionale rispetto alla risoluzione è stato necessario passare da un valore di 1200 a uno di 2400. Gli altri valori, invece, non sono stati variati rispetto al progetto precedente: si sono infatti mantenuti *shape* a 0,1 e *compactness* a 0,6. Ai tre *layer* caricati è stato, inoltre, dato lo stesso peso in fase di segmentazione (Fig. 9.14). Come nel caso di studio precedente, è stato inserito nel progetto uno *shape file*, nello specifico quello relativo ai ritrovamenti archeologici effettuati nella zona di indagine.

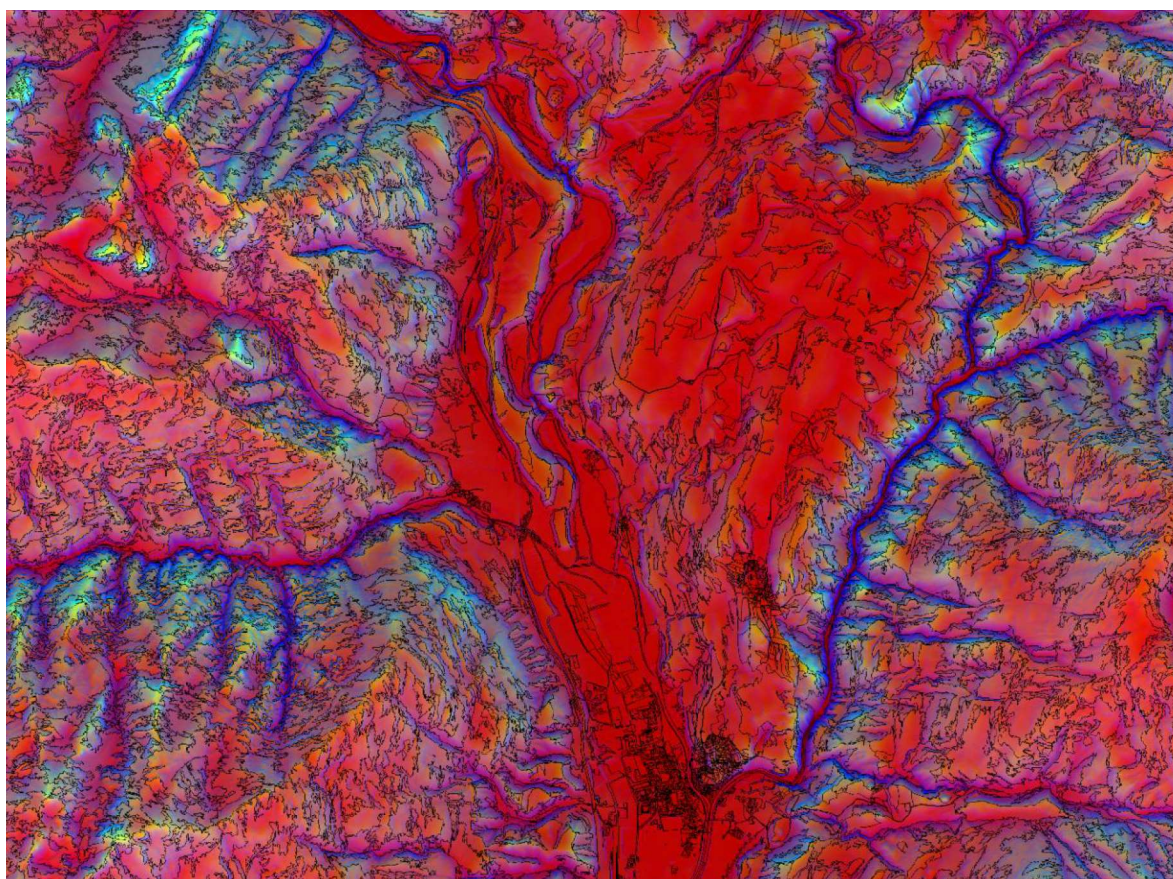


Fig. 9. 14 Segmentazione a multirisoluzione delle tre elaborazioni del DEM in fig. 9.13 visualizzate come un'immagine RGB: *layer* rosso – *solar radiation*; *layer* verde – *local dominance*; *layer* blu – *slope*.

Successivamente, pur mantenendo lo stesso modello mentale, è stato necessario adattare allo specifico caso di studio i valori di “*mean*” sul *layer* della *solar radiation* e su quello della *local dominance* (Fig. 9.15 A). Questa modifica si è resa necessaria per via delle condizioni geografiche dei due luoghi indagati che, sebbene entrambi ubicati in territorio

alpino, presentano caratteristiche orografiche differenti. L'areale veneto si presenta come un esteso altopiano con elevazione piuttosto costante (a esclusione del fondo valle) e cime moderate; al contrario nella Val d'Isarco il dislivello di quota è molto più marcato (550 – 2550 m) e la vallata più stretta. In queste ultime condizioni l'irradiazione solare e la dominanza dei singoli oggetti-immagine risultano a livello assoluto più basse, ma ugualmente importanti in relazione al territorio circostante.

La parte finale del *rule set* è rimasta essenzialmente invariata. Sono state, infatti, escluse dalla classificazione le aree con pendenza maggiore di 20 gradi (Fig. 9.15 B) e sono stati applicati algoritmi di tipo relazionale (*rel. border to class.* > 0,3 su un valore totale massimo di 1) e di fusione (*merge region*) tra oggetti-immagine per definire con maggiore dettaglio le zone classificate (Fig. 9.15 C).

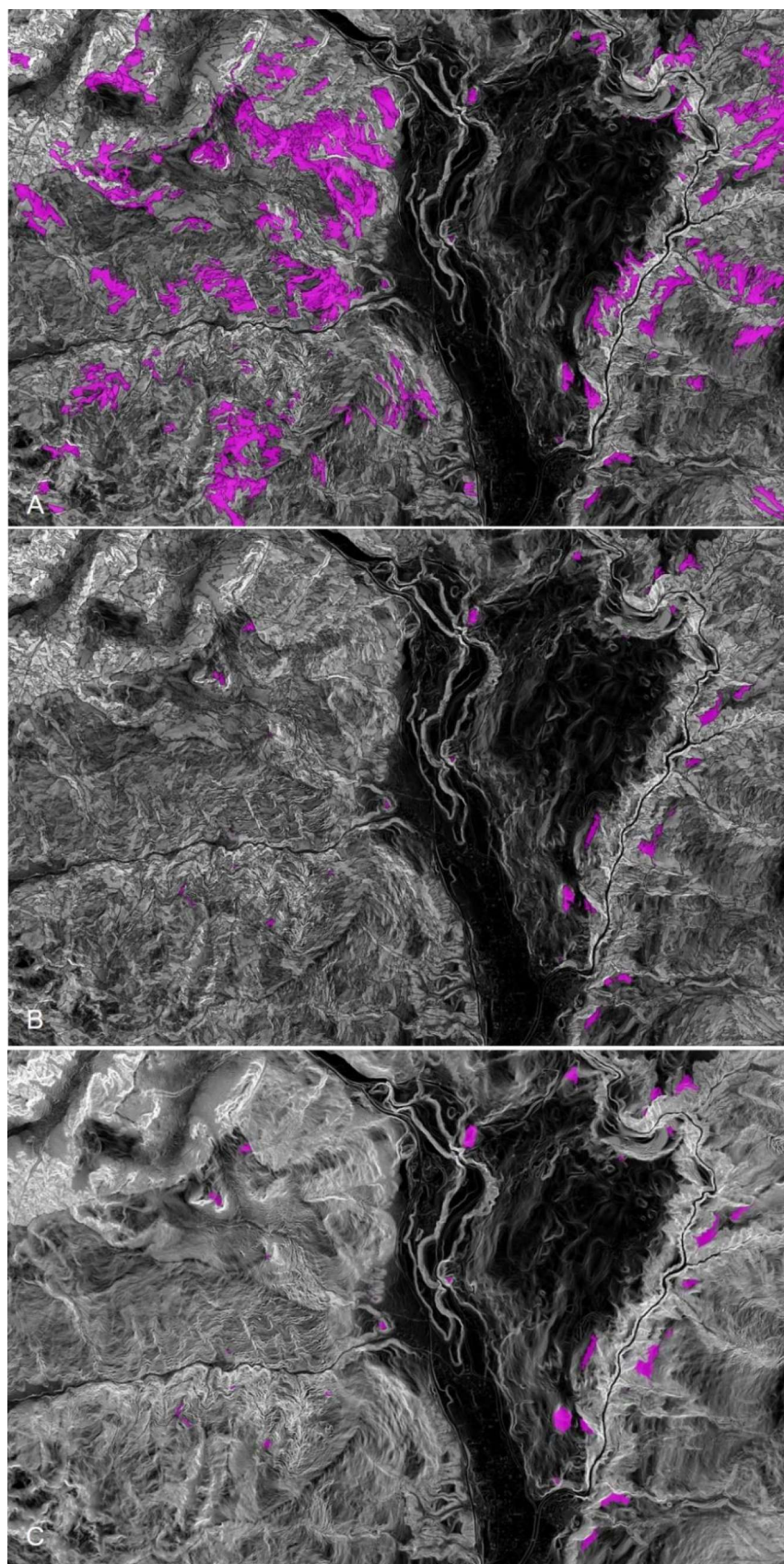


Fig. 9. 15 Adattamento e riapplicazione automatica del *rule set* “*control places*”: A) classificazione di oggetti con alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance*; B) classificazione di oggetti con alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance* e bassi valori di *Slope*; C. classificazione finale (alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance*, bassi valori di *Slope*, algoritmi di *rel. border to class* e *merge region*).

9.5 Verifica dei risultati

L'applicazione supervisionata del *rule set* individua 36 oggetti-immagine appartenenti alla classe “*control places*” all'interno dell'areale studiato (Fig. 9.16 A). Queste zone sono state successivamente oggetto di indagine confrontando i risultati ottenuti con dati di tipo vettoriale relativi ai siti archeologici censiti nel relativo *geodatabase* provinciale (Fig. 9.16 B) e con dati raster ortofotografici e DTM ad alta risoluzione (0,5 m). Dato l'elevato numero di occorrenze individuate si è provveduto, per comodità, alla verifica per settori suddividendo l'area in “versante occidentale”, ovvero a ovest rispetto al corso del fiume Isarco, “fondovalle” compreso tra il corso dell'Isarco e della Rienza e “versante orientale”, a est del fiume Rienza. I due siti di Punterbühel e Fiumes sono stati inseriti rispettivamente nei settori “fondovalle” e “versante orientale” pur essendo localizzati nei settori “versante occidentale” e “fondovalle” a causa del loro stretto legame sotto il profilo dei sistemi insediativi protostorici con i siti dei settori adiacenti.

Il versante occidentale presenta 11 oggetti-immagine classificati, di questi 5 fanno parte di zone definite come “certamente archeologiche” mentre gli altri 6 non sono presenti sul *geodatabase* (Fig. 9.17). Analizzando nel dettaglio le aree classificate che trovano riscontro sullo *shape file* della cartografia archeologica provinciale è possibile notare come due oggetti-immagine facciano parte di siti identificati come castelli. Entrambi i contesti sono localizzati nella municipalità di Varna a meno di 500 m di distanza l'uno dall'altro. I due areali sono occupati da resti di fortificazioni medievali, che sono solo parzialmente visibili sui dati LiDAR (Fig. 9.18); nell'area sono stati tuttavia rinvenuti anche reperti di epoca protostorica. Nel dettaglio, nell'area di Spelonca/ Voitsberg (LUNZ, 1992) è stata individuata una fase insediativa protostorica della Media e Recente età del Bronzo, sulla quale si è successivamente sviluppato il castello medievale (Fig. 9.19). Questa continuità d'uso, pur intervallata da significativi episodi di abbandono, è probabilmente da mettere in relazione anche alla posizione di controllo occupata dall'area.

Il terzo oggetto-immagine identificato, anch'esso coincidente con una zona segnalata sullo *shape file*, è la porzione più meridionale di un ampio pianoro a poco più di un chilometro dal sito di Spelonca/ Voitsberg. Sull'area, denominata come Spelonca/ Burgstalllegg (LUNZ, 1981; 1992), sono stati identificati i resti di un sito stagionale del Bronzo Recente forse da mettere in relazione con la fase finale dell'abitato situato poco più a valle. L'assenza di un

modello digitale ad alta risoluzione e la fitta vegetazione non permettono di visualizzare alcuna struttura residuale dell'insediamento protostorico attraverso indagini da remoto.

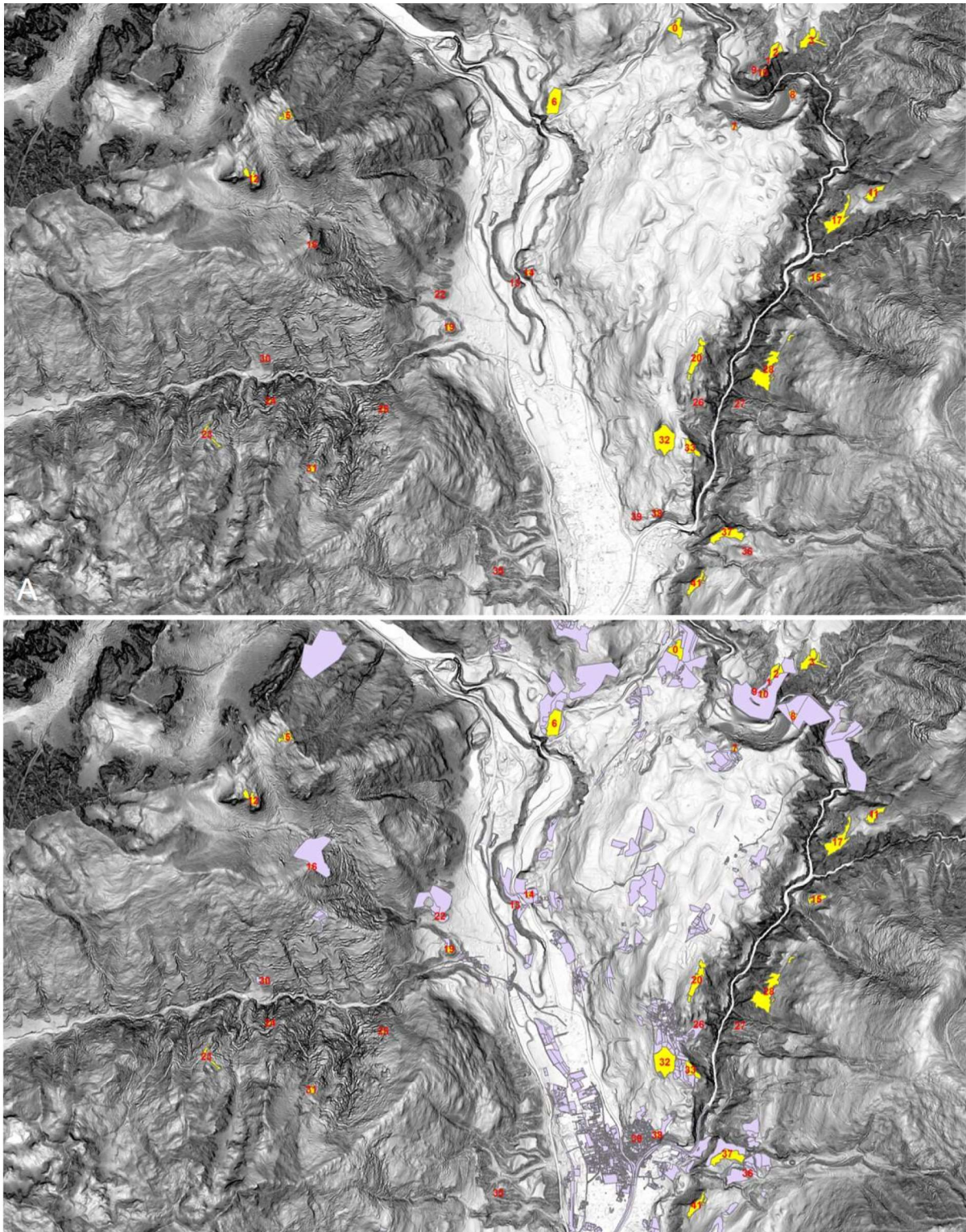


Fig. 9. 16 Modello digitale del terreno (*slope analysis*) della conca di Bressanone: A) in giallo i 36 oggetti-immagine classificati come “*control places*”; B) in violetto *shape file* delle aree archeologiche finora conosciute.

Le altre due evidenze classificate dal software sono le aree vincolate che ospitano due importanti chiese locali: la chiesa Parrocchiale di San Wolfgang presso Scaleres nel comune di Varna e la chiesa di San Cirillo presso Tiles nel comune di Bressanone.

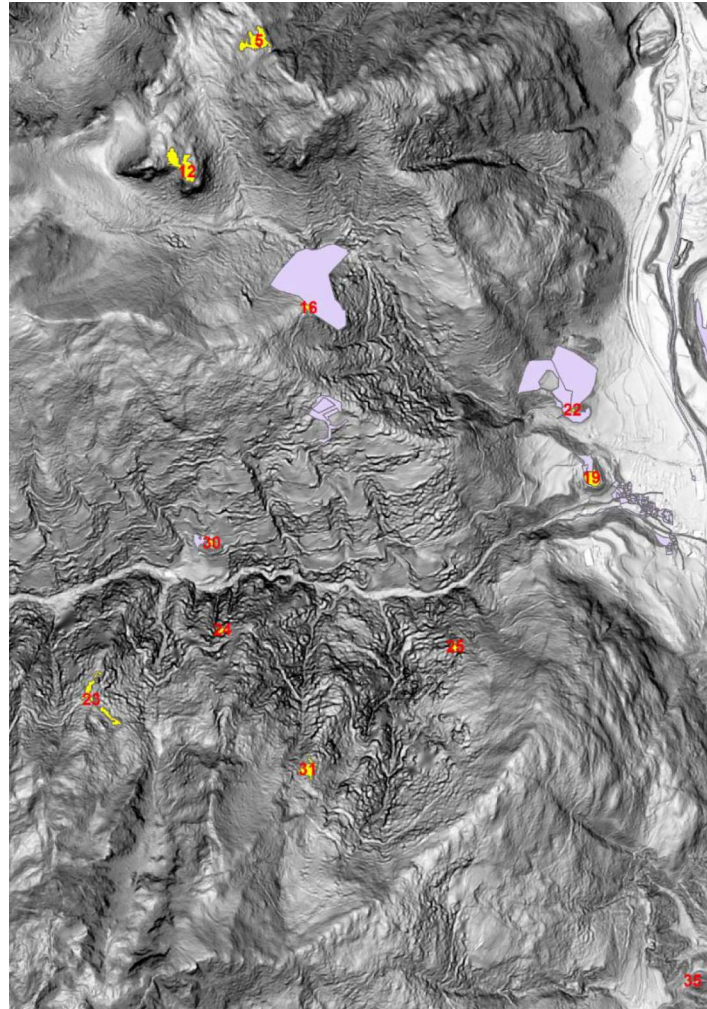


Fig. 9. 17 Modello digitale del versante occidentale: sono evidenziati in giallo e dai numeri identificativi rossi gli 11 oggetti-immagine individuati dal modello predittivo, in violetto le aree archeologiche finora conosciute.

Le 6 occorrenze non presenti sul *geodatabase* archeologico sono situate tutte lungo i versanti occidentali più esterni della valle e sono coperte da una fitta vegetazione. L'assenza per queste aree di modelli digitali ad alta risoluzione non permette interpretazioni dettagliate. Si possono in ogni caso proporre alcune considerazioni generali basandosi sui dati disponibili (DTM 2,5m): ad eccezione dell'area numero 12, che presenta caratteristiche geografiche del tutto simili a quelle dei territori ospitanti i siti più prominenti della zona, e dell'area 31, la cui posizione naturalmente difesa potrebbe indiziare una frequentazione antropica antica, le altre quattro sembrano non essere direttamente in relazione con possibili strutture archeologiche. È invece probabile, vista anche la vicinanza di alcuni con gli attuali

tracciati stradali, che siano zone spianate artificialmente durante i lavori di costruzione moderni (ciò, ad esempio, pare particolarmente plausibile per le aree numero 23 e 24).

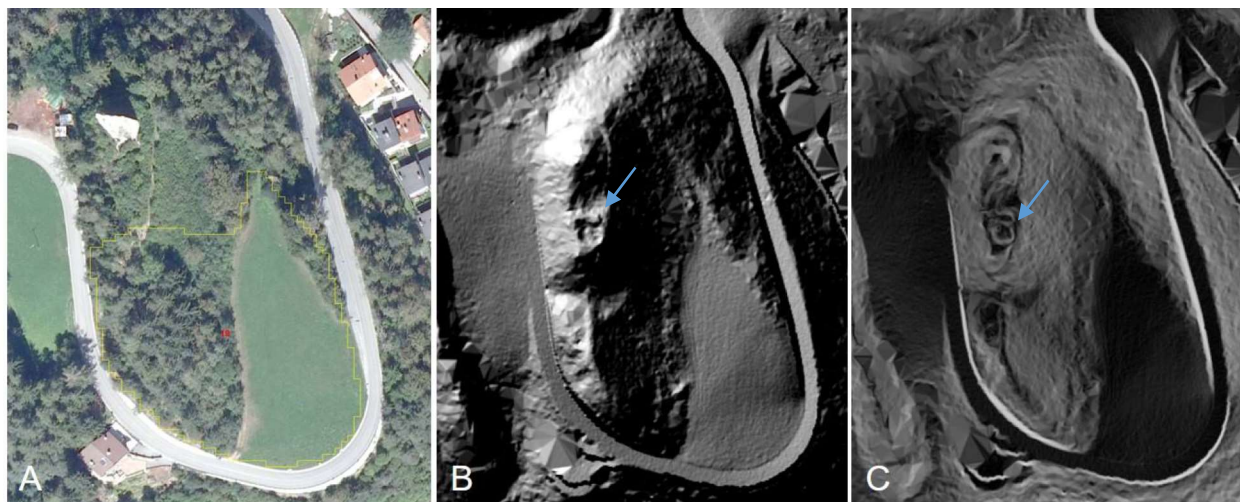


Fig. 9. 18 Sito di Castel Salern: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; C) *slope analysis* del DTM a 0,5 m di risoluzione. La freccia azzurra indica un'anomalia identificata come possibile fortificazione medievale.

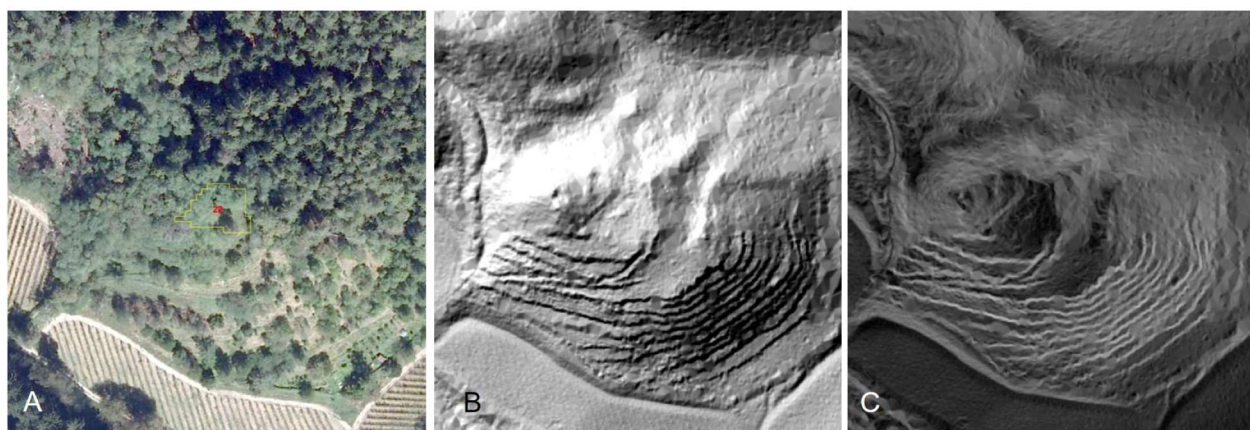


Fig. 9. 19 Sito di Spelonca/ Voitsberg: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; C) *slope analysis* del DTM a 0,5 m di risoluzione.

Anche gli oggetti-immagine classificati nel fondovalle sono 11, 7 dei quali rientrano nelle cosiddette aree “certamente archeologiche”, 3 nelle zone definite “a rischio archeologico”. Uno soltanto non è riportato sul GIS archeologico provinciale (Fig. 9.20).

