GREEN LIDAR DA UAV PER BATIMETRIA IN ACQUE POCO PROFONDE: VALUTAZIONE METRICA E INTEGRAZIONE MULTISENSORE SULL'AREA COSTIERA DELL'ISOLA DI CULUCCIA

Matteo Balzano[1] Filiberto Chiabrando[1] Beatrice Tanduo[1] Paolo Maschio[2] Andrea Maria Lingua[2] Francesca Gallitto[2] Sabrina Rossi[2,3] Mattia Ventimiglia[4] Andrea Mazzaglia[5] Enrico Signor[5] Bruno Campigotto[5]

[1] Laboratorio per i Beni Culturali (Lab G4CH), Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125, Torino (TO), (s354275@studenti.polito.it, filiberto.chiabrando@polito.it, beatrice.tanduo@polito.it)
[2] Laboratorio di Geomatica, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente e Territorio e delle Infratrutture (DIATI), Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino (TO), (andrea.lingua@polito.it, paolo.maschio@polito.it, francesca.gallitto@polito.it)
[3] Osservatorio Naturalistico dell'isola di Culuccia, 07028, Santa Teresa di Gallura (OT), (rossi@culuccia.org)
[4] Microgeosrl, Via San Quirico 306/a, 50013Campi Bisenzio (FI) (m.ventimiglia@microgeo.it)
[5] Ageasurvey, Piazza Michelangelo Buonarroti 22, 95126, Catania (CT), (info@ageasurvey.com)

Parole chiave: Green LiDAr, Batimetria, UAV

Abstract esteso. Il rilievo batimetrico delle acque poco profonde rappresenta ancora oggi una sfida significativa [1,2], sia per i limiti operativi dei sensori disponibili sia per le difficoltà di navigazione nelle aree prossime alla costa. La presenza di scogli affioranti, bassi fondali, ostacoli sommersi e morfologie irregolari può infatti limitare o impedire l'impiego in sicurezza delle imbarcazioni e dei tradizionali sistemi acustici. In questo contesto, le tecnologie Green LiDAR installate su piattaforme aeree costituiscono oggi una soluzione in rapida evoluzione e particolarmente efficace per acquisire dati nella complessa zona di transizione tra ambiente terrestre e ambiente marino (Fig. 1, sx).

Il contributo presenta l'impiego di un sistema Green LiDAR RIEGL VQ-840-GE montato su un sistema UAV[3] (Uncrewed Aerial Vehicle) (Fig. 1,dx) per il rilievo topografico e batimetrico della fascia costiera dell'isola di Culuccia, in Sardegna. Grazie alla capacità della radiazione laser verde di penetrare la colonna d'acqua, il sistema ha consentito di documentare in modo continuo sia le superfici emerse sia i fondali marini poco profondi, includendo aree difficilmente accessibili o non rilevabili in sicurezza mediante tradizionali imbarcazioni (Fig. 2). Il flusso di lavoro adottato ha previsto la pianificazione delle traiettorie di volo in un applicativo appositamente progettato (Fig. 3), in base alle specifiche di rilievo, e successivamente per l'acquisizione dei dati si è proceduto con l'importazione delle traiettorie nel software di gestione del volo DJI FlightHub. In totale sono stati realizzati 11 voli con quota relativa pari a 60 metri.

La prima fase di post-elaborazione ha previsto l'integrazione delle informazioni relative al sistema inerziale dello strumento, delle osservazioni GNSS (Global Navigation Satellite System) del sensore LiDAR integrate con i dati GNSS acquisiti su un punto di coordinate note.

Tale processo ha permesso di correggere le traiettorie acquisite in real-time durante il volo grazie al processo PPK (Post-Processed Kinematic), l'elaborazione è stata realizzata grazie al software POSPac UAV di APPLANIX [4].

Si è quindi verificata la distribuzione delle scansioni e la sovrapposizione tra le strisciate, per individuare eventuali disallineamenti o lacune, e alla nuvola sono stati attribuiti i valori RGB mediante le immagini fotografiche acquisite, ottenendo una rappresentazione tridimensionale a colori. Sono seguite verifiche del processing e visualizzazione della nuvola, per controllarne la densità, la corretta rappresentazione delle superfici costiere emerse e sommerse e la continuità geometrica e cromatica, con particolare attenzione alle aree marine. È stata poi applicata la correzione di rifrazione, classificando i punti della superficie dell'acqua con RiHYDRO di Riscan [5] e correggendo geometricamente i punti sommersi per compensare la rifrazione del raggio laser nel passaggio tra aria e acqua. Infine, la nuvola elaborata è stata esportata in formato LAS, con il corretto sistema di riferimento e gli attributi disponibili, per le successive analisi.



Fig. 1. Area rilevata con Green LiDAR relativa alla fascia costiera dell'isola di Culuccia: nuvola di punti con colorazione RGB delle superfici emerse e dei

Parallelamente alle acquisizioni LiDAR sono stati condotti specifici test metrici e confrontati con dati acquisti mediante rilievi GNSS, dati batimetrici multi-beam e single beam (con natanti di superficie) e voli fotogrammetrici

sull'intera area costiera (Fig. 4), i dati sono acquisiti con con DJI Matrice 350 RTK equipaggiato con sensore DJI Zenmuse P1,

Le fasi successive, ancora in corso, consisteranno nell'elaborazione dei dati acquisiti, tramite software Agisoft Metashape per la parte del rilievo fotogrammetrico e Matlab, Excel e ArcGIS per la parte di batimetria multibeam, al fine di valutare l'accuratezza e la qualità geometrica dei dati acquisiti, e la coerenza tra le differenti tecniche di acquisizione, valutando la capacità del sistema Green LiDAR di rilevare il fondale in diverse condizioni ambientali e di profondità.

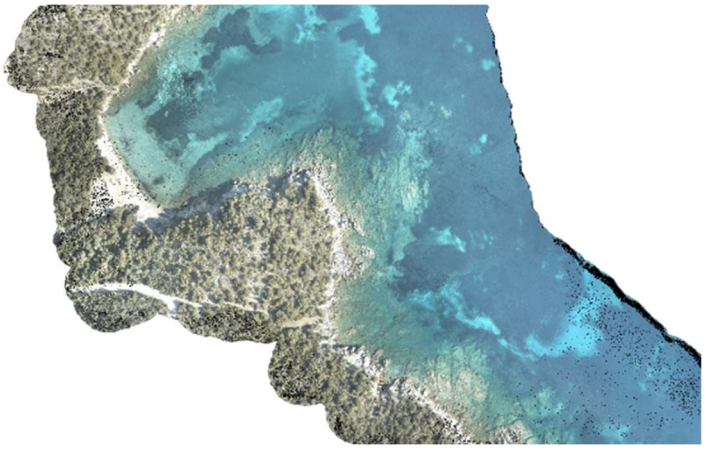


Fig. 2. Dettaglio nuvola di punti acquisita dal LiDAR verde



Fig. 3. Pianificazione dei voli LiDAR



Fig. 4. Traiettorie dei voli fotogrammetrico realizzati con DJI Matrice 350 RTK, sensore DJI Zenmuse P1.

Riferimenti bibliografici

1. Kujawa, P., & Remondino, F. (2025). A Review of Image- and LiDAR-Based Mapping of Shallow Water Scenarios. *Remote Sensing, 17*(12), 2086. https://doi.org/10.3390/rs17122086
2. Schwarz, R., Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., & Pfeifer, N. (2019). Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 150*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002
3. Mandlburger, G., Dammert, L., Rhomberg-Kauert, J., Pöppl, F., & Pfennigbauer, M. (2026). Refraction-aware integrated Georeferencing of bathymetric Laser Scanning Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIX-B2-2026*, 963–970. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIX-B2-2026-963-2026
4. Trimble Applanix. (s.d.). *POSPac UAV: Frequently Asked Questions* [Documentazione tecnica]. https://www.applanix.com/downloads/products/FAQs/FAQs_POSPac-UAV.pdf
5. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. (2026). *RiHYDRO: Airborne Data Processing Software AddOn for Commercial Hydrographic and Bathymetric Surveying* [Scheda tecnica, 15 giugno 2026]. https://www.riegl.com/index.php?eID=downloadFile&f=721&token=c12d252fc102f858f480594de01cb202b324ff8a

Intelligenza artificiale spiegabile per l'identificazione delle foreste mature e vetuste in Italia: il confronto con la rete Natura 2000

Costanza Borghi[1[0000-0002-5334-7548]], Francesco Solano[2[0000-0002-2457-5517]], Giovanni D'Amico[1[0000-0002-2341-3268]], Titomanlio Pepe[2[0009-0001-0638-9411]], Elia Vangi[1[0000-0002-9772-2258]], Mattia Niccoli[1[0009-0005-9744-1295]], Francesco Parisi[3,4[0000-0002-1914-7331]], Davide Travaglini[1[0000-0003-0706-2653]], Giancarlo Papitto[5[0009-0004-1897-162X]], Gianluca Piovesan[6[0000-0002-3214-0839]] e Gherardo Chirici[1[0000-0002-0669-5726]]

[1] Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze. costanza.borghi@unifi.it; giovanni.damico@unifi.it; elia.vangi@unifi.it; mattia.niccoli@unifi.it; davide.travaglini@unifi.it; gherardo.chirici@unifi.it

[2] Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE), Via San Camillo de Lellis s.n.c., 01100 Viterbo. f.solano@unitus.it, titomanlio.pepe@unitus.it

[3] Università degli Studi del Molise, Dipartimento di Bioscienze e Territorio, Contrada Fonte Lappone, 86090 Pesche (IS). francesco.parisi@unimol.it

[4] National Research Council of Italy - Institute of Technologies and Environmental Intelligence (CNR-ITIAm), Area della Ricerca Roma 1, Strada Provinciale 35d, 9, Montelibretti, 00010 Rome, Italy. francesco.parisi@unimol.it

[5] Accademia Italiana di Scienze Forestali, Piazza Edison 11, 50133 Firenze. giancarlo.papitto@carabinieri.it

[6] Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche (DEB), Largo dell'Università s.n.c., 01100 Viterbo. piovesan@unitus.it

Abstract. Partendo da un modello Random Forest già sviluppato per mappare a 30 m le foreste mature e vetuste italiane, si confronta la mappa con la rete Natura 2000 e si interpreta il modello con SHAP (SHapley Additive exPlanations). Dai risultati ottenuti, il 61% della foresta nel decile più alto del punteggio, soprattutto quella alpina, risulta fuori dalla rete; SHAP mostra che queste aree sono spiegate dagli stessi predittori di quelle interne, indicando aree prioritarie per verifiche in campo.

Parole chiave: Biodiversità, Random Forest, SHAP, Nature Restoration Law, Telerilevamento, Natura 2000.

1 Introduzione

Le foreste vetuste rappresentano condizioni strutturalmente complesse e funzionalmente distintive, associate a stadi successionali avanzati, a lunghi periodi privi di disturbi di grande entità e a un'elevata complessità biologica [1]. Ospitano generalmente alberi vecchi [2], chiome pluristratificate, abbondante necromassa e

numerosi microhabitat: attributi che tuttavia variano con il contesto biogeografico, il tipo forestale e la storia d'uso del suolo. In Europa le foreste primarie e vetuste cartografate occupano circa 1,35 Mha, meno del 3% della superficie forestale, e ulteriori 4,4 Mha potrebbero esistere senza essere ancora state individuate [3]; solo una piccola parte di esse è rigorosamente protetta [4]. Framework internazionali, come le linee guida europee sulle foreste primarie e vetuste [5] e la Nature Restoration Law, richiedono approcci scalabili, trasparenti e precauzionali per la loro mappatura, valutazione e protezione, compiti resi più complessi dall'assenza di una definizione universale di tali boschi [6, 7].

La rete Natura 2000, istituita dalla Direttiva Habitat (92/43/CEE) e dalla Direttiva Uccelli (2009/147/CE), è il principale strumento dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità: nel 2024 comprendeva 27.173 siti, pari al 18,6% della superficie terrestre dell'UE [8]. In Italia la rete conta 2.649 siti (SIC/ZSC e ZPS), che coprono circa il 20% del territorio nazionale [9]. Le foreste ne sono una componente centrale: occupano circa la metà della superficie terrestre della rete. Anche a livello europeo, circa il 21% delle foreste ricade all'interno dei siti Natura 2000 [10]. Le aree protette contribuiscono anche alla mitigazione dei cambiamenti climatici, perché conservano stock di carbonio epigeo più elevati rispetto ad aree comparabili non protette [11]; in Europa, i dati LiDAR satellitari indicano inoltre che le foreste protette mantengono, in media, altezze e complessità strutturale verticale maggiori rispetto a foreste comparabili non protette [12]. Per alcune specie bersaglio, come gli uccelli dell'Allegato I della Direttiva Uccelli, una maggiore copertura della rete è associata a tendenze di popolazione più favorevoli [13]. I siti sono tuttavia designati sulla base di habitat e specie di interesse comunitario, e non della maturità strutturale delle foreste. Una quota rilevante delle foreste primarie e vetuste europee resta così priva di protezione rigorosa [4, 14], mentre la Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030 chiede di proteggere il 30% del territorio, di cui almeno un terzo in modo rigoroso, includendo tutte le foreste primarie e vetuste ancora presenti [5, 15]. Valutare in che misura le foreste con caratteristiche di maturità ricadono nella rete è quindi un passaggio necessario per orientare l'eventuale estensione della tutela.

Su scala nazionale, la mappatura delle foreste mature e vetuste richiede di spazializzare, in modo continuo sul territorio, attributi che gli inventari forestali misurano solo in punti di campionamento. Le serie storiche di immagini ottiche, come Landsat e Sentinel-2, possono descrivere la dinamica della copertura forestale e la storia dei disturbi, e la loro integrazione con i dati inventariali consente di stimare in modo continuo attributi come la provvigione, lo stock di carbonio e l'incremento corrente. I dati bidimensionali, tuttavia, non descrivono direttamente la struttura verticale dei popolamenti. Le metriche LiDAR migliorano sensibilmente l'identificazione delle foreste vetuste [16, 17], ma in Italia non esiste attualmente una copertura LiDAR aereo nazionale [18], e i modelli globali di altezza delle chiome derivati dalla fusione di dati ottici e GEDI [19, 20] sono l'unica fonte di informazione tridimensionale per l'intero territorio. Questi prodotti tendono però a comprimere le altezze più elevate e a ridurre l'eterogeneità spaziale delle chiome [21, 22], proprio negli attributi che caratterizzano i popolamenti maturi [23, 24]. Inoltre, la risoluzione dei predittori disponibili su scala nazionale non coincide con la scala ecologica alla quale si definisce la vetustà [25].

Nessuna fonte, da sola, è quindi sufficiente, e combinare predittori di natura diversa (strutturali, di stock e di produttività) permette di compensarne in parte i limiti. Gli algoritmi di apprendimento automatico consentono questa integrazione multi-sorgente. L'intelligenza artificiale spiegabile (eXplainable Artificial Intelligence, XAI), e in particolare le SHapley Additive exPlanations (SHAP), rende inoltre trasparente il contributo di ciascun predittore e permette di interrogare il modello anche a valle della mappatura, per esempio confrontando come il punteggio viene spiegato in contesti territoriali diversi.

Il presente lavoro considera la vetustà come un gradiente continuo [26, 27] e stima, per ogni pixel identificato come bosco (30 m), la somiglianza con una condizione di riferimento definita operativamente come "Mature and Old-Growth-like Forest" (MOGF), che comprende sia foreste vetuste sia foreste mature con attributi di vetustà. Lo studio utilizza la mappa a 30 m del punteggio MOGF, presentata e validata con i dati di campo dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC2015) in [28], al quale si rimanda per i dettagli. Gli obiettivi sono: (i) quantificare la sovrapposizione tra le aree a punteggio elevato e la rete Natura 2000; (ii) analizzare con SHAP come il modello spiega il punteggio all'interno e all'esterno della rete, per verificare se le aree a punteggio elevato esterne alla rete differiscano, secondo il modello, da quelle già incluse.

2 Materiali e metodi

2.1 Mappa del punteggio MOGF

La mappa è stata ottenuta addestrando un modello su poligoni di riferimento di foreste mature e vetuste (MOGF), tratti da database esistenti [29, 30] e dalla conoscenza esperta, e di foreste non mature (NMOGF), derivate da disturbi documentati con serie Landsat e Sentinel-2 [31] e da popolamenti gestiti noti agli autori, limitatamente alle foreste con altezza ≥ 15 m. Sono stati utilizzati sei predittori nazionali a 30 m: (i) l'altezza delle chiome (canopy height model, CHM), dal modello globale a 10 m di Lang et al. [19], aggregata con il valore massimo e mascherata con la carta forestale nazionale [18]; (ii) il residuo del CHM (RES) rispetto all'altezza attesa in funzione di variabili topografiche, litologiche e della latitudine, stimata con un modello additivo generalizzato per grandi dataset [32]; (iii) la provvigione (GSV) e (iv) lo stock di carbonio (CS) al 2015, ottenuti modellando i dati INFC2015 con predittori Landsat, topografici e climatici [33, 34]; (v) l'incremento corrente di volume (CAI) [35]; (vi) l'indice di Rumple [36], calcolato dal CHM globale a 1 m di Tolan et al. [37]. Il punteggio MOGF di ciascuna cella è stato stimato con un classificatore Random Forest [38] come frazione di alberi che la assegnano alla classe MOGF. Il modello discrimina bene le MOGF dalle altre foreste su poligoni di test indipendenti (ROC-AUC = 0,95), con prestazioni inferiori nel distinguere le MOGF dai soli popolamenti gestiti (ROC-AUC = 0,81). Dalla mappa è stato quindi calcolato il 90° percentile nazionale del punteggio (P90), utilizzato come soglia per individuare le aree a punteggio elevato.

2.2 Rete Natura 2000 e analisi SHAP

La mappa è stata sovrapposta ai siti della rete Natura 2000 (SIC, ZSC e ZPS), tratti dalla banca dati ufficiale del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, riproiettati in EPSG:3035 e rasterizzati sulla griglia di 30 m. Per l'intera rete, per regione biogeografica e per Regione amministrativa sono state calcolate la quota di foresta interna ai siti, la quota della superficie con punteggio superiore al P90 che ricade nei siti e la superficie superiore al P90 esterna alla rete, usata come indicatore di lacuna. Per quantificare la rappresentazione delle aree sopra P90 all'interno della rete è stato calcolato il rapporto di arricchimento (*enrichment ratio*, ER; Eq. 1):

$$ER = (A_{P90,N2000} / A_{F,N2000}) / (A_{P90,IT} / A_{F,IT}) \quad (1)$$

dove $A_{P90,N2000}$ è la superficie forestale con punteggio sopra P90 interna alla rete, $A_{F,N2000}$ la superficie forestale interna alla rete, e $A_{P90,IT}$ e $A_{F,IT}$ le corrispondenti superfici a livello nazionale (o della regione biogeografica considerata). Valori di ER > 1 indicano che le aree sopra P90 sono proporzionalmente sovrarappresentate nella rete Natura 2000, ER = 1 una rappresentazione proporzionale e ER < 1 una sottorappresentazione. L'incertezza di ER è stata stimata con un bootstrap spaziale a blocchi [39] (i.e., quadrati di 10 km, 2.000 repliche), che tiene conto dell'autocorrelazione spaziale. Le distribuzioni dei punteggi all'interno e all'esterno della rete sono state inoltre confrontate mediante il test di Mann–Whitney e il delta di Cliff [40] come misura dell'effetto, sul campione di pixel descritto di seguito.

Per analizzare come il modello spiega il punteggio all'interno e all'esterno della rete Natura 2000, è stato estratto un campione casuale stratificato di 18.000 pixel: 1.500 pixel per ciascuna combinazione di posizione rispetto alla rete (dentro o fuori), regione biogeografica (alpina, continentale, mediterranea) e gruppo di punteggio (tutta la foresta e pixel sopra P90). Per ogni pixel sono stati estratti i sei predittori e calcolati i valori SHAP [41] con l'algoritmo TreeSHAP, applicato al modello Random Forest utilizzato per generare la mappa. Per ciascuno strato sono stati infine calcolati (i) la media dei valori assoluti di SHAP (|SHAP| medio) di ogni predittore e (ii) la sua quota sul totale dell'attribuzione; le differenze tra dentro e fuori dalla rete sono state valutate con intervalli di confidenza bootstrap al 95%. Va sottolineato che il rapporto di arricchimento e i valori SHAP descrivono, rispettivamente, la rappresentazione delle aree a punteggio elevato nella rete e il funzionamento del modello; non valutano lo stato di tutela delle foreste né l'efficacia delle aree protette.

3 Risultati

3.1 Aree a punteggio elevato e rete Natura 2000

La rete Natura 2000, che include il 28,8% dell'area considerata, comprende le porzioni con punteggi mediamente più elevati: contiene il 38,7% della superficie sopra P90 (0,41; ER = 1,34; IC 95% 1,28–1,41), e il punteggio mediano è più alto all'interno che all'esterno della rete in tutte le regioni biogeografiche (Mann–Whitney, p < 0,001; delta

di Cliff 0,09–0,20). Il fenomeno è più marcato nelle regioni continentale (ER = 1,87; IC 95% 1,67–2,06) e mediterranea (ER = 1,61; IC 95% 1,49–1,74) rispetto a quella alpina (ER = 1,09; IC 95% 1,03–1,15; Tabella 1) dove solo il 29,4% della superficie sopra P90 è interna ai siti. Tra le Regioni amministrative italiane, la quota della superficie sopra P90 interna alla rete Natura 2000 varia dal 17–24% di Piemonte, Valle d'Aosta, Friuli Venezia Giulia, Trentino-Alto Adige e Lombardia all'89–97% di Abruzzo, Molise, Campania e Puglia; in Calabria, principale hotspot al di fuori delle Alpi, è pari al 32,0%, con circa 61.000 ha esterni ai siti.

Tabella 1. Superficie di bosco considerata e superficie con punteggio MOGF ≥ P90 (0,41) rispetto alla rete Natura 2000, per regione biogeografica.

Regione biogeografica	Superficie di bosco (Mha)	Superficie in Natura 2000 (%)	Sup. ≥ P90 in Natura 2000 (%)	Sup. ≥ P90 fuori Natura 2000 (ha)
Alpina	2,98	26,9	29,4	337.400
Continentale	1,91	22,2	41,4	55.800
Mediterranea	3,44	34,1	54,9	117.600
Italia	**8,34**	**28,8**	**38,7**	**510.800**

3.2 Interpretazione del modello dentro e fuori dalla rete Natura 2000

Nei pixel sopra P90, il profilo SHAP è molto simile sia all'interno sia all'esterno della rete Natura 2000 in tutte e tre le regioni biogeografiche (Fig. 1a): RES è il predittore con il valore medio di |SHAP| più elevato (22–25% dell'attribuzione totale), seguito da CS e GSV (18–20% ciascuno), e le quote dei singoli predittori differiscono al massimo di 1,7 punti percentuali tra dentro e fuori. Le differenze sono contenute e di segno variabile. Ad esempio, nella regione mediterranea, al di fuori della rete, il contributo dello stock di carbonio (+1,6 punti) è leggermente superiore, mentre all'interno delle aree Natura 2000 lo è l'incremento corrente (+1,7 punti). Anche i valori dei predittori sono simili; all'interno della rete, i pixel sopra P90 hanno uno stock di carbonio mediano leggermente più alto e un incremento corrente leggermente più basso (regione mediterranea: CS 87 contro 81 Mg C ha^{-1}; CAI 6,3 contro 6,8 m^3 ha^{-1} $anno^{-1}$).

Considerando invece tutta la superficie forestale oggetto d'indagine, le differenze sono più marcate (Fig. 1b). Nelle regioni continentale e mediterranea, fuori dalla rete lo stock di carbonio spiega il 31% dell'attribuzione, contro il 25–26% dentro, e contribuisce più fortemente ad abbassare il punteggio (SHAP medio −0,14 contro −0,10); dentro la rete aumentano invece i contributi di RES (+2,6–3,4 punti) e, in tutte e tre le regioni, della rugosità delle chiome (+1,8–2,1 punti).

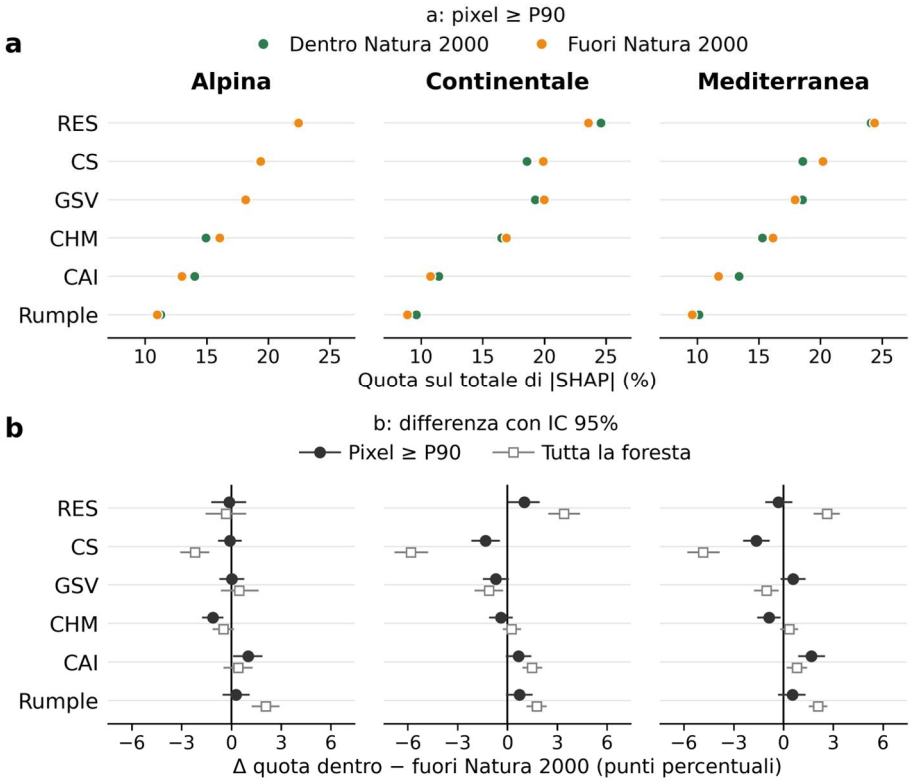


Fig. 1. Interpretazione del modello dentro e fuori dalla rete Natura 2000, per regione biogeografica (1.500 pixel per strato). Dove è visibile un solo punto, i valori si sovrappongono. (a) Quota di ciascun predittore sul totale di |SHAP| nei pixel di bosco con punteggio MOGF ≥ P90. (b) Differenza delle quote dentro − fuori (punti percentuali; valori positivi = maggior peso dentro la rete), con intervallo di confidenza bootstrap al 95%, per i pixel ≥ P90 (cerchi) e per tutta la superficie forestale considerata (quadrati). RES: residuo dell'altezza delle chiome; CS: stock di carbonio; GSV: provvigione; CHM: altezza delle chiome; CAI: incremento corrente; Rumple: rugosità delle chiome.

4 Discussione e conclusioni

Il confronto con la rete Natura 2000 illustra un'applicazione diretta della mappa alla pianificazione forestale. Le aree a punteggio elevato sono più frequenti all'interno dei siti Natura 2000, coerentemente con il ruolo della rete nella tutela delle foreste meno disturbate, ma circa il 60% di esse ne resta escluso, soprattutto nelle Alpi, dove la rete copre una quota ridotta della superficie forestale. Queste aree non sono necessariamente prive di tutela, perché possono ricadere in parchi o riserve non inclusi nella rete, e la designazione dei siti segue criteri (ad esempio habitat e specie di interesse comunitario) diversi da quelli di maturità strutturale. La sovrapposizione fornisce tuttavia un primo elenco di aree, in particolare nell'arco alpino e in Calabria, in cui verificare in campo

la presenza di attributi di vetustà e valutare l'adeguatezza della tutela, in linea con le linee guida europee [5].

L'analisi SHAP aggiunge un elemento a questa lettura. Nei pixel con punteggio elevato il modello riconosce le foreste esterne alla rete attraverso la stessa combinazione di segnali di quelle interne, dominata dall'altezza relativa alle attese stazionali e dagli stock: il modello, quindi, non distingue le aree ad alto punteggio esterne alla rete da quelle interne. Poiché i predittori telerilevati possono non distinguere le foreste mature dai popolamenti gestiti ben sviluppati, questa somiglianza non dimostra che le due situazioni siano ecologicamente equivalenti, ma rende le aree esterne candidate prioritarie per la verifica in campo, che sola può stabilire se si tratti di foreste mature o di popolamenti gestiti con stock elevati. Le differenze emergono invece sull'intera superficie boscata, dove, fuori dalla rete, il punteggio è abbassato soprattutto dai bassi stock di carbonio, mentre, dentro la rete, pesano di più l'altezza relativa e la rugosità delle chiome. Questi risultati riflettono anche differenze di tipo forestale e di condizioni stazionali, che il confronto per regione biogeografica controlla solo in parte.

Complessivamente, il valore MOGF predetto dal modello non determina lo stato di foresta vetusta, che richiede informazioni sull'età e su elementi relativi alla biodiversità, come la presenza di microhabitat, la necromassa e la continuità ecologica [42], ma contribuisce all'individuazione di aree potenzialmente idonee all'applicazione di politiche di protezione [43], in linea con i framework europei. In attesa di un LiDAR nazionale, la mappa offre quindi un primo screening riproducibile della maturità strutturale delle foreste italiane, utile per orientare le verifiche in campo e gli interventi previsti dalla Nature Restoration Law; la disponibilità futura di dati LiDAR nazionali consentirà inoltre di ridurre l'incertezza legata ai modelli globali di altezza.

Riferimenti bibliografici

1. Bauhus, J., Puettmann, K., Messier, C.: Silviculture for old-growth attributes. Forest Ecology and Management 258(4), 525–537 (2009). https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.053
2. Piovesan, G., Biondi, F.: On tree longevity. New Phytologist 231(4), 1318–1337 (2021). https://doi.org/10.1111/nph.17148
3. Barredo, J.I., Brailescu, C., Teller, A., Sabatini, F.M., Mauri, A., Janouskova, K.: Mapping and assessment of primary and old-growth forests in Europe. EUR 30661 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg (2021). https://doi.org/10.2760/797591
4. Sabatini, F.M., Burrascano, S., Keeton, W.S., Levers, C., Lindner, M., Pötzschner, F., et al.: Where are Europe's last primary forests? Diversity and Distributions 24(10), 1426–1439 (2018). https://doi.org/10.1111/ddi.12778
5. European Commission: Commission Guidelines for Defining, Mapping, Monitoring and Strictly Protecting EU Primary and Old-Growth Forests. Commission Staff Working Document SWD(2023) 62 final. Brussels (2023).
6. Bruening, J.M., Dubayah, R.O., Pederson, N., Poulter, B., Calle, L.: Definition criteria determine the success of old-growth mapping. Ecological Indicators 159, 111709 (2024). https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111709

7. , C., Woodall, C.W.: Perspectives: The wicked problem of defining and inventorying mature and old-growth forests. Forest Ecology and Management 546, 121350 (2023). https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121350
8. European Environment Agency: Natura 2000 sites designated under the EU Birds and Habitats Directives. EEA indicator, https://www.eea.europa.eu/ims/natura-2000-sites-designated-under, ultimo accesso 2026/10/15.
9. ISPRA: Rete Natura 2000. Indicatori ambientali, https://indicatoriambientali.isprambiente.it/en/protected-areas/natura-2000-network, ultimo accesso 2026/10/15.
10. European Commission: Natura 2000 and Forests, Part I–II. Technical Report 2015-088. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2015). https://doi.org/10.2779/699873
11. Duncanson, L., Liang, M., Leitold, V., Armston, J., Krishna Moorthy, S.M., Dubayah, R., et al.: The effectiveness of global protected areas for climate change mitigation. Nature Communications 14 (2023). https://doi.org/10.1038/s41467-023-38073-9
12. Ceccherini, G., Girardello, M., Beck, P.S.A., Migliavacca, M., Duveiller, G., Dubois, G., et al.: Spaceborne LiDAR reveals the effectiveness of European Protected Areas in conserving forest height and vertical structure. Communications Earth & Environment 4, 97 (2023). https://doi.org/10.1038/s43247-023-00758-w
13. Gamero, A., Brotons, L., Brunner, A., Foppen, R., Fornasari, L., Gregory, R.D., et al.: Tracking progress toward EU Biodiversity Strategy targets: EU policy effects in preserving its common farmland birds. Conservation Letters 10(4), 395–402 (2017). https://doi.org/10.1111/conl.12292
14. Sabatini, F.M., Keeton, W.S., Lindner, M., Svoboda, M., Verkerk, P.J., Bauhus, J., et al.: Protection gaps and restoration opportunities for primary forests in Europe. Diversity and Distributions 26(12), 1646–1662 (2020). https://doi.org/10.1111/ddi.13158
15. European Commission: EU Biodiversity Strategy for 2030. Bringing nature back into our lives. COM(2020) 380 final. Brussels (2020).
16. Adiningrat, D.P., Skidmore, A., Schlund, M., Wang, T., Abdullah, H., Heurich, M.: Investigating LiDAR metrics for old-growth beech- and spruce-dominated forest identification in Central Europe. Remote Sensing 17(2), 251 (2025). https://doi.org/10.3390/rs17020251
17. Spracklen, B., Spracklen, D.V.: Determination of structural characteristics of old-growth forest in Ukraine using spaceborne LiDAR. Remote Sensing 13(7), 1233 (2021). https://doi.org/10.3390/rs13071233
18. D'Amico, G., Vangi, E., Francini, S., Giannetti, F., Nicolaci, A., Travaglini, D., Massai, L., Giambastiani, Y., Terranova, C., Chirici, G.: Are we ready for a National Forest Information System? State of the art of forest maps and airborne laser scanning data availability in Italy. iForest 14(2), 144–154 (2021). https://doi.org/10.3832/ifor3648-014
19. Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., Wegner, J.D.: A high-resolution canopy height model of the Earth. Nature Ecology & Evolution 7(11), 1778–1789 (2023). https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6
20. Dubayah, R., Blair, J.B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., et al.: The Global Ecosystem Dynamics Investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. Science of Remote Sensing 1, 100002 (2020). https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002
21. Besic, N., Picard, N., Vega, C., Bontemps, J.-D., Hertzog, L., Renaud, J.-P., et al.: Remote-sensing-based forest canopy height mapping: some models are useful, but might they

provide us with even more insights when combined? Geoscientific Model Development 18(2), 337–359 (2025). https://doi.org/10.5194/gmd-18-337-2025
22. Moudrý, V., Gábor, L., Marselis, S., Pracná, P., Barták, V., Prošek, J., et al.: Comparison of three global canopy height maps and their applicability to biodiversity modeling: accuracy issues revealed. Ecosphere 15(10), e70026 (2024). https://doi.org/10.1002/ecs2.70026
23. Franklin, J.F., Van Pelt, R.: Spatial aspects of structural complexity in old-growth forests. Journal of Forestry 102(3), 22–28 (2004).
24. Huang, Q., Xu, J., Wong, J.P., Radeloff, V.C., Songer, M.: Prioritizing global tall forests toward the 30 × 30 goals. Conservation Biology 37(6), e14135 (2023). https://doi.org/10.1111/cobi.14135
25. Markham, K., Frazier, A.E., Singh, K.K., Madden, M.: A review of methods for scaling remotely sensed data for spatial pattern analysis. Landscape Ecology 38(3), 619–635 (2023). https://doi.org/10.1007/s10980-022-01449-1
26. Barbati, A., Salvati, R., Ferrari, B., Di Santo, D., Quatrini, A., Portoghesi, L., Travaglini, D., Iovino, F., Nocentini, S.: Assessing and promoting old-growthness of forest stands: lessons from research in Italy. Plant Biosystems 146(1), 167–174 (2012). https://doi.org/10.1080/11263504.2011.650730
27. Borghi, C., Francini, S., McRoberts, R.E., Parisi, F., Lombardi, F., Nocentini, S., Maltoni, A., Travaglini, D., Chirici, G.: Country-wide assessment of biodiversity, naturalness, and old-growth status using National Forest Inventory data. European Journal of Forest Research (2023). https://doi.org/10.1007/s10342-023-01620-6
28. Borghi, C., Solano, F., D'Amico, G., Pepe, T., Niccoli, M., Vangi, E., Parisi, F., Travaglini, D., Modica, G., Papitto, G., Piovesan, G., Chirici, G.: Caratterizzazione dei gradienti di maturità e vetustà nelle foreste italiane: un approccio integrato tra telerilevamento e inventari forestali. L'Italia Forestale e Montana 81(2s), 118–139 (2026). https://doi.org/10.36253/ifm-1250
29. Burrascano, S., Ripullone, F., Bernardo, L., Borghetti, M., Carli, E., Colangelo, M., et al.: It's a long way to the top: plant species diversity in the transition from managed to old-growth forests. Journal of Vegetation Science 29(1), 98–109 (2018). https://doi.org/10.1111/jvs.12588
30. Sabatini, F.M., Bluhm, H., Kun, Z., Aksenov, D., Atauri, J.A., Buchwald, E., et al.: European primary forest database v2.0. Scientific Data 8, 220 (2021). https://doi.org/10.1038/s41597-021-00988-7
31. Francini, S., McRoberts, R.E., Giannetti, F., Marchetti, M., Scarascia Mugnozza, G., Chirici, G.: The Three Indices Three Dimensions (3I3D) algorithm: a new method for forest disturbance mapping and area estimation based on optical remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing 42(12), 4697–4715 (2021). https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1899334
32. Wood, S.N., Goude, Y., Shaw, S.: Generalized additive models for large data sets. Journal of the Royal Statistical Society Series C 64(1), 139–155 (2015). https://doi.org/10.1111/rssc.12068
33. Chirici, G., Giannetti, F., McRoberts, R.E., Travaglini, D., Pecchi, M., Maselli, F., Chiesi, M., Corona, P.: Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 84, 101959 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101959
34. Vangi, E., D'Amico, G., Francini, S., Giannetti, F., Lasserre, B., Marchetti, M., McRoberts, R.E., Chirici, G.: The effect of forest mask quality in the wall-to-wall estimation of growing stock volume. Remote Sensing 13(5), 1038 (2021). https://doi.org/10.3390/rs13051038

35. Giannetti, F., Chirici, G., Vangi, E., Corona, P., Maselli, F., Chiesi, M., D'Amico, G., Puletti, N.: Wall-to-wall mapping of forest biomass and wood volume increment in Italy. Forests 13(12), 1989 (2022). https://doi.org/10.3390/f13121989
36. Kane, V.R., Bakker, J.D., McGaughey, R.J., Lutz, J.A., Gersonde, R.F., Franklin, J.F.: Examining conifer canopy structural complexity across forest ages and elevations with LiDAR data. Canadian Journal of Forest Research 40(4), 774–787 (2010). https://doi.org/10.1139/X10-064
37. Tolan, J., Yang, H.-I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H.V., Brandt, J., et al.: Very high resolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. Remote Sensing of Environment 300, 113888 (2024). https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113888
38. Breiman, L.: Random forests. Machine Learning 45, 5–32 (2001). https://doi.org/10.1023/A:1010933404324
39. Künsch, H.R.: The jackknife and the bootstrap for general stationary observations. Annals of Statistics 17(3), 1217–1241 (1989). https://doi.org/10.1214/aos/1176347265
40. Cliff, N.: Dominance statistics: ordinal analyses to answer ordinal questions. Psychological Bulletin 114(3), 494–509 (1993).
41. Lundberg, S.M., Lee, S.-I.: A unified approach to interpreting model predictions. In: Advances in Neural Information Processing Systems 30, pp. 4765–4774. Curran Associates, Red Hook (2017).
42. Di Filippo, A., Biondi, F., Piovesan, G., Ziaco, E.: Tree ring-based metrics for assessing old-growth forest naturalness. Journal of Applied Ecology 54(3), 737–749 (2017). https://doi.org/10.1111/1365-2664.12793
43. Chiarucci, A., Piovesan, G.: Need for a global map of forest naturalness for a sustainable future. Conservation Biology 34(2), 368–372 (2020). https://doi.org/10.1111/cobi.13408

AetherMMS: un software per la pianificazione e l'analisi predittiva delle condizioni GNSS a supporto dei rilievi Mobile Mapping

Matteo Cappuccio, Giorgio Del Ciondolo e Stefano Gandolfi

DICAM, Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, Bologna
matteo.cappuccio@unibo.it

Abstract. AetherMMS integra traiettoria, almanacchi GPS e Galileo e modelli tridimensionali del territorio per prevedere visibilità e geometria satellitare lungo un rilievo Mobile Mapping. Il confronto degli orari di partenza consente di individuare finestre favorevoli e tratti critici. Le prove sperimentali mostrano l'utilità operativa della pianificazione, distinguendo gli indicatori geometrici dalla qualità del posizionamento effettivamente ottenuto.

Parole chiave: GNSS, Mobile Mapping, Pianificazione del rilievo.

1 Obiettivo e metodo

La georeferenziazione dei rilievi Mobile Mapping dipende dalla disponibilità di osservazioni GNSS lungo la traiettoria. In ambito urbano, edifici e vegetazione modificano il cielo visibile, mentre il moto dei satelliti rende le condizioni variabili nel tempo. La pianificazione con modelli del terreno [1] viene qui estesa all'intera missione, associando a ciascuna posizione l'istante previsto di passaggio.

AetherMMS [2] combina un percorso in formato KML, una velocità assegnata, un modello digitale del terreno e dati di edifici e alberi. Le posizioni di GPS e Galileo sono ricavate dagli almanacchi; per ogni epoca, le linee di vista vengono confrontate con la scena tridimensionale. Gli edifici sono rappresentati come prismi e la vegetazione mediante volumi cilindrici. Sono inoltre individuati i tratti coperti, nei quali la disponibilità geometrica del GNSS è considerata nulla.

L'analisi restituisce il numero di satelliti in vista libera e il Position Dilution of Precision (PDOP), che descrive l'effetto della geometria satellitare sul posizionamento. Il confronto tra condizioni a cielo libero e presenza di ostacoli permette di localizzare le criticità lungo il percorso. L'interfaccia web visualizza la scena e gli esiti della simulazione (Fig. 1).

Una ricerca progressiva confronta diversi orari di partenza e affina quelli più favorevoli e sfavorevoli. Il punteggio combina disponibilità satellitare, PDOP e frequenza delle epoche critiche, fornendo un supporto alla scelta della finestra di acquisizione e alla preparazione dell'integrazione con altri sensori.

(a) (b)

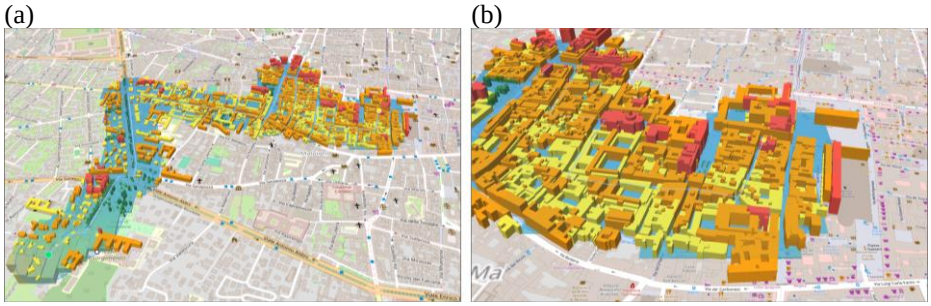


Fig. 1. Scena tridimensionale in AetherMMS: (a) vista d'insieme; (b) dettaglio.

2 Risultati e considerazioni

Nei test a Bologna, il percorso prevalentemente aperto mostra variazioni contenute: includendo gli ostacoli, il numero medio di satelliti in vista libera passa da 15,63 a 15,29, con PDOP mediano pari a 1,30. Nel percorso urbano la disponibilità media scende invece da 17,00 a 10,99 satelliti, con una riduzione del 35,4%. Il PDOP mediano aumenta da 1,18 a 1,95 e supera 4 nel 13% delle epoche, evidenziando criticità non riconoscibili con la sola ipotesi di cielo libero.

Una prova sullo stesso itinerario urbano, eseguita il 10 giugno 2026 con ricevitore STONEX S900A, ha confrontato due finestre temporali mediante elaborazione differenziale cinematica in RTKLIB. Nella finestra prevista come favorevole, le epoche con ambiguità fissate passano dal 6,3% al 25,7% e il tratto continuo con soluzione fixed cresce da 56 a 744 m.

Il riscontro sostiene l'utilità della scelta dell'orario, ma riguarda due acquisizioni e non quantifica l'accuratezza della traiettoria, in assenza di un riferimento indipendente. Il modello assume velocità costante e non simula multipath né attenuazione della vegetazione. AetherMMS offre quindi un supporto alla preparazione del rilievo e all'individuazione dei tratti critici, da integrare con le condizioni operative e le caratteristiche dei sensori.

Riferimenti bibliografici

1. Gandolfi, S., La Via, L.: SKYPLOT_DEM: a tool for GNSS planning and simulations. Applied Geomatics 3, 35-48 (2011).
2. Cappuccio, M.: AetherMMS, codice sorgente e manuale d'uso (2026). https://github.com/matteocappuccio/AetherMMS

ICEGIANT: monitoraggio geodetico e geofisico del sistema David Glacier–Drygalski Ice Tongue nell'ambito della XLI spedizione antartica PNRA

Matteo Cappuccio[1], Salomon Hailemikael[2], Shahriar Mokhtari[1], Stefania Danesi[2], Cristina Castagnetti[3], Antonio Zanutta[1], Francesco Mancini[3], Francesca Grassi[3], Simone Salimbeni[2], Stefano Gandolfi[1], Alessandro Capra[3], Massimo Frezzotti[4], Luca Vittuari[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna
[2] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
[3] Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università di Modena e Reggio Emilia
[4] Dipartimento di Scienze, Università degli Studi Roma Tre

Abstract. Il progetto ICEGIANT integra GNSS, sismologia e dati SAR per studiare il sistema David Glacier–Drygalski Ice Tongue. Durante la XLI spedizione PNRA sono state installate 12 stazioni GNSS e tre stazioni sismiche. Le prime analisi PPP-AR evidenziano un contrasto nella risposta verticale alle maree tra zona di galleggiamento e lingua flottante. Sono presentati la rete osservativa, le strategie di elaborazione e le prospettive di integrazione dei dati.

Parole chiave: GNSS; Drygalski Ice Tongue; sismologia broadband; SAR; dinamica glaciale; maree oceaniche; PNRA.

1. Contesto e obiettivi

Il David Glacier è il principale ghiacciaio di sbocco della Terra Vittoria settentrionale e drena circa il 4% della calotta dell'Antartide orientale, con un bacino che si estende fino a Dome C e Talos Dome (Rignot, 2002). Superato l'icefall del David Cauldron, dove la topografia basale cambia bruscamente pendenza nell'attraversamento delle Montagne Transantartiche, il flusso alimenta la Drygalski Ice Tongue, lingua galleggiante lunga circa 140 km dalla zona di galleggiamento e larga circa 20 km, di cui circa 90 km non confinati nel Mare di Ross. Si tratta di un ghiacciaio a base marina, con linea di galleggiamento a profondità prossime ai 2000 m sotto il livello del mare (Frezzotti et al., 2000); per dimensioni e posizione il sistema influenza la circolazione oceanica locale e la persistenza della polynya di Baia Terra Nova, e rappresenta quindi un osservatorio naturale delle interazioni tra ghiaccio, substrato roccioso, oceano e atmosfera.

Il sistema David Glacier–Drygalski Ice Tongue attraversa condizioni meccaniche e ambientali differenti: scorrimento del ghiaccio continentale, zona di transizione tra porzione appoggiata sul bedrock e lingua galleggiante, lingua glaciale libera e

interazione con l'oceano. Fratture, geometria basale complessa e sollecitazioni mareali rendono difficile descrivere la cinematica con una sola tecnica di misura. ICEGIANT mira, pertanto, a osservare in modo coordinato gli spostamenti superficiali e le deformazioni locali, a riconoscere il contributo della forzante mareale e a costruire un quadro di riferimento per interpretare la sismicità glaciale e i campi cinematici derivati dal radar satellitare. Il contributo ad ASITA è soprattutto metodologico: dimostrare come una rete geodetica in ambiente estremo possa collegare osservazioni puntuali ad alta frequenza, processi geofisici e copertura spaziale satellitare.

Il sistema è oggetto di osservazioni italiane fin dai primi anni '90: rilievi GPS temporanei sono stati eseguiti nelle stagioni 1992–1994, 2000-2001 e 2005–2006, mentre la sismicità glaciale dell'area è registrata durante le estati australi a partire dal 2003. Studi precedenti hanno documentato la sensibilità del flusso alla marea oceanica, compresa la modulazione a circa 14 giorni dell'ampiezza mareale, e la presenza di sismicità basale raggruppata nel tempo e nello spazio, verosimilmente condizionata dalle condizioni di lubrificazione alla base del ghiaccio (Vittuari et al., 2023; Danesi et al., 2025). La possibilità di rioccupare, ove praticabile, le posizioni geografiche delle campagne storiche rende ICEGIANT anche un'occasione per confronti su scale temporali di due-tre decenni. In un quadro più ampio, il progetto si colloca tra gli obiettivi del programma strategico SCAR INSTANT (INStabilities & Thresholds in ANTarctica), che richiama la necessità di nuove misure dirette attraverso le zone di galleggiamento e lungo i ghiacciai di sbocco per migliorare la capacità predittiva dei modelli di dinamica delle calotte.

2. Rete di osservazione e acquisizione

La distribuzione delle 12 postazioni GNSS copre diversi settori della Drygalski Ice Tongue, con gruppi trasversali DA2 e DR8 e stazioni disposte lungo la direzione prevalente del flusso. Tale geometria permette confronti tra porzioni più interne e settori flottanti, oltre all'analisi differenziale tra siti vicini. Il nuovo assetto estende spazialmente le osservazioni GNSS storiche svolte sul sistema. Le tre stazioni sismiche broadband sono destinate al riconoscimento di segnali associati a fratturazione, scorrimento e interazioni ghiaccio–substrato; la loro correlazione con le variazioni cinematiche GNSS potrà essere affrontata dopo il recupero dei dati. Le attività hanno richiesto soluzioni specifiche per accessibilità, sicurezza nei settori crepacciati, alimentazione e continuità di registrazione.

Le stazioni GNSS sono state progettate per un'installazione rapida e reversibile su ghiaccio: ricevitori geodetici multi-costellazione a basso consumo (Septentrio AsteRx e Stonex SC650), antenne montate su pali in alluminio infissi nel firn, elettronica e batterie al litio-ferro-fosfato (LiFePO4) alloggiate in contenitori stagni, alimentazione integrata da pannelli solari dimensionati in funzione dell'assorbimento degli strumenti e delle condizioni di ciascun sito. La scelta di strumentazione compatta e a costo contenuto rispetto ai sistemi tradizionali risponde all'obiettivo di aumentare la densità spaziale delle misure riducendo il carico logistico per singolo punto, senza rinunciare a

una cadenza di acquisizione adatta a ricavare soluzioni cinematiche a intervalli di pochi minuti.

La rete sismica è composta da tre stazioni broadband autonome (sensore triassiale nanometrics Trillium T40 e acquisitore Reftek RT130 con sincronizzazione GPS), installate su affioramenti rocciosi ai margini del flusso principale, in prossimità della zona di galleggiamento: Central Trio Nunatak, Hughes Bluff e D'Urville Wall. La collocazione su roccia, già sperimentata in campagne precedenti, garantisce accoppiamento con il substrato roccioso e un buon rapporto segnale/rumore, mentre la vicinanza ad alcuni gruppi di stazioni GNSS consente di formare coppie di osservazione geodetico-sismiche riferite a settori omogenei del ghiacciaio. I sistemi di alimentazione prevedono lo spegnimento controllato all'arrivo dell'inverno australe e il successivo riavvio nella stagione estiva.

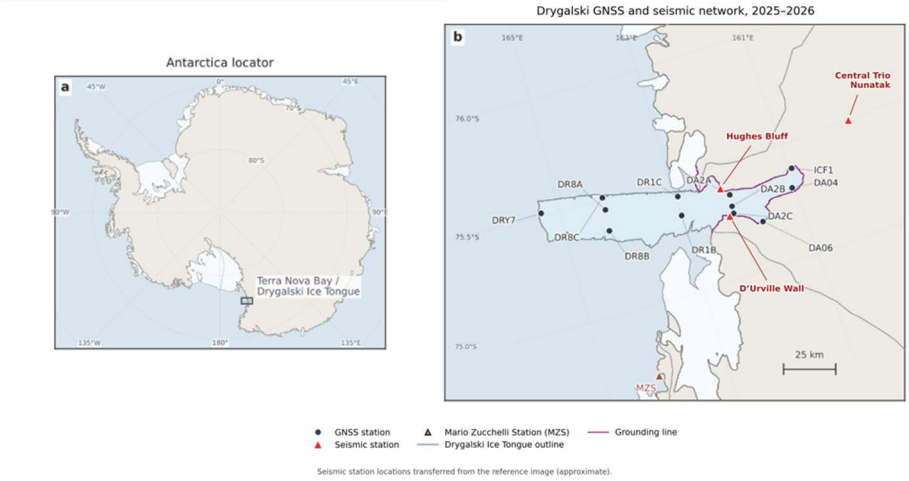


Figura 1 – Schema della rete di monitoraggio ICEGIANT 2025–2026 (3 stazioni sismiche, 12 stazioni GNSS) e inquadramento geografico.

Le attività di campo si sono svolte tra il 19 dicembre 2025 e il 19 gennaio 2026 e hanno compreso il collaudo della strumentazione presso la Stazione Mario Zucchelli, l'installazione, le rivisitazioni per verifica di funzionamento e scarico dati, interventi di riparazione e reinstallazione di alcune stazioni e, infine, la riconfigurazione della rete: al termine della fase intensiva quattro ricevitori sono stati lasciati in sito, uno in posizione più interna e tre lungo un transetto orientato circa nord-sud nel settore distale della lingua. GNSS e sismometri dispongono di una base temporale comune di oltre 18 giorni, mentre le acquisizioni prolungate potranno aumentare di un fattore due-tre il volume di dati disponibile, pur con prevedibili lacune invernali. Le criticità incontrate (malfunzionamenti di alcuni ricevitori, gestione energetica, accesso ai settori crepacciati) costituiscono indicazioni pratiche per la progettazione di reti geodetiche temporanee in contesti analoghi. In collaborazione con l'osservatorio geodetico IGOA (Italian Geodetic Observatory in Antarctica) è stata inoltre eseguita la manutenzione

del mareografo di Baia Terra Nova, i cui dati sono essenziali per definire un modello di marea locale non basato esclusivamente su previsioni armoniche.

3. Elaborazione GNSS e caratterizzazione della risposta mareale

In assenza di una rete regionale densa, e con le stazioni permanenti più vicine situate a distanze dell'ordine di 100 km o superiori dai settori di misura, l'elaborazione segue una strategia Precise Point Positioning con risoluzione intera delle ambiguità di fase (PPP-AR) in modalità cinematica, basata su prodotti precisi di orbite, orologi e bias dei satelliti, con coordinate espresse in ITRF2020. Rispetto alle soluzioni differenziate di rete, l'approccio PPP-AR non richiede stazioni di riferimento prossime né vincoli di rete che potrebbero attenuare segnali spazialmente coerenti; rispetto alle precedenti soluzioni PPP con ambiguità float, riduce la dispersione a breve termine e migliora la stabilità temporale delle serie, aspetto determinante per oscillazioni di piccola ampiezza in prossimità della zona di galleggiamento (Cappuccio et al., 2026). L'adozione di un flusso di elaborazione omogeneo (PRIDE PPP-AR; Geng et al., 2019), applicabile anche alla rielaborazione dei dati storici, favorisce inoltre la confrontabilità tra campagne acquisite a distanza di anni con strumentazioni e software differenti. Il controllo di qualità comprende la verifica della continuità delle sessioni, l'individuazione di salti e lacune e la valutazione del rumore residuo prima della modellazione.

Le serie di coordinate GNSS sono analizzate nelle componenti locali nord, est e verticale (Up) e, per l'interpretazione glaciologica, proiettate anche lungo e trasversalmente alla direzione media di scorrimento. Le analisi del rapporto tecnico ICEGIANT si basano su serie campionate nominalmente ogni cinque minuti e sul confronto con una previsione mareale per l'area della Stazione Mario Zucchelli. Per separare andamento medio e oscillazioni periodiche è stato adottato un modello costituito da termine lineare e due armoniche diurne principali, con periodi di circa 25,714 e 24 ore. L'ampiezza della risposta e la frazione di variabilità spiegata dal modello (R^2) descrivono le differenze fra i punti della rete: si tratta di indicatori di risposta cinematica alla marea, non di misure dirette del livello oceanico sotto ogni stazione.

La risposta verticale appare nettamente differenziata. La stazione ICF1, nel settore prossimo alla transizione con il ghiaccio ancorato, mostra una relazione mareale debole ($R^2 = 0,04$; rapporto composito di ampiezza = 0,02). DA06 presenta un comportamento intermedio ($R^2 = 0,37$; rapporto = 0,08). Al contrario, stazioni sulla lingua flottante quali DA2B e DR8C raggiungono rispettivamente $R^2 = 0,83$ e 0,86, con rapporti di ampiezza prossimi all'unità. Nei settori flottanti la variabilità Up risulta quindi largamente spiegata dalle oscillazioni diurne, mentre le componenti orizzontali presentano in generale una risposta periodica più contenuta. Questo contrasto è coerente con la diversa condizione dinamica dei settori attraversati dalla rete.

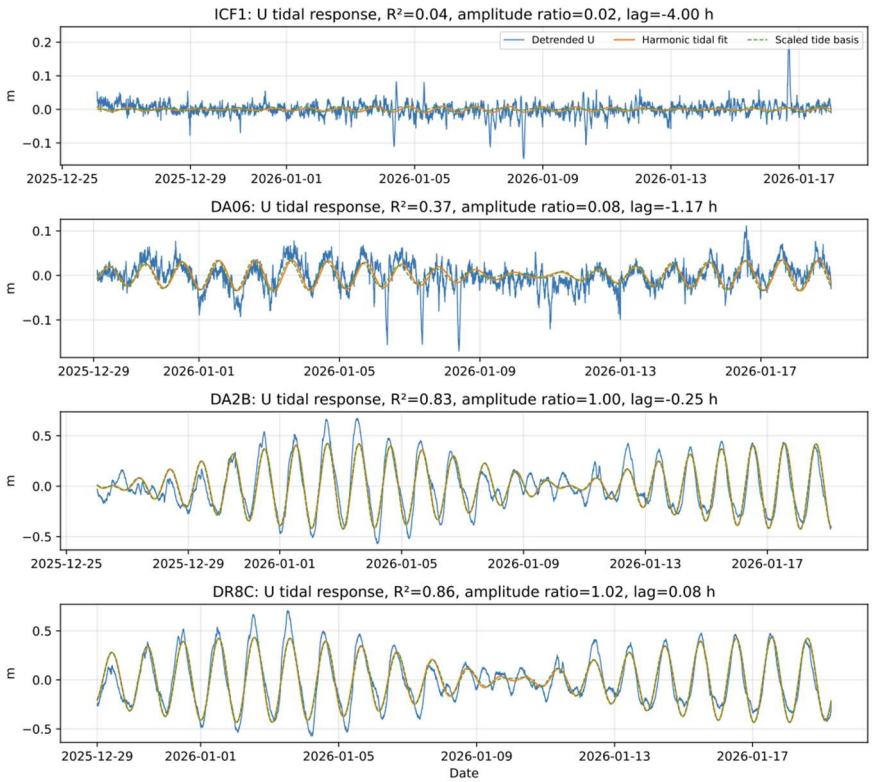


Figura 2 – Esempi di serie verticali GNSS de-trendizzate e ricostruzioni armoniche: ICF1 e DA06 rispetto a DA2B e DR8C.

4. Differenze cinematiche spaziali e aspetti interpretativi

La distribuzione delle velocità orizzontali lungo il corridoio glaciale descrive una progressiva accelerazione verso valle. Il rapporto tecnico indica velocità medie settoriali prossime a 516 m/anno nel gruppo DA2 e a 730 m/anno nel settore DR8, fino a circa 750 m/anno in corrispondenza di DRY7. La comparazione con valori pubblicati per il sistema suggerisce un comportamento compatibile con quello di una lingua flottante a rapido scorrimento; ogni confronto storico richiede tuttavia cautela per le diverse epoche di osservazione, coperture spaziali e tecniche impiegate.

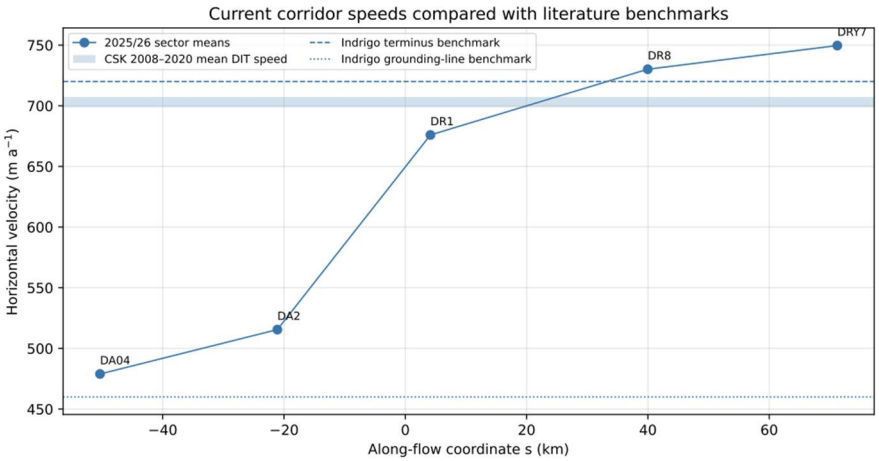


Figura 3 – Velocità orizzontali settoriali della campagna 2025–2026 lungo il flusso e confronto indicativo con riferimenti bibliografici.

L'organizzazione in triplette trasversali consente inoltre di esaminare differenze cinematiche laterali. Nel settore DA2 emerge un gradiente trasversale positivo della velocità lungo flusso (circa 4,35 × 10^{-5} giorno^{-1}), mentre nel settore DR8 risultano relativamente più evidenti le variazioni della componente trasversale. La quasi collinearità delle stazioni, però, rende mal condizionata l'inversione completa del tensore bidimensionale dei gradienti: i risultati sono pertanto interpretati come indicatori monodimensionali, non come misure complete dello stato deformativo. Anche l'analisi di differenze verticali dopo sottrazione delle armoniche mareali richiede una lettura prudente: nel transetto DA2 emergono residui differenziali interessanti, ma la breve durata e le correzioni locali ancora necessarie non consentono di convertirli in stime affidabili di assottigliamento o fusione basale.

5. Integrazione con sismologia e telerilevamento SAR

L'integrazione fra dati GNSS e sismici rappresenta la fase successiva del progetto. La registrazione broadband potrà contribuire a distinguere episodi legati alla fratturazione del ghiaccio, alla dinamica di scorrimento e ai processi prossimi all'interfaccia ghiaccio–substrato; l'analisi congiunta di eventi sismici, velocità GNSS e oscillazioni mareali permetterà di cercare eventuali correlazioni temporali senza assumerle a priori. Parallelamente, il telerilevamento SAR mediante offset tracking e, dove la coerenza delle scene lo consenta, interferometria, sarà utilizzato per costruire campi spazialmente continui di movimento e deformazione. Le misure GNSS serviranno come riferimento indipendente per il controllo dei prodotti satellitari, mentre l'estensione areale SAR aiuterà a contestualizzare le differenze osservate nei transetti.

5.1 Analisi sismologica

Il trattamento preliminare dei dati sismici continui è orientato a ottenere descrittori confrontabili con le serie geodetiche: dalle registrazioni di velocità del suolo vengono derivate serie orarie della densità spettrale di potenza (PSD) e della relativa frequenza di picco. Poiché la marea può modulare tutti questi segnali, sia le serie GNSS sia gli spostamenti al suolo sono trattati con uno stesso modello di regressione rispetto alla previsione di marea, che comprende un termine in fase (risposta elastica), un termine quadratico (risposta non lineare) e le derivate temporali prima e seconda (ritardi di fase). L'applicazione di un modello identico a grandezze fisicamente diverse consente di confrontare i residui su una base comune, in particolare per coppie di stazioni sismiche e GNSS vicine fra loro. Le prime verifiche indicano che questo confronto è informativo e meritevole di approfondimento, anche mediante la stima di variazioni di deformazione e di sforzo a partire dalle serie di velocità; i risultati saranno oggetto di una pubblicazione dedicata. Sul lungo periodo, i dati contribuiranno ad aggiornare il catalogo della sismicità del David Glacier e a individuare eventuali transitori legati a variazioni dell'idrologia subglaciale.

5.2 Telerilevamento SAR

La componente satellitare si basa principalmente sull'archivio Sentinel-1 in modalità Interferometric Wide Swath, che fornisce acquisizioni regolari con rivisitazione di 6–12 giorni lungo il margine antartico. L'offset tracking, basato sull'ampiezza delle immagini, è adatto ai settori a rapido scorrimento ma risente delle striature ionosferiche tipiche delle alte latitudini; l'interferometria differenziale, più accurata nei settori lenti, è limitata dalla perdita di coerenza dove gli spostamenti tra acquisizioni successive sono elevati o dove sono attivi processi di fusione superficiale. Il forte contrasto di velocità tra il flusso glaciale e gli affioramenti rocciosi circostanti costituisce un ulteriore elemento critico per la co-registrazione. In questo quadro le serie GNSS svolgono un duplice ruolo: riferimento indipendente per la validazione dei campi di velocità e fonte di informazione sulla variabilità di breve periodo che i campi mediati su più giorni non possono risolvere. L'esperienza maturata con immagini COSMO-SkyMed Stripmap, il cui confronto con le velocità GNSS aveva mostrato un buon accordo (Vittuari et al., 2023), costituisce la base per l'estensione a serie temporali dense. Le coordinate delle stazioni, comprese quelle collocate in posizioni già misurate in passato, saranno inoltre utilizzate come punti di controllo per il modello altimetrico REMA (Howat et al., 2019), impiegato come superficie di riferimento per l'elaborazione SAR e, con ipotesi sulla densità del ghiaccio e dell'acqua marina, per una stima idrostatica dello spessore immerso della lingua.

6. Indicazioni metodologiche per la geomatica in ambiente polare

Al di là degli specifici risultati glaciologici, l'esperienza di ICEGIANT fornisce alcune indicazioni di interesse generale per la geomatica applicata ad ambienti estremi. In primo luogo, l'integrazione di tecniche eterogenee richiede un'armonizzazione

esplicita dei riferimenti: un sistema di riferimento globale comune per le soluzioni GNSS e i prodotti SAR, una scala temporale unica per serie geodetiche e registrazioni sismiche, e una descrizione coerente della forzante mareale, basata su previsioni armoniche e, ove disponibili, su osservazioni mareografiche locali. In secondo luogo, la geometria della rete va progettata in funzione delle grandezze da stimare: transetti trasversali e longitudinali favoriscono il confronto tra settori, ma la stima completa di gradienti di velocità bidimensionali richiede configurazioni non collineari, da considerare nella pianificazione delle prossime installazioni. Infine, la combinazione di stazioni ad alta risoluzione temporale ma copertura puntuale con prodotti satellitari a copertura areale ma rivisitazione più rada suggerisce un modello di monitoraggio multi-scala, nel quale ciascuna tecnica valida e completa le altre. I dataset prodotti, corredati da metadati di stazione e di elaborazione, sono destinati a costituire un riferimento quantitativo per il confronto con future osservazioni e con i modelli di dinamica glaciale.

7. Conclusioni e prospettive

ICEGIANT ha realizzato un'infrastruttura di osservazione multiparametrica in uno dei settori glaciali più dinamici dell'Antartide orientale. Le prime analisi GNSS descrivono una netta transizione nella risposta verticale alla marea tra settore prossimo all'ancoraggio e lingua flottante, un aumento delle velocità lungo flusso e differenze laterali che potranno guidare successive analisi deformative. I risultati documentano già il valore della rete per la geomatica polare, ma indicano anche limiti interpretativi da rispettare: la risposta mareale non coincide con la fusione basale e la geometria delle triplette non risolve da sola un campo deformativo bidimensionale completo. Le quattro postazioni GNSS e le tre stazioni sismiche lasciate in sito, insieme al futuro confronto con i prodotti SAR, permetteranno di verificare la persistenza di questi segnali e di approfondire i meccanismi responsabili delle variazioni osservate.

Le prossime fasi prevedono il recupero, nella campagna 2026–2027, delle stazioni GNSS e sismiche lasciate in sito, che consentirà di estendere l'analisi a più cicli mareali quattordicinali, di verificare l'eventuale presenza di segnali stagionali e di confrontare, nei siti rioccupati, le velocità attuali con quelle delle campagne storiche. Parallelamente proseguiranno l'analisi congiunta geodetico-sismica e l'elaborazione delle serie Sentinel-1, con l'obiettivo di passare da una descrizione per punti e transetti a una lettura spazialmente continua della dinamica del sistema.

Ringraziamenti

I risultati presentati in questo articolo sono stati ottenuti nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA), che ha fornito supporto finanziario e logistico nell'ambito del Progetto ICEGIAN PNRA0000060.

Bibliografia

Cappuccio, M., Del Ciondolo, G., Zanutta, A., Negusini, M., Mokhtari, S., Gandolfi, S., & Vittuari, L. (2026). Impact of PPP ambiguity resolution on Antarctic glacier GNSS time series: Comparison with network-based and PPP ambiguity-float solutions. In *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2026_359.

Danesi, S., Salimbeni, S., Borghi, A., Urbini, S., Zirizzotti, A., & Frezzotti, M. (2025). Ice mass discharge through the Antarctic subglacial hydrographic network as a trigger for cryoseismicity. *Journal of Glaciology, 71*, e89. https://doi.org/10.1017/jog.2025.10062.

Frezzotti, M., Tabacco, I. E., & Zirizzotti, A. (2000). Ice discharge of eastern Dome C drainage area, Antarctica, determined from airborne radar survey and satellite image analysis. *Journal of Glaciology, 46*(153), 253–264. https://doi.org/10.3189/172756500781832855.

Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., & Zhang, K. (2019). PRIDE PPP-AR: An open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions, 23*, 91. https://doi.org/10.1007/s10291-019-0888-1.

Howat, I. M., Porter, C., Smith, B. E., Noh, M.-J., & Morin, P. (2019). The Reference Elevation Model of Antarctica. *The Cryosphere, 13*, 665–674. https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019.

Indrigo, C., Dow, C. F., Greenbaum, J. S., & Morlighem, M. (2021). Drygalski Ice Tongue stability influenced by rift formation and ice morphology. *Journal of Glaciology, 67*(262), 243–252. https://doi.org/10.1017/jog.2020.99.

Rignot, E. (2002). Mass balance of East Antarctic glaciers and ice shelves from satellite data. *Annals of Glaciology, 34*, 217–227. https://doi.org/10.3189/172756402781817419.

Vittuari, L., Zanutta, A., Lugli, A., Martelli, L., & Dubbini, M. (2023). Sea tide influence on ice flow of David Drygalski's Ice Tongue inferred from geodetic GNSS observations and SAR offset tracking analysis. *Remote Sensing, 15*(8), 2037. https://doi.org/10.3390/rs15082037.

SpaceSUITE: una visione strategica per lo sviluppo delle competenze a supporto della Space Economy

Milva Carbonaro[1], Giacomo Martirano[2] e Lisa Bilotti[2]

[1] GISIG, m.carbonaro@gisig.it
[2] Epsilon Italia, g.martirano@epsilon-italia.it, l.bilotti@epsilon-italia.it

Abstract. Il progetto Erasmus+ SpaceSUITE (2024-2027) mira ad allineare domanda e offerta di competenze nel settore *space downstream*. A tal fine, sta sviluppando un'offerta formativa a partire da un'analisi dei fabbisogni professionali, integrando principi e strumenti riconosciuti a livello europeo. L'articolo ne illustra approccio e stato di avanzamento, con un approfondimento sul corso per esperto in Agricoltura Digitale, articolato in sei moduli.

Parole chiave: Space Economy, Space downstream, Sviluppo delle competenze, Formazione professionale, Agricoltura Digitale.

1 Introduzione

1.1 La Space Economy e la domanda di nuove competenze

Si definisce **Space Economy** la catena del valore che, partendo dalla ricerca, dallo sviluppo e dalla realizzazione di infrastrutture spaziali abilitanti, arriva alla generazione di prodotti e servizi innovativi a supporto, per esempio, delle telecomunicazioni, del posizionamento e del monitoraggio ambientale. Essa rappresenta una delle più promettenti traiettorie di sviluppo dell'economia mondiale per i prossimi decenni: nel settore spaziale si assiste infatti a una crescita molto rapida delle attività economiche e, di conseguenza, alla creazione di nuove opportunità e prospettive di lavoro e di *business*.

Con il rapido avanzamento delle applicazioni e dei servizi sviluppati a terra a partire dai dati raccolti dai dispositivi in orbita, e grazie all'incremento significativo non solo delle capacità dei satelliti ma anche della disponibilità di dati *in-situ*, per il settore *space downstream* diventa indispensabile adattarsi e sfruttare appieno le opportunità offerte dalle nuove tecnologie. Questa trasformazione del mercato ha generato una nuova domanda di competenze e abilità, nonché di riqualificazione (*reskilling*) e aggiornamento (*upskilling*) della forza lavoro attuale e futura, ritenuti cruciali per assicurare la competitività e l'innovazione del settore spaziale europeo.

Il tema è oggi al centro dell'agenda politica europea. Nel corso della recente *Executive Roundtable on Future Skills* dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), alla quale hanno partecipato diversi partner di SpaceSUITE, è emerso che il settore spaziale europeo cresce di circa il 10% all'anno e che entro il 2030 si prevede una carenza di

circa 42.000 unità di personale a tempo pieno. Il Comitato Economico e Sociale Europeo (CESE) propone l'adozione di un'Agenda europea per le competenze spaziali [5], mentre il rapporto 2026 sul mercato spaziale dell'Agenzia dell'Unione europea per il Programma Spaziale (EUSPA) sottolinea la crescente domanda di competenze integrate, trainata da intelligenza artificiale, trasformazione digitale e convergenza tra le diverse tecnologie spaziali [6].

1.2 Il progetto SpaceSUITE

Per affrontare la sfida di allineare offerta e domanda di competenze e abilità attraverso lo sviluppo di risorse innovative per l'istruzione e la formazione, il 1° gennaio 2024 è stato avviato il progetto Erasmus+ SpaceSUITE (*SPACE downstream Skills development and User uptake through Innovative curricula in Training and Education*, www.spacesuite-project.eu) [7], le cui attività si svolgeranno nel corso di quattro anni, fino al 31 dicembre 2027.

Promosso dalla *Large-scale Skills Partnership* su *Space Data, Services and Applications* denominata SPACE4GEO (www.space4geo.eu), il progetto sostiene gli obiettivi dell'iniziativa europea "Patto per le competenze" (*Pact for Skills*) e si fonda sull'esperienza del precedente progetto Erasmus+ EO4GEO (www.eo4geo.eu), con il fine di aggiornare il *Body of Knowledge* (corpus strutturato delle conoscenze) sull'Osservazione della Terra e l'informazione geografica (*Earth Observation and Geographic Information*), estendendolo ai campi del posizionamento, navigazione e sincronizzazione temporale (*Positioning, Navigation and Timing*, PNT) e dei sistemi globali di navigazione satellitare (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS), nonché delle comunicazioni satellitari (*Satellite Communication*, SatCom). Il *Body of Knowledge* così esteso, la cui gestione è stata rafforzata attraverso un gruppo di lavoro dedicato, è oggi denominato *GeoSpace Body of Knowledge* ed è consultabile all'indirizzo geospacebok.eu [8].

Il consorzio riunisce istituzioni accademiche, centri di ricerca, enti di formazione professionale, associazioni di settore, enti governativi e rappresentanti dell'industria, ai quali si affiancano partner associati, prevalentemente enti pubblici locali e regionali, destinatari e promotori a livello territoriale delle soluzioni sviluppate.

2 Obiettivi e metodologia

2.1 Obiettivi

SpaceSUITE mira a colmare il divario tra offerta e domanda di competenze e abilità, facilitandone l'acquisizione. Partendo dalla raccolta e dall'analisi dettagliata dei bisogni esistenti e delle tendenze tecnologiche, economiche e sociali dominanti, il progetto individua i principali profili occupazionali richiesti dal mercato, nonché quelli emergenti. Le conoscenze necessarie per tali profili costituiscono la base per definire i fabbisogni formativi e progettare un'offerta educativa in grado di formare, aggiornare

o riqualificare le risorse umane chiamate a ricoprirli. I materiali e gli strumenti innovativi sviluppati vengono resi disponibili all'intera comunità interessata.

I beneficiari dei risultati del progetto sono professionisti, imprenditori, docenti, neolaureati e studenti, figure essenziali per il successo del Programma Spaziale dell'Unione europea e per l'ulteriore espansione del settore *space downstream*.

2.2 Dalla skills intelligence alla progettazione curricolare

Una valutazione completa delle competenze e abilità attualmente offerte dal sistema di istruzione e formazione, e l'identificazione delle lacune rispetto alle necessità del mercato del lavoro, sono fondamentali per progettare in modo efficace nuovi *curricula* destinati all'istruzione superiore (*Higher Education*) e alla formazione professionale (*Vocational Education and Training*). A tal fine il progetto si avvale della cosiddetta *skills intelligence*, un processo guidato da esperti che comprende la raccolta, l'analisi, la sintesi e la presentazione di informazioni quantitative e qualitative sulle competenze e sul mercato del lavoro [1].

Le informazioni derivano dall'analisi dei dati sull'offerta formativa e sugli annunci di lavoro raccolti nel 2024 e nel 2025, che restituisce segnali ampi di mercato, e dalle interviste a esperti, che consentono di approfondire lacune di competenze, competenze trasversali ed emergenti. I dati sono stati condivisi con i responsabili della classificazione europea di abilità, competenze, qualifiche e occupazioni (*European Skills, Competences, Qualifications and Occupations*, ESCO) e con la Direzione Generale Industria della Difesa e lo Spazio della Commissione europea (DG DEFIS), per contribuire all'aggiornamento dei profili occupazionali. La prima versione della Strategia delle competenze del settore, approvata in occasione della revisione intermedia del progetto, sarà aggiornata nell'ultimo anno di attività.

Per tradurre le informazioni raccolte in percorsi formativi, il progetto adotta il metodo delle *personas*, profili astratti di potenziali discenti caratterizzati da insiemi specifici di attributi, considerato efficace per la progettazione di risorse per lo sviluppo professionale nei settori dell'ingegneria e della tecnologia [2, 3]. Nella prima fase del progetto sono state definite quattro *personas* (un analista di dati di Osservazione della Terra, un tecnico GNSS, un ingegnere di sistemi per le comunicazioni satellitari e un formatore della formazione professionale), messe in relazione con i profili ESCO [4]. Per la fase attuale è in via di finalizzazione un modello di *persona* "empatica", finalizzato a comprendere gli obiettivi, i traguardi, le aspirazioni, i valori e le paure dei discenti di riferimento, affiancato da un modello che guida il passaggio dalla *persona* ai contenuti formativi, così da garantire la coerenza degli obiettivi di apprendimento con ESCO, con il Quadro europeo delle qualifiche (*European Qualifications Framework*, EQF), con la Classificazione internazionale standard dell'istruzione (*International Standard Classification of Education*, ISCED) e con i modelli di riferimento per la valutazione dell'apprendimento (*Learning-Transfer Evaluation Model*, LTEM) e la tassonomia di Bloom.

3 Dalla risposta reattiva alla risposta proattiva

L'offerta formativa del progetto è sperimentata attraverso azioni di formazione organizzate in due fasi. La prima, denominata "risposta reattiva" (*reactive response*) e conclusa all'inizio del 2025, mirava a rispondere ai bisogni formativi più urgenti per le figure professionali già altamente richieste:

- Esperto di sistemi globali di navigazione satellitare (*GNSS Engineer*);
- Analista di dati di Osservazione della Terra (*EO Data Analyst*);
- Ingegnere di sistemi (*Systems Engineer*);
- Docenti di scuole e istituti professionali e relativi formatori.

L'obiettivo complessivo del progetto è lo sviluppo di 50 pacchetti formativi entro la sua conclusione. Al giugno 2026 risultano sviluppati 11 pacchetti formativi ed erogate 11 offerte formative (6 nell'ambito della risposta reattiva e 5 nell'ambito della risposta proattiva); alcuni corsi sono stati erogati più volte e alcuni rappresentano casi di replica (*multiplication*). Un esempio è la replica in Navarra (Spagna) del corso sull'uso dell'Osservazione della Terra per la gestione degli edifici, tenuta il 15 giugno 2026 presso Tracasa Global da personale dell'azienda che aveva partecipato come discente al corso originale, concepito secondo la logica della formazione dei formatori (*Train-the-Trainer*). A livello di scuola secondaria e di formazione professionale sono inoltre già state realizzate azioni formative quali *Earth from Above* e *GPS in Action*.

La seconda fase, denominata "risposta proattiva" (*proactive response*) e attualmente in corso, è finalizzata a formare le figure professionali emergenti. Nel gennaio 2026 il consorzio ha selezionato quattro ambiti tematici prioritari (*topics in demand*), sulla base dei contributi dichiarati dai partner e della fattibilità entro i tempi del progetto. Ciascun ambito è affidato a un gruppo di lavoro dedicato:

- Agricoltura Digitale, coordinato da Epsilon Italia (IT);
- PNT moderno, resiliente e sicuro, coordinato dalla Universitat Politècnica de Catalunya (ES);
- Resilienza urbana, comprendente temi quali le isole di calore urbane e il monitoraggio delle infrastrutture basate sulla natura, coordinato dalla Katholieke Universiteit Leuven (BE);
- Cambiamenti climatici ed eventi estremi, coordinato congiuntamente da FDC (FR) e CICA, Consorzio Italiano per la Copernicus Academy (IT) .

I *topics in demand* orientano anche la scelta dei gruppi destinatari, rispondendo inoltre alla richiesta della DG DEFIS di una forte attenzione all'integrazione di temi legati alla sicurezza e alla difesa. All'interno del consorzio vi è ampio consenso sul fatto che non sia semplice individuare singoli profili occupazionali da formare, poiché le transizioni verde e digitale costituiscono una tendenza generale che interessa i diversi settori in modo trasversale. Per questo motivo i profili prioritari per l'aggiornamento e la riqualificazione vengono definiti da ciascun gruppo di lavoro insieme agli sviluppatori dei contenuti formativi, e potranno a loro volta contribuire a integrare i profili ESCO con competenze specifiche del settore spaziale.

Nel periodo marzo-giugno 2026 le attività sono passate dalla pianificazione alla progettazione concreta dei *curricula*. Il gruppo sui cambiamenti climatici sta finalizzando un percorso di 6 moduli e 38 lezioni, il cui sviluppo è iniziato a settembre

2026; il gruppo sulla resilienza urbana adatterà ed estenderà materiali già sviluppati nella risposta reattiva; per il PNT moderno, resiliente e sicuro è stato progettato il modulo sulle vulnerabilità dei sistemi GNSS e delle comunicazioni ed è stato individuato un nuovo tema di frontiera, la navigazione lunare. In parallelo è stato avviato lo sviluppo di formazione sulle competenze trasversali.

4 L'esempio del corso per esperto di Agricoltura Digitale

4.1 Struttura del percorso

Il gruppo di lavoro sull'Agricoltura Digitale è il più avanzato tra quelli della risposta proattiva, anche perché le attività su questo tema erano già state avviate prima della selezione formale dei *topics in demand*. Il corso intende rispondere alla crescente domanda di profili professionali in grado di utilizzare dati spaziali e tecnologie correlate per ottimizzare i processi agricoli. In particolare, l'obiettivo è quello di formare il profilo professionale di un esperto di Agricoltura Digitale, che possegga le competenze di base relative alle tecnologie del settore *space downstream* (EO, GI, PNNT, SatCom) e alla loro applicazione al suolo e alla vegetazione. Tale figura è pensata per supportare, in team con altri esperti come agronomi e sviluppatori tecnologici, gli agricoltori nell'affrontare le sfide che causano una ridotta competitività dei loro prodotti (cambiamento climatico, modifiche al quadro normativo in ambito agricolo, scarsa conoscenza delle nuove tecnologie).

Il corso ha un livello EQF pari a 5 e non prevede particolari prerequisiti, se non competenze di base nell'utilizzo di software quali QGIS.

Il percorso formativo è strutturato in sei moduli, che accompagnano il discente dalle basi tecnologiche fino alle tendenze future, passando per le applicazioni su suolo e vegetazione, il supporto alle decisioni sul campo e il quadro normativo. In totale sono state progettate 27 unità didattiche (*lectures*), della durata complessiva di circa 3 settimane, sintetizzate in **Tabella 1**.

Tabella 1. Struttura del corso per esperto di Agricoltura Digitale: moduli e unità didattiche.

Modulo	Unità didattiche
1 – Tecnologie	Fondamenti di scienza del suolo; basi del monitoraggio della vegetazione; principi e tecnologie degli algoritmi di intelligenza artificiale; basi delle tecnologie EO, dei sistemi GNSS e delle comunicazioni satellitari; panoramica delle tecniche di posizionamento GNSS; sistemi informativi geografici (GIS) per l'Agricoltura Digitale.
2 – Suolo	Mappatura del carbonio nel suolo mediante apprendimento automatico e serie temporali di dati EO; mappatura dell'umidità e della struttura del suolo da dati EO.
3 – Vegetazione	Mappatura del vigore delle colture tramite indici di vegetazione; fusione di dati satellitari e da drone (UAV) per il monitoraggio delle colture; applicazioni GNSS per la gestione della vegetazione; monitoraggio in

	tempo reale abilitato dalle comunicazioni satellitari; integrazione di EO, GNSS, comunicazioni satellitari e intelligenza artificiale per la gestione digitale della vegetazione.
4 – Supporto alle decisioni a livello di campo	Dimostrazioni di soluzioni operative (Agricolus, Agriconsulting, iFarming); strumenti per la digitalizzazione dell'agricoltura in prospettiva agronomica.
5 – Aspetti normativi	Controlli a livello di parcella nell'ambito della Politica Agricola Comune (PAC); quadro normativo europeo per l'agricoltura; quadro normativo europeo per certificazione, etichettatura e tracciabilità nel settore agroalimentare.
6 – Tendenze future	Nuovi prodotti satellitari per l'agricoltura; mappe di umidità del suolo ad alta risoluzione; gemelli digitali (*digital twins*) per la profilazione e la previsione dell'umidità del suolo; tecniche avanzate di radar ad apertura sintetica (SAR) per la stima quantitativa di parametri agricoli; il servizio ad alta precisione di Galileo (*High Accuracy Service*) e le sue implicazioni per l'agricoltura di precisione.

Il primo modulo fornisce le basi comuni necessarie a un pubblico eterogeneo, coerentemente con l'esigenza, emersa nel progetto, di rendere il *Body of Knowledge* e i percorsi formativi accessibili anche ai non esperti, in particolare a chi proviene da settori diversi da quello spaziale. Il discente acquisisce i fondamenti agronomici (suolo e vegetazione) e quelli delle tre componenti spaziali trattate dal progetto (Osservazione della Terra, GNSS e comunicazioni satellitari), oltre che dei sistemi informativi geografici e dell'intelligenza artificiale.

I moduli 2 e 3 declinano tali basi in applicazioni concrete sul suolo e sulla vegetazione, con un'impostazione che mira all'integrazione delle diverse tecnologie: dalla stima di carbonio e umidità del suolo con tecniche di apprendimento automatico, fino all'uso combinato di dati satellitari, da drone, di posizionamento e di comunicazione per la gestione digitale delle colture. Il modulo 4 porta in aula strumenti operativi di supporto alle decisioni già utilizzati nella pratica agricola, attraverso dimostrazioni dedicate, mentre il modulo 5 colloca le competenze tecniche nel quadro normativo europeo, dai controlli previsti dalla PAC fino a certificazione, etichettatura e tracciabilità dei prodotti agroalimentari. Il modulo 6, infine, apre lo sguardo alle tendenze future, tra cui nuovi prodotti satellitari, gemelli digitali, tecniche SAR avanzate e il servizio ad alta precisione del sistema europeo di navigazione satellitare Galileo.

4.2 Materiali, valutazione e certificazione

Per ciascuna unità didattica sono previsti materiali in forma di presentazioni PowerPoint e di videolezioni, oltre ad attività e prove per la verifica del raggiungimento degli obiettivi formativi. Le modalità di valutazione individuate (a livello di modulo o di singola unità didattica) variano in funzione dei contenuti e comprendono questionari a scelta multipla e quiz finali online, eventualmente integrati da brevi problemi,

dimostrativo non è prevista una valutazione formale. Quanto alla certificazione, per alcuni moduli si prevede il rilascio di micro-credenziali in linea con le Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea relativa a un approccio europeo alle micro-credenziali per l'apprendimento permanente e l'occupabilità [9]. Per micro-credenziale si intende la registrazione dei risultati di apprendimento ottenuti da un discente a seguito di un piccolo volume di apprendimento. Esse consentono l'acquisizione mirata e flessibile di conoscenze, abilità e competenze per soddisfare le esigenze nuove ed emergenti della società e del mercato del lavoro. Caratteristica fondamentale è che tali risultati di apprendimento siano valutati in base a criteri trasparenti e definiti in modo chiaro e rigoroso.

Allo scopo di offrire una solida base per la valutazione dei risultati di apprendimento e, di conseguenza, consentire un rigoroso processo di certificazione, molta attenzione è stata dedicata alla definizione degli obiettivi formativi. Il gruppo di lavoro sull'Agricoltura Digitale ha formalizzato, utilizzando la Tassonomia di Bloom, obiettivi formativi a livello di singola unità didattica e a livello di modulo. La definizione degli obiettivi formativi guida inoltre lo sviluppo dei materiali formativi e la scelta di modalità di valutazione adeguate. Attualmente, lo sviluppo dei materiali formativi dell'offerta formativa è in corso, con un livello di completamento pari a circa il 70%. Il completamento è atteso per la fine del 2026, cui seguirà una fase di assicurazione della qualità dei materiali. Coinvolti nella produzione dei materiali formativi sono undici formatori, appartenenti a sei partner del progetto SpaceSUITE.

L'erogazione del corso è prevista per l'inizio del 2027, mentre le attività di annuncio, comunicazione e coinvolgimento dei potenziali discenti sono previste già a partire dall'ultimo trimestre del 2026.

Il programma è quello di offrire il corso su piattaforma di Learning Management System (LMS) in modalità di fruizione asincrona. I materiali formativi saranno disponibili in lingua inglese. La durata prevista è di circa due settimane. Le modalità di iscrizione avverranno tramite il sito di progetto.

I materiali sviluppati per il corso di Agricoltura Digitale e per gli altri *topics in demand* andranno ad arricchire un archivio di risorse educative e formative, l'*Open Space Academy*, a cui discenti e formatori potranno accedere anche dopo la conclusione del progetto e in cui sarà possibile essere guidati nella scelta del percorso formativo più adeguato alle proprie esigenze.

5 Conclusioni

Il contributo ha offerto una panoramica del progetto SpaceSUITE, descrivendone obiettivi, metodologia e stato di avanzamento a metà del suo percorso. Conclusa la risposta reattiva, rivolta ai profili già altamente richiesti, il progetto sta ora concentrando i propri sforzi sulla risposta proattiva, articolata in quattro *topics in demand*: Agricoltura Digitale, PNT moderno, resiliente e sicuro, resilienza urbana, cambiamenti climatici ed eventi estremi.

Il corso per esperto di Agricoltura Digitale rappresenta l'esempio più maturo di questo approccio: un percorso in sei moduli che integra Osservazione della Terra, sistemi GNSS, comunicazioni satellitari e intelligenza artificiale con le conoscenze agronomiche, gli strumenti operativi di supporto alle decisioni e il quadro normativo europeo, con l'obiettivo di formare figure capaci di operare all'intersezione tra settore spaziale e agricolo.

L'obiettivo finale del progetto resta la definizione di un Piano d'azione a lungo termine, con misure concrete per il potenziamento delle competenze nel medio e lungo periodo, fondato su una Strategia delle competenze di settore condivisa e integrata, e il consolidamento di attività continue di *skills intelligence* che costituiscano una sorta di osservatorio permanente delle competenze per il settore *space downstream*.

Nota
Il progetto SpaceSUITE è co-finanziato dall'Unione europea. Le opinioni espresse appartengono, tuttavia, al solo o ai soli autori e non riflettono necessariamente le opinioni dell'Unione europea o dell'Agenzia esecutiva europea per l'istruzione e la cultura (EACEA). Né l'Unione europea né l'EACEA possono esserne ritenute responsabili.

Riferimenti bibliografici

1. CEDEFOP – European Centre for the Development of Vocational Training: Crafting skills intelligence, https://www.cedefop.europa.eu/en/blog-articles/crafting-skills-intelligence.
2. Madsen, A., et al.: Personas as a Powerful Methodology to Design Targeted Professional Development Resources. In: Learning and Becoming in Practice: The International Conference of the Learning Sciences (ICLS), vol. 2, pp. 1082-1086. Boulder, CO (2017).
3. Ozkan, D., Reeping, D., McNair, L., Martin, T., Harrison, S., Lester, L., Knapp, B., Wisnioski, M., Patrick, A., Baum, L.: Using Personas as Curricular Design Tools: Engaging the Boundaries of Engineering Culture. In: IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) (2019), https://doi.org/10.1109/FIE43999.2019.9028358.
4. Hofer, B., Casteleyn, S., Aguilar-Moreno, E., Missoni-Steinbacher, E.-M., Albrecht, F., Lemmens, R., Lang, S., Albrecht, J., Stelmaszczuk-Górska, M., Vancauwenberghe, G., Monfort-Muriach, A.: Complementing the European earth observation and geographic information body of knowledge with a business-oriented perspective. Transactions in GIS (2020), https://doi.org/10.1111/tgis.12628.
5. EESC – European Economic and Social Committee: The EU Space Act: Catalysing Europe's Leap to Global Tech and Economic Power, https://www.eesc.europa.eu/en/news-media/eu-space-act-catalysing-europes-leap-global-tech-and-economic-power.
6. EUSPA – European Union Agency for the Space Programme: EU Space Market Report 2026 (2026).
7. SpaceSUITE Homepage, https://www.spacesuite-project.eu/
8. GeoSpace Body of Knowledge, https://geospacebok.eu/
9. Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 16 giugno 2022 relativa a un approccio europeo alle microcredenziali per l'apprendimento permanente e l'occupabilità, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0627(02)

Esplorare il patrimonio sommerso della regione Puglia: dal progetto Archim3des al portale Andar per Mare

Filiberto Chiabrando[1], Rita Auriemma[2], Andrea Lingua[3], Beatrice Tanduo[1], Edward Borgogno[1], Elisabetta Colucci[1], Francesca Matrone[3], Luigi Coluccia[2], Cristiano Alfonso[2]

[1] Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (Lab G4CH), Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125, Torino (TO) - (filiberto.chiabrando, beatrice.tanduo, edward.borgogno, elisabetta.colucci)@polito.it

[2] Dipartimento Beni Culturali, Università del Salento, Via Dalmazio Birago, 64, Lecce (LE) – (rita.auriemma, luigi.coluccia, cristiano.alfonso)@unisalento.it

[3] Laboratorio di Geomatica, Dipartimento di Ingegneria dell'ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino, Corso Duca Degli Abruzzi 24, 10129, Torino, (TO) - (andrea.lingua, francesca.matrone)@polito.it

Abstract. Il contributo presenta il sistema informativo sviluppato per il patrimonio archeologico marino pugliese nell'ambito dei progetti ARCHIM3DES e Andar per Mare. Attraverso l'integrazione di fonti eterogenee in un geodatabase spaziale condiviso, il sistema permette la gestione e la consultazione delle informazioni archeologiche mediante applicazioni webGIS dedicate alla ricerca scientifica e alla valorizzazione del patrimonio sommerso e costiero.

Parole chiave: Patrimonio culturale sommerso, Geodatabase, WebGIS.

1 Introduzione

Il patrimonio archeologico marino, sommerso e costiero rappresenta una risorsa di grande valore storico e culturale, la cui documentazione, conservazione e valorizzazione richiedono strumenti in grado di confrontarsi con la complessità dei contesti in cui questi beni si trovano. In Puglia, le numerose testimonianze archeologiche distribuite lungo le coste adriatiche e ioniche sono state oggetto, nel corso degli ultimi decenni, di ricerche sistematiche, ricognizioni e campagne di scavo che hanno prodotto una quantità significativa di informazioni, spesso raccolte in archivi e banche dati sviluppati con finalità e modalità differenti. Nonostante la ricchezza della documentazione disponibile, la frammentazione delle fonti e la disomogeneità delle strutture informative ne rendono complessa la gestione integrata, limitando le possibilità di interrogazione, aggiornamento e condivisione dei dati [1].

La necessità di superare queste criticità si inserisce in una riflessione più ampia sul ruolo delle tecnologie geomatiche nella conoscenza e nella valorizzazione del patrimonio sommerso, con particolare attenzione alle potenzialità offerte dai sistemi informativi geografici e dalle piattaforme webGIS, già utilizzati in altri contesti europei per l'organizzazione e la condivisione dei dati archeologici [2]. In questo contesto si

collocano i progetti ARCHIM3DES (*ARchaeological and Cultural Heritage documentation In Marine environment using advanced 3D mEtric Survey techniques*), finanziato nell'ambito del PRIN 2022 [3], e Andar per Mare, dedicati alla promozione del patrimonio archeologico marino e costiero pugliese. Pur perseguendo obiettivi differenti, legati rispettivamente alla ricerca e alla documentazione scientifica e alla fruizione turistico-culturale, i due progetti condividono l'esigenza di organizzare le informazioni disponibili all'interno di un sistema geografico coerente, accessibile e aggiornabile.

Il presente contributo descrive il percorso che, a partire dall'analisi e dall'armonizzazione delle fonti esistenti, ha portato alla realizzazione di un geodatabase spaziale condiviso e allo sviluppo di applicazioni webGIS rivolte a diverse categorie di utenti. L'attenzione si concentra in particolare sull'organizzazione del sistema informativo e sulle modalità attraverso cui i dati archeologici vengono resi disponibili per la consultazione scientifica e la valorizzazione territoriale, evidenziando le relazioni tra le attività sviluppate nell'ambito di ARCHIM3DES e gli strumenti di esplorazione proposti dal portale Andar per Mare.

2 Progettazione e strutturazione del sistema informativo

La progettazione del sistema informativo ha preso avvio dall'analisi delle principali fonti documentali disponibili per il patrimonio archeologico marino della Puglia, con particolare riferimento alla Carta Archeologica Subacquea, sviluppata dall'Università del Salento, e al sistema informativo regionale CartApulia. Le due banche dati presentavano caratteristiche complementari, ma anche differenze significative nella struttura e nell'organizzazione delle informazioni. La Carta Archeologica Subacquea raccoglieva infatti una documentazione descrittiva particolarmente articolata, derivante da fonti bibliografiche e da decenni di attività di ricerca archeologica [4]. Nonostante le precedenti esperienze di pubblicazione cartografica e webGIS [5], nella configurazione analizzata per il progetto la banca dati non disponeva di una gestione pienamente integrata e aggiornabile delle informazioni spaziali. CartApulia consentiva invece la localizzazione geografica dei beni, attraverso un sistema strutturato per la catalogazione del patrimonio culturale regionale, ma non comprendeva tutti gli attributi specifici necessari alla descrizione dei contesti archeologici sommersi.

Il confronto tra le fonti ha evidenziato inoltre alcune incongruenze riconducibili ai differenti processi di aggiornamento, rendendo necessaria un'attività preliminare di verifica e armonizzazione dei contenuti. Tale processo ha previsto l'integrazione delle informazioni descrittive provenienti dalla Carta Archeologica Subacquea con i dati geografici disponibili in CartApulia, utilizzando i codici identificativi comuni per associare gli attributi alle rispettive localizzazioni. Questa operazione ha costituito il punto di partenza per la definizione di un nuovo modello dei dati, concepito per raccogliere le informazioni esistenti all'interno di una struttura condivisa e consentirne una gestione più coerente [1].

Il geodatabase è stato progettato secondo un modello relazionale spaziale, articolato in entità capaci di rappresentare le diverse tipologie di beni archeologici e le relazioni tra di esse. La struttura comprende siti stratificati, siti archeologici, relitti e reperti

decontestualizzati, ai quali sono associate informazioni relative alle rotte, alla documentazione e alla bibliografia. Per le entità destinate alle applicazioni di Andar per Mare sono state inoltre definite le specifiche dei campi, comprendenti denominazione, descrizione, tipologia del dato e corrispondenza con gli standard di catalogazione, ove prevista. La definizione degli attributi ha tenuto conto degli standard nazionali di catalogazione, con particolare riferimento alla scheda SI – Siti archeologici dell'ICCD [6], prevedendo inoltre una struttura bilingue, in italiano e inglese, e l'impiego di vocabolari controllati per garantire maggiore uniformità nella compilazione dei campi. Il modello distingue campi testuali, numerici e temporali, affiancati da liste di valori predefiniti per informazioni ricorrenti, quali la provincia, la collocazione dei beni e la tipologia dei luoghi di interesse, oltre alle denominazioni degli itinerari.

Per quanto riguarda la componente spaziale, è previsto l'utilizzo di coordinate espresse nel sistema di riferimento WGS 84 / UTM zona 33N (EPSG:32633), impiegate per la generazione delle geometrie associate ai siti. La definizione del sistema di riferimento, dei tipi di dato e dei vocabolari controllati contribuisce a rendere esplicite le regole di organizzazione delle informazioni, favorendo la coerenza dei contenuti e la loro possibile interoperabilità con altre banche dati.

Dal punto di vista tecnologico, il sistema è stato sviluppato attraverso l'integrazione di un database spaziale PostgreSQL e strumenti GIS dell'ambiente ArcGIS, secondo un'architettura concepita per favorire l'accesso simultaneo da parte di più utenti autorizzati e l'aggiornamento diretto dei dati nella base comune. Il geodatabase, inizialmente definito nell'ambito della progettazione dei due progetti, è stato successivamente implementato e costituisce oggi la base informativa comune delle applicazioni webGIS realizzate. L'utilizzo di una base centralizzata consente inoltre di superare la precedente organizzazione basata su shapefile separati, il cui aggiornamento richiedeva la sostituzione periodica dei file geografici pubblicati.

Questa organizzazione permette di mantenere una struttura condivisa per la gestione dei dati, differenziando al tempo stesso le informazioni e le modalità di consultazione proposte dalle singole interfacce, in funzione delle esigenze scientifiche e divulgative. La relazione tra le fonti documentali, l'organizzazione del geodatabase e le applicazioni sviluppate nell'ambito dei due progetti è sintetizzata nello schema di Fig. 1.

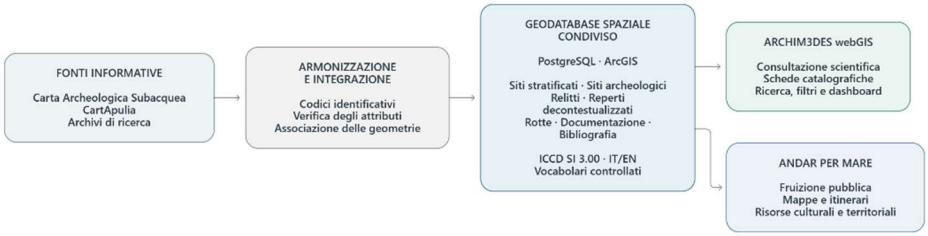


Fig. 1. Schema generale del sistema informativo sviluppato, dall'armonizzazione delle fonti documentali all'organizzazione del geodatabase spaziale condiviso e alla pubblicazione dei dati attraverso le applicazioni webGIS.

3 Implementazione e applicazioni del sistema informativo per la conoscenza e la valorizzazione del patrimonio

L'implementazione del geodatabase ha costituito la base per lo sviluppo di applicazioni webGIS dedicate alla consultazione delle informazioni archeologiche, progettate per rispondere alle differenti finalità dei due progetti. Pur condividendo la medesima infrastruttura informativa, le piattaforme ARCHIM3DES e Andar per Mare presentano infatti modalità di organizzazione e visualizzazione dei contenuti specifiche, che riflettono le esigenze dei rispettivi utenti e i diversi livelli di approfondimento richiesti.

3.1 ARCHIM3DES: un webGIS per la consultazione scientifica

Nell'ambito del progetto ARCHIM3DES è stata realizzata un'applicazione webGIS mediante ArcGIS Experience Builder, finalizzata alla rappresentazione geografica e alla consultazione delle informazioni relative ai relitti archeologici catalogati lungo le coste pugliesi. Le attività di catalogazione hanno interessato complessivamente 96 relitti, per i quali sono state organizzate informazioni archeologiche, localizzazioni geografiche e documentazione disponibile.

L'interfaccia consente di esplorare la distribuzione dei siti attraverso una mappa interattiva, alla quale sono associate una galleria fotografica e schede descrittive contenenti gli attributi disponibili nel database. I beni sono rappresentati cartograficamente mediante elementi puntuali, associati ai rispettivi codici identificativi e alle informazioni alfanumeriche presenti nel geodatabase. La selezione di un relitto, effettuata direttamente sulla mappa oppure attraverso la ricerca per denominazione o codice identificativo, permette di visualizzarne la posizione e di accedere alle informazioni catalografiche, mantenendo un collegamento diretto tra il dato geografico e la relativa documentazione (Fig. 2).

Per agevolare la consultazione di un patrimonio distribuito su un territorio particolarmente esteso, l'applicazione mette inoltre a disposizione filtri per provincia, strumenti di ricerca e funzionalità cartografiche per la gestione dei layer, la scelta delle mappe di base e l'esecuzione di misure. A queste possibilità si affianca una dashboard che consente di rappresentare graficamente alcuni attributi strutturati del database, aggiornando le visualizzazioni in relazione ai beni presenti nell'area selezionata. L'integrazione di tali strumenti permette quindi di affiancare alla consultazione puntuale delle schede una lettura complessiva delle informazioni disponibili, favorendo l'esplorazione dei dati archeologici anche attraverso criteri geografici e tematici.

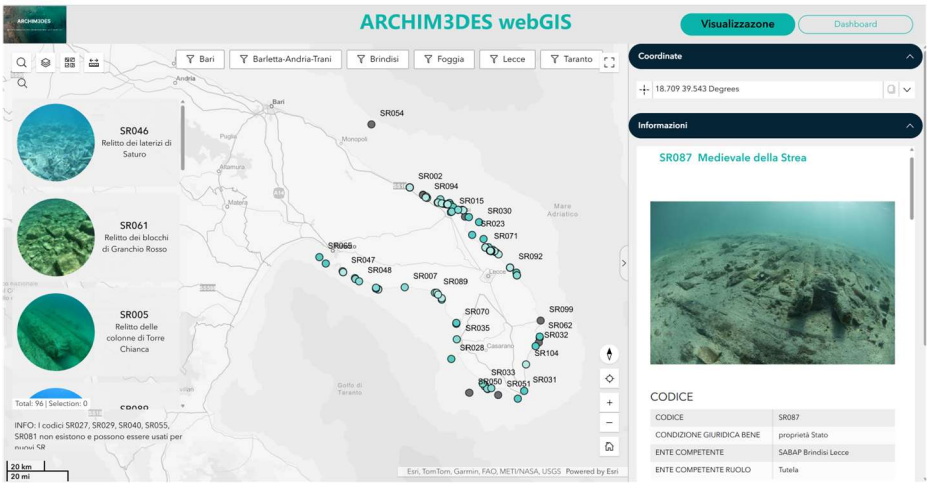


Fig. 2. Interfaccia del webGIS ARCHIM3DES: distribuzione geografica dei relitti archeologici lungo le coste pugliesi, galleria fotografica e consultazione della scheda catalografica di uno dei siti.

3.2 Andar per Mare: dalla documentazione alla fruizione del patrimonio

Le informazioni organizzate nel geodatabase costituiscono anche il riferimento per il portale Andar per Mare, attraverso il quale il patrimonio archeologico marino e costiero viene presentato a un pubblico più ampio, con particolare attenzione alla sua conoscenza e valorizzazione turistico-culturale. Il portale utilizza una selezione delle informazioni relative ai siti archeologici, integrandole con quelle sugli itinerari e sui luoghi di interesse culturale e naturalistico, secondo l'impostazione del modello dei dati descritta in Spreafico et al. [1]. In questo caso, la componente geografica è integrata all'interno di un sito web divulgativo, nel quale le applicazioni webGIS, progettate per la consultazione sia da desktop sia da dispositivi mobili, permettono di esplorare i luoghi di interesse, visualizzarne la distribuzione territoriale e accedere a contenuti descrittivi e fotografici [7].

La mappa interattiva regionale rappresenta uno dei principali strumenti di accesso al patrimonio, consentendo di individuare i siti archeologici e di consultarli attraverso una galleria fotografica collegata alle rispettive localizzazioni. La navigazione può essere progressivamente approfondita a scala locale, dove i singoli beni vengono presentati in relazione al contesto territoriale circostante e alle altre risorse culturali e naturalistiche disponibili. A questa modalità di esplorazione si affianca l'organizzazione dei contenuti in itinerari tematici, che propongono differenti percorsi di conoscenza del patrimonio pugliese, dai paesaggi costieri e dalle testimonianze delle antiche rotte commerciali fino ai beni situati ad alta profondità, difficilmente accessibili attraverso l'esperienza diretta (Fig. 3).

Accanto all'esplorazione dei siti e degli itinerari, il portale comprende una sezione dedicata alla pianificazione della visita, nella quale le informazioni sul patrimonio archeologico vengono integrate con quelle relative a musei, aree marine protette e altre

risorse territoriali. L'organizzazione dei contenuti permette così di mettere in relazione le testimonianze sommerse con i contesti culturali e paesaggistici di riferimento, proponendo differenti possibilità di conoscenza e fruizione del territorio.

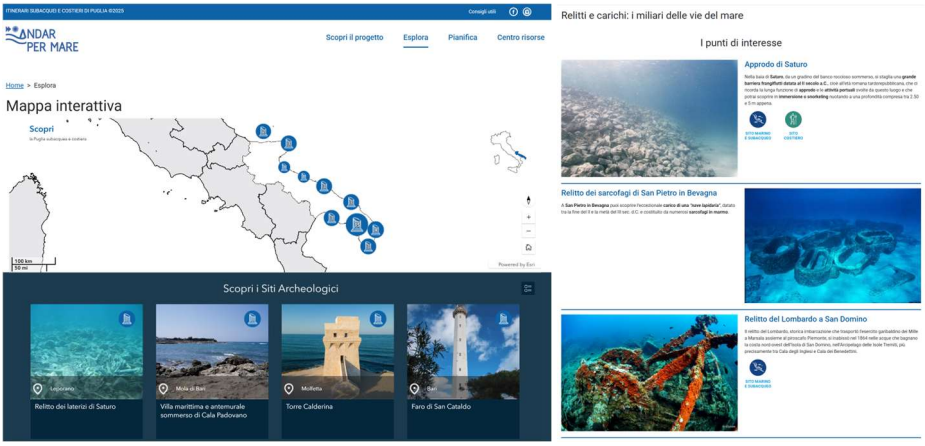


Fig. 3. Portale Andar per Mare: mappa interattiva del patrimonio archeologico sommerso e costiero pugliese, con galleria fotografica dei siti (sinistra); esempio di itinerario tematico, *Relitti e carichi: i miliari delle vie del mare*, con schede descrittive dei punti di interesse (destra).

4 Conclusioni e sviluppi futuri

L'esperienza sviluppata nell'ambito dei progetti ARCHIM3DES e Andar per Mare evidenzia come l'organizzazione delle informazioni archeologiche in un geodatabase spaziale condiviso possa costituire il punto di partenza per applicazioni rivolte a differenti esigenze di consultazione. Il percorso descritto, dalla raccolta e armonizzazione delle fonti fino all'implementazione delle applicazioni webGIS, ha permesso di collegare la documentazione scientifica del patrimonio sommerso alla sua presentazione attraverso strumenti di esplorazione geografica e divulgazione culturale. Le due piattaforme rappresentano quindi modalità complementari di accesso a una medesima base informativa, organizzate secondo differenti livelli di dettaglio e finalità di utilizzo.

L'approccio adottato offre inoltre una base per il progressivo ampliamento e aggiornamento delle informazioni disponibili, attraverso l'integrazione di nuovi dati archeologici e documentali e il consolidamento delle procedure di gestione collaborativa. Ulteriori sviluppi potranno riguardare l'approfondimento dell'interoperabilità con altri sistemi informativi e l'estensione delle modalità di accesso ai contenuti, anche in relazione ai prodotti digitali derivanti dalle attività di documentazione geomatica. In questa prospettiva, la struttura scalabile del geodatabase potrebbe costituire un riferimento metodologico per iniziative analoghe in altri contesti territoriali e, a lungo termine, contribuire allo sviluppo di sistemi condivisi per la gestione integrata del patrimonio archeologico marino anche a livello nazionale.

Riferimenti bibliografici

[1] Spreafico, A., Colucci, E., Chiabrando, F., Auriemma, R.: A Review of Existing Sources for the Design of an Archaeological Underwater Cultural Heritage Database of Puglia Region (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4-2024, 445–452 (2024). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-445-2024.

[2] Vandenbulcke, A., Van Ackere, S., Decock, M., Stal, C., De Wulf, A.: Preservation of the archaeological heritage of the North Sea using webGIS. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM*, pp. 375–382. Stef92 Technology, Sofia (2016).

[3] Antonazzo, A., Alfonso, C., Auriemma, R., Borgogno, E., Chiabrando, F., Colucci, E., Coluccia, L., Lingua, A.M., Maschio, P.F., Matrone, F., Spreafico, A., Tanduo, B.: Il Progetto ARCHIM3DES: ARchaeological and Cultural Heritage documentation In Marine environment using advanced 3D mEtric Survey techniques. *Atti della Conferenza ASITA 2024* (2024).

[4] Auriemma, R.: *Salentum a salo. 2. Forma Maris Antiqui*. Congedo Editore, Galatina (2004).

[5] Cossa, A., Zaccarelli, N., Auriemma, R., Gull, P.: La Carta Archeologica Subacquea della Puglia meridionale. Il Sistema Informativo in Rete. In: *Atti del XIII Convegno Utenti ESRI*, Roma (2012).

[6] Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione (ICCD): *Normativa SI – Siti archeologici. Versione 3.00*. ICCD, Roma.

[7] Andar per Mare: *Itinerari subacquei e costieri di Puglia*. https://andarpermarepuglia.it/, ultimo accesso 14 ottobre 2026.

Condividere i dati 3D del patrimonio culturale: OpenHeritage3D.org

Filiberto Chiabrando[1], Beatrice Tanduo[1], Scott McAvoy[2]

[1] Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (Lab G4CH), Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125, Torino (TO) (filiberto.chiabrando; beatrice.tanduo)@polito.it

[2] Cultural Heritage Engineering Initiative (CHEI), Qualcomm Institute, University of California San Diego, smcavoy@ucsd.edu

Abstract. OpenHeritage3D.org è una piattaforma open-source per archiviare, pubblicare e condividere dati 3D del patrimonio culturale. Conserva dati grezzi e prodotti derivati, consentendo la visualizzazione online di grandi nuvole di punti. Formati aperti, DOI, metadati e paradati garantiscono tracciabilità e favoriscono il riuso scientifico, tecnico e divulgativo, sostenendo la conservazione digitale e l'accessibilità dei rilievi 3D per attività di ricerca, tutela, didattica e valorizzazione.

Parole chiave: patrimonio culturale; rilievo 3D; archivi digitali.

1 Introduzione

La documentazione 3D costituisce oggi una risorsa per conoscere e documentare la geometria dei beni culturali, supportare la valutazione del loro stato di conservazione e fornire basi informative per interventi successivi. Tecniche *image-based* (fotogrammetria terrestre e aerea da drone) e *range-based* (sensori LiDAR fissi e mobili) permettono di acquisire superfici e contesti complessi, producendo immagini, nuvole di punti e modelli 3D con diversi gradi di accuratezza e livelli di dettaglio. La crescente accessibilità di sensori e software amplia la comunità dei produttori, ma rende più eterogenee le procedure di acquisizione, elaborazione e controllo. Un modello visivamente convincente può quindi derivare da processi molto diversi, con implicazioni per la sua accuratezza, l'affidabilità metrica e le analisi quantitative che è possibile condurre a partire dai dati acquisiti.

La pubblicazione del solo prodotto finale risponde a esigenze di comunicazione, ma conserva soltanto una parte del patrimonio informativo del rilievo. Immagini originali, scansioni strutturate, coordinate dei punti di controllo e informazioni sul processo di elaborazione possono diventare difficili da reperire una volta concluso il progetto. La perdita di questi elementi limita la verifica dei risultati, l'integrazione con nuove campagne di rilievo e la possibilità di riprocessare le osservazioni mediante strumenti più evoluti. Il problema riguarda dunque non soltanto la conservazione dei file, ma anche la disponibilità delle informazioni necessarie a interpretarli e riutilizzarli.

OpenHeritage3D affronta questa criticità integrando la conservazione dei dati con la loro accessibilità attraverso il web. Il presente contributo esamina l'organizzazione dell'infrastruttura archivistica della piattaforma e i criteri adottati per documentare i rilievi 3D, con particolare attenzione al ruolo dei metadati e dei paradati [1, 2]. L'obiettivo è evidenziare come questi elementi possano favorire l'interpretazione, la verifica e il riuso scientifico e operativo dei dati nel tempo.

2 Una piattaforma per la pubblicazione di dati 3D

Il progetto OpenHeritage3D.org (OH3D) è una piattaforma open-source per l'archiviazione scientifica e la condivisione di dati 3D del patrimonio culturale, avviata nel 2019 e progettata in collaborazione con architetti, ingegneri, esperti di geomatica, archivisti digitali e specialisti nell'elaborazione e nella visualizzazione di dati 3D. Si tratta di un progetto congiunto sostenuto dalla University of California San Diego, da CyArk e dal Politecnico di Torino.

OH3D collabora con ricercatori, organizzazioni senza scopo di lucro, singoli professionisti ed enti pubblici che realizzano rilievi 3D di importanti siti del patrimonio culturale, offrendo anche a chi non dispone di infrastrutture dedicate la possibilità di conservarne e pubblicarne i dati. Nonostante la crescente diffusione delle tecnologie di rilievo 3D, la condivisione dei dati originali e dei prodotti intermedi rimane meno consolidata rispetto alla pubblicazione di modelli destinati prevalentemente alla visualizzazione. L'aumento delle capacità di elaborazione grafica dei computer, la disponibilità di potenti strumenti open-source per la visualizzazione e il miglioramento dei software di elaborazione hanno favorito il riuso di dati pregressi, a condizione che i file originali e la relativa documentazione fossero stati conservati.

OH3D consente attualmente la pubblicazione aperta, la diffusione, la visualizzazione e il riuso di oltre 500 dataset LiDAR e fotogrammetrici a scala architettonica. Questi dataset riguardano siti distribuiti in 36 Paesi, tra cui 47 siti iscritti nella Lista del Patrimonio Mondiale UNESCO, e provengono da quasi 400 soggetti privati, pubblici e accademici. La distribuzione geografica dei progetti può essere esplorata attraverso l'interfaccia cartografica della piattaforma, mentre la sezione dedicata ai dataset ne consente la consultazione attraverso un elenco e una funzione di ricerca (Fig. 1).

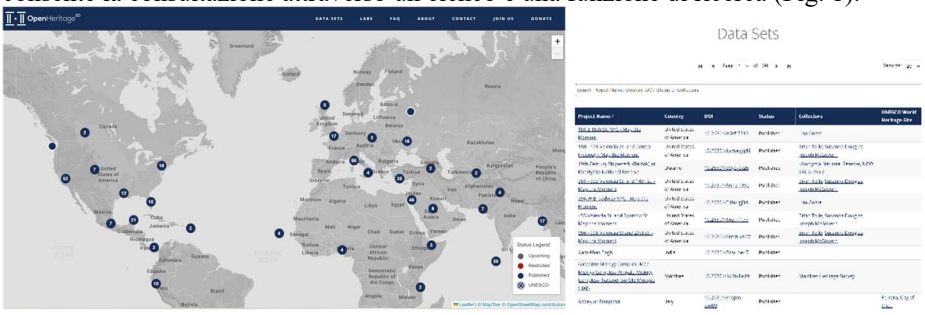


Fig. 1. Modalità di esplorazione dei dataset disponibili su OpenHeritage3D.org: interfaccia cartografica della landing page (sinistra); catalogo dei dataset con elenco tabellare e funzione di ricerca (destra).

La piattaforma adotta formati aperti e uno schema di metadati e paradati che tiene conto delle caratteristiche dei dati prodotti dalle diverse tecniche di acquisizione 3D. L'obiettivo è documentare la provenienza, le modalità di produzione e le caratteristiche tecniche dei dataset, favorendone l'interpretazione e il riutilizzo anche per finalità diverse da quelle originarie.

OH3D utilizza il software Potree, che consente la visualizzazione di nuvole di punti di grandi dimensioni mediante il caricamento progressivo dei dati e la gestione dei livelli di dettaglio [3]. I dataset sono organizzati in progetti che possono comprendere rilievi realizzati con tecniche differenti. L'archivio è stato sviluppato inizialmente per i dati provenienti da laser scanner terrestre (TLS) e aereo (ALS), conservati come nuvole di punti nei formati E57 e LAS/LAZ, ed è stato successivamente esteso ai dati da scansione mobile e ai dataset fotogrammetrici aerei e terrestri, per i quali possono essere conservate anche le immagini originali in formati come JPEG, TIFF e DNG.

Tutti i dataset devono essere resi disponibili con una licenza Creative Commons le cui condizioni di riutilizzo sono stabilite dal titolare dei dati. Per ogni progetto sottoposto a OH3D, il proponente fornisce le informazioni necessarie a completare la descrizione del dataset, mentre il Digital Object Identifier (DOI) viene assegnato dal gruppo di lavoro di OH3D. L'architettura generale della piattaforma e l'organizzazione dei metadati associati ai progetti e ai dataset sono illustrate nella Fig. 2, che sintetizza le principali componenti funzionali del sistema e le relazioni tra le informazioni archiviate.

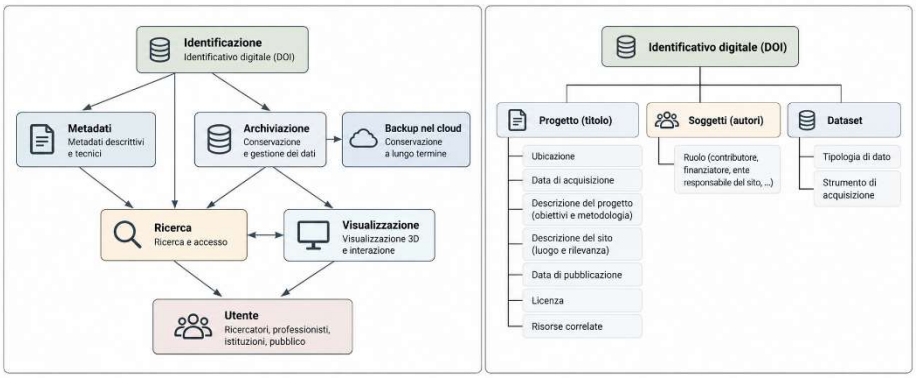


Fig. 2. Architettura funzionale della piattaforma OpenHeritage3D.org (sinistra) e organizzazione dei metadati associati ai progetti e ai dataset (destra). Rielaborazione grafica da McAvoy et al. (2023).

3 Metadati e paradati

Come ampiamente consolidato e noto in letteratura, I metadati [4] descrivono le risorse digitali e ne facilitano l'identificazione e la ricerca, mentre i paradati [5] documentano le procedure e le scelte attraverso cui esse sono state prodotte. Per un rilievo, conoscere la data, il sensore e il sistema di riferimento è necessario, ma può non bastare. Occorre comprendere come siano state registrate le scansioni, quali punti abbiano vincolato il

modello, quali filtraggi siano stati applicati e quali parti siano rimaste escluse. Queste informazioni permettono di interpretare tanto la geometria disponibile quanto le sue lacune e di valutarne l'affidabilità per successive applicazioni scientifiche.

In OpenHeritage3D, la documentazione associata ai dataset comprende informazioni descrittive relative ai progetti, ai soggetti coinvolti e alle risorse disponibili, insieme a parametri riguardanti le fasi di acquisizione ed elaborazione. In fase di conferimento vengono richiesti, in funzione delle tecniche utilizzate, elementi quali distanza di presa e GSD per la fotogrammetria, modello e impostazioni dello scanner, informazioni sui riferimenti topografici, software e relative versioni, operazioni di editing e indicatori degli errori. La documentazione può essere integrata con report di elaborazione, monografie dei punti e schemi delle posizioni strumentali, utili a ricostruire le procedure adottate e a interpretare eventuali limitazioni dei dati.

Le informazioni fornite dai proponenti sono attualmente inserite manualmente dai gestori della piattaforma. Lo schema dei metadati, sviluppato con riferimento al CIDOC-CRM e all'Europeana Data Model, è stato esteso per includere attributi specifici dei dataset spaziali 3D. Tale impostazione si inserisce nel quadro dei principi FAIR [6], orientati a favorire la reperibilità, l'accessibilità, l'interoperabilità e il riutilizzo dei dati. La Fig. 2 (destra) ne sintetizza l'organizzazione, evidenziando le relazioni tra progetti, soggetti coinvolti e dataset.

4 Innovazione e applicazioni interdisciplinari

Il contributo più significativo consiste nella possibilità di visualizzare e interrogare, mediante streaming e caricamento progressivo, dataset di nuvole di punti 3D contenenti miliardi di punti tramite un comune browser web, senza la necessità di software client dedicati o di autenticazione istituzionale. La rappresentazione ottimizzata per la consultazione online si affianca alla conservazione dei dati originali, disponibili per successive elaborazioni e analisi quantitative.

Prima della diffusione di piattaforme di questo tipo, le opzioni concrete per condividere grandi nuvole di punti del patrimonio culturale erano limitate al trasferimento su supporti fisici, a server FTP con accesso tramite credenziali o a piattaforme commerciali che potevano imporre limiti dimensionali e controlli di accesso proprietari. Storicamente, i dataset 3D del patrimonio culturale sono stati spesso pubblicati come oggetti isolati, privi di relazioni spaziali reciproche. All'interno della piattaforma il visualizzatore basato su CesiumJS [7] permette di collocare i dataset georiferiti all'interno di un contesto geografico comune, facilitando l'esplorazione dei siti e l'integrazione con altre informazioni territoriali. Le funzionalità di visualizzazione e interrogazione dei dati sono illustrate in Fig. 3 attraverso il caso studio di Salvation Mountain (California, USA), che mostra la scheda informativa del progetto e un esempio di misurazione geometrica e consultazione degli attributi della nuvola di punti.

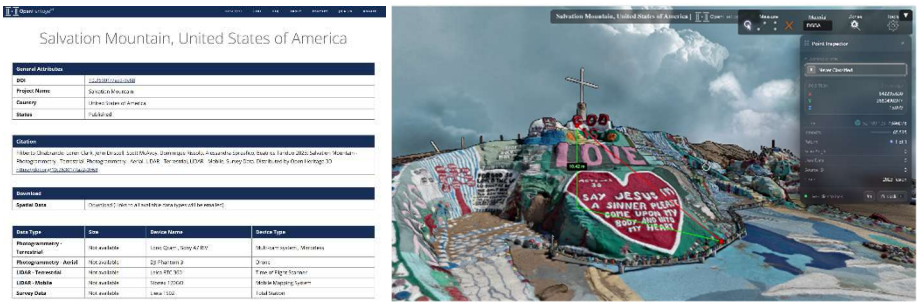


Fig. 3. Visualizzazione e interrogazione del dataset 3D di Salvation Mountain (California, USA) attraverso OpenHeritage3D.org: scheda informativa del progetto, con metadati e informazioni sui dati disponibili (sinistra); visualizzazione interattiva della nuvola di punti, con esempio di misurazione geometrica e interrogazione degli attributi mediante lo strumento Point Inspector (destra).

La disponibilità di dataset relativi a contesti differenti offre opportunità per studi comparativi di ambito architettonico e archeologico. In presenza di rilievi ripetuti sullo stesso sito, può inoltre costituire una base per analisi multitemporali e valutazioni di eventuali variazioni geometriche.

In questa prospettiva, il valore di OpenHeritage3D.org risiede anche nella possibilità di prolungare la vita scientifica dei rilievi oltre le finalità per cui sono stati originariamente acquisiti. Un dataset reso accessibile e adeguatamente documentato può essere riutilizzato per formulare nuove domande di ricerca, sperimentare metodi di elaborazione e sviluppare letture del patrimonio che coinvolgono geomatica, archeologia, architettura e scienze della conservazione. L'apertura dei dati contribuisce inoltre a valorizzare le risorse investite nelle campagne di acquisizione, favorendo collaborazioni tra istituzioni con competenze e disponibilità tecnologiche differenti. Componenti e strumenti sviluppati per la piattaforma sono stati inoltre applicati a contesti di monitoraggio ambientale, come gli incendi in California, e alla gestione di infrastrutture costruite, evidenziando la trasferibilità delle soluzioni tecnologiche anche al di fuori dell'ambito del patrimonio culturale [8].

Affinché queste opportunità si traducano in risultati scientificamente affidabili, l'accessibilità deve essere accompagnata da una documentazione chiara della qualità e della provenienza dei dati. Questo aspetto è particolarmente importante nei confronti multitemporali, per i quali accuratezza, risoluzione, sistemi di riferimento, condizioni di acquisizione e procedure di elaborazione devono essere valutati in modo coerente. Occorre inoltre quantificare le incertezze, così da distinguere le trasformazioni effettive del bene dalle differenze riconducibili ai sensori e ai metodi impiegati.

La prospettiva è quella di una documentazione digitale progressivamente aggiornabile, capace di collegare la conoscenza del patrimonio alle esigenze della sua conservazione. La disponibilità di osservazioni successive può fornire una base per riconoscere situazioni di vulnerabilità, orientare ulteriori indagini e supportare la programmazione degli interventi.

5 Prospettive di sviluppo

Le prospettive di sviluppo di OpenHeritage3D.org si orientano verso la realizzazione di un'infrastruttura distribuita, in grado di ampliare le possibilità di conservazione, accesso e utilizzo dei dati 3D del patrimonio culturale su scala internazionale. L'obiettivo è il progressivo passaggio dall'attuale configurazione prevalentemente centralizzata a una rete federata di nodi regionali, gestiti da università, istituti di ricerca ed enti responsabili della tutela e della documentazione del patrimonio Ciascun nodo potrebbe mantenere autonomia nella gestione e conservazione dei propri dataset, partecipando al contempo a un sistema comune di ricerca e accesso alle risorse distribuite. Tale approccio consentirebbe di distribuire le risorse necessarie alla gestione dei dati e di favorire una maggiore partecipazione delle istituzioni coinvolte, mantenendo criteri comuni di accessibilità e interoperabilità [8].

La realizzazione di questa architettura richiederà la definizione di standard condivisi per lo scambio dei metadati e lo sviluppo di interfacce di programmazione (API) che permettano l'individuazione e l'interrogazione dei dataset conservati presso i diversi nodi, senza richiederne la centralizzazione. In tale percorso è previsto il coinvolgimento di organismi internazionali di standardizzazione, tra cui l'Open Geospatial Consortium (OGC), per favorire l'integrazione della piattaforma con altre infrastrutture per la gestione dei dati spaziali. Il percorso di implementazione prevede una fase iniziale di sperimentazione con un numero limitato di nodi, seguita dalla progressiva estensione della rete e dei servizi disponibili. Le collaborazioni con il Politecnico di Torino e la Cyprus University of Technology rappresentano un punto di partenza per lo sviluppo dell'infrastruttura in ambito europeo, mentre il coinvolgimento di ulteriori istituzioni potrebbe favorirne l'espansione in altre aree geografiche.

Parallelamente all'evoluzione dell'architettura, sono previsti sviluppi degli strumenti di visualizzazione e analisi. L'integrazione di tecnologie WebXR potrebbe ampliare le modalità di fruizione dei dataset attraverso ambienti immersivi di realtà virtuale e applicazioni di realtà aumentata. Ulteriori funzionalità potrebbero supportare analisi quantitative avanzate direttamente in ambiente web, attraverso strumenti per l'estrazione di sezioni, il confronto volumetrico e l'analisi delle variazioni geometriche tra rilievi acquisiti in epoche differenti. È inoltre previsto lo sviluppo di servizi che consentano di interrogare ed elaborare porzioni specifiche delle nuvole di punti senza richiedere il trasferimento dell'intero dataset. Tra le prospettive tecnologiche rientra anche l'integrazione di sistemi di visualizzazione basati su Gaussian Splatting, da affiancare agli strumenti esistenti senza sostituire la conservazione delle nuvole di punti e degli altri dati originali, fondamentali per le analisi metriche e per eventuali elaborazioni successive.

Un ulteriore ambito di ricerca riguarda l'impiego dei dataset archiviati per applicazioni di intelligenza artificiale. La disponibilità di dati 3D ad alta risoluzione, georiferiti e accompagnati da metadati e paradati potrebbe favorire lo sviluppo di procedure di segmentazione semantica, riconoscimento degli elementi architettonici e individuazione automatizzata di anomalie o fenomeni di degrado. In questo contesto, l'evoluzione della piattaforma potrebbe comprendere strumenti per la selezione,

l'annotazione e l'esportazione di dati destinati all'addestramento di modelli di apprendimento automatico, nel rispetto delle condizioni di licenza e riuso.

Il consolidamento di queste prospettive dipenderà non soltanto dallo sviluppo tecnologico, ma anche dalla definizione di modalità condivise di gestione, aggiornamento e conservazione delle risorse digitali. In particolare, l'architettura federata richiederà una chiara attribuzione delle responsabilità per la manutenzione dei nodi, la continuità dei servizi e la tutela dei dati nel tempo.

6 Conclusioni

OpenHeritage3D.org rappresenta un esempio di infrastruttura aperta per la conservazione e la condivisione di dati 3D del patrimonio culturale, in risposta alle criticità associate alla gestione e alla distribuzione di dataset di grandi dimensioni. L'integrazione tra archiviazione dei dati originali, documentazione dei processi di acquisizione ed elaborazione, identificazione persistente delle risorse e visualizzazione interattiva attraverso il web consente di ampliare le possibilità di accesso e riutilizzo delle informazioni prodotte dalle attività di rilievo. In particolare, la disponibilità di metadati e paradati assume un ruolo essenziale per interpretare correttamente i contenuti geometrici, valutarne l'affidabilità e individuare possibili applicazioni successive.

Le prospettive di evoluzione verso una rete federata e l'integrazione di nuovi strumenti di analisi e visualizzazione potrebbero ampliare ulteriormente queste opportunità, ma richiederanno standard condivisi e forme di coordinamento tra i soggetti coinvolti. La sostenibilità di tale sviluppo dipenderà dalla capacità di mantenere accessibili i dati e le informazioni necessarie a interpretarli, anche oltre la durata dei singoli progetti di documentazione. In questo quadro, OpenHeritage3D.org costituisce un riferimento per la costruzione di archivi in cui i rilievi possano essere non soltanto consultati, ma anche verificati, confrontati e riutilizzati per attività di ricerca, monitoraggio e tutela del patrimonio culturale.

Riferimenti bibliografici

1. McAvoy, S., Ristevski, J., Rissolo, D., Kuester, F. (2023). OpenHeritage3D: Building an Open Visual Archive for Site Scale Giga-Resolution LiDAR and Photogrammetry Data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-M-1-2023, 215–222. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-1-2023-215-2023
2. McAvoy, S., Tanduo, B., Spreafico, A., Chiabrando, F., Rissolo, D., Ristevski, J., Kuester, F. (2024). An Archival Framework for Sharing of Cultural Heritage 3D Survey Data: OpenHeritage3D.org. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2-2024, 241–248. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-241-2024
3. Schütz, M. (2016). *Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers*. Master's Thesis, Vienna University of Technology. https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2016/SCHUETZ-2016-POT/

4. Baca, M. (Ed.). (2016). *Introduction to Metadata* (3rd ed.). Getty Research Institute, Los Angeles. https://www.getty.edu/publications/intrometadata/
5. Ioannides, M., Baker, D., Agapiou, A., Siegkas, P., Cassar, A. (2025). Quality Certification in Data Acquisition for Cultural Heritage: The Power of Paradata for High Quality Digital 3D Cultural Heritage Assets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-9-2025, 623–628. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-623-2025
6. Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J. J., et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18
7. Cesium GS (s.d.). *CesiumJS: An Open-Source JavaScript Library for 3D Globes and Maps*. https://cesium.com/platform/cesiumjs/ (ultimo accesso: 19 ottobre 2026).
8. McAvoy, S., Agarwal, A., Rissolo, D., Chiabrando, F., Bent, G., Pfaff, D., Ristevski, J., Kuester, F. (2026). OpenHeritage3D.org: Digital Atlas Archival and Streaming Infrastructure for Open Cultural Heritage 3D Data. *Proceedings of World Internet Conference Digital Silk Road Development Forum*, 2026. https://escholarship.org/uc/item/5gr6n6bw

Mappatura delle colture in Piemonte: un framework multimodale e multitemporale nel contesto della PAC

Enrico Chiesa[1ab†], Alessandro Farbo[2b†], Enrico Borgogno Mondino[3b]

[a] Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, [1]enrico.chiesa@uniroma1.it
[b] Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Largo Paolo Braccini 2, 10095 Grugliasco (TO), [2]alessandro.farbo@unito.it, [3]enrico.borgogno@unito.it
[†] Questi autori hanno contribuito in egual misura al presente lavoro

Abstract. La piena operatività dell'Area Monitoring System (AMS), nell'ambito della Politica Agricola Comune (PAC), richiede sistemi di mappatura delle colture che siano accurati e robusti rispetto alla variabilità inter-annuale [1]. In letteratura sono presenti numerosi lavori sulla classificazione delle colture, ma persiste l'esigenza di confrontare gli approcci di classificazione diretta dei tipi colturali rispetto a quelli gerarchici, valutando l'efficacia dei modelli addestrati su singole stagioni colturali rispetto a quelli addestrati su più anni, sia in termini di accuratezza sia in termini di requisiti qualitativi e quantitativi dei dati. In questo lavoro si propone un framework di classificazione basato su dati multitemporali Sentinel-1 (S1) e Sentinel-2 (S2), articolato su due livelli: L1 (Fig. 1, macro-classi colturali), definito da cicli fenologici (colture estive, invernali, doppi cicli, prati), e L2 (tipi colturali specifici), focalizzato sull'identificazione delle colture (cereali autunno vernini, colza, mais, soia, girasole, ecc.). L'originalità della ricerca risiede nel confronto tra due macro-architetture: (i) una pipeline sequenziale vincolata (prima L1, poi L2), dove la classificazione di macro-livello (L1) restringe lo spazio di ricerca del secondo livello (L2); (ii) un modello di "multitask learning" (L1 e L2), che restituisca direttamente i tipi colturali analizzati [2]. Si affronta inoltre il problema della trasferibilità temporale, effettuando un confronto tra modelli addestrati nell'anno e modelli addestrati su più anni, con l'obiettivo di cogliere la varianza fenologica su più stagioni per migliorare la generalizzazione su anni diversi da quelli di addestramento [3]. Viene inoltre analizzata l'importanza del dato, mettendo a confronto l'uso di sensori ottici, radar (SAR) e il loro impiego combinato, per misurare l'incremento di accuratezza derivante dalla fusione multimodale [4]. I risultati mirano a fornire linee guida operative per la scalabilità dei sistemi di monitoraggio, evidenziando il compromesso tra la propagazione degli errori nelle pipeline vincolate e la capacità di identificazione dei tipi colturali del "multitask learning". Lo studio contribuisce a definire protocolli efficienti per l'automazione dei controlli PAC, ottimizzando l'uso di dati storici e risorse multimodali.

Parole chiave: Classificazione delle colture, Sentinel-1, Sentinel-2, Multitask Learning, Classificazione gerarchica, Trasferibilità temporale, Politica Agricola Comune (PAC), Area Monitoring System (AMS).

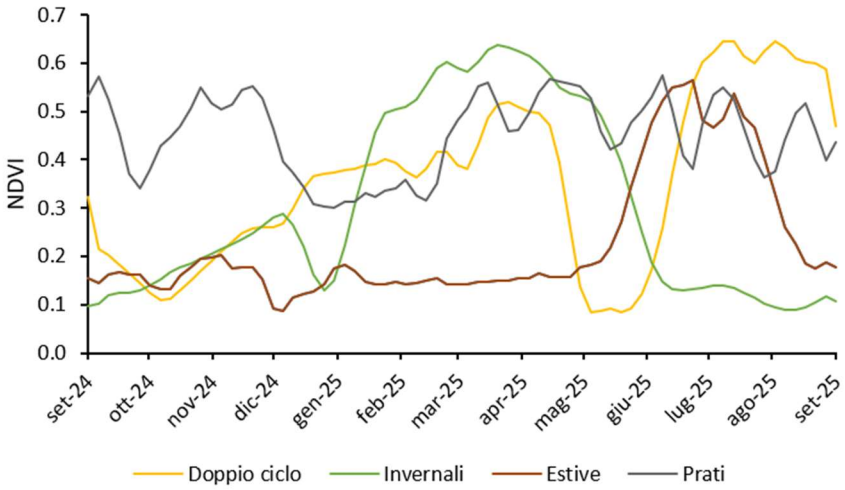


Fig. 1. Profili multi-temporali di NDVI esemplificativi per le classi colturali di livello 1: estive, doppio ciclo, invernali e prati.

Riferimenti bibliografici

1. Tricht, K. V., Gobin, A., Gilliams, S., & Piccard, I. (2018). Synergistic Use of Radar Sentinel-1 and Optical Sentinel-2 Imagery for Crop Mapping: A Case Study for Belgium. *Remote. Sens., 10*, 1642. https://doi.org/10.20944/preprints201808.0066.v1
2. Turkoglu, M. O., D'Aronco, S., Perich, G., Liebisch, F., Streit, C., Schindler, K., & Wegner, J. (2021). Crop mapping from image time series: deep learning with multi-scale label hierarchies. *ArXiv, abs/2102.08820*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112603
3. Pham, V.-D., Tetteh, G., Thiel, F., Erasmi, S., Schwieder, M., Frantz, D., & Van Der Linden, S. (2024). Temporally transferable crop mapping with temporal encoding and deep learning augmentations. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation, 129*, 103867. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103867
4. Sitokonstantinou, V., Papoutsis, I., Kontoes, C., Arnal, A., Andrés, A., & Garraza Zurbano, J. A. (2018). Scalable Parcel-Based Crop Identification Scheme Using Sentinel-2 Data Time-Series for the Monitoring of the Common Agricultural Policy. *Remote. Sens., 10*, 911. https://doi.org/10.3390/rs10060911

Stima dell'evapotraspirazione reale in aree mediterranee mediante dati telerilevati ottici e termici

Marta Chiesi[1][0000-0003-3459-6693] Luca Angeli[2][0000-0002-6064-7514], Piero Battista[1][0000-0003-1858-9653], Luca Fibbi[1][0000-0001-6985-6809], Maurizio Pieri[1][0000-0003-0930-8346], Bernardo Rapi[1][0000-0002-3089-5664], Francesco Sabatini[1] e Fabio Maselli[1] [0000-0001-6475-4600]

[1] CNR IBE, e-mail: nome.cognome@cnr.it
[2] Consorzio LaMMA, e-mail: angeli@lamma.toscana.it

Abstract. L'evapotraspirazione reale (ETa) è una componente fondamentale del ciclo dell'acqua a scala territoriale, sempre più influenzata dall'aumento delle temperature dovuto ai cambiamenti climatici. Questo fenomeno è particolarmente evidente nell'area mediterranea, dove è necessario promuovere una gestione sostenibile delle risorse idriche per ottimizzarne l'utilizzo prevenendo gli sprechi. Ciò comporta l'importanza di monitorare nel tempo le variazioni di ETa su vasta scala, cosa che può essere fatta utilizzando dati telerilevati.
Le tecniche di stima dell'ETa tramite dati satellitari sono generalmente classificate in metodi energy balance, water balance e miste.
Questo studio valuta la capacità di stimare l'ETa ad alta risoluzione spazio-temporale mediante l'applicazione di due approcci distinti: il modello energy balance Sen-ET ed il modello water balance NDVI-Cws, entrambi alimentati da dati della costellazione Sentinel. Le stime prodotte da Sen-ET sono state preliminarmente sottoposte a procedure di gap-filling al fine di ottenere serie giornaliere complete. La prestazione dei due metodi è stata successivamente valutata utilizzando osservazioni raccolte a terra in tre aree di studio in Toscana, tra cui un prato-pascolo, una coltura arborea (oliveto) ed una coltura annuale (grano). I risultati preliminari evidenziano la diversa sensibilità dei due metodi nel riconoscere e descrivere le variazioni giornaliere di ETa nelle tipologie di ecosistema considerato. In particolare, il metodo NDVI-Cws mostra prestazioni migliori nel simulare la ETa delle superfici in esame, che sono dovute soprattutto alla maggiore risoluzione spaziale dei dati di ingresso.

Parole chiave: dati ottici, dati termici, Sen-ET, NDVI-Cws.

1 Introduzione

L'evapotraspirazione reale (ETa), nelle sue due componenti di traspirazione legata alla biomassa verde e di evaporazione dal suolo, è una delle principali variabili del bilancio idrico ed è fortemente legata alle caratteristiche di un territorio (e.g. fattori meteorologici, tipologia di vegetazione, caratteristiche del suolo, etc.) [1]. Nell'ottica di promuovere un uso sostenibile delle risorse idriche quindi, quantificare l'ETa è

particolarmente importante soprattutto in aree in cui tali risorse possono essere un fattore limitante per lo sviluppo della vegetazione e, più in generale, delle diverse attività umane. Ciò comporta la necessità di lavorare su ampia scala e quindi richiede la messa a punto di metodologie di stima che possano essere operative e facili da applicare, soprattutto in aree mediterranee disomogenee e frammentate. In questo contesto l'uso del telerilevamento offre notevoli opportunità, perché è in grado di fornire informazioni su vaste aree in maniera sinottica, a diverse risoluzioni spaziali e temporali [2].

Le metodologie comunemente adottate possono essere raggruppate in due categorie principali più una terza, "mixed". Le prime, energy balance, sono fisicamente basate e teoricamente efficienti ma soggette a problemi di sotto-campionamento sia spaziale che temporale. Recentemente, questi problemi sono stati affrontati tramite tecniche di fusione dei dati con diverse caratteristiche ed un esempio di questo approccio è fornito dall'algoritmo Sen-ET [3,4]. Le seconde, ovvero i metodi water balance, sono invece di tipo semi-empirico e meno influenzati da problemi di risoluzione spazio-temporale, anche se generalmente non riescono a considerare correttamente l'effetto dello stress idrico sulla vegetazione. Questo limite è stato in buona parte superato nel metodo NDVI-Cws che tratta separatamente le superfici traspiranti e quelle evaporanti e considera sia gli effetti dovuti a stress transitori di breve durata che quelli a lungo termine [5].

La fusione di stime ottenute dai due metodi fondamentali potrebbe superare i rimanenti ostacoli per la produzione di un dataset completo di ETa giornaliero ad alta risoluzione (10-20 m), come proposto anche da Melton et al. [6]. Nel presente lavoro, tale approccio viene valutato con riferimento ad un'area mediterranea caratterizzata da elevata frammentazione ed eterogeneità spaziale della copertura del suolo. In particolare, dopo aver descritto i metodi di stima impiegati, vengono introdotti i siti di studio ed i relativi dati a terra; vengono poi descritti i dati utilizzati dai due modelli, la loro applicazione nei siti selezionati ed il successivo confronto tra i riferimenti a terra e le corrispondenti stime di ETa. L'ultima sezione del lavoro riporta la discussione dei risultati ottenuti e le conclusioni ritraibili da questa prima valutazione.

2 Modelli di stima dell'ETa

2.1 Approccio *energy balance*: Sen-ET

Le stime Sen-ET sono ottenute sulla base dell'algoritmo Priestley-Taylor T-SEB, distinguendo tra il bilancio energetico a livello del suolo e quello a livello della chioma [7]. Le due superfici vengono individuate utilizzando la frazione di copertura vegetale (Fractional Vegetation Cover, FVC) e caratterizzate mediante la temperatura della superficie del suolo (Land Surface Temperature, LST) [4].

La versione di Sen-ET correntemente utilizzata è riferita alla libreria Python open-source pyTSEB (https://github.com/hectornieto/pyTSEB, ultimo accesso: 20 marzo 2026) che produce dati alla risoluzione spaziale di 20 m per i giorni in cui le immagini termiche del satellite Sentinel-3 sono disponibili.

2.2 Approccio water balance: NDVI-Cws

Il modello NDVI-Cws utilizza un approccio water balance ed è di tipo semi-empirico. In particolare, il metodo stima separatamente la traspirazione dalle superfici verdi e l'evaporazione dal suolo utilizzando il concetto di FVC che viene derivata direttamente dalle immagini NDVI applicando una relazione lineare [5]. L'FVC viene poi combinata con i dati meteorologici giornalieri per considerare gli effetti dello stress idrico a breve termine sulla vegetazione e, seguendo un approccio basato sul concetto di coefficiente colturale (Kc) [8], la stima dell'ETa relativa al giorno *i* si ottiene secondo:

$$ETa_i = ET_{0i} \cdot (Kc_{Veg} \cdot FVC_i \cdot Cws_i + Kc_{Soil} \cdot (1\text{-}FVC_i) \cdot AW_i) \quad (1)$$

dove ET_{0i} viene calcolata con il metodo Jensen & Haise [9], Kc_{Veg} e Kc_{Soil} sono rispettivamente il coefficiente colturale massimo per la vegetazione investigata e quello relativo al suolo (sempre pari a 0.2 nei siti considerati); Cws_i e AW_i sono invece due coefficienti che tengono in considerazione lo stress idrico a breve termine. Quest'ultimo, infatti, non viene rilevato dalle immagini di NDVI, che registrano invece stress prolungati nel tempo, ovvero quelli capaci di causare un impatto intenso e duraturo sulla vegetazione.

Per il calcolo dei due coefficienti meteorologici Cws ed AW si utilizzano dati di precipitazione ed evapotraspirazione potenziale cumulati su periodi variabili a seconda della tipologia di vegetazione considerata (i.e. periodi di integrazione) [10].

3 Materiali e metodi

3.1 Area di studio

La Toscana si estende su una superficie di circa 23.000 km² (9°-12° longitudine Est, 42°-44° latitudine Nord) ed è caratterizzata da una ampia varietà di paesaggi, clima e copertura del suolo. La morfologia della regione varia tra pianure costiere ed ampie valli fluviali, ed aree collinari e montuose che degradano verso la catena appenninica. Il clima varia da mediterraneo, vicino alla costa, a temperato, caldo o freddo, a seconda dell'altitudine, della latitudine e della distanza dal mare.

Le pianure toscane sono occupate principalmente da aree urbane ed attività agricole, mentre le colline e le montagne sono un mosaico di terreni agricoli e foreste. Le colture annuali (principalmente grano, mais ed ortaggi) coprono circa il 25% della regione, mentre le colture arboree come vigneti e uliveti rappresentano circa il 5%. I boschi coprono quasi la metà della superficie della Toscana.

Per il lavoro corrente sono state selezionate tre aree di studio caratterizzate da diversa copertura vegetazionale: un prato-pascolo, una coltura permanente ed una coltura annuale a ciclo invernale (Figura 1, Tabella 1). Tutte le aree selezionate sono situate nell'area metropolitana di Firenze. Durante l'anno di studio (2023), l'ET_0 delle aree è stata di circa 1350 mm mentre la precipitazione, distribuita con massimi primaverile ed autunnale è stata di 750-800 mm.

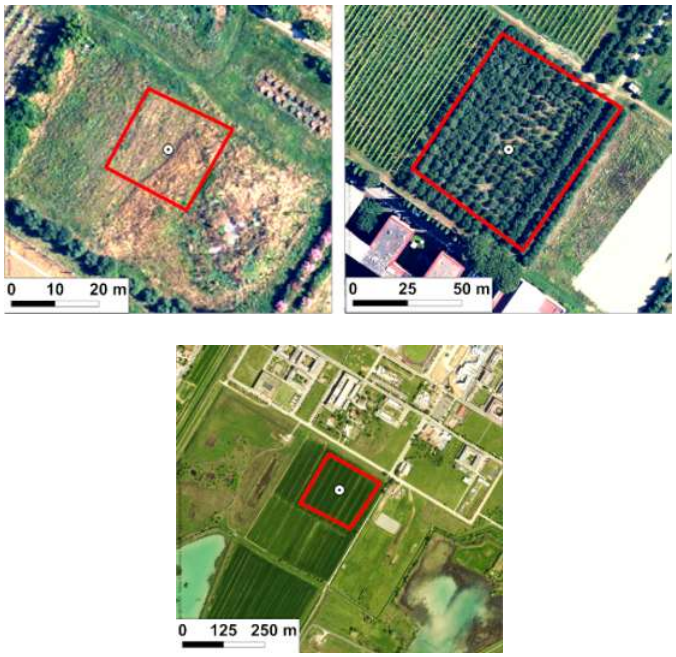


Fig. 1. Ortofoto del 2023 che riportano in alto il prato (sinistra) e l'oliveto (destra) delle Cascine ed in basso il campo di grano di Sesto Fiorentino.

Tabella 1. Posizione e dimensione delle aree di studio selezionate.

Sito	Posizione (°Lat N, °Long E)	Dimensione (ha)	Uso suolo
Cascine 1	43.785,11.218	0.04	Prato-pascolo
Cascine 2	43.786,11.216	0.5	Coltura permanente (oliveto)
Sesto F.no	43.816,11.194	3	Coltura annuale (grano)

3.2 Dati di studio

Per ciascuna delle aree di studio selezionate, per tutto il 2023, sono stati raccolti dati meteorologici giornalieri da stazioni agrometeorologiche locali, includenti anche dati di contenuto idrico del suolo. In aggiunta, per l'oliveto delle Cascine, sono state raccolte misure di sap-flow mediante sensori SFM1 (SFM1 Spa Flow Meter, ICT International Pty Ltd.) applicati a due alberi rappresentativi dell'intero appezzamento; la copertura della chioma (CC) di questi alberi e dell'intero oliveto è stata poi determinata utilizzando un'immagine Google Earth dell'agosto 2023.

Per l'applicazione del modello Sen-ET, le informazioni utilizzate in ingresso sono i dati meteorologici, un modello digitale del terreno (*Shuttle Radar Topography Mission* DEM a 30 m di risoluzione spaziale), una mappa dell'uso del suolo ed i dati telerilevati. In particolare, i dati meteorologici (ovvero temperatura dell'aria, temperatura di

rugiada, pressione, velocità del vento, precipitazioni e radiazione solare) sono ricavati dal dataset ERA-5 prodotto dall'ECMWF a bassa risoluzione spaziale e la mappa di uso del suolo è prodotta dall'ESA nell'ambito della *Climate Change Initiative*. Le informazioni da satellite, come accennato, sono derivate dalle immagini Sentinel-2 (S2) e dalle immagini Sentinel-3 (S3) di temperatura superficiale del suolo. Quest'ultima, che ha una risoluzione spaziale di 1-km, viene ricampionata a 20 m tramite fusione con i dati ottici S2 [4].

Per l'applicazione del modello NDVI-Cws, i dati di temperatura minima e massima e precipitazione sono stati ottenuti interpolando i dati giornalieri di stazioni a terra disponibili presso il Consorzio LaMMA [11]. La radiazione solare è stata invece ottenuta tramite l'algoritmo ERAD, utilizzando immagini Meteosat Second Generation [12]. I dati sono disponibili alla risoluzione spaziale di 250 m e si riferiscono all'anno 2023.

Una mappa di uso suolo della regione in scala 1:10000 è stata prodotta a partire dal CORINE Land Cover le cui classi sono state raggruppate in 6 macro-categorie: foreste, prati-pascoli, colture annuali, colture pluriennali, vivai ed aree urbane.

Per quanto riguarda i dati telerilevati, sono state utilizzate immagini prodotte dal *MultiSpectral Imager* (MSI) montato sui satelliti S2. Tutte le immagini disponibili per il periodo di studio sono state scaricate nel formato L2A; dopo il calcolo dell'NDVI, le immagini sono state composte su 15 giorni e trattate per rimuovere eventuali disturbi atmosferici, come proposto da Maselli et al. [5]. In tal modo si sono ottenute 24 immagini per anno, ad alta risoluzione spaziale (10 m).

3.3 Valori di ETa osservati

Per le colture erbacee (il prato delle Cascine e la coltura annuale di Sesto Fiorentino), l'ETa è stata determinata mediante un approccio simile a quanto proposto da Allen et al. [8], sulla base dei dati raccolti a terra e di informazioni sulla vegetazione desunte dalle immagini GE.

Per l'oliveto delle Cascine, i dati di sap-flow delle due piante campionate sono stati cumulati sul giorno ed estesi all'intero oliveto utilizzando la copertura della chioma dei singoli olivi; successivamente, le misure relative alla sola componente arborea dell'oliveto sono state integrate assumendo un contributo delle specie erbacee direttamente proporzionale alla relativa percentuale di copertura.

3.4 Applicazione e valutazione dei due metodi

A causa della discontinuità temporale delle immagini termiche, le serie prodotte tramite Sen-ET presentano lacune che sono state riempite tramite procedure di "gap filling". L'approccio utilizzato è basato sul calcolo del rapporto tra ETa ed ET_0 per i giorni in cui Sen-ET è disponibile e la sua conseguente applicazione per i giorni mancanti, secondo quanto proposto anche da Guzinski et al. [4].

L'applicazione del modello NDVI-Cws nelle tre aree di studio ha comportato la messa a punto di tre diverse configurazioni per adattarlo alle rispettive tipologie di uso del suolo. In particolare, i Kc_{Veg} utilizzati per il prato, l'oliveto e la coltura annuale sono stati 1, 0.9 ed 1.2, rispettivamente; inoltre, il periodo di integrazione per il calcolo dei

due coefficienti meteorologici Cws ed AW è stato di 30 giorni per le colture erbacee (il prato e la coltura annuale) e di 45 giorni per l'oliveto [13].

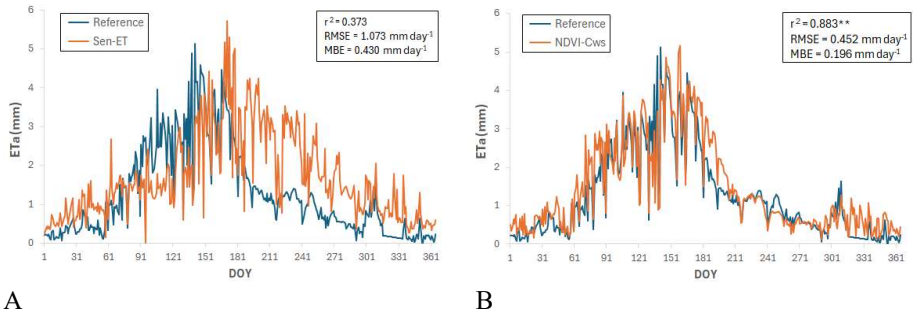
Infine, il confronto tra le osservazioni giornaliere di ETa basate su dati raccolti a terra e quelle stimate da entrambi i modelli è stato effettuato utilizzando le comuni statistiche di accuratezza (i.e. coefficiente di determinazione, r^2, scarto quadratico medio, RMSE, ed errore medio, MBE).

4 Risultati

Le Figure 2-4 mostrano l'andamento dell'ETa giornaliera osservata per le tre aree di studio selezionate insieme alle rispettive stime ottenute dai metodi Sen-ET (A) ed NDVI-Cws (B). In particolare, la Figura 2 è riferita al prato delle Cascine monitorato nel corso del 2023: i valori giornalieri di ETa di riferimento raggiungono massimi intorno a 5 mm giorno^{-1} in tarda primavera, per poi ridursi durante il periodo estivo caldo e siccitoso. Su base annuale il totale osservato è circa 462 mm. Questo andamento è riprodotto con accordo moderato da Sen-ET (r^2 = 0.373) e buono da NDVI-Cws (r^2 = 0.883); inoltre, il primo modello tende a sovrastimare i dati osservati.

In Figura 3(A-B) sono riportati i risultati ottenuti per l'oliveto delle Cascine; su base annua l'ETa misurata è circa 750 mm e l'andamento osservato indica una maggior resilienza allo stress idrico di questo ecosistema rispetto al prato situato nella medesima area. Anche in questo caso le prestazioni del modello Sen-ET sono inferiori rispetto a quelle di NDVI-Cws, sia in termini di andamento temporale (rispettivamente r^2 = 0. 386 e r^2 = 0.821) che di valori assoluti, dal momento che il primo modello evidenzia una forte sottostima concentrata soprattutto nel periodo primaverile.

La Figura 4 mostra l'ETa del campo di grano che nel 2023 assume valori comparabili a quelli del prato delle Cascine (412 mm contro 462 mm). Anche in questo caso, Sen-ET mostra una forte sovrastima soprattutto nel periodo estivo, ovvero quello in cui la copertura vegetale rimasta è maggiormente soggetto a stress idrico maggiore (RMSE = 1.120 mm giorno^{-1}, MBE = 0.482 mm giorno^{-1}). Il modello NDVI-Cws è capace di riprodurre abbastanza fedelmente l'andamento dell'ETa osservata (r^2 = 0.818) e, rispetto alle stime di Sen-ET consente di ottenere una precisione maggiore (RMSE = 0.679 mm giorno^{-1}, MBE = 0.197 mm giorno^{-1}).



A B

Fig. 2. ETa osservata nel 2023 per il prato delle Cascine confrontata con le rispettive stime ottenute da Sen-ET (A) e da NDVI-Cws (B).

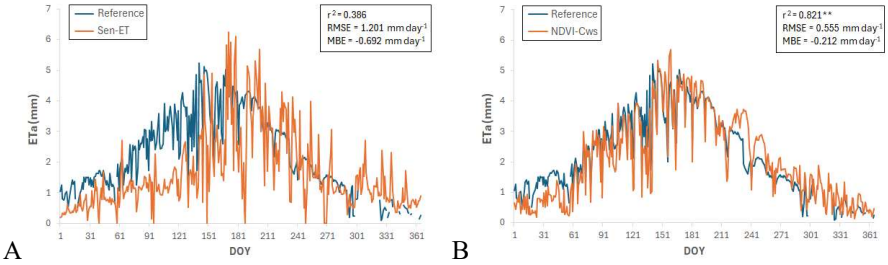


Fig. 3. ETa osservata nel 2023 per l'oliveto delle Cascine confrontata con le rispettive stime ottenute da Sen-ET (A) e da NDVI-Cws (B).

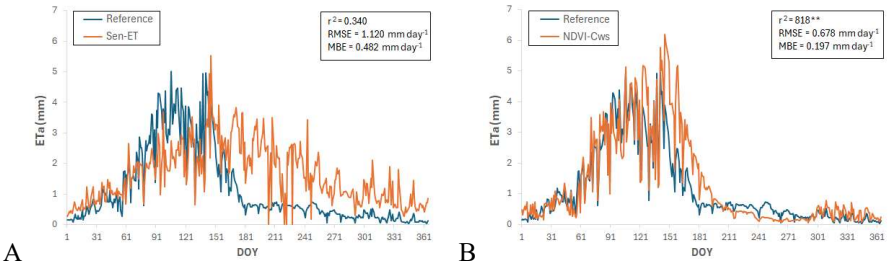


Fig. 4. ETa osservata nel 2023 per il campo di grano di Sesto Fiorentino confrontata con le rispettive stime ottenute da Sen-ET (A) e da NDVI-Cws (B).

5 Discussione e Conclusioni

Il presente studio riporta una prima valutazione di due metodi di stima dell'ETa basati sul telerilevamento, ovvero l'algoritmo Sen-ET, che usa immagini termiche e ottiche, ed il metodo semi-operativo NDVI-Cws che sfrutta invece solo queste ultime.

In particolare, Sen-ET si basa su principi fisici ed è teoricamente capace di stimare i flussi di energia ed acqua che caratterizzano la superficie osservata; per fare ciò, impiega dati termici che, come noto, hanno problemi di sotto-campionamento spazio-temporale [3,4]. Il metodo NDVI-Cws, invece, impiega un approccio semi-empirico basato sul bilancio idrico, che sfrutta la combinazione di dati ancillari ed immagini NDVI che sono disponibili ad una risoluzione spaziale e temporale adatta a seguire la dinamica della vegetazione.

Le stime di ETa dai due metodi sono state valutate verso dati indipendenti dopo aver adottato una tecnica di gap-filling per gli output di Sen-ET. I risultati ottenuti indicano che le stime prodotte da NDVI-Cws sono generalmente più adatte a seguire i processi fisiologici in aree eterogenee e frammentate quali quelle prese in esame nel presente lavoro, sia in termini di intensità che di evoluzione temporale.

Riferimenti bibliografici

1. Liu, Y., Yue, Q., Wang, Q., Yu, J., Zheng, Y., Yao, X., Xu, S.: A framework for actual evapotranspiration assessment and projection based on meteorological, vegetation and hydrological remote sensing products. Remote Sensing 13 (18), 3643 (2021).
2. Zhang, K., Kimball, J.S., Running, S.W.: A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. WIREs Water 3, 834–853 (2016).
3. Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., Karamitilios, G.: Modelling high-resolution actual evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 data fusion. Remote Sensing 12 (9), 1433 (2020).
4. Guzinski, R., Nieto, H., Ramo Sánchez, R., Sánchez, J.M., Jomaa, I., Zitouna-Chebbi, R., Roupsard, O., López-Urrea, R.: Improving field-scale crop actual evapotranspiration monitoring with Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat data fusion. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation 125, 103587 (2023).
5. Maselli, F., Papale, D., Chiesi, M., Matteucci, G., Angeli, L., Raschi, A., Seufert, G.: Operational monitoring of daily evapotranspiration by the combination of MODIS NDVI and ground meteorological data: Application and evaluation in Central Italy. Remote Sensing of Environment 152, 279–290 (2014).
6. Melton, F.S., Huntington, J., Grimm, R., Herring, J., Hall, M., Rollison, D., Erickson, T., Allen, R., Anderson, M., Fisher, J.B. et al.: OpenET: Filling a critical data gap in water management for the Western United States. Journal of the American Water Resources Association 58, 971–994 (2022).
7. Kustas, W.P, Norman, J.M.: Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. Agricultural and Forest Meteorology 94, 13–29 (1999).
8. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M.: Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 92-5-104219-5 (1998).
9. Jensen, M.E., Heise, H.R.: Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE 89, 15-41 (1963).
10. Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P.: Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. Remote Sensing of Environment 113, 657–667 (2009).
11. Fibbi, L., Bartolini, G., Gozzini, B., Grifoni D.: Spatial interpolation of meteorological variables with Daymet4-r2: A self-calibrating algorithm for complex terrains. Water 18(12), 1461 (2026).
12. Fibbi, L., Maselli, F., Pieri, M.: Improved estimation of global solar radiation over rugged terrains by the disaggregation of Satellite Applications Facility on Land Surface Analysis data (LSA SAF). Meteorological Applications 27, e1940 (2020).
13. Maselli, F., Arriga, N., Battista, P., Brilli, L., Chiesi, M., Dell'Acqua, A., Dionigi, M., Gardin, L., Gioli, B., Massari, C., Moriondo, M., Pieri, M., Putzolu, S, Rapi, B., Todisco, F., Fibbi, L.: High spatio-temporal resolution estimation of actual evapotranspiration by the use of Sentinel-2 MSI data. International Journal of Applied Earth Information and Geoinformation, in revision (2026).

Riferimenti geotopografici per la verifica dell'accuratezza posizionale e correzione geometrica delle immagini raster

Virgilio Cima[1], Alessandra Amoroso[2], Laura Magnabosco[2], Carlo Masetto[2], Daniele Savio[2], Umberto Trivelloni[2]

[1] Libero professionista, virgiliocima@gmail.com
[2] Regione del Veneto, Direzione Pianificazione Territoriale, alessandra.amoroso@regione.veneto.it, laura.magnabosco@regione.veneto.it, carlo.masetto@regione.veneto.it, daniele.savio@regione.veneto.it, umberto.trivelloni@regione.veneto.it

Abstract. Nel presente lavoro viene identificata una metodologia per la costituzione di una banca dati di punti di controllo geotopografici adeguatamente distribuiti sull'intero territorio del Veneto, con densità e caratteristiche tali da consentirne l'utilizzo per la verifica metrica di dati geotopocartografici in formato raster. Tali punti possono essere utilizzati anche come elementi di vincolo per operazioni di raddrizzamento geometrico delle immagini.

Parole chiave: Ortofoto, Immagini satellitari, Verifiche di conformità, Georiferimento.

1 Introduzione

Fra le molte funzioni della Regione del Veneto c'è anche il compito di elaborare una rappresentazione geocartografica del territorio strutturata in conformità agli standard nazionali ed europei, fondamento per le attività di programmazione, pianificazione e monitoraggio del territorio che trovano costante supporto nell'ecosistema dell'Infrastruttura Dati Territoriali della Regione del Veneto (IDT-RV) [1][2][3].
Tra i livelli informativi principali del database geotopografico (DBGT) figurano i dataset dei punti di riferimento altimetrico e planimetrico; si tratta in sostanza di reti che, assieme a quelle per il posizionamento satellitare, consentono di applicare correttamente il georiferimento a qualsiasi dato geografico e a qualsiasi tematismo presente nell'IDT-RV.
Tali riferimenti fisici sono fondamentali anche per l'esecuzione di operazioni di verifica di conformità dei servizi di produzione di dati geotopocartografici; si registra tuttavia una crescente disponibilità delle possibili fonti informative geografiche che comprendono, in modo ormai ampiamente consolidato, anche droni e satelliti assieme a quelle metodologie basate sull'Intelligenza Artificiale (A.I.) per l'estrazione automatica di oggetti dalle immagini. La necessità di inserire tutti i nuovi dataset nel più vasto quadro dell'IDT-RV comporta quindi l'obbligo di individuare metodologie

speditive, ma affidabili, per la validazione dei dati sotto il profilo della correttezza geometrica [4].
La soluzione adottata consiste nella realizzazione di un dataset geografico di riferimento che consenta di effettuare rapidi confronti metrici tra punti di coordinate note e dati di nuova produzione.

2 Individuazione, strutturazione e monografie dei punti di verifica

2.1 Criteri per l'individuazione degli elementi di riferimento

I punti utili alla verifica di conformità di un dato geografico devono corrispondere a particolari ben riconoscibili nel prodotto da esaminare, sia esso vettoriale, un'ortofoto o un'immagine satellitare. Le loro coordinate devono essere espresse in un sistema di riferimento condiviso e avere un'incertezza nota, sufficientemente contenuta rispetto ai requisiti di accuratezza del prodotto sottoposto a verifica. Essi devono inoltre essere distribuiti su tutto il territorio potenzialmente soggetto a future verifiche; è quindi opportuno cercare di coprire la maggior parte possibile dell'intero territorio regionale.
Nell'ambito del progetto qui descritto sono state analizzate le fonti disponibili e sono state individuate due categorie di informazioni georiferite particolarmente adatte allo scopo: da un lato i punti relativi alle misure topografiche eseguite via via sul territorio in occasione delle verifiche di conformità dei vari lotti di cartografia (DBGT), ortofoto e LiDAR, e dall'altro le immagini ortorettificate dell'intero territorio relative alla copertura "ortofoto AGEA 2024".
I primi hanno la sola informazione delle coordinate misurate, ma derivano da acquisizioni topografiche satellitari di elevata accuratezza (tipicamente misure GNSS in modalità NRTK, che garantiscono un'accuratezza posizionale con incertezza inferiore ai 10 centimetri) che li rendono particolarmente adatti a verifiche puntuali di dati con elevata qualità metrica [5].
Le ortofoto consentono invece di acquisire "stralci" di immagini che, oltre a costituire un riferimento posizionale per un'eventuale verifica interattiva da parte di un operatore su dati per i quali l'accuratezza dei riferimenti (qualche decimetro) risulti sufficiente, possono costituire un valido ausilio per la verifica, o addirittura la calibrazione automatica, di immagini satellitari, per le quali l'accuratezza delle ortofoto da cui sono estratti gli stralci è senz'altro - ad oggi - più che sufficiente.

2.2 Punti relativi alle misure topografiche

Per prima cosa si è provveduto a fare un censimento delle misure disponibili, che sono risultate consistere in un totale di oltre 11000 punti distribuiti nell'intero Veneto.
I vari set di misure, eseguite da soggetti e in periodi temporali diversi, risultavano disomogenei in termini di sistema di coordinate e tipo di quota (ellissoidica o già convertita in ortometrica). Si è quindi provveduto ad una loro omogeneizzazione, trasformando le coordinate originali di ciascun set verso i sistemi di riferimento che si

è ritenuto opportuno mantenere nel costruendo database: coordinate geografiche ETRF2000 (EPSG 6706), altezza ellissoidica ETRF2000, quota ortometrica, coordinate piane TM-ETRF2000 nel fuso "12" (EPSG 7795), coordinate piane TM-ETRF2000 nel fuso 32 (EPSG 7791).
Data la natura dei punti e considerati gli scopi di utilizzo della banca dati, non si è ritenuto necessario (né opportuno) esprimere le coordinate in altri sistemi di riferimento, come ad esempio il Gauss-Boaga, che non appartengano alla famiglia dei sistemi "satellitari", ovvero alle varie realizzazioni del sistema geodetico ETRS89.
I dati così uniformati sono stati quindi organizzati in forma di database, all'interno di un ambiente DBMS. Per questa operazione si è scelto l'ambiente SpatiaLite, e cioè il diffusissimo DBMS SQlite integrato con il modulo spaziale per la gestione della componente geometrica, i cui contenuti possono essere utilizzati direttamente mediante le apposite interfacce CLI (Command Line Interface) o GUI (Graphical User Interface) oppure possono essere facilmente trasferiti in altri ambienti DBMS, come ad esempio PostGIS o Oracle (Spatial).
I punti delle misure topografiche sono stati organizzati in una specifica tabella, denominata “misure_topogr”, con la seguente struttura:

nome attributo	tipo di dato	contenuto
obj_id	integer	identificativo univoco
codice	testo	codifica (univoca) del punto
tipo	testo	tipo di punto (es. GNSS NRTK)
anno_misur	testo	anno della misura
istat_prov	testo	provincia
istat_com	testo	comune
data_coord	testo	data del sistema di coordinate (allo stato attuale 2008.0)
lat_d_6706	double	latitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
lon_d_6706	double	longitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
altez_ell	double	altezza ellissoidica ETRF2000
quota_orto	double	quota ortometrica (rif. Genova 1942)
mod_geoide	testo	modello di geoide usato per la conversione altimetrica (Italgeo_2005)
e_7795	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"
n_7795	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"
e_7791	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
n_7791	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
note	testo	eventuali annotazioni

Per garantire l'univocità della codifica dei punti, utile per la gestione in un database, è stato aggiunto al valore codice di ogni record un prefisso in forma di sigla sintetica a riferimento del lotto di provenienza, che è diventato parte integrante del codice stesso.

2.3 Riferimenti geografici in forma di immagine (stralci di ortofoto)

I punti raccolti nella banca dati appena descritta sono idonei ad un utilizzo interattivo per le verifiche di accuratezza posizionale di dati vettoriali, ortofoto e prodotti LiDAR, ma non sono ottimali per la verifica dell'accuratezza posizionale né per la calibrazione automatica di immagini georiferite, quali ad esempio le scene satellitari, la cui dimensione del pixel potrebbe non essere congrua con la natura dei particolari misurati.

Per quest'ultimo scopo occorrono riferimenti costituiti da oggetti ben riconoscibili sulle immagini, che siano facilmente individuabili non solo da un operatore umano ma anche da una procedura di correlazione automatica. Trattandosi di punti di verifica - oppure di correlazione - fra immagini già ortorettificate, è sufficiente che la loro geometria sia bidimensionale.
Si è quindi ritenuto confacente allo scopo utilizzare stralci di immagini, ben georiferiti, estratti da ortofoto che abbiano una risoluzione geometrica e un'accuratezza posizionale sufficienti a costituire un valido campione di riferimento. La fonte più adatta da cui prelevare l'informazione è al momento l'ortofoto 2024, che copre in modo omogeneo l'intero territorio regionale con una risoluzione geometrica di 0.20 m.
Tale copertura geografica è disponibile in forma di "mosaico" di immagini RGB in formato GeoTIFF, suddivisa per unità di consegna ("tile") che corrispondono agli elementi 1:5000 della CTR, per complessivi 2243 file.
La numerosità di file suggerisce, come soluzione per determinare una buona quantità di punti di riferimento, l'estrazione di uno stralcio per ogni elemento di ortofoto disponibile. Possono però verificarsi casi eccezionali, specialmente in alta montagna, in cui in un intero elemento non è presente alcun particolare antropico con caratteristiche idonee di definizione geometrica e riconoscibilità.
Si è provveduto quindi ad esplorare l'intero territorio regionale, cercando di individuare una posizione di riferimento in ciascuna area corrispondente ad un elemento di ortofoto 2024. Escludendo alcune aree montane prive di particolari adeguatamente riconoscibili, sono state individuate complessivamente oltre 2100 posizioni idonee alla formazione degli stralci.
In corrispondenza di ciascun punto sono stati estratti due stralci di ortofoto, entrambi centrati sulle coordinate del punto, a due diversi livelli di zoom, per fornire sia il dettaglio del particolare sia il contesto appena più generale in cui esso è inserito.



Fig. 1. Esempio di stralcio di ortofoto ai due diversi livelli di dettaglio

Per ciascun punto di riferimento è stata prodotta anche una seconda copia dell'immagine di dettaglio, all'interno della quale è stato inserito un "marker" a forma di croce che identifica il particolare scelto, per facilitare la consultazione da parte di un operatore umano. Le immagini così modificate sono state usate per comporre il catalogo delle schede monografiche, in formato HTML, di tutto il complesso dei punti di riferimento.

A corredo di ogni coppia di immagini (dettaglio e contesto), le schede monografiche contenute nel catalogo riportano il codice identificativo del punto di riferimento, che per questo set di punti di impianto coincide col numero di elemento della CTR all'interno del quale il punto ricade seguito dal suffisso "_2025", e le coordinate del punto stesso nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12".



Fig. 2. Esempio di parte del "catalogo" HTML delle monografie

L'elenco dei riferimenti è disponibile anche in forma di shapefile puntuale, anch'esso in coordinate TM-ETRF2000 fuso "12", nonché in forma di tabella all'interno del DBMS dei punti geodetici in ambiente SpatiaLite già contenente i punti delle misure topografiche.
I punti sono stati organizzati in una specifica tabella, denominata “riferim_immagini”, con la seguente struttura:

nome attributo	tipo di dato	contenuto
obj_id	integer	identificativo univoco
codice	testo	codifica (univoca) del punto
tipo	testo	tipo di punto (es. stralcio_ortofoto)
fonte	testo	fonte di provenienza (es. ortofoto_2024)
anno_def	testo	anno di definizione del punto
anno_verif	testo	anno di ultima conferma di validità dell'immagine rispetto al territorio
istat_prov	testo	provincia
istat_com	testo	comune
elem_ctr	testo	numero dell'elemento di CTR 1:5000
tavol_25k	testo	codifica della tavoletta 1:25000
foglio_50k	testo	numero del foglio 1:50000
data_coord	testo	data del sistema di coordinate (allo stato attuale 2008.0)
lat_d_6706	double	latitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
lon_d_6706	double	longitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
e_7795	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"

n_7795	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"
e_7791	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
n_7791	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
valore_gsd	double	dimensione del pixel, in metri
accur_pos	double	stima dell'accuratezza posizionale, in metri
note	testo	eventuali annotazioni
tipo_img_1	testo	tipo immagine di maggior dettaglio (FK campo "tipo" tabella "percorsi")
nome_img_1	testo	nome del file con l'immagine di maggior dettaglio
tipo_img_2	testo	tipo immagine di contesto (FK campo "tipo" tabella "percorsi")
nome_img_2	testo	nome del file con l'immagine di contesto

L'insieme delle informazioni che concorrono a completare la descrizione dei punti comprende anche delle immagini, che sono salvate esternamente all'ambiente DBMS, in modalità file system. È però opportuno che all'interno della banca dati siano presenti i riferimenti a tali file. Per garantire, nei limiti del possibile, una certa flessibilità nella gestione della posizione dei file, i percorsi esterni sono memorizzati in un'apposita tabella denominata “percorsi”, con la seguente struttura:

nome attributo	tipo di dato	contenuto
obj_id	integer	identificativo univoco
tipo	testo	nome univoco per il tipo di immagine (es. "pt_rif_dettaglio")
percorso	testo	percorso della cartella destinata a quel tipo di immagine

La tabella dei punti di riferimento contiene, per ognuna delle immagini relative ad un punto, il nome del file senza percorso e il valore del campo tipo (chiave esterna) della tabella percorsi da cui prelevare il percorso del file. Nel caso in cui venga modificata la posizione dei file delle immagini, ovvero il nome delle cartelle in cui sono contenuti, è sufficiente aggiornare i soli contenuti della tabella percorsi.
Per evitare ridondanza nell'informazione lo shapefile dei punti riporta negli attributi solo il codice identificativo, che fa da chiave esterna verso il campo codice della tabella presente all'interno del database.

3 Considerazioni sull'utilizzo dei punti a scopo di verifica

Una volta garantita la disponibilità dei punti di controllo, è stata posta l'attenzione sulle metodologie e le procedure applicabili per l’utilizzo di tali punti nelle operazioni di verifica di conformità.
Nella sostanza, gli elementi di lavoro sono due: da una parte il dato da sottoporre a verifica (es. immagine satellitare georiferita, di cui si vuole valutare l'accuratezza posizionale) e dall'altra l'insieme dei punti di coordinate note, dei quali sono disponibili gli stralci di ortofoto. Si tratta quindi di selezionare i punti di riferimento che ricadono nell'area geografica interessata dal dato da controllare, e per ogni punto valutare la distanza che intercorre fra le coordinate di riferimento e quelle che il medesimo particolare assume all'interno del dato oggetto di verifica.
Operativamente si può procedere in vari modi, tutti riconducibili all'attività che risponde all'aspetto di sostanza, e cioè il riconoscimento dei punti di riferimento sul

dato da valutare. Ad esempio, tale riconoscimento può avvenire in modo interattivo, sotto la gestione diretta di un operatore, oppure può essere il prodotto di procedure di correlazione automatica delle immagini, con l'eventuale ausilio di tecniche di intelligenza artificiale [6][7].
Nel primo caso si tratta di visualizzare il dato in ambiente GIS, riconoscere i particolari corrispondenti ai punti noti, confrontare le coordinate con quelle di riferimento e valutare l'entità delle differenze rispetto ai requisiti della fornitura, applicando gli opportuni criteri statistici [8]; nel secondo caso i valori delle differenze sono forniti direttamente dalla procedura automatica.

4 Possibile utilizzo dei punti di riferimento a scopo di calibrazione

Le operazioni sopra descritte riguardo all'utilizzo dei punti per le verifiche di conformità producono valori di differenze di coordinate localizzate sui medesimi punti, che costituiscono nella sostanza una serie di vettori (bidimensionali) applicati sul piano delle immagini.
Oltre che per un'attestazione della qualità metrica del prodotto da verificare, tali vettori possono essere utilizzati anche come elementi di vincolo per sottoporre il prodotto ad una trasformazione geometrica di raddrizzamento.
Il modello matematico da utilizzare per la trasformazione deve essere scelto in base al contesto applicativo, a seconda del numero di gradi di libertà che si ritiene opportuno adottare [9]; l'obiettivo generale è però sempre lo stesso, e cioè la rimozione o mitigazione di eventuali deformazioni geometriche.
Nel caso di informazioni geografiche raster scaricate in modo periodico, come potrebbe essere l'esempio delle scene satellitari, ciò potrebbe costituire un processo di aggiustamento che agisce in modo automatico a valle di ogni download, con l'obiettivo di migliorare la qualità metrica del dato.

5 Conclusioni

L'attività descritta ha consentito di produrre una banca dati di elementi geotopografici di riferimento, comprendente sia i punti acquisiti con misure topografiche durante le verifiche di conformità dei vari lotti di cartografia (DBGT), ortofoto e LiDAR sia una serie di stralci di immagini ortorettificate distribuiti sull'intero territorio regionale.
I punti e gli stralci di immagini, archiviati conservando la georeferenziazione, costituiscono elementi di confronto che possono essere usati da un operatore per l'esecuzione delle verifiche di conformità metrica di altri set di dati, o anche da procedure automatiche che, riconoscendo per correlazione radiometrica lo stesso particolare (o l'intero stralcio) nell'immagine da verificare o calibrare e conoscendo le coordinate del particolare in quanto situato al centro esatto dello stralcio, possono procedere alla documentazione delle differenze di posizione oppure alle opportune operazioni di rettifica.

La disponibilità di questi riferimenti consente il raggiungimento dell'importante obiettivo di poter sottoporre dati geografici con tipologia geometrica raster nei quali siano riconoscibili elementi omologhi ad una verifica / calibrazione metrica (anche automatica) preventivamente al loro inserimento all'interno delle banche dati regionali.

Riferimenti bibliografici

1. Regione del Veneto, Capitolato Speciale d'Appalto per il Servizio per il rilievo aerofotogrammetrico con produzione di ortofoto e derivazione automatica di oggetti dell'intera provincia di Treviso e di parte delle province di Venezia, Verona e Vicenza, https://bandi.regione.veneto.it/Public/Download?idAllegato=33512, ultimo accesso 2026/10/12.
2. Ciarapica A., Trivelloni U., Cima V., Mazzi C., Milan P., Preparazione di modelli di capitolato per le varie tipologie di rilevamento. In: Atti XXII Conferenza ASITA, Bolzano (2018).
3. Cilloccu, F., et al., Ortoimmagini e modelli altimetrici: Specifiche tecniche per la produzione di ortofoto e modelli altimetrici alla scala 1:10.000, CISIS, Roma (2009).
4. Joint Research Centre (JRC), Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery (EUR 23638 EN), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2008).
5. Crosilla, F., Mussio, L., Progettazione e ottimizzazione del rilievo topografico e fotogrammetrico di controllo, CISM, Udine, (2001).
6. Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R., Determination of displacements in a 2D digital image correlation. In: Image and Vision Computing, 1(3), 133-139, (1983).
7. Kobayashi, T., Otsu, N., Image feature extraction using gradient local auto-correlations. In: European Conference on Computer Vision (pp. 340-351), Springer, Berlin, Heidelberg (2008).
8. ISO 19157-1:2023, Geographic information - Data quality, https://www.iso.org/standard/78900.html, ultimo accesso 2026/10/12.
9. Jensen, J. R., Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, Pearson (2015).

Approccio cooperativo per le verifiche di qualità dei prodotti Lidar e Fotogrammetrici

Virgilio Cima[1], Giampiero Gozza[2], Paolo Formicola[2], Stefano Olivucci[2], Simone Ceresini[3], Annachiara Vincenzi[3], Valentina Tegoni[4]

[1] Libero professionista, virgiliocima@gmail.com
[2] Regione Emilia-Romagna, Giampiero.Gozza@regione.emilia-romagna.it, Paolo.Formicola@regione.emilia-romagna.it, Stefano.Olivucci@regione.emilia-romagna.it
[3] Compagnia Generale Ripreseaeree S.p.A, simone.ceresini@cgrspa.com, annachiara.vincenzi@cgrspa.com
[4] ELIOFOTOTECNICABARBIERI - EFT S.r.l, vtegoni@eft.it

Abstract. Il lavoro vuole mettere in evidenza come un approccio cooperativo e articolato in attività di verifica di dati Lidar e fotogrammetrici da piattaforma aerea consenta di raggiungere un livello di qualità dei prodotti pienamente adeguato all'utilizzo degli stessi nelle applicazioni di tipo cartografico quale componente del sistema informativo geo-topografico regionale.
Oltre ad illustrare le caratteristiche dei controlli e testimoniare le criticità emerse, il lavoro intende mettere in luce il ruolo fondamentale del coordinamento e della piena sinergia tra committente, ditta esecutrice e collaudatori allo scopo di rendere disponibili prodotti cartografici di alta qualità e di alto valore sia per la Pubblica Amministrazione sia per chi opera sul territorio.

Parole chiave: Ortofoto, Lidar, Modelli digitali, DTM, DSM, Verifiche di conformità.

1 Introduzione

La Regione Emilia-Romagna sta acquisendo per lotti una copertura di prodotti Lidar e fotogrammetrici, a cui si aggiungono analoghi rilievi comunali o locali, della quale è stata incaricata l'azienda Compagnia Generale Ripreseaeree S.p.A. (CGR). Nella pianificazione delle attività si sono concordate una serie di fasi di verifica di qualità, sia in corso di produzione che nell'ambito del collaudo, e successive fasi di re-work e consolidamento che complessivamente rendono i prodotti particolarmente performanti.

Questo approccio contribuisce a ottimizzare le attività di post-processing e a rafforzare il controllo della qualità dei dati. Infatti, attraverso il confronto tra le coordinate dei GCP disponibili presso CGR e quelle estratte dalla nuvola di punti mediante il software TerraScan (TerraSolid), è possibile verificare in modo sistematico l'accuratezza plano-altimetrica dei prodotti, individuando eventuali scostamenti e consentendo l'adozione tempestiva delle opportune azioni correttive nel rispetto delle tolleranze previste dal progetto.

Successivamente, nelle fasi di verifica di conformità, oltre alle attività relative a controlli intrinseci automatizzabili, è stata eseguita una intensa attività in campagna con rilievo GNSS di un numero elevato di punti di controllo che ha consentito di individuare, pur nel rispetto generale del capitolato, anomalie localizzate puntualmente corrette o documentate.

Una parte dei dati acquisiti, rilevati in modo preventivo, sono stati utilizzati per rinforzare i vincoli nell'inquadramento plano-altimetrico dei prodotti ed incrementare la qualità geometrica in fase di produzione.

2 Il progetto, i prodotti e le modalità di accesso ai dati

2.1 Il progetto

Nel 2023 il Settore Innovazione Digitale, Dati, Tecnologia e Polo Archivistico della Regione Emilia-Romagna ha avviato un progetto, tutt'ora in corso, per il rilevamento di tutto il territorio regionale mediante ripresa aerofotogrammetrica digitale con successiva formazione di ortofoto e contestuale ripresa LiDAR con successiva produzione dei modelli digitali di elevazione [1].

Le campagne di rilievo procedono per aree geografiche equamente suddivise per annualità successive, individuate in funzione delle necessità delle diverse Direzioni e Agenzie regionali, tenendo conto di eventuali criticità, progetti in corso e potenzialità di utilizzo nell'immediato.

In analogia a quanto già effettuato per le aree di un progetto pilota eseguito nell'anno 2022, le riprese avvengono in condizioni di limitata fogliazione, minimi residui di neve (solo a quote di montagna) ed inclinazione dei raggi solari non inferiore a 25°.

Nella figura seguente sono schematizzate le aree attualmente rilevate o in corso di acquisizione.

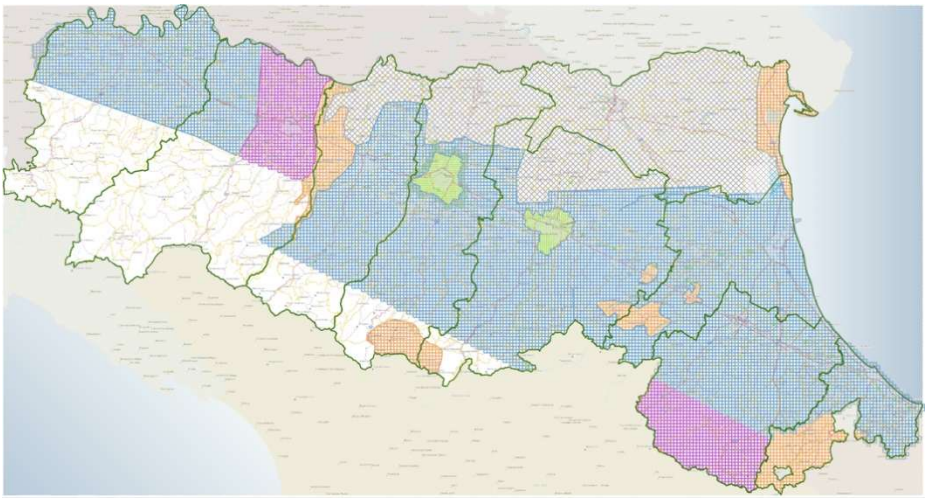


Fig. 1. Stato di avanzamento delle campagne di rilievo

In viola le aree relative alle annualità 2025/26, in azzurro le aree relative alle annualità 2023/24, in arancione le aree rilevate nel progetto pilota del 2022, in verde le aree relative a campagne di riprese commissionate dai Comuni di Bologna e Modena, in grigio le aree attualmente in consegna/collaudo.

2.2 Caratteristiche dei prodotti

Le ortofoto, derivate dalla ripresa aerofotogrammetrica, hanno una risoluzione a terra del pixel di 20 cm, una risoluzione radiometrica di 4 bande RGBI di 8 bit ciascuna e un'accuratezza posizionale di 60 cm al livello di confidenza del 97%.

Le nuvole di punti del rilievo LiDAR hanno una densità non inferiore agli 8 punti a metro quadro sulla singola strisciata (contando solo un punto nei casi di ritorni multipli), un'accuratezza altimetrica di 8 cm ad 1 sigma e sono classificate in 6 diverse classi (Ground, Overground, Vegetazione, Edifici e Manufatti, Acqua e Ponti).

I modelli digitali di elevazione DTM, DSM "first" e DSM "last", derivati dalle nuvole LiDAR, hanno la cella di 0.5 metri.

2.3 Accesso ai dati/servizi

I dati sono direttamente accessibili tramite servizi WMS/WCS.

Le ortofoto sono consultabili anche tramite app webgis "Moka" o tramite Geoportale 3D. In entrambi i casi non è richiesta installazione di software aggiuntivi, perché i dati vengono visualizzati direttamente all'interno del browser. In generale, il Geoportale 3D permette la visualizzazione dei dati del catalogo regionale con una rappresentazione tridimensionale, consentendo anche il caricamento di dati da parte dell'utente.

3 La ditta esecutrice e i controlli di qualità interni

La ditta incaricata dell'esecuzione dei rilievi è CGR S.p.A. con sede a Parma.
Grazie a un solido know-how tecnico nella rilevazione ed elaborazione delle informazioni territoriali, CGR supporta i processi decisionali in settori chiave quali infrastrutture, ambiente, agricoltura e pianificazione urbana.

In questo contesto, il controllo della qualità rappresenta una fase integrante del processo produttivo, volta a garantire l'affidabilità dei dati acquisiti e la conformità dei prodotti alle specifiche tecniche previste dal Capitolato Speciale d'Appalto. Prima della consegna finale, tutti i dati vengono pertanto sottoposti a verifiche sistematiche di completezza, accuratezza e rispondenza ai requisiti contrattuali.

Per la componente fotogrammetrica vengono controllati la qualità radiometrica delle immagini, la corretta copertura del territorio, le sovrapposizioni longitudinali e trasversali, la bontà dell'aero triangolazione e gli scarti sui punti di appoggio e di controllo. Per quanto riguarda la generazione dell'ortofoto vengono verificate le linee di mosaicature tra le immagini rettificate e l'accuratezza geometrica e radiometrica. Per la componente LiDAR vengono verificate la copertura delle strisciate, la corretta georeferenziazione, l'allineamento tra le traiettorie di volo, la densità della nuvola di

punti e l'assenza di anomalie o lacune. Ulteriori controlli riguardano la classificazione automatica e manuale della nuvola di punti, con particolare attenzione all'individuazione dele classi previste dal Capitolato Speciale d'Appalto. L'intero processo è supportato da verifiche statistiche e ispettive finalizzate a garantire la piena rispondenza dei prodotti ai requisiti tecnici contrattuali.

4 Le verifiche di conformità

In occasione di ogni consegna tutti i prodotti vengono sottoposti a verifica di conformità, secondo quanto indicato nel Capitolato Speciale dell'appalto. I controlli vengono eseguiti da una squadra di verificatori costituita da personale dell'azienda EFT srl di Parma e da personale tecnico regionale, con un contributo di supporto tecnico da parte di un professionista esterno.

I controlli riguardano sia gli aspetti di conformità intrinseca, eseguiti sulla totalità della fornitura utilizzando anche procedure automatiche, sia gli aspetti di conformità reale, soprattutto per quanto riguarda le prestazioni metriche delle geometrie modellate.

Per alcuni tipi di controlli, per rendere più agevole ed efficace l'esecuzione delle verifiche formali sono state sviluppate procedure software ad hoc, che rimangono a disposizione anche a valle dell'utilizzo nel contesto attuale.

Complessivamente, le attività di verifica possono essere così schematizzate [2][3][4].

Generali
- completezza e correttezza della documentazione e dei supporti informatici previsti per la consegna

Verifica delle riprese aerofotogrammetriche
- risoluzione radiometrica delle immagini
- continuità nella copertura stereoscopica del territorio
- corrispondenza fra riprese eseguite e piano di volo
- che i valori di GSD rientrino nei limiti stabiliti (proiezione su DTM)
- che i ricoprimenti longitudinali e trasversali rientrino nei limiti consentiti
- che i valori angolari di o.e. di tutti i fotogrammi e le relative differenze rientrino nei limiti consentiti
- che i contenuti delle immagini dei fotogrammi siano privi di nubi, ombre o altri difetti radiometrici

Verifica delle ortofoto
- copertura della superficie di territorio
- risoluzione geometrica e radiometrica delle immagini
- che il sistema di riferimento utilizzato sia quello previsto
- dimensioni e "taglio" dei fogli in cui è suddivisa la fornitura
- qualità radiometrica delle immagini (analitica, istogrammi ecc.), distribuzione di eventuali "no data"
- verifica visuale per valutare la qualità radiometrica e l'assenza di anomalie geometriche
- accuratezza metrica (intrinseca) mediante confronto con collimazioni stereoscopiche
- accuratezza metrica mediante confronto con misure topografiche
- congruenza agli attacchi fra immagini adiacenti
- in caso di adiacenza ad altre ortofoto preesistenti, completezza e congruenza dei dati all'attacco

Verifica del rilievo LiDAR e dei modelli digitali
- copertura della superficie di territorio
- densità delle nuvole di punti
- che il sistema di riferimento utilizzato sia quello previsto
- coerenza altimetrica dei punti nelle aree di sovrapposizione fra le diverse nuvole
- dimensioni e "taglio" dei tile in cui è suddivisa la forniturai
- risoluzione geometrica e radiometrica dei file raster dell'Intensità
- assenza di "spikes", "outliers" e altre anomalie grossolane mediante algoritmi automatici
- assenza di anomalie nei modelli altimetrici mediante analisi visuale in ambiente 3D
- coerenza altimetrica al contatto/sovrapposizione fra nuvole di punti
- coerenza altimetrica al contatto fra modelli altimetrici adiacenti
- omogeneità del valore altimetrico in corrispondenza degli specchi d'acqua
- accuratezza metrica mediante confronto con misure topografiche
- in caso di adiacenza a rilievi preesistenti, completezza e congruenza dei dati all'attacco

Pur non avendo mai superato, nell'ambito dei vari lotti di consegna, i limiti di tolleranza indicati dai parametri statistici di valutazione della qualità contenuti nel Capitolato Speciale dell'appalto, i prodotti forniti hanno evidenziato in alcuni casi la presenza di anomalie geometriche circoscritte a determinate aree del territorio.

Si tratta di anomalie circoscritte e di modesta entità, che rientrano ampiamente nelle percentuali di ammissibilità degli errori, ma che risaltano nel contesto complessivo dei dati proprio per l'elevata qualità generale del resto dei prodotti. Si è quindi deciso di mettere in atto alcune azioni di coordinamento ai fini di perfezionare la qualità dei prodotti.

5 Il coordinamento e obiettivi di qualità condivisi

La soluzione identificata per il raggiungimento degli scopi sopra descritti ha previsto come prima operazione l'incremento della densità dei punti di controllo acquisiti sul terreno mediante misure topografiche, con il doppio obiettivo di rendere da un lato particolarmente robusto il controllo metrico aumentando la probabilità di intercettare eventuali anomalie localizzate (un esempio delle quali è riportato nel punto successivo) e dall'altro di implementare una banca dati di punti noti sul territorio, ben riconoscibili sulle immagini delle ortofoto e/o particolarmente idonei alla verifica metrica dei modelli digitali [5][6], che al di là dello scopo contingente costituisce un patrimonio informativo a disposizione per una varietà di potenziali esigenze future.

I punti di controllo a terra vengono acquisiti con ricevitori satellitari di categoria geodetica, in modalità NRTK. La distribuzione complessiva delle aree interessate dai punti di controllo è schematizzata nella figura seguente.

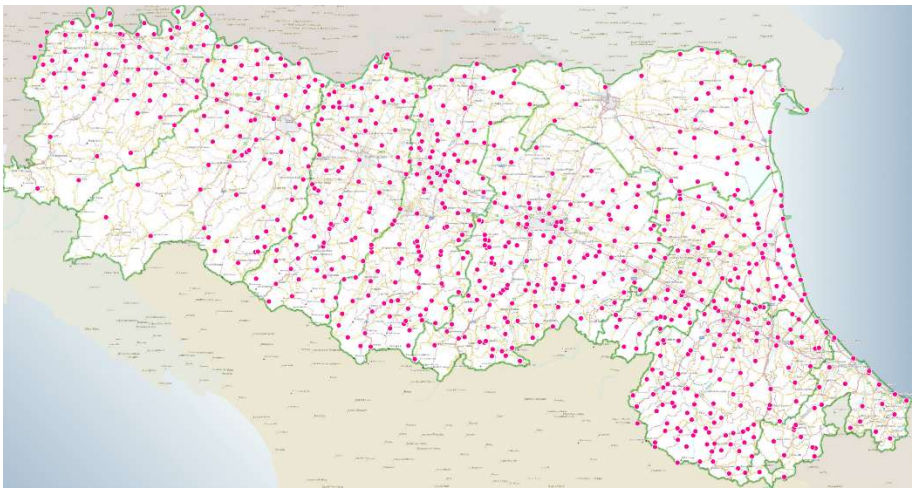


Fig. 2. Aree in cui sono state eseguite misure topografiche di controllo

In presenza delle anomalie localizzate di cui sopra, un sottoinsieme dei punti acquisiti sul terreno a scopo di verifica, selezionato secondo criteri di migliore riconoscibilità e distribuzione spaziale, è stato trasmesso alla ditta esecutrice ad integrazione dei GCP già presenti.

È stato quindi concordato con la ditta di utilizzare tali punti integrativi come elementi di vincolo per una ripetizione mirata delle operazioni di ortorettifica delle immagini oppure di processamento delle nuvole di punti, a seconda di quale fra i prodotti avesse evidenziato l'opportunità di correzione.

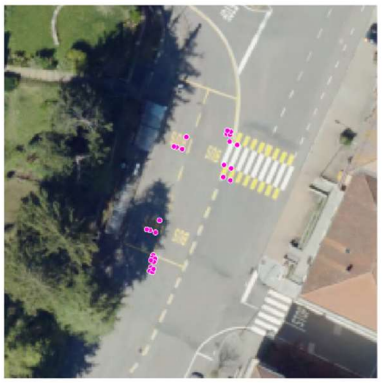
In tutti i casi elaborati la ripetizione del trattamento ha risolto il problema, eliminando completamente le anomalie.

A valle di ogni intervento correttivo è stata ripetuta tutta la serie di controlli che interessano il tipo di prodotto modificato [7], estendendo convenientemente l'area di verifica in modo da accertare che l'operazione non abbia generato discontinuità con i dati circostanti non soggetti a variazioni.

6 I risultati raggiunti

La robustezza delle verifiche di conformità eseguite sui prodotti, unitamente alla disponibilità della ditta esecutrice dei rilievi a recepire richieste di perfezionamento dei dati anche al di là degli obblighi strettamente contrattuali, ha consentito di ottenere una serie di prodotti particolarmente performanti.

A titolo di esempio, si riportano alcuni casi in cui l'intervento correttivo ha risolto le (pur modeste) criticità. Nei tabulati delle figure seguenti le quote misurate dei punti di verifica sono messe a confronto con le quote dei modelli di prima consegna (“1”) e con le quote degli stessi modelli rigenerati a valle dell’aggiunta dei vincoli (“2”).



punto	e_mis	n_mis	q_mis	q_dtm_1	dq_1	q_dtm_2	dq_2
p_576	619160.104	4929671.764	568.101	568.25	0.14	568.12	0.02
p_577	619160.011	4929671.460	568.095	568.23	0.13	568.10	0.00
p_578	619160.368	4929671.283	568.068	568.22	0.15	568.09	0.02
p_579	619160.204	4929670.931	568.055	568.21	0.15	568.08	0.03
p_580	619159.849	4929671.084	568.058	568.21	0.15	568.08	0.02
p_581	619159.822	4929670.193	568.028	568.16	0.13	568.04	0.01
p_582	619159.681	4929669.803	567.997	568.14	0.14	568.01	0.01
p_583	619160.025	4929669.640	568.009	568.13	0.12	568.01	0.00
p_584	619160.189	4929670.010	568.036	568.15	0.12	568.03	-0.01
p_585	619160.409	4929674.605	568.220	568.35	0.13	568.23	0.00
p_586	619160.941	4929676.111	568.324	568.42	0.10	568.29	-0.03
p_587	619159.681	4929674.862	568.221	568.35	0.13	568.22	0.00
p_588	619159.317	4929674.966	568.244	568.35	0.11	568.23	-0.02
p_589	619163.731	4929685.000	568.740	568.91	0.16	568.78	0.04
p_590	619164.268	4929686.495	568.852	568.98	0.13	568.86	0.00
p_591	619163.058	4929685.210	568.769	568.91	0.14	568.78	0.01
p_592	619162.715	4929685.329	568.757	568.91	0.15	568.78	0.03
p_593	619169.310	4929686.862	568.853	569.02	0.17	568.90	0.05
p_594	619169.734	4929686.751	568.871	569.01	0.14	568.88	0.01
p_595	619169.806	4929687.157	568.894	569.04	0.15	568.92	0.02
p_596	619169.392	4929687.273	568.899	569.06	0.16	568.93	0.03
p_597	619169.693	4929685.934	568.872	569.03	0.16	568.91	0.03
p_598	619168.969	4929682.992	568.766	568.90	0.13	568.78	0.01
p_599	619168.874	4929681.507	568.680	568.84	0.16	568.72	0.04
p_600	619169.776	4929681.091	568.712	568.86	0.15	568.74	0.03
p_601	619169.869	4929682.569	568.773	568.92	0.14	568.79	0.02
p_602	619170.595	4929685.499	568.903	569.05	0.14	568.92	0.02



punto	e_mis	n_mis	q_mis	q_dtm_1	dq_1	q_dtm_2	dq_2
p_846	632879.576	4927968.392	225.003	225.14	0.13	225.01	0.00
p_847	632879.955	4927967.686	224.992	225.13	0.14	225.00	0.01
p_848	632880.234	4927967.044	225.012	225.13	0.11	225.00	-0.01
p_849	632880.702	4927967.352	225.005	225.14	0.14	225.01	0.01
p_850	632880.984	4927966.877	224.994	225.14	0.14	225.01	0.01
p_851	632880.516	4927966.607	224.995	225.13	0.13	225.00	0.00
p_852	632884.613	4927960.201	224.812	224.94	0.13	224.81	0.00
p_853	632885.131	4927959.377	224.818	224.93	0.11	224.80	-0.02
p_854	632885.728	4927958.432	224.787	224.91	0.12	224.78	-0.01
p_855	632887.783	4927955.151	224.780	224.83	0.04	224.70	-0.08
p_856	632887.964	4927954.856	224.731	224.83	0.10	224.70	-0.03
p_857	632890.022	4927950.486	224.649	224.72	0.07	224.59	-0.06
p_858	632890.161	4927950.185	224.539	224.71	0.18	224.59	0.05
p_859	632890.461	4927950.321	224.515	224.70	0.18	224.57	0.06
p_860	632890.318	4927950.628	224.534	224.71	0.17	224.58	0.05
p_861	632893.448	4927946.779	224.388	224.56	0.17	224.43	0.04
p_862	632893.753	4927946.335	224.405	224.55	0.15	224.42	0.02
p_863	632894.203	4927946.617	224.392	224.53	0.14	224.40	0.01
p_864	632893.900	4927947.071	224.393	224.54	0.15	224.41	0.02
p_865	632899.085	4927943.954	224.256	224.43	0.17	224.30	0.04
p_866	632898.591	4927944.693	224.291	224.45	0.16	224.32	0.03
p_867	632898.034	4927945.607	224.347	224.49	0.14	224.36	0.01
p_868	632897.555	4927946.353	224.347	224.50	0.16	224.38	0.03
p_869	632897.001	4927947.248	224.396	224.54	0.14	224.41	0.01
p_870	632896.548	4927948.011	224.419	224.56	0.14	224.43	0.01
p_871	632891.477	4927947.546	224.490	224.66	0.16	224.53	0.04
p_874	632891.678	4927947.168	224.481	224.66	0.17	224.53	0.05

Fig. 3. Differenze su alcuni punti di verifica prima e dopo l'aggiunta dei vincoli

Le modalità di coordinamento adottate hanno quindi efficacemente concorso al raggiungimento dell'obiettivo principale alla base del lavoro, che era quello di mettere a disposizione dell'utenza, sia essa appartenente alla Pubblica Amministrazione sia esterna, prodotti di alto livello qualitativo.

L'esito positivo è testimoniato anche da riscontri di apprezzamento sulla qualità e utilità dei prodotti che giungono talvolta direttamente dall'utenza, non solo regionale ma anche ad esempio di istituti di ricerca che operano in ambito nazionale.

7 Conclusioni

Il risultato della cooperazione virtuosa fra i vari soggetti coinvolti a diverso titolo nelle attività inerenti agli appalti di formazione di ortofoto, nuvole di punti e modelli digitali di elevazione, ha garantito un costante controllo qualitativo delle forniture e ha permesso di intervenire in modo efficace in tutte le situazioni in cui sono emerse opportunità di miglioramento, può essere quindi validamente sintetizzato nei seguenti due aspetti:

- il raggiungimento di un'ottima qualità di tutti dati prodotti;
- la disponibilità di strumenti software specificamente sviluppati e di punti noti acquisiti sul territorio che, al di là dell'utilizzo già avvenuto nell'ambito delle attività sopra descritte, costituiscono un patrimonio potenzialmente riutilizzabile in una varietà di contesti futuri. Ciò ha consentito di consolidare l'obiettivo primario dell'intera attività, che è quello di rendere disponibili prodotti cartografici di alta qualità e di alto valore sia per la Pubblica Amministrazione sia per chi opera sul territorio.

Riferimenti bibliografici

1. Regione Emilia-Romagna, Capitolato Tecnico appalto LiDAR 2023-24, https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/contenuti-allegati/all-3-capitolato-tecnico.pdf, ultimo accesso 2026/10/12.
2. Casella, V. M., Franzini, M., & Lodigiani, D., Automated and Comprehensive Quality Assessment of Nationwide Aerial LiDAR Data: Insights from the LiDAR-ITA Project. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives), XLIX-B2-2026, 125–132 (2026).
3. Joint Research Centre (JRC), Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery (EUR 23638 EN), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2008).
4. Polidori, L., & El Hage, M., Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. In: Remote Sensing, 12(21), 3522, MDPI Open Access (2020).
5. EuroSDR (European Spatial Data Research), Assessment of the Quality of Digital Terrain Models. EuroSDR Official Publication, Project Report. EuroSDR Resource (2011).
6. Höhle, J., Höhle, M., Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. ISPRS. In: Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4), 398-406, (2009).
7. ISO 19157-1:2023, Geographic information - Data quality, https://www.iso.org/standard/78900.html, ultimo accesso 2026/10/12.

URBES an Intelligent Geospatial Platform for the Identification and Valorization of Critical Raw Materials

Carlo Cipolloni[1[0000-0001-7652-9814]], Giada Possemato[1[0009-0006-4242-3898]], Ignazio Scano [1[0009-0005-0047-7620]], Giulio Gatti[2], Tiziano Olivieri[2], Paolo Gigliarelli Fiumi[2]

[1]Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, Italy
[2]SAS Institute, Milano, Italy
carlo.cipolloni@isprambiente.it

Abstract.
The URBES platform addresses data fragmentation to support Critical Raw Material recovery through Urban Mining. Built on a 5-layer AI-GIS architecture, it integrates Natural Language Processing, U-Net cartographic segmentation, and closed-domain Retrieval-Augmented Generation with strict spatial validation. The system transforms unstructured historical archives into FAIR geodatabases, offering a robust decision support tool.

Parole chiave: AI, Critical Raw Materiale, RAG, Architecture.

1 Introduction and Strategic Context

The secure, sustainable, and ethically responsible supply of Critical Raw Materials (CRMs) and Strategic Raw Materials (SRMs) represents a fundamental prerequisite for ensuring European technological sovereignty, industrial competitiveness, and the successful implementation of the green transition. Within this framework, both national and European policies aimed at strengthening supply chain resilience increasingly recognize the importance of **Urban Mining**, defined as the recovery of resources from end-of-life products and urban infrastructures, as well as the valorization of historical extractive waste deposits [1].

These secondary sources constitute a potentially strategic reservoir of raw materials; however, their effective exploitation is hindered by the fragmentation, heterogeneity, and limited accessibility of the available information. A significant proportion of the knowledge related to abandoned mining sites, extractive waste deposits, and recoverable resources is currently preserved within historical documentation, technical archives, and paper-based reports that are only marginally interoperable with modern information systems.

To address this challenge, the URBES (Urban Mining and Extractive Waste Information System) project was funded through the Italian National Recovery and Resilience Plan (PNRR), Mission 7 RePower program. The initiative is structured into four coordinated work packages. In particular, Work Package 2, entitled *Intelligent Knowledge Platform and WebGIS*, focuses on the design and implementation of a

geospatial cognitive infrastructure capable of integrating geological, territorial, and documentary data while simultaneously enhancing the value of historical information assets that are often dispersed or unstructured.

The primary objective of the URBES platform is to overcome barriers to information accessibility and usability through the development of an integrated, queryable, and continuously updatable geospatial knowledge base. To achieve this goal, a multilayer architecture comprising five functional levels has been developed. These layers are responsible for information acquisition and management, automated textual content analysis through Natural Language Processing (NLP) techniques, statistical and spatial data validation, and the implementation of a cognitive engine based on Retrieval-Augmented Generation (RAG) approaches [2] and Large Language Models (LLMs).

The entire ecosystem is coordinated by a multi-agent orchestration framework that enables users to query documents, geodatabases, and geographic information through natural language interactions within a unified interface. This architecture promotes interoperability among heterogeneous information sources and supports the generation of traceable and scientifically verifiable responses through dedicated data validation and quality-control procedures, thereby reducing the risk of interpretative errors commonly associated with generative Artificial Intelligence systems.

1.1 The Challenge of Geological and Mining Data Fragmentation

The Italian geological and mining information heritage has historically been characterized by significant fragmentation, both from structural and technological perspectives. A substantial portion of information concerning historical production activities, accumulated volumes, and ore grades is contained within so-called non-conventional datasets, including historical paper documentation, mining permits and leases records, technical exploration reports, mine survey maps, and geological bulletins preserved over more than a century within national and regional archives.

Despite their considerable scientific and informational value, these documentary assets generally lack both semantic and geographic indexing, making their identification, integration, and analysis through conventional information technologies particularly challenging at a national scale. Table 1 summarizes the main operational challenges associated with the management and processing of the various categories of raw data currently preserved and managed by the Geological Survey of Italy (ISPRA).

To overcome these limitations, the URBES methodology defines a high-fidelity digital transformation workflow aimed at converting unstructured documents and raster cartography into structured, georeferenced, topologically validated datasets that can be directly interpreted by machine-based systems. The approach incorporates and operationalizes the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) [6], with particular emphasis on interoperability, which is regarded as a key enabling factor for the integration of heterogeneous information sources.

Within this framework, the automated extraction of toponyms, mining sites, and geological-mining entities through Natural Language Processing (NLP) techniques is coupled with dynamic geocoding procedures capable of transforming unstructured textual information into explicit geographic entities. As a result, isolated descriptive

references are converted into queryable spatial primitives that can be exploited within WebGIS environments and advanced territorial analysis systems.

Table 1. Data source types.

Raw Data Type	Key Limitations of Conventional Processing Workflows
More than 2,500 PDF documents (30-150 MB each; historical scans, images, and native PDF files)	Limited indexing of scanned content; difficulties in preserving the structural relationships among text, tables, figures, and appendices; absence of explicit geographic metadata associated with place names, mining production records, and extractive entities.
More than 200 raster geological maps (historical and thematic cartography not available in vector format)	Presence of graphical and symbolic layers lacking native georeferencing; inability to perform advanced spatial queries and topological analyses; limited computational usability of geological legends and mapped geological units.
JSON-native geodatabases and SQL tables (heterogeneous and decoupled management databases)	Misalignment among the conceptual and syntactic schemas adopted by regional and national registries; difficulties in integrating structured datasets with qualitative and extractive information derived from historical documentation.

2 The URBES platform architecture

During the preliminary phases of the URBES project, the technological infrastructure was initially conceived as a three-layer architectural framework comprising a data ingestion layer, a data analytics layer, and a Retrieval-Augmented Generation (RAG) layer exposed to end users. However, subsequent analyses of computational requirements and the scientific validation needs defined by ISPRA led to the development of a more articulated solution based on five distinct functional layers (Figure 1).

The main architectural evolution involved the separation between the Artificial Intelligence-driven integration and analytics layer and the layer dedicated to geostatistical analysis and spatial validation. This design choice was motivated by the need to isolate heterogeneous computational workloads characterized by different hardware and performance requirements, while introducing a rigorous geospatial data quality-control mechanism based on the Human-in-the-Loop (*HITL*) paradigm.

In particular, document processing, computer vision tasks, and semantic embedding generation require highly parallelized GPU-accelerated infrastructures, whereas geostatistical analyses, GIS processing workflows, and topological verification procedures rely on CPU-oriented architectures with intensive access to spatial databases. Furthermore, the separation of these two domains implements a dedicated

"anti-hallucination barrier," whereby every geographic entity generated or inferred by Artificial Intelligence models undergoes deterministic validation procedures before being incorporated into the system's knowledge base.



Fig. 1. Five-layer functional architecture of the URBES AI-GIS platform.

The architecture implements a progressive data transformation process that converts heterogeneous and unstructured information into formally validated geospatial knowledge. The first layer is dedicated to the acquisition, normalization, and preparation of information sources originating from ISPRA archives and associated documentary repositories. The infrastructure currently manages more than 2,500 PDF documents, over 200 raster geological maps, and numerous structured datasets stored in relational databases and JSON-native geodatabases. At this stage, advanced Optical Character Recognition (OCR) processes and document layout analysis models are applied to identify the logical structure of document pages and preserve the relationships among textual content, tables, legends, and annotations. Simultaneously, data normalization procedures, scan correction, noise reduction, and document integrity verification activities are performed.

The second layer implements semantic extraction, vectorization, and automated image analysis functionalities through high-performance infrastructures equipped with state-of-the-art GPU accelerators (e.g., NVIDIA H100). Textual contents are processed through NLP pipelines based on overlapping chunking strategies and state-of-the-art embedding models (BGE and E5) [5], enabling the extraction of domain-specific entities such as mining-related toponyms, mineral categories, and quantitative production parameters. The resulting semantic vectors are stored and indexed using PostgreSQL with the pgVector extension, enabling similarity-based semantic retrieval operations. In parallel, a U-Net convolutional neural network architecture [3], specifically trained for cartographic segmentation tasks, performs the automated vectorization of historical geological maps, transforming raster elements into

georeferenced geographic primitives while converting symbols and legends into queryable metadata. This layer also integrates FAIR-compliant geocoding services to ensure data interoperability and reusability.

The third layer represents the scientific validation and geospatial quality-assurance core of the entire ecosystem. Through the integration of SAS Viya with SAS Intelligent Decisioning, used for middleware integration system, SAS RAM Retrieval Agent Manager, used for LLM queries, PDF ingestion and queries to POSTGRES using MCP TOOLS, PostGIS, and QGIS platforms, advanced statistical analyses, kriging-based geostatistical estimations, and three-dimensional block-modeling procedures are performed to quantify critical and strategic mineral resources contained within extractive waste deposits. Concurrently, a comprehensive suite of topological validation procedures verifies geometric consistency, the integrity of cartographic reference systems, the absence of polygon anomalies, and the administrative coherence of geographic locations. Only datasets that successfully pass all validation procedures are promoted to the subsequent layer and made available as certified data collections. The adoption of Open Geospatial Consortium (OGC) standards, including WMS, WFS, and OGC API Features, further ensures full interoperability with external geospatial infrastructures.

The fourth layer constitutes the system's certified cognitive repository and provides the foundation for the Retrieval-Augmented Generation (RAG) engine [2]. Optimized for GPU-based inference, the infrastructure integrates the open-weights Llama Gemma4-31B language model with a knowledge base composed of vector collections, relational geodatabases, and domain-specific operational rules pertaining to the mining sector. The adoption of a closed-domain approach restricts the model's reasoning capabilities exclusively to information validated within the geo-mining ecosystem, significantly reducing the risk of hallucinations while ensuring high levels of scientific reliability.

The fifth layer performs intelligent orchestration functions and serves as the primary interaction point for end users. A central component, referred to as the Orchestrator Agent, analyzes user intent, coordinates the parallel execution of specialized agents, and integrates outputs generated by the various subsystems. Retrieval settings have been created to define the logic for interpreting requests and the response procedures, including routing systems specialized in directing the analysis only to the collections dedicated to the requested topic. Access to the ecosystem functionalities is provided through a GTT-based (Generative Trained Transformer like GPT) virtual assistant integrated within a multilingual conversational WebGIS platform. This environment enables natural language queries and delivers, through a unified interface, textual responses, interactive cartographic visualizations, and direct links to the original documentary sources. Within this configuration, the URBES AI platform implements a workflow based on the convergence of two complementary processes: the Semantic Retrieval Path and the Geometric Validation Path, ensuring that every generated response is simultaneously semantically relevant and geographically validated.

3 Considerations and Future Developments of the Virtual Agent

The synergistic integration of advanced Computer Vision techniques (U-Net), Layout Analysis technologies (Tesseract and PaddleOCR) [4], and closed-domain Retrieval-Augmented Generation (RAG) [3] systems based on OLlama-Gemma4-31B has enabled ISPRA to transform more than a century of historical documentation, previously unstructured and difficult to access, into a modern, dynamic, and queryable geographic information infrastructure. This process of digitization and knowledge enhancement generates substantial operational and strategic benefits.

First, it supports strategic autonomy and circular economy principles through the systematic mapping of mining waste deposits, enabling the identification of sites with high potential for the recovery of Critical Raw Materials (CRMs) and Strategic Raw Materials (SRMs), thereby reducing dependence on foreign supply sources. At the same time, the system dramatically decreases the time required for archival consultation and information georeferencing, transforming activities that previously demanded weeks of manual processing into real-time query operations. Furthermore, the platform provides robust support for environmental policies and territorial governance by delivering an integrated knowledge framework that combines geochemical data, information on mining sites, and urban landfill inventories, thereby enhancing remediation, monitoring, and environmental risk mitigation activities.

The most significant methodological innovation lies in the ability to combine the inferential power of Large Language Models (LLMs) with the rigor, traceability, and determinism traditionally required by Geographic Information Systems (GIS).

The scientific robustness of the architecture is founded upon three fundamental principles. The first is the concept of vector-geometric informational duality, whereby every semantic entity identified by the language models is uniquely associated with its corresponding spatial geometry within the PostGIS geodatabase, ensuring a direct linkage between textual knowledge and geographic representation. The second principle is the systematic elimination of spatial hallucinations through a dedicated validation layer that subjects every geographically referenced output generated by Artificial Intelligence models to rigorous topological verification procedures, including the validation of coordinate reference systems, geometric integrity, and administrative consistency, before integration into the knowledge base. The third principle concerns the adoption of an open and interoperable ecosystem, compliant with OGC standards (WMS, WFS, and OGC API Features) and complemented by OpenAPI endpoints, thereby ensuring full adherence to FAIR principles and enabling data access and reuse by other institutional WebGIS systems.

The modular structure of the AI Platform, organized according to a multilayer architecture, also demonstrates a high degree of scalability and methodological transferability. The framework developed within the URBES project for Urban Mining and the valorization of Critical Raw Materials can be regarded as a replicable operational paradigm applicable to numerous domains of applied geosciences, including natural hazard assessment, groundwater resource management, spatial planning, and the protection of critical national infrastructures.

From this perspective, the introduction of the Geological AI Framework represents a significant advancement in the Institution's capability to leverage and exploit its geospatial information assets, transforming them into a strategic instrument for decision support and for the implementation of national policies oriented toward sustainability, environmental security, and the efficient management of natural mineral resources.

Riferimenti bibliografici

1. Blengini, G. A., Mathieux, F., Mancini, L., & European Commission, Joint Research Centre. (2019). Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: State of play on existing practices key challenges and opportunities. Publications Office of the European Union. EUR 29868 EN.
2. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W. T., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. In Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020), Vol. 33, pp. 9459–9474.
3. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2015), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9351, pp. 234–241. Springer, Cham.
4. Smith, R. (2007). An overview of the Tesseract OCR engine. In Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007), Vol. 2, pp. 629–633. IEEE.
5. Wang, L., Yang, N., Huang, X., Jiao, B., Yang, L., Jiang, D., Majumder, R., & Wei, F. (2022). Text Embeddings by Weakly-Supervised Contrastive Pre-training. arXiv preprint arXiv:2212.03533
6. Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., ... & Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data, 3(1), 160018.

Innovare le geoscienze: il ruolo chiave degli open data e della formazione nell'infrastruttura di ricerca Geosciences-IR

Maria Pia Congi,[1] Valentina Campo[1], Carlo Cipolloni, [2]

[1] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Dipartimento Servizio Geologico D'Italia,

mariapia.congi@isprambiente.it, valentina.campo@isprambiente.it
carlo.cipolloni@isprambiente.it,

Abstract. Con l'affermazione dell'Open Science, l'accesso ai dati aperti è ormai riconosciuto come una risorsa strategica globale. Il progetto GeoSciences-IR, coordinato da ISPRA, risponde a questa esigenza attraverso l'infrastruttura di ricerca (CRI) ormai disponibile online all'indirizzo https://www.geosciences-ir.it/infrastruttura/. L'applicazione dei principi FAIR rappresenta lo strumento per il massimo coinvolgimento anche del mondo della ricerca. L'iniziativa punta a supportare direttamente la Rete dei Servizi Geologici Regionali (RISG) e non solo, ottimizzando la governance e il riuso dei dati territoriali..

Parole chiave: GeoSciences-IR, FAIR, e-learning.

1 Geosciences-IR

Stiamo assistendo negli ultimi anni alla transizione di tutti i progetti nazionali ed europei verso il paradigma dell'Open Science che come più volte ricordato ha ridefinito radicalmente le modalità di produzione, validazione e diffusione della conoscenza scientifica. In questo contesto, i dati della ricerca non sono più considerati meri sottoprodotti dell'attività analitica, bensì asset strategici fondamentali, la cui preservazione e condivisione risultano imprescindibili per garantire la trasparenza e la replicabilità dei risultati sperimentali. Il PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) ha finanziato le Infrastrutture di Ricerca (IR) tramite la Missione 4 ("Istruzione e Ricerca"), in particolare attraverso l'Investimento 3.1 che ha previsto lo stanziamento di circa 1,58 miliardi di euro totali gestiti tramite bandi del MUR (fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR).
Gli obiettivi e le azioni di Finanziamento hanno interessato il sostegno alla nascita di nuove strutture o all'aggiornamento di quelle esistenti alla creazione di reti tematiche o multidisciplinari per unire il mondo accademico e quello industriale, rispettare il vincolo di destinare una quota significativa delle risorse alle regioni del Mezzogiorno

L'acceso avviene attraverso il sito di progetto https://www.geosciences-ir.it/infrastruttura/ [1]. Da questa pagina si accede ad una sezione relativa all'infrastruttura cloud disponibile all'indirizzo https://hub.geosciences-ir.it/ [2] (Fig.1).



Figura 1: L'HUB della infrastruttura di ricerca Geosciences-IR

L'HUB, è concepito come un'infrastruttura cloud integrata (Cloud Research Infrastructure - CRI) [3] progettata per centralizzare dati, metadati servizi in ambito geologico ambientale, nel rispetto dei principi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) [4] e delle direttive europee INSPIRE.
Dall'interfaccia dell'HUB è immediata l'individuazione delle categorie di informazioni ivi contenute. Le principali sezioni sono di seguito descritte:
Catalogo di dati: È il motore di ricerca centrale e il repository di tutti i dati geografici e geotematici prodotti dal progetto ripartiti nei 12 ambiti tematici (frane, sinkhole, georisorse, faglie capaci, ecc.) (Fig. 2) [2].
Editor di metadati: E' l'applicativo per l'inserimento standardizzato dei metadati
Laboratori virtuali: Ambienti di calcolo e simulazione cloud-based accessibili direttamente via web previa richiesta accesso per dimensionare la potenza di calcolo necessaria allo specifico laboratorio.
Catalogo API: Presenta endpoint e chiavi di accesso per il riuso di API REST .
Vocabolari: Sezione focalizzata sullo sviluppo e l'implementazione di vocabolari controllati e codelist relativi agli ambiti tematici affrontati dal progetto. Per colmare le lacune riscontrate nei principali repository internazionali di riferimento (come INSPIRE e GeoSciML - Geoscience Markup Language), sono stati strutturati nuovi vocabolari in conformità agli standard del W3C, garantendo una rigorosa semantica e la piena interoperabilità dei dati geologici.
e-Learning corsi multimediali, video-tutorial, webinar registrati e linee guida operative per tutta l'utenza interessata

Servizi Cloud: Risorse di archiviazione
Web GIS: Visualizzatori geografici interattivi accessibili da browser
Nodi: federazione con altre piattaforme
Applicazioni: tools, software e web-app orientate a problemi o scenari specifici
Servizi dati: installazioni di geoserver in modalità consultazione
I dati di 13 università e 3 istituti di ricerca partner vengono esposti attraverso dei visualizzatori dedicati. Una grande quantità di metadati, attualmente 120, 45 vocabolari, software e documenti vengono condivisi con licenza aperta [5]. La sezione dedicata alla formazione eroga 28 corsi e 25 video tutorial per i quali vengono rilasciati attestati di frequenza.
I dati sono scaricabili attraverso servizi standard OGC e open feature API. Per il bulk download sono stati predisposti dei geopackages disponibili attraverso un'istanza di GIT-HUB dedicata.

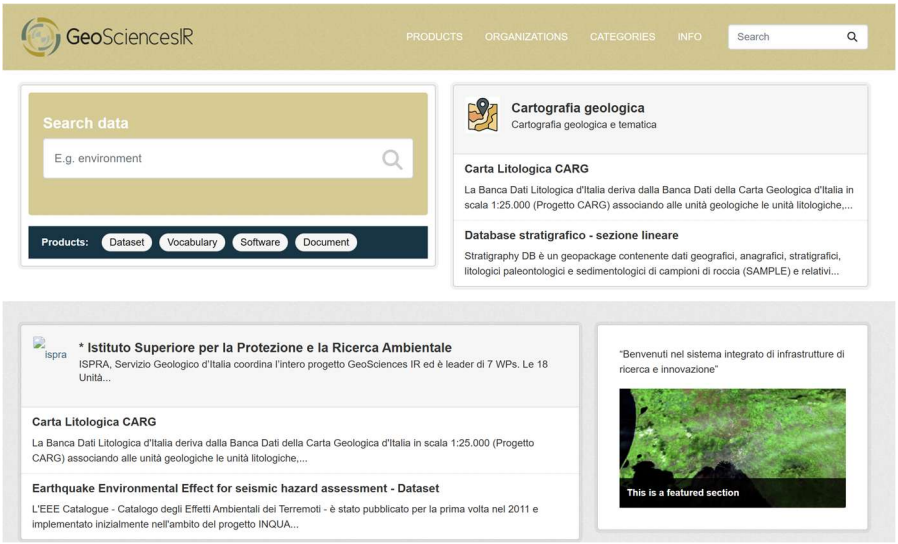


Figura 2: Accesso ai dati

2 E-learning

Un'altra attività fondamentale propria dell'Infrastruttura di Ricerca ha riguardato l'implementazione di una piattaforma di e-learning integrata e flessibile. Dal momento che l'Infrastruttura di ricerca dovrà essere mantenuta e aggiornata per i 10 anni successivi alla fine del progetto, ossia fino al 2035, si è deciso di dotarla di una propria "sezione web" per accedere sia ai contenuti prodotti per scopi prevalentemente divulgativi/promozionali sia a quelli didattici. Tale piattaforma di e-learning è stata sviluppata sul modello Moodle ed è accessibile dall' HUB della Cloud Research Infrastructure (CRI) Geosciences-IR.

Il target principale dell'attività è la Rete dei Servizi Geologici Regionali (RISG), ma anche tutti gli utenti interessati agli argomenti sul tema geologia possono usufruirne.
La piattaforma Moodle di GeoSciences IR (Fig. 3) è quindi uno spazio dedicato alla formazione specialistica e al trasferimento tecnologico di contenuti didattici suddivisi per Aree formative e divulgative focalizzate sui temi delle Scienze della Terra. In particolare, gli argomenti presenti riguardano:

- Cartografia geologica e geotematica
- Modellazione geologica del sottosuolo
- Geologia marina e costiera
- Microzonazione sismica
- Ricerca applicata e nuove tecnologie per il monitoraggio del territorio (uso di radar doppler, immagini satellitari, ecc.)
- Produzione di dati e servizi sulle frane
- Inventari regionali dei fenomeni franosi
- Processi di degradazione del permafrost nelle aree alpine
- Mitigazione del rischio idrogeologico
- Monitoraggio satellitare e analisi del movimento del suolo
- Identificazione e caratterizzazione delle faglie attive e capaci (FAC) a livello nazionale;
- Potenziale sismico delle Faglie capaci associate a infrastrutture sensibili;
- Pericolosità sismica;
- Attività mineraria sostenibile e materie prime critiche;
- Gestione dei rifiuti minerari;
- Uso, copertura e consumo del suolo;
- Pianificazione territoriale e patrimonio geologico;

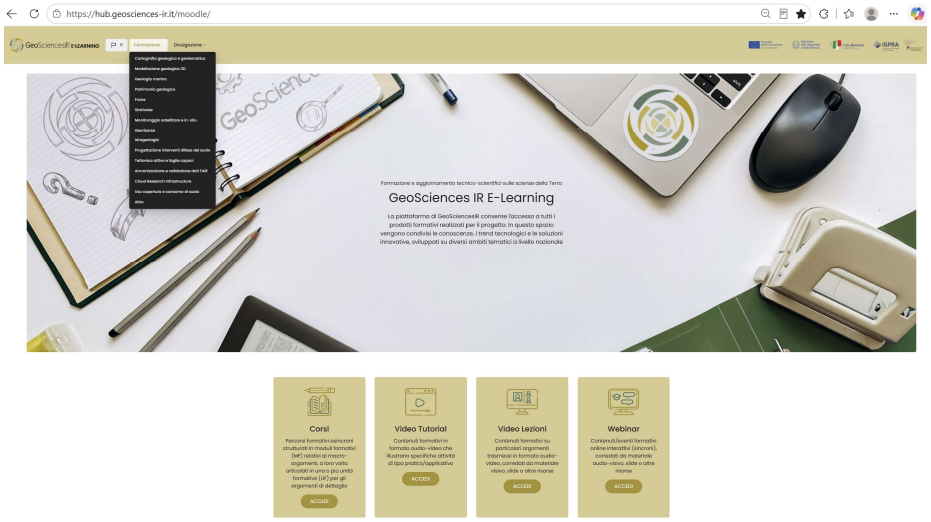


Figure 3: La piattaforma di e-learning: menù Formazione

La piattaforma di e-learning consente l'accesso a corsi di formazione, strutturati principlamente per l'apprendimento a distanza, in modalità asincrona, oltre a video tutorial e video lezioni, contenuti di natura più propriamente divulgativa, informativa, comunicativa e/o promozionale.
Attraverso un'ampia diffusione delle informazioni relative al progetto di rilevanza nazionale GeoSciences IR, queste risorse mirano a trasferire conoscenze specialistiche e di settore, supportando al contempo lo sviluppo professionale.

3 Validazione

Il progetto ha definito anche un Piano di Data Management definendo i prodotti con i relativi formati ricadenti nella Infrastruttura GeoSciences-IR, gli aspetti di qualità e sicurezza dei prodotti, gli aspetti etici e di privacy e tutto il processo di valutazione della FAIRness per ogni prodotto. In parallelo, ha sviluppato un'applicazione per la validazione dei livelli di rispetto dei principi FAIR applicabili ad ognuno dei prodotti così definiti:

- Metadati [**M**];
- Datasets [**D**];
    - Network Services [**Sv**];
- Vocabolari [**V**];
- Documenti o lavori scientifici [**P**];
- Software [**S**];
- Applicazioni [**Ap**].

Il nome del tool GeoSFAIR unisce l'ambito geospaziale all'acronimo FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), l'insieme di principi globali che regolano la corretta condivisione e il riutilizzo dei dati scientifici.
GeoSFAIR è uno strumento modulare e flessibile concepito per testare e validare il livello di aderenza ai principi FAIR delle risorse digitali prodotte (metadati, dati geologici, software).
L'uso del tool prevede che l'utente possa scegliere i criteri di test per lo specifico prodotto geospaziale; l'applicazione esegue un codice basato su API che verifica in tempo reale (o in modo asincrono) i requisiti di conformità raggiunti.
L'interfaccia restituisce un risultato grafico chiaro ed immediato, assegnando un punteggio in percentuale (da 0 a 100%) per ciascuno dei quattro pilastri FAIR valutati.
Tale verifica è fondamentale anche ai fini della sostenibilità prevista per i prossimi 10 anni che prevede l'aggiornamento migliorativo dei prodotti condivisi in piattaforma.

Riferimenti bibliografici

1. Geosciences-IR Homepage, https://www.geosciences-ir.it/infrastruttura/, ultimo accesso 2026/10/09.
2. Geosciences-IR HUB, https://hub.geosciences-ir.it/, ultimo accesso 2026/10/09.
3. Battistoni P., Cipolloni C., Congi M. P., Sebillo M.M.: L'architettura dell'infrastruttura di ricerca GeoSciencesIR. Atti ASITA 2024 (2024).
4. Wilkinson, M., Dumontier, M., Aalbersberg, I. et al.: The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data 3, 160018 (2016). https://doi.org/10.1038/sdata
5. Cipolloni C., Congi M.P., Minelli A.: Un processo FAIR per la gestione dei dati e dei prodotti dell'infrastruttura GeoSciencesIR, GIT 2024 Proceedings on Proceedings (2024).

L'eredità ambientale e geomorfologica della Prima Guerra Mondiale: GIS e remote sensing per la ricostruzione del paesaggio lungo il Fronte Occidentale

Beatrice D'Agostino[1][0009-0007-5483-3453] e Enrico Borgogno[0000-0003-4570-8013]

[1] Dottorato in Osservazione della Terra, Sapienza Università di Roma, beatrice.dagostino@uniroma1.it
[2] Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università di Torino, enrico.borgogno@unito.it

Abstract Questo studio si propone di indagare, quantificare e mappare l'impatto ambientale e geomorfologico causato dagli intensi episodi bellici susseguitesi lungo il Fronte Occidentale durante la Prima Guerra Mondiale. L'obiettivo è identificare e interpretare le trasformazioni che rimangono rilevabili a più di un secolo di distanza, attraverso una ricostruzione diacronica dell'evoluzione del paesaggio del campo di battaglia. La ricerca adotta un approccio integrato in ambiente GIS per analizzare e quantificare tali trasformazioni, confrontando due aree di studio pertinenti entrambe al Dipartimento della Somme (Francia) e caratterizzate da destini post-bellici differenti: il territorio agricolo di Cléry-sur-Somme e il massiccio forestale del Bois de Saint-Pierre-Vaast. Per valutare l'evoluzione del paesaggio, la ricerca integra diverse fonti geospaziali: cartografia storica militare, fotografia aerea storica e DTM LiDAR. Nel caso di Cléry-sur-Somme l'applicazione della tecnica fotogrammetrica *Structure from Motion* (SfM) su fotogrammi aerei dell'agosto 1919 ha permesso di generare un ortomosaico storico ad altissima risoluzione, che mostra il paesaggio all'indomani del conflitto, con tracce oggi completamente livellate dalle pratiche agricole. Al contrario, il DTM nell'area boscata del Bois de Saint-Pierre-Vaast conserva intatta la memoria morfologica degli scontri ed è stato possibile procedere all'estrazione vettoriale dei crateri.Attraverso un approccio multidisciplinare, il progetto mira a ricostruire l'eredità ambientale del conflitto, contribuendo alla ricostruzione storica e alla comprensione dei processi di trasformazione territoriale indotti dalla guerra.

Parole chiave: Prima guerra mondiale, GIS, Fotogrammetria storica, LiDAR

1 Introduzione

Gli intensi episodi bellici della Prima Guerra Mondiale lungo il Fronte Occidentale hanno causato profonde trasformazioni e lasciato tracce indelebili nei territori coinvolti

Molti di questi effetti di origine antropica sono ancora leggibili nel paesaggio attuale, sebbene non sempre immediatamente visibili a causa delle bonifiche agricole e a processi di riforestazione del dopoguerra. L'intensa attività militare, attraverso massicci bombardamenti d'artiglieria, la guerra di mina e la costruzione di sistemi difensivi, ha determinato una radicale alterazione morfologica del terreno, generando crateri, devastando la copertura vegetale e distruggendo interi insediamenti umani, lasciando al contempo numerose tracce archeologiche [1, 2].
In questo scenario, la Battaglia della Somme (1° luglio e il 18 novembre 1916) costituisce uno degli esempi più emblematici di tale rimodellamento antropico del territorio. Nel corso dei circa cinque mesi di scontri, il prolungato bombardamento con artiglieria pesante, unito all'esplosione di imponenti mine sotterranee, ha stravolto la microtopografia locale, arrivando anche a cancellare interi centri abitati [3, 4]. Oggi, la valle della Somme mostra chiaramente questa complessa stratificazione: se da un lato l'agricoltura e le bonifiche hanno riassorbito gran parte delle deformazioni superficiali, dall'altro le aree boschive custodiscono ancora le ferite del conflitto.

2 Materiali e metodi

2.1 Aree di studio

Le aree di studio prese in considerazione (fig.1) sono entrambe collocate in Francia, nella porzione nord- orientale del Dipartimento della Somme, nella regione Hauts-de-France. La prima è pertinente alla cittadina di Cléry-sur-Somme, teatro di aspri combattimenti sul finire dell'estate 1916 che portarono alla distruzione pressoché totale del villaggio. Situato sulla riva destra del fiume Somme in prossimità di Péronne, il sito costituiva un caposaldo tedesco protetto da un elaborato difensivo costituito da trincee, cunicoli e reticolati. Dopo sanguinosi scontri svoltisi in agosto, nell'ambito di un'offensiva generale scattata su tutto il fronte della VI armata, 279° Reggimento di Fanteria riuscì a spezzare definitivamente la resistenza tedesca e a liberare Cléry-sur-Somme[5]. Inclusa al termine del conflitto nella zona rossa, all'inizio degli anni '20 prese avvio un processo di ricostruzione e bonifica finalizzata a restituire i terreni a una destinazione agricola.

La seconda area di interesse è costituita invece dal Bois de Saint-Pierre-Vaast, un massiccio forestale di circa 1200 ettari occupato nel settembre 1914 e sfruttato dall'esercito tedesco come complesso bastione difensivo fino alla riconquista francese nel novembre 1916, a seguito di feroci combattimenti di artiglieria. Il luogo divenne nuovamente teatro di scontri nel marzo e nell'estate 1918, determinando una profonda devastazione della copertura arborea [6, 7]. Dichiarato Zona rossa, l'area è stata soggetta a riforestazione e ancora oggi risulta solo parzialmente bonificata.

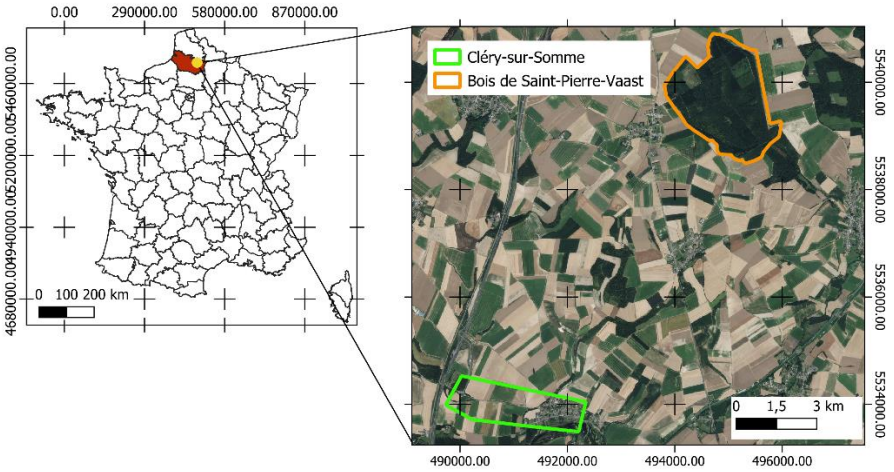


Fig.1: Aree di studio. Mappa di base: BD ORTHO® 2024; SR: WGS 84/UTM zone 31N.

2.2 Dataset geospaziali: cartografia storica, fotografia aerea, dati LiDAR

Per uno studio di questo tipo risulta fondamentale un approccio multidisciplinare che preveda l'analisi e l'integrazione in ambiente GIS di dati provenienti da fonti differenti. In primo luogo, sono state reperite le carte storiche disponibili per le aree selezionate. In particolare, sono state utilizzate le carte militari con scala compresa tra 1:5.000 e 1:20.000 dell'area settentrionale della Somme conservate e rese disponibili online dagli archivi del Dipartimento della Somme [8]. Esse sono state georiferite nel sistema di riferimento EPSG:32631-WGS 84/UTM zone 31N mediante lo strumento Georeferencer del software QGIS. Per la georeferenziazione è stata utilizzata come base cartografica il servizio WMS BD ORTHO® distribuito dall'IGN (*Institut national de l'information géographique et forestière*), comprendente una collezione di ortomosaici con risoluzione a 20cm [9]. Sull'ortofoto 2024 sono stati individuati i Ground Control Points (GCP)**,** selezionati tra gli elementi stabili, principalmente incroci stradali rimasti invariati nel tempo.

Grazie allo strumento *Remonter le temps – IGN* [10] è stato possibile scaricare i fotogrammi storici acquisiti con un volo aereo risalente al 12 agosto 1919 sul villaggio di Cléry Sur Somme, con i quali si è potuto procedere a una ricostruzione fotogrammetrica dell'area in un momento immediatamente successivo alla fine del conflitto.

Fondamentale per questa prospettiva di ricerca, è poi il DTM derivato da dati LiDAR che sempre l'IGN distribuisce gratuitamente ad alta risoluzione (0,50m/px) [11]. I tasselli DTM relativi all'area di studio sono stati scaricati direttamente in "QGIS" per mezzo del plugin "PointCloudFR".

2.3 Ricostruzione fotogrammetrica per il territorio di Cléry sur Somme

Per realizzare un ortomosaico con i fotogrammi sopracitati, si è utilizzato il software di fotogrammetria *Structure from Motion* "Agisoft Metashape". Trattandosi di immagini prive di coordinate, l'orientamento del blocco fotogrammetrico è stato eseguito inserendo in "Agisoft" GCP estratti da cartografia storica georeferenziata e da elementi antropici rimasti inalterati ricavati da ortofoto, con SR: EPSG:32631-WGS84/UTM zone 31N. Non essendo in alcun modo noti i parametri di orientamento interno della camera utilizzata, si sono mantenuti quelli stimati dal software. A seguito dell'allineamento dei fotogrammi, è stata elaborata la nuvola densa di punti sulla base della quale è stato generato il Modello Digitale di Elevazione (DEM) con risoluzione spaziale di 17cm/px. Infine, utilizzando il DEM con superficie geometrica di appoggio i fotogrammi sono stati ortorettificati in un ortomosaico con risoluzione a terra di 10 cm/px. La georeferenziazione è stata ulteriormente affinata grazie allo strumento Georeferencer in "QGIS" applicando una trasformazione Polinomiale di I grado con metodo di ricampionamento Nearest neighbor,ottenendo un RMSE planimetrico di 6m.

2.4 Analisi del DTM per l'area del Bois de Saint-Pierre-Vaast

Trattandosi di un'area boscata e per la maggior parte non bonificata, l'analisi del DTM del Bois de Saint-Pierre-Vaast prometteva la possibilità di individuare ancora oggi la persistenza archeologica di tracce del conflitto. Per mettere in luce queste anomalie morfologiche del terreno, il modello digitale del terreno è stato elaborato mediante differenti algoritmi di visualizzazione processati in "QGIS" con il plugin "Relief Visualization Toolbox (RVT)".

Contestualmente, in ambiente "SAGA GIS", al fine di isolare i crateri causati da artiglieria o esplosione rimuovendo la componente macro-topografica, è stato calcolato il *Local Relief Model* (LRM), sottraendo il DEM originale da una versione levigata dello stesso generata tramite lo strumento *Simple Filter* (raggio di 60 pixel).

$$LRM = DTM_{levigato} - DTM_{\text{originale}}$$

Attraverso questa differenza, la componente di pendenza generale viene azzerata, consentendo di evidenziare le variazioni altimetriche negative corrispondenti alle cavità [12]. Per filtrare la rugosità trascurabile del terreno, è stata applicata una sogliatura (*thresholding*) e per discriminare i soli crateri con una profondità pari o superiore a 0,25m è stata applicata una riclassificazione binarizzata in cui ai pixel caratterizzati da un valore di depressione pari o superiore a 0,25 metri è stato assegnato valore 1, rappresentante i crateri, mentre a tutti i pixel con valori inferiori è stato assegnato il valore 0, rappresentante lo sfondo. Infine, è stato applicato un filtro *Sieve* con soglia di 5 pixel per ripulire dal rumore topografico residuo.

Il raster LRM risultante è stato sottoposto a vettorializzazione convertendo le regioni di pixel a valore 1 in geometrie poligonali. Ciascuna entità è stata successivamente arricchita nella tabella attributi associata con parametri morfometrici descrittivi, tra cui l'area superficiale, il diametro equivalente medio e la profondità massima, estratti tramite statistiche zonali calcolate in "QGIS".

Per valutare il pattern di distribuzione e le concentrazioni spaziale dei crateri, per ogni poligono è stato calcolato ed estratto il relativo centroide geometrico dai quali è

stata eseguita un'interpolazione di densità spaziale con l'algoritmo *Kernel Density Estimation* per la generazione di una *Heatmap.*

3 Risultati e discussioni

Pur trattandosi di uno studio ancora a uno stadio preliminare, l'integrazione dei dati cartografici storici, della fotogrammetria storica e dei rilievi LiDAR ad alta risoluzione comunque permesso di analizzare e quantificare alcune prime evidenze dell'impatto geomorfologico del conflitto.

3.1 Ortomosaico di Cléry-sur-Somme

Dall'analisi dell'ortomosaico, emergono dettagliatamente i segni dell'impatto antropico e delle distruzioni causate dai combattimenti dell'estate 1916. Sul terreno sono ben identificabili i reticoli delle trincee e dei camminamenti di collegamente, infrastrutture logistiche militari, oltre a un'elevata concentrazione di crateri di artiglieria distribuiti in maniera capillare su tutta la superficie. Il confronto in ambiente GIS permette di associare le strutture difensive individuate con quelle riportate nella cartografia militare. Inoltre, si riscontra la presenza di tracce non censite dalla cartografia ufficiale, evidenziando la natura fortemente dinamica e in continua evoluzione del campo di battaglia. Il raffronto con il DTM dimostra la quasi totale levigatura delle micro-deformazioni superficiali determinata dai processi di ricostruzione, spianamento e bonifica agricola che hanno progressivamente riassorbito e cancellato la visibilità diretta delle tracce dei combattimenti nei terreni coltivati (fig.2).

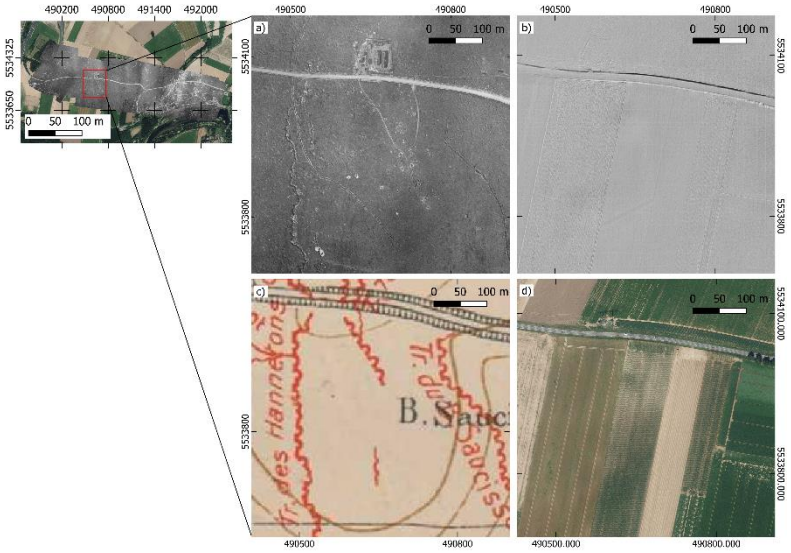


Fig. 2: Particolare dell'ortomosaico ottenuto (a) e confronto con DTM – *Hillshade* (b), Carta storica *Nord de la Somme. Groupe des canevas de tir - 22FI74, Archives de la Somme* (c), BD

ORTHO® 2024 (d) ; SR: WGS 84/UTM zone 31N.

3.2 Analisi LiDAR e morfometria dei crateri nel Bois de Saint-Pierre-Vaast

In netto contrasto con le aree agricole di Cléry-sur-Somme, l'analisi del DTM nel Bois de Saint-Pierre-Vaast ha confermato come la copertura boscata e la bonifica parziale abbiano preservato la memoria morfologica del conflitto. La vettorializzazione e l'estrazione delle statistiche zonali hanno permesso di caratterizzare quantitativamente i crateri in termini di area superficiale, diametro equivalente medio e profondità massima. L'*heatmap* generata mostra come le concentrazioni più elevate si registrino in corrispondenza dei settori settentrionale e occidentale, trovando riscontro in quanto riportato nei resoconti delle operazioni [6, 13].

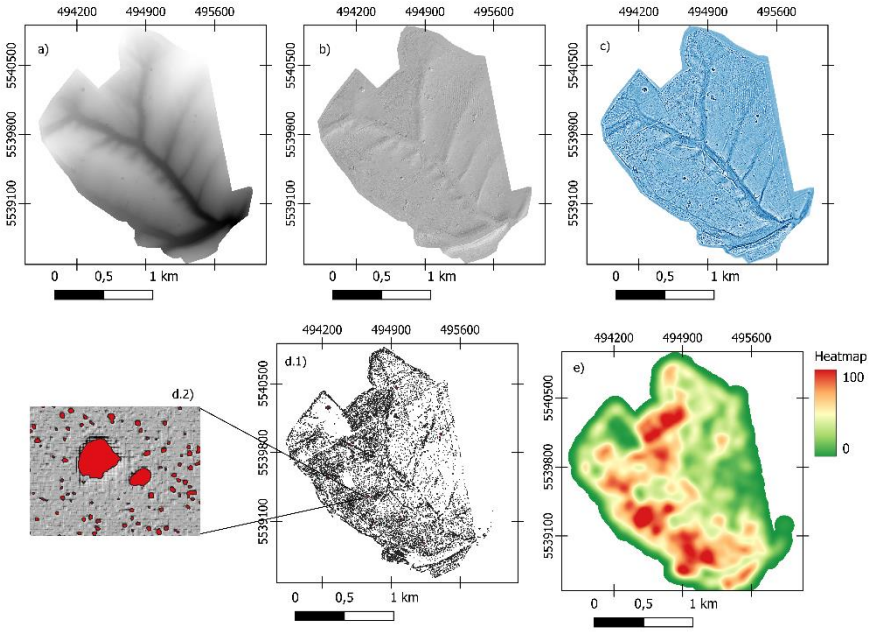


Fig.3: Analisi dell'area del Bois de Saint-Pierre-Vaast, a) DTM ; b) *Hillshade* ; c) LRM ; d1) Vettorializzazione dei crateri; d2) Particolare della vettorializzazione; e) *Heatmap*; SR: WGS 84/UTM zone 31N.

4 Conclusioni e prospettive future

I primi risultati ottenuti in questa fase preliminare della ricerca dimostrano la validità di un approccio multidisciplinare basato sull'integrazione tra dati di differente natura. I successivi sviluppi mirano ad ampliare il quadro conoscitivo e a consolidare la metodologia estendendo l'indagine anche ad altre tipologie di dato. In particolare, si intende testare le potenzialità di immagini multispettrali e iperspettrali acquisite da

satellite (es. Sentinel-2, Planetscope, PRISMA) o da drone. Esse permetteranno di osservare eventuali anomalie vegetative e dei suoli (*crop marks* e *soil marks*) corrispondenti a tracce non più rilevabili topograficamente in aree agricole. L'analisi iperspettrale inoltre consentirà di identificare variazioni nella composizione minerale del suolo dovute al rimescolamento stratigrafico (*bombturbation*), alla presenza di metalli pesanti o a contaminazioni. Si intende anche proseguire nell'analisi spaziale, implementando, ad esempio, analisi di visibilità (*Viewshed Analysis*) per ricostruire le dinamiche logistiche, i campi di tiro e la visibilità reciproca tra le linee avversarie.

Questo approccio non solo arricchisce la ricostruzione storica nell'ambito dell'archeologia dei paesaggi di guerra, ma dimostra come il terreno costituisca un vero e proprio archivio materiale, dove l'impatto ecologico e morfologico dei conflitti continua a manifestarsi attraverso cicatrici indelebili.

Riferimenti bibliografici

1. Milanese, M.: APM–Archeologia Postmedievale, 22, 2018. L'archeologia della Prima Guerra Mondiale. Scenari, progetti, ricerche/The archaeology of the First World War. Research background, projects and case studies. All'Insegna del Giglio (2020).

2. Tucker, R.P., Keller, T., McNeill, J.R., Schmid, M.: Environmental histories of the first world war. Cambridge University Press (2018).

3. Boutet, M., Nivet, P.: La Bataille de la Somme: L'hécatombe oubliée, 1er juillet-18 novembre 1916. Tallandier (2016). https://doi.org/10.14375/NP.9791021018495.

4. Cimmino, M.: Breve storia della prima guerra mondiale. Vol. 1: 1914-1916. Gaspari (2017).

5. Fayolle, M.: Cahiers secrets de la Grande Guerre. Nouveau Monde (2013). https://doi.org/10.14375/NP.9782365838290.

6. Historique du 91e régiment d'infanterie pendant la campagne 1914-1918. Charleville (1920).

7. Jünger, E.: Nelle tempeste d'acciaio. Guanda (2014).

8. Archives en ligne, https://archives.somme.fr/page/archives-en-ligne-1, last accessed 2026/10/11.

9. data.gouv.fr, https://www.data.gouv.fr/datasets/bd-ortho-r, last accessed 2026/10/11.

10. Remonter le temps - IGN, https://remonterletemps.ign.fr/, last accessed 2026/10/11.

11. data.gouv.fr, https://www.data.gouv.fr/datasets/mnt-lidar-hd/informations, last accessed 2026/10/12.

12. Matos-Machado, R. de, Toumazet, J.-P., Bergès, J.-C., Amat, J.-P., Arnaud-Fassetta, G., Bétard, F., Bilodeau, C., Hupy, J.P., Jacquemot, S.: War landform mapping and classification on the Verdun battlefield (France) using airborne LiDAR and multivariate analysis. Earth Surface Processes and Landforms. 44, 1430–1448 (2019). https://doi.org/10.1002/esp.4586.

13. Journaux des marches et opérations (JMO), https://www.memoiredeshommes.defense.gouv.fr/conflits-operations/premiere-guerre-mondiale/journaux-des-unites-engagees-dans-la-premiere-guerre-mondiale.

Ottimizzazione degli iperparametri nella stima di volume e carbonio forestale Accuratezza e costo computazionale

G. D'Amico[1][0000-0002-2341-3268], A. Montaghi[2][0000-0001-8351-0230], M. Niccoli[1][0009-0005-9744-1295], E. Vangi[1][0000-0002-9772-2258], C. Borghi[1][0000-0002-5334-7548], G. Chirici[1][0000-0002-0669-5726]

[1] Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), University of Florence, Florence, Italy; giovanni.damico@unifi.it, mattia.niccoli@unifi.it, elia.vangi@unifi.it, costanza.borghi@unifi.it, gherardo.chirici@unifi.it

[2] Institute for BioEconomy (IBE), National Research Council (CNR), Sesto Fiorentino, Italy. alessandro.montaghi@cnr.it

Abstract. Su plot inventariali e dati multisorgente confrontiamo cinque modelli per volume e carbonio forestale, due strategie di ottimizzazione e tre budget. Extreme Gradient Boosting (XGBoost) beneficia maggiormente del tuning. Nei modelli di boosting, da 100 a 1000 tentativi il guadagno mediano nell'errore relativo è di 0,09 punti percentuali, con tempi circa dieci volte maggiori. Budget moderati risultano adeguati in molte configurazioni.

Parole chiave: Inventario forestale, telerilevamento, machine learning, iperparametri, costo computazionale.

1 Introduzione

Gli inventari forestali forniscono informazioni essenziali sulla consistenza delle risorse legnose e sui serbatoi di carbonio [1]. L'integrazione dei rilievi a terra con le osservazioni satellitari consente di stimare le variabili forestali anche al di fuori dei punti campionati. I modelli di machine learning apprendono queste relazioni dai dati, combinando predittori telerilevati con informazioni ambientali e strutturali. Gli ensemble di alberi decisionali combinano le predizioni di più alberi per rappresentare relazioni non lineari e interazioni tra predittori. Queste caratteristiche ne hanno favorito l'ampia diffusione nella stima spazialmente esplicita di variabili forestali mediante dati telerilevati.

Nelle applicazioni di telerilevamento forestale, gli ensemble di alberi decisionali sono tra gli approcci di machine learning più utilizzati per stimare variabili quantitative. Random Forest (RF) si è affermato come metodo di riferimento, spesso adottato come scelta iniziale nella costruzione dei modelli [2, 3]. RF combina le predizioni di alberi addestrati su campioni bootstrap, ottenuti mediante estrazione con reinserimento delle osservazioni dal set di addestramento. Durante la costruzione di ciascun albero, un iperparametro determina il numero di predittori candidati a ogni suddivisione; le predizioni dei singoli alberi vengono quindi mediate per ottenere la stima finale [3].

Accanto a RF, trovano crescente impiego XGBoost (Extreme Gradient Boosting) e LightGBM (Light Gradient Boosting Machine), entrambi basati sul gradient boosting [4, 5]. In questo approccio, gli alberi sono costruiti sequenzialmente: ogni nuovo albero contribuisce a correggere gli errori dell'ensemble corrente, seguendo il gradiente della funzione di perdita. Questa modalità di apprendimento rende particolarmente rilevante la scelta degli iperparametri che regolano il contributo e la complessità degli alberi.

Per LightGBM, questo studio considera tre configurazioni: Gradient Boosting Decision Tree (GBDT), che impiega il boosting tradizionale; Gradient-based One-Side Sampling (GOSS), che mantiene le osservazioni con gradienti elevati e campiona una parte di quelle con gradienti più piccoli; e Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees (DART), che esclude temporaneamente alcuni alberi durante l'apprendimento per limitarne l'eccessiva specializzazione [5, 6]. A seconda dell'algoritmo, iperparametri quali il numero di alberi, la profondità massima e il tasso di apprendimento controllano la struttura del modello e il processo di addestramento. Essi sono definiti prima dell'apprendimento e si distinguono dai parametri interni, stimati dai dati durante il training [7].

L'ottimizzazione degli iperparametri (Hyperparameter Optimization, HPO), o tuning, mira a ottenere prestazioni migliori in fase di validazione. Random Search campiona configurazioni dalle distribuzioni definite, senza utilizzare i risultati precedenti [8]. Optuna è un framework che, con il campionatore Tree-structured Parzen Estimator (TPE), adatta la ricerca alle configurazioni già valutate [9]. Il beneficio dipende dall'algoritmo e dal problema [2]. Questo contributo confronta modelli predefiniti e ottimizzati per la stima di volume e carbonio delle foreste italiane, valutando l'accuratezza, il tempo di calcolo e il guadagno marginale da 100 a 1000 tentativi.

2 Materiali e metodi

I dati provengono dal terzo Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio, riferito al 2015 (INFC2015) [1]. In particolare, sono stati utilizzati i 6.993 plot della terza fase, dedicata ai rilievi quantitativi. Le variabili di risposta sono il volume legnoso (Growing Stock Volume, GSV, $m^3\ ha^{-1}$) e lo stock di carbonio (Carbon Stock, CS, Mg C ha^{-1}).

I predittori sono stati organizzati in quattro gruppi: i. Landsat e ii. Sentinel (Sentinel-2), basati sui rispettivi dati ottici; iii. MIX, una combinazione multisensore selezionata; iv. MIX_small, una configurazione con meno predittori (Tab. 1). Il nucleo comprende bande, indici spettrali, componenti Tasseled Cap e variabili derivate dal modello digitale di elevazione (Digital Elevation Model, DEM) Copernicus. Sentinel-1 fornisce retrodiffusione radar ad apertura sintetica (Synthetic Aperture Radar, SAR); VH indica trasmissione verticale e ricezione orizzontale. I dati ottici Landsat e Sentinel-2 derivano da compositi annuali sviluppati con l'approccio medoid [10].

Gli indici comprendono Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Burn Ratio (NBR), Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Mangrove Vegetation Index (NMVI),

Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) e Moisture Stress Index (MSI). Le componenti Tasseled Cap rappresentano la luminosità, il verde della vegetazione e l'umidità spettrale e, per Landsat, una componente angolare; TCG indica Tasseled Cap Greenness. I prefissi LT e S2 identificano Landsat e Sentinel-2; SWIR2 è la seconda banda dell'infrarosso a onde corte (Short-Wave Infrared, SWIR). Oltre agli indici spettrali, è utilizzata anche la distanza euclidea (Euclidean Distance, ED) associata alla selezione medoid, quale indicatore della rappresentatività spettrale dell'osservazione.

Tutti i gruppi includono covariate climatiche di radiazione, precipitazione, temperatura e deficit di pressione di vapore, e un modello di altezza della copertura arborea (Canopy Height Model, CHM) di Tolan et al. [11]. Landsat, Sentinel e MIX includono anche mappe pregresse di volume e carbonio, escluse da MIX_small. I conteggi della Tab. 1 riguardano solo i nuclei ottico, radar e topografico, non il totale dei predittori finali. Il confronto modifica quindi sia la quantità sia il contenuto informativo delle variabili.

Tab. 1. Nucleo ottico, radar e topografico. N indica il numero di queste variabili, escluse integrazioni climatiche, altezza della copertura e mappe pregresse. Le variabili risposta e la categoria forestale non rientrano nel conteggio.

Insieme	N	Composizione
Landsat	19	Quota, pendenza ed esposizione; 6 bande ottiche; 6 indici spettrali: NDVI, EVI, NBR, NDWI, EMVI, NDBI; 4 componenti Tasseled Cap.
Sentinel	17	Quota, pendenza ed esposizione; 5 bande ottiche; 5 indici (MSI, NDMI, NDVI, EVI, NBR); 3 componenti Tasseled Cap; S2_ED.
MIX	14	Quota e pendenza; 4 bande ottiche; 4 indici spettrali; 3 componenti Tasseled Cap; retrodiffusione VH Sentinel-1 in orbita ascendente.
MIX_small	8	Quota; LT_SWIR2, LT_NBR e LT_TCG; S2_SWIR2 e S2_NBR; retrodiffusione VH Sentinel-1 in orbite ascendente e discendente.

Il training (80%) serve all'addestramento e alla selezione dei modelli; il test (20%) è riservato alla valutazione finale. La partizione casuale è stratificata per categoria forestale, identificata dal campo CFOR del database, per conservarne approssimativamente le proporzioni. Gli stessi plot sono assegnati ai due insiemi per tutti i gruppi di predittori. Si confrontano cinque configurazioni: RF, XGBoost con booster gbtree (boosting basato su alberi) e LightGBM nelle configurazioni GBDT, GOSS e DART.

Per ogni combinazione di modello, predittori e variabile risposta si stima una baseline con le impostazioni predefinite del software, indicate nelle figure come Default. Seguono Random Search, implementata con RandomizedSearchCV, e Optuna con TPE, con budget di 10, 100 e 1000 tentativi. Ogni tentativo valuta una configurazione di iperparametri: questo budget è distinto dal numero di alberi o dalle iterazioni di apprendimento del modello.

L'HPO utilizza la cross-validation a cinque partizioni (fold) del training: a turno, quattro partizioni vengono utilizzate per l'addestramento e la quinta per la validazione. Le prestazioni guidano la selezione; il modello scelto è riaddestrato sull'intero training

e valutato sul test, esterno all'HPO. Il disegno comprende 240 procedure di ottimizzazione (5 modelli × 4 gruppi × 2 target × 2 strategie × 3 budget), ciascuna con un modello selezionato, e 40 modelli predefiniti.

Per la valutazione dell'accuratezza sono stati usati il Root Mean Square Error (RMSE), cioè la radice della media dei quadrati delle differenze tra osservazioni e predizioni, e il RMSE%, ottenuto dividendo RMSE per la media osservata del target nel test e moltiplicando il rapporto per 100.

L'effetto del tuning è espresso come ΔRMSE% = RMSE%ottimizzato − RMSE%predefinito: valori negativi indicano miglioramenti. Il guadagno marginale è $G_{100\rightarrow1000}$ = $RMSE\%_{100}$ − $RMSE\%_{1000}$: valori positivi indicano miglioramenti da 100 a 1000 tentativi. Si confrontano gli stessi target, predittori, algoritmi e strategie. Il rapporto t_{1000}/t_{100} quantifica l'aumento dei tempi. Le differenze di RMSE% sono espresse in punti percentuali, abbreviati nelle figure come p.p. I minimi tra strategie e budget restano riepiloghi descrittivi ex post sul test.

Nelle figure di costo e beneficio, tempo e ΔRMSE% sono sintetizzati con mediane separate sui quattro gruppi di predittori, per ciascuna combinazione di algoritmo, target, strategia e budget. Il punto mediano non è necessariamente una singola esecuzione. Le sintesi descrivono configurazioni diverse, non ripetizioni indipendenti della stessa procedura.

3 Risultati

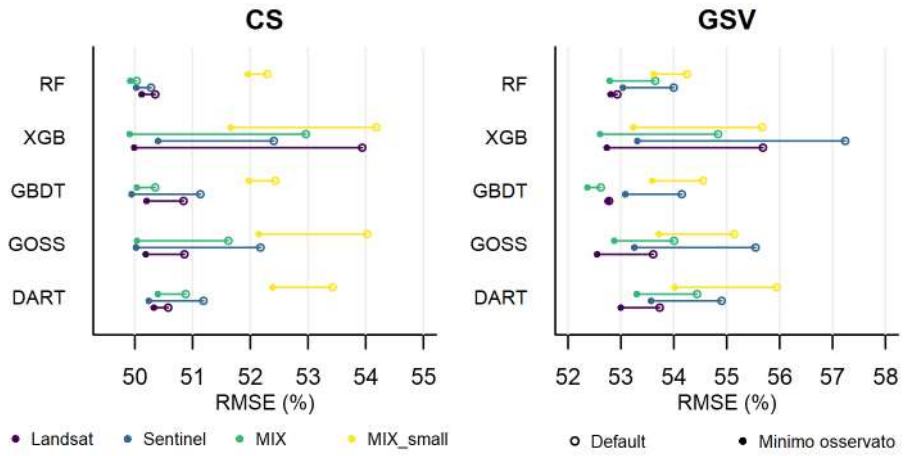


Fig. 1. RMSE% dei modelli predefiniti e minimo osservato tra strategie e budget di HPO. CS indica lo stock di carbonio e GSV il volume legnoso; XGB: XGBoost. GBDT, GOSS e DART indicano le configurazioni LightGBM descritte nell'introduzione. I colori distinguono i quattro gruppi di predittori. Il minimo è una sintesi descrittiva ex post delle prestazioni sul test.

Considerando le 20 combinazioni di algoritmo e predittori per ciascuna variabile risposta, la mediana di RMSE% dei modelli predefiniti è 51,40% per CS e 54,34% per GSV. Se per ciascuna combinazione si considera il minimo osservato tra le sei

procedure di HPO, le mediane sono rispettivamente del 50,19% e del 53,06%. XGBoost mostra il beneficio maggiore: la riduzione mediana rispetto alla baseline, calcolata sui quattro gruppi di predittori, è di 2,79 punti percentuali per CS e 2,69 per GSV. RF presenta riduzioni più contenute, pari a 0,24 e 0,75 punti; le configurazioni di LightGBM presentano risposte intermedie (Fig. 1).
Il beneficio del minimo osservato non implica che tutte le procedure di tuning migliorino la baseline. Alcune configurazioni di RF, infatti, peggiorano fino a 6,57 punti di RMSE% per CS e 9,93 per GSV, soprattutto con budget ridotti. Anche LightGBM-DART presenta configurazioni sfavorevoli. In XGBoost gran parte del recupero rispetto alle impostazioni predefinite si osserva già con 10 tentativi, mentre i budget maggiori determinano variazioni più contenute. Il confronto non identifica una strategia di ricerca superiore in tutte le combinazioni di algoritmo e predittori. La Fig. 2 collega questi risultati ai tempi di ottimizzazione.
Le differenze tra gruppi di predittori persistono dopo il tuning. Per CS, i minimi osservati dei modelli basati su Landsat, Sentinel e MIX ricadono complessivamente nell'intervallo 49,91–50,40% di RMSE%, mentre quelli di MIX_small variano tra 51,66 e 52,38%. Per GSV gli intervalli sono rispettivamente 52,37–53,57% e 53,23–54,02%. Il gruppo con meno predittori risulta dunque generalmente meno accurato, soprattutto per CS; l'HPO non annulla il divario legato alla diversa composizione dei dati.

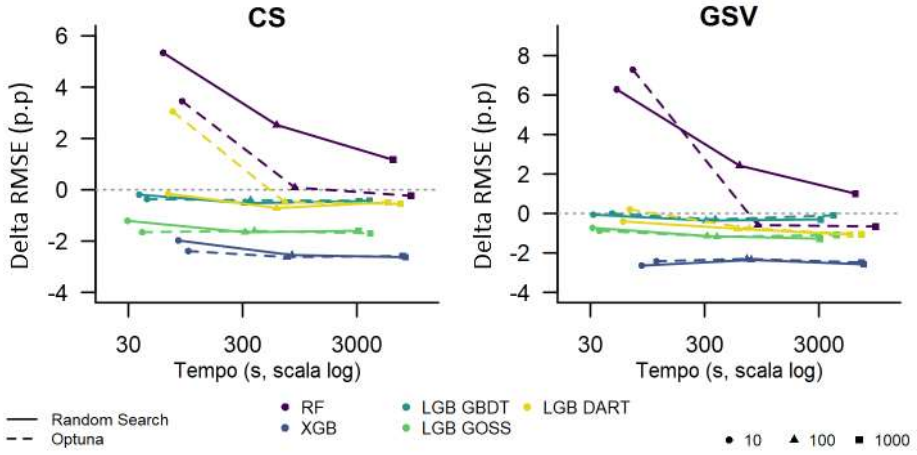


Fig. 2. Tempo di HPO e ΔRMSE% rispetto ai modelli predefiniti. Ogni punto riporta mediane separate sui quattro gruppi, per target, algoritmo, strategia e budget. Valori negativi indicano miglioramenti. XGB e LGB abbreviano XGBoost e LightGBM; p.p. indica punti percentuali. Le linee collegano budget diversi, senza implicare una ricerca cumulativa.

Il confronto tra 100 e 1000 tentativi comprende 64 coppie per i quattro modelli di boosting (4 modelli × 4 gruppi di predittori × 2 target × 2 strategie). Il guadagno mediano è di 0,089 punti di RMSE%, mentre il rapporto mediano dei tempi è 10,05. In 60 delle 64 coppie la variazione assoluta di errore non supera 0,5 punti percentuali, includendo sia miglioramenti sia peggioramenti. RF costituisce il caso con il maggior

recupero a budget elevati, soprattutto con Random Search: il guadagno mediano sui quattro gruppi è di 1,69 punti per CS e 1,42 per GSV. Con Optuna i corrispondenti valori sono 0,27 e 0,20 punti (Fig. 3).

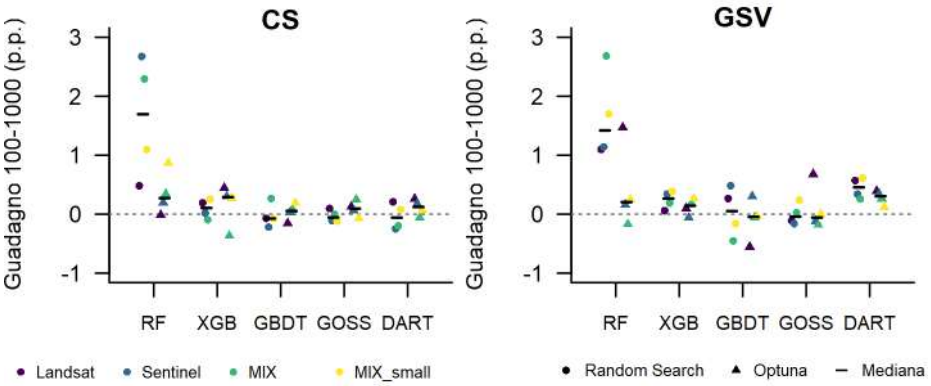


Fig. 3. Guadagno marginale da 100 a 1000 tentativi, calcolato come $RMSE\%_{100} - RMSE\%_{1000}$. I colori distinguono i gruppi di predittori e i simboli le strategie; i segmenti neri rappresentano, per ciascuna strategia, la mediana tra i quattro gruppi. Valori positivi indicano miglioramenti, negativi peggioramenti. Le differenze sono espresse in punti percentuali.

4 Discussione

Il beneficio del tuning deve essere valutato in relazione alla qualità della baseline. XGBoost mostra margini di miglioramento elevati e raggiunge prestazioni prossime a quelle dei modelli già competitivi con le impostazioni predefinite, in accordo con la sensibilità agli iperparametri documentata in letteratura [7, 12]. In RF, il peggioramento di alcune configurazioni è compatibile con limiti dello spazio di ricerca che riducono eccessivamente la complessità degli alberi. Questa interpretazione riguarda gli intervalli esplorati e non dimostra che l'ottimizzazione di RF sia intrinsecamente svantaggiosa. È quindi opportuno mantenere il modello predefinito come termine di confronto durante la selezione in fase di validazione.

Nei modelli di boosting, l'aumento del budget da 100 a 1000 tentativi richiede tempi circa dieci volte maggiori, ma produce variazioni dell'errore generalmente contenute. Il recupero più marcato di RF con Random Search va interpretato in relazione alle prestazioni della baseline: migliorare una configurazione meno accurata ma ottimizzata non implica necessariamente superare il modello predefinito. I risultati sostengono budget moderati come punto di partenza, da estendere qualora la validazione mostri benefici ancora rilevanti. Non definiscono tuttavia né una soglia di arresto universale né una strategia di ricerca sempre preferibile.

Il confronto MIX–MIX_small modifica sia il numero sia il tipo dei predittori. Oltre a escludere le mappe pregresse, MIX_small include la componente Tasseled Cap Greenness di Landsat e la retrodiffusione discendente di Sentinel-1, assenti dal nucleo di MIX. Non rappresenta quindi un sottoinsieme stretto con cui isolare il solo effetto

della dimensionalità. Analogamente, la riduzione della dispersione tra i modelli non dimostra stabilità né tra le esecuzioni né nello spazio. Le mediane riportate descrivono le configurazioni disponibili e non costituiscono intervalli di confidenza.

Lo studio riguarda il contesto forestale italiano e utilizza una singola partizione casuale dei plot, stratificata per categoria forestale. Il test, mantenuto esterno all'ottimizzazione, valuta le prestazioni su osservazioni escluse dall'addestramento nello stesso dominio geografico. La trasferibilità ad altre aree richiede ulteriori verifiche, mediante partizioni spaziali che separino geograficamente il training e il test, e mediante applicazioni in contesti forestali differenti.

La selezione ex post del minimo sul test, utilizzata nelle figure e nei risultati, per ciascuna combinazione di algoritmo, predittori e variabile di risposta, consente di descrivere il beneficio massimo osservato del tuning; la conferma della configurazione più efficace richiede ulteriori partizioni dei dati o un insieme di valutazione indipendente.

5 Conclusioni

L'HPO può migliorare la stima di volume e carbonio forestale, ma il beneficio dipende dall'algoritmo, dalla baseline e dallo spazio di ricerca. Nel caso esaminato, XGBoost mostra il recupero più consistente, mentre RF è già competitivo con le impostazioni predefinite. Nei quattro modelli di boosting, il passaggio da 100 a 1000 tentativi produce un guadagno mediano di circa 0,09 punti di RMSE% con tempi circa dieci volte maggiori. Per applicazioni analoghe, un approccio operativo consiste nel partire da budget moderati, confrontare le prestazioni con la baseline e ampliare la ricerca in base ai risultati di validazione. La trasferibilità di queste indicazioni richiede partizioni spaziali, ripetizioni indipendenti dell'HPO e confronti in contesti forestali diversi.

Riferimenti bibliografici

[1] Gasparini, P., Di Cosmo, L., Floris, A., De Laurentis, D. (a cura di): Italian National Forest Inventory—Methods and Results of the Third Survey. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-030-98678-0

[2] Freeman, E.A., Moisen, G.G., Coulston, J.W., Wilson, B.T.: Random forests and stochastic gradient boosting for predicting tree canopy cover: comparing tuning processes and model performance. Canadian Journal of Forest Research 46(3), 323–339 (2016). https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0562

[3] Breiman, L.: Random forests. Machine Learning 45, 5–32 (2001). https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

[4] Chen, T., Guestrin, C.: XGBoost: A scalable tree boosting system. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 785–794 (2016). https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

[5] Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., Liu, T.-Y.: LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. Advances in Neural Information Processing Systems 30, 3146–3154 (2017).

[6] Korlakai Vinayak, R., Gilad-Bachrach, R.: DART: Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees. Proceedings of the Eighteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics 38, 489–497 (2015).
[7] Bischl, B., Binder, M., Lang, M., Pielok, T., Richter, J., Coors, S., Thomas, J., Ullmann, T., Becker, M., Boulesteix, A.-L., Deng, D., Lindauer, M.: Hyperparameter optimization: Foundations, algorithms, best practices, and open challenges. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery 13(2), e1484 (2023). https://doi.org/10.1002/widm.1484
[8] Bergstra, J., Bengio, Y.: Random search for hyper-parameter optimization. Journal of Machine Learning Research 13, 281–305 (2012).
[9] Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., Koyama, M.: Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. In: Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 2623–2631 (2019). https://doi.org/10.1145/3292500.3330701
[10] D'Amico, G., et al.: A multi-source remote sensing dataset for large-scale forest monitoring. Data in Brief 67, 112945 (2026). https://doi.org/10.1016/j.dib.2026.112945
[11] Tolan, J., et al.: Very high resolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. Remote Sensing of Environment 300, 113888 (2024). https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113888
[12] Probst, P., Boulesteix, A.-L., Bischl, B.: Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. Journal of Machine Learning Research 20(53), 1–32 (2019).

GIS per la catalogazione delle specchie situate nel Salento (Puglia)

Maurizio Delli Santi[1]

[1] CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE – Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, e-mail: maurizio.dellisanti@cnr.it;

Abstract. Il GIS per la schedatura sistematica delle specchie presenti nel Salento implementa tecnologie di analisi GIS. Con esse si evidenziano immediatamente le caratteristiche comuni delle specchie, creando così tabelle che, convertite in formati speciali, collegano dinamicamente i manufatti e i segmenti tematici. Con specchie vengono definite quei cumuli di pietrame informe ancora presenti nelle campagne del Salento, di epoca messapica, poste quasi sempre su un'altura, atti ad allargare l'orizzonte, per l'avvistamento del nemico.

Parole chiave: GIS, Specchie, Salento.

1 Introduzione

L'informazione contenuta in un dato geografico, ossia il posizionamento spaziale, è una sorta di metadato, in quanto costituito da un'altra serie di dati, tra loro correlati: l'insieme di coordinate geografiche, i valori numerici del dato stesso, la posizione che occupa nel tempo, ecc. La congiunzione di valori numerici ed alfanumerici alla ordinaria coppia di coordinate geografiche, consente di valorizzare il mero dato geografico, si trasforma in informazione, un *input* che, rappresentata su una mappa per mezzo delle tecnologie GIS, consente elevate opportunità di utilizzazione. Creati quali strumenti di controllo tecnico del territorio, i GIS attualmente costituiscono uno degli *atout* più strategici per la "lettura" interdisciplinare del patrimonio culturale. Infatti, è sempre più intensa l'applicazione GIS al campo della conservazione del patrimonio edilizio esistente, in particolare per quello storico-monumentale, con un graduale abbandono della scala urbanistica in favore di rappresentazione grafico-informatiche differenti, che giunge a rappresentare anche il manufatto architettonico. Il GIS per la schedatura sistematica delle specchie presenti nel territorio salentino, implementa tecnologie di analisi GIS. Con esse si evidenziano immediatamente le caratteristiche comuni delle specchie, creando così tabelle che, convertite in formati speciali, collegano dinamicamente i manufatti e i segmenti tematici: una fonte preziosa per un innovativo strumento di analisi, in chiave di recupero conservativo e successiva valorizzazione, dell'intero sistema delle specchie.

2 Le specchie presenti nel Salento

Sin dall'antichità l'uomo ha avvertito la necessità di tenere sotto controllo il territorio vicino alla sua dimora e quindi difenderlo da eventuali conquistatori con ogni mezzo a disposizione. Da qui, la necessità che sedi umane si organizzarono quasi sempre su un'altura oppure furono realizzati apprestamenti. Con specchie vengono definite quei cumuli di pietrame informe ancora presenti nelle campagne del Salento poste quasi sempre su un'altura atti ad allargare l'orizzonte per l'avvistamento del nemico. Le specchie rappresentano, quindi, una forma primitiva di difesa, in quanto la loro funzione era soltanto quella di controllo e di avvistamento, avamposti che simili alle torri, potevano segnalare l'avvicinarsi di un pericolo. Specchia infatti deriva dal latino *specula,* e significa luogo eminente. Diffuse soprattutto nel Salento, questi antichissimi "posti di guardia" dovettero assumere un ruolo importante in epoca messapica, infatti intorno ai più importanti insediamenti messapici, come Oria, Manduria, Ceglie Messapica e *Rudiae*, troviamo tutt'oggi specchie disposte a corona (Costantini, 2024). Queste costruzioni si presentano comunemente con una base circolare, con diametro che si aggira intorno ai 25 – 30 metri, formata da un anello di grossi blocchi squadrati che compongono un accumulo di pietrame informe e s'innalza a forma tronco conica fino a raggiungere un'altezza di circa sette metri. Non si può escludere che molte specchie siano state realizzate anche come *speculae* in epoca romana e medievale. Un esempio della conferma della relazione tra specchie e viabilità può essere, la ancora visitabile, *Specchia dei Mori* (Fig. 1)*,* ubicata sulla strada Martignano – Martano, che situata su un pianoro, ha avuto un ruolo importante come punto di osservazione della costa ma anche del tracciato della Via Traiano – Calabra. Un'antenata delle torri costiere aragonesi e quindi antico punto di osservazione e controllo della fascia costiera, era la *Specchia di Caulone,* situata nei pressi dell'odierna marina di Casalabate (Costantini, 2024). Ma il sistema difensivo di questa area era anche affidato ad altre due specchie: la *Specchia di Cerrate e la Specchia di Furno,* la prima è ubicata a circa 200 metri dall'Abbazia di Cerrate, mentre la seconda si trova sul confine tra il feudo di Cerrate e quello dell'Abbatessa (Costantini, 2024). A nord di Manduria e precisamente al Km 2,3 della strada Francavilla-Manduria, in prossimità del ciglio stradale, è possibile osservare il cosiddetto *Specchione* (Fig. 2). Questo manufatto fa parte delle specchie della corona circum-oritana, come la *Specchia d'Oria* e la *Specchia Schiavoni*. Oggi la specchia si presenta come una collina sassosa e ricoperta di arbusti e ulivi. La *Specchia Schiavoni,* invece, si trova in prossimità del confine amministrativo tra Manduria e Oria, precisamente al km 0,120 della strada orientale Manduria-Oria (Fig. 3), mentre la *Specchia d'Oria* si trova a 0,500 km a est dall'incrocio tra la statale Manduria-Oria e la strada statale in costruzione nella cosiddetta Bradanica-Salentina. Si presenta come un manufatto di notevoli dimensioni apparentemente costruito con l'accumulo di terra e pietre disposte sopra una circonferenza di blocchi squadrati (Marra, 2002).



Fig. 1 – Territorio di Martano. *La Specchia dei Mori*.



Fig. 2 – Territorio di Oria. *La Specchia Schiavoni*.



Fig. 3 – Territorio di Oria. *Lo Specchione*.

3 Struttura del GIS

Per la realizzazione dell'applicazione GIS, è stato necessario seguire una precisa procedura programmatica che ha previsto, come prima fase, la creazione di un modello dati. Un modello dati si ottiene attraverso un percorso logico che consiste, innanzi tutto, nell'avere chiari gli obiettivi da conseguire, nella selezione e nell'organizzazione delle informazioni da utilizzare, nella scelta dei *software* e dei formati più consoni al tipo di informazioni utilizzate, nella valutazione del trattamento dati (tecniche di elaborazione, implementazione ed analisi dei dati). L'elemento più interessante del modello dati di un GIS sono i *database.* In genere la cartografia ha come obiettivo principale la produzione di carte per la rappresentazione delle informazioni; un GIS invece ha come obiettivo principale l'analisi dei dati, per diventare uno strumento di supporto alle decisioni. Nell'analisi condotta mediante GIS non si addiviene ad una mera rappresentazione geometrica dei manufatti o degli oggetti: ciò che si evidenzia sono piuttosto le dirette relazioni spaziali tra i diversi elementi, come la connessione, l'adiacenza o l'inclusione. Dalle suddette relazioni, il sistema GIS consentirà - tramite la strutturazione di dati diversi ma completi – di definire analisi complesse di monitoraggio dello spazio, delineando di volta in volta i tratti specifici del *topos.* In pratica, il modello dei dati, in una ottica di efficace interazione, deve prevedere l'inserimento, al suo interno, di dati descrittivi dei singoli oggetti reali, definibili come attributi dello spazio. Questi tre insiemi di informazioni (geometria, topologia, attributi) vengono poi effettivamente implementati in un GIS mediante uno specifico modello fisico, che oggi si basa su strutture dei dati di tipo relazionale, tipiche dei *database* più evoluti e su architetture *hardware* e *software* di tipo *client/server*, tipicamente in reti locali di elaboratori: nel nostro caso, il software GIS utilizzato per l'implementazione e la successiva gestione dei dati è stato ArcGIS della Esri (Fig. 3). Più generalmente, le fasi essenziali per produrre un'elaborazione del dato geografico sono: input dei dati, gestione dei dati, analisi dei dati, presentazione dei dati. Occorrerà comunque distinguere la tipologia di dati stessi, essi sono distinguibili solitamente in due categorie: dati spaziali (vale a dire il posizionamento degli elementi geografici, nel nostro caso le specchie situate nel Salento) e dati attributo (cioè l'insieme del patrimonio culturale, localizzazione dello stesso, denominazione, secolo di costruzione, stato di conservazione, etc.), associati ai dati spaziali (Fig 4). I dati spaziali (mappe, rilievi, ecc.) sono stati implementati mediante digitalizzazione manuale, *scanning* e *files* grafici in formato vettoriale; i dati attributo, invece, sono stati introdotti tramite *script* da tastiera di elaboratore elettronico. E' importante evidenziare il fatto che in un GIS le informazioni vettoriali sono sempre accompagnate da informazioni topologiche. La topologia è la branca della matematica che studia le relazioni tra gli oggetti geometrici; essa analizza quelle proprietà delle figure che si mantengono inalterate anche quando le figure stesse subiscono una deformazione continua. In generale, tutte le informazioni inserite nel GIS risultano provenienti da supporti cartacei, tabelle-attributi o *database* interni al *software*. Sinteticamente, si riporta che l'identificazione delle specchie, sulla relativa cartografia di base, è stata eseguita secondo la tipologia

puntuale: l'opzione di una tipologia da riferire al geotipo, ossia alla classe di oggetto grafico, dipende non solo dalla sua estensione nello spazio, ma anche dall'uso previsto o prevedibile che si vuol fare di ogni elemento nelle fasi di gestione dei dati. Dopo il processo descritto, sono state opportunamente redatte delle tabelle-attributo collegate in modo interattivo alle specchie, così da determinare, alla richiesta di dati tramite puntamento, una classe di informazioni dettagliate sul sito oggetto di interesse. I dati attributo sono stati inseriti in un database interno: ogni tabella è collegata al geotipo attraverso il legame ID, che viene automaticamente gestito dal *software* ArcGIS. La gestione complessa dei dati, ovvero le procedure per archiviare e ricercare le informazioni introdotte in un GIS, sono poi affidate ad un *database* che gestisce le relazioni informative (Fig. 5). Il tracciato per giungere ad individuare le informazioni si articola in "chiavi di ricerca" definiti a target univoco e a gerarchia differenziata di domanda: ad esempio, sarà possibile ricercare le singole emergenze architettoniche del patrimonio delle specchie oppure le caratteristiche strutturali e morfologiche delle stesse. La gestione dei diversi tematismi cartografici associati ad un bene culturale è stata affidata alla tecnica dell'*overlay*, cioè della codifica per *layers* differenti delle informazioni di base.

4 Conclusioni

Lo strumento di analisi, in continuo aggiornamento e che presenta agilità di lettura-interpretazione, si compone di documenti informatici di facile utilizzo, orientati non solo all'indagine meramente scientifica bensì anche alle istanze istituzionali, al fine di varare iniziative – locali o regionali – tese a recuperare, sia dal punto di vista edilizio che economico, il patrimonio culturale delle specchie. Lo studio così condotto contiene pertanto spunti di valorizzazione interessate a ipotesi di sviluppo territoriale per la programmazione di un organico piano di recupero e fruizione delle specchie a valere quale riqualificazione di un più ampio territorio di riferimento.

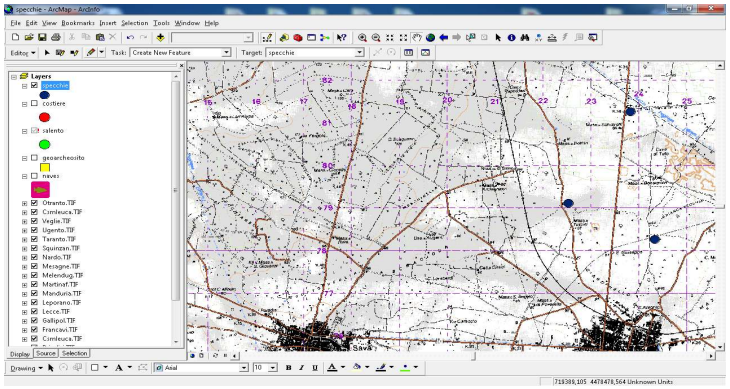


Fig. 4 – Schermata durante una sessione di lavoro:
si evidenzia la tipologia riferita al geotipo-*specchia* del tipo puntuale.

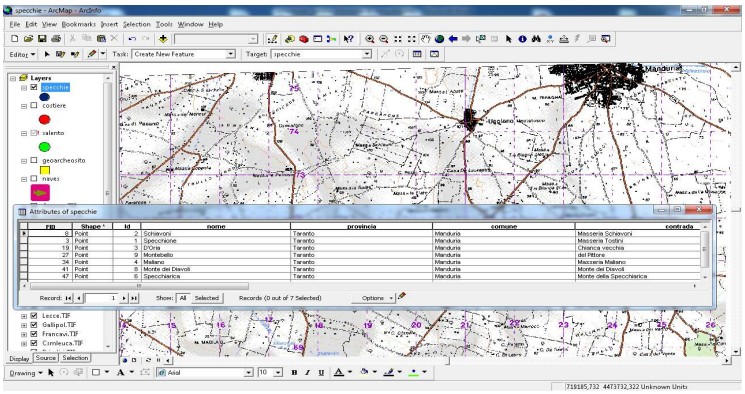


Fig. 5 – Schermata durante una sessione di lavoro:
si evidenzia il database associato ai dati spaziali (specchie).

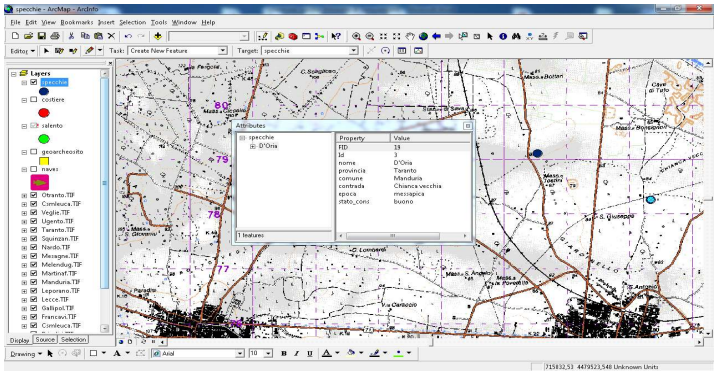


Fig. 6 – Schermata durante una sessione di lavoro:
si evidenzia il *database* associato al dato spaziale.

Riferimenti bibliografici

1. De Giorgi C., Le specchie in Terra d'Otranto (Note e Documenti), in Riv. Stor. Salent., nn. 7-8, 11-12. Lecce, (1905).

2. Neglia G., Il fenomeno delle cinte di "Specchie" nella penisola salentina, Bari, (1970).

3. Delli Santi M., Gizzi F.T., Masini N., Pellettieri A., Potenza M.R., Santagata P., Il G.I.S. nella fotointerpretazione aerea di un territorio: Monte Serico in Basilicata, in Atti della 3° Conferenza Nazionale ASITA: Informazioni Territoriali e Rischi Ambientali (Napoli, 9-12 novembre 1999), vol. II, 703-708, (1999).

4. Delli Santi M., Masini N., Montesano N., Pellettieri A., Potenza M. R., G.I.S. e Beni Culturali: i centri scomparsi nella Basilicata, in Atti della 5° Conferenza Nazionale ASITA: La qualità nell'Informazione Geografica (Palacongressi di Rimini, 9-12 ottobre 2001), vol. II, 701-706, (2001).

5. Marra R., *Le specchie situate nel territorio di Manduria,* in QuaderniArcheo, NN. 6-7 - 2002, Barbieri Editore, Manduria, 153-174, (2002).

6. Delli Santi M., Censimento e catalogazione dei "marmi antichi": un'applicazione G.I.S., in Atti della 12° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni territoriali e Ambientali (L'Aquila, 21 - 24 ottobre 2008), vol. I, 2009, 1019 – 1024, (2008).

7. Delli Santi M., La banca dati digitale delle torri costiere del XVI secolo nel Salento, in Atti della 14° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Brescia, 9 - 12 dicembre 2010), 2010, 849 – 855, (2010).

8. Delli Santi M., Un Sistema Informativo Territoriale per la salvaguardia del patrimonio architettonico in Basilicata, in Atti della 15° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Reggia di Colorno, Parma, 15 - 18 novembre 2011), 2011, 883 – 887, (2011).

9. Delli Santi M., Conservazione e valorizzazione dei castelli del Salento (Puglia) attraverso censimento in ambiente GIS, in Atti della 16° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Fiera di Vicenza, 6 - 9 novembre 2012), 2012, 555 – 562, (2012).

10. Delli Santi M., Geomatica e beni culturali: in GIS per la gestione e valorizzazione delle masserie della Basilicata, in Atti della 17° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Riva del Garda, 5 - 7 novembre 2013), 2013, 623 – 630, (2013).

11. Delli Santi M., La Geomatica per la valorizzazione del patrimonio architettonico nella provincia di Potenza, in Atti della 18° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Firenze, 14 - 16 ottobre 2014), pp. 461 – 468, (2014).

12. Delli Santi M., La Geomatica per il monitoraggio del patrimonio architettonico nella provincia di Matera, in Atti della 19° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Lecco, 29 - 30 settembre, 1 ottobre 2015), pp. 355 – 362, (2015).

13. Delli Santi M., Geomatica e beni culturali: GIS per la valorizzazione degli insediamenti rupestri dell'Alto Salento, in Atti della 20° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Cagliari, 8 - 10 novembre 2016), pp. 309 – 316, (2026).

14. Delli Santi M., Geomatica e beni culturali: il patrimonio architettonico del comune di Calvera in Basilicata, in Atti della XXI° Conferenza Nazionale ASITA, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Salerno, 21 - 23 novembre 2017), pp. 365 – 372, (2017).

15. Delli Santi M., HBIM per il recupero di tre trulli in Puglia, in Atti di #AsitaAcademy2021, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Webnar, 1-2-9-16-23 luglio 2021), pp. 115 – 120, (2021).

16. Delli Santi M., Geomatica per i beni culturali: catalogazione tramite GIS delle torri colombaie del Salento, in Atti di #Asita2022 dal titolo: GEOMATICA PER LA TRANSIZIONE VERDE E DIGITALE, Federazione Italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientali (Genova in webnar, 20-24 giugno 2022), pp. 151 – 158, (2022).

17. Delli Santi M. – Passarelli M. – Corrado A., Analisi ricostruttiva del sito fortificato di Monte Croccia (Oliveto Lucano), in Atti della 27 Conferenza Nazionale ASITA (Federazione italiana delle Associazioni Scientifiche per le informazioni Territoriali e Ambientale (Padova, 9 – 13 dicembre 2024), pp. 165 – 171 (2024).

18. Costantini A., Il Sistema Difensivo del Salento, Congedo Editore, Galatina, (2024).

SMART-PUFFIN: una metodologia a basso costo per il posizionamento di sorgenti sonore in ambiente subacqueo

Silvio Del Pizzo [1,4], Antonio Angrisano [2], Salvatore Gaglione [1,3], Bianca Naspi [1], Gabriele Portelli[3], Antonio Schiano Lo Moriello [4], Salvatore Troisi[1,3]

[1] Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Italia – <silvio.delpizzo, salvatore.gaglione,salvatore.troisi>@uniparthenope.it; bianca.naspi001@studenti.uniparthenope.it;
[2] Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina, Italia – antonio.angrisano@unime.it
[3] Dottorato di Ricerca Internazionale / Cattedra UNESCO in "Ambiente, Risorse e Sviluppo Sostenibile", Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Italia – gabriele.portelli@phds.uniparthenope.it
[4] Dottorato di Ricerca Internazionale in "Information and Communication Technology and Engineering", Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Italia – antonio.schianolomoriello@phds.uniparthenope.it

Abstract. Il contributo presenta i primi risultati del progetto SMART-PUFFIN sulla localizzazione di sorgenti acustiche subacquee mediante misure TDOA acquisite da una rete di idrofoni sincronizzati. La metodologia integra la stima dei ritardi di arrivo, l'analisi della geometria dei sensori tramite DOP e il pretrattamento dei segnali. Le prime prove su dati reali confermano la fattibilità dell'approccio con sensoristica low-cost e il ruolo della geometria nell'accuratezza del posizionamento.

Parole chiave: Posizionamento subacqueo, TDOA, Monitoraggio acustico.

1 Introduzione

Il monitoraggio degli ecosistemi marini è essenziale per la tutela della biodiversità e la gestione sostenibile delle risorse, soprattutto nelle Aree Marine Protette (AMP), dove occorre sorvegliare le attività antropiche [1]. I rilievi visivi, fotografici e subacquei forniscono informazioni dettagliate, ma la loro discontinuità limita l'osservazione di eventi occasionali. Tra questi rientrano il transito di mammiferi marini e la pesca illegale del dattero di mare (*Lithophaga lithophaga*), la cui raccolta comporta la distruzione del substrato roccioso, con gravi conseguenze per gli habitat e le comunità bentoniche [2]. Il monitoraggio acustico passivo consente di rilevare tali eventi attraverso i suoni che generano. Tuttavia, riconoscere la presenza di una sorgente non equivale a determinarne la posizione: quest'ultima richiede acquisizioni distribuite e specifiche procedure di elaborazione. Inoltre, i costi della strumentazione possono limitare l'estensione delle reti di osservazione, rendendo necessario lo sviluppo di soluzioni a basso costo [3].

In questo contesto si colloca il progetto SMART-PUFFIN (*Smart Positioning Underwater System for Environmental Field using Artificial Intelligence*), finalizzato a integrare idrofoni, ricevitori GNSS e algoritmi di analisi dei segnali per identificare e localizzare sorgenti sonore subacquee, sia cooperative che non cooperative. L'architettura originaria prevede boe equipaggiate con sistemi di acquisizione sincronizzati tramite riferimenti temporali GNSS e geolocalizzate mediante il *Precise Point Positioning* (PPP) [4]. La metodologia di posizionamento della sorgente si basa sulle differenze di tempo di arrivo TDOA (*Time Difference of Arrival*) di un medesimo segnale rilevato da diversi idrofoni. Note le coordinate dei sensori acustici e la velocità di propagazione del suono, i ritardi temporali consentono di determinare differenze di distanza e di stimare la posizione della sorgente [5]. L'approccio non richiede di conoscere l'istante di emissione, ma richiede acquisizioni temporalmente coerenti e una conoscenza adeguata della geometria di misura. L'impiego di componenti *low-cost* richiede attenzione alla stabilità della sincronizzazione, al campionamento e alla qualità delle registrazioni. Un ruolo centrale è attribuito alla geometria della rete, analizzata mediante la *Dilution of Precision* (DOP). Questo indicatore descrive come la disposizione relativa di sensori e sorgente condizioni la propagazione delle incertezze di misura nella soluzione di posizionamento [6]. Dopo le simulazioni numeriche, è stata condotta una prima validazione a Marina di Puolo mediante tre stazioni fisse di acquisizione sincronizzate. Le prove hanno fornito indicazioni preliminari sull'applicabilità del metodo a dati reali.

2 La metodologia

Il progetto SMART-PUFFIN è finalizzato alla realizzazione di un sistema di monitoraggio acustico basato su una rete di idrofoni. Nell'architettura prevista, ciascun nodo associa alle registrazioni acustiche informazioni spaziali e temporali, necessarie per confrontare i segnali acquisiti in punti diversi e ricostruire la posizione della sorgente [4]. La Figura 1 illustra schematicamente l'architettura del sistema proposto, evidenziando la disposizione dei sensori, l'integrazione delle informazioni GNSS e acustiche e il trasferimento dei dati al centro di elaborazione. Tutta la strumentazione impiegata durante la sperimentazione è costituita da dispositivi a *low-cost*, individuati con l'obiettivo di sviluppare un sistema di acquisizione facilmente replicabile.

Per affrontare separatamente le principali criticità, l'attività è stata articolata in tre sottoattività complementari: il posizionamento dei nodi mediante Precise Point Positioning (PPP), il riconoscimento dei suoni attraverso Intelligenza Artificiale (AI) e il posizionamento delle sorgenti mediante *Time Difference of Arrival* (TDOA). Questa organizzazione ha consentito di sviluppare e verificare le singole componenti prima della loro progressiva integrazione, distinguendo tra le problematiche di posizionamento satellitare, di interpretazione del segnale e di determinazione delle coordinate subacquee. La componente AI riguarda la classificazione degli eventi acustici e il riconoscimento delle tipologie di sorgenti presenti nelle registrazioni. Tale attività, sviluppata dall'Università di Salerno, è approfondita nel lavoro di Nappi, Narducci e Simone [7]. L'analisi degli algoritmi di classificazione e delle relative

prestazioni non rientra nel presente contributo, che si concentra sulle componenti di posizionamento PPP e TDOA.

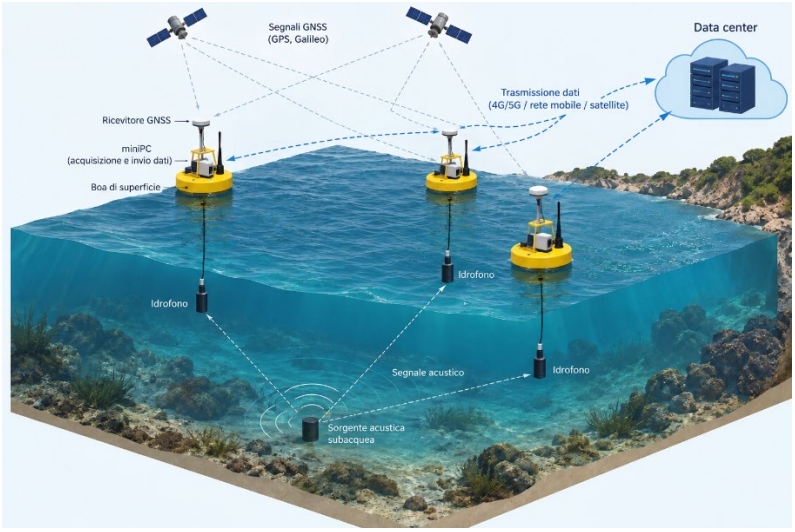


Fig. 1. Schema del sistema SMART-PUFFIN: tre boe equipaggiate con GNSS, miniPC e idrofoni sincronizzati che acquisiscono segnali acustici, che saranno successivamente elaborati mediante TDOA per stimare la posizione della sorgente subacquea.

2.1 Il PPP

La prima problematica affrontata riguarda la determinazione della posizione dei rilevatori acustici. Di conseguenza, la posizione di un generico ricevitore/mobile può essere determinata mediante una delle tecniche di posizionamento satellitare. Nella configurazione con piattaforme galleggianti, tali coordinate non possono essere considerate costanti, poiché il movimento delle boe ne modifica la posizione. Il PPP è stato quindi individuato come soluzione per il posizionamento delle piattaforme che ospitano i sensori acustici, senza richiedere una stazione di riferimento locale [8]. Il PPP risulta essere la tecnica più complessa dal punto di vista implementativo, ma consente di raggiungere accuratezze nell'ordine del centimetro sfruttando le misure di pseudorange e di fase. In passato, il PPP è stato impiegato utilizzando prodotti precisi forniti dall'International GNSS Service (IGS), rilasciati con una latenza di circa 14 giorni, il che costituiva uno dei punti deboli della tecnica. Negli ultimi decenni, la crescente esigenza di ottenere soluzioni di posizionamento sempre più accurate in tempo reale ha favorito lo sviluppo di servizi di correzione satellitare, come ad esempio: IGS RTS, Galileo HAS (High Accuracy Service), consentendo di migliorare le prestazioni delle tecniche di posizionamento e di raggiungere, in condizioni operative favorevoli, accuratezze dell'ordine dei centimetri o dei decimetri.

Per il conseguimento degli obiettivi del progetto, è stato sviluppato in ambiente MATLAB un *engine* di posizionamento PPP, progettato per elaborare sia le correzioni satellitari fornite in tempo reale dal servizio Galileo HAS, sia i prodotti precisi dell'IGS, utilizzati per le elaborazioni in post-processing. Questa duplice capacità consente di

valutare le prestazioni del sistema in scenari operativi diversi e di confrontare l'accuratezza delle soluzioni di posizionamento ottenute. Il PPP *engine* è stato sviluppato considerando il modello *Uncombined Undifferenced*, il quale risulta essere il più efficiente. Inoltre, il grande punto di forza di tale modello è che consente di effettuare il processamento delle misure senza ricorrere alla loro combinazione, poiché quest'ultima aumenta la rumorosità delle nuove osservabili. Pertanto le equazioni delle misure sono le seguenti:

$$\begin{aligned} \Delta\rho^s_{r,j} &= \rho^s_{0_r} + cdt^s_r + m^s_{wet}ZWD + \mu_j I^s_r + \epsilon^s_{r,j} \\ \lambda_j\Delta\varphi^s_{r,j} &= \rho^s_0 + cdt^s_r - m^s_{wet}ZWD - \mu_j I^s_r + \lambda_j N^s_j + \varepsilon^s_{r,j} \end{aligned} \tag{1}$$

Nelle (1) i pedici r, j indicano la dipendenza dal ricevitore e frequenza mentre l'apice s definisce la dipendenza dal satellite. Inoltre, $\Delta\rho$ e $\Delta\varphi$ sono le misure corrette, ovvero le misure effettuate dal ricevitore alle quali vengono sottratti i modelli correttivi degli altri errori, come ad esempio *Zenith HydrostaticDelay*, *Shapiro*, *Solid Tides*. Al secondo membro delle equazioni vengono riportati i termini incogniti del modello: ρ_0 distanza geometrica tra ricevitore e satellite; dt indica l'*offset* dell'orologio del ricevitore; ZWD è il contributo nella direzione zenitale della parte umida della troposfera al ritardo troposferico; I identifica il ritardo ionosferico e N individua l'ambiguità di fase espressa in cicli. Infine, λ rappresenta la lunghezza d'onda espressa in metri; c è la velocità della luce nel vuoto; m_{wet} rappresenta il coefficiente che mappa lo ZWD dalla direzione zenitale alla linea di vista ricevitore-satellite; ϵ, ε rappresentano errori non modellati. L'*engine* sviluppato implementa il Kalman filter per la stima delle precedenti incognite, che restituisce la soluzione float, ovvero le ambiguità dei satelliti vengono stimate come valori reali e non interi.

2.2 Il TDOA (Time Difference of Arrival)

La seconda componente trattata nel presente lavoro riguarda la stima della posizione della sorgente a partire dai ritardi con cui un medesimo evento acustico raggiunge i diversi idrofoni. L'approccio TDOA elimina dall'equazione di misura l'istante di emissione, che può essere sconosciuto, e risulta pertanto adatto anche a sorgenti non cooperanti. Restano invece necessarie la coerenza temporale delle acquisizioni e la conoscenza delle coordinate dei sensori [5]. L'applicazione di tale tecnica richiede un elevato grado di precisione nella sincronizzazione temporale dei ricevitori, al fine di garantire misure accurate degli istanti di arrivo del segnale e, conseguentemente, consentire la determinazione delle coordinate della sorgente di emissione.

Nello specifico, il segnale emesso da una sorgente acustica si propaga nell'acqua e raggiunge i diversi idrofoni in istanti differenti, in funzione delle distanze sorgente-idrofono (ricevitore). La misura delle differenze temporali consente di ricavare le differenze di distanza tra la sorgente acustica e i ricevitori. In particolare, assumendo che la velocità del suono sia costante, la differenza di distanza (Δd_{ij}) tra la sorgente e due idrofoni (*i,j*) è espressa dalla relazione (2)

$$\Delta d_{ij} = v\Delta t_{ij} \tag{2}$$

dove v è la velocità di propagazione del suono in acqua di mare, determinata secondo la formulazione semplificata di Mackenzie [9] per acque di mare poco profonde, e Δt_{ij} è la differenza di tempo di ricezione tra due stazioni.
Nel caso applicativo considerato, relativo ai primi metri della colonna d'acqua di un bacino costiero la velocità del suono dipende solo dalla temperatura. Dal punto di vista geometrico, ciascuna misura indipendente di differenza temporale definisce, in condizioni di velocità del suono costante, un luogo di punti a differenza di distanza costante: un'iperbole nel caso bidimensionale e un iperboloide nel caso tridimensionale. L'intersezione dei luoghi geometrici associati a più coppie di ricevitori consente di stimare la posizione della sorgente acustica. L'accuratezza del metodo richiede un'accurata sincronizzazione temporale tra gli idrofoni, poiché eventuali disallineamenti degli orologi si riflettono direttamente sulle differenze temporali misurate. Inoltre, la relazione tra ritardo temporale e differenza di distanza è esatta soltanto nel caso delle ipotesi assunte.

3 Sperimentazione e acquisizione dati

Le metodologie SMART-PUFFIN sono state validate con approcci differenziati: il PPP mediante osservazioni GNSS statiche in ambiente controllato e il TDOA dapprima in simulazione, attraverso analisi DOP, e successivamente su dati reali acquisiti durante una campagna sperimentale.

3.1 Sperimentazione del modulo PPP

La validazione del modulo PPP è stata condotta mediante dataset GNSS statici, utilizzando osservazioni multi-costellazione e multi-frequenza. Le elaborazioni hanno consentito di verificare progressivamente l'implementazione sviluppata in MATLAB e di confrontare le soluzioni ottenute con diversi prodotti di correzione. In particolare, sono state considerate sia i prodotti precisi da utilizzare in post-processing sia le correzioni fornite dal servizio HAS, maggiormente orientate a future applicazioni in tempo reale. Il confronto tra le diverse soluzioni ha permesso di valutare le prestazioni dell'*engine* PPP sviluppato e di verificarne la coerenza. Le prove hanno inoltre consentito di affinare progressivamente la procedura di stima, basata su un'inizializzazione mediante minimi quadrati pesati e su un successivo filtro di Kalman.

3.2 Sperimentazione del posizionamento TDOA

La validazione della metodologia TDOA è stata articolata in due fasi. Nella prima, gli algoritmi di localizzazione sono stati analizzati mediante simulazioni numeriche, considerando diverse configurazioni della rete di sensori. Parallelamente, è stato sviluppato un modulo per l'analisi della *Dilution of Precision* (DOP), utilizzato per valutare l'influenza della geometria degli idrofoni sulla precisione teorica della soluzione e per individuare le configurazioni più favorevoli al posizionamento.

La seconda fase ha riguardato la verifica sperimentale su dati reali. La campagna di misura è stata condotta presso Marina di Puolo mediante l'installazione di tre stazioni fisse di acquisizione sincronizzate, il posizionamento è avvenuto con misure GNSS in modalità N-RTK. All'interno dell'area delimitata dai sensori è stata utilizzata una sorgente acustica controllata, costituita da uno *shaker* subacqueo, mentre la posizione della sorgente è stata rilevata mediante GNSS in modalità N-RTK, così da disporre di un riferimento indipendente per la successiva valutazione del posizionamento TDOA. Le misure effettuate sono state condotte attraverso l'utilizzo di un sistema di acquisizione costituito da un idrofono ASF-1 MKII (Ambient), collegato a un registratore Zoom H5, utilizzato in questa configurazione come interfaccia audio. La sincronizzazione temporale dei segnali audio è stata garantita dall'utilizzo del segnale PPS (*Pulse-Per-Second*) fornito dal ricevitore GNSS u-blox C099 F9P.

4 Risultati

Al fine di validare l'*engine*-PPP sviluppato, si è deciso di elaborare i dati della stazione fissa ALIC00AUS, appartenente alla rete delle stazioni di controllo IGS, utilizzando sia i prodotti finali e precisi forniti dal centro di controllo IGS CODE sia il servizio real-time Galileo HAS. La decisione di processare i dati di una stazione di riferimento IGS è supportata dal fatto che tali stazioni operano in contesti e scenari tanto più simili alle operazioni in mare, dove gli effetti di *multipath* sono minimi o mitigabili. Gli errori sulle componenti ENU (*East-North-Up*), sono stati calcolati considerando come riferimento vero le coordinate della stazione riportate nel prodotto finale SINEX.

Tabella 1. Table captions should be placed above the tables.

Tipo di Prodotto	Media E [cm]	Media N [cm]	Media U [cm]	RMS E [cm]	RMS N [cm]	RMS U [cm]
Finals – IGS	0.04	-0.51	-1.48	0.65	0.7	3.06
HAS	-1.15	-0.34	0.37	5.53	4.58	15.91

In figura 2 viene riportato il confronto dell'andamento degli errori nelle componenti ENU ottenuti a valle del processamento con i prodotti finali IGS ed il servizio real-time Galileo HAS. Analizzando i valori numerici, riportati in Tabella 1, in termini di errori medi ed RMS, calcolati escludendo solo la prima ora di elaborazione per eliminare gli effetti della convergenza del filtro, si mostra che la soluzione con i prodotti IGS è a un livello di accuratezza centimetrica, confermando le aspettative e validando l'engine. Invece, i valori numerici riportati per Galileo HAS, evidenziano che risulta possibile determinare una soluzione PPP in real-time con un'accuratezza a livello decimetrico in verticale.

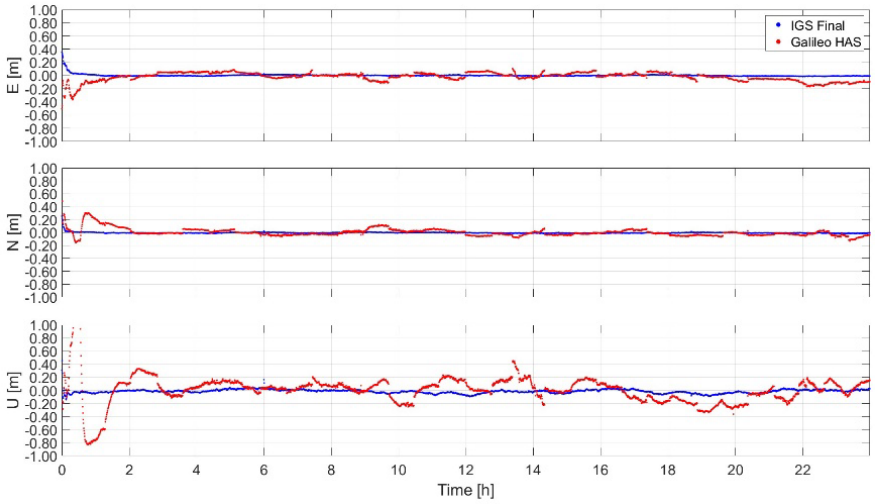


Fig.2. Confronto dell'andamento degli errori sulle componenti ENU tra le soluzioni ottenute con prodotti finali IGS e Galileo HAS

Per la componente TDOA, le prime verifiche sono state condotte in ambiente simulato. Particolare attenzione è stata dedicata alla geometria della rete di sensori attraverso lo sviluppo di un modulo per il calcolo della DOP. Le simulazioni hanno confermato che la configurazione spaziale degli idrofoni è un elemento determinante per la qualità della soluzione, consentendo di individuare in anticipo le geometrie più favorevoli e di supportare la pianificazione delle campagne sperimentali successive.

La successiva sperimentazione presso Marina di Puolo ha permesso di trasferire la metodologia dai dati simulati alle prime registrazioni acustiche reali. Le tre stazioni sincronizzate hanno consentito di acquisire lo stesso evento sonoro in punti diversi e di ricavare le corrispondenti differenze nei tempi di arrivo (Figura 3).

Contestualmente, la disponibilità delle coordinate N-RTK degli idrofoni e della posizione della sorgente acustica ha fornito il riferimento geometrico necessario per la verifica della procedura. I primi risultati hanno mostrato una differenza tra le misure GNSS-NRTK e quelle acustiche dell'ordine di 30 cm.



Fig.3. Campagna sperimentale a Marina di Puolo: generazione della sorgente Acustica (a sinistra) e disposizione delle tre stazioni di acquisizione (a destra)

5 Conclusioni

Il progetto SMART-PUFFIN ha consentito di sviluppare e validare le principali componenti di un sistema a basso costo per la localizzazione di sorgenti acustiche subacquee. Il modulo PPP ha mostrato risultati coerenti sia utilizzando prodotti precisi sia mediante correzioni Galileo HAS, confermando la possibilità di supportare la georeferenziazione dei nodi con strumentazione GNSS economica. er il posizionamento TDOA, le simulazioni e l'analisi DOP hanno evidenziato il ruolo determinante della geometria della rete di idrofoni, fornendo uno strumento utile per la pianificazione delle configurazioni sperimentali. La successiva campagna condotta a Marina di Puolo ha permesso di acquisire i primi dataset reali sincronizzati e di effettuare una prima validazione della catena di localizzazione in condizioni operative.I risultati ottenuti confermano quindi la fattibilità dell'approccio proposto e il potenziale dell'integrazione tra GNSS, acquisizione acustica e algoritmi TDOA. Ulteriori sviluppi saranno rivolti al miglioramento della sincronizzazione, alla caratterizzazione quantitativa dell'accuratezza e alla sperimentazione con configurazioni di sensori più estese e rappresentative delle condizioni operative reali.

Riferimenti bibliografici

1. Bianchi, C. N., et al. (2022). Biodiversity Monitoring in Mediterranean Marine Protected Areas: Scientific and Methodological Challenges. *Diversity*, 14(1), 43. DOI: 10.3390/d14010043.
2. Colletti, A., et al. (2020). The date mussel *Lithophaga lithophaga*: Biology, ecology and the multiple impacts of its illegal fishery. *Science of the Total Environment*, 744, 140866. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140866.
3. De Marco, R., et al. (2023). The Development of a Low-Cost Hydrophone for Passive Acoustic Monitoring of Dolphin's Vocalizations. *Remote Sensing*, 15(7), 1946. DOI: 10.3390/rs15071946.
4. Del Pizzo, S., Angrisano, A., Narducci, F., Gioia, C., Simone, B., Troisi, S. (2024). Smart-Puffin Project Smart Positioning Underwater System for Environmental Field Using Artificial Intelligence. In *2024 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea (MetroSea)*, pp. 564–569. DOI: 10.1109/MetroSea62823.2024.10765719.
5. Mensing, C., Plass, S. (2006). Positioning Algorithms for Cellular Networks Using TDOA. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 4, pp. 513–516. DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1661018.
6. Zhang, F., Li, H., Ding, Y., Yang, S.-H., Yang, L. (2021). Dilution of precision for time difference of arrival with station deployment. *IET Signal Processing*, **15**(6), 353–364. DOI: 10.1049/sil2.12036
7. Nappi, M., Narducci, F., Simone, B. (2025). Underwater Sounds Classification for Effective Smart Marine Monitoring Systems. *IEEE Access*, **13**, 111237–111248. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3583359
8. Kouba, J., Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, **5**(2), 12–28. DOI: 10.1007/PL00012883.
9. Mackenzie, K. V. (1981). Nine-term equation for sound speed in the oceans. Journal of the Acoustical Society of America, 70(3), 807–812. DOI: 10.1121/1.386920

Un approccio integrato di Earth Observation e dati geospaziali per l'identificazione delle isole di calore urbane: il caso studio di Genova

Monica De Martino[1][0000-0002-1963-3321], Alfonso Quarati[1][0000-0002-1801-3403], Silvia Gorni[2], Alessandra Marchese[2], Roderic Molina[2]

[1] CNR-IMATI — monica.demartino@ge.imati.cnr.it; alfonso.quarati@ge.imati.cnr.it
[2] GISIG — s.gorni@gisig.it; a.marchese@gisig.it; r.molina@gisig.it

Abstract. L'articolo presenta una procedura GIS basata su dati satellitari per caratterizzare le isole di calore urbane superficiali (SUHI) a Genova. L'analisi integra la LST derivata da Landsat 9, la copertura del suolo e il DTM TINITALY per selezionare aree rurali di riferimento nella fascia altimetrica 0–150 m. L'intensità SUHI (SUHII) è stimata come differenza tra la LST e la temperatura media rurale di riferimento. I risultati preliminari dimostrano la fattibilità della procedura.

Parole chiave: isola di calore urbana superficiale; temperatura superficiale del suolo; Landsat 9; modello digitale del terreno; riferimento rurale.

1 Introduzione e obiettivi

La temperatura superficiale del suolo (Land Surface Temperature, LST) descrive la temperatura radiometrica delle superfici terrestri osservata nell'infrarosso termico al momento del passaggio del satellite. I materiali superficiali, la vegetazione, la geometria urbana e le condizioni meteorologiche contribuiscono alla sua variabilità spaziale (Voogt e Oke, 2003; Weng et al., 2004). La LST si distingue dalla temperatura dell'aria, poiché le due grandezze descrivono ambienti termici e processi fisici differenti. Il fenomeno dell'isola di calore urbana superficiale (SUHI) è caratterizzato dal contrasto termico tra superfici urbane e aree rurali di riferimento, e la sua intensità (SUHII) è quantificata rispetto alla LST rurale media (Zhou et al., 2019).

L'identificazione e la caratterizzazione delle isole di calore urbane superficiali richiedono particolare attenzione alla selezione di aree rurali di riferimento adeguate, soprattutto nei territori con topografia complessa. A Genova, lo sviluppo urbano si concentra lungo la costa e nel fondovalle, mentre le aree non urbanizzate si estendono rapidamente verso quote più elevate. Studi precedenti hanno esaminato l'impiego di dati e servizi Copernicus per monitorare il fenomeno UHI nell'area metropolitana genovese (Apicella et al., 2021). In un contesto geografico di questo tipo, le differenze di temperatura tra aree urbane e rurali possono riflettere non soltanto le variazioni di copertura del suolo, ma anche l'influenza dell'altitudine. La metodologia proposta

combina pertanto informazioni LULC, distanza dalle superfici antropizzate e quote derivate dal DTM per supportare la selezione delle aree rurali di riferimento.

Questo articolo presenta un'applicazione preliminare della metodologia al Comune di Genova, sviluppata nell'ambito di uno studio di fattibilità tecnica. La valutazione ha confrontato diverse fonti di dati termici satellitari disponibili: Landsat offre una lunga serie storica e un dettaglio spaziale relativamente elevato, adatto alle analisi urbane; MODIS fornisce osservazioni più frequenti ma a risoluzione spaziale inferiore; ASTER offre acquisizioni dettagliate ma meno regolari. Per il caso studio è stato selezionato Landsat 9, utilizzando un prodotto di temperatura superficiale Collection 2 Level-2 acquisito il 3 marzo 2025.

L'analisi si concentra sulla fascia altimetrica 0–150 m, che comprende gran parte del territorio urbanizzato di Genova. Limitare il confronto a tale fascia mira a ridurre l'influenza delle differenze di quota sulla stima delle anomalie termiche superficiali. Lo studio valuta la fattibilità dell'integrazione della LST satellitare con informazioni geospaziali e morfologiche per la mappatura delle SUHI. Questo lavoro fornisce una base metodologica per le successive attività del progetto SAT4UHI, finalizzato allo sviluppo di una piattaforma geospaziale intelligente per identificare, analizzare e monitorare le isole di calore urbane mediante l'integrazione di dati di osservazione della Terra e informazioni ambientali, territoriali e socioeconomiche a supporto della pianificazione urbana e delle strategie di adattamento climatico.

2 Area di studio e fonti dei dati

L'area di studio comprende il Comune di Genova, caratterizzato da una fascia costiera densamente urbanizzata e da una topografia complessa, con valli, versanti e rilievi montuosi distribuiti su distanze relativamente brevi. Questa configurazione geografica rende l'altitudine particolarmente rilevante nel confronto tra le temperature superficiali delle aree urbane e rurali.

L'altimetria è rappresentata dal DTM TINITALY, con griglia di 10 m (Figura 1). I dati LULC forniti dalla Regione Liguria sono utilizzati per distinguere le superfici artificiali dalle aree non urbanizzate (Figura 2). Insieme, questi dataset supportano l'identificazione spaziale delle superfici urbane e la selezione di aree rurali di riferimento idonee.

Il dataset termico è costituito dal prodotto di temperatura superficiale Landsat 9 Collection 2 Level-2 acquisito il 3 marzo 2025. Il prodotto fornisce i valori di LST utilizzati per caratterizzare la distribuzione spaziale delle temperature superficiali e calcolare le differenze di temperatura tra aree urbane e rurali.

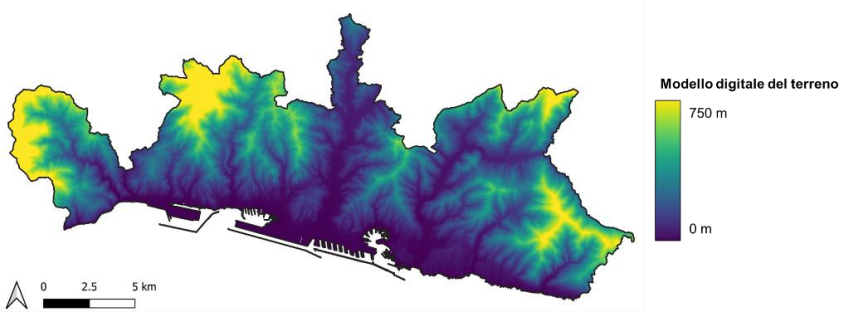


Fig. 1. DTM del Comune di Genova. Fonte: TINITALY (INGV); risoluzione spaziale: 10 m.

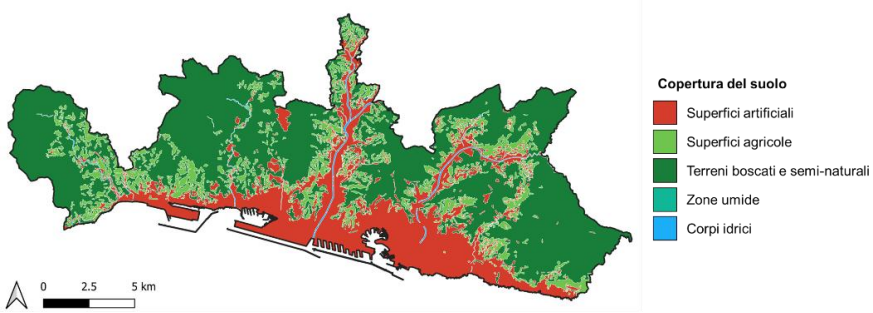


Fig. 2. Uso e copertura del suolo (LULC) nel Comune di Genova. Fonte: Geoportale della Regione Liguria. Le classi comprendono superfici artificiali, terreni agricoli, aree boscate e seminaturali, zone umide e corpi idrici.

3 Materiali e metodi

La procedura GIS proposta integra la LST derivata da satellite, le informazioni LULC e l'altimetria per individuare aree rurali di riferimento idonee e produrre mappe di SUHII. La fonte termica è la banda ST_B10 dell'acquisizione Landsat 9 Collection 2 Level-2 del 3 marzo 2025. La LST è ottenuta applicando ai valori del prodotto il fattore di scala e l'offset documentati dall'USGS. Le elaborazioni spaziali utilizzano pixel validi e un sistema di riferimento coerente per integrare dati termici, carta di copertura del suolo e modello digitale del terreno.

Il flusso di lavoro della Figura 3 distingue il percorso Level-2 impiegato in questo studio da un possibile percorso Level-1, riportato per completezza metodologica. Tutte le elaborazioni e i risultati discussi di seguito derivano esclusivamente dal prodotto Level-2.

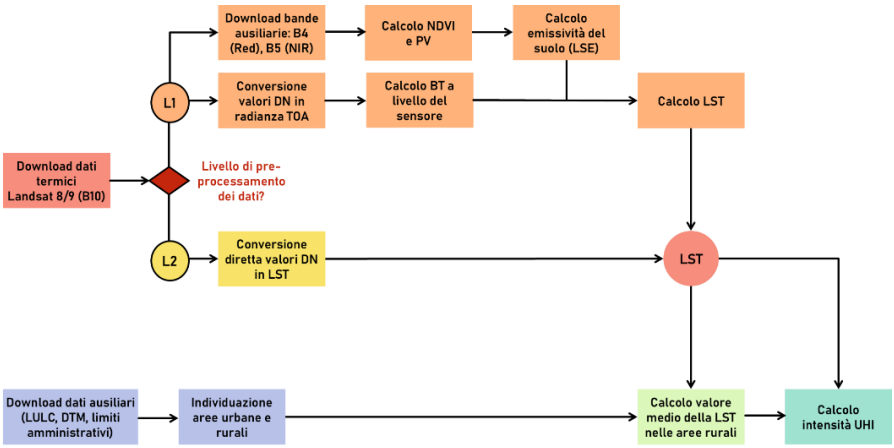


Fig. 3. Flusso generale di elaborazione. Il caso studio segue il percorso Landsat Level-2; quello Level-1 è mostrato soltanto come alternativa metodologica.

La selezione delle aree rurali di riferimento combina tre criteri complementari: copertura del suolo, distanza dalle superfici antropizzate e altitudine. La carta LULC viene utilizzata per identificare le superfici artificiali e le aree rurali candidate tra le classi non urbanizzate. Le aree prossime alle superfici antropizzate sono escluse dalla selezione del riferimento rurale mediante un buffer, al fine di limitarne la potenziale influenza termica. La selezione è inoltre limitata alla fascia altimetrica 0–150 m, individuata mediante il DTM. Tale vincolo mira a ridurre le differenze di quota tra superfici urbane e aree rurali di riferimento, che potrebbero altrimenti influenzare l'interpretazione del contrasto termico osservato.

La LST media delle aree rurali di riferimento selezionate, $\overline{LST}_{\text{rurale}}$, costituisce il riferimento termico della scena. Per ogni pixel valido x nella fascia altimetrica 0–150 m, la SUHII è calcolata come:

$$SUHII(x) = LST(x) - \overline{LST}_{\text{rurale}}$$

Un valore positivo identifica una superficie più calda della media rurale, mentre un valore negativo indica una superficie più fredda. La differenza per i pixel urbani caratterizza l'intensità dell'effetto SUHI.

4 Risultati

Le mappe DTM e LULC (Figure 1 e 2) forniscono il contesto geografico per interpretare i pattern termici superficiali, evidenziando i marcati gradienti altimetrici e la vicinanza delle aree costiere urbanizzate ai versanti vegetati.

La Figura 4 mostra la distribuzione spaziale della LST derivata dall'acquisizione Landsat 9 Level-2 del 3 marzo 2025. La mappa illustra la variabilità spaziale della temperatura superficiale al momento del passaggio satellitare, fornendo le informazioni termiche utilizzate per la successiva analisi SUHI.

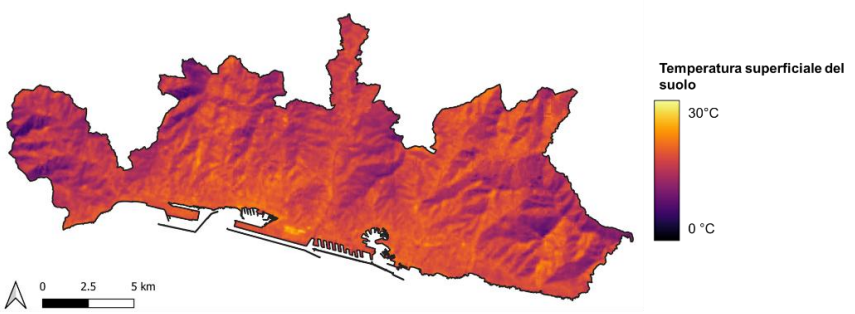


Fig. 4. LST nel Comune di Genova il 3 marzo 2025, derivata da Landsat 9 Level-2, ST_B10. Fonte: USGS.

La Figura 5 mostra le superfici urbane e le aree rurali di riferimento individuate applicando i criteri LULC, distanza e altitudine. La selezione ottenuta fornisce i pixel rurali utilizzati per calcolare la temperatura media di riferimento per la fascia altimetrica 0–150 m.

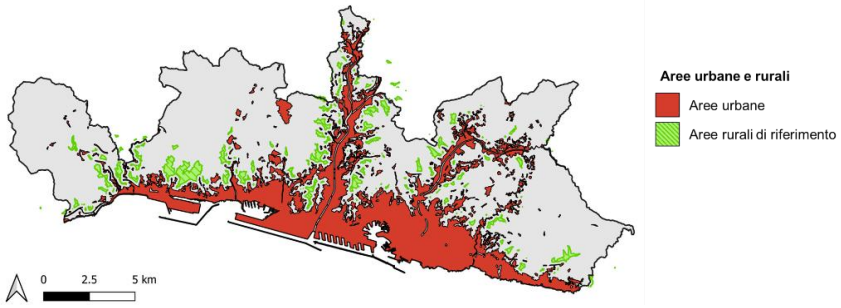


Fig. 5. Superfici urbane e aree rurali di riferimento selezionate nel Comune di Genova, individuate mediante criteri di copertura del suolo, distanza e altitudine. Il rosso indica le aree urbane e il verde quelle rurali di riferimento.

La Figura 6 presenta la distribuzione spaziale della SUHII calcolata rispetto alla LST media delle aree rurali di riferimento selezionate. I valori positivi indicano superfici più calde del riferimento rurale, mentre quelli negativi indicano superfici più fredde. La mappa risultante illustra la SUHII nella fascia altimetrica 0–150 m per l'acquisizione satellitare considerata.

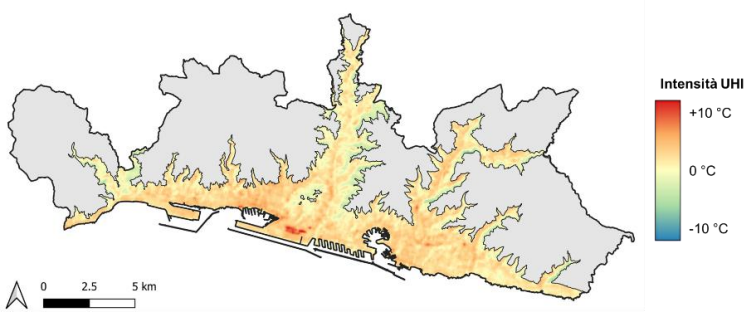


Fig. 6. Distribuzione spaziale dell'intensità SUHI a Genova il 3 marzo 2025 nella fascia altimetrica 0–150 m.

La Figura 7 presenta un'integrazione esplorativa tra LST e dati sulla popolazione residente a livello di unità territoriale. La LST media è rappresentata dal colore, mentre la dimensione dei simboli indica il numero di residenti. Questa visualizzazione fornisce un primo quadro della distribuzione spaziale delle temperature superficiali in relazione alla popolazione, senza implicare una correlazione statisticamente validata né una valutazione diretta della vulnerabilità della popolazione.

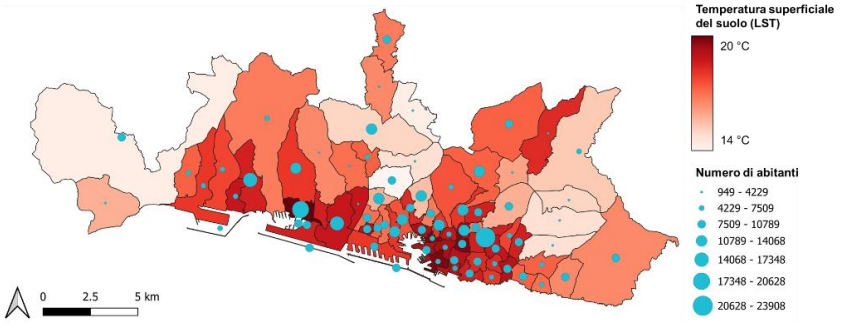


Fig. 7. Distribuzione spaziale della LST media e della popolazione residente per unità territoriale a Genova. Il colore rappresenta la LST media, mentre la dimensione dei simboli indica il numero di residenti.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio dimostra la fattibilità operativa dell'integrazione della LST Landsat 9 Level-2, dei dati LULC e dell'altimetria derivata dal DTM per caratterizzare il fenomeno SUHI e stimarne l'intensità a Genova. La selezione delle aree rurali di riferimento basata su copertura del suolo, distanza dalle superfici antropizzate e altitudine fornisce una base territoriale esplicita per stimare le differenze di temperatura superficiale tra aree urbane e rurali. Limitare l'analisi alla fascia altimetrica 0–150 m mira a contenere l'influenza delle differenze di quota sul confronto termico urbano-rurale, sebbene possano permanere altri effetti topografici. I risultati sono preliminari e

si riferiscono a una sola acquisizione satellitare del 3 marzo 2025 e alla fascia altimetrica 0–150 m.

Ulteriori indagini sono necessarie per valutare la robustezza della metodologia, in particolare la sensibilità delle stime SUHII ai criteri di selezione del riferimento rurale, alla distanza del buffer e alle soglie altimetriche. Analisi multi-temporali basate su acquisizioni satellitari ripetute, insieme a una validazione indipendente, saranno essenziali per caratterizzare la variabilità spaziale e temporale del fenomeno.

Questo lavoro costituisce una base metodologica per le successive attività del progetto SAT4UHI, che amplieranno l'analisi integrando ulteriori dati ambientali, territoriali e socioeconomici. Gli sviluppi futuri comprenderanno lo studio delle relazioni tra pattern termici superficiali e caratteristiche urbane, la definizione di indicatori di vulnerabilità e resilienza e l'esplorazione di tecniche di intelligenza artificiale e apprendimento automatico (AI/ML) per l'analisi spazio-temporale. L'obiettivo finale è supportare la pianificazione urbana e le strategie di adattamento climatico attraverso una piattaforma GIS integrata e un sistema di supporto alle decisioni (DSS).

Riferimenti bibliografici

1. Apicella, L., Quarati, A., De Martino, M. (2021). Analysing the Surface Urban Heat Island Effect with Copernicus Data. In: Kö, A., Francesconi, E., Kotsis, G., Tjoa, A. M., Khalil, I. (eds.), Electronic Government and the Information Systems Perspective (EGOVIS 2021). Lecture Notes in Computer Science, vol. 12926, pp. 61–72. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86611-2_5
2. INGV (n.d.). TINITALY DEM. https://tinitaly.pi.ingv.it/
3. Liguria Region (n.d.). Liguria Region Geoportal. https://geoportal.regione.liguria.it/
4. USGS (n.d.). Landsat Collection 2 Surface Temperature. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature
5. Voogt, J. A., Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8
6. Weng, Q., Lu, D., Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, 89(4), 467–483.
7. Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. Remote Sensing, 11(1), 48. https://doi.org/10.3390/rs11010048

Informazioni sul progetto

SAT4UHI – «Piattaforma intelligente per l'identificazione, l'analisi e la gestione delle isole di calore urbane», coordinato da ABIRK Italia S.r.l. e finanziato dalla Regione Liguria nell'ambito del PR FESR 2021–2027, Azione 1.1.1.

Progetto GIN: una Rete Geodetica Integrata per il monitoraggio e il rilievo topografico in Emilia Romagna

Nunzio De Nigris[1], Michele Di Lorenzo[1], Stefano Gandolfi[2] [0000-0003-2096-5670], Marco Marcaccio[1], Marianna Mazzei[1], Stefano Olivucci[3], Alberto Pellegrinelli[4] [0000-0002-8977-3864], Andrea Valentini[1] [0000-0001-7827-6267], Enrica Vecchi[5] [0000-0002-6524-9216]

[1] Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna (Arpae), Bologna
[2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna
[3] Sistema Informativo Geo-Topografico e Archivio Cartografico Regionale, Area Statistica, Dati e Sistemi Informativi Geografici, Direzione Risorse, Europa, Innovazione e Istituzioni, Regione Emilia-Romagna
[4] Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara
[5] Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DICAAR), Università di Cagliari

Abstract. Il seguente lavoro costituisce una sintesi in italiano di un articolo già pubblicato in occasione del convegno IAG2025. Il senso di tale contributo è quindi quello di diffondere tale iniziativa anche in ambito nazionale.
Tutti gli elementi di dettaglio sono quindi recuperabili nella pubblicazione [1].
Le reti geodetiche costituiscono l'infrastruttura di riferimento per la rappresentazione, il rilievo e il monitoraggio del territorio. In Emilia-Romagna, subsidenza, erosione costiera, frane ed eventi estremi richiedono misure accurate e confrontabili nel tempo. Tali misure, pur essendo ottenibili mediante differenti tecniche di rilievo, dovrebbero essere riferite a un sistema di riferimento geodetico comune, aggiornato e condiviso. Il progetto di Rete Geodetica Integrata (GIN) combina stazioni GNSS permanenti, mareografi, reti di livellazione e vertici GNSS passivi, collegati ai riferimenti nazionali. L'integrazione di quote ellissoidiche e ortometriche, sostenuta da un modello geoidico locale, permetterà di supportare il posizionamento di precisione, la gestione idraulica, gli interventi di difesa costiera e le analisi delle deformazioni superficiali del territorio.

Parole chiave: reti geodetiche, sistemi di riferimento, GNSS, livellazione geometrica, mareografi.

1 Introduzione

Il territorio dell'Emilia-Romagna comprende un'ampia pianura alluvionale, parte degli Appennini settentrionali e circa 120 km di costa prevalentemente sabbiosa. Il terremoto del 2012 e le piogge estreme del 2023 e 2024 hanno evidenziato la vulnerabilità di questo territorio. La subsidenza, di origine naturale e antropogenica, modifica le deboli

pendenze della pianura, aggravando le criticità idrauliche, mentre frane ed erosione interessano rispettivamente le aree montane e costiere. Per comprendere questa evoluzione, Regione Emilia-Romagna, Arpae, Protezione Civile, Consorzi di Bonifica e Autorità di Bacino necessitano di dati geotopografici aggiornati e riferiti a un sistema comune. GIN (Geodetic Integrated Network) risponde a tali esigenze attraverso un'infrastruttura regionale integrata. Nel seguito vengono illustrate le più importanti e diverse esigenze dei principali portatori di interesse e viene sinteticamente illustrato il progetto GIN.

2 Contesto ed esigenze degli utilizzatori

2.1 Posizionamento preciso in tempo reale

Le amministrazioni regionali devono mantenere aggiornate cartografia e banche dati topografiche. Le attività di rilievo tecnico e l'agricoltura di precisione richiedono inoltre posizionamenti centimetrici in tempo reale.

Per tali applicazioni, il posizionamento GNSS di precisione costituisce un elemento imprescindibile. La disponibilità di Reti di stazioni permanenti NRTK, integrate a una rete densa di vertici geodetici passivi, consente di raggiungere precisioni centimetriche in tempo reale, sia mediante l'utilizzo delle correzioni di rete (NRTK) che attraverso il tradizionale approccio RTK (base-rover).

La disponibilità di quote ortometriche per i vertici della rete di raffittimento e di un modello di ondulazione geoidica consentono inoltre di stimare anche quote di natura ortometrica a partire da quote ellissoidiche ottenute mediante posizionamento GNSS.

2.2 Erosione costiera

Il litorale è esposto a ingressione marina, erosione e subsidenza. Arpae monitora l'evoluzione delle spiagge e l'efficacia delle opere di difesa e dei ripascimenti mediante rilievi topografici e batimetrici realizzati a cadenza triennale. L'analisi dell'evoluzione della costa, considerando anche la stima dei volumi erosi o depositati, costituisce un elemento fondamentale per poter pianificare interventi di protezione o ripascimento costiero volti a ripristinare lo stato del litorale nel tempo e quindi preservarne gli aspetti naturali.

2.3 Monitoraggio dei fiumi

Le stazioni idrometriche misurano i livelli idrometrici rispetto a riferimenti locali non uniformi e non interconnessi, rendendo complesso il confronto delle osservazioni e la modellazione idraulica. Una rete di livellazione unificata che collega altimetricamente gli idrometri alle quote degli alvei, degli argini, al livello medio del mare risulta importante per la corretta gestione degli ambienti fluviali.

2.4 Monitoraggio della subsidenza

La compattazione dei sedimenti alluvionali produce una subsidenza naturale di pochi millimetri all'anno, localmente accentuata dall'estrazione di fluidi sotterranei. Dal 1997 ad oggi Arpae ha sempre utilizzato metodi topografici per la stima di tali abbassamenti.

Inizialmente, il monitoraggio della subsidenza veniva effettuato mediante tecniche di livellazione geometrica dal mezzo, successivamente affiancate dall'impiego dei sistemi GNSS. Negli ultimi anni, il forte sviluppo della tecnologia InSAR ha consentito di ottenere mappe di subsidenza ad altissima risoluzione spaziale che, se integrate a dati acquisiti dalle reti di stazioni GNSS, possono essere riferite a sistemi di riferimento geodetici riconosciuti a livello internazionale.

2.5 Dinamiche e previsioni marine

Mareografi co-localizzati con stazioni GNSS permettono di distinguere le variazioni del livello del mare dai movimenti verticali del suolo. Il loro collegamento mediante livellazione di alta precisione garantisce di poter definire un datum verticale comune, a supporto delle previsioni marine, della gestione costiera e delle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici.

3 Il progetto GIN

Per fare fronte alle diverse problematiche del territorio precedentemente illustrate sono necessarie tecniche differenti che, per poter essere gestibili in modo integrato, devono essere riferite ad un sistema di riferimento comune. GIN integra una componente attiva, costituita da stazioni GNSS permanenti e mareografi, con una componente passiva di capisaldi di livellazione e vertici tridimensionali.

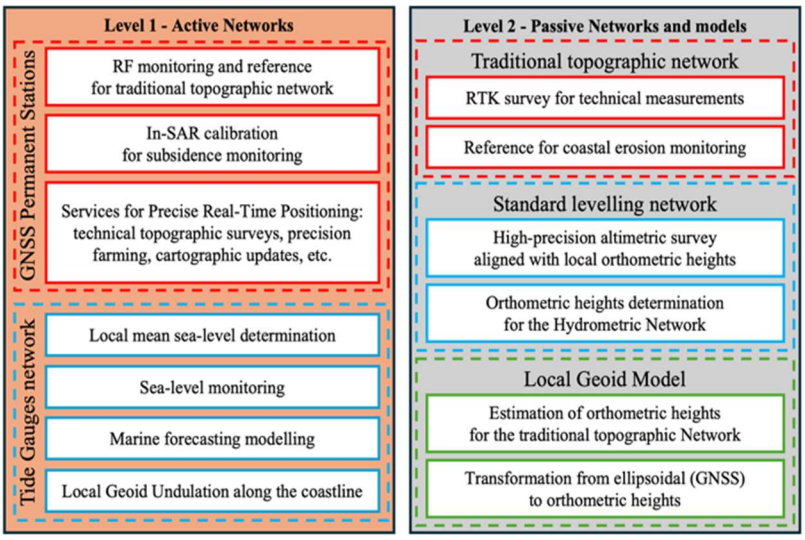


Fig. 1 - Schema concettuale del progetto di Rete Geodetica Integrata costituita da infrastrutture geodetiche attive (mareografi e stazioni permanenti GNSS) e passive (rete di livellazione e di raffittimento GNSS)

Le stazioni GNSS sostengono servizi NRTK centimetrici, calibrazione InSAR e inquadramento delle reti tradizionali; i mareografi consentono di analizzare il livello del mare-separando gli effetti della subsidenza.

Le reti passive rendono il riferimento accessibile agli operatori sul territorio. Questa struttura favorisce la condivisione dei dati e il coordinamento fra enti e istituzioni scientifiche. In Figura 1 si mostra uno schema concettuale del progetto.

3.1 Aspetti tecnici

La progettazione della rete geodetica integrata prevede una copertura di stazioni permanenti GNSS regionale (sia per il controllo delle deformazioni che per l'erogazione di servizi di posizionamento in tempo reale) e l'installazione di mareografi, collegati mediante livellazione geometrica dal mezzo a linee di livellazione che si estendono dalla costa verso l'interno lungo i principali corsi d'acqua. I vertici classici passivi, destinati prevalentemente al posizionamento GNSS in modalità RTK tradizionale, costituiranno un raffittimento della rete di stazioni permanenti GNSS. Almeno un sottoinsieme di tali vertici sarà inoltre individuato in corrispondenza di capisaldi di livellazione, al fine di stimare le ondulazioni geoidiche necessarie per la

conversione delle quote ellissoidiche ottenute mediante GNSS, in quote ortometriche, molto più rilevanti per applicazioni di natura idraulica.

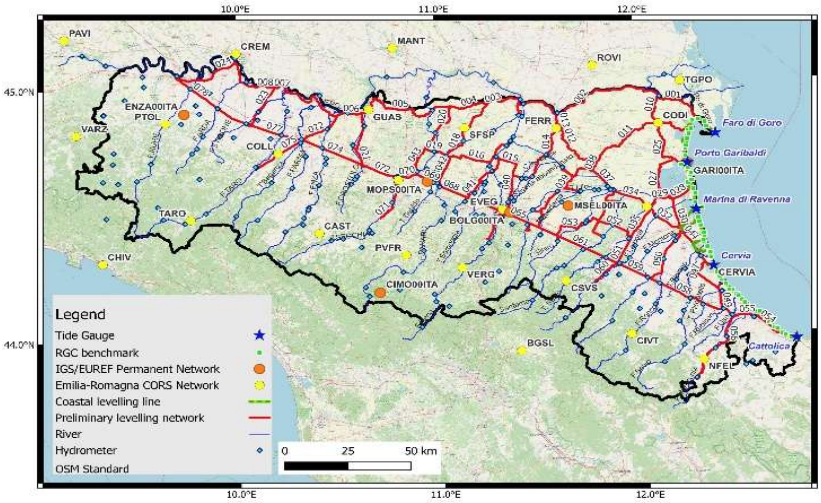


Fig. 2 - Progetto della Rete Geodetica Integrata (GIN)

L'inquadramento generale della rete GIN sarà coerente con il sistema ETRF2000 all'epoca 2008.0 per gli aspetti planimetrici e la stima della quota ellissoidica, mentre le quote ortometriche saranno disponibili con riferimento sia al livello medio mare locale sia al datum Genova 1942. I loro aggiornamenti nel tempo, riconducibili ad effetti di subsidenza, incorporeranno i modelli di subsidenza elaborati da Arpae. Le osservazioni sui nuovi vertici consentiranno inoltre l'adattamento locale del modello ITALGEO, migliorando la conversione fra quote ellissoidiche e ortometriche. In Figura 2 si riporta una mappa con il progetto della rete GIN.

3.2 Progettazione e stato di attuazione

Dal 2014 ad oggi, la rete ha avuto un'evoluzione non lineare ma è sempre proseguita con continuità.

Per quanto attiene gli aspetti mareografici, alle stazioni di Porto Garibaldi, Marina di Ravenna e Faro di Goro negli ultimi anni sono state aggiunte due stazioni a Cervia e Cattolica (in questo momento tutti i mareografi risultano co-localizzati con Stazioni permanenti GNSS). In particolare, la stazione mareografica di Porto Garibaldi appartiene alla rete EUREF dal 2009 e dispone dal 2010 di dati del livello del mare correggibili per la subsidenza.

Per quanto riguarda la rete di livellazione invece, nel 2023 è stato eseguito un primo rilievo mediante livellazione geometrica dal mezzo di alta precisione che ha collegato altimetricamente al Mareografo di Porto Garibaldi tutti i vertici della rete Geodetica Costiera (RGC). Questa linea di livellazione, ed i capisaldi che la materializzano, costituisce da un lato il riferimento per il monitoraggio dell'erosione e per la

realizzazione delle opere di difesa, collegando rilievi terrestri e osservazioni del livello del mare, ma costituisce anche un primo passo per la rete di livellazione che, a partire dalla costa si svilupperà sull'intero territorio Emiliano Romagnolo.

La rete delle stazioni GNSS permanenti è in fase di ultimazione, nel 2025 e 2026 sono state installate tutte le stazioni GNSS di riferimento previste dal progetto e l'erogazione dei servizi di posizionamento di precisione in tempo reale e gratuiti è prevista per i primi mesi del 2027.

Ci sono invece ancora attività da ultimare che riguardano prevalentemente le reti di natura passiva in quanto più onerose sia in termini di progettazione che di materializzazione e rilievo. In particolare:

- Sono previsti circa 1.518 km di linee, organizzate in 27 anelli chiusi, con tratti medi di 1 km. La rete collegherà 86 teleidrometri nelle aree pianeggianti e collinari, uniformando le quote al riferimento altimetrico collegato al livello medio del mare locale di Porto Garibaldi.
- È prevista l'installazione di 600-700 vertici tridimensionali, distribuiti sull'intero territorio regionale a distanze di 7–10 km per il rilievo RTK. La prossimità o coincidenza con capisaldi di livellazione faciliterà il collegamento altimetrico e la determinazione dell'ondulazione geoidica locale. La conoscenza congiunta delle quote ellissoidiche e ortometriche permetterà di ricavare un modello geoidico locale basato sulla rete GIN, rendendo utilizzabili le misure GNSS anche per applicazioni che richiedono quote ortometriche precise.

4 Prospettive

GIN fornirà un riferimento planimetrico e altimetrico regionale aggiornato, collegato ai sistemi nazionali, per il rilievo e il monitoraggio dei fenomeni naturali e antropici. Il mantenimento dell'infrastruttura richiederà procedure di aggiornamento delle componenti attive e passive, già in sviluppo, affinché le coordinate restino rappresentative dell'evoluzione del territorio.

Riferimenti bibliografici

1. De Nigris, N. et al. (2026). GIN Project: A Geodetic Integrated Network for Monitoring and Topographical Surveying in the Emilia-Romagna Region Suitable both for Classical and Space Geodetic Techniques. In: International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2026_394

Monitoraggio dei parametri strutturali e dielettrici delle colture mediante riflettometria interferometrica GNSS

De Petris S.[1][0000-0001-8184-9871] e Borgogno-Mondino E.[1][0000-0003-4570-8013]

[1] Department of Agriculture, Forest and Food Sciences, University of Turin, L.go Braccini 2, 10095, Grugliasco (IT). samuele.depetris@unito.it; enrico.borgogno@unito.it

Abstract. Questo studio valuta il potenziale della riflettometria interferometrica GNSS (GNSS-IR) per il monitoraggio della crescita della vegetazione e la valutazione dello stato idrico di un campo agricolo, attraverso tecniche di telerilevamento prossimale. La ricerca analizza se i segnali GNSS riflessi, sulla base delle misure del rapporto segnale-rumore (SNR), possano fornire indicatori affidabili della struttura della copertura vegetale e delle proprietà dielettriche.

I dati sono stati raccolti tra giugno e settembre 2025 mediante un'antenna GNSS installata all'interno di un prato sperimentale situato a Mondovì (Piemonte, Italia nord-occidentale), operante con più costellazioni satellitari, nello specifico GPS e GLONASS. Il sistema ha registrato sia i segnali diretti sia quelli riflessi dal suolo e dalla vegetazione circostante. La tecnica GNSS-IR sfrutta l'interferenza tra questi segnali per ricavare parametri fisici, come l'altezza del riflettore, che in questo contesto consente di stimare l'altezza del centro di fase della vegetazione rispetto alla superficie del suolo. Monitorando nel tempo le variazioni dell'altezza stimata del riflettore, è possibile dedurre le dinamiche di crescita della coltura.

Le variazioni dell'ampiezza e della fase del pattern di interferenza sono sensibili alle proprietà dielettriche della superficie riflettente, influenzate principalmente dal contenuto idrico del suolo e delle piante. La tecnica GNSS-IR, pertanto, non consente soltanto di stimare l'altezza della vegetazione, ma offre anche la possibilità di monitorare le condizioni idrologiche senza ricorrere a campionamenti distruttivi o a sensori invasivi.

Le stime dell'altezza della vegetazione e dei parametri di umidità del suolo sono state confrontate con i corrispondenti valori di riferimento rilevati in campo mediante misurazioni con asta graduata e sensori di umidità del suolo interrati. I risultati preliminari suggeriscono che la tecnica GNSS-IR è in grado di stimare l'altezza della copertura vegetale con un elevato grado di coerenza, fornendo al contempo indicazioni indirette sulle variazioni dello stato idrico della vegetazione e del suolo.
Questi risultati aprono prospettive promettenti per lo sviluppo di strategie innovative di monitoraggio nell'ambito dell'agricoltura di precisione, sfruttando le infrastrutture GNSS esistenti per ottenere parametri biofisici fondamentali con attrezzature aggiuntive e complessità operativa ridotte.

Parole chiave: GNSS-IR, struttura della vegetazione, umidità del suolo

Quando un pixel fa la differenza? L'incertezza nelle equazioni di collinearità e la coerenza radiometrica negli ortomosaici multispettrali

De Petris S.[1][0000-0001-8184-9871] e Borgogno-Mondino E.[1][0000-0003-4570-8013]

[1] Department of Agriculture, Forest and Food Sciences, University of Turin,
samuele.depetris@unito.it ; enrico.borgogno@unito.it

Abstract. Le equazioni di collinearità rappresentano il modello fotogrammetrico fondamentale per stabilire la relazione geometrica tra le coordinate nello spazio oggetto e quelle nello spazio immagine. Nella fotogrammetria multispettrale, tali equazioni vengono utilizzate implicitamente per associare le informazioni radiometriche registrate da un sensore (digital number, radianza o valori di riflettanza) a specifiche posizioni al suolo e, viceversa, per proiettare i punti a terra sui pixel dell'immagine. Tuttavia, l'incertezza associata a questa trasformazione geometrica viene raramente valutata dal punto di vista dell'assegnazione dei dati radiometrici.

Questo studio analizza la propagazione dell'incertezza nelle equazioni di collinearità mediante la legge di propagazione della varianza, al fine di quantificare l'accuratezza con cui un punto al suolo può essere associato al corrispondente pixel dell'immagine. L'analisi considera le principali fonti di incertezza che influenzano il modello fotogrammetrico, tra cui la posizione e l'assetto della camera, la risoluzione dell'immagine, la lunghezza focale, le coordinate del punto principale.

Per valutare l'impatto di questi fattori, è stato sviluppato un sistema di simulazione Monte Carlo in ambiente R. Ai parametri di orientamento interno ed esterno sono stati assegnati diversi livelli di incertezza e sono stati simulati molteplici scenari di acquisizione delle immagini. Questi comprendono geometrie di ripresa nadirali e oblique, differenti quote di volo e diverse posizioni dei punti all'interno del campo immagine. Per ciascuna configurazione, l'incertezza risultante sulle coordinate immagine è stata stimata e confrontata, allo scopo di individuare le condizioni di acquisizione che minimizzano l'incertezza di riproiezione.

I risultati mostrano che livelli di incertezza realistici, comunemente riscontrabili nei rilievi multispettrali effettuati con droni, possono generare incertezze sulle coordinate immagine superiori a un pixel. Ciò implica che il valore di radianza o riflettanza registrato dal sensore potrebbe non essere associato al pixel corretto durante la proiezione attraverso il modello fotogrammetrico (equazioni di collinearità in prospettivizzazione). Di conseguenza, l'informazione spettrale attribuita a una determinata posizione al suolo può essere influenzata da un errore di natura geometrica, spesso trascurato nei flussi di elaborazione convenzionali.

Le implicazioni sono particolarmente rilevanti per la generazione di ortomosaici multispettrali, nei quali si assume che il valore radiometrico assegnato a ciascun pixel ortorettificato provenga dalla corretta posizione nell'immagine originale. Se l'incertezza delle equazioni di collinearità supera la dimensione del pixel, il mosaico risultante può presentare incoerenze radiometriche sistematiche, dovute ad associazioni errate tra pixel e posizioni al suolo. Questi effetti diventano particolarmente critici nelle applicazioni che richiedono un'elevata accuratezza radiometrica, come l'agricoltura di precisione, il monitoraggio della vegetazione, la valutazione ambientale e il telerilevamento quantitativo.

Il quadro metodologico proposto evidenzia la necessità di valutare congiuntamente l'accuratezza geometrica e quella radiometrica nelle catene di elaborazione fotogrammetrica e dimostra come le incertezze geometriche possano influenzare significativamente l'affidabilità dei prodotti spettrali derivati da immagini multispettrali.

Parole chiave: - Fotogrammetria multispettrale, Equazioni di collinearità, Propagazione dell'incertezza, Coerenza radiometrica.

Vulnerabilità dei siti archeologici alle inondazioni: un'analisi GIS-AHP nella Valle di Moche (Perù)

Francesco Di Stefano[1][0000-0002-0604-7163], Marsia Sanità[1][0009-0002-9828-2626] e Eva Savina Malinverni[1][0000-0001-6582-2943]

[1] DICEA, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia – f.distefano@staff.univpm.it, m.sanita@staff.univpm.it, e.s.malinverni@staff.univpm.it

Abstract. Si presenta un'analisi GIS-AHP della suscettibilità alle inondazioni nella Valle del Moche (Perù), riferita a *El Niño* 2017. Sei indicatori ambientali definiscono una mappa in cinque classi, confrontata con CEMS EMSR199. Il 19,55% delle aree allagate analizzate ricade nelle classi alta e molto alta, che comprendono 26 delle 76 localizzazioni archeologiche valutabili. Il modello orienta gli approfondimenti sull'esposizione dei siti, senza stimare il danno ai manufatti.

Parole chiave: Remote Sensing, Vulnerabilità, Siti Archeologici, Perù.

1 Introduzione

Nella costa settentrionale del Perù, gli eventi *El Niño* possono modificare rapidamente il funzionamento idrologico di territori prevalentemente aridi. Piogge intense, esondazioni e riattivazione delle *quebradas*, gli impluvi normalmente asciutti o a deflusso intermittente, interessano insediamenti e paesaggi di elevato valore culturale. Nella Valle del Moche la conservazione delle architetture in terra cruda richiede una lettura congiunta del contesto geomorfologico e dell'esposizione dei siti [1]. L'integrazione tra GIS, dati remote sensing e analisi multicriterio (MCDA) permette di individuare le aree predisposte alle inondazioni anche dove mancano serie idrometriche sufficienti per una modellazione dettagliata. L'Analytic Hierarchy Process (AHP) consente di ponderare gli indicatori ambientali per costruire un indice sintetico di suscettibilità alle inondazioni [2]. Applicazioni recenti combinano morfometria, prossimità al reticolo e copertura del suolo per produrre mappe di suscettibilità, sottoposte a verifica con osservazioni indipendenti [3, 4]. La trasferibilità di questi approcci dipende tuttavia dalla pertinenza locale degli indicatori e dalla qualità dei dati. Una mappa multicriterio esprime una predisposizione relativa: non restituisce automaticamente una probabilità di allagamento, un tirante idrico o un danno atteso. Per il patrimonio archeologico, inoltre, la localizzazione in un'area suscettibile deve essere distinta dalla fragilità fisica delle strutture. La combinazione di cartografia territoriale e inventari dei siti costituisce pertanto un primo livello di selezione delle priorità, da approfondire con rilievi e osservazioni conservative.

Il contributo presenta l'applicazione di un modello GIS-AHP alla Valle del Moche (Perù) limitatamente all'evento *El Niño* del 2017. L'obiettivo è descrivere la costruzione dell'indice territoriale, leggere la posizione dei siti rispetto alle classi ottenute e impostare il confronto con le aree allagate cartografate dal Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Il termine vulnerabilità territoriale è qui utilizzato in senso operativo; l'indice misura principalmente la suscettibilità ambientale alle inondazioni e non la vulnerabilità strutturale dei beni.

2 Metodologia

2.1 Area di studio e organizzazione dei dati

L'area di interesse (AOI) comprende circa 424,2 km² nella regione di La Libertad, attorno a Trujillo e al fiume Moche (Perù). Le quote variano dal livello del mare a circa 2154 m; approssimativamente il 70% della superficie si colloca sotto i 500 m. Il passaggio dalla pianura costiera ai rilievi interni determina condizioni morfologiche differenziate e connessioni tra asse fluviale, canali e drenaggi secondari (*quebradas*).

Le elaborazioni sono state organizzate in QGIS 3.40 nel sistema WGS84/UTM17S (EPSG: 32717). Il geodatabase integra i limiti territoriali, l'idrografia e i siti storico-archeologici individuati (Fig. 1).

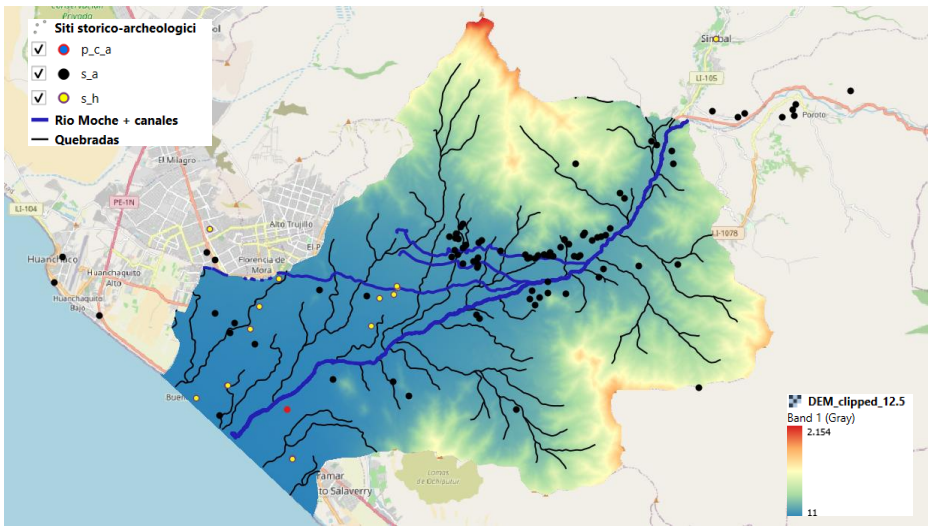
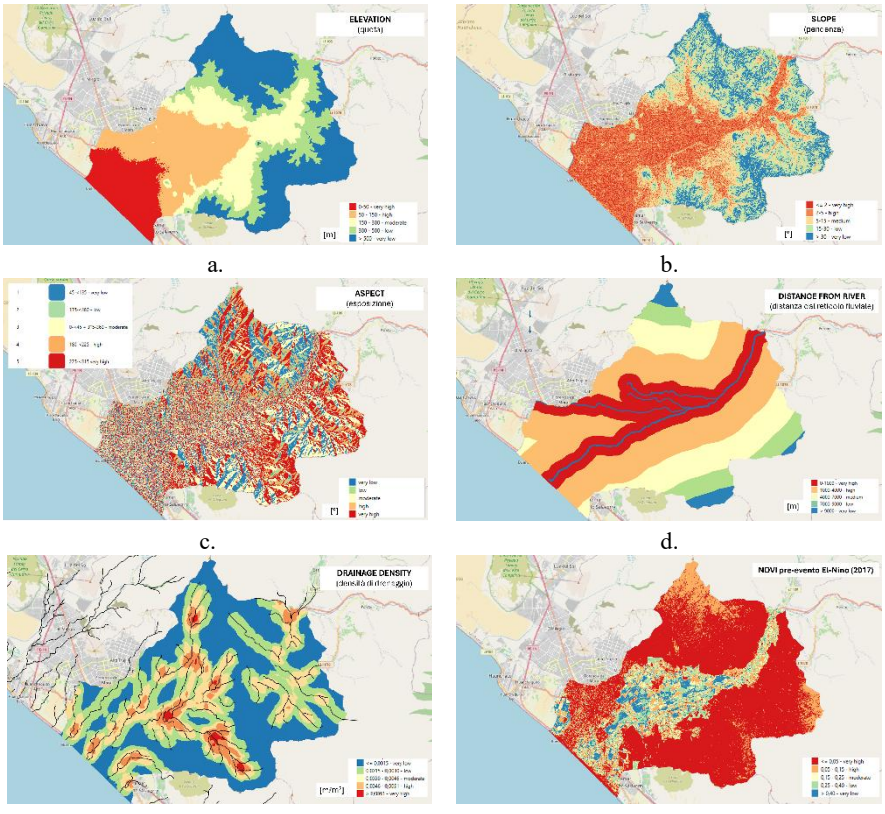


Fig. 1. Inquadramento della Valle del Moche, visualizzazione del DEM sovrapposto da corsi fluviali, *quebradas* e posizione dei siti storico-archeologici (EPSG: 32717).

2.2 Indicatori e classificazione

Dal DEM associato al prodotto ALOS PALSAR distribuito da ASF (Alaska Satellite Facility)[1], con passo di griglia di 12,5 m, sono ricavati quota, pendenza ed esposizione (Fig. 2a–c). La distanza dal fiume Moche e dai canali è calcolata mediante analisi di prossimità (Fig. 2d); la densità di drenaggio descrive la concentrazione del reticolo delle *quebradas* (Fig. 2e). I layer sono ritagliati sull'AOI e armonizzati nello stesso sistema di riferimento.

La configurazione antecedente all'evento *El Niño* 2017 è descritta dall'NDVI ricavato dalle immagini Sentinel-2 MSI L2A del 28 novembre 2016 (Copernicus Data Space Ecosystem)[2]. L'indice è calcolato come (B8−B4)/(B8+B4), utilizzando le bande dell'infrarosso vicino e del rosso a 10 m (Fig. 2f).



a. b. c. d. e. f.

Fig. 2. Indicatori utilizzati nel modello di vulnerabilità, riclassificati in cinque classi di vulnerabilità: (a) quota, (b) pendenza, (c) esposizione, (d) distanza dal reticolo, (e) densità di drenaggio, (f) NDVI.

[1] https://www.earthdata.nasa.gov/data/projects/alos-palsar-rtc-project
[2] https://dataspace.copernicus.eu/ecosystem/services/copernicus-browser

I sei indicatori sono riclassificati nella scala ordinale (Tab. 1), da vulnerabilità molto bassa (1) a molto alta (5). Le soglie rendono confrontabili grandezze eterogenee, ma introducono discontinuità che vanno considerate nell'interpretazione dei risultati.

Tab. 1. Classificazione dei sei indicatori utilizzati nel modello MCDA-AHP nelle cinque classi di vulnerabilità alle inondazioni, da molto bassa (1) a molto alta (5).

Indicatore	1	2	3	4	5
Quota (m)	>500	300–500	150–300	50–150	0–50
Pendenza (°)	>30	15–30	5–15	2–5	≤2
Esposizione (°)	45–135	135–180	315–360 ; 0–45	180–225	225–315
Densità di Drenaggio (m/m^2)	≤0,0015	0,0015–0,0030	0,0030–0,0046	0,0046–0,0061	>0,0061
Distanza dal fiume (m)	>9000	7000–9000	4000–7000	1000–4000	0–1000
NDVI	>0,40	0,25–0,40	0,15–0,25	0,05–0,15	≤0,05

2.3 Pesi AHP e indice di vulnerabilità

L'AHP definisce l'importanza relativa degli indicatori attraverso una matrice reciproca di confronti a coppie. I giudizi attribuiscono maggiore rilevanza alla prossimità al corso d'acqua (DR) e alla densità di drenaggio (DD). La matrice riportata è riprodotta in Tab. 2, rendendo esplicito il passaggio dai giudizi qualitativi alla ponderazione.

Il controllo mediante autovalore principale della matrice fornisce $\lambda_{max} \approx 6{,}0475$ e un rapporto di consistenza $CR \approx 0{,}0077$, assumendo $RI = 1{,}24$ per sei criteri. Il valore indica una buona coerenza interna dei giudizi; non dimostra, da solo, la capacità del modello di rappresentare gli allagamenti.

Tab. 2. Matrice AHP: DR: distanza dal reticolo; DD: densità di drenaggio; E: quota; S: pendenza; N: NDVI; A: esposizione.

	DR	DD	S	E	N	A
DR	**1**	2	3	3	5	7
DD	1/2	**1**	2	2	4	5
S	1/3	1/2	**1**	1	2	4
E	1/3	1/2	1	**1**	2	3
N	1/5	1/4	1/2	1/2	**1**	2
A	1/7	1/5	1/4	1/3	1/2	**1**

Per descrivere la mappa di vulnerabilità all'alluvione si tiene conto dei pesi operativi attribuiti a ciascun indicatore: DR = 0,382; DD = 0,241; S = 0,136; E = 0,129; N = 0,070; A = 0,043. La loro somma è 1,001; la normalizzazione elimina lo scarto

dovuto agli arrotondamenti. La mappa di suscettibilità (FVI) è ottenuta mediante una combinazione lineare ponderata dei sei indicatori:

$$FVI(x) = \frac{\sum_{i=1}^{6} w_i \; r_i(x)}{\sum_{i=1}^{6} w_i}$$

dove $r_i(x)$ è il valore dell'indicatore i, riclassificato nella scala 1–5 nella cella x, e w_i è il relativo peso. Applicando i pesi operativi si ottiene:

$$FVI = (0{,}382\ DR + 0{,}241\ DD + 0{,}136\ S + 0{,}129\ E + 0{,}070\ N + 0{,}043\ A) / 1{,}001 \quad (5)$$

La combinazione lineare restituisce un indice adimensionale compreso teoricamente tra 1 e 5, successivamente organizzato in cinque classi ordinali.

3 Risultati

3.1 Mappa di vulnerabilità territoriale alle inondazioni

La mappa relativa alla configurazione antecedente all'evento del 2017 evidenzia una distribuzione articolata delle cinque classi (Fig. 3). I livelli alto e molto alto si concentrano lungo il corridoio vallivo del Moche, con fasce che attraversano il settore centrale dell'AOI e proseguono verso la costa. Le classi basse interessano soprattutto i margini collinari e i settori più distanti dal reticolo principale. Questa lettura è coerente con la struttura dei pesi e con l'attribuzione di punteggi maggiori alle superfici pianeggianti e prossime ai corsi d'acqua.

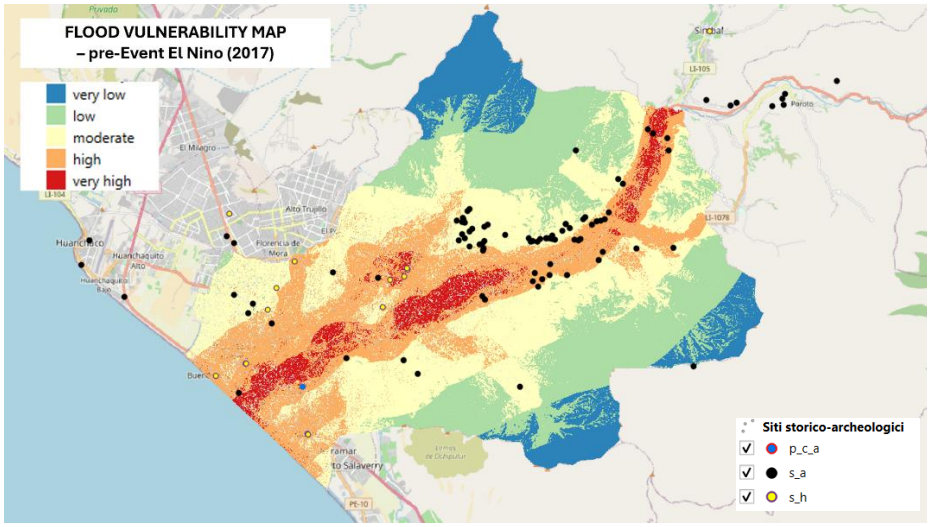


Fig. 3. Vulnerabilità territoriale alle inondazioni (FVI) e localizzazione dei siti storico-archeologici. Classi dalla molto bassa (blu) alla molto alta (rosso).

All'interno del corridoio ad alta suscettibilità sono presenti variazioni locali, dovute alla combinazione degli indicatori classificati. La carta non individua una superficie allagata continua, ma un insieme di condizioni territoriali relativamente più favorevoli al fenomeno. L'estensione delle fasce segue anche le soglie di distanza adottate, per cui il passaggio tra classi non deve essere interpretato come un limite fisico certo della piena.

3.2 Confronto quantitativo con le aree inondate CEMS del 2017

Il confronto della mappa di vulnerabilità territoriale alle inondazioni è stato effettuato utilizzando i prodotti dell'attivazione CEMS EMSR199, "Floods in Peru", del 22 marzo 2017[3]. Sono stati considerati il prodotto 13TRUJILLO DELINEATION MONIT01, contenente geometrie associate a osservazioni del 23, 24 e 27 marzo 2017, e i prodotti di *grading* 18TRUJILLOSOUTH e 21LAREDO, riferiti al 1° aprile 2017. I dati sono stati impiegati come cartografia già elaborata dal servizio. La selezione degli elementi da confrontare è stata effettuata attraverso l'attributo *interpret*, includendo esclusivamente i poligoni classificati come *Flooded Area*.

I layer vettoriali sono stati armonizzati nel sistema WGS84/UTM17S (EPSG: 32717), verificati geometricamente e rasterizzati sulla medesima griglia del FVI, con celle di 10×10 m. L'assegnazione è stata effettuata sulla base della posizione del centro della cella rispetto ai poligoni. L'analisi ha considerato esclusivamente i pixel FVI appartenenti alle classi 1–5, escludendo NoData e valori non classificati. Per il confronto complessivo è stata utilizzata l'unione delle aree allagate dei tre prodotti, contando una sola volta i pixel presenti in poligoni sovrapposti. Tale unione rappresenta una sintesi delle osservazioni disponibili in date differenti, non l'estensione simultanea dell'allagamento.

L'intersezione ha individuato 169.259 pixel allagati entro la superficie classificata, corrispondenti a 16,926 km². Di questi, il 3,64% ricade nella classe bassa (FVI_2), il 76,81% nella classe moderata (FVI_3), il 15,42% nella classe alta (FVI_4) e il 4,14% nella classe molto alta (FVI_5); nessun pixel ricade nella classe molto bassa (FVI_1). La quota degli allagamenti intercettata complessivamente dalle classi alta e molto alta, espressa dall'indicatore:

$$C_{45} = \frac{n_4 + n_5}{n_F} = 0{,}1955 = 19{,}55\%$$

dove n_4 e n_5 sono i pixel allagati CEMS nelle rispettive classi e n_F è il totale dei pixel allagati nel dominio analizzato. Il confronto separato restituisce valori di C45 del 14,93% per 13TRUJILLO MONIT01, del 100% per 18TRUJILLOSOUTH e del 97,76% per 21LAREDO, su superfici allagate rispettivamente pari a 15,991, 0,389 e 0,576 km².

I risultati evidenziano una corrispondenza elevata nei due prodotti locali e più limitata nel prodotto esteso di Trujillo, che domina il confronto complessivo per superficie allagata. La prevalenza della classe moderata indica che la soglia costituita

[3] https://mapping.emergency.copernicus.eu/activations/EMSR199/

dalle sole classi alta e molto alta intercetta una porzione ridotta delle inondazioni documentate. C_{45} misura, pertanto, la copertura degli allagamenti osservati da parte delle classi elevate e non l'accuratezza complessiva del modello, la probabilità di inondazione o il danno ai beni archeologici.

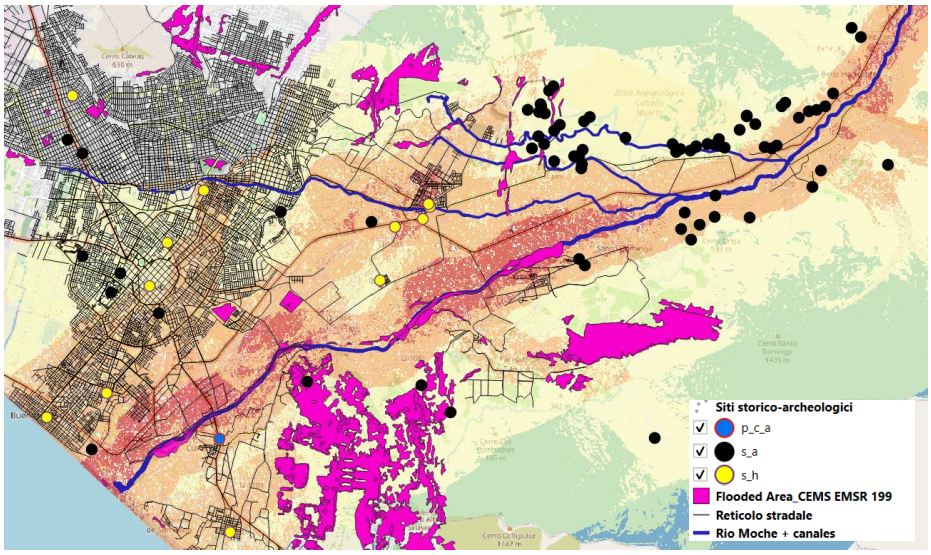


Fig. 4. Sovrapposizione delle aree inondate cartografate da CEMS EMSR199 (poligoni magenta) alla mappa di vulnerabilità alle inondazioni relativa all'evento *El Niño* del 2017 nella Valle del Moche (zoom su aree urbane di Trujillo e Laredo, Perù).

3.3 Esposizione del patrimonio storico-archeologico

L'esposizione del patrimonio è stata analizzata mediante sovrapposizione del layer puntuale relativo ai siti storico-archeologici individuati alla mappa FVI dell'evento 2017, attribuendo a ciascuna localizzazione la classe della cella raster corrispondente. Il dataset comprende 110 elementi, di cui 92 classificati come siti archeologici (s_a), 17 come siti storici (s_h) e uno come paesaggio culturale archeologico (p_c_a). Complessivamente, 88 punti ricadono su celle con valori FVI validi, mentre 22 risultano esterni alla superficie classificata o in corrispondenza di celle prive di una classe utilizzabile.

Considerando esclusivamente i siti archeologici, è stato possibile attribuire una classe a 76 localizzazioni: una ricade nella classe bassa (FVI_2), 49 nella moderata (FVI_3), 23 nell'alta (FVI_4) e 3 nella molto alta (FVI_5). Le due classi più elevate comprendono quindi 26 punti, pari al 34,2% delle localizzazioni archeologiche valutabili. Questi risultati individuano ambiti prioritari per approfondimenti geomatici e conservativi, senza attribuire automaticamente la medesima classe all'intera estensione dei siti.

4 Discussione e conclusioni

L'integrazione di dati territoriali, indicatori ambientali e localizzazioni archeologiche permette di individuare ambiti prioritari per ricognizioni e approfondimenti. Il confronto con CEMS EMSR199 evidenzia che il 19,55% della superficie allagata analizzata ricade nelle classi alta e molto alta, mentre il 76,81% appartiene alla classe moderata. I valori più elevati nei prodotti locali di Trujillo South e Laredo non sono quindi generalizzabili all'intera area. Queste percentuali descrivono la distribuzione degli allagamenti tra le classi, senza misurare l'accuratezza complessiva del modello.

La predominanza dei criteri idrografici spiega la concentrazione delle classi elevate lungo il fiume Moche, ma rende il risultato sensibile alla completezza del reticolo e alle soglie adottate. Quota, pendenza e prossimità possono introdurre ridondanze, mentre il ruolo dell'esposizione dei versanti richiede una motivazione locale. L'NDVI calcolato nel pre-evento (2017) evita di incorporare gli effetti delle inondazioni, ma non sostituisce informazioni su permeabilità e gestione dei canali. Il passo di griglia del DEM non garantisce inoltre la rappresentazione di argini, muri archeologici e micro-depressioni.

Tra le 76 localizzazioni archeologiche valutabili, 26 ricadono nelle classi alta e molto alta. L'attribuzione riguarda la cella campionata, non l'intera estensione del sito né il danno atteso. La vulnerabilità dei manufatti richiede ulteriori informazioni su materiali, stato di conservazione e caratteristiche del flusso.

Il FVI (Flood Vulnerability Index) costituisce pertanto uno strumento preliminare di selezione delle priorità. Il confronto quantitativo svolto deve essere integrato con la superficie delle classi nel dominio effettivamente osservato da CEMS e con analisi di sensibilità ai pesi. Rilievi di dettaglio e osservazioni conservative potranno approfondire la vulnerabilità dei singoli complessi archeologici.

Riferimenti bibliografici

1. UNESCO: Recovery of Peru's Culture Sector following the Recent Floods caused by El Niño (2017). https://www.unesco.org/en/articles/recovery-perus-culture-sector-following-recent-floods-caused-el-nino, ultimo accesso il 2026/10/10.
2. Saaty, T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1), 83–98 (2008). https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
3. Hossain, M.N., Mumu, U.H.: Flood susceptibility modelling of the Teesta River Basin through the AHP-MCDA process using GIS and remote sensing. *Natural Hazards* 120, 12137–12161 (2024). https://doi.org/10.1007/s11069-024-06677-z
4. M. Sanità, H. D. T. Viet, R. Pierdicca, E. S. Malinverni and F. Di Stefano, "Remote Sensing and GIS Applications for Assessing Flood Vulnerability of Cultural Heritage Sites in Hue City, Central Vietnam," *IGARSS 2025 - 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brisbane, Australia, 2025, pp. 1644-1648, doi: 10.1109/IGARSS55030.2025.11242625.

Certificazione spazio-temporale di dati digitali con supporto Galileo OSNMA: il sistema ATLHAS

Michele Donatacci*, Gabriele Amendola*, Luca Amendola*, Jaume Cunill**, Livio Rossi**

*ATLHAS; ** ATLHAS consultant

Fotografie, video e dati di tracciamento acquisiti a terra, da aeromobile o da drone sono sempre più utilizzati nei processi di verifica, monitoraggio, audit e documentazione tecnica. In questo contesto non è sufficiente associare al dato una posizione geografica e un timestamp: diventa necessario poter verificare anche successivamente **dove e quando il dato sia stato acquisito, la sua integrità e la coerenza delle informazioni utilizzate per determinarne la collocazione spazio-temporale**.

È su questo aspetto che si concentra ATLHAS. Nei tradizionali sistemi di geotagging, posizione e tempo sono normalmente memorizzati come metadati associati al file e possono però essere modificati, sostituiti o separati dal contenuto originario. **ATLHAS realizza invece una certificazione spazio-temporale del dato digitale**, costruendo un legame verificabile tra contenuto acquisito, posizione, data/ora e informazioni prodotte durante il processo di acquisizione.

La piattaforma combina dati GNSS, autenticazione dei messaggi di navigazione Galileo mediante OSNMA (Open Service Navigation Message Authentication), controlli sul processo di acquisizione e tecniche crittografiche. Il risultato non è quindi un semplice dato geolocalizzato, ma un contenuto digitale accompagnato da **evidenze verificabili della propria origine spazio-temporale e della propria integrità**, controllabili anche successivamente e indipendentemente dal dispositivo che ha effettuato l'acquisizione.

ATLHAS è disponibile attraverso API e SDK e può essere integrato in applicazioni mobili e piattaforme software esistenti. La certificazione viene quindi incorporata direttamente nel flusso operativo di acquisizione, senza richiedere la sostituzione dei sistemi applicativi già utilizzati.

Nel caso di acquisizioni fotografiche, ad esempio per control point tematici, statistici o topografici, il sistema può associare allo scatto informazioni verificabili relative a posizione, data/ora, orientamento e campo visivo, collegandole al contenuto fotografico e ai dati prodotti durante l'acquisizione. L'impiego di smartphone dotati di capacità GNSS avanzate e, quando disponibili, di correzioni RTK consente inoltre di sviluppare applicazioni per misure geometriche e rilievi ad elevata precisione, comprese misure di distanze e altezze (edifici, alberature ecc.) in condizioni operative controllate.

Le possibili applicazioni comprendono i settori agro-ambientale, forestale, geo-archeologico, assicurativo, legale e logistico, oltre al monitoraggio di infrastrutture, cantieri e veicoli terrestri

o aerei. In tali contesti ATLHAS permette di associare ai dati territoriali elementi indipendentemente verificabili relativi alla loro provenienza, integrità e collocazione spazio-temporale, rendendoli utilizzabili anche in processi nei quali la semplice presenza di coordinate geografiche non costituisce una prova sufficiente.

Il sistema supporta inoltre modalità di posizionamento e tracking ad alta precisione, integrando tecniche GNSS avanzate, incluse correzioni RTK, utilizzabili sia tramite dispositivi mobili compatibili sia attraverso ricevitori GNSS esterni cost-effective, compatti e facilmente trasportabili, inclusi dispositivi USB plug-and-play. In scenari operativi controllati tali configurazioni possono consentire accuratezze fino al livello centimetrico.

ATLHAS introduce quindi un livello ulteriore rispetto alla semplice geolocalizzazione del dato: il dato non viene soltanto geotaggato, ma viene accompagnato da una prova digitale verificabile della propria origine spazio-temporale e della propria integrità. Questo approccio consente di utilizzare fotografie, video e dati territoriali all'interno di processi tecnici, amministrativi e probatori nei quali è necessario verificare non soltanto il contenuto, ma anche dove, quando e in quali condizioni esso sia stato acquisito.

Il Sistema ATLHAS applicato alla risoluzione certificata dei controlli PAC EU per AGEA

Michele Donatacci*, Gabriele Amendola*, Luca Amendola*, Jaume Cunill**, Livio Rossi**
** ATLHAS; ** ATLHAS consultant*

La digitalizzazione dei controlli agro-ambientali e territoriali richiede non solo di associare coordinate geografiche e timestamp ai dati di campo, ma di poter **dimostrare successivamente l'autenticità, l'integrità e la coerenza spazio-temporale dell'acquisizione**.

Un tradizionale sistema di geotagging registra posizione e tempo come semplici metadati, che possono essere modificati o sostituiti. L'innovazione portata da **ATLHAS trasforma invece posizione, tempo e contenuto acquisito in un'unica evidenza digitale spazio-temporale verificabile**, combinando informazioni GNSS, autenticazione dei messaggi di navigazione Galileo attraverso OSNMA (Open Service Navigation Message Authentication), controlli sul processo di acquisizione e tecniche crittografiche.

Il risultato non è quindi soltanto una fotografia geolocalizzata, ma un dato digitale al quale vengono associate evidenze verificabili relative a **dove e quando è stato acquisito, alla sua integrità e alla coerenza delle informazioni utilizzate per determinarne la sua collocazione spazio-temporale**. Tali evidenze possono essere controllate anche successivamente e indipendentemente dal dispositivo che ha effettuato l'acquisizione.

Nell'ambito della Politica Agricola Comune (PAC), l'Area Monitoring System (AMS), basato principalmente sull'osservazione satellitare Sentinel, spesso le informazioni disponibili non sono sufficienti a completare automaticamente una verifica. In tali situazioni, acquisizioni fotografiche spazio-temporalmente certificate sul campo costituiscono la soluzione per chiudere subito i dossier dei beneficiari.

Le evidenze prodotte da uno smartphone mediante ATLHAS possono documentare, ad esempio, colture specifiche o in serra, operazioni di sfalcio, coperture vegetali, attività di pascolo anche sotto bosco, applicazione di misure ambientali e altre condizioni rilevanti ai fini dei controlli PAC non risolvibili sempre da Sentinel. L'utilizzo di tali evidenze può supportare sia gli agricoltori nella documentazione delle attività sia gli organismi responsabili delle verifiche, contribuendo alla riduzione o all'annullamento dei casi che richiedono costosi e time-consuming sopralluoghi dedicati e alla semplificazione dei processi istruttori.

Nel 2026 la tecnologia ATLHAS è stata integrata, attraverso il relativo Software Development Kit (SDK), in AgriFoto, applicazione mobile di AGEA – Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura Italiana.

Per ogni acquisizione fotografica, il sistema può:

- associare alla fotografia evidenze verificabili di posizione, data e ora;
- collegare in modo crittografico immagine, dati GNSS e metadati agronomici;
- verificare la coerenza dei dati utilizzati nel processo di acquisizione;
- effettuare controlli finalizzati all'individuazione di anomalie GNSS e di possibili manipolazioni dell'immagine o del processo di acquisizione (foto di foto, modificate, già esistenti);
- generare un certificato digitale per ogni evidenza raccolta;
- consentire verifiche successive indipendenti da parte dei soggetti autorizzati (audit EU, Corte dei Conti ecc).

L'architettura SDK consente inoltre l'integrazione di ATLHAS in applicazioni mobili, piattaforme GIS, sistemi per droni e aeromobili e flussi di lavoro industriali, senza richiedere la sostituzione delle applicazioni operative già esistenti.

L'esperienza AgriFoto rappresenta quindi un caso applicativo nel quale **il dato geografico non viene semplicemente geotaggato, ma viene accompagnato da una prova digitale verificabile della propria origine spazio-temporale e della propria integrità**, utilizzabile in tutti i successivi processi di controllo e verifica della PAC.

Il progetto MEDUSA - MEDiterraneo: Uso Sostenibile dell'Ambiente

Margherita Fiani[1], Alessandro Di Benedetto[1], Jacopo Maria Lisena[1], Laura Candela[2] e Luigi D'Amato[2]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, Fisciano (SA), Italia
[2] Agenzia Spaziale Italiana (ASI), Roma, Italia
m.fiani@unisa.it, adibenedetto@unisa.it, jlisena@unisa.it, laura.candela@asi.it, luigi.damato@asi.it

Abstract. Il progetto MEDUSA sviluppa un Digital Twin della Costiera Amalfitana integrando dati COSMO-SkyMed, PRISMA e rianalisi climatiche per monitorare deformazioni dell'edificato, evoluzione della linea di costa, qualità delle acque, corrosione atmosferica e microclima dei siti storici.

Parole chiave: COSMO-SkyMed, PRISMA, Digital Twin, PS-InSAR, Costiera Amalfitana

1 Introduzione

Le zone costiere del Mediterraneo concentrano in una fascia ristretta centri abitati, infrastrutture, attività turistico-produttive e una quota rilevante del patrimonio culturale. In Italia, secondo l'ISPRA, tra il 2006 e il 2020 circa 1.900 km di costa bassa hanno subito variazioni significative, di cui 934 km in arretramento [1]. Parallelamente, gli apporti di nutrienti e sedimenti da scarichi e corsi d'acqua degradano le acque costiere, rendendo necessario il monitoraggio dello stato ecologico [2] e il contrasto all'eutrofizzazione [3]. A queste pressioni si sommano i cambiamenti climatici nel Mediterraneo, un hot-spot dove il riscaldamento supera la media globale [4]. L'innalzamento del livello marino e l'intensificarsi degli eventi meteo-marini estremi aumentano il rischio di inondazioni e danni costieri, mentre il patrimonio costruito subisce processi di degrado lenti: i cedimenti del terreno deformano gli edifici, l'aerosol marino accelera la corrosione metallica e l'umidità persistente favorisce la formazione di muffe nei siti storici. La Costiera Amalfitana, in Campania, è un caso emblematico di queste vulnerabilità. Le coste alte e rocciose, le piccole spiagge alla foce dei valloni e i centri storici a ridosso del mare ne fanno un paesaggio riconosciuto Patrimonio Mondiale UNESCO, ma anche un territorio esposto a dissesto idrogeologico. Il monitoraggio deve seguire sia processi lenti, come i cedimenti degli edifici e la corrosione, sia fenomeni rapidi, come le variazioni della linea di riva o della qualità delle acque dopo eventi intensi.

L'Osservazione della Terra (OT) da satellite consente di analizzare aree estese, con acquisizioni regolari e dati confrontabili nel tempo, spesso disponibili gratuitamente grazie a programmi come Copernicus. Le tecniche interferometriche SAR (Synthetic

Aperture Radar) consentono di misurare gli spostamenti del suolo e degli edifici con precisione millimetrica [5]; in Europa questi dati sono elaborati e distribuiti dall'European Ground Motion Service [6]. Da dati acquisiti da sensori passivi si può ricavare la linea di riva, la cui posizione dipende dal criterio adottato per definirla [7]; strumenti aperti come CoastSat consentono di ricostruirne l'evoluzione partendo dalle immagini Landsat e Sentinel-2 [8]. Il Copernicus Marine Service distribuisce mappe di qualità delle acque validate per tutti i mari europei [9], mentre per monitorare le variabili atmosferiche come temperatura e umidità relativa sono usati i dati di rianalisi, tra cui ERA5 [10]. L'uso operativo di questi dati da parte degli enti territoriali resta però limitato. Il primo ostacolo è la frammentazione: i prodotti provengono da fornitori diversi, con formati, sistemi di riferimento e risoluzioni non omogenei. Manca, in particolare a scala locale, una piattaforma che li riunisca e li renda confrontabili. Il secondo ostacolo è la risoluzione dei prodotti, spesso inadeguata su coste alte e frastagliate come quella amalfitana: le spiagge di fondovalle hanno dimensioni paragonabili a pochi pixel delle immagini a media risoluzione. Per superare la frammentazione dei dati si sta affermando l'approccio del Digital Twin (DT), concetto nato in ambito manifatturiero. Un DT è una rappresentazione digitale di un sistema fisico, che ne riceve con continuità i dati e ne simula il comportamento [11]. L'approccio è stato poi esteso all'ambiente: l'iniziativa europea Destination Earth punta a un DT dell'intero sistema Terra [12]. A scala regionale, sistemi come SOCIB (Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System) ne hanno mostrato il valore per la gestione delle coste [13]. Questi sistemi operano però a scala di bacino o regionale e raramente includono l'edificato.

Il progetto MEDUSA (MEDiterraneo: Uso Sostenibile dell'Ambiente), finanziato dall'ASI nell'ambito del bando Boosting Future in Space @ Matera Space Center Lab e sviluppato dall'Università degli Studi di Salerno, sviluppa un DT dell'ecosistema marino-costiero a scala locale, con area test in Costiera Amalfitana. Il DT si fonda sulle missioni nazionali COSMO-SkyMed e PRISMA, ad alta risoluzione rispettivamente spaziale e spettrale, e le integra con i prodotti Copernicus, i dati di rianalisi, i rilievi LiDAR (Light Detection and Ranging) e fotogrammetrici da drone (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), le reti di sensori IoT (Internet of Things) e le basi cartografiche regionali. Le misure in situ servono anche a calibrare e a verificare le stime ottenute da satellite.

Su questi dati operano cinque modelli: (i) la vulnerabilità dell'edificato, da dati Permanent Scatterer Interferometry (PS-InSAR); (ii) l'evoluzione della linea di riva, da serie multitemporali SAR; (iii) la qualità delle acque, da immagini iperspettrali PRISMA; (iv) la corrosione atmosferica; (v) il microclima e il rischio muffe nei siti storici, da reti di sensori IoT. I modelli condividono il sistema di riferimento e l'infrastruttura dati, ma operano in modo autonomo e sono integrati in un'unica interfaccia di consultazione.

2 Metodologia

La realizzazione del DT MEDUSA si articola in tre fasi: la progettazione dell'architettura; l'acquisizione e l'ottimizzazione della cartografia di base, con l'omogeneizzazione dei sistemi di riferimento e la georeferenziazione dei dati multi-sorgente (satellitari, aerei, in situ e d'archivio); lo sviluppo dei cinque modelli dinamici per simulazioni e analisi

previsionali, eseguiti su server dedicati. L'architettura, distribuita e multilivello, segue uno schema ibrido edge-fog-cloud: i nodi edge e fog acquisiscono e pre-elaborano i dati (MQTT per i sensori IoT, API REST e SFTP per i server esterni) prima dell'integrazione in cloud. Geometrie e metadati sono gestiti in PostgreSQL/PostGIS, i raster su file system distribuiti; l'interoperabilità è garantita dai protocolli OGC e l'accesso è regolato per ruoli (RBAC). La base statica del DT è organizzata in sei categorie: mappe di base (Sentinel-2, GeoDataBase Topografico (GDBT) della Regione Campania, Copernicus Digital Elevation Model); altimetria e morfologia (DTM regionale e LiDAR MASE, batimetria EMODnet); rilievi UAV (DJI Matrice 300 RTK e Wingtra One Gen II) e batimetrici a Maiori e Cetara; immagini PRISMA; cartografia tematica, tra cui i modelli LOD2 dell'edificato da GDBT [14], carte geologiche e geomorfologiche, pericolosità da crollo, clima ondoso e reti di scarico; pianificazione territoriale e beni architettonici.

2.1 I modelli del DT

I modelli sono ospitati su un server online ed eseguono le elaborazioni in tempo reale, aggiornandosi sia con i nuovi dati in ingresso sia con i parametri impostati dall'utente. La Fig. 1 illustra lo schema complessivo dei cinque modelli, con i dati in ingresso, la catena di elaborazione e i prodotti in uscita per ciascuno.

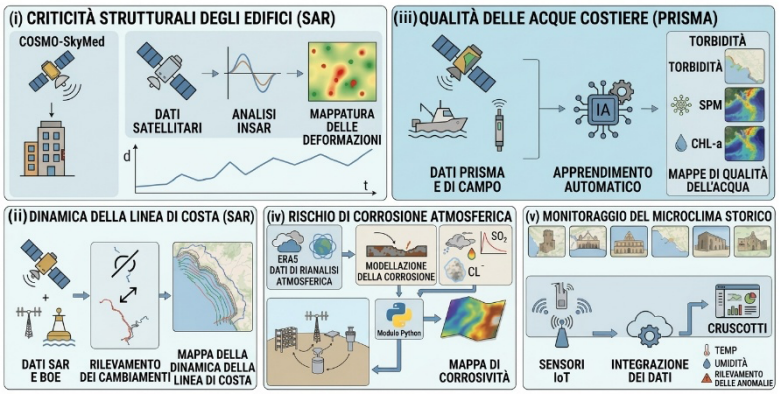


Fig. 1. Schema dei cinque modelli del DT MEDUSA.

(i) Il primo modello individua gli edifici potenzialmente critici dalle deformazioni misurate con la tecnica PS-InSAR [5] su due stack COSMO-SkyMed di prima e seconda generazione (2015-2025), in orbita ascendente e discendente, elaborati offline. Sono considerati solo i Permanent Scatterers (PS) con coerenza superiore a 0,75. Le serie temporali di spostamento sono ricampionate a 14 giorni con spline PCHIP, per evitare oscillazioni spurie, scomposte in trend, stagionalità e residuo, e proiettate a tre anni con Holt-Winters o SARIMA (calibrazione sull'80% della serie, validazione sul 20%). Combinando le due geometrie orbitali si separano le componenti verticale ed est-ovest. I valori puntuali sono interpolati con funzioni a base radiale (RBF), pesate sull'incertezza degli spostamenti, sulle impronte degli edifici del GDBT, dove sono calcolati tre indicatori [15]: spostamento medio, escursione differenziale (differenza tra

i valori estremi nell'impronta) e gradiente spaziale massimo. Gli ultimi due sono i più legati al danno [16]. Il modello riconosce così i cinematismi in atto (traslazioni, rotazioni) e classifica gli edifici per livello di criticità, con soglie configurabili per tipologia edilizia.

(ii) Il secondo modello ricostruisce l'evoluzione della linea di riva. Il modello usa immagini COSMO-SkyMed in orbita ascendente (2015-2025), che superano i limiti delle ottiche in presenza di nuvole, coregistrate e geocodificate in ENVI SARscape. Sfruttando il contrasto di retrodiffusione tra acqua e terraferma, la linea di riva è estratta con l'algoritmo a contorni attivi di Chan-Vese [17], vincolando l'evoluzione della curva entro un buffer attorno alla linea di costa GDBT per evitare falsi contorni dovuti a ombre radar o opere portuali. L'intersezione delle linee multitemporali con transetti ortogonali genera serie storiche analizzate ed estrapolate con la medesima procedura applicata ai PS. Dalla piattaforma l'utente può selezionare i transetti di interesse e consultarne le serie storiche di avanzamento e arretramento della linea di riva.

(iii) Il terzo modello stima dalle immagini PRISMA tre parametri della qualità delle acque legati agli apporti di scarichi e torrenti: la clorofilla-a, indicatore della quantità di fitoplancton, la torbidità e i solidi sospesi, che descrivono la trasparenza dell'acqua. Le campagne in situ, in sette stazioni a circa 150 m dalla costa, misurano anche i parametri chimico-fisici (pH, temperatura, ossigeno disciolto, salinità e conducibilità) e gli indicatori microbiologici (Escherichia coli e coliformi fecali). Previa verifica con questi dati, i prodotti CMDS (100 m) sono impiegati come riferimento per addestrare sette algoritmi di machine learning (tra cui Random Forest, Extra Trees, XGBoost, SVR e Ridge) sulle bande VNIR di PRISMA [18], operando un downscaling spaziale. Prima dell'addestramento, dalle immagini sono esclusi i pixel di terraferma e quelli disturbati da riflessi solari, cirri e ombre. Gli iperparametri dei modelli sono ottimizzati con una grid search e una validazione incrociata su sei delle nove scene PRISMA; le altre tre sono riservate alla validazione indipendente.

(iv) Il quarto modello stima la corrosività atmosferica dell'acciaio al carbonio con la funzione dose-risposta della norma ISO 9223, che ricava la perdita di materiale nel primo anno da temperatura, umidità relativa e deposizione di SO_2 e di cloruri. Temperatura e umidità sono ricavate da ERA5, la SO_2 da MERRA-2; i valori sono verificati in quattro siti pilota (Fisciano, Cetara, Maiori e Salerno) attrezzati con espositori di provini in acciaio, stazioni meteorologiche e campionatori di deposizione. I cloruri, misurati con il metodo della candela umida (wet candle), sono modellati con una legge a doppio decadimento esponenziale in funzione della distanza dalla costa e della quota. La deposizione di SO_2, misurata con il metodo della superficie alcalina, è calcolata con un modello fluidodinamico a resistenze in serie. Un modulo Python genera le mappe di deposizione e di corrosività, tenendo conto dei venti dominanti e della morfologia, nelle classi definite dalla norma, da C1 (molto bassa) a CX (estrema).

(v) Il quinto modello stima il rischio di sviluppo di muffe negli ambienti interni di sei siti storici: la Torre Vicereale e la Chiesa del Cimitero a Cetara, il Municipio, l'Arsenale e la Cartiera Amatruda ad Amalfi e la Villa Romana a Minori. Poiché le condizioni interne dipendono anche dalle murature e dall'uso degli ambienti e non sono descritte dalle rianalisi a circa 30 km, nei sei siti è installata una rete di 36 sensori IoT (LoRaWAN e NB-IoT) che misurano temperatura, umidità relativa, illuminamento e umidità muraria, all'esterno e all'interno degli edifici. Due regressioni XGBoost in cascata legano i dati orari ERA5 ai sensori esterni e questi ai sensori interni; alimentata con le previsioni ECMWF IFS a 7

giorni, la catena fornisce stime indoor che, confrontate con le curve isoplete di Sedlbauer per substrati biodegradabili (LIM I) e minerali porosi (LIM II), generano un indice giornaliero di allerta a tre livelli (sicuro, moderato, elevato).

3 Risultati e Discussione

La base geometrica del DT copre i diciassette comuni dell'area test e costituisce il riferimento comune per tutti i modelli. Dalle nuvole di punti LiDAR MASE del 2013 è stato generato, per interpolazione TIN con breaklines, un DTM a 1 m; i rilievi single-beam hanno esteso la copertura batimetrica a Cetara (9,7 ha) e Maiori (25,2 ha), con isobate a passo di 0,5 m. Dalle impronte del GDBT e dai dati LiDAR, la procedura basata su City3D e PolyFit ha ricostruito in LOD2 circa 40.000 edifici, con un errore medio di 0,20 m rispetto al DSM LiDAR. I rilievi UAV hanno prodotto ortofoto con GSD inferiore a 1,5 cm/px nei centri abitati e a 2 cm/px lungo costa, e nuvole di punti con densità superiori a 140 pt/m² nei centri e a 55 pt/m² lungo costa. La catalogazione ha censito 21 accessi al mare lungo la SS163, 42 torri costiere, 117 edifici religiosi (53 con cupole maiolicate) e 212 elementi archeologici, in prevalenza di età romana (183). L'analisi di 288 eventi franosi storici (1969-1999) con la distribuzione di Von Mises indica che le precipitazioni sono il principale fattore di innesco dei crolli (coefficiente di correlazione 0,74).

Modello (i) — Criticità strutturale dell'edificato. Per la stima delle criticità dell'edificato, il ricampionamento PCHIP riduce l'RMSE medio di previsione sul periodo di test da 0,94 mm (interpolazione lineare) a 0,76 mm. Il modello assegna una criticità strutturale se l'escursione differenziale supera 3 mm o il gradiente supera 0,5 mm/m, e una criticità funzionale se lo spostamento medio supera 5 mm in assenza di moti differenziali (soglie personalizzabili dall'utente). La Fig. 2 illustra un caso a Cetara: l'edificio selezionato mostra un trend contenuto (-0,211 mm/anno) e uno spostamento medio di -2,256 mm, valori che da soli suggerirebbero stabilità. Tuttavia, l'escursione massima raggiunge 5,855 mm (con gradiente di 0,2175 mm/m), evidenziando cedimenti differenziali. Il modello segnala quindi cedimenti differenziali non rilevabili dal solo spostamento medio.

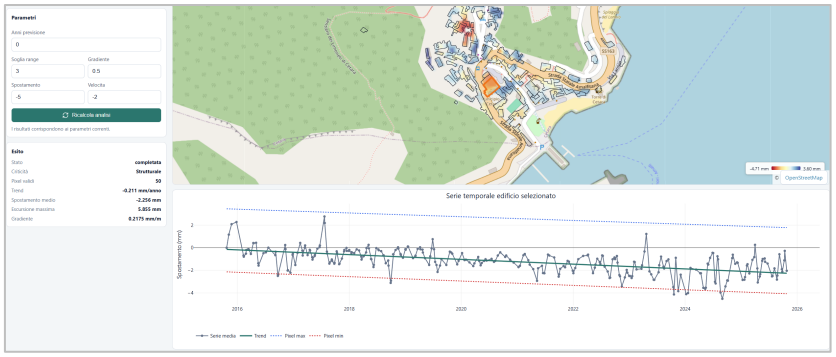


Fig. 2. Modello per la stima delle deformazioni dell'edificato: i parametri dell'analisi (a sinistra), i poligoni degli edifici (in alto) e la serie storica con i trend (in basso).

Modello (ii) — Dinamica della linea di costa. Sulla linea di costa (2015-2025), il modello rileva a Marina di Vietri un avanzamento medio di 0,4 m/anno, attribuibile agli apporti solidi del torrente Bonea e agli interventi di ripascimento. L'avanzamento raggiunge un massimo di 0,9 m/anno, mentre le falesie e le coste rocciose adiacenti risultano nel complesso stabili, con arretramenti locali di 0,1-0,2 m/anno. Il confronto con le ortofoto UAV conferma l'accuratezza sub-pixel dell'estrazione (scarto medio di 1,5 m). L'analisi del clima ondoso al largo di Cetara evidenzia una concentrazione delle mareggiate più intense nei mesi autunnali e invernali.

Modello (iii) — Qualