Archeologia e Calcolatori
Supplemento 15, 2026, 199-215
doi 10.19282/ACS.15.2026.14

INDAGINI GEOFISICHE E LIDAR SUL TERRITORIO DI ROSELLE

1. Introduzione

L'area rosellana è stata interessata da molte ricerche sia in passato sia negli ultimi decenni; tra le iniziative recenti, il progetto "Emptyscapes" si distingue per la forte tensione metodologica e il carattere interdisciplinare ed è volto allo studio delle dinamiche insediative e dell'organizzazione del paesaggio (Campana 2017a, 2023). Il progetto nasce con l'obiettivo di stimolare un cambiamento nel modo in cui l'archeologia del paesaggio viene praticata in Italia, superando un approccio prevalentemente site-based a favore di una prospettiva realmente territoriale, capace di cogliere la continuità e la complessità dei processi insediativi nel lungo periodo. In questo quadro, "Emptyscapes" promuove l'adozione di nuovi paradigmi per l'analisi del paesaggio, fondati sull'integrazione tra metodologie e approcci multidisciplinari, inclusi studi ambientali, indagini geofisiche su larga scala e altre tecniche di telerilevamento. I risultati ottenuti fin dalle fasi iniziali del progetto hanno dimostrato come la ricostruzione dell'archaeological continuum costituisca un obiettivo realistico anche nelle specifiche condizioni ambientali e archeologiche del mondo mediterraneo, storicamente ritenute meno favorevoli rispetto ad altri contesti per la presenza di vegetazione persistente, morfologie complesse e strutture a basso rilievo (Campana 2018).

L'applicazione di tale approccio al territorio dell'antica *Rusellae* e del suo hinterland ha prodotto una quantità considerevole di dati archeologici, topografici e ambientali, che hanno contribuito in modo significativo alla ricostruzione diacronica del popolamento, dell'organizzazione del paesaggio e dell'ambiente. Tali risultati sono stati resi possibili grazie all'integrazione di metodologie di indagine differenziate, selezionate e adattate in funzione delle specifiche caratteristiche geomorfologiche, ambientali e di uso del suolo delle diverse aree indagate. In particolare, il territorio rosellano e grossetano è costituito in larga parte da aree agricole aperte, dove le ricognizioni di superficie si sono dimostrate particolarmente efficaci, consentendo una lettura articolata delle dinamiche insediative e produttive nel lungo periodo. Queste aree si sono prestate molto bene anche per l'integrazione di ricognizioni di superficie, fotografia aerea e magnetometria estensiva. Alle aree pianeggianti si affiancano tuttavia rilievi collinari che si sviluppano progressivamente verso l'interno; aree interessate da una copertura vegetazionale fitta e stratificata, caratterizzata sia da alberi ad alto fusto sia da una densa vegetazione arbustiva. In tali contesti, la visibilità archeologica risulta fortemente compromessa e le operazioni di ricognizione a terra diventano estremamente complesse, se

non del tutto impraticabili (Cirigliano 2023). Questa condizione rappresenta uno dei principali fattori di squilibrio conoscitivo nella ricostruzione dei paesaggi antichi, poiché ampie porzioni di territorio tendono a rimanere escluse dalle analisi sistematiche basate sulla ricognizione di superficie e la fotografia aerea, che mostrano limiti evidenti in presenza di una copertura vegetale persistente, sebbene, in alcune circostanze, i risultati possono essere anche molto positivi (Cosci 2005).

Negli ultimi anni, il quadro metodologico dell'archeologia basata su dati telerilevati è stato interessato da sviluppi che stanno incidendo in modo significativo sulle modalità di documentazione e interpretazione del paesaggio. Da un lato, si assiste a una diffusione sempre più ampia dell'impiego di sensori LiDAR (Light Detection And Ranging) montati su droni, che ha profondamente modificato le possibilità di acquisizione dei dati in ambito archeologico. Rispetto ai sistemi aerotrasportati tradizionali, le piattaforme a pilotaggio remoto consentono un'elevata flessibilità operativa e la raccolta di dataset caratterizzati da densità di punti nettamente superiori, rendendo accessibili porzioni di paesaggio fino a tempi recenti considerate difficilmente esplorabili. Ambienti complessi come i versanti collinari coperti da vegetazione arbustiva e sempreverdi, tipici di molte aree mediterranee, possono oggi essere analizzati con un livello di dettaglio tale da restituire micro-forme antropiche precedentemente invisibili.

Dall'altro lato, l'introduzione di tecniche di apprendimento automatico e deep learning applicate alla mappatura delle evidenze archeologiche ha aperto nuove prospettive per l'analisi di grandi volumi di dati, contribuendo a supportare e integrare il lavoro interpretativo dell'archeologo in contesti caratterizzati da una complessità informativa tale da rendere impraticabile una restituzione interamente manuale. Questi approcci non si configurano come strumenti sostitutivi dell'interpretazione archeologica, ma come metodi di supporto capaci di individuare pattern ricorrenti e di orientare in modo più efficiente le fasi di analisi e verifica. L'intersezione tra queste due traiettorie di sviluppo, analisi avanzata dei dati e acquisizione LiDAR ad altissima risoluzione, sta contribuendo a ridefinire i confini operativi dell'archeologia del paesaggio, ponendo nuove questioni metodologiche e interpretative. In questo contesto, il presente contributo si inserisce consapevolmente all'interno di tale evoluzione, adottando il drone-based LiDAR ad alta densità come strumento primario per l'esplorazione delle aree boscate del territorio rosellano. L'obiettivo non è quello di automatizzare il processo di scoperta archeologica, ma di costruire un workflow in grado di affrontare la complessità del record paesaggistico mediterraneo, mantenendo centrale il ruolo dell'interpretazione archeologica.

In questo quadro, Roselle rappresenta un caso di studio particolarmente significativo. La presenza congiunta di un centro urbano di lunga durata,

di un territorio articolato e di ampie porzioni di paesaggio oggi coperte da vegetazione consente di valutare in modo critico le potenzialità e i limiti delle nuove metodologie di indagine. Il presente studio si propone pertanto di esplorare le possibilità offerte dalle indagini geofisiche e dal LiDAR ad altissima risoluzione per ridurre il divario conoscitivo tra aree aperte e aree boscate, contribuendo a una lettura più continua e integrata delle dinamiche insediative e territoriali dell'*Ager Rusellanus*.

Alla luce di questo squilibrio conoscitivo, il presente lavoro si propone di verificare in che misura l'integrazione tra prospezioni magnetometriche estensive nelle aree agricole e rilievo UAV-LiDAR ad altissima densità nelle aree boscate. In particolare, l'obiettivo è ridurre il "knowledge bias" legato alla scarsa visibilità under-canopy attraverso un'acquisizione LiDAR a bassa quota e velocità controllata e un workflow di processing multi-livello basato su segmentazione semantica (deep learning), finalizzato alla separazione robusta tra ground e non-ground e alla produzione di modelli DTM/DFM (Digital Terrain Model/Digital Feature Model) ad alta leggibilità per l'analisi micro-topografica in ambiente GIS.

2. Contesto storico e storia degli studi

Tra i paesaggi dell'Etruria antica e della Toscana romana, pochi contesti offrono un palinsesto altrettanto denso, stratificato e archeologicamente leggibile quanto quello di *Rusellae* e del suo territorio, l'*Ager Rusellanus*. Collocata su un rilievo dominante la piana maremmana centrale, in posizione strategica rispetto all'antico bacino del *Lacus Prilis* e ai sistemi fluviali dell'Ombrone a S e del Bruna a N, Roselle occupa un punto di osservazione privilegiato dal quale è possibile cogliere, in una prospettiva di lunga durata, l'evoluzione dei processi insediativi, economici e ambientali che hanno interessato questo settore della costa tirrenica (Botarelli, Cavallo 2001; Bianchi 2022, 63-87). La storia della città risulta infatti inseparabile da quella del suo hinterland: reti rurali, infrastrutture di produzione e circolazione, trasformazioni ambientali e assetti politici concorrono a definire un sistema unitario, nel quale dinamiche urbane e territoriali si influenzano reciprocamente (Vaccaro 2011; Celuzza 2015; Celuzza *et al.* 2021). La ricostruzione storica di Roselle è il risultato di una tradizione di studi lunga oltre un secolo e mezzo, caratterizzata da fasi di intensa attività e da momenti di interruzione della ricerca.

Alle prime esplorazioni di carattere antiquario, avviate nella seconda metà del XIX secolo e documentate, tra l'altro, dagli atti della Società Colombaria di Firenze (Capei 1862), seguirono le grandi campagne di scavo promosse dalla Soprintendenza Archeologica della Toscana nel secondo dopoguerra, che tra gli anni Cinquanta e Ottanta del Novecento rivelarono in modo sistematico l'impianto urbano romano e le sue principali articolazioni

monumentali (Scavi Roselle 1950-1990). Parallelamente, studi numismatici, ricerche geomorfologiche e analisi ambientali contribuirono ad ampliare il quadro interpretativo, spostando progressivamente l'attenzione dal solo centro urbano all'intero territorio (Marinelli 1927; Mazzanti 1983; Luti *et al.* 2000; De Benetti, Catalli 2013). In tempi più recenti, l'introduzione di metodologie di telerilevamento e analisi LiDAR ha prodotto una vera e propria svolta nello studio del paesaggio rosellano, inserendo il sito nel più ampio dibattito sull'"archaeological continuum" e sulla necessità di superare una lettura esclusivamente site-based dei contesti mediterranei (Campana 2017b, 2018).

Dal punto di vista geografico, Roselle sorge su un rilievo di ca. 194 m s.l.m., appartenente al sistema collinare pliocenico che delimita verso l'interno la piana grossetana. I versanti settentrionali e orientali degradano progressivamente verso la valle dell'Ombrone, mentre il fronte occidentale si affaccia sulla depressione occupata in antico dal *Lacus Prilis*, un ambiente lagunare complesso e dinamico che ha profondamente condizionato la distribuzione degli insediamenti e le strategie economiche dell'area (Botarelli, Cavallo 2001; Celuzza 2013). Attivo almeno fino all'alto medioevo, il bacino offriva risorse diversificate – pesca, saline, approdi protetti, terreni alluvionali fertili – fungendo da polo di attrazione per le comunità locali. Il progressivo interramento della laguna, accelerato tra la tarda antichità e il pieno medioevo, determinò una profonda riorganizzazione delle attività produttive e delle reti di circolazione, con ricadute dirette sulla resilienza degli insediamenti costieri e interni (Ceccarelli Lemut 1994; Bianchi 2022).

Le origini urbane di Roselle si collocano verosimilmente tra il VII e il VI sec. a.C., quando la città etrusca si strutturò come centro fortificato in grado di controllare i collegamenti tra la costa, le Colline Metallifere e l'Etruria settentrionale interna (Mazzolai 1960). Le prime cinte murarie, le evidenze ceramiche e gli allineamenti urbani individuati sotto le strutture romane attestano l'esistenza di una comunità già pienamente organizzata, fondata su una posizione topografica strategica e sull'accesso al sistema lagunare (Bianchi 2022, 63-87). La conquista romana del 294 a.C. segnò l'inizio di una nuova fase, culminata nella monumentalizzazione della città tra la tarda repubblica e l'età imperiale. Le indagini archeologiche hanno restituito i vari edifici e infrastrutture che compongono il foro: la basilica, i portici, le terme, l'anfiteatro e un impianto viario regolare, definendo un assetto urbano coerente e articolato (Scavi Roselle 1950-1990; Nicosia, Poggesi 1998). Analisi stratigrafiche e studi architettonici hanno ulteriormente affinato la cronologia di questi interventi, individuando fasi costruttive successive fino alla tarda antichità (Celuzza 2015; Chirico, Citter 2018; Celuzza *et al.* 2021).

In età imperiale Roselle partecipò attivamente ai circuiti economici regionali e mediterranei, come dimostrato dalla documentazione numismatica,

che attesta una circolazione monetaria significativa almeno fino al III sec. d.C. (De Benetti, Catalli 2013). A partire dalla tarda antichità si osservano fenomeni di contrazione degli spazi abitati, riuso delle strutture pubbliche e progressivi fenomeni di trasformazione del tessuto urbano in senso ecclesiastico. La diffusione di edifici di culto e l'istituzione della sede vescovile nel V sec. d.C. indicano una trasformazione funzionale della città, più che un abbandono immediato (Ronzani 1996). Tuttavia, l'aggravarsi delle condizioni ambientali, il degrado del sistema lagunare e il mutamento degli equilibri politici contribuirono, tra VII e IX secolo, a indebolire il ruolo di Roselle, favorendo l'emergere di nuovi poli insediativi nella pianura, in particolare Grosseto (Ceccarelli Lemut 1994; Farinelli, Francovich 2000).

Il territorio rosellano rappresentò il vero motore della vitalità di lungo periodo della città. Indagini di superficie e studi territoriali condotti dalla fine del XX secolo hanno documentato un paesaggio rurale sorprendentemente denso, articolato in fattorie, *villae*, strutture produttive e sistemi agrari adattati alle variazioni ambientali (Luti *et al.* 2000; Vaccaro 2011). L'area dell'ex Lago Prile, soggetta a continui processi di sedimentazione, costituì una frontiera ecologica instabile, influenzando la localizzazione degli insediamenti e le strategie di sfruttamento delle risorse (Mazzanti 1983; Botarelli, Cavallo 2001). In età medievale, la riorganizzazione del territorio intorno a nuclei fortificati ed enti ecclesiastici, testimoniata dalla diffusione delle *plebes*, segnò una nuova fase di controllo e gestione del paesaggio (Ceccarelli Lemut 1994; Ronzani 1996).

La storia moderna della ricerca riflette questa complessità. Dalle prime osservazioni antiquarie alle grandi campagne di scavo del secondo Novecento, fino alle più recenti indagini territoriali e ai progetti basati su GIS e LiDAR, Roselle si è progressivamente affermata come laboratorio privilegiato per lo studio dei paesaggi mediterranei (Celuzza 2013; Campana 2017a; Chirico, Citter 2018). L'introduzione di modelli digitali ad alta risoluzione ha permesso di individuare micro-forme antropiche – terrazzamenti, viabilità incassata, paleoalvei, sistemi agrari – difficilmente riconoscibili con metodologie tradizionali, contribuendo a ridefinire il rapporto tra città, territorio e ambiente. Nonostante i progressi, permangono tuttavia lacune significative. L'integrazione tra dati urbani e territoriali resta parziale, così come la correlazione puntuale tra sequenze archeologiche e dinamiche ambientali di lungo periodo. Ampie porzioni del territorio, soprattutto in aree boscate e marginali, non sono state ancora oggetto di una verifica sistematica sul terreno, mentre una parte consistente della documentazione di scavo del Novecento rimane inedita. In questo senso, Roselle continua a rappresentare non solo un sito archeologico di primaria importanza, ma anche un banco di prova per approcci metodologici integrati, nei quali l'analisi storica, archeologica e

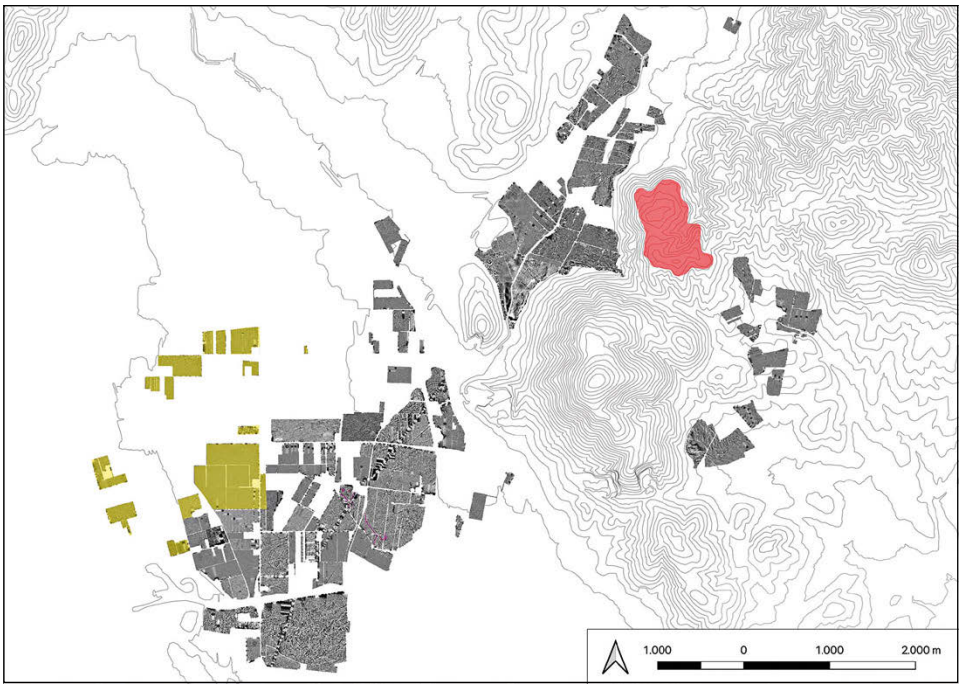


Fig. 1 – In giallo, le aree rilevate con il sistema magnetico forster ferex a quattro sensori.

geospaziale concorre alla costruzione di una lettura più equilibrata e continua del paesaggio antico (Campana 2018).

3. Indagini magnetiche

Il progetto GreatT ha permesso di proseguire le indagini magnetiche che si estendevano prima dell'inizio di questo progetto su ca. 1000 ettari. L'obiettivo originario è sempre stato quello di acquisire un campione continuo riducendo il più possibile gli spazi vuoti con l'obiettivo di analizzare il paesaggio evitando ogni forma di discontinuità. Purtroppo, non sempre le aree di nostro interesse sono state disponibili e quindi ci siamo concentrati nell'area sudoccidentale del campione territoriale (Fig. 1). Le campagne di rilevamento delle misure hanno permesso l'acquisizione complessivamente di ca. 70 ettari. Il processing dei dati è stato completato, mentre le attività di interpretazione sono ancora in corso. I risultati iniziali mostrano una sostanziale continuità delle tipologie di evidenze già individuate nelle aree contermini; in particolare emerge con chiarezza e in continuità il sistema agrario di età romana, di elementi infrastrutturali e la presenza di aree insediative.

4. Acquisizione dei dati e metodologia di processing

Lo studio delle aree boscate e a fitta copertura vegetale del territorio rosellano ha richiesto l'adozione di una strategia di acquisizione e analisi dei dati specificamente progettata per l'archeologia under-canopy in ambiente mediterraneo. Come evidenziato in recenti contributi metodologici, la combinazione tra rilievo LiDAR ad altissima risoluzione da piattaforma UAV e workflow di processing strutturati su più livelli rappresenta attualmente una delle soluzioni più efficaci per superare i limiti imposti dalla vegetazione persistente e dalla ridotta visibilità archeologica a terra, consentendo l'individuazione di microrilievi di origine antropica difficilmente intercettabili mediante metodologie tradizionali (Campana 2017b; Mazzacca *et al.* 2022; Cirigliano *et al.* 2025).

L'acquisizione dei dati è stata effettuata mediante piattaforma UAV multirotore, configurata per missioni a bassa quota e velocità controllata, con l'obiettivo di massimizzare la densità di campionamento e aumentare la probabilità di intercettazione del suolo al di sotto della copertura vegetale. Il sensore LiDAR impiegato è un RIEGL mini VUX-3, un sistema ad alta frequenza di emissione, progettato specificamente per applicazioni di rilievo ad alta precisione, in grado di registrare multiple eco per ciascun impulso laser, caratteristica fondamentale per il campionamento efficace del terreno in contesti forestali complessi. Le missioni di volo sono state pianificate con un'altezza operativa media costante di 60 m dal suolo, velocità di crociera compresa tra 4 e 6 m/s e valori di sovrapposizione longitudinale e trasversale superiori al 70%. Questa configurazione è stata adottata al fine di garantire una copertura omogenea dell'area di studio e di ridurre gli effetti delle zone d'ombra generate dalla morfologia del rilievo e dalla struttura tridimensionale della vegetazione. La pianificazione delle strisciate di volo ha tenuto conto sia dell'andamento topografico sia della distribuzione delle principali tipologie di copertura del suolo, con particolare attenzione ai settori caratterizzati da bosco fitto e macchia mediterranea. L'area coperta dal rilievo ha interessato una superficie di 550 ettari in continuità comprendendo anche la città di Roselle e le colline circostanti come quella di Moscona (Fig. 2).

Il dataset risultante presenta una densità media complessiva superiore a 700-800 punti/m², con valori localmente più elevati in corrispondenza delle aree di maggiore sovrapposizione delle strisciate di volo. Anche dopo le fasi di filtraggio e classificazione, la densità dei punti attribuiti alla classe ground si mantiene su livelli particolarmente elevati per contesti forestali mediterranei, consentendo la generazione di modelli digitali del terreno (DTM) con risoluzioni metriche e sub-metriche adeguate alla lettura archeologica di dettaglio e all'individuazione di micro-forme antropiche. Per la produzione dei raster dei modelli digitali del terreno utilizzati per l'analisi del microrilievo, i dati



Fig. 2 – Area complessiva dei 550 ha di acquisizione LiDAR da drone ad alta risoluzione. In particolare questa immagine è il risultato di un'analisi di visualizzazione chiamato Sky view factor ottenuto in ambiente GIS.

acquisiti sono stati preliminarmente sottoposti a un processo di segmentazione semantica della nuvola di punti, finalizzato alla suddivisione delle osservazioni in tre classi principali: terreno, strutture e vegetazione. Il processing è stato condotto seguendo una pipeline sostanzialmente analoga a quella presentata in una precedente pubblicazione (Mazzacca *et al.* 2022; Cirigliano *et al.* 2025), con alcune modifiche introdotte in relazione agli sviluppi metodologici più recenti e agli obiettivi specifici del presente studio.

L'approccio adottato si fonda su una procedura multilivello (Teruggi *et al.* 2020), articolata in due successivi processi di segmentazione semantica binaria, finalizzati rispettivamente alla mappatura della classe ground e all'individuazione delle strutture archeologiche sopra il piano di campagna (Fig. 3). Poiché l'obiettivo principale di questo lavoro è lo studio del microrilievo, l'attenzione è stata rivolta in primo luogo all'individuazione accurata della superficie del terreno. Diversamente rispetto a quanto proposto in precedenti applicazioni (Mazzacca *et al.* 2022), la classificazione è stata quindi inizialmente orientata alla separazione tra punti ground e non-ground,

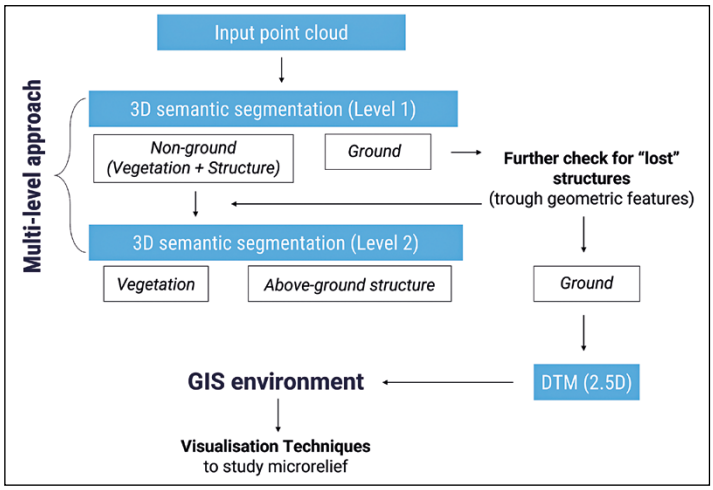


Fig. 3 – Rappresentazione schematica del workflow utilizzato per il processing dei dati LiDAR.

rimandando a una fase successiva la distinzione tra strutture e vegetazione. Questa scelta metodologica è stata finalizzata alla generazione di un DTM quanto più possibile preciso, accurato e caratterizzato da un basso livello di rumore, condizione indispensabile per ottenere raster DTM leggibili e funzionali alle fasi successive dell'analisi. L'obiettivo finale della pipeline rimane tuttavia la produzione di un Digital Feature Model (DFM) ad alta risoluzione, inteso come un'estensione del DTM capace di includere anche elementi archeologici sopra il piano di campagna (Štular *et al.* 2021). In questa prospettiva, due porzioni del dataset contenenti strutture archeologiche note sono state selezionate come aree di test, al fine di valutare le capacità dell'algoritmo nel riconoscimento delle evidenze archeologiche emergenti. Un'ulteriore differenza riguarda l'impiego di una tecnica di deep learning per la segmentazione semantica, in luogo di un approccio basato su metodi di machine learning tradizionali.

In particolare, è stata utilizzata un'implementazione interna dell'architettura Point-Transformer (Zhao *et al.* 2021). Per l'addestramento dell'algoritmo sono stati impiegati dati selezionati manualmente provenienti da una porzione del sito archeologico di *Rusellae*, caratterizzata da una copertura vegetazionale mediterranea esemplificativa. I dati evidenziati e selezionati manualmente nelle varie classi sono stati quindi utilizzati per addestrare la rete neurale alla suddivisione automatica delle nuvole di punti acquisite in classi semantiche. In continuità con quanto già proposto in precedenti lavori (Mazzacca *et al.* 2022), le classi sono state integrate con caratteristiche

derivate dal sensore e con descrittori geometrici calcolati a differenti raggi di analisi (Weinmann *et al.* 2015), al fine di favorire la convergenza della rete verso risultati più accurati. Al termine del primo livello di classificazione, i raster DTM sono stati generati a partire dalle nuvole di punti classificate come ground, mentre le nuvole di punti non-ground sono state trasmesse al secondo stadio della procedura di classificazione, finalizzato alla distinzione tra strutture sopra il piano di campagna e vegetazione. Il primo livello della pipeline è stato eseguito a una risoluzione inferiore rispetto a quella della nuvola di punti grezza, mediante un subsampling dei dati a 0,2 m. Inoltre, l'intero dataset è stato suddiviso in tile e processato in modo incrementale in entrambe le fasi del workflow di segmentazione. Tale scelta è stata dettata dalle dimensioni complessive del dataset, che altrimenti avrebbero richiesto tempi di elaborazione eccessivamente lunghi.

La natura fortemente compute-intensive delle metodologie di deep learning impone infatti una valutazione attenta delle risorse hardware necessarie per l'applicazione efficace di questi approcci. Sono stati condotti test preliminari per individuare il livello di subsampling più appropriato. In particolare, il primo livello della pipeline è stato testato su porzioni selezionate del dataset a risoluzioni di 0,1 m, 0,2 m e 0,5 m. I risultati hanno mostrato come il DTM più chiaro e leggibile fosse ottenuto elaborando i dati a 0,2 m e successivamente riproiettando i risultati sulla nuvola di punti originale, prima di generare i raster DTM a partire dai punti classificati come ground mediante interpolazione kriging con passo di 0,3 m. Il secondo livello della classificazione è stato invece eseguito a una risoluzione più elevata (0,1 m), al fine di migliorare la discriminazione tra strutture sopra il piano di campagna e vegetazione, riconoscendo come quest'ultima sia caratterizzata da valori elevati del descrittore di anisotropia quando calcolato a raggi molto ridotti. I raster DTM ottenuti dall'interpolazione dei punti ground sono stati quindi importati in ambiente GIS per le successive analisi archeologiche, condotte mediante diverse tecniche di visualizzazione. I risultati del secondo livello di classificazione sono stati valutati attraverso un'analisi visiva e comparativa.

Durante la prima fase del processo, la rete è risultata in grado di distinguere con successo la classe ground dalla classe non-ground, superando in larga misura le difficoltà specifiche del contesto Roselle-Moscona, quali la presenza di strutture archeologiche a basso rilievo e di una copertura arbustiva estesa. Tuttavia, la vegetazione bassa particolarmente densa non consente in alcune aree la penetrazione dell'impulso laser fino al suolo, determinando la presenza di lacune nel campionamento del terreno. Inoltre, la copertura arbustiva rende talvolta complessa la distinzione tra punti ground e non-ground in prossimità della superficie, generando rumore diffuso. Nonostante ciò, le metriche calcolate sul dataset di valutazione al termine

della fase di addestramento mostrano un elevato livello di accuratezza, e la nuvola di punti ground risultante evidenzia una sensibile riduzione del rumore rispetto a precedenti applicazioni, producendo un DTM complessivamente più pulito.

La fase di mappatura delle strutture sopra il piano di campagna presenta ulteriori criticità, legate sia alle differenze intrinseche tra le strutture archeologiche in termini di funzione, dimensione e cronologia, sia alla limitata disponibilità di dati di addestramento rappresentativi di tutte le tipologie strutturali considerate. Per questa ragione, i risultati di questa fase sono stati valutati principalmente attraverso un'ispezione visiva *in situ*. Come già evidenziato, la possibile presenza di strutture significativamente diverse da quelle utilizzate per l'addestramento dell'algoritmo rende le metriche calcolate sul dataset di valutazione insufficienti, da sole, per una valutazione completa dell'accuratezza dei risultati, rendendo necessaria la verifica mediante ricognizione sul terreno. Il modello si è dimostrato comunque efficace nell'individuazione di strutture archeologiche sopraelevate, in particolare complessi di grandi dimensioni (Fig. 4), pur mostrando la presenza di un numero significativo di falsi positivi, che si traducono in rumore diffuso nel paesaggio.

5. Risultati

Sebbene il progetto di ricerca nel suo complesso integri indagini magnetometriche estensive nelle aree agricole e rilievo LiDAR nelle aree boscate, il presente contributo si concentra in particolare sull'applicazione del drone-based LiDAR ad altissima risoluzione e sul relativo workflow di processing, quale strumento privilegiato per affrontare il problema della visibilità archeologica under-canopy nel contesto rosellano. L'analisi dei dati LiDAR ad altissima risoluzione applicata al settore di Roselle-Moscona ha prodotto un avanzamento sostanziale nella conoscenza del paesaggio archeologico locale, modificando in modo profondo il quadro restituito dalle ricerche precedenti. Il confronto diretto tra la cartografia archeologica preesistente e i risultati del rilievo LiDAR evidenzia come vaste porzioni del territorio, in particolare quelle caratterizzate da copertura forestale continua, apparissero fino a oggi quasi del tutto prive di evidenze, nonostante la loro prossimità al centro urbano e la loro posizione strategica nel sistema territoriale dell'*Ager Rusellanus*.

L'acquisizione e l'analisi del modello digitale del terreno hanno invece rivelato un paesaggio intensamente strutturato, nel quale le tracce antropiche si distribuiscono in modo continuo e articolato lungo i versanti collinari, le aree di raccordo tra collina e fondovalle e i principali corridoi di mobilità. Il risultato più evidente è la netta discrepanza tra l'immagine di un territorio



Fig. 4 – L'immagine mostra le aree di necropoli durante la verifica a terra. Nella parte sinistra (a) si vede l'interno delle tombe ipogee, caratterizzate da ambienti ad un'unica stanza alti circa 1 m e profonde fino a 3 m. Nella parte destra (b), invece, vediamo come esse si presentano esternamente. È possibile notare come queste siano completamente ricoperte dalla vegetazione.

marginale, restituita dai dati tradizionali, e quella di un paesaggio produttivo, infrastrutturato e sfruttato su lunga durata, che emerge dall'analisi LiDAR.

Uno degli elementi più ricorrenti è rappresentato dai sistemi di terrazzamento, distribuiti con particolare densità sui versanti meridionali e occidentali di Roselle e nei settori collinari di Moscona. Questi terrazzamenti, spesso conservati per pochi corsi di pietre o come lievi rotture di pendenza, risultano difficilmente identificabili durante la ricognizione a terra, ma diventano chiaramente leggibili nei modelli LiDAR ad alta risoluzione. La loro estensione e continuità suggeriscono un investimento consistente nella trasformazione agraria del paesaggio, incompatibile con forme di sfruttamento episodico o marginale. Al contrario, tali strutture rimandano a pratiche agricole organizzate, probabilmente legate alla coltivazione specializzata e alla gestione sistematica delle superfici collinari in età etrusca, romana e post-antica.

Particolarmente rilevante è l'emersione di aree funerarie estese e articolate, caratterizzate da strutture ipogee scavate nella roccia, spesso invisibili in superficie e individuabili quasi esclusivamente attraverso le anomalie micro-topografiche del terreno (Fig. 4). La distribuzione spaziale di queste tombe, soprattutto sui versanti occidentali e meridionali della collina di

Roselle, indica l'esistenza di necropoli ben strutturate, il cui sviluppo appare strettamente connesso al legame con la città e all'organizzazione del territorio extraurbano. Anche in questo caso, il LiDAR consente di superare la frammentarietà delle evidenze note, restituendo una visione di insieme che sarebbe irraggiungibile attraverso osservazioni puntuali.

L'analisi dei risultati mostra inoltre come il paesaggio boscato non sia caratterizzato esclusivamente da strutture di età classica, ma conservi tracce di attività distribuite su un ampio arco cronologico, inclusi interventi legati allo sfruttamento forestale e produttivo in età medievale e post-medievale, quali piattaforme di carbonizzazione, strutture per la produzione della calce e sistemazioni idrauliche minori. Questi elementi, pur spesso difficili da datare in modo preciso, contribuiscono a delineare un quadro di continuità d'uso del territorio, nel quale le trasformazioni ambientali e le dinamiche socioeconomiche si riflettono direttamente nella morfologia del suolo. Un aspetto cruciale dei risultati riguarda il rapporto tra dato LiDAR e verifica sul terreno. Nei settori in cui è stato possibile effettuare controlli diretti, le evidenze morfologiche individuate nel DTM hanno trovato conferma nella presenza di strutture, allineamenti murari, superfici lavorate o materiali archeologici, rafforzando l'affidabilità interpretativa del rilievo.

Tuttavia, l'assenza di riscontri materiali in alcune aree non è stata interpretata come indicativa di un errore di identificazione, bensì come il riflesso delle condizioni ambientali: copertura vegetale fitta, accumuli colluviali e scarsa mobilità superficiale dei depositi. In questo senso, il risultato metodologico più rilevante è la dimostrazione che, in contesti forestali mediterranei, l'assenza di materiali in superficie non equivale all'assenza di strutture o di occupazione.

I risultati complessivi consentono quindi di proporre una rilettura radicale del paesaggio rosellano, nella quale le aree boscate cessano di essere considerate vuoti conoscitivi e diventano componenti centrali dell'organizzazione territoriale. Il LiDAR non si limita ad aggiungere nuove evidenze puntuali, ma ridefinisce le relazioni spaziali tra città, necropoli, aree produttive e infrastrutture, rendendo visibile quella continuità archeologica del paesaggio che le metodologie tradizionali faticano a cogliere.

In definitiva, i risultati dimostrano come l'applicazione del drone-based LiDAR ad alta densità consenta non solo di incrementare quantitativamente il numero di evidenze note, ma soprattutto di trasformare qualitativamente la lettura del territorio, offrendo una base solida per interpretazioni di lungo periodo sulle dinamiche insediative, economiche e ambientali del comprensorio di Roselle. Queste acquisizioni costituiscono il fondamento per la sintesi interpretativa proposta nelle conclusioni, in cui il caso rosellano viene inquadrato nel più ampio dibattito sull'archeologia dei paesaggi forestali mediterranei.

6. Conclusioni

Il caso di studio di Roselle e del suo territorio dimostra in modo chiaro come l'integrazione tra rilievo LiDAR ad altissima risoluzione e approcci di analisi orientati al paesaggio consenta di superare limiti conoscitivi strutturali che hanno a lungo condizionato l'archeologia delle aree boscate mediterranee. In un contesto caratterizzato da una copertura vegetale densa e persistente, il drone-based LiDAR si conferma non soltanto come uno strumento di supporto alle indagini tradizionali, ma come un vero e proprio cambio di paradigma nella lettura e interpretazione del territorio. I risultati presentati mostrano come le aree collinari e forestali attorno a Roselle, tradizionalmente percepite come marginali o scarsamente informative, conservino in realtà una straordinaria ricchezza di tracce antropiche, riconducibili a pratiche agricole, infrastrutturali e funerarie sviluppatesi su una lunga durata. Terrazzamenti, reti di mobilità, strutture a basso rilievo e sistemi di gestione delle risorse emergono come componenti fondamentali di un paesaggio fortemente strutturato, la cui invisibilità è dovuta più a limiti metodologici che a una reale assenza di occupazione.

In questo senso, il LiDAR non incrementa semplicemente il numero delle evidenze note, ma consente di ricostruire relazioni spaziali e funzionali che ridefiniscono il rapporto tra città, territorio e ambiente. Dal punto di vista metodologico, il lavoro conferma la validità di un approccio multi-livello, nel quale l'acquisizione UAV-LiDAR ad alta densità, la classificazione adattiva della nuvola di punti e l'analisi morfologica avanzata costituiscono fasi strettamente interconnesse. In contesti forestali mediterranei, caratterizzati da microrilievi estremamente ridotti e da una forte complessità geomorfologica, la qualità del dato e la calibrazione dei parametri di acquisizione e di processing risultano determinanti per evitare sia la perdita di informazioni archeologiche sia la sovra-interpretazione delle forme naturali. L'esperienza di Roselle evidenzia inoltre come il controllo critico e iterativo del dato sia indispensabile per trasformare il rilievo LiDAR da prodotto tecnico a strumento interpretativo. Un contributo rilevante di questo studio riguarda la conferma empirica del concetto di continuità archeologica del paesaggio. Le evidenze individuate non si organizzano in insiemi discreti e isolati, ma si distribuiscono lungo gradienti spaziali che riflettono processi di uso, riuso e trasformazione del territorio nel tempo.

Questa prospettiva consente di superare una visione frammentaria del record archeologico e di affrontare in modo più efficace le dinamiche di lunga durata che caratterizzano il paesaggio mediterraneo, dove la persistenza delle strutture e la sovrapposizione delle fasi costituiscono la norma piuttosto che l'eccezione. Allo stesso tempo, il caso rosellano mette in evidenza alcuni limiti e criticità. Il dato LiDAR, per quanto potente, non è autosufficiente: la validazione interpretativa delle evidenze richiede un confronto costante con

dati archeologici, storici e ambientali, nonché verifiche sul terreno mirate e selettive. Inoltre, la difficoltà di attribuire una cronologia precisa a molte delle strutture individuate impone un uso prudente delle interpretazioni, privilegiando letture di tipo funzionale e spaziale rispetto a datazioni puntuali non supportate da evidenze stratigrafiche o materiali. Nonostante tali limiti, l'approccio adottato apre prospettive significative per la ricerca futura. La possibilità di estendere metodologie analoghe ad altri settori dell'*Ager Rusellanus* e, più in generale, ad altri contesti mediterranei caratterizzati da condizioni ambientali simili, suggerisce un elevato potenziale di replicabilità e scalabilità. In questo senso, Roselle si configura come un laboratorio privilegiato per lo sviluppo di protocolli metodologici applicabili allo studio delle aree forestali, contribuendo a ridurre lo squilibrio conoscitivo tra paesaggi aperti e paesaggi coperti da vegetazione.

In conclusione, il presente contributo dimostra come l'integrazione tra drone-based LiDAR ad alta risoluzione e archeologia del paesaggio consenta di accedere a una dimensione del record archeologico finora largamente sottovalutata. Attraverso una lettura continua e territoriale delle evidenze, Roselle emerge non solo come un sito di grande rilevanza storica, ma come un caso emblematico per ripensare criticamente strumenti, scale e obiettivi dell'archeologia mediterranea contemporanea.

Giuseppe Prospero Cirigliano
Scuola IMT, Alti Studi Lucca
giuseppe.cirigliano@imtlucca.it

Gabriele Mazzacca, Fabio Remondino
3D Optical Metrology Unit, Bruno Kessler Foundation (FBK), Trento
gmazzacca@fbk.eu, remondino@fbk.eu

Ken Saito, Stefano Campana
Laboratory of Landscape Archaeology and Remote Sensing (LAP&T)
Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali, Università degli Studi di Siena
ppdm@hotmail.co.jp, stefano.campana@unisi.it

BIBLIOGRAFIA

Bianchi G. 2022, *Archeologia dei beni pubblici. Alle origini della crescita economica in una regione mediterranea (secc. IX-XI)*, Firenze, All'Insegna del Giglio.

Botarelli L., Cavallo C. 2001, *Assetto geomorfologico e dinamiche ambientali della piana grossetana*, in *Roselle e il suo territorio*, Firenze, Edizioni Regione Toscana, 35-63.

Campana S. 2017a, *Emptyscapes: Filling an "empty" Mediterranean landscape at Rusellae, Italy*, «Antiquity», 91, 359, 1223-1240 (https://doi.org/10.15184/aqy.2017.139).

Campana S. 2017b, *Drones in archaeology: State-of-the-art and future perspectives*, «Archaeological Prospection», 24, 4, 275-296 (https://doi.org/10.1002/arp.1569).

Campana S. 2018, *Mapping the Archaeological Continuum. Filling "Empty" Mediterranean Landscapes*, Cham, Springer.

Campana S. 2023, *Infrastructures, water management, settlements, agricultural and funerary landscapes in the Ager Rusellanus in the longue durée: A work in progress*, in R. Rao, A. Sebastiani (eds.), *Archaeological Landscapes of Late Antique and Early Medieval Tuscia*, Brepols, Turnhout, 39-55 (https://doi.org/10.1484/M.MEDITO-EB.5.133992).

Capei P. 1862, *Bullettino degli scavi della Società Colombaria n. V e VI*, «Archivio Storico Italiano», n.s. 16, 1, 70-85.

Ceccarelli Lemut M.L. 1994, *La Maremma tra tarda antichità e alto medioevo*, in R. Francovich, G. Noyé (eds.), *La storia dell'alto medioevo italiano (VI-X secolo)*, Firenze, All'insegna del Giglio, 233-258.

Celuzza M. 2013, *Il territorio di Roselle*, in M. De Benetti, F. Catalli (eds.), *Roselle. Le monete dagli scavi archeologici (1957-1991) e dal territorio*, Arcidosso, Effigi, 256-259.

Celuzza M. 2015, *Roselle romana e tardoantica*, in M. Celuzza (ed.), *Roselle. Storia e monumenti*, Arcidosso, Effigi, 85-112.

Celuzza M., Milletti M., Zifferero A. 2021, *Rusellae and its territory. From the Etruscan to the Roman city*, in A. Sebastiani, C. Megale (eds.), *Archaeological Landscapes of Roman Etruria. Research and Field Papers*, Brepols, Turnhout, 79-92 (https://doi.org/10.1484/M.MEDITO-EB.5.121516).

Chirico E., Citter C. 2018, *I beni pubblici e della corona dall'Impero romano ai Longobardi: il caso di Roselle (Grosseto)*, in C. Giostra (ed.), *Città e campagna. Culture, insediamenti, economia (secc. VI-IX)*, Mantova, Società Archeologica Padana, 97-120.

Cirigliano G.P. 2023, *Il rapporto tra uomo e territorio: il caso di Moscona e Mosconcina nel basso medioevo (Grosseto)*, in F. Carbotti, D. Gangale Risoleo, E. Iacopini, F. Pizzimenti, I. Raimondo (eds.), *Landscape 3. Uomo e ambiente nel mondo antico*, Oxford, Archaeopress, 72-77.

Cirigliano G.P., Mazzacca G., Remondino F., Liverani P., Cantoro G., Maschner H., Campana S. 2025, *Drone-based high-resolution LiDAR for under-canopy archaeology in Mediterranean environments: The Rusellae case study (Italy)*, «Archaeological Prospection», 32, 3, 644-655 (https://doi.org/10.1002/arp.1980).

Cosci M. 2005, *Ricerca aerea e archeologia in Toscana*, in C. Musson, R. Palmer, S. Campana (eds.), *Flights into the Past. Aerial Photography, Photo Interpretation and Mapping for Archaeology*, Aerial Archaeology Research Group, 398-414.

De Benetti M., Catalli F. (eds.) 2013, *Roselle. Le monete dagli scavi archeologici (1957-1991) e dal territorio*, Arcidosso, Effigi.

Farinelli R., Francovich R. (eds.) 2000, *Guida alla Maremma medievale. Itinerari di archeologia nella provincia di Grosseto*, Siena, Nuova Immagine Editrice.

Luti F., Farinelli R., Vaccaro E. 2000, *Dinamiche insediative e sfruttamento del territorio nella Maremma grossetana*, «Archeologia Medievale», 27, 87-126.

Marinelli O. 1927, *La Maremma grossetana. Saggio di geografia fisica*, «Bollettino della Società Geografica Italiana», 64, 1-56.

Mazzacca G., Grilli E., Cirigliano G.P., Remondino F., Campana S. 2022, *Seeing among foliage with LiDAR and machine learning: Towards a transferable archaeological pipeline*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 46-2/W1, 365-372.

Mazzanti R. 1983, *Evoluzione geomorfologica e ambientale della pianura grossetana*, «Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria», 6, 45-62.

Mazzolai A. 1960, *Roselle e il suo territorio. Ricerche e documenti*, Grosseto, Tipografia Stem.

Nicosia M., Poggesi R. (eds.) 1998, *Roselle*, Siena, Nuova Immagine Editrice.

Ronzani M. 1996, *Le diocesi toscane tra tarda antichità e alto medioevo*, Pisa, ETS.

Scavi Roselle 1950-1990, *Relazioni di scavo della Soprintendenza Archeologica della Toscana*, Firenze.

Štular B., Lozić E., Eichert S. 2021, *Airborne LiDAR-derived digital elevation model for archaeology*, «Remote Sensing», 13, 9, 1855 (https://doi.org/10.3390/rs13091855).

Teruggi S., Grilli E., Russo M., Fassi F., Remondino F. 2020, *A hierarchical machine learning approach for multi-level and multi-resolution 3D point cloud classification*, «Remote Sensing», 12, 16, 2598.

Vaccaro E. 2011, *Sites and Pots. Settlement and Economy in Southern Tuscany (AD 300-900)*, Oxford, Archaeopress.

Weinmann M., Jutzi B., Hinz S., Mallet C. 2015, *Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers*, «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 105, 286-304.

Zhao H., Jiang L., Jia J., Torr P.H.S., Koltun V. 2021, *Point Transformer*, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 16259-16268.

ABSTRACT

This paper presents an integrated geophysical and UAV-LiDAR investigation of the *Rusellae* (Roselle) hinterland, carried out within the 'Emptyscapes' framework aimed at moving beyond site-based approaches toward a continuous, landscape-scale reconstruction of settlement and land-use dynamics. While extensive field survey, aerial imagery and large-scale magnetometry are effective in the open agricultural portions of the *Ager Rusellanus*, densely vegetated hill slopes remain a major source of knowledge bias. To address this gap, we combined (i) new magnetic prospections (ca. 70 ha) in the south-western sector of the study area with (ii) a drone-based high-density LiDAR survey (ca. 550 ha) acquired with a RIEGL miniVUX-3 at low altitude and controlled speed, achieving an average density >700-800 pts/m². Point clouds were processed through a multi-level, multi-resolution semantic segmentation workflow, using a Point Transformer deep-learning architecture to classify ground, vegetation and above-ground structures and to produce high-resolution DTMs and DFMs for GIS-based analysis. Results reveal a markedly more structured landscape in wooded areas than previously documented, including extensive terracing systems, mobility corridors, funerary districts with rock-cut hypogea, and traces of later productive activities. The study highlights both the potential and the limits of high-density UAV-LiDAR and ML-based processing, stressing the need for targeted ground validation in Mediterranean under-canopy contexts.