Le 7 aree sicuramente archeologiche sono segnalate come insediamenti (o quantomeno come probabili insediamenti) o strutture abitative di epoca pre-protostorica. Tra questi spiccano i due castellieri, quello di Nössing (EGGER, 1917; POLACCO *et alii*, 1968; TECCHIATI, 1998b) e quello di Pinatz (EGGER, 1943; 1951; DI PILLO, 1994), sicuramente luoghi deputati all'osservazione e al controllo della valle. Il primo, come detto già scavato dall'Università degli Studi di Padova tra il 1966 e il 1969, è stato oggetto di una accurata campagna di fotointerpretazione e di ricognizione sul campo. I dati LiDAR a 0,5 m di

risoluzione sono stati trattati con alcune tecniche di visualizzazione standard come *hillshade*, *skyview factor*, *slope* e *local relief model*; successivamente le immagini ottenute sono state analizzate tramite tecniche di fotointerpretazione alla ricerca di possibili *features* di natura archeologica (Fig. 9.21)

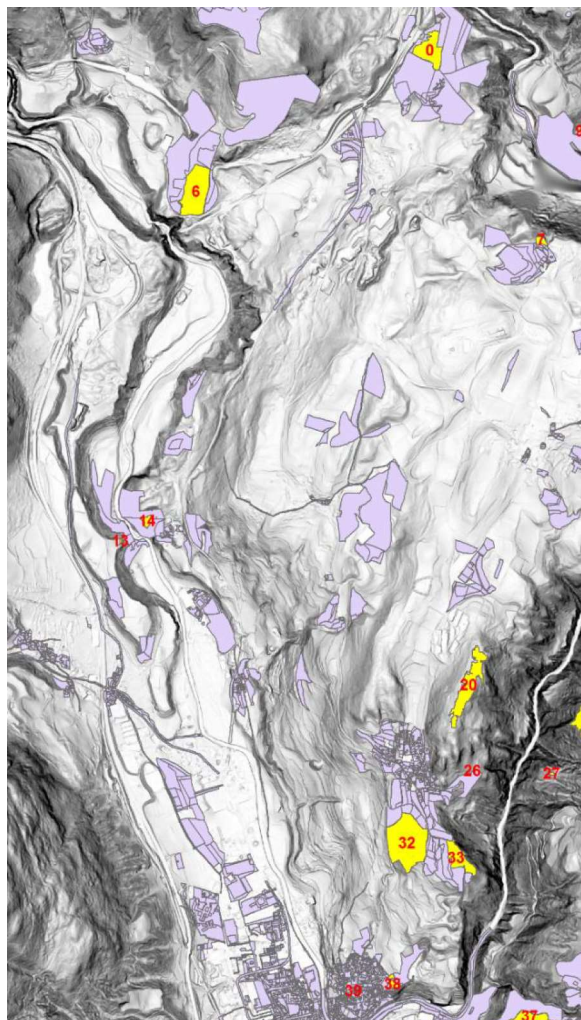


Fig. 9. 20 Modello digitale del fondovalle: sono evidenziati in giallo e dai numeri identificativi rossi gli 11 oggetti-immagine individuati dal modello predittivo, in violetto le aree archeologiche finora conosciute.

I risultati evidenziano come all'interno e lungo il perimetro del sito siano identificabili da remoto sia strutture note, come il muro di sbarramento (A) e i transetti di scavo dell'Università degli Studi di Padova, sia strutture mai precedentemente individuate e di cronologia non precisabile. Tuttavia la veramente trascurabile documentazione materiale relativa a ulteriori fasi di frequentazione nell'area, confermata anche dagli scavi stratigrafici condotti, consente di ipotizzare ragionevolmente che esse siano da ascrivere alla fase di frequentazione più antica dell'abitato. Si tratta di due evidenze di forma sub-circolare leggermente depresse, oltre a una terza di forma quadrangolare. I controlli a terra effettuati non hanno chiarito la natura della *feature* quadrangolare (B) che risulta invisibile a livello

suolo, mentre le due evidenze sub-circolari nell'area meridionale del sito (C) non hanno restituito ulteriori elementi utili per la loro interpretazione, nonostante fossero ben visibili anche a terra. La terza struttura sub-circolare, di dimensioni metriche (D), è stata invece identificata come una fossa di spoliazione moderna che andava a insistere sul taglio del muro effettuato durante gli scavi del 1969 incidendo direttamente gli strati in posto della perimetrazione protostorica (Fig. 9.22).

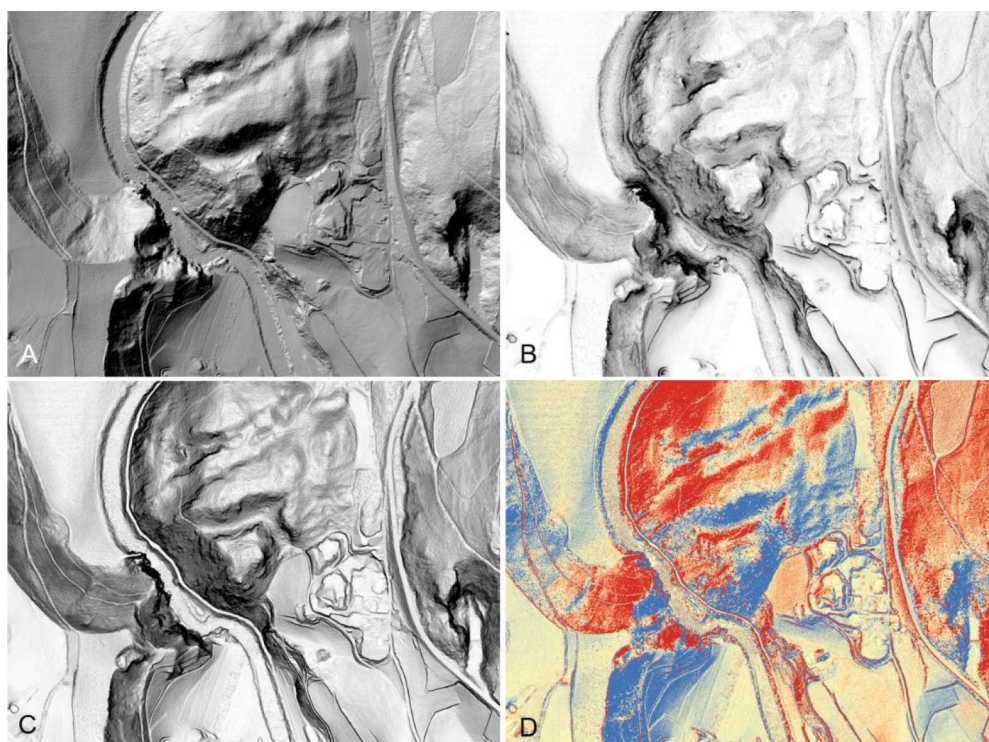


Fig. 9. 21 Sito di Nössing: A) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; B) *sky-view factor* del DTM a 0,5 m di risoluzione; C) *slope analysis* del DTM a 0,5 m di risoluzione; D) *local relief model* del DTM a 0,5 m di risoluzione.

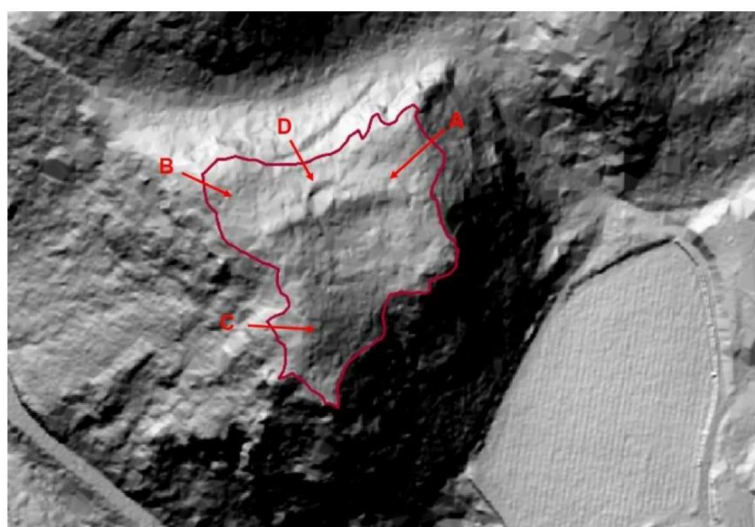


Fig. 9. 22 Trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione del sito di Nössing. In rosso il perimetro e le tracce identificate: A) il muro difensivo; B) l'anomalia rettangolare; C) le due anomalie sub-circolari; D) la fossa di spoliazione.

Nell'area del castelliere di Pinatz il DTM, pur evidenziando un'ampia area pianeggiante apprezzabile anche da ortofoto, non consente di identificare evidenze archeologiche apprezzabili da remoto se non le linee di "fortificazione" (o infrastrutturazione agraria) già riportate da Egger (1943; 1951) (Fig. 9.23). Il sito si inserisce all'interno del complesso e pluristratificato contesto di Elvas che presenta una cronologia che va dall'età del Bronzo Finale fino a epoca romana.

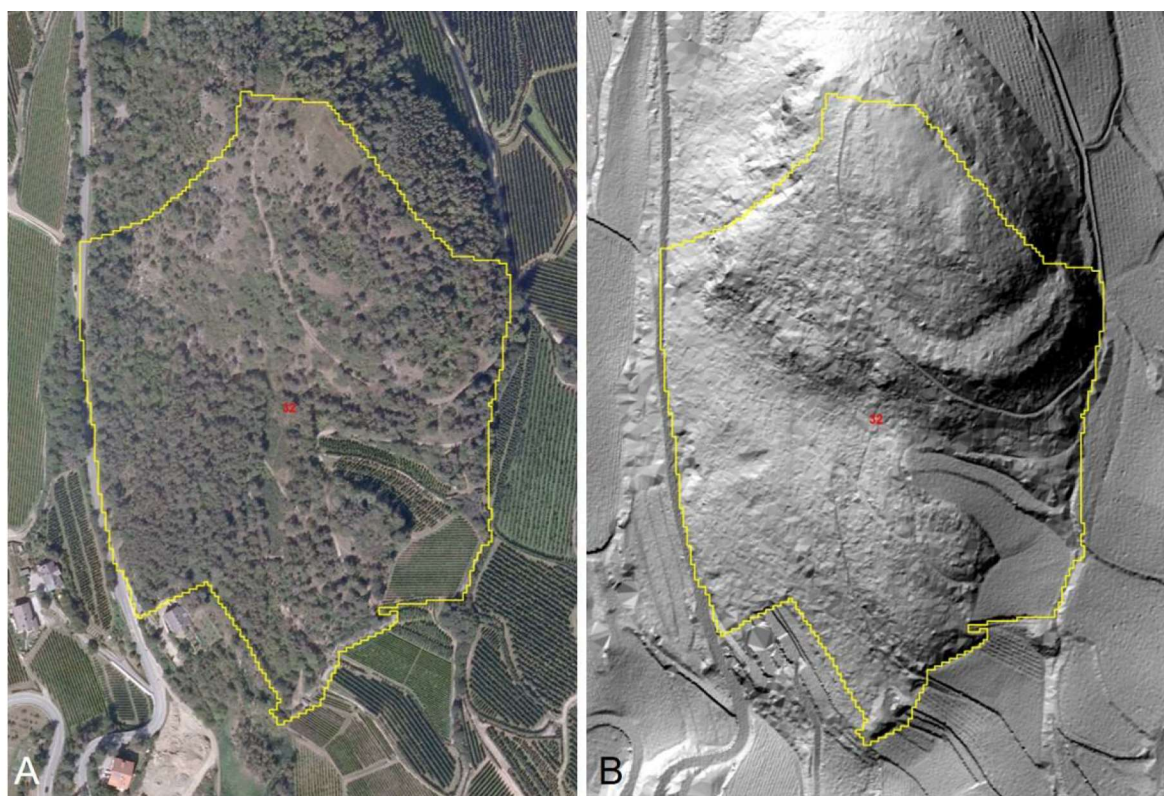


Fig. 9. 23 Castelliere di Pinatz: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione.

Il terzo abitato, Col dei Bovi (EGGER, 1943; LUNZ, 1974) nel comune di Naz-Sciaves, è situato pochi chilometri più a nord rispetto al sito di Nössing lungo la sponda sinistra dell'Isarco. Il modello predittivo elaborato identifica la parte più rilevata del colle, evidenziando la forte propensione, anche di questo villaggio, al controllo della vallata alpina. L'area alterna zone con vegetazione rada o assente a zone fortemente vegetate che si traducono sul DTM come "artefatti" regolari facilmente distinguibili. Sulle aree spoglie è tuttavia possibile scorgere alcune anomalie morfologiche che potrebbero essere associate a una frequentazione antica (Fig. 9.24). Le tracce sono tuttavia irregolari, dunque non è possibile azzardare un'interpretazione funzionale.

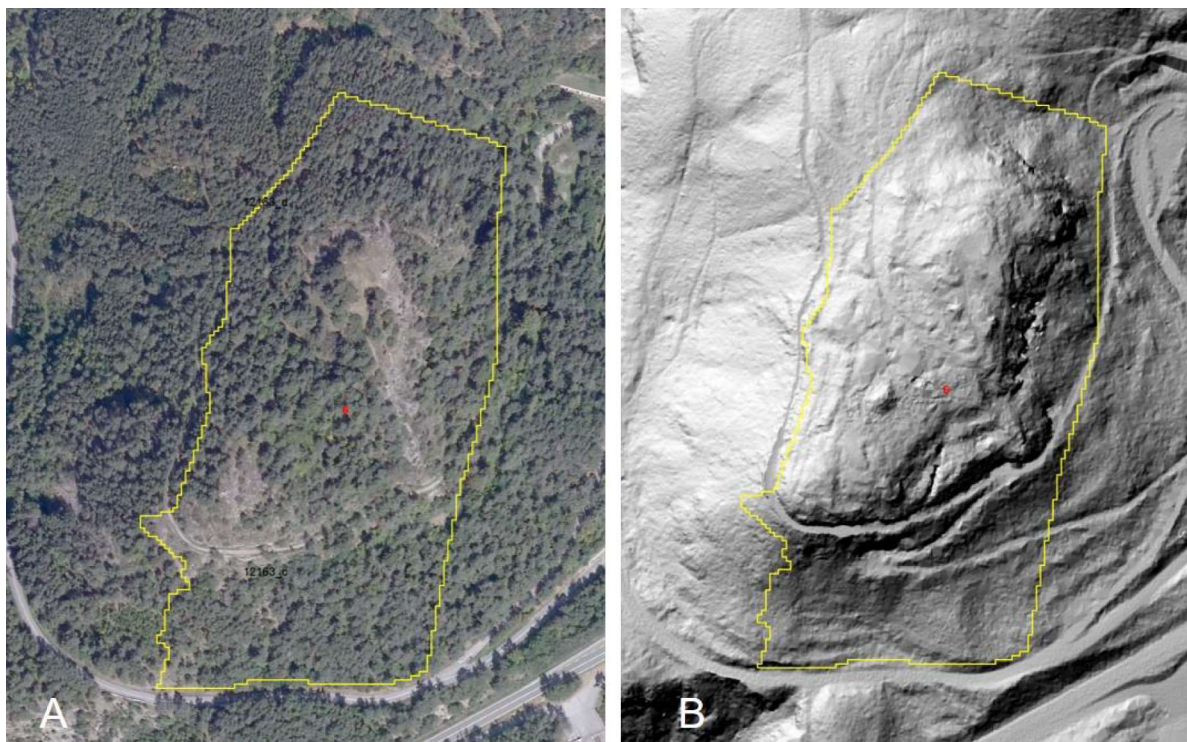


Fig. 9. 24 Abitato di Col dei Bovi: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione.

Il modello predittivo identifica solo la porzione più nord-orientale del villaggio protostorico di Fumes Kirchbühel (EGGER, 1917; 1943; LUNZ, 1994), si tratta di uno dei pochi settori definiti con certezza come abitato diversamente da quelli limitrofi dove non è accertata la presenza di strutture (Fig. 9.25).

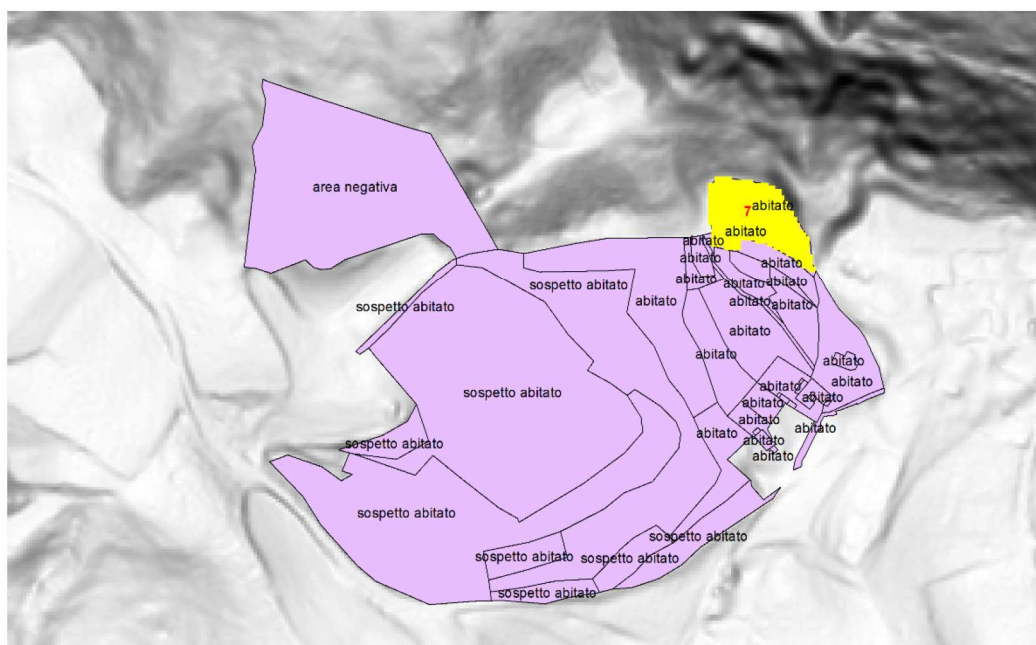


Fig. 9. 25 Sito di Fumes Kirchbühel: modello digitale (*slope analysis*) con in giallo l'area classificata dal *rule set* come "*control places*" e in violetto lo *shape file* delle aree archeologiche. Le scritte identificano le zone con presenza certa dell'abitato da quello dove è solo sospetta.

Analizzando le caratteristiche geografiche e territoriali del sito è assai probabile che anche buona parte delle zone definite sul *geodatabase* archeologico della Provincia come “sospetto abitato” siano a tutti gli effetti parte del villaggio. Tra queste spicca il piccolo colle con caratteristiche molto simili a quelle identificate per il sito di Nössing e di Col dei Bovi, ma con un valore di *local dominance* troppo basso per essere compreso nel modello creato. A livello fotointerpretativo sono stati identificati alcuni *crop mark* negativi di difficile decifrazione sulle ortofoto del 2011 (Fig. 9.26). I trattamenti sul modello digitale del terreno (*hillshade*, *slope*, *openness* positiva e negativa) al contrario mettono in evidenza diverse anomalie morfologiche localizzate sull’area del colle (Fig. 9.27); lungo il crinale sud-orientale è possibile individuare due anomalie lineari parallele interpretabili come terrazzamenti; una terza anomalia lineare negativa, forse ascrivibile a una via di accesso, taglia in direzione sud-ovest/ nord-est il versante occidentale del colle curvando di quasi 90 gradi una volta giunta sulla sommità. Al centro del colle è, inoltre, possibile osservare un’evidenza morfologica trapezoidale piuttosto regolare di poco meno di 20 m di lunghezza massima e una seconda anomalia sempre trapezoidale leggermente più piccola (circa 15 m di lunghezza) poco più a est; al momento non è possibile fare ipotesi sulla natura delle strutture individuate. Al di fuori del colle non sono visibili anomalie sui modelli digitali, probabilmente anche a causa del forte impatto agrario sul territorio su cui insisteva il sito.

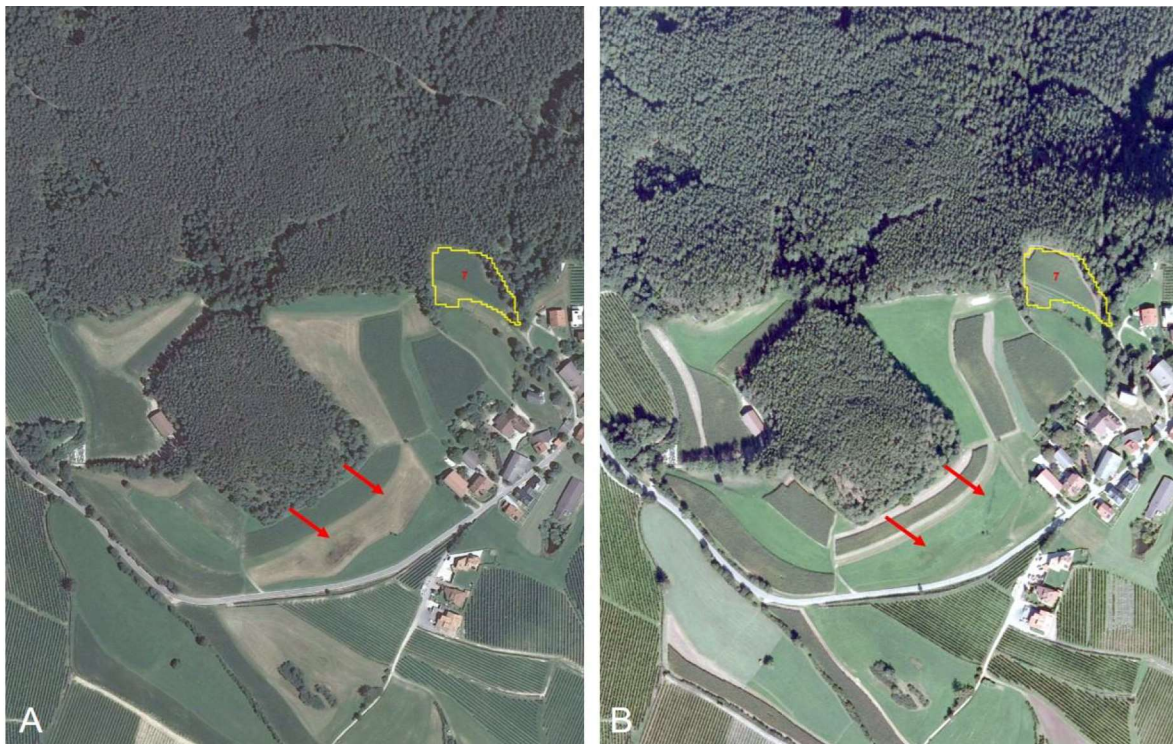


Fig. 9. 26 Sito di Fumes Kirchbühel: A) ortofoto 2011, 50 cm di risoluzione; B) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione. Le frecce rosse indicano i *crop-marks* individuati.

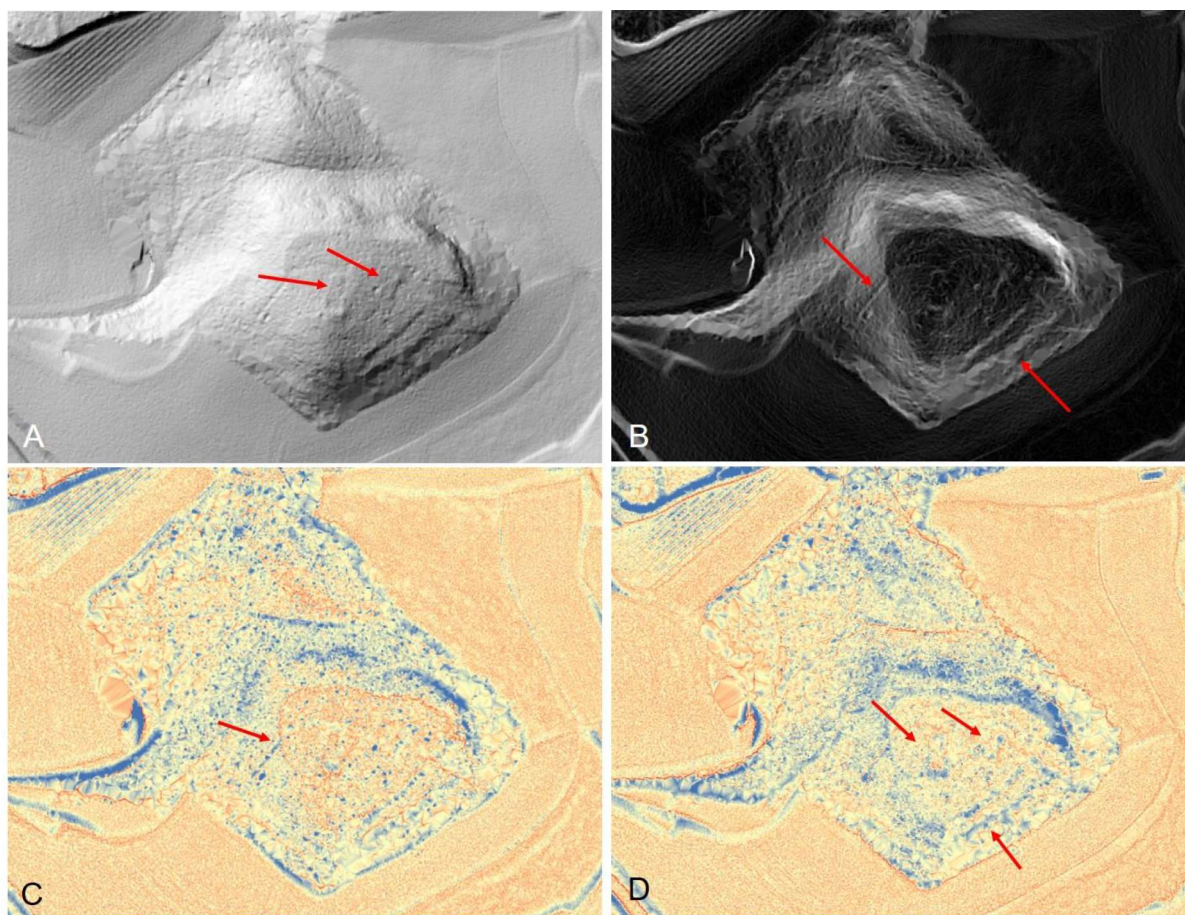


Fig. 9. 27 Sito di Fiumes Kirchbühel: A) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; B) *slope analysis* del DTM a 0,5 m di risoluzione; C) *openness* positiva del DTM a 0,5 m di risoluzione D) *openness* negativa del DTM a 0,5 m di risoluzione. Le frecce rosse indicano le anomalie riconosciute.

L'ultimo abitato individuato nel settore mediano dell'areale di indagine è quello di Costa di Elvas, localizzato a est rispetto al centro storico di Bressanone in una delle zone a più alta densità di rinvenimenti archeologici. Il modello predittivo identifica buona parte dell'area inquadrata come abitato, concentrandosi principalmente sulla zona più elevata del villaggio che verosimilmente doveva esercitare un maggiore controllo sul territorio circostante. La presenza di abitazioni, vegetazione e terrazzamenti moderni non consente alcun tipo di speculazione archeologica da remoto. L'inquadramento cronologico del sito, che si protrae dal Bronzo Finale all'epoca romana con un picco di frequentazione durante l'età del Ferro, è possibile grazie agli scavi di emergenza che hanno interessato (e che continuano a interessare) tutta la zona.

Un'altra zona con accertata presenza archeologica, di dimensioni molto ridotte, dista circa 250 m dall'abitato di Costa di Elvas e rientra nel contesto delle strutture abitative protostoriche che interessano la sponda sinistra dell'Isarco, all'altezza del centro di Bressanone, che da Stufles (MARZOLI, 1999) si protrae verso Elvas. L'area è localizzata

su un piccolo promontorio, ma la presenza di strutture abitative moderne impedisce ulteriori approfondimenti.

L'ultimo contesto, denominato Stiflerbühel (EGGER, 1943; LUNZ, 1974), è invece situato a nord di Bressanone nel comune di Naz-Sciaves e si presenta come un'ampia area di dispersione di materiale archeologico datato tra il Bronzo Recente e il primo Ferro. Si tratta di una bassa collina sul lato orientale della strada che porta in Val Pusteria attualmente interamente coperta di vegetazione ad esclusione di un bacino artificiale.

Le tre aree definite "a rischio archeologico" si localizzano nei pressi dei principali abitati della zona. La prima è una piccola area nota come Punterbühel (EGGER, 1947), ai piedi del colle situato in corrispondenza del sito di Nössing ma dalla parte opposta del fiume Isarco. Sia il colle che la zona individuata dal modello sono classificate dal *geodatabase* archeologico come "sospetto abitato" per via dei materiali rinvenuti, tra cui ceramica generalmente riferibile al Bronzo Antico e uno/ due frammenti di tipo Luco⁴. Negli ultimi anni sono state effettuate diverse ricognizioni di superficie per chiarire con maggiore precisione la natura del sito, ma precedenti lavori di sbancamento effettuati sul colle, ben visibili anche dal modello digitale, hanno in buona parte compromesso il contesto (Fig. 9.28).

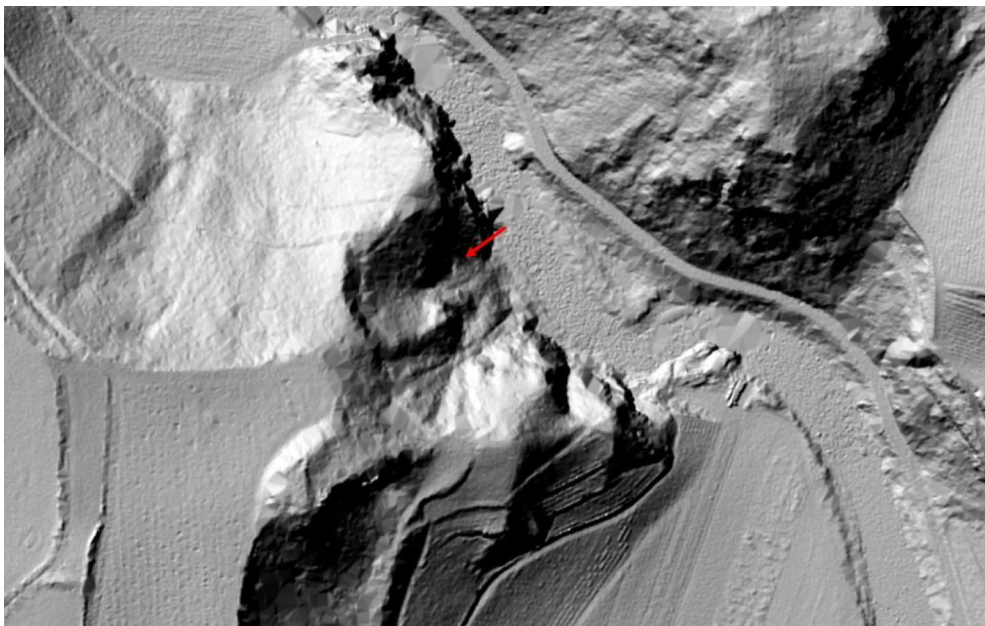


Fig. 9. 28 Modello digitale del terreno con risoluzione a 0,5 m del sito di Punterbühel. La freccia indica lo sbancamento effettuato sul colle.

Le altre due aree "a rischio archeologico" sono localizzate lungo la sponda orientale dell'Isarco nel complesso contesto di rinvenimenti che si sviluppa tra Stufles ed Elvas. La

⁴ I materiali sono all'oggi ancora inediti. Si ringrazia pertanto il dott. Umberto Tecchiati per la preziosa comunicazione.

prima, identificata col numero 33, è un ampio pianoro attualmente coltivato a circa 150 m dal castelliere di Pinatz. L'area è interessata esclusivamente dal ritrovamento di reperti con ogni probabilità provenienti dal vicino abitato. L'analisi del modello digitale e delle ortofoto non evidenzia alcuna struttura visibile dall'alto.

La seconda è una piccola area situata ai limiti settentrionali della necropoli protostorica denominata sul *geodatabase* "zona di espansione 17" a est del sito Dosso di Elvas/Vogeltenne. Considerate la posizione marginale e le dimensioni estremamente ridotte dell'area classificata, questo oggetto-immagine può essere probabilmente considerato come un *outlier*, sebbene rientri all'interno di una zona potenzialmente archeologica.

L'unico oggetto-immagine classificato (ID 20) non presente sul *geodatabase* provinciale per il settore del fondovalle è un ampio pianoro di 4,5 ettari situato a circa 250 m a nord-est rispetto all'abitato di Elvas (sia attuale che di epoca protostorica). L'area identificata si sviluppa quasi integralmente al di sotto della vegetazione, dunque risulta quasi impossibile da indagare attraverso le fotografie aeree (Fig. 9.29). Utilizzando il modello digitale del terreno trattato con *hillshading*, *openess* positiva e negativa si possono scorgere alcune anomalie lineari e circolari lungo l'intero pianoro (Fig. 9.30) che però è interessato dal passaggio della linea dell'alta tensione e di alcuni sentieri. Risulta pertanto molto difficile, senza riscontro a terra, attribuire con un buon grado di sicurezza le evidenze identificate a una frequentazione in antico, sebbene l'area sia localizzata lungo un percorso preferenziale per l'insediamento.

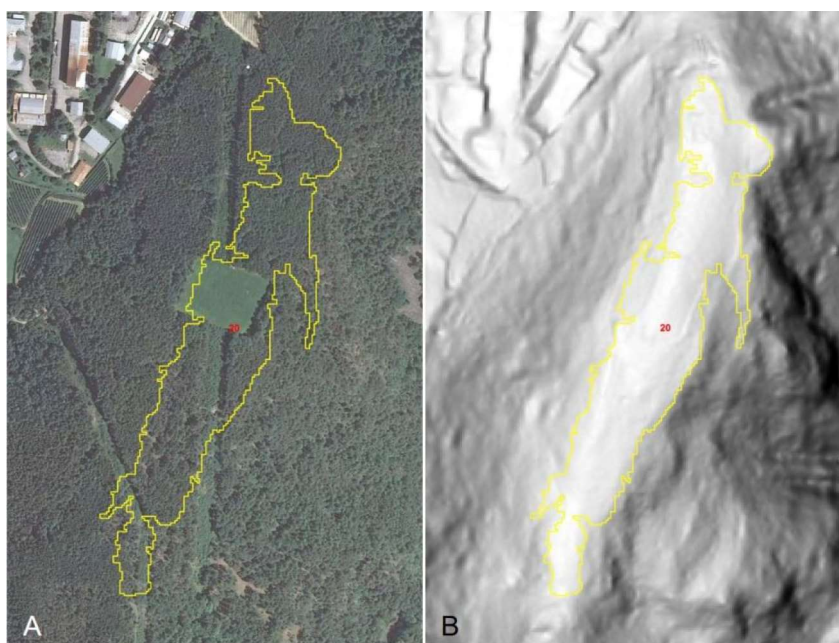


Fig. 9. 29 Oggetto-immagine numero 20 (in giallo), pianoro a nord-est rispetto al sito protostorico di Elvas: A) ortofoto 2011, 50 cm di risoluzione; B) *slope analysis* del DTM a 2,5 m di risoluzione.

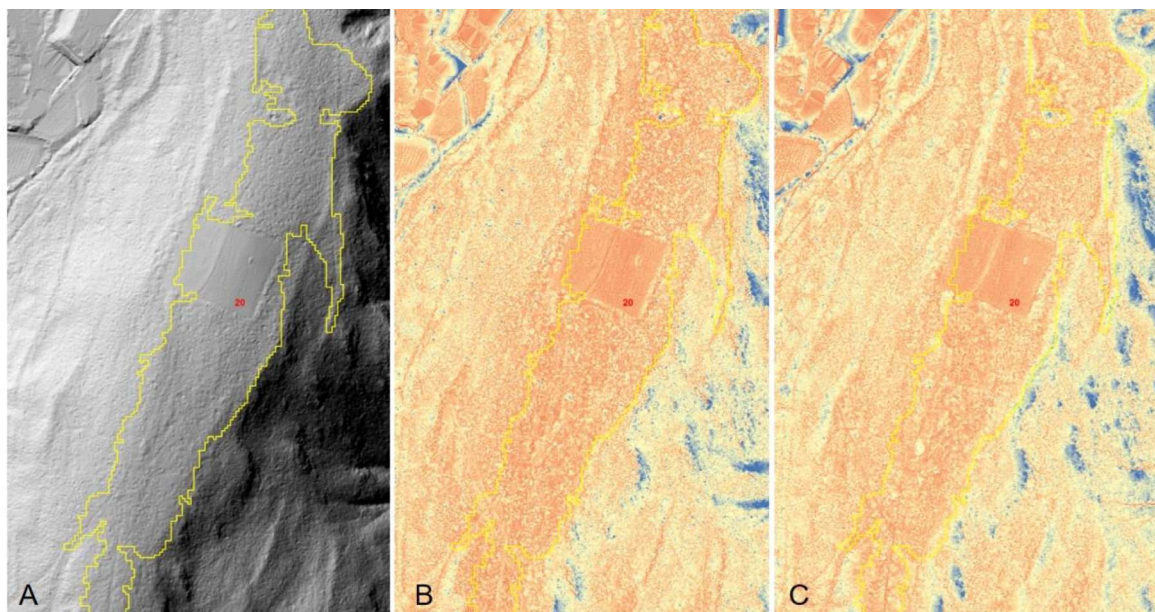


Fig. 9. 30 Oggetto-immagine numero 20 (in giallo), pianoro a nord-est rispetto al sito protostorico di Elvas: A) *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; B) *openness* positiva del DTM a 0,5 m di risoluzione; C) *openness* negativa del DTM a 0,5 m di risoluzione.

Il “versante orientale” presenta il maggior numero di occorrenze classificate, ben 14. 8 di queste sono censite come aree “certamente archeologiche”, mentre le 6 rimanenti non trovano riscontro sul *geodatabase* disponibile (Fig. 9.31).

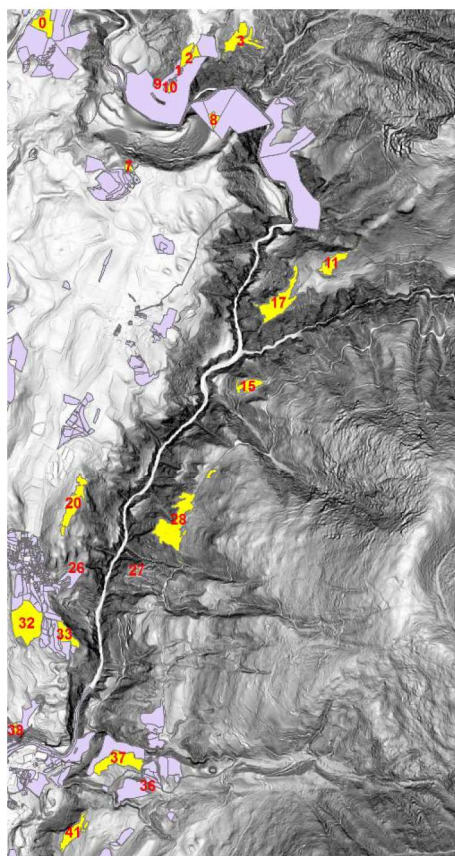


Fig. 9. 31 Modello digitale del versante orientale: sono evidenziati in giallo e dai numeri identificativi rossi i 14 oggetti-immagine individuati dal modello predittivo, in violetto le aree archeologiche finora conosciute.

Quattro degli otto oggetti-immagine concernenti le zone sicuramente archeologiche cadono all'interno di uno stesso contesto, quello di Castel Rodengo (Fig. 9.32 A). L'area è molto vasta e comprende (Fig. 9.32 B): 1) i resti dell'impianto più antico del castello medievale direttamente a ridosso della vallata, perfettamente identificati dal modello predittivo (ID 10); 2) l'ampliamento di XIV sec. d.C., che comprende gli edifici attualmente sede del Museo, di cui è identificata solo una piccolissima parte (ID 1); 3) il pianoro su cui insistono la chiesa e il cimitero, anch'esso identificato nella sua interezza dal modello (ID 2); 4) due aree marginali prive di edifici, una a est della chiesa e l'altra a ovest del castello, che non vengono classificate nel modello predittivo. Un quarto oggetto-immagine (ID 9) rientra nell'area archeologica, ma vista la posizione marginale e le piccole dimensioni può essere forse anch'esso considerato un *outlier*. Oltre a materiali risalenti al periodo di frequentazione del castello (dal 1140 d.C. circa, fino ai giorni nostri) nell'intero areale sono stati rinvenuti anche reperti di epoca pre-protostorica e romana.

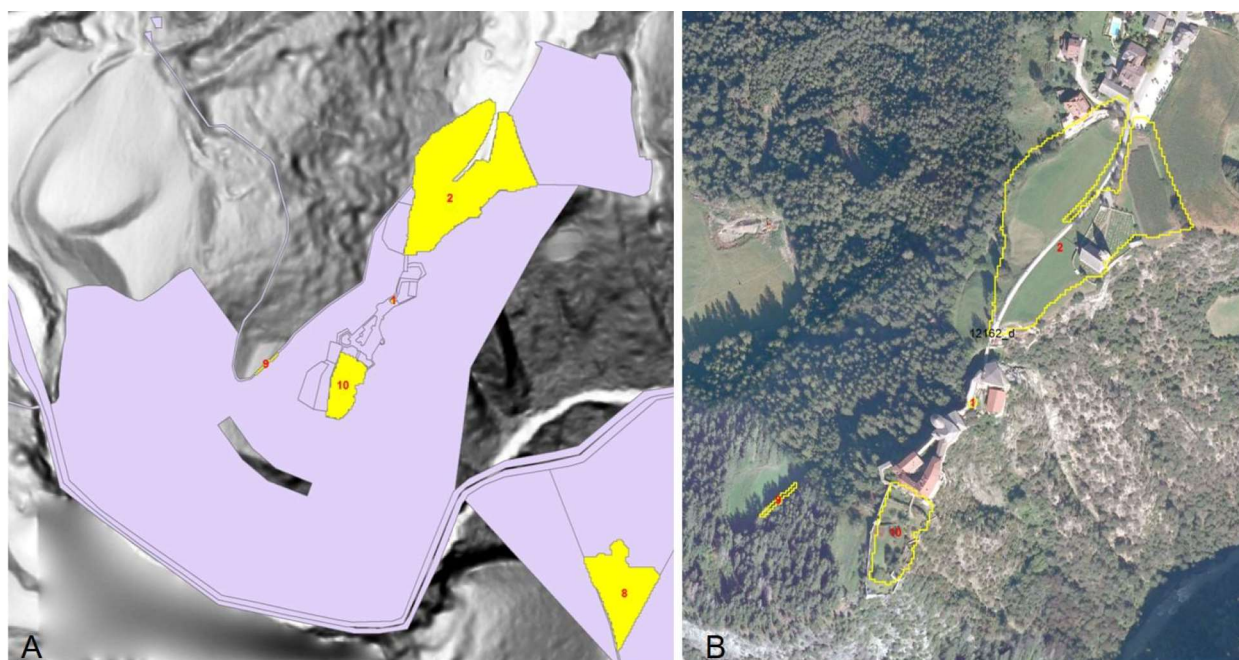


Fig. 9. 32 Castel Rodengo: A) *slope analysis*, sono evidenziati in giallo e dai numeri identificativi rossi (1, 2, 9, 10) i 4 oggetti-immagine individuati dal modello predittivo all'interno dell'area archeologica del castello; B) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione, in giallo i 4 oggetti-immagine classificati dal *rule set*.

A meno di 500 m di distanza da Castel Rodengo, nel comune di Naz-Sciaves, è situata un'area, individuata dal modello solo per la sua parte più piana e maggiormente esposta all'irradiazione solare, dove è stata rinvenuta una dispersione di materiali archeologici di epoca pre-protostorica. La zona si inserisce nel contesto di occupazione massiccia del versante orientale della conca di Bressanone che interessa tutta l'età del Bronzo e del Ferro, anche in relazione alla presenza di una via di transito che metteva in comunicazione il bacino

dell'Isarco con la Val Pusteria e l'arco alpino orientale (TECCHIATI, 2010). La presenza di una fitta vegetazione non permette un'analisi interpretativa delle ortofoto e produce numerosi artefatti anche sul modello digitale ad alta risoluzione che, dunque, non consentono di individuare possibili strutture archeologiche associate ai resti materiali.

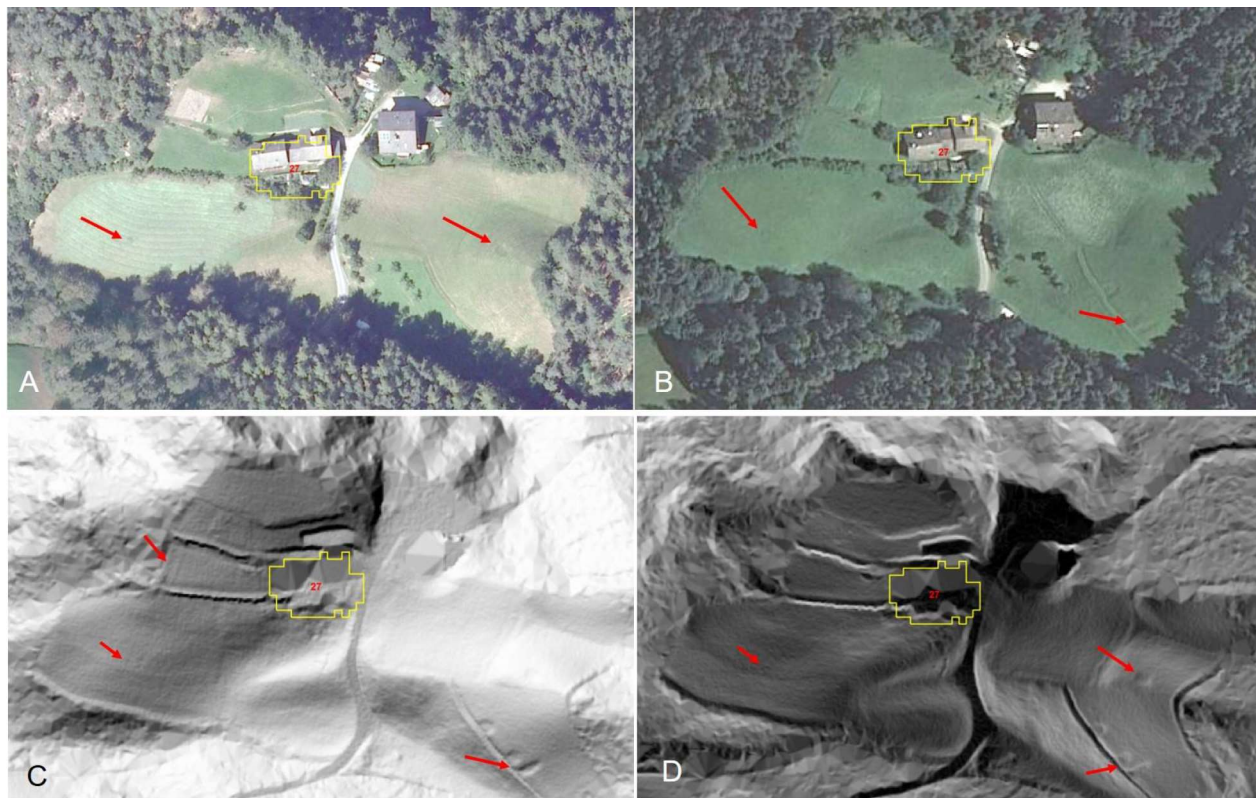


Fig. 9. 33 Colcucco di Sotto: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) ortofoto 2011, 50 cm di risoluzione; C) trattamento in *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; D) *slope analysis* del DTM a 0,5 m di risoluzione. Le frecce rosse indicano le anomalie identificate sui diversi supporti.

La sesta area individuata dal modello predittivo che trova corrispondenza nel *geodatabase* è quella dell'abitato protostorico di Colcucco di Sotto/ Guggenbichl (LUNZ, 1994; PARNIGOTTO, 2001), le cui fasi insediative corrispondono al Bronzo Antico e al Bronzo Medio. Si tratta di un piccolo promontorio a ridosso del fiume Rienza in una zona di probabile passaggio già durante l'età del Bronzo. Attualmente l'area è interessata dalla presenza di alcuni masi moderni e dai rispettivi campi. Dall'analisi delle ortofoto (soprattutto in quelle del 2011) si possono scorgere alcune tracce di possibili strutture antiche nel campo a ovest e in quello a est rispetto all'area edificata (Fig 9.33 A e B). Lo studio della micromorfologia attraverso elaborazioni di dati LiDAR ha confermato la presenza di alcune anomalie concave molto regolari di circa 5 m di lunghezza massima in corrispondenza delle evidenze riscontrate sulle fotografie aeree. Sono state inoltre messe in luce tre anomalie, due di forma semicircolare e una semicircolare allungata lungo il sentiero agricolo che taglia il sito in

direzione sud-est nord-ovest (Fig. 9.33 C e D). Pur trovando riscontro sia sul modello digitale che su una ortofoto, non è possibile associare con certezza queste tracce a specifiche strutture di natura archeologica senza un controllo sul campo. L'ultima anomalia rilevata è localizzata a ovest delle strutture abitative moderne e consiste in due *features* lineari parallele visibili solo sul trattamento in *hillshade* del DTM.

Per l'insediamento della Media e Recente età del Bronzo di Cornale Putzerbühel (EGGER, 1943; LUNZ, 1994) (Fig. 9.34), a est rispetto al centro storico di Bressanone, il modello ha individuato, oltre al colle, l'area meglio esposta all'irradiazione solare. La presenza di una zona piuttosto estesa, individuata dal modello, con una buona esposizione solare conferma la necessità da parte dell'abitato di avere a disposizione nell'immediato *near site* terreni favorevoli alle pratiche agrarie. Nell'area sono stati inoltre rinvenuti oltre al materiale di Bronzo Medio e Recente anche reperti sporadici di epoca romana.

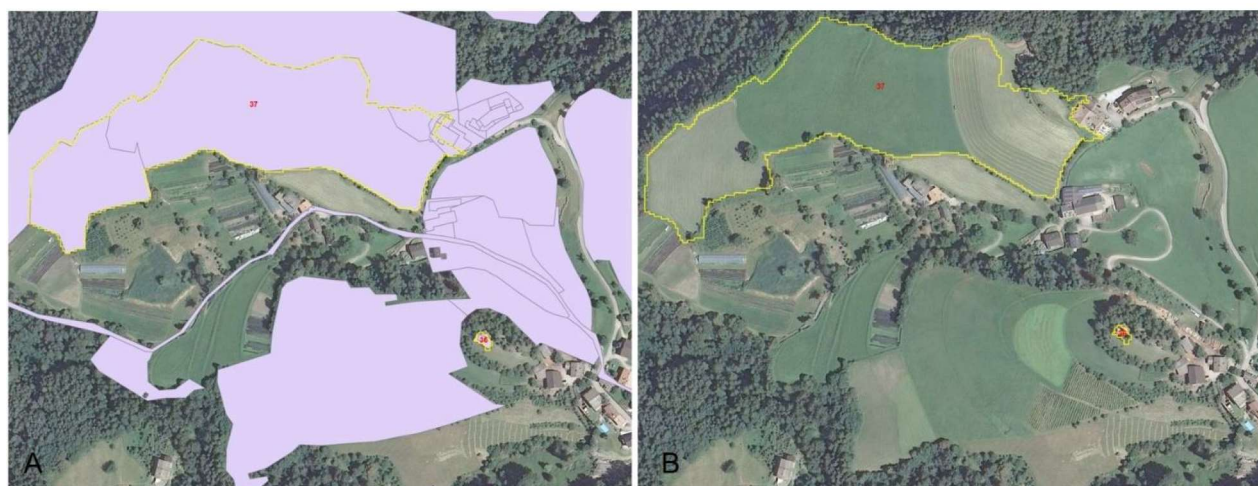


Fig. 9. 34 Siti di Cornale Putzerbühel e di Cornale Kirchbühel, ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione: A) aree identificate dal modello predittivo (in giallo) in relazione alle zone archeologiche note (in violetto); B) aree identificate dal modello predittivo (in giallo) in relazione con il paesaggio.

A poche centinaia di metri di distanza in direzione sud si trova un piccolo colle molto simile a quello che ospita il sito di Cornale Putzerbühel, chiamato Cornale Kirchbühel (LUNZ, 1994; FELTRIN, 2002); (Fig. 9.34); il modello predittivo elaborato ne individua la zona attualmente occupata dalla chiesa di San Giovanni. Per questo specifico insediamento della Media età del Bronzo si era prospettata l'ipotesi che i versanti più soleggiati e meno acclivi fossero risparmiati per le pratiche agricole, mentre l'insediamento doveva trovarsi in zone meno favorevoli (FELTRIN, 2002), rinvenimenti più recenti hanno dimostrato che l'insediamento doveva estendersi all'intero colle (TECCHIATI, 2010) rafforzando così la validità del modello anche per questo sito. Sono stati rinvenuti anche sporadici reperti riferibili alla seconda età del Ferro (DAL RI, RIZZI, 1997). A livello fotointerpretativo la cima

del colle e il versante settentrionale sono occupati rispettivamente dalla chiesa medievale e da una fitta vegetazione che portano alla creazione di artefatti anche sul modello digitale del terreno. L'area sud-occidentale si presenta come un'ampia zona coltivata quindi è stato possibile scorgere alcuna anomalie, soprattutto a livello di *crop mark*.

Dei sei oggetti-immagine classificati non presenti sul *geodatabase* quattro sono localizzati nella zona mediana dell'area di indagine, uno in quella meridionale e uno in quella settentrionale. L'oggetto numero 41 si presenta come un ampio pianoro coltivato localizzato tra l'abitato protostorico di Cornale di Sotto e quello di Cornale Kirchbühel, leggermente spostato verso est. L'osservazione delle ortofoto mette in evidenza nella zona alcuni *crop mark* negativi mentre attraverso il modello digitale non sono state evidenziate morfologie rilevanti a causa delle pratiche agricole che hanno spianato l'area. L'assenza sul pianoro di indizi relativi a strutture consente probabilmente di escludere l'areale dai possibili punti di controllo frequentati in antico, tuttavia dei controlli a terra potrebbero contribuire a una più precisa interpretazione del sito. In particolare, la buona esposizione ai raggi solari, la scarsa pendenza, le notevoli dimensioni (intorno ai 4 ettari) e la vicinanza a due differenti villaggi protostorici consentono forse di considerare il sito come un contesto di *near site* a probabile sfruttamento agricolo.



Fig. 9. 35 Oggetto-immagine numero 28 (in giallo), ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione.

L'oggetto-immagine 28, situato lungo la strada principale che collega il comune di Bressanone con quello di Luson, si presenta come un'ampia zona non coperta dalla vegetazione occupata da un maso e dai terreni agricoli circostanti. Lo studio delle immagini

da remoto ha permesso di identificare diversi terrazzamenti di contenimento verso valle. Sono state riconosciute sia strutture ancora in uso, sia tracce visibili solo in forma di *crop mark* sulle ortofoto e come anomalie morfologiche sul modello digitale. Nel campo direttamente a est rispetto agli edifici, si sviluppa infatti un complesso palinsesto di *crop mark*, in parte causati dai lavori agricoli sui campi, in parte non riferibili alle pratiche agrarie. Tra questi ultimi si può segnalare un'interessante anomalia di forma quadrangolare/trapezoidale regolare con il lato più lungo di circa 8 m visibile sia sull'ortofoto del 2011 (e in parte anche su quella del 2006) sia sul modello digitale del terreno. Una seconda evidenza, meno regolare, ma con orientamento e dimensioni simili alla precedente, è inoltre presente a pochi metri di distanza (Fig. 9.36). Queste due specifiche anomalie associate alla posizione favorevole e alla fitta antropizzazione dell'area possono essere indicatori di una frequentazione antica del sito. Sono in ogni caso necessari controlli a terra con ricognizioni di superficie e lettura di finestre stratigrafiche esposte per una più completa caratterizzazione dell'area.

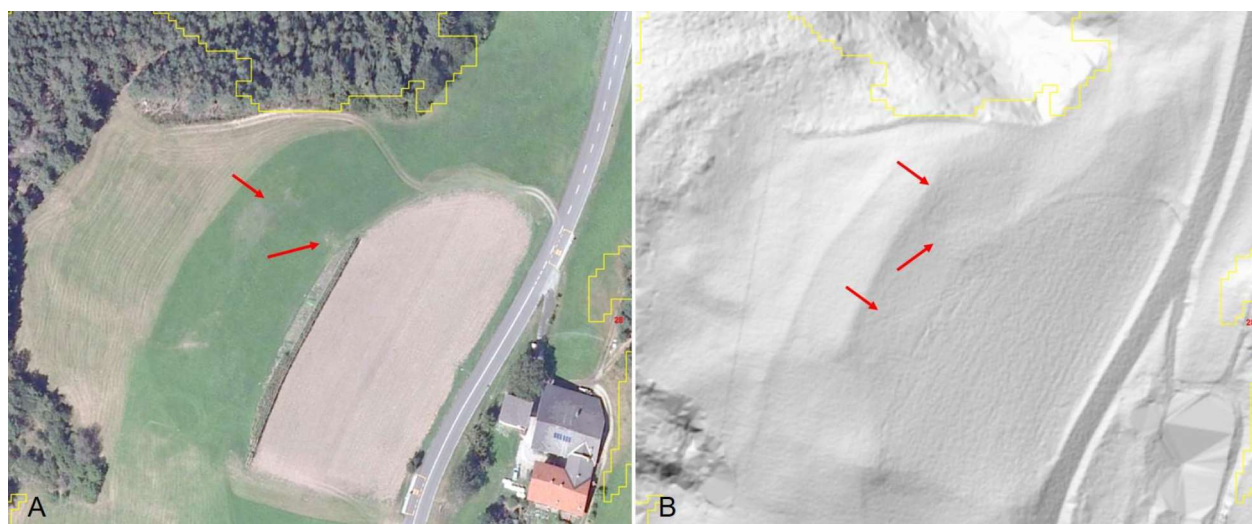


Fig. 9. 36 Dettaglio dell'oggetto-immagine 28: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) *hillshade* del modello digitale a 0,5 m di risoluzione. Le frecce rosse indicano le anomalie individuate.

La terza occorrenza classificata che non trova riscontro sul GIS archeologico provinciale è un altro pianoro che si apre in mezzo alla vegetazione e ospita una struttura agricola con annessi campi. Anche in questo caso la vicinanza con il fiume Rienza è piuttosto marcata così come quella con i siti archeologici già individuati nell'area, che però si sviluppano più a valle lungo la sponda sinistra del fiume. Attraverso le ortofoto del 2006 (Fig. 9.37 A) e del 1999 è stata individuata un'anomalia confermata anche in parte dalla presenza di una micromorfologia sul modello digitale del terreno. Sulle fotografie aeree successive la traccia non è più visibile ma considerando la forma e l'elevata nitidezza, è stata interpretata come

una struttura agraria recente. Una seconda anomalia, visibile solo sul DTM, è stata riconosciuta nella parte più orientale della zona. Si tratta di un alto morfologico circolare di diametro di circa 10 m (Fig. 9.37 B). Senza ulteriori verifiche sul campo risulta difficile fornire un'interpretazione oggettiva della traccia.

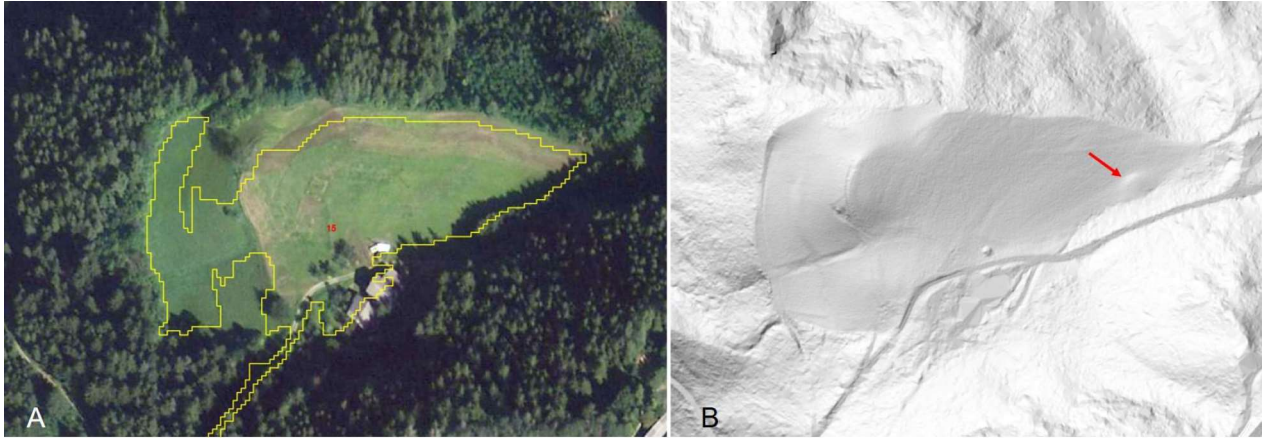


Fig. 9. 37 Oggetto-immagine numero 15 (in giallo): A) ortofoto 2006, 50 cm di risoluzione; B) *hillshade* del modello digitale a 0,5 m di risoluzione. La freccia rossa indica l'anomalia circolare individuata.

Gli oggetti-immagine 11 e 17 sono tra le aree più interessanti tra quelle individuate dal modello predittivo e data la loro prossimità verranno analizzati come un unico sito. L'area si trova alla confluenza tra il fiume Rienza e il rio Luson ed è composta da un ampio pianoro ben esposto all'irradiazione solare (ID 17) e da un colle dominante sulla zona (ID 11) (Fig. 9.38). Le fotografie aeree, soprattutto quelle più recenti, mostrano sulle zone adibite a coltura o a prato tracce di *crop mark* negativi di difficile lettura (Fig. 9.39). Visualizzando i dati LiDAR è stata individuata un'anomalia rettangolare al centro di un campo (Fig. 9.40); le dimensioni ridotte e l'assenza di corrispondenza con gli assetti agrari presenti sulle serie ortofotografiche disponibili lasciano intendere una possibile anteriorità della struttura rispetto al paesaggio moderno. L'area del colle è completamente coperta dalla vegetazione. L'analisi del trattamento *slope* del modello digitale del terreno, tuttavia, ha evidenziato due anomalie composte da tracce lineari a formare un angolo di circa 90 gradi (Fig. 9.41 A). L'*openness* sia positivo (Fig. 9.41 B) che negativo (Fig. 9.41 C) hanno permesso di identificare un terzo tratto, almeno per l'evidenza più orientale, che andrebbe a formare una morfologia pseudo-rettangolare di circa 10 m sul lato lungo e 5 su quello corto. Le dimensioni e l'orientamento analogo fanno supporre che le due anomalie siano compatibili tra loro, sebbene la seconda risulti meno visibile.

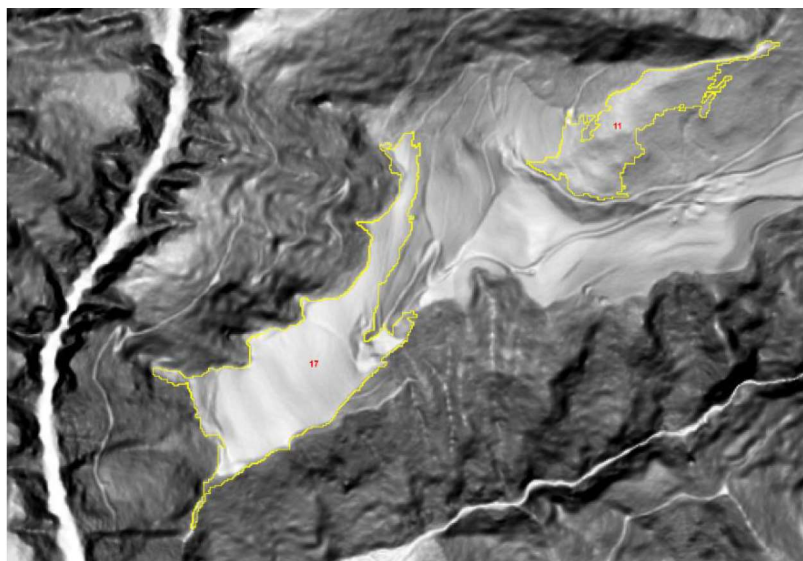


Fig. 9. 38 Modello digitale del terreno (*slope analysis*) con risoluzione a 2,5 m degli oggetti-immagine 11 e 17 (in giallo).



Fig. 9. 39 Oggetti-immagine 11 e 17: A) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione; B) ortofoto 2011, 50 cm di risoluzione. Le frecce indicano i principali *crop marks* presenti nell'area.

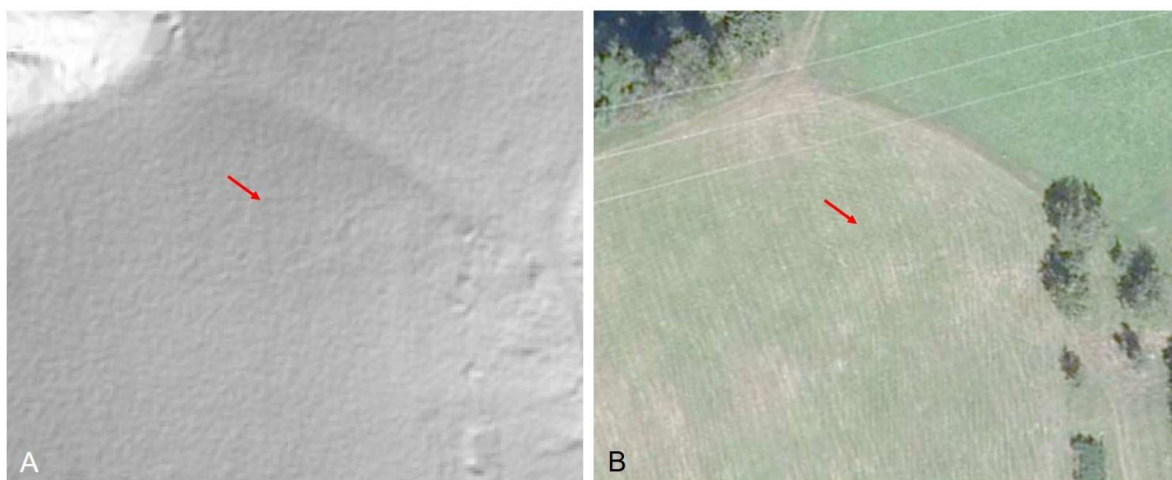


Fig. 9. 40 Dettaglio dell'oggetto-immagine numero 17: A) *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; B) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione. Le frecce indicano la struttura quadrangolare piuttosto ben visibile sul DTM ma quasi invisibile sull'ortofoto.

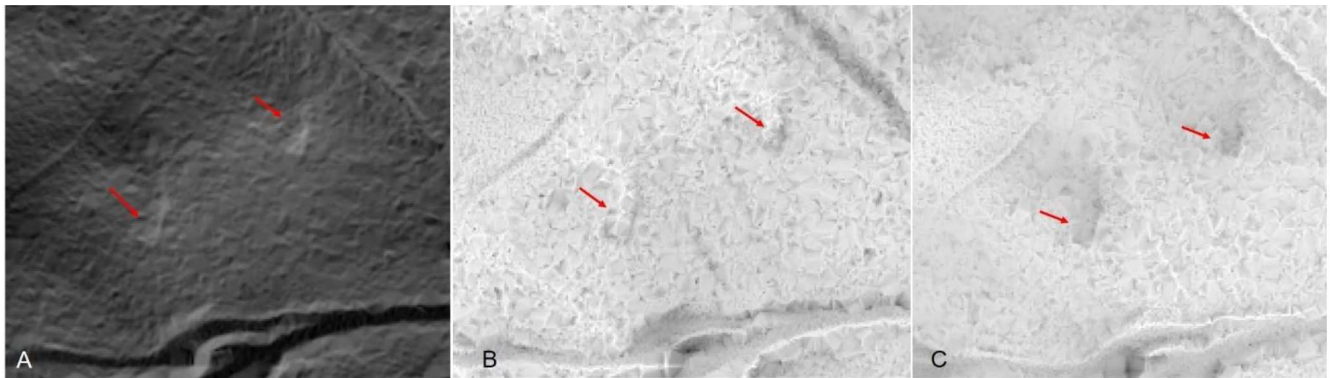


Fig. 9. 41 Dettaglio dell'oggetto-immagine 11: A) *slope analysis* del DTM a 0,5 m di risoluzione; B) *openness* positiva del DTM a 0,5 m di risoluzione; C) *openness* negativa del DTM a 0,5 m di risoluzione. Le frecce indicano le anomalie individuate.

L'ultimo oggetto-immagine (ID 3) che non trova corrispondenza sullo *shape file* dei ritrovamenti archeologici provinciali è situato a poche centinaia di metri a nord-est rispetto al pianoro che ospita Castel Rodengo (Fig. 9.42 A). Si tratta di un colle direttamente a strapiombo sulla valle del Rienza in una posizione estremamente favorevole per il controllo dell'area circostante (Fig. 9.42 B). In relazione a questi dati e alla dimensione piuttosto grande dell'areale, le tracce rinvenute esaminando le ortofoto e il modello digitale sono piuttosto esigue. Sul colmo del colle è stata riconosciuta un'unica anomalia da *crop mark* negativo visibile sia sulle fotografie aeree del 2006 (Fig. 9.43 A) sia su quelle del 2011 (Fig. 9.43 B). La traccia più interessante si trova a est del colle dove sul modello digitale è visibile molto chiaramente una struttura quadrangolare di poco più di 10 m di lato non presente su nessuna delle ortofoto disponibili (Fig. 9.44).

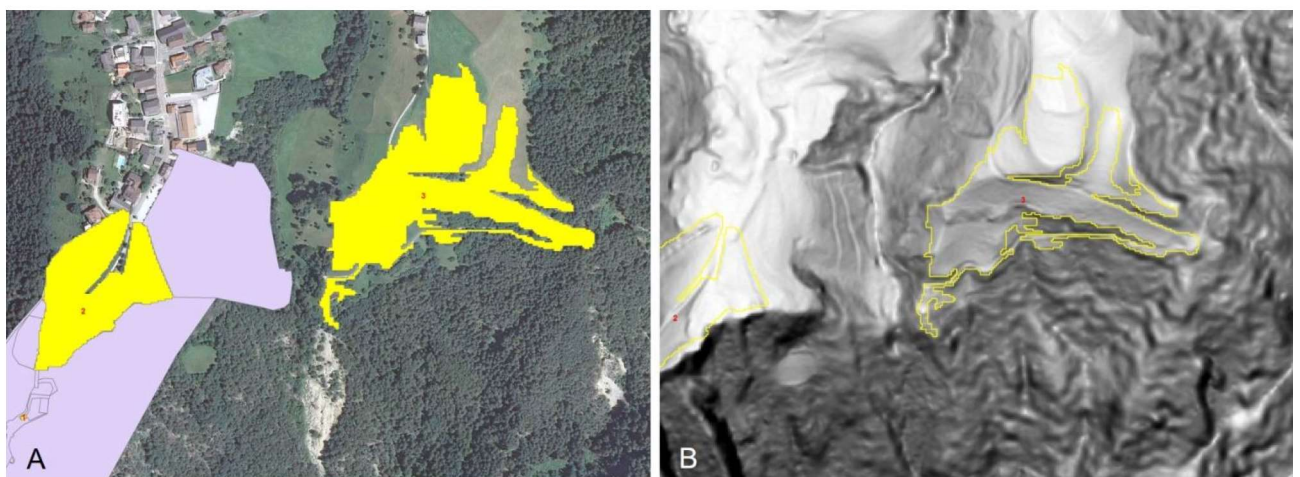


Fig. 9. 42 Oggetto-immagine numero 3 (in giallo): A) ortofoto 2011, 50 cm di risoluzione; B) *slope analysis* del DTM con 2,5 m di risoluzione. In violetto le aree archeologiche note.

L'areale considerato per la riapplicazione del *rule set* finalizzato all'identificazione dei "control places" comprende un totale di 18 principali nuclei insediativi di epoca protostorica censiti sul *geodatabase* archeologico della Provincia.



Fig. 9. 43 Dettaglio dell'oggetto-immagine numero 3: A) ortofoto 2006, 50 cm di risoluzione; B) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione. Le frecce indicano il *crop mark* identificato.

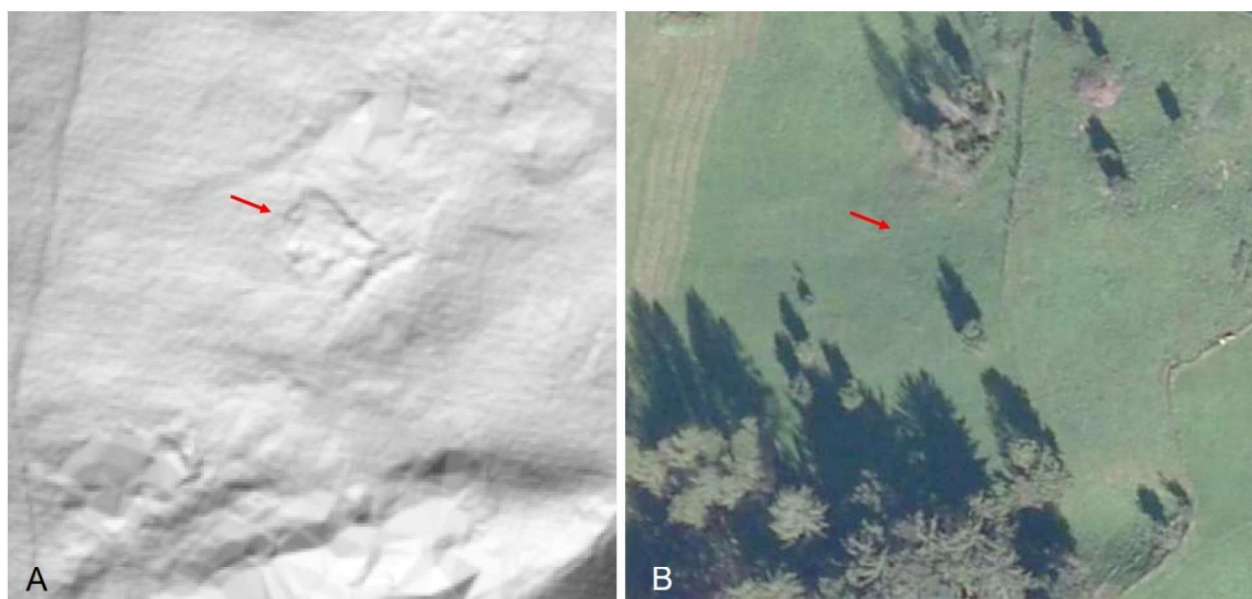


Fig. 9. 44 Area contigua all'oggetto-immagine numero 3: A) *hillshade* del DTM a 0,5 m di risoluzione; B) ortofoto 2011, 20 cm di risoluzione. La freccia indica una marcata anomalia quadrangolare visibile sul DTM ma non riconoscibile sulle tre serie ortofotografiche disponibili (1999, 2006, 2011).

Per stabilire l'accuratezza del metodo, ricoprono un ruolo fondamentale anche i castelli e le chiese, che sono spesso posizionati in zone di controllo del territorio su dossi naturali o lungo i versanti. Gli abitati, infatti, a partire da una fase avanzata dell'età del Bronzo, e in svariate occorrenze anche durante l'età del Ferro e la successiva epoca romana, si trovano

ubicati anche nel fondovalle e sui pianori a ridosso dei versanti, senza dunque configurarsi in modo esplicito quali punti di controllo (PARNIGOTTO, 2010). Meno rilevanti sono, invece, i ritrovamenti sporadici, a meno che essi non costituiscano indizio della presenza di un insediamento stabile, e le necropoli.

Dei 36 oggetti-immagine classificati all'interno della zona indagata 23 trovano corrispondenza sul *geodatabase* provinciale. 12 delle occorrenze classificate coincidono in modo più o meno preciso con gli abitati pre-protostorici già noti dell'areale d'indagine. Quasi tutti gli insediamenti non classificati occupano, però, il fondovalle e quindi non condividono con gli altri abitati le caratteristiche che contraddistinguono i punti di controllo. Fanno eccezione solo gli abitati di Aica e Cornale di sotto, localizzati in zone collinari o di versante.

I castelli di epoca medievale sono stati classificati nella loro totalità (3 su 3) confermando, da un lato, l'accurata scelta di ubicazione per questa tipologia di struttura a controllo del territorio, e dall'altro come il modello predittivo possa essere sfruttato indipendentemente dalla cronologia dei siti da indagare. Finora infatti, considerando entrambi gli areali di studio, sono state individuate evidenze che vanno dall'Antica età del Bronzo fino a epoca Moderna.

Gli altri 8 oggetti-immagine che hanno una corrispondenza sul GIS archeologico includono 3 chiese posizionate sui versanti della valle, 3 aree con dispersione di materiale sporadico prevalentemente protostorico e romano, la zona marginale della necropoli di Elvas e parte dell'area occupata dal sospetto abitato di Punterbühel.

Tra le aree identificate dal modello predittivo ma non presenti sul *geodatabase* si segnalano solo quelle che dal punto di vista delle anomalie riscontrate risultano più interessanti. Si tratta prevalentemente di colli e pianori situati lungo il versante orientale della vallata, dove si trovano la gran parte degli insediamenti d'altura finora noti. La posizione favorevole e la vicinanza al fiume Rienza fanno di queste aree (oggetti-immagine numero 11, 17, 28 e 15) delle zone preferenziali per il controllo del territorio circostante.

Questi risultati confermano l'importanza dell'OBIA anche nello sviluppo dei modelli predittivi basati sulla *classification tree analysis*. In particolare, la possibilità di modificare in maniera dinamica i valori dei parametri del *process tree* consente di adattare facilmente il *rule set* a diversi contesti e a diverse esigenze (ad esempio impostando condizioni più o meno restrittive per l'inclusione degli oggetti-immagine nella classificazione) rendendo questo modello uno strumento estremamente efficace dal punto di vista archeologico. Questo caso di studio dimostra, inoltre, come l'utilizzo di modelli predittivi, filtrati attraverso una buona conoscenza del territorio indagato e l'occhio di un fotointerpretatore esperto, può

ridurre notevolmente le tempistiche delle analisi territoriali su vasta scala, permettendo di focalizzare l'attenzione sulle aree più significative.

L'utilizzo dell'*object-based image analysis* per lo sviluppo di modelli predittivi appare dunque come un campo estremamente promettente. Per quanto riguarda lo specifico caso di studio, il controllo a terra di tutte le aree identificate dal modello e attualmente non segnalate tra quelle a rischio archeologico non attiene agli obiettivi di questa tesi di dottorato. Tuttavia la collaborazione attivata con l'Ufficio Beni Archeologici della Provincia di Bolzano nella persona del dott. Umberto Tecchiati e con la ditta Ricerche Archeologiche di Giovanni Rizzi, consentirà in futuro di verificare sul campo i contesti più interessanti. Ciò potrà contribuire, in prospettiva, a rivalutare l'accuratezza del modello qualora alcune delle aree attualmente non ricomprese nella cartografia archeologica della Provincia di Bolzano restituiscano in effetti materiali o strutture archeologiche certe.

10. Discussione dei risultati

I casi di studio sviluppati durante questo progetto di dottorato, insieme all'articolato quadro teorico di base presentato nei primi capitoli dell'elaborato e all'analisi della bibliografia sul tema, consentono di ricavare una panoramica generale in relazione all'impiego delle tecniche di OBIA in archeologia e del loro possibile impatto sulla disciplina. Si cercherà quindi, di seguito, di delineare il quadro complessivo delle potenzialità e dei limiti del metodo, facendo riferimento ai risultati conseguiti in questa tesi e ai dati editi in letteratura, anche a livello comparativo con quanto noto per le applicazioni *object-based* in altre discipline di ambito ambientale e biomedico.

Per poter esaminare le metodologie più efficaci e le modalità operative relative agli approcci OBIA in archeologia, è necessario innanzitutto operare una distinzione tra casi di studio che prevedono il riconoscimento di "oggetti semplici" e quelli che necessitano l'identificazione di "oggetti complessi". Questa suddivisione, infatti, costituisce il fulcro nodale per comprendere le diverse modalità di trattamento dati necessarie per estrarre dagli oggetti-immagine informazioni significative e creare dunque una corrispondenza con i geo-oggetti (HAY, CASTILLA, 2008; TIEDE *et alii*, 2010), ovvero le entità del mondo reale. Infatti, il riconoscimento di forme semplici come cerchi, quadrati, rettangoli e linee non presenta particolari complessità né dal punto di vista teorico né da quello pratico-operativo; al contrario, invece, l'identificazione semi-automatica o automatica di forme complesse (e di forme semplici disturbate dalla presenza di un diffuso rumore di fondo, come nel caso delle tracce archeologiche) può trasformarsi per l'operatore in una vera e propria sfida.

Per quanto riguarda le forme geometriche semplici, va innanzitutto sfatata l'idea che basti applicare un parametro di rotondità (*roundness*) adeguato per classificare tutte le tracce che l'occhio umano interpreta come circolari. Questo tipo di consequenzialità logica ha valore in un universo ideale, ma non può quasi mai essere applicato al mondo reale. Tradurre la percezione umana di un oggetto in un *process tree* parametrizzato, infatti, richiede capacità di astrazione e attenta pianificazione del modello mentale, che discendono dalla conoscenza approfondita del contesto d'indagine, delle caratteristiche delle evidenze di interesse e delle basi teoriche della metodologia impiegata. Il primo passo per ottenere risultati attendibili, dunque, risiede nella consapevolezza delle finalità specifiche della ricerca: un *know why* intimamente connesso al *know how* archeologico e tecnico per portare a termine il progetto, ovvero alla capacità di raccogliere e capitalizzare le informazioni

necessarie per programmare in modo ottimale il *process tree* e raggiungere quindi gli obiettivi prefissati. L'idea di base è quella di scomporre il modello mentale basato sull'esperienza e l'intuizione dell'operatore e trasformarlo in singoli passaggi quantificabili e traducibili in linguaggio macchina. Prendendo a prestito uno dei principi della programmazione, il KISS (acronimo di "*keep it simple stupid*" e varianti; CAPSTON, 2003), è possibile affermare che nella progettazione del *rule set* la semplicità è un valore aggiunto e dunque dovrebbero essere evitate complicazioni superflue.

In quest'ottica, il riconoscimento di forme regolari può avvenire anche utilizzando le loro caratteristiche spettrali: spesso, infatti, è la differenza cromatica a consentirci di distinguere una geometria specifica rispetto allo sfondo circostante. Anche la topologia (JAMES *et alii*, 1999; MANETTI, 2008) riveste un ruolo fondamentale nel riconoscimento di specifiche classi di evidenze. Essa, infatti, consente di valutare le proprietà di relazione tra gli oggetti-immagine ed andare dunque a operare riconoscimenti mirati. L'importanza dell'approccio topologico in archeologia, già sottolineato in più occasioni da Cattani (a partire da CATTANI, FIORINI, 2004), trova riscontro anche nella creazione di alcuni dei modelli mentali sottesi alla progettazione dei *rule set* presentati in questo lavoro. In particolare, se Cattani definisce una topografia verticale di stampo post harrisiano per la lettura delle sequenze stratigrafiche, in questo caso è stata sfruttata una topologia più classicamente orizzontale, in grado di impiegare i rapporti spaziali tra gli oggetti-immagine per la classificazione degli elementi di interesse.

L'approccio *object-based*, come peraltro già ampiamente sottolineato nel capitolo dedicato, è costituito da due step interconnessi, la segmentazione e la classificazione, che vanno sfruttati congiuntamente per ottenere un risultato ottimale. Così, ad esempio, per riconoscere una pozza d'alpeggio su un supporto ortofotografico (DE GUIO *et alii*, 2013; DE GUIO *et alii*, 2015) non basta creare un buon modello mentale e trasporlo nel relativo *rule set*, trascurando la fase di segmentazione. Quest'ultima, infatti, deve avere un parametro di scala conforme alle dimensioni dell'oggetto da identificare e tale da evitare fenomeni di sovra- e sotto-segmentazione. Inoltre, è importante tenere in alta considerazione già in questa fase preliminare le caratteristiche spettrali delle evidenze di interesse (anche in relazione al peso dati ai parametri di *shape* e *compactness*), poiché ciò aumenta le probabilità di successo del *rule set* soprattutto nei (frequenti) casi in cui i parametri formali e dimensionali non siano sufficienti a descrivere la complessa variabilità delle caratteristiche geometriche delle strutture indagate (nell'esempio specifico l'elemento *outlier* erano le

pozze doppie). In questo modo è possibile impostare la successiva fase di classificazione a partire da oggetti immagine che siano un'approssimazione significativa degli oggetti reali. Ciò consente una trasposizione pressoché diretta delle informazioni di tipo dimensionale, formale, relazionale e spettrale note, che consentono di riconoscere univocamente le evidenze di interesse. Tornando all'esempio delle pozze d'alpeggio, sono state sfruttate le *object-features* di *roundness*, di area, oltre ai valori di uniformità e luminosità sulle tre bande del visibile (Fig. 10.1).

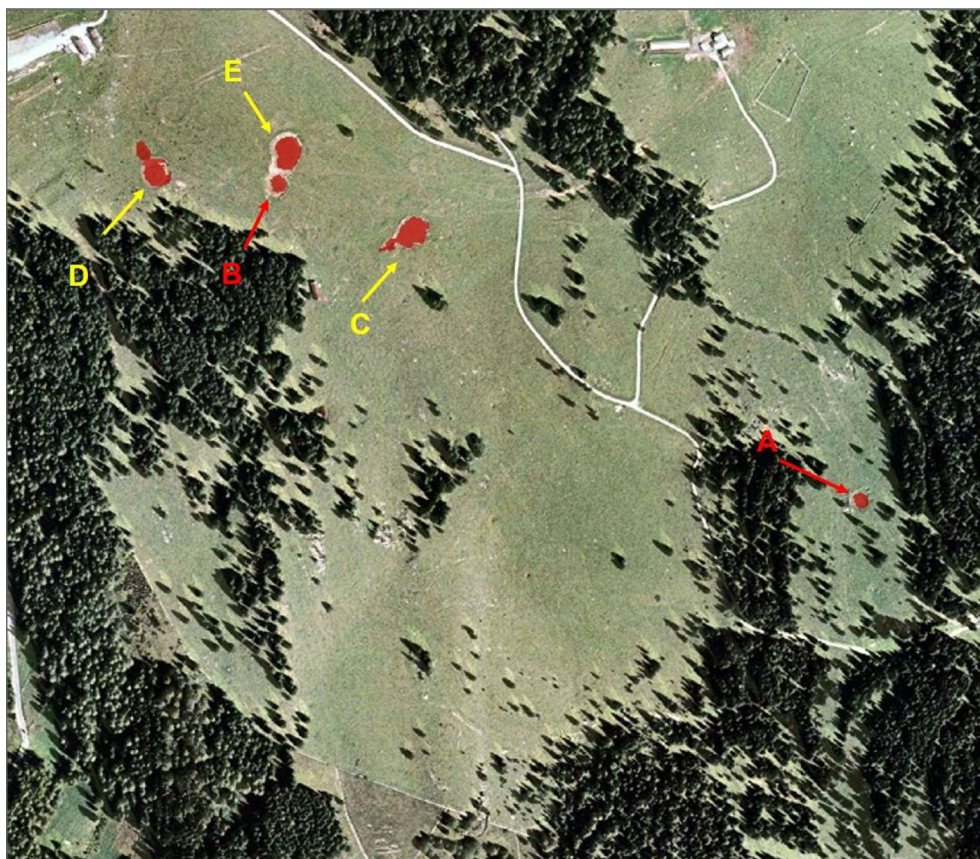


Fig. 10. 1 Esempio di “oggetti semplici”. Area di Millegrobbe, identificazione semi-automatica delle pozze d'alpeggio: A e B) pozze di forma regolare identificate attraverso l'utilizzo esclusivo delle *object-features roundness* e area (parametri morfologico/ formali e dimensionali); C, D ed E) pozze di forma irregolare identificate attraverso l'utilizzo combinato di parametri morfologico/ formali, dimensionali e spettrali.

L'OBIA si trova impiegata anche per il riconoscimento di altre *features* archeologiche circolari, come nel caso delle buche di bomba (cfr. capitolo 7.2, MAGNINI *et alii*, 2016) o dei *mound* (SEVARA *et alii*, 2016; KRAMER, 2015; FREELAND *et alii*, 2016).

Sevara e colleghi, nel loro contributo del 2016, confrontano i risultati di analisi *object-based*, *pixel-based* e visivo-manuale effettuate in due contesti molto diversi fra loro. Nonostante gli ottimi risultati ottenuti, il limite maggiore del lavoro è quello di tentare di applicare in modo automatico lo stesso *workflow* in un ambiente che presenta caratteristiche

e strutture archeologiche molto diverse rispetto a quelle presenti nel contesto su cui era stato sviluppato.

Se consideriamo i risultati ottenuti nel sito di Birka, area su cui è stato sviluppato il *rule set*, è possibile notare un alto tasso di successo dell'approccio per oggetti. Il 91% degli oggetti-immagine classificati trova, infatti, corrispondenza sul terreno. Considerando anche gli errori di commissione l'accuratezza si riduce all'85%. Questi valori trovano piena corrispondenza con i risultati ottenuti in questo lavoro di dottorato relativamente alla quantificazione delle buche di bomba (capitolo 7.2) e si assestano su cifre assimilabili a quelle pubblicate da Peña-Barragán e colleghi (2011) sull'identificazione delle colture agricole a partire dagli indici di crescita vegetazionale. Analogamente, anche le percentuali di errori di omissione e di commissione risultano simili, mettendo in evidenza come l'approccio OBIA, indipendentemente dall'areale di indagine, tenda a classificare un numero maggiore di falsi positivi, rispetto ai falsi negativi. Questa medesima tendenza è stata osservata anche nel lavoro di Kramer (2015). L'approccio *object-oriented* (BAATZ *et alii*, 2008), rispetto a quello per pixel, contribuisce a ridurre questo tipo di errore e per tale ragione è stato impiegato qui sia per la classificazione delle buche di bomba sia per la trincea. Attraverso questa procedura, infatti, è possibile alternare fasi di segmentazione a fasi di classificazione per rimodellare gli oggetti-immagine creati con la segmentazione iniziale e suddividere la scena in molteplici classi. In questo modo è possibile raggiungere una maggiore corrispondenza tra gli oggetti-immagine e gli oggetti reali. Questo approccio, inoltre, consente di andare a operare selettivamente solo sulle classi di interesse, così da ottenere risultati più accurati.

Per lo studio dei tumuli funerari di Avebury (Regno Unito), Kramer applica e compara tre diverse tecniche di riconoscimento automatico: la *rule-based classification*, il *template matching* e il *machine learning*. L'autrice, pur avendo riscontrato delle problematiche con i *data set* in fase di riapplicazione delle metodologie sviluppate, delinea un quadro promettente portando risultati incoraggianti soprattutto per quanto concerne l'impiego dei metodi basati sulla traduzione di regole cognitive.

Le potenzialità offerte dallo studio sono, in parte, limitate dalla mancanza di un controllo sistematico sul campo dei risultati ottenuti. L'assenza della fase di verifica a terra (*ground truth*) porta a considerare errate tutte le occorrenze classificate che non trovano riscontro sui dati presenti in letteratura, che sono essenzialmente derivati dall'analisi da remoto delle fotografie aeree, senza il supporto del DTM (KRAMER, 2015). Non è, tuttavia, possibile

escludere che alcune delle evidenze classificate siano a tutti gli effetti veri positivi ad oggi inediti identificati dal *rule set*.

Un secondo aspetto da considerare, e che la stessa autrice sottolinea a più riprese, è la grande eterogeneità negli esiti morfogenetici dei *mound* presenti nell'area, che possono essere suddivisi in cinque diverse categorie.

Quella dell'elevata variabilità intra-classe è, in effetti, di una delle problematiche più complesse legate all'applicazione dell'*object-based image analysis* in archeologia. Per tentare di ovviare a questa problematica, può essere utile (se la risoluzione dei dati di partenza lo permette) creare classificazioni specifiche per ogni tipo all'interno della stessa categoria. Nello specifico, partendo da regole generali comuni e andando poi a selezionare le *object-features* che consentono di distinguere ogni singola tipologia, è possibile sviluppare una serie di *rule set* differenziati. D'altro canto, l'iper-specializzazione del *process tree* può portare al problema inverso, ovvero all'impossibilità di esportare il *rule set* e applicarlo al di fuori dell'area test sulla quale è stato sviluppato. È proprio durante la fase decisionale che l'operatore svolge il compito più delicato (e più complesso), ovvero istruire la macchina senza forzare il *rule set* e conseguentemente inficiare l'automatismo della procedura. A seconda dello scopo (analisi di uno specifico contesto vs necessità di creare modelli esportabili), la capacità dell'operatore di trovare una soluzione di compromesso efficace può essere messa a dura prova. Ciò è particolarmente evidente durante la formulazione di *rule set* per la classificazione di oggetti complessi.

Per oggetti complessi, in questo caso, si intendono evidenze che la percezione umana identifica come appartenenti a un'unica entità e che per svariati motivi la segmentazione suddivide in diversi oggetti-immagine. Tra le ragioni sottese a questa discrasia, si segnalano le più comuni, ovvero la disomogeneità intrinseca della struttura o dell'entità di interesse¹ o il disturbo da parte di fattori secondari, come i processi post-deposizionali o gli interventi antropici moderni che, trasformano le evidenze antiche andando talvolta a interromperne la continuità, come nel caso delle canalette agrarie che tagliano i *crop mark* dell'infrastrutturazione *off site* protostorica nella bassa pianura veronese (Fig. 10.2 e 10.3).

¹ Si considerino, ad esempio, le strutture costituite da elementi con caratteristiche diverse, come i siti arginati del Bronzo Medio e Recente padano (BERNABÒ BREA *et alii*, 1997), che appaiono costituiti, nelle immagini aeree, da una perimetrazione (generalmente del tipo a terrapieno e fossato) di colore chiaro e da un interno sito di colorazione decisamente più scura. La possibilità di classificare automaticamente le strutture perimetrali degli abitati terramaricoli è stata sperimentata su alcuni siti test tra quelli le cui perimetrazioni appaiono meglio conservate a uno sguardo da remoto. Tali indagini preliminari hanno restituito risultati incoraggianti (Fig. 10.2).



Fig. 10. 2 Esempio di “oggetti complessi”. Castello del Tartaro (VR), identificazione semi-automatica della perimetrazione del villaggio arginato. Si noti come la classe sia composta da numerosi oggetti-immagine non necessariamente adiacenti e con caratteristiche diversificate a causa della presenza di canalette e suddivisioni agrarie moderne.

Nell’ambito dello studio delle infrastrutture idriche e stradali dell’età del Bronzo nelle Valli Grandi Veronesi è stato effettuato un test di approccio *object-based* per identificare sia i tracciati stradali sia le canalizzazioni antiche. Entrambe queste tipologie di evidenze, le cui caratteristiche sono piuttosto lineari (in tutti i sensi), soffrono del rumore causato dagli attuali assetti territoriali, che compromettono in parte la lettura delle loro caratteristiche morfologiche. Anche dal punto di vista spettrale, la presenza di colture differenziate sugli appezzamenti interessati dalle tracce delle strutture antiche comporta una variazione cromatica considerevole tra oggetti-immagine appartenenti allo stesso oggetto complesso. Nello specifico caso di studio, l’utilizzo combinato di immagini RGB e NIR (*Near Infra Red*) hanno permesso di ovviare a questa problematica. Infatti il picco massimo di riflettanza della vegetazione è nella porzione del vicino infrarosso dello spettro elettromagnetico e questo conferisce ai dati NIR un alto potenziale discriminatorio per il rilevamento dello stato di salute della vegetazione (DE GUIO, 2015b). Durante l’analisi OBIA, quindi, i parametri effettivamente utilizzabili per la creazione del *rule set* erano molto più limitati rispetto alle conoscenze teoriche relative alle reali caratteristiche delle strutture: la mancanza di continuità non ha permesso, ad esempio, di utilizzare il rapporto lunghezza/ larghezza che generalmente viene impiegato per il riconoscimento di canali e strade.

Sevara e Pregesbauer (2014), nella loro pubblicazione riguardo al fortino “16 Joch” (presso Kreuttal, in Austria), sostengono che è fondamentale definire un protocollo che sfrutti una combinazione di attributi, per la definizione cumulativa degli oggetti archeologici complessi. Bisogna comunque prestare attenzione a non cadere nell’iper-specializzazione del *process tree*. Come fatto giustamente notare dagli autori, infatti, poter riapplicare su terra incognita il lavoro sviluppato su contesti conosciuti è una delle più significative potenzialità in archeologia dell’approccio *object-based*. Per ottenere questo risultato è però necessario essere in grado di applicare in maniera indipendente le singole parti di un *rule set* che identificano una specifica porzione di oggetto complesso. In quest’ottica allo scrivente pare tuttavia più promettente sviluppare un *process tree* costituito da molteplici classi specifiche, ognuna delle quali corrispondente alle singole *features* che compongono l’oggetto complesso.

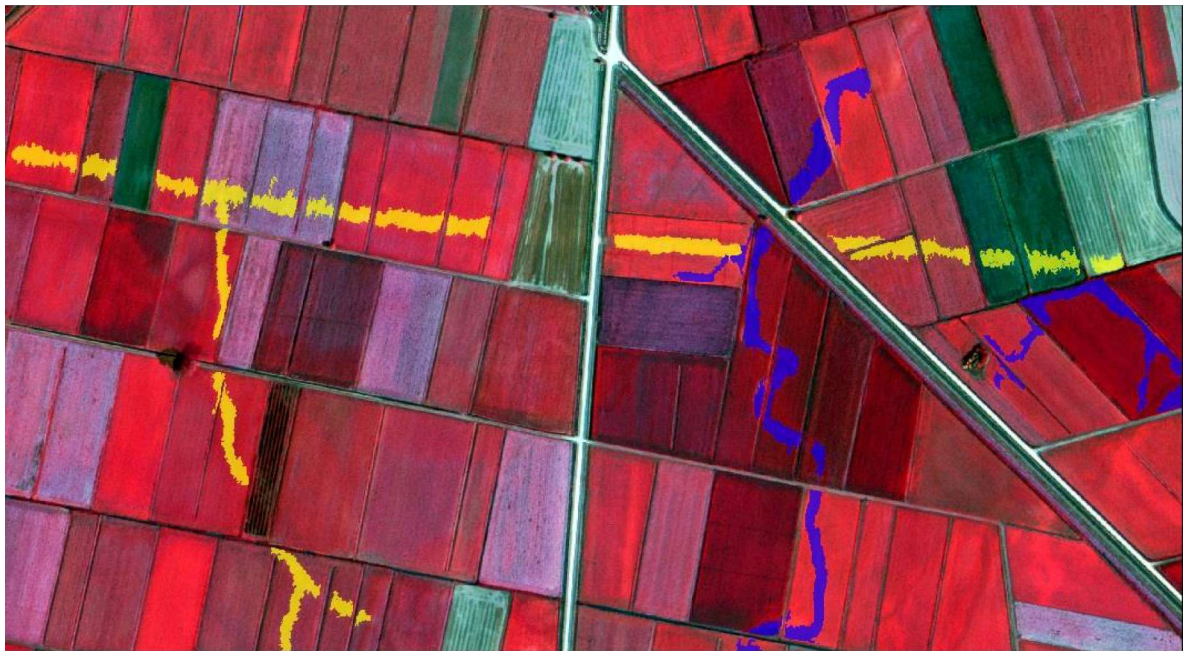


Fig. 10. 3 Esempio di “oggetti complessi”. Area di Ponte Moro (VR), immagine a falsi colori RGB + NIR. Identificazione semi-automatica del tracciato stradale (in giallo) e del paleo-canale (in blu) dell’età del Bronzo. A esclusione di alcuni tratti molto limitati le caratteristiche formali e dimensionali delle strutture sono sconvolte dalla parcellizzazione agraria moderna.

Nel 2016, Sevara e colleghi riprendono il discorso relativo all’applicazione di tecniche OBIA nel territorio del comune di Kreuttal. Utilizzando lo stesso *rule set* sviluppato per il sito di Birka, ne valutano la riapplicabilità su un contesto molto diverso per numero e per tipologia di *features* presenti. I risultati ottenuti non consentono un’identificazione adeguata delle evidenze visibili, anche se la comparazione dei risultati ottenuti attraverso un approccio basato sui pixel e quello *object-based* appare decisamente sbilanciato verso quest’ultimo

(SEVARA *et alii*, 2016), come peraltro già sottolineato in numerosi articoli di letteratura (BAATZ *et alii*, 2008).

Gli scarsi risultati del gruppo di Sevara in relazione alla riapplicazione del *rule set* confermano l'importanza di calibrare un modello mentale *ad hoc* per il riconoscimento delle *features* archeologiche. Quest'ultimo deve essere specifico per ciascuna tipologia di evidenza, ma sufficientemente generale da poter essere utilizzato su più contesti di indagine. L'esperienza richiesta all'operatore non è quindi solo quella dell'archeologo fotointerpretatore: si rendono infatti necessarie anche capacità di deduzione, astrazione e ragionamento analogico (o CBR, ovvero *Case-Based Reasoning*, cfr. AAMODT, PLAZA, 1994). Per ovviare alle problematiche riscontrate nell'ambito del riconoscimento automatico e semi-automatico delle tracce archeologiche, la soluzione maggiormente percorribile sembra essere in definitiva la creazione di *rule set* semplici, adattabili e modulabili tra loro. Come visto nei casi di studio dei crani dell'Olmo di Nogara e del modello predittivo, la possibilità di ricalibrare un *rule set* per esportarlo in contesti diversi e su supporti con risoluzione differente permette, con pochi semplici passaggi, di riapplicare in modo semi-automatico un procedimento altrimenti lungo e laborioso. Il caso di studio sulle buche di bomba nei paesaggi di guerra, al contrario, non ha necessitato di alcuna modifica, ma dati di partenza e contesto erano coerenti con quelli dell'area su cui era stato sviluppato il *process tree*.

Per gli oggetti complessi, la possibilità di creare *set di regole* specifici per ogni elemento o tipologia relativi alle evidenze di interesse e modularli in un *rule set* complessivo attraverso una procedura gerarchica apre nuove prospettive per l'utilizzo di questa metodologia anche in contesti palinsestici e con una molteplicità di *features* archeologiche diverse (Fig. 10.4). In questo senso, un primo passo è stato fatto nel caso di studio dei paesaggi di guerra e nel test effettuato nella bassa pianura veronese (DE GUIO *et alii*, 2015).

Lo stesso tipo di approccio è stato impiegato in questo lavoro anche per il trattamento di modelli tridimensionali di piccoli oggetti. Tali modelli, infatti, costituiscono essenzialmente delle superfici pseudo-topografiche che condividono con i dati di elevazione del terreno i principi base di acquisizione e le problematiche interpretative e di elaborazione, nonostante le evidenti differenze in termini di scala di osservazione e risoluzione spaziale. Peraltro, la classificazione di specifici elementi di interesse bioarcheologico e biomedico trova una significativa corrispondenza metodologica nelle procedure per l'identificazione delle tracce archeologiche da supporti remoti (siano essi fotografici o di elevazione).

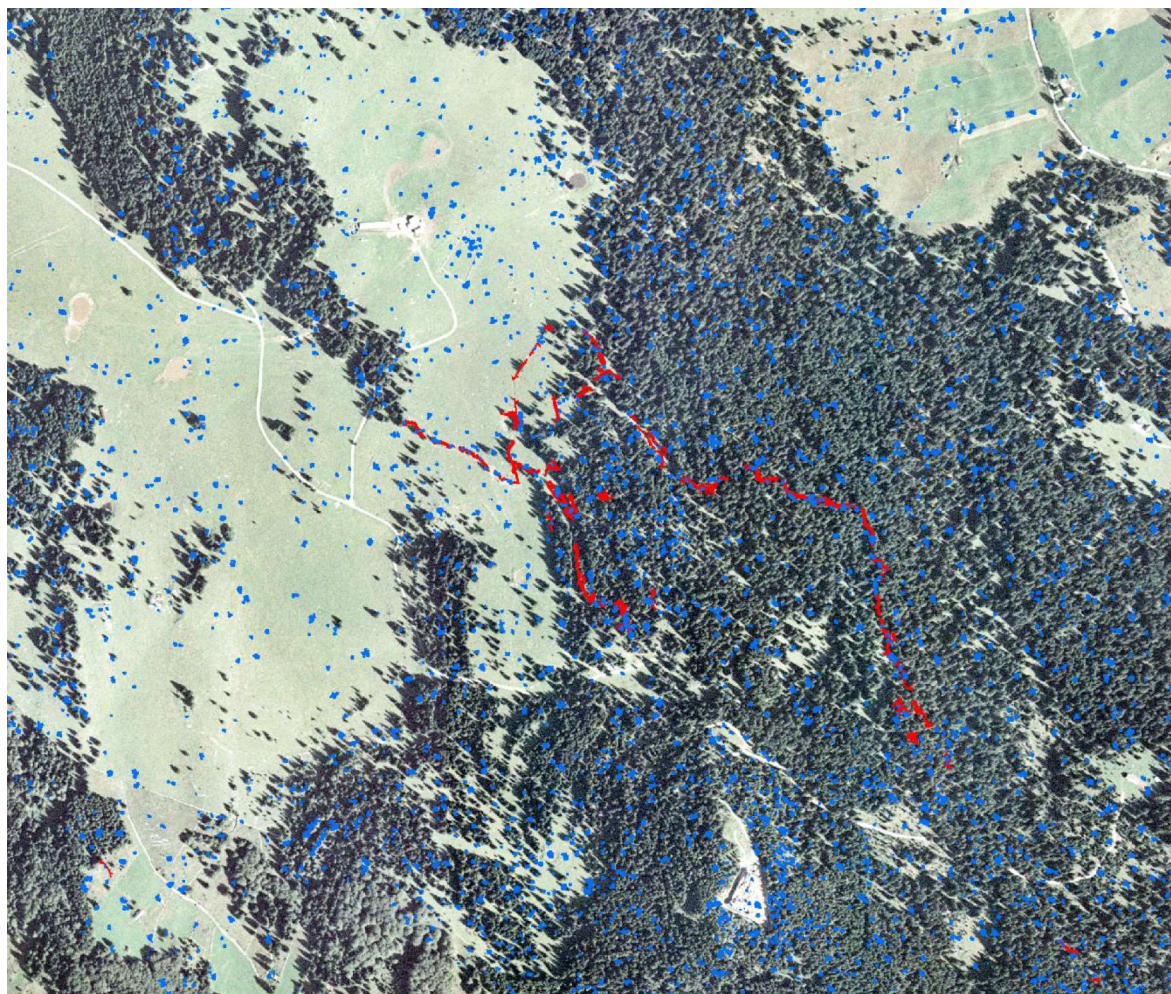


Fig. 10. 4 Area di Millegrobbe e Cima Campo, palinsesto del paesaggio di guerra (trincee in rosso e buche di bomba in blu) proiettato su ortofoto.

In particolare, si è lavorato su due crani della necropoli protostorica dell'Olmo di Nogara (VR), che sono stati trattati per il riconoscimento e la quantificazione oggettiva (non mediata dalla manualità dell'operatore, come generalmente avviene) del tessuto osseo ricalcificato all'interno di ferite da arma da taglio alla testa. Si tratta, per certi versi, di un ritorno alle origini, poiché la società Definiens (proprietaria di eCognition prima della cessione alla Trimble) è stata fondata nel 1994 nell'ottica di sviluppare tecniche di *imaging* biomedico. Attualmente si contano oltre 650 pubblicazioni referate sul tema (tra le più recenti HAWKINS *et alii*, 2016; FEUCHTINGER *et alii*, 2016; CAIE *et alii*, 2016), che spaziano dalla valutazione della proliferazione delle cellule tumorali, al trattamento di dati tomografici per lo studio dell'embriogenesi dei polli (HEIDRICH *et alii*, 2013).

In definitiva, l'applicazione di tecniche teleosservative a piccoli oggetti consente di visualizzare i dati in una prospettiva del tutto inedita, ponendo le basi per l'integrazione delle competenze tra esperti di settori diversi, ma affini.

Un ulteriore spunto di riflessione arriva dalla lettura comparata della bibliografia sulle applicazioni OBIA in archeologia. Si rileva, infatti, un'estrema variabilità nella modalità di presentazione dei risultati e di descrizione del *process tree*, che spesso viene soltanto sintetizzato senza riportare le *object-features* e/o i parametri utilizzati², impedendo di fatto sia la verifica delle modalità operative, che la riproduzione e la riapplicazione dei *rule set*. Con la progressiva diffusione del metodo in archeologia, appare ora indispensabile trovare un linguaggio e un protocollo d'indagine condivisi (passando idealmente dalla pratica operativa alla prassi operativa), necessari per permettere la comparabilità dei dati e svincolare questo tipo di analisi d'immagine dall'ambito strettamente accademico per arrivare alla quotidianità professionale dell'archeologo. Le potenzialità del metodo, infatti, ne fanno uno strumento particolarmente valido negli ambiti dell'archeologia predittiva e preventiva: operativamente, l'OBIA potrebbe avere un impatto rilevante ad esempio nella gestione rapida ed efficace dei progetti VI Arc (Verifiche di Impatto Archeologico).

A questo riguardo, un utilizzo particolarmente interessante e ancora poco sfruttato delle tecniche OBIA è legato alla possibilità di realizzare modelli predittivi attraverso un *classification tree*. Questo tipo di applicazione è stata proposta per la prima volta da Verhagen e Dragut nel 2012. I due autori hanno paragonato procedure di classificazione visivo-manuali delle morfologie (*landforms*) caratteristiche della pianura olandese prima, (VERHAGEN, DRAGUT, 2012) e delle zone montane in seguito (VERHAGEN, DRAGUT, 2013), con le tecniche *object-based*. Nei casi specifici, l'analisi per oggetti ha restituito risultati equiparabili a quelli degli approcci teleosservativi tradizionali per quanto riguarda la precisione del metodo, ma ha ridotto drasticamente le tempistiche di analisi grazie all'esportazione del *rule set* e alla sua riapplicabilità (VERHAGEN, DRAGUT, 2013). In entrambi i lavori, però, quello che manca è una domanda archeologica a cui rispondere. Tuttavia i risultati da un lato sono estremamente significativi dal punto di vista metodologico e dall'altro hanno gettato le basi per tutte le successive applicazioni archeologiche del metodo, tra cui quelle tracciate in questo elaborato. L'innovatività dell'intuizione di Verhagen e Dragut ha, infatti, dato l'input per lo sviluppo del terzo caso di studio di questo dottorato, dedicato alla realizzazione e alla verifica di un modello predittivo che rispondesse alla necessità di identificare in modo (semi)automatico le aree poste a controllo del territorio

² E più raramente addirittura la tipologia e la risoluzione dei dati di partenza, oltre che gli specifici trattamenti impiegati.

circostante, particolarmente significative per l'identificazione di nuovi possibili siti archeologici sulla base delle scelte locazionali antiche.

11. Conclusioni e prospettive

Questa tesi si è focalizzata sullo sviluppo di metodologie pilota e sulla sperimentazione di un parco variegato di casi test per valutare l'efficacia dell'analisi d'immagine *object-based* per la ricerca archeologica, con particolare attenzione alle applicazioni connesse all'impiego di modelli tridimensionali (ALS e TLS-*derived*) e alle loro elaborazioni.

Il lavoro ha dimostrato che l'impiego di un'ampia varietà di tecniche di visualizzazione per dati LiDAR, appositamente selezionate e combinate, consente di velocizzare e semplificare la progettazione dei *rule set* e dunque di ottenere una fotointerpretazione automatica e semi-automatica sempre più performante, sia per l'identificazione di classi di evidenze archeologiche fossili o sepolte, sia per la creazione di modelli predittivi, sia per la quantificazione automatica di elementi di interesse, siano essi pertinenti al paesaggio o a singoli oggetti antichi. In questo modo, viene in parte superato il condizionamento imposto dall'operatore umano, consentendo di offrire risposte qualitativamente e quantitativamente più oggettive alle domande archeologiche che costituiscono (e devono costituire) il nucleo centrale della ricerca.

Arrivando alle conclusioni, è possibile stilare una lista di limiti e potenzialità del metodo, che consentano di gettare uno sguardo verso il futuro dell'OBIA in archeologia. Il potenziale offerto dal metodo può essere essenzialmente sintetizzato come segue:

- se debitamente istruito, si tratta di un metodo oggettivo e riproducibile in grado di replicare i processi cognitivi umani e dunque coadiuvare l'analisi dei dati e le classiche procedure di fotointerpretazione visivo-manuale;
- consente di migliorare a livello qualitativo l'accuratezza nell'identificazione degli esiti formali delle anomalie archeologiche al suolo attraverso la variazione dei parametri di segmentazione;
- offre l'opportunità di classificare e quantificare oggetti-immagine corrispondenti a elementi di interesse archeologico nel modo reale, permettendo di velocizzare il processo di analisi d'immagine e *object/ pattern/ scenery recognition* (OPSR). sia nel caso di studi sul paesaggio, che nel caso di piccole superfici;
- si rivela particolarmente utile per gestire grandi quantità di dati grazie alla possibilità di creare *rule set* esportabili rivolti all'automatizzazione del processo di analisi d'immagine;

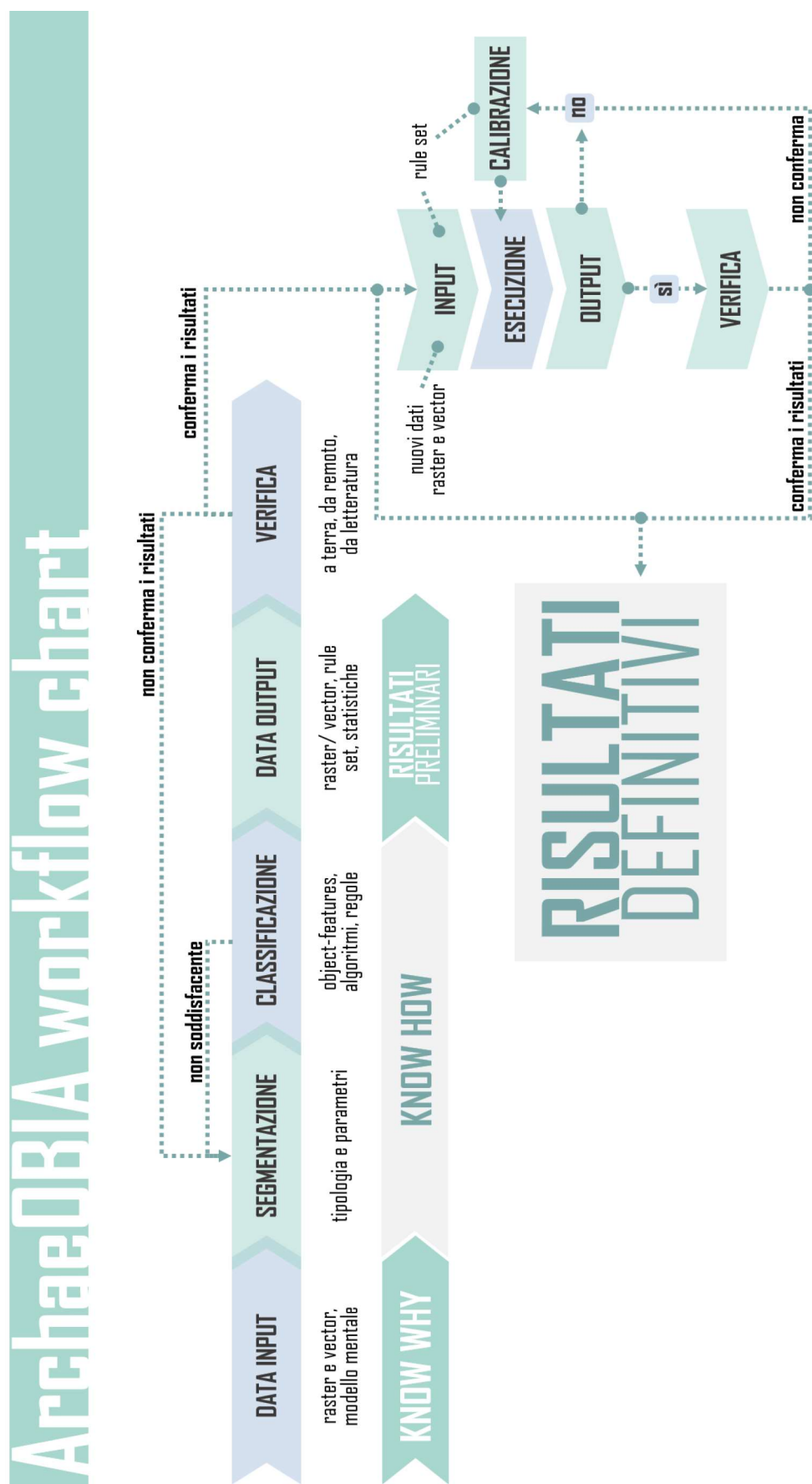


Figura 11 Grafico del flusso di lavoro di un progetto ArchaeOBIA.

ciò consente da un lato la validazione incrociata dei risultati e dall'altro di classificare oggetti complessi le cui singole parti risultano visibili solo in un'unica tipologia di supporto;

- fornisce un metodo innovativo ed efficace per lo sviluppo di modelli predittivi volti alla valutazione del rischio (o meglio del potenziale) archeologico di una determinata area.

Riconoscere un patrimonio intrinsecamente variabile e non standardizzato come quello archeologico attraverso l'utilizzo di procedure automatiche resta una questione fondamentale aperta. Tuttavia lo scrivente ritiene che lo sviluppo di protocolli condivisi e la collaborazione tra gruppi di ricerca interdisciplinari possa consentire di raccogliere la sfida e sviluppare delle metodologie di approccio specifiche, in grado di aggirare alcune delle problematiche che ancora oggi limitano le potenzialità dell'OBIA in archeologia. I risultati ottenuti finora, anche nell'ambito di questo progetto di dottorato, sono senza dubbio incoraggianti e puntano verso prospettive di grande impatto per la disciplina archeologica. In questo senso, il monitoraggio (semi)automatico, multi-temporale e multi-livello del patrimonio culturale merita senza dubbio il posto d'onore¹. L'analisi d'immagine *object-based*, infatti, costituisce uno strumento di eccezionale rilievo per la mappatura e la diagnostica dei processi di degrado che coinvolgono evidenze, materiali e contesti archeologici, oltre a offrire un mezzo efficace per identificare e prevenire scavi clandestini e azioni di saccheggio nell'ottica dell'Archeologia Applicata (*APA Archaeologies*). Inoltre, il metodo potrà essere impiegato per monitorare processi di distruzione (volontaria o accidentale) del patrimonio culturale in zone di guerra, essenzialmente inaccessibili per l'intervento diretto sul campo. L'importanza e l'urgenza di questo compito sono state recentemente portate alla ribalta della comunità internazionale, non solo scientifica, in seguito alle tristemente note vicende del sito di Palmira (CASANA, PANAHIPOUR, 2014).

Infine, l'uso della logica *fuzzy*, già testata da Sevara e colleghi (2016), consentirà in prospettiva di calibrare i parametri di appartenenza alle diverse classi, consentendo un approccio più flessibile per il riconoscimento automatico e semi-automatico delle evidenze di interesse. Tale metodologia, infatti, consente di graduare l'appartenenza di ciascun oggetto immagine a una determinata classe utilizzando uno qualsiasi dei valori compresi tra 1 (completamente vero) a 0 (completamente falso) (BENZ *et alii*, 2004). Ciò permetterà di programmare interventi di verifica e monitoraggio mirati, attraverso la combinazione dei dati derivanti dall'applicazione della logica *fuzzy* e dall'esperienza dell'operatore archeologo.

¹ Questo tipo di applicazioni sono in corso di sviluppo da parte dello scrivente e di un gruppo di lavoro patavino nell'ambito di un progetto recentemente finanziato.

Le possibilità offerte dal rilevamento automatico o semi-automatico restano un tema di fondamentale importanza nei futuri sviluppi del *remote sensing* archeologico, come dimostrato anche dai recenti trend della letteratura internazionale (cfr. la corposa lista di articoli di approfondimento pubblicata in LAMBERS, TRAVIGLIA, 2016; TRAVIGLIA *et alii* 2016). La crescente necessità di approcci oggettivi e riproducibili quando si lavora con grandi quantità di dati ad alta risoluzione e per esplorare le trasformazioni del paesaggio nel tempo impone un cambiamento paradigmatico nei protocolli analitici tradizionali. Come indicato in precedenza da Bennett e co-autori (2014), questo non significa che le classificazioni automatiche sono in grado di fornire interpretazioni storiche. Gli operatori archeologici hanno infatti un ruolo centrale nell'analisi supervisionata *object-oriented*, perché le loro competenze e i loro modelli mentali costituiscono la base della struttura decisionale e dei relativi *rule set*.

Pare, in definitiva, possibile introdurre il concetto di *Archaeological Object-Based Image Analysis* (ArchaeOBIA²), per rimarcare le specificità delle applicazioni *object-based* in archeologia, che non si limitano allo studio dei paesaggi (GeOBIA), ma che possono essere sfruttate per indagini su piccoli oggetti o addirittura per l'analisi d'immagine di fotografie registrate in microscopia ottica ed elettronica a scansione³. Inoltre, con il termine ArchaeOBIA, si intende identificare una metodologia che integra sistematicamente OBIA e verifiche tramite ricognizioni mirate al suolo, prospezioni geofisiche o validazione incrociata dei risultati tramite controllo da remoto o da letteratura, al fine di raggiungere un adeguato equilibrio tra rapidità di elaborazione e affidabilità dei risultati (Fig. 11).

Nonostante tutti i problemi critici esaminati, l'analisi d'immagine *object-based* è una novità promettente in campo archeologico. Questo lavoro rivela che un uso diffuso di tale metodologia sarà in grado di migliorare notevolmente il tasso di automazione, la velocità, l'obiettività e la qualità del riconoscimento di *features*, senza impatti negativi sulla conservazione del record archeologico al suolo. In particolare, questo aiuterà nel processo di estrazione e classificazione di oggetti, *pattern* e scene, fornendo uno strumento

² Il termine "Arché-OBIA" è stato edito per la prima volta dai francesi Lamotte e Masson alla fine del 2016. Gli autori, tuttavia, lo impiegano nel ristretto (e restrittivo) contesto dello studio tipologico e morfometrico degli oggetti archeologici (presentando il caso di alcuni bifacciali in selce). Tale impiego, però, è estremamente limitante e non tiene conto delle ampie potenzialità del metodo nel quadro della disciplina archeologica. Questa prospettiva riduce, infatti, la portata dell'OBIA in archeologia a un "semplice" mezzo di confronto tra oggetti e va dunque rivista e ampliata, come si è cercato di dimostrare in questa tesi.

³ È già avviata una collaborazione in questo senso da parte dello scrivente con esperti di ambito archeometrico.

economicamente sostenibile per catalogare, conservare e proteggere il patrimonio archeologico.

12. Ringraziamenti

Il primo, doveroso, e più sentito ringraziamento va al prof. Armando De Guio per i preziosi insegnamenti, il costante supporto, la fiducia dimostrata in questi anni di collaborazione e per aver rappresentato nel corso del tempo un esempio da (in)seguire.

Un sincero ringraziamento va anche al prof. Giuseppe Salemi per essere sempre stato disponibile a darmi consigli mettendo a disposizione la sua esperienza e le sue conoscenze e per il confronto costruttivo durante gli anni del dottorato.

Ringrazio, inoltre, il prof. Maurizio Cattani dell'Università di Bologna e la dott.ssa Rosa Lasaponara del CNR di Potenza per la revisione dell'elaborato e i preziosi consigli.

Un grazie particolare va anche alla prof.ssa Paola Zanovello per il sostegno e il coinvolgimento in numerosi progetti tra i quali non posso non nominare "Horus", che mi ha accompagnato durante il periodo di questo dottorato. A tal proposito, tengo inoltre a ringraziare la dott.ssa Giulia Deotto, il dott. Luca Toninello, il dott. Giacomo Colombatti, l'ing. Alessio Aboudan, il prof. Carlo Bettanini, il CISAS e tutti i partecipanti al progetto per essere riusciti a portare avanti un lavoro eccellente tra mille difficoltà. Avanti con il prossimo!

La mia più sincera gratitudine va al dott. Umberto Tecchiati per l'amicizia e per la passione con cui ha condiviso con me le sue competenze, oltre che per la disponibilità nell'aiutarmi proprio in occasione di questa tesi anche con pochissimo preavviso.

Intendo inoltre ringraziare tutto l'Ufficio Beni Archeologici della Provincia Autonoma di Bolzano per avermi accolto in laboratorio e avermi fatto sentire parte integrante del team di lavoro, anche se solo per pochi mesi.

Un doveroso ringraziamento va poi all'Ufficio Cartografia Provinciale e Coordinamento Geodati della Provincia Autonoma di Bolzano e al dott. David Colmano per aver reso disponibili i dati LiDAR e aerofotografici delle zone di interesse.

Si ringrazia, inoltre, l'Ufficio per il Diritto allo Studio Universitario della Provincia Autonoma di Bolzano per aver erogato la borsa di studio che mi ha permesso di portare avanti questa ricerca.

Mille grazie anche alla dott.ssa Maria Ilaria "Marilli" Pannaccione Apa per l'aiuto e la pazienza dimostrata durante la stesura dei vari progetti a cui abbiamo collaborato e su stiamo lavorando al momento (tenendo le dita incrociate perché vadano in porto!).

Un grande grazie anche ai colleghi e agli studenti che nel corso di questi anni hanno contribuito al lavoro: la dott.ssa Emanuela Faresin, per aver condiviso con me i dati del suo

dottorato, per i consigli e le indicazioni e la dott.ssa Laura Burigana, per la sua schiettezza e per il costante e fruttuoso scambio di idee e opinioni.

Ci anche tengo a ringraziare tutti i ragazzi che hanno partecipato alle recenti campagne di scavo sul Bostel di Rotzo per aver condiviso con me gioie e dolori (muscolari) della vita sul campo e non avermi fatto sentire troppo vecchio.

Un particolare ringraziamento va ai miei genitori per aver sempre supportato le mie decisioni e non avermi mai imposto alcuna scelta, anche se questo per loro ha significato dei sacrifici.

Inoltre volevo ringraziare i parenti e gli amici che hanno avuto modo di conoscermi, sostenermi e starmi vicino in tutti questi anni.

E infine (*the best for last?*) un ringraziamento speciale va alla dott.ssa Cinzia Bettineschi, per sopportare quotidianamente i miei “deliri” e per talmente tanti altri motivi che, per quanto estremamente sentiti, sarebbero davvero troppi da elencare in questa sede.

BIBLIOGRAFIA

AAMODT A., PLAZA E., 1994, "Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches", *Artificial Intelligence Communications*, 7(1), pp. 39-59.

ANDERS N.S., SEIJMONSBERGEN A.C., BOUTEN W., 2011, "Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping", *Remote Sensing of Environment* 115, pp. 2976-2985.

ADDINK E.A., KLEINHANS M.G., 2008, "Recognizing meanders to reconstruct river dynamics of the Ganges", in *Object Based Image Analysis*, a cura di BLASCHKE T., LANG S. and HAY G., Springer, Heidelberg, Berlin.

ADDIS A., ANGELINI I., NIMIS P., ARTIOLI G., 2016, "Late Bronze Age Copper Smelting Slags from Luserna (Trentino, Italy): Interpretation of the Metallurgical Process" in *Archaeometry* **58** (1), pp. 96-114. DOI: 10.1111/arcm.12160

APOLLONI L., 1993, "Aspetti dell'impatto antropico nella parte alta dell'Altopiano dei Sette Comuni dal tempo della Serenissima ai giorni nostri", *Acta Geologica*, Museo Tridentino di Scienze Naturali, 70, pp. 153-164.

ARTIOLI G., ANGELINI I., NIMIS P., VILLA I. M., 2016, "A lead-isotope database of copper ores from the Southeastern Alps: A tool for the investigation of prehistoric copper metallurgy" in *Journal of Archaeological Science*, 75, pp. 27-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2016.09.005>

AUDEECHYA N., PORWAL M.K., 2013, "Lidar Technology and Applications", *International journal of research in Computer engineering and Electronics* 2/3.

AXELSSON P., 1999, "Processing of laser scanner data - algorithms and applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, pp. 138-147.

BAATZ M., HOFFMANN C., WILLHAUCK G., 2008, "Progressing From Object-based to Object-oriented Image Analysis", in *Object Based Image Analysis*, a cura di BLASCHKE T., LANG S. and HAY G., Springer, Heidelberg, Berlin.

BAATZ M., SCHÄPE A., 1999, "Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks", in *Proc. of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing* August 16th – 20th 1999. Enschede. ITC.

BAATZ M., SCHÄPE A., 2000, "Multiresolution segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation", in *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung* vol. XII, a cura di STROBL J., BLASCHKE T. and GRIESEBNER G., pp. 12-23, Heidelberg: Wichmann.

BALISTA C., 2009, "Le risposte del sistema paleoidrografico di risorgiva delle Valli Grandi Veronesi Meridionali alle fluttuazioni climatiche tardo-oloceniche e agli impatti antropici legati ai cicli insediativi dell'età del Bronzo, di età romana e di età tardorinascimentale-moderna", *Padusa*, XLV, Nuova Serie, 2009, Pisa - Roma, pp. 73-131.

BALISTA C., BLAKE H., DE GUIO A., HOWARD DAVIS C., HOWARD P., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J., 1986, "Progetto Alto Polesine. Marzo-Aprile 1986. Relazione preliminare." *Quaderni di Archeologia del Veneto*, II, pp. 21-25.

BALISTA C., CAFIERO F., DE GUIO A., 1997, "Castello del Tartaro", in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, catalogo della mostra, Modena 15 marzo - 1 giugno 1997, Milano, pp. 240-245.

BALISTA C., BAGOLAN M., CAFIERO F., DE GUIO A., LEVI S., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J., 1998, "Bronze-Age «Fossil Landscapes» in the Po Plain", in *Mensch und Umwelt in der Bronzezeit Europas*, a cura di HÄNSEL B., pp. 493-499, Kiel: Oetker-Voges Verlag.

BALISTA C., DE GUIO A., VANZETTI A., BETTO A., DE ANGELI G., SARTOR F., 2005, "Paleoidrografie, impianti terramaricoli e strade su argine: evoluzione paleoambientale, dinamiche insediative e organizzazione territoriale nelle Valli Grandi Veronesi alla fine dell'età del bronzo", *Padusa*, anno XLI, Pisa-Roma, pp. 97-138.

BARATTER L., 2007, "Dagli Altipiani a Caporetto - Von Hochebene nach Karfreit", Luserna, Centro di Documentazione.

BARBIERI G., 1993, "Le rocce dell'Altopiano dei Sette Comuni", *Acta Geologica*, Museo Tridentino di Scienze Naturali, 70, pp. 9-20.

BARETTA L., MARCHETTO S., 1997, "Guida ai paesi, alla natura, alle tradizioni dell'Altopiano di Asiago", libreria Demetra.

BELLO T., 2006, "Storie di Confine dell'Alpe Vicentine: da Recoaro al monte Grappa", Vicenza, La Serenissima.

BENNETT R., WELLHAM K., HILL R.A., FORD A., 2012, "A comparison of visualization techniques for models created from airborne laser scanned data", in *Archaeological Prospection* 19, pp. 41-48.

BENNETT R., COWLEY D., DE LAET V., 2014, "The data explosion: tackling the taboo of automatic feature recognition in airborne survey data", *Antiquity* 88, pp. 896-905.

BENZ U.C., HOFMANN P., WILLHAUCK G., LINGENFELDER I., HEYNEN M., 2004, "Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58, pp. 239-258.

BERNI P., SAURO U., VARANINI G.M. (eds), 1991, "Gli alti pascoli dei Lessini Veronesi", Storia, Natura, Cultura, Vago di Lavagno, La grafica Editrice.

BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), 1997, "Le terramare. La più antica civiltà padana", Electa, Milano, pp. 801.

BETTO A., 2003-2004, "Archeologia della Grande Guerra: i casi di studio di Vezzena e Luserna (TN)", tesi di laurea, Università di Padova - Dipartimento di Scienze dell'Antichità.

BETTO A., 2013, "Le strade dell'età del bronzo nelle Valli Grandi Veronesi Meridionali. Connettività e management idraulico nel quadro di un Paesaggio di Potere", tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Beni Culturali: Archeologia, Storia dell'Arte, del Cinema e della Musica.

BETTO A., DE ANGELI G., SARTOR F., 2006, "«Embanked roads» of the Southern Valli Grandi Veronesi. Between air photointerpretation and ground evaluation of buried stratigraphy: a positive feedback", in *From Space to Place - 2nd International Conference*

on *Remote Sensing in Archaeology*, a cura di CAMPANA S., FORTE M., pp. 487-490, Proceedings of the 2nd International Workshop, CNR Rome (Italy) December 4-7 2006. Oxford: Archaeopress.

BEWELEY R.H., CRUTCHLEY S., SHELL C.A., 2005, "New light on ancient landscape: Lidar survey in the Stonehenge World Heritage site", in *Antiquity* 79(305), pp. 636-647.

BINNIG G., BAATZ M., KLENK J., SCHMIDT G., 2002, "Will Machines start to think like humans?" in *Europhysics News*, vol. 33 (2).

BLASCHKE T., 2010, "Object based image analysis for remote sensing", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, pp. 2-16.

BLASCHKE, T., BURNETT, C., PEKKARINEN, A., 2004, "New contextual approaches using image segmentation for object-based classification", in *Remote Sensing Image Analysis: Including the spatial domain*, a cura di DE MEER, F., DE JONG, S., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 211-236.

BLASCHKE T., HAY G.J., KELLY M., LANG S., HOFMANN P., ADDINK E., QUEIROZ FEITOSA R., VAN DER MEER F., VAN DER WERFF H., VAN COILLIE F., TIEDE D., 2014, "Geographic Object-Based Image Analysis - Towards a new paradigm", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87, pp. 180-191.

BLASCHKE T., LANG S., HAY G.J., 2008, "Object-based image analysis. Spatial concepts for knowledge-driven Remote Sensing applications", Berlino, Springer.

BLASCHKE T., LANG S., LORUP E., STROBL J., ZEIL P., 2000, "Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for

environmental applications”, in Cremers A., Greve K. (Eds.), *Environmental Information for Planning, Politics and the Public*, vol. 2, pp. 555 - 570, Metropolis Verlag: Marburg.

BÖHNER J., ANTONIC O., 2009, “Land-surface parameters specific to topoclimatology”, In *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science* 33, pp. 195-226.

BÖHNER J., MCCLOY KR., STROBL J., (a cura di) 2006, “SAGA - Analysis and Modelling Applications”, *Göttinger Geographische Abhandlungen*, volume 115. Cartographic Portal of Trentino. 2006-2008. LiDAR database: <http://www.territorio.provincia.tn.it/portal/server.pt/community/lidar/847/lidar/23954>

BONATO S., RIGONI P., 1987, “Terra e vita dei Sette Comuni”, Vicenza, Rumor.

BOYD D.S., HILL R.A., 2007, “Validation of airborne lidar intensity values from a forested landscape using hymap data: preliminary analyses”, *IAPRS XXXXVI*, Pt 3, pp. 6-71.

BREIMAN L., FRIEDMAN J., STONE C.J., OLSHEN R.A., 1984, “Classification and Regression Trees”, Taylor & Francis.

BRESSAN C., 2009, “Bostel di Rotzo. Il primo villaggio”, in *L’Altipiano dei Sette Comuni*, a cura di RIGONI P., VAROTTO M., Verona, Cierre, pp. 139-141.

BURNETT C., BLASCHKE T., 2003, “A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis”, in *Ecological Modelling* 168 (3), pp. 233-249.

BURROUGH P. A., MCDONELL R. A., 1998, "Principles of Geographical Information Systems", Oxford University Press, New York, pp.190.

CAIE P.D., ZHOU Y., TURNBULL A.K., ONISCU A., HARRISON D.J., 2016, "Novel histopathologic feature identified through image analysis augments stage II colorectal cancer clinical reporting", in *Oncotarget* 7(28), pp. 44381-44394.

CAMPANA S., 2009, "Archeologia dei paesaggi e Remote Sensing", *Groma 2. In profondità senza scavare*, BraDypUS Communicating Cultural Heritage, pp. 137-155.

CAMPANA S., FORTE M. (a cura di), 2006, "From Space to Place: 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology." Proceedings of the 2nd International Workshop, CNR, Rome, Italy, December 4-7, 2006; Oxford, Archaeopress.

CAMPBELL J.B., 2002, "Introduction to Remote Sensing", The Guilford Press, New York.

CANCI A., CONTURSI D., FORNACIARI G., 2005, "La necropoli dell'età del bronzo di Olmo di Nogara (Verona): primi risultati dello studio paleopatologico", in *La necropoli dell'età del bronzo all'Olmo di Nogara*, a cura di SALZANI L., Verona, pp. 495-501.

CANCI A., SALZANI L., CUPPAIUOLO A. (a cura di), 2010, "Vita e morte nell'età del Bronzo. Il racconto delle sepolture di Olmo di Nogara", Museo Archeologico Nazionale di Fratta Polesine.

CAPSTONE PRESS, 2003, KISS, in "Capstone Encyclopaedia of Business", Hoboken: Wiley, pp. 488.

CARDARELLI A., 2009, "The collapse of the Terramare Culture and growth of new economic and social systems during the Late Bronze Age in Italy", *Scienze dell'Antichità. Storia Archeologia Antropologia*, 15 (2009), pp. 449-520.

CASANA J., PANAHIPOUR M., 2014, "Satellite-Based Monitoring of Looting and Damage to Archaeological Sites in Syria", in *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology & Heritage Studies* Vol. 2, No. 2, pp. 128-151.

CASTALDINI A., 2003, "Gli Ultimi Cimbri", in *Limes* 6/2003 "Il Nostro Oriente", Roma: L'Espresso, pp. 169-179.

CATTANI M., FIORINI A., 2004, "Topologia: identificazione, significato e valenza nella ricerca archeologica", in *Archeologia e Calcolatori*, vol. 15, pp. 317-340.

CELI M., 1991, "The impact of bombs of World War I on limestone slopes of Monte Grappa", in *Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas, Quaderni del Dipartimento di Geografia* n. 13 - Università di Padova, pp. 279-287.

CHALLIS K., FORLIN P., KINCEY M., 2011, "A generic toolkit for the visualization of archaeological features on airborne Lidar elevation data", in *Archaeological Prospection* 18(4).

CHAVARRIA ARNAU A., REYNOLDS A. (a cura di), 2015, "Detecting and understanding historic landscapes", Mantova: SAP SOCIETA' ARCHEOLOGICA SRL.

CHEN Y., SHI P., FUNG T., WANG J., LI Y., 2007, "Object-oriented classification for urban land cover mapping with ASTER imagery", *International Journal of Remote Sensing* 28 (29), pp. 4645-4651.

CORBANE C., RACLOT D., JACOB F., ALBERGEL J., ANDRIEUX P., 2008, "Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach", *Catena* 75 (3), pp. 308-318.

CROW P., 2007, "Historic Environment Surveys of Woodland using LiDAR", Forest Research: www.forestresearch.gov.uk/lidar

CRUTCHLEY S., 2008, "Ancient and modern: combining different remote sensing techniques to interpret historic landscapes", in *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management*, a cura di LASAPONARA R., MASINI N., Proceedings of the first International EARSeL Workshop on Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. Roma: Aracne, pp. 103-106.

CRUTCHLEY S., CROW P., 2010, "The Light Fantastic. Using Air Borne LiDAR in Archaeological Survey", Swindon.

DAL POZZO A., 1820 (ristampato 1910), "Memorie storiche dei Sette Comuni vicentini".

DAL RI L., RIZZI G., 1997, "Bressanone", in *Denkmalpflege in Südtirol/ Tutela dei Beni Culturali in Alto Adige*, 1991-1995, Wien – Bozen, pp. 25-55.

DE GUIO A., 1994, "L'Altopiano di Asiago dal Bronzo Medio agli inizi dell'Età del Ferro", in A.A.V.V., pp. 157-178.

DE GUIO A., 2005, "Archeologia di frontiera: il progetto "Ad Metalla"", in *Luserna 89 - la storia di un paesaggio alpino, Atti del Convegno "Sul confine... Percorsi tra archeologia, etnoarcheologia e storia lungo i passi della montagna di Luserna"*, a cura di De GUIO A., ZAMMATTEO P., Luserna, 28 dicembre 2002, S.A.R.G.O.N. Editrice e Libreria, Padova, pp. 87-123.

DE GUIO A., 2015a, "Nuove linee di ricerca fra archeologia pre-dittiva e post-dittiva" in *Archeologia e Calcolatori n. XXVI*, All'insegna del Giglio edizioni, pp. 303-313.

DE GUIO A., 2015b, "Cropping For a Better Future: Vegetation Indices in Archaeology" in *Detecting and understanding historic landscapes*, a cura di CHAVARRIA ARNAU A., REYNOLDS A., Mantova: SAP SOCIETA' ARCHEOLOGICA SRL.

DE GUIO A., BETTO A., 2005, "Archaeology of the War, Archaeology through the War: an analytical frontier" in *Archaeological Landscapes through Digital Technologies, Proceedings of the 2nd Italy-United States Workshop*, Roma, Italia, 3-5 November 2003, a cura di FORTE M., Berkeley, USA, May 2005, *BAR International Series 1379*, Oxford, pp. 153-170.

DE GUIO A., BETTO A., 2010, "Archaeology of the Great War: molto di nuovo dal fronte occidentale", *Archeologia della Grande Guerra / Archaeology of the Great War*, Luserna 2006 -Trento 2010, pp. 139-172.

DE GUIO A., BETTO A., BALISTA C., 2011, "Per la tutela e la valorizzazione di un patrimonio paesaggistico-culturale unico nel suo genere: le tracce degli antichi campi, dei canali e delle strade su terrapieno di età preistorica e romana conservate nel sottosuolo delle Valli Grandi e Medio Veronese", in *Pianificazione territoriale, urbanistica e archeologia: una sintesi possibile*, edited by Saracino M., pp. 79-124. Verona: Comune di Verona, Assessorato all'urbanistica.

DE GUIO A., BETTO A., MIGLIAVACCA M., MAGNINI L., 2013, "Mountain fossil landscapes and the "archaeology of us": an object/ pattern/ scenery recognition experiment", in *Proceedings of the 5th International Congress of Ethnoarchaeology, Roma, ISAO, May 13-14 2010*, edited by Lugli F., Stoppiello A.A., Biagetti S., pp. 241-247. BAR International Series 2472. Oxford: Archaeopress.

DE GUIO A., FINZI E., 1995, "Il "Progetto Rotzo" (Altopiano di Asiago): un caso di studio di pattern recognition incrociata", in *Le scienze della terra e l'archeometria* a cura di D'AMICO C., FINOTTI F., Rovereto, Museo Civico di Rovereto, Museo di Mineralogia "L. Bombicci", Università di Bologna, PP. 33-41.

DE GUIO A., MAGNINI L., BETTINESCHI C., 2015, "GeOBIA approaches to remote sensing of fossil landscapes: two case studies from Northern Italy", in *Across Space and Time: papers of the 41st Computer Association and Quantitative Methods in Archaeology Conference* (Perth, Australia), edited by Traviglia A., Amsterdam University Press, pp. 45-53.

DE GUIO A., ZAMMATTEO P., 2005. *Luserna - La storia di un paesaggio Alpino - Atti del Convegno Sul Confine... Percorsi tra archeologia, etnoarcheologia e storia lungo i passi della montagna di Luserna*. Padova: S.A.R.G.O.N. Editrice e Libreria.

DEOTTO G., BETTINESCHI C., BETTANINI C., MAGNINI L., TONINELLO L., COLOMBATTI G., ABOUDAN A., ZANOVELLO P., MENEGAZZI A., BENVENUTI P., DEBEI S., DE GUIO A., HORUS TEAM, cds, "Horus Project: aerospace technologies for archaeological research", in *Archeologia Aerea* 10/ 16, Studi di Aerotopografia Archeologica.

DESFOSSES Y., JAQUES A., PRILAUX G., 2009, "*Great War archaeology*. Rennes: Ouest-France".

DEVEREUX B.J., AMABLE G.S., CROW P., 2008, "Visualisation of lidar terrain models for archaeological feature detection", in *Antiquity* 82, pp. 9-470.

DI PILLO M., 1994, "L'area atesina tra il bronzo medio e l'inizio dell'età del ferro", tesi di dottorato in archeologia, 1991-1994.

DONADEL V., 2012, "I materiali dal Bronzo recente avanzato alla prima età del ferro", in *Il castelliere di Castel de Pedena. Un sito di frontiera del II e I millennio a.C.*, a cura di ANGELINI A., LEONARDI G., Saltuarie dal Laboratorio del Piovego 9.

DONEUS M., 2013, "Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models", in *Remote Sensing* 5, 6427-6442.

DONEUS M., BRIESE C., 2006, "Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance", in *"From Space to place" Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, S. CAMPANA and M. FORTE (eds), (BAR-IS 1568) Oxford, pp. 99-105.

DONEUS M., BRIESE C., FERA M., JANNER M., 2008, "Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laserscanning" *Journal of Archaeological Science* 35, pp. 882-893. DOI: 10.1016/j.jas.2007.06.013.

DORREN L.K., MAIER B., SEIJMONSBERGEN A.C., 2003, "Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification", *Forest Ecology and Management* 183, pp. 31-46.

DOZIER J., FREW J., 1990, "Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation model data", in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 28, pp. 963-969.

DRĂGUȚ L., BLASCHKE T., 2006, "Automated classification of landform elements using object-based image analysis", *Geomorphology* 81, pp. 330-344.

DRONOVA I., GONG P., WANG L., 2011, "Object-based analysis and change detection of major wetland cover types and their classification uncertainty during the low water period at Poyang Lake, China", *Remote Sensing of Environment* 115, pp. 3220-3236.

EGGER A., 1917, "Prähistorische Stationen auf dem St. Andräer Berge bei Brixen", in *Mitteilungen der K. K. Zentral-Kommission für Denkmalpflege*, Band XV, pp. 130-145.

EGGER A., 1943, "Prähistorische und römische Siedlungen im Rienz- und Eisacktal", Bressanone.

EGGER A., 1951, "Die Natzerplatte, eine natürliche Grossfestung der Urzeit", in *Der Schlern* XXXV, pp. 80-81.

FARESIN E., 2015, "Multisensor data fusion in ambito bioarcheologico. Estrazione ed analisi di features su reperti ossei provenienti dalla necropoli di Olmo di Nogara", tesi di dottorato in Studio e Conservazione dei Beni Archeologici e Architettonici, Università degli Studi di Padova.

FELTRIN M., 2002, "Il deposito dell'età del Bronzo del colle Cornale (Bressanone): un esempio abitativo di aree improduttive", in *Riassunti della XXXIII Riunione Scientifica dell'IIPP*, pp. 377-380.

FEUCHTINGER A., WALCH A., DOBOSZ M., 2016, "Deep tissue imaging: a review from a preclinical cancer research perspective", in *Histochemistry and Cell Biology* 146 (6), pp. 781-806.

FIRTH H., TRUSCOE K., 2011, "The Aggregate Landscape of Somerset: Predicting the Archaeological Resource", in *The Archaeology of Mendip: 500,000 years of change and continuity*, a cura di LEWIS J., Heritage Publications.

FINCATI GIRARDI A., 1999, "Andar per malghe sull'Altopiano di Asiago", Colognola ai Colli (VR).

FRASER A.H., BROWN M., 2007, "Mud, Blood and Missing Men: Excavations at Serre, Somme, France", *Journal of Conflict Archaeology* 3 (1), pp. 147-171. DOI: <http://dx.doi.org/10.1163/157407807X257412>

FREELAND T., HEUNG B., BURLEY D.V., CLARK G., KNUDBY A., 2016, "Automated feature extraction for prospection and analysis of monumental earthworks from aerial LiDAR in the Kingdom of Tonga", *Journal of Archaeological Science* 69, pp. 64-74.

FU P., RICH P.M., 1999, "Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales", in *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference*.

FU P., RICH P.M., 2000, "The Solar Analyst 1.0 Manual", Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.

GATES D.M., 1980, "Biophysical Ecology", Springer-Verlag, New York.

GAUDIO, BETTO A., VANIN S., DE GUIO A., GALASSI A., CATTANEO C., 2013, "Excavation and Study of Skeletal Remains from a World War I Mass Grave", *International Journal of Osteoarchaeology* **25** (5), pp. 585-592.

GEISSER S., 1993, "Predictive Inference", CRC Press.

GHEYLE W., SAEY T., VAN HOLLEBEEKE Y., VERPLAETSE S., NOTE N., BOURGEOIS J., VAN MEIRVENNE M., VAN EETVELDE V., STICHELBAUT B., 2016, "Historical Aerial Photography and Multi-receiver EMI Soil Sensing, Complementing Techniques for the Study of a Great War Conflict Landscape", *Archaeological Prospection* **23** (3), pp. 149-164. DOI: 10.1002/arp.1534

HALLIDAY S., 2013, "I Walked, I Saw, I Surveyed, But What Did I See? ... and what did I survey?" in *Interpreting archaeological topography: airborne laser scanning, 3D data and ground observation*, a cura di OPITZ R., COWLEY D.C., Oxford: Oxbow, pp. 63-75.

HANUS K., 2012, "The application of airborne laser scanning in archaeology", *Studies in ancient art and civilization* 16, Kraków, pp. 233-248.

HAPKA R., WENGER R., 1997, "Baumes et gouffres neuchâtelais - Découverte d'un univers fascinant ", *Hauterive Suisse*.

HARALICK R.M., SHANMUGAN K., DINSTEN I., 1973, "Textural Features for Image Classification", in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol SMC-3, No. 6 pp. 610–621.

HARALICK R.M., SHAPIRO L.G., 1985, "Image segmentation Techniques", by *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 29, pp.100-132.

HAWKINS E.D., DUARTE D., AKINDURO O., KHORSHED R.A., PASSARO D., NOWICKA M., STRASZKOWSKI L., SCOTT M.K., ROTHERY S., RUIVO N., FOSTER K., WAIBEL M., JOHNSTONE R.W., HARRISON S.J., WESTERMAN D.A., QUACH H., GRIBBEN J., ROBINSON M.D., PURTON L.E., BONNET D., LO CELSO C., 2016, "T-cell acute leukaemia exhibits dynamic interactions with bone marrow microenvironments", in *Nature* 538, pp. 518-522.

HAY G.J., BLASCHKE T., MARCEAU D.J., BOUCHARD A., 2003, "A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure", in *Photogrammetry and Remote Sensing* 1253, pp. 1-19.

HAY G.J., CASTILLA G., 2008, "Geographic object based image analysis (GEOBIA): a new name for a new discipline", in *Object Based Image Analysis*, edited by Blaschke T., Lang S. and Hay G., pp. 93-112, Springer, Heidelberg, Berlin, New York.

HAY G.J., NIEMANN K.O., 1994, "Visualizing 3D Texture: A Three Dimensional Structural Approach to Model Forest Texture", in *Canadian Journal of Remote Sensing* 20 (2), pp. 90-101.

HAY G.J., NIEMANN K.O., GOODENOUGH D.G., 1997, "Spatial thresholds, image-objects and upscaling: a multi-scale evaluation", *Remote Sensing of Environment* 62 (1), pp. 1-19.

HEIDRICH A., SCHMIDT J., ZIMMERMANN J., SALUZ H.P., 2013, "Automated Segmentation and Object Classification of CT Images: Application to *in vivo* Molecular Imaging of Avian Embryos", in *International Journal of Biomedical Imaging*, 508, 474.

HENTZSCHEL R., 2008, "*Festungskrieg im Hochgebirge: der Kampf um die österreichischen und italienischen Hochgebirgsforts in Südtirol im Ersten Weltkrieg*", Athesia, Bozen.

HERRERA B., KLEIN C., KOCH B., DEES M., 2004, "Automatic classification of trees outside forest using an object-driven approach: An application in a Costa Rican landscape", *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 8 (2), pp. 111-119.

HESSE R., 2010, "LiDAR-derived Local Relief Models - a new tool for archaeological prospection", *Archaeological Prospection* 17 (2), pp. 67-72. DOI: 10.1002/arp.374

HESSE R., 2013, "Visualisierung hochauflösender digitaler Geländemodelle mit LiVT", First Draft, da Academia.edu.

HESSE R., 2014, "Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models", *Applied Geography* 46, pp. 11-20.

HEYMAN O., GASTON G.G., KIMERLING A.J., CAMPBELL J.T., 2003, "A persegment approach to improving aspen mapping from high-resolution remote sensing imagery", *Journal of Forestry* 101 (4), pp. 29-33.

HICKS J., FLANAGAN R., PETROV P., STOYEN A., 2001-2003, "Eyekon: Distributed Augmented Reality for Soldier Teams", 21st Century Systems Inc., pp. 2-14.

HOLDEN N., HORNE P., BEWLEY R.H., 2002, "High-resolution digital airborne mapping and archaeology", in *Aerial Archaeology: developing future practice*, a cura di BEWLEY R.H., pp. 80-173.

HOLE F., HEIZER R.F., 1969, "An introduction to prehistoric archeology", 2nd edition. New York: Holt, Rinehart and Winston.

HUPY J.P., SCHAETZL R.J., 2006, "Introducing "Bomburbation" a singular type of soil disturbance and mixing", in *Soil Science* 171 (11), pp. 823-836.

HUPY J.P., SCHAETZL R.J., 2008, "Soil development on the WWI battlefield of Verdun, France", in *Geoderma* 145 (1), pp. 37-49.

IMHOF E., 1982, "Cartographic Relief Presentation", ESRI Press.

JAMES I.M. (a cura di), 1999, "History of Topology", Elseiver, 1056.

JANKAUSKAS R., PALUBECKAITĖ-MILIAUSKIENĖ Ž., STANKEVIČIŪTĖ D., KUNCEVIČIUS A., 2011, "Im Osten etwas Neues: Anthropological analysis of remains of German soldiers from 1915-1918", in *Anthropologischer Anzeiger* 68, pp. 393-414.

JACQUIN A., MISAKOVA L., GAY M., 2008, "A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment", *Landscape and Urban Planning* 84 (2), pp. 152 - 165.

KAIMARIS D., 2011, "Location of Defensive Military Trenches in Central and Northern Greece", in *Archaeological Prospection* 18 (3), pp. 223-229.

KAMERMANS H., 2004, "The Application of Predictive Modelling in Archaeology: Problems and Possibilities", in *Beyond the artifact: digital interpretation of the past*,

Proceedings of CAA 2004, a cura di NICCOLUCCI F., HERMON S., Prato 13-17 aprile 2004, Archaeolingua, Budapest 2010, pp. 273-277.

KAMERMANS H., VANLEUSEN M., VERHAGEN P., (a cura di) 2009, "Archaeological Prediction and Risk Management: alternatives to current practice", Leiden, Leiden University press.

KAMERMANS H. 2011, "Predictive maps in the Netherlands, problems and solutions", in *A piccoli passi. Archeologia predittiva e preventiva nell'esperienza cesenate*, a cura di GELICHI S., NEGRELLI C., Firenze: all'insegna del Giglio, pp. 13-18.

KEEGAN, J., 1998, "The First World War", London, Random House.

KIDD C., CHAPMAN L., 2012, "Derivation of sky-view factors from lidar data", *International Journal of Remote Sensing* **33**:11, pp. 3640-3652.

KOHLER T.A., PARKER S.C., 1986, "Predictive models for archaeological resource location" in *Advances in Archaeological Method and Theory, Volume 9.*, a cura di SCHIFFER M. B., pp. 397-452, New York, Academic Press.

KOKALJ Ž., ZAKŠEK K., OŠTIR K., 2011, "Application of sky-view factor for the visualisation of historic landscape features in lidar-derived relief models", *Antiquity* **85** (327), pp. 263-273.

KOKALJ Ž., ZAKŠEK K., OŠTIR K., 2013, "Visualizations of Lidar Derived Relief Models", in *Interpreting Archaeological Topography - Airborne Laser Scanning, Aerial Photographs and Ground Observation*, a cura di OPITZ R., COWLEY C.D., Oxford: Oxbow Books; pp. 100-114.

KORF B., ENGELER M., HAGMANN T., 2010, "The Geography of Warscape", *Third World Quarterly* 31 (3), pp. 385-399.

KRAMER I.C., 2015, "An archaeological reaction to the remote sensing data explosion: reviewing the research on semi-automated pattern recognition and assessing the potential to integrate artificial intelligence", MSc thesis, University of Southampton.

KUHN T.S., 1962, "The structure of scientific revolution", Chicago University Press.

KUHN M., JOHNSON K., 2013, "Applied Predictive Modeling", Springer.

LAMBERS K., TRAVIGLIA A., 2016, "Automated detection in remote sensing archaeology: a reading list", *AARGnews* 53, PP. 25-29.

LAMOTTE A., MUSSON E., 2016, "Arché-OBIA: un concept d'analyse quantitative d'images numériques appliqué aux bifaces du gisement de Gouzeaucourt (Nord, FR)" in *Notae Praehistoricae* 36, pp. 121-130.

LANG S., 2002, "Zur Anwendung des Holarchiekonzeptes bei der Generierung regionalisierter Segmentierungsebenen in höchstaflösenden Bilddaten", in *Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – innovative Methoden*, a cura di BLASCHKE T., Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 24-33.

LANG S., 2005, "Image objects vs. landscape objects. Interpretation, hierarchical representation and significance", Salzburg, unpublished PhD thesis.

LANG S., 2008, "Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality - dealing with complexity", in *Object-based image analysis. Spatial concepts for knowledge-driven Remote Sensing applications* a cura di BLASCHKE T., LANG S., HAY G.J., Berlino: Springer, pp. 3-28.

LANG S., BLASCHKE T., 2006, "Bridging remote sensing and GIS - what are the most supportive pillars?" in *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* vol. XXXVI-4/C42, a cura di LANG S., BLASCHKE T., SCHÖPFER E.

LANG, S., BURNETT, C., BLASCHKE, T., 2004, "Multi-scale object-based image analysis – a key to the hierarchical organisation of landscapes", *Ekologia*, Supplement 23, 1-9.

LANG S., LANGANKE T., 2006, "Object-based mapping and object-relationship modeling for land use classes and habitats", in *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 1/2006, pp. 5-18.

LASAPONARA R., COLUZZI R., MASINI N., 2011, "Flights into the past: full-waveform airborne laser scanning data for archaeological investigation", *Journal of Archaeological Science* 38, pp. 2061-2070.

LASAPONARA R., MASINI N. (a cura di), 2012, "Satellite Remote Sensing. A New Tool for Archaeology", Springer Dordrecht Heidelberg, London New York.

LE BAILLY M., LANDOLT M., BOUCHET F., 2012, "First World War German Soldier Intestinal Worms: An Original Study of a Trench Latrine in France", *The Journal of Parasitology* 98 (6), pp. 1273-1275.

LEONARDI G., RUTA SERAFINI M., 1981, "L'abitato protostorico di Rotzo", in *Preistoria Alpina* 17, Trento 1981, pp. 7-75.

LE ROY LADURIE E., 1974, "L'histoire immobile", *Annales, Économies, Sociétés, Civilisations* 29 (3), pp. 673-692.

LIBER T., LEITEMPERGHER U., KOZLOVIC A., 1988, "1914-18. La grande guerra sugli altipiani. Folgaria, Lavarone, Luserna, Vezzena, Sette Comuni, M. Pasubio, M. Cimone e sugli altri fronti di guerra", Valdagno (VI), Rosato.

LI Z., ZHU Q., GOLD C., 2005, "Digital terrain modeling : principles and methodology", in Boca Raton : CRC Press.

LILLESAND T.M., KIEFER R.W., CHIPMAN J.W., 2004, "Remote sensing and Image Interpretation", John Willey and Sons, Inc.

LUNZ R., 1974, "Studien zur End-Bronzezeit und älteren Eisenzeit im Südalpenraum", in *Origines*, IIPP, Firenze.

LUNZ R., 1981, "Archeologie Südtirols Teil 1", in *Archeologisch-historische Forschungen in Tirol* 7, Bolzano.

LUNZ R., 1992, "Die Ur- und Frühgeschichte Vahrns mit Ausblicken auf die Umgebung", in *Vahrn. Heimat zwischen den Welt*, pp. 10-39.

LUNZ R., 1994, "Ur- und Frühgeschichte des Brixener Raumes", in *Archeologisch-historische Forschungen in Tirol* 9, Bolzano.

MAGNINI L., 2010-2011, "OPSR: object, pattern, scenery recognition in archeologia. L'approccio eCognition al caso di studio di Millegrobbe (TN)", tesi di laurea specialistica, Università degli Studi di Padova.

MAGNINI L., 2013-2014, "Object-based image analysis ed elaborazioni LiDAR: linee sperimentali di object/ pattern/ scenery recognition", tesi di specializzazione, Università degli Studi di Padova.

MAGNINI L., BETTINESCHI C., DE GUIO A., 2016, "Object-based shell craters classification from LiDAR derived Sky-view factor", in *Archaeological Prospection*, DOI: 10.1002.

MAGNINI L., BETTINESCHI C., DE GUIO A., COLOMBATTI G., DEOTTO G., TONINELLO L., ABOUDAN A., BETTANINI C., BENVENUTI P., DEBEI S., MENEGAZZI A., ZANOVELLO P., HORUS TEAM, cds, "Dalla terra al cielo e ritorno. Rotzo (VI): un caso di telerilevamento archeologico integrato", in *Archeologia Aerea* 10/ 16, Studi di Aerotopografia Archeologica.

MAIER B., TIEDE D., DORREN I., 2008, "Characterising mountain forest structure using landscape metrics on LiDAR-based canopy surface models", in Blaschke T., Lang S., Hay G.J. (Eds.), *Object Based Image Analysis*, pp. 625 - 644, Berlin, New York: Springer, Heidelberg.

MANETTI M., 2008, "Topologia", Springer ed., 289.

MARTELLO G.V., 1993, "Gli ambienti dell'Altopiano dei Sette Comuni: evoluzione recente e correlazione con le attività antropiche", *Acta Geologica*, Museo Tridentino di Scienze Naturali, 70, pp. 135-142.

MARTELLO P., 2014, "Sette volte bosco, sette volte prato", Vicenza, *Editrice Veneta sas*, pp. 197.

MARZATICO F., 2012, "La Cultura di Luco/Laugen, aggiornamenti e problemi aperti", in *Il castelliere di Castel de Pedena. Un sito di frontiera del II e I millennio a.C.*, a cura di ANGELINI A., LEONARDI G., Saltuarie dal Laboratorio del Piovego 9.

MARZOLI C., 1999, "Bressanone", in *Denkmalpflege in Südtirol Tutela dei Beni Culturali in Alto Adige*, Folio, Wien-Bozen, pp. 24-30.

MASTERS P., STICHELBAUT B., 2009, "From the air to beneath the soil - revealing and mapping great war trenches at Ploegsteert (Comines-Warneton)", in *Archaeological Prospection* 16 (4) Belgium, pp. 279-285.

MCKEE B., SEVER T., 1994, "Remote Sensing in the Arenal Region", in *Archaeology, Volcanism, and Remote Sensing in the Arenal Region, Costa Rica*, a cura di SHEETS P., MCKEE B., pp. 135-142, Austin.

MLEKUŽ D., KOŠIR U., ČREŠNAR M., 2016, "Landscapes of Death and Suffering: Archaeology of Conflict Landscapes of the Upper Soča Valley, Slovenia", in *Conflict Landscapes and Archaeology from above*, Stichelbaut B, Cowley D (eds), Farnham: Ashgate, pp.127-146.

MOLON F., 1880, "Archeologia preistorica: i sette comuni del Vicentino", in *Nuova Antologia fasc. XIX* (1 ottobre), pp. 471-472.

MUSSON C., PALMER R., CAMPANA S., 2005, "In volo nel passato. Aerofotografia e cartografia archeologica", All'insegna del Giglio s.a.s.

MYINT S.W., YUAN M., CERVENY R.S., GIRI C.P., 2008, "Comparison of remote sensing image processing techniques to identify tornado damage areas from landsat TM data", in *Sensors* 8 (2), pp. 1128 - 1156.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) COASTAL SERVICES CENTER, 2012, "Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications." Revised Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.

NAVON E.J., 1977, "Forest before trees: the precedence of global features in visual perception", in *Cognitive Psychology*, vol. 9, pp. 353-383.

NEBBIA M., 2012, "Elaborazione dati Lidar per lo studio dei paesaggi storici trentini. Progetto APSAT", tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova.

NICOLIS F., CIURLETTI G., DE GUIO A. (a cura di), 2011, "Archeologia della Grande Guerra: Atti del convegno internazionale 23/24.06.2006 Luserna, Trento", Soprintendenza per i Beni librari, archivistici e archeologici della Provincia autonoma di Trento.

NOVAK D., 2014, "Local Relief Model (LRM) Toolbox for ArcGIS", da Academia.edu.

NOVOTNY J.L., 2009, "Digging Deeper: Recent Publications on First World War Archaeology", *Journal of Conflict Archaeology* 5 (1), pp. 273-281.

OPITZ R.S., 2012, "An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology", in *Interpreting archaeological topography: airborne laser scanning, 3D data and ground observation* a cura di OPITZ R.S., COWLEY D.C., Oxford Books, Oxford, UK, pp. 13-31.

OSWALD A., SMITH L., HANDLEY C., 2008, "Introduction to surveys and survey techniques", in *Woodland Heritage Manual - A Guide to Investigating Woodland Landscapes*, a cura di ROTHERAM I.D., JONES M., SMITH L., HANDLEY C., Sheffield: Wildtrack, pp. 86-95.

PARCAK S.H., 2009, "Satellite Remote Sensing for Archaeology", Abingdon-on-Thames.

PARK N.W., CHI K.H., 2008, "Quantitative assessment of landslide susceptibility using high-resolution remote sensing data and a generalized additive model." *International Journal of Remote Sensing* 29 (1), pp. 247 - 264.

PARNIGOTTO I., 2000-2001, "Popolamento, sistemi insediativi e organizzazione del territorio nell'età del Bronzo in Alto Adige. Due casi di studio: la conca di Bressanone e la conca di Brunico – San Lorenzo", tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Padova.

PARNIGOTTO I., 2010, "Condizioni ambientali e popolamento nel secondo millennio a.C. in Alto Adige: gli esempi delle conche di Bressanone e Brunico", in *Abitati d'altura dell'età del Bronzo e del Ferro. Controllo delle vie di comunicazione attraverso le Alpi*, a cura di DAL RI L., GAMPER P., STEINER H., Temi Editrice, Trento, pp. 307-324.

PASSMORE D.G., HARRISON S., CAPPS TUNWELL D., 2014, "Second World War conflict archaeology in the forests of north-west Europe", *Antiquity* 88 (342), pp. 1275-1290.

PEARCE M., DE GUIO A., 1999, "Between the mountains and the plain: an integrated metal production and circulation system in later Bronze Age north-eastern Italy", in

Prehistoric Environment, society, and economy - Papers of the international colloquium PAESE '97 in Zurich, edited by Della Casa P., pp. 289-293. Bonn: Habelt.

PELLEGRINI A., 1915-1916, "La stazione preromana di Rotzo sull'altipiano dei Sette Comuni Vicentini", in *Atti del Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti* 75, Venezia 1915-1916, pp. 105-135.

PEÑA-BARRAGÁN J.M., NGUGI M.K., PLANT R.E., SIX J., 2011, "Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology", in *Remote Sensing of Environment* 115, pp. 1301-1316.

PFEIFER N., BRIESE C., 2007, "Geometrical aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning", *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* 26, Part 3/W52, pp. 113-119.

PAL, R., PAL, K., 1993, "A review on image segmentation techniques", in *Pattern Recognition* 26 (9), pp. 1277-1294.

PERONI R., 1963, "L'età del Bronzo media e recente tra l'Adige ed il Mincio", in *Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona* 11, pp. 49-104.

POLACCO L., FAVARETTO I., CALZAVARA CAPUIS L., 1968, "Ricerche e scavi in Alto Adige. Campagna 1967 (Relazione preliminare)", *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, Anno acc. 1968/69, T. CXXVII, Classe di Scienze morali, lettere ed arti, pp. 185-210.

POWERS R.P., HAY G.J., CHEN G., 2012, "How wetland type and area differ through scale: A GEOBIA case study in Alberta's Boreal Plains", in *Remote Sensing of Environment* 117, pp. 135-145.

POWESLAND D., 2006, "Redefining past landscapes: 30 years of remote sensing in the Vale of Pickering," in *From Space to Place: 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, a cura di CAMPANA S., FORTE M., Oxford: British Archaeology Reports.

PREGESBAUER M., TRINKS I., NEUBAUER W., 2014, "An object oriented approach to automatic classification of archaeological features in magnetic prospection data", in *Near Surface Geophysics* 12 (5), pp. 651-656. DOI: 10.3997/1873-0604.2014014.

QUINLAN J.R., 1986, "Induction of Decision Trees", in *Machine Learning*, 1, pp. 81-106.

RAMON E., 1994, "Le lame della comunità montana delle prealpi venete. Tradizioni, usi, destinazioni e finalità", in *Il flaminio* 7, Comunità Montana delle Prealpi Trevigiane editore.

RENFREW C., BAHN P., 2006, "Archeologia: teoria, metodi, pratiche", Zanichelli editore, Bologna.

RICH P.M., DUBAYAH R., HETRICK W.A., SAVING S.C., 1994, "Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology", in *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, pp. 524-529.

ROBERTSHAW A., KENYON D., 2008, "*Digging the Trenches: the archaeology of the Western Front*", Barnsley: Pen & Sword Military.

ROKACH L., MAIMON O., 2008, "Data Mining with Decision Trees. Theory and Applications", in *Machine Perception and Artificial Intelligence Volume 69*.

SALZANI L. (a cura di), 2005, "La necropoli dell'età del Bronzo dell'Olmo di Nogara" in *Memorie del Museo Civico di Storie Naturali di Verona*, Sommacampagna, CR Grafica.

SAUNDERS N., 2002, "Excavating memories: archaeology and the great war, 1914-2001", *Antiquity* 76, pp. 101-108.

SAUNDERS N., 2003, "*Trench Art: Materialities and Memories of War*", Oxford: Berg.

SAUNDERS N. (a cura di), 2012, "*Beyond the Dead Horizon: Studies in Modern Conflict Archaeology*", Oxford: Oxbow.

SAURO U., 1993, "Human impact on the Karst of the Venetian fore-Alps (Italy)", *Environmental Geology* 21, pp. 115-121.

SEVARA C., PREGESBAUER M., 2014, "Archaeological feature classification: an object oriented approach", *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics* 3 (2), pp. 139-143.

SEVARA C., PREGESBAUER M., DONEUS M., VERHOEVEN G., TRINKS I., 2016, "Pixel versus object — A comparison of strategies for the semi-automated mapping of archaeological features using airborne laser scanning data", *Journal of Archaeological Science, Reports* 5, pp. 485-498.

SIGNORATI R., 1968, "Carta archeologica foglio 63, quadrante IV, tavoletta di Bovolone – Sanguinetto – Nogara – Isola della Scala", Tesi di laurea, Università degli Studi di Padova.

SIMON, H.A., 1973, "The organization of complex systems", in *Hierarchy Theory: The Challenge of Complex Systems*, a cura di PATTEE, H.H., George Braziller, New York, Cambridge, pp. 1-27.

SINGH R., SINGH J., SHARMA P., SHARMA S., 2011, "Edge Based Region Growing", in *International Journal of Computer Technology and Applications*, Vol 2 (4), pp. 1122-1126.

STAL C.C., BURGEIOIS J., DE MAEYER P., DE MULDER G., DE WULF A., GOOSSENS R., NUTTENS T., STICHELBAUT B., 2010, "Kemmelberg (Belgium) case study: comparison of DTM analysis methods for the detection of relicts from the First World War", in *Proceeding of the 30th EARSeL Symposium 2010: Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage - Paris, France*, pp. 65 -72.

STEINER H., 2010, "Alpine Brandopferplätze - Roghi Votivi Alpini, zur Denkmalpflege in Südtirol - Beni culturali in Alto Adige Studi e ricerche", vol. 5, Trento: Tipografia Editrice Temi, pp. 907.

STICHELBAUT B., GHEYLE W., SAEY T., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., NOTEC N., VAN DEN BERGHE H., BOURGEOIS J., 2016, "The First World War from above and below. Historical aerial photographs and mine craters in the Ypres Salient", *Applied Geography* 66, pp. 64-72.

STULAR B., KOKALJ Z., OSTIR K., NUNINGER L., 2012, "Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features", in *Journal of Archaeological Science* 39, pp. 3354-3360.

TECCHIATI U., 1998a, "Sotciastel. Un abitato fortificato dell'età del bronzo in val Badia", *Ist. Ladin Micura de Ru*, pp. 401.

TECCHIATI U., 1998b, "Il castelliere Nössing: un insediamento d'altura dell'antica e media età del bronzo in Val d'Isarco (BZ)", Tesi di Dottorato di Ricerca in Archeologia, Consorzio Universitario di Pisa, Firenze e Siena.

TECCHIATI U., 2010, "Dinamiche insediative e gestione del territorio in Alto Adige tra la fine del III e la fine del I millennio a.C.", in *Abitati d'altura dell'età del Bronzo e del Ferro. Controllo delle vie di comunicazione attraverso le Alpi*, a cura di DAL RI L., GAMPER P., STEINER H., Temi Editrice, Trento, pp. 487-559.

TECCHIATI U., RIZZI G. 2014, «La "Casa delle botti e delle ruote": scavo di un edificio incendiato del V sec. a.C. nella piana di Rosslauf a Bressanone (BZ), in *Antichi Popoli delle Alpi: Sviluppi culturali durante l'età del Ferro nei territori alpini centro-orientali*», Atti della Giornata internazionale di Studi, 1 maggio 2010 (Sanzeno), pp. 73-103.

TIEDE D., LANG S., ALBRECHT F., HÖBLING D., 2010, "Object-based Class Modeling for Cadastre-constrained delineation of geo-objects", in *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 76, No. 2, pp. 193-202.

TOMMASINI A., 1923, "*Ricordi del tribunale di guerra a Trento, 1914-1918*", Trento: Arti grafiche Tridentum.

TRAVIGLIA A., COWLEY D., LAMBERS K., 2016, "Finding common ground: human and computer vision in archaeological prospection", in *AARGnews* 53, pp. 11-24.

TRIMBLE, 2011, "eCognition User Guide. Document version 8.7", Trimble Germany GmbH, Trappentreustr. 1, D-80339 München, Germany.

TRIMBLE, 2011, "eCognition Reference Book. Document version 8.7", Trimble Germany GmbH, Trappentreustr. 1, D-80339 München, Germany.

TRUSCOE K., 2006, "The Aggregate Landscape of Somerset: Predicting the Archaeological Resource: Interim Report for Aerial Survey Component, Eastern Mendip Block 1: ST 66 41 to ST 71 46 and Somerset Levels Block 2: ST 34 30 to ST 39 36", Unpublished Somerset County Council & English Heritage.

TRUSCOE K., 2008, "The Aggregate Landscape of Somerset: Predicting the Archaeological Resource: Archaeological Aerial Survey in the Central Mendip Hills", Unpublished Somerset County Council & English Heritage Report.

TUDHOPE D., LYKKE NIELSEN M., 2006, "Introduction to special issue: Knowledge Organization Systems and Services", *New Review of Hypermedia and Multimedia*, 12 (1), pp. 3-9.

VAN DE SANDE C.J., DE JONG S.M., DE ROO A.P.J., 2003, "A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4 (3), pp. 217 - 229.

VANLEUSEN M., KAMERMANS H., (eds.) 2005, "Predictive Modelling for Archaeological Heritage Management: a research agenda", Amersfoort, ROB, PlantijnCasparie Almere.

VERHAGEN P., 2007, "Case studies in Archaeology Predictive Modelling", Netherlands, Leiden University Press.

VERHAGEN P., KAMERMANS H., VAN LEUSEN M., DUCKE B., 2010, "New developments in archaeological predictive modelling", in *The Cultural Landscape & Heritage Paradox. Protection and Development of the Dutch Archaeological-Historical*

Landscape and its European Dimension, a cura di BLOEMERS T., KARS H., DER VAN VALK A., WIJNEN M., *Landscape & Heritage Studies* ed., pp. 431-444, Amsterdam: Amsterdam University Press .

VERHAGEN P., DRĂGUT L., 2012, "Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping", *Journal of Archaeological Science* 39, pp. 698-703.

VIEIRA M.A., FORMAGGIO A.R., RENNÓ C.D., ATZBERGER C., AGUIAR D.A., MELLO M.P., 2012 "Object Based Image Analysis and Data Mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas", *Remote Sensing of Environment* 123, pp. 553-562.

VON BERTALANFFY L., 1956, "General System Theory", in *General Systems (Yearbook of the Society for the Advancement of General Systems Theory)*, vol. 1, edited by Von Bertalanffy L. and Rapoport A., Ann Arbor MI: Society for General Systems Research, pp. 1-10.

WARREN R.E., ASCH D.L., 2000, "A Predictive Model of Archaeological Site Location in the Eastern Prairie Peninsula", in *Practical Applications of GIS for Archaeologists: A Predictive Modelling Kit*, a cura di WESTCOTT K.L., BRANDON R.J., London, Tayolor & Francis.

WEHR A., LOHR U., 1999, "Airborne laser scanning - an introduction and overview", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3), pp. 68-82.

WHEATLEY D., 2003, "Making Space for an Archaeology of Place, in «Internet Archaeology»", 15. http://intarch.ac.uk/journal/issue15/wheatley_index.htm

WHEATLEY D., GILLINGS M. 2002, "Spatial technology and archaeology: the archaeological applications of GIS", London, Taylor & Francis.

XUELIAN M., NATE C., KAIGUANG Z., 2010, "Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: a review of critical issues", *Remote Sensing* 2(3), pp. 833-860.

YOKOYAMA R., SIRASAWA M., PIKE R.J., 2002, "Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models", in *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 68, pp. 257-265.

YU Q., GONG P., CHINTON N., BIGING G., KELLY M., SCHIROKAUER D., 2006, "Object based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72 (7), pp. 799-811.

ZAKŠEK K., OŠTIR K., KOKALJ Z., 2011, "Sky-View Factor as a relief visualisation technique", *Remote Sensing* 3, pp. 398-415.

ZAMMATTEO P., 2005, "Luserna, le antiche strade di confine e il passo Lavarone", in *Luserna - la storia di un paesaggio alpino*, Atti del Convegno "Sul confine... Percorsi tra archeologia, etnoarcheologia e storia lungo i passi della montagna di Luserna", a cura di DE GUIO A., ZAMMATTEO P., Luserna, 28 dicembre 2002, S.A.R.G.O.N. Editrice e Libreria, Padova, pp. 21-42.

ZENG M. L., CHAN L.M., 2004, "Trends and issues in establishing interoperability among knowledge organization systems", *Journal for the American Society for Information Science and Technology*, 55 (5), pp. 377-395.

ZHOU Q., ZHU A-X., 2013, "The recent advancement in digital terrain analysis and modeling.", *International Journal of Geographical Information Science* 27 (7), pp. 1269-1271.

ZOLLMANN S., KALKOFEN D., HOPPE C., KLUNCKER S., BISCHOF H., REITMAYR G., 2012, "Interactive 4D Overview and Detail Visualization in Augmented Reality", *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp.167-176.

ZORZI F., 1960, "Preistoria veronese. Isediamenti e stirpi", in *Verona ed il suo territorio*, 1. Istituto per gli Studi Storici Veronesi, Verona, pp. 73-153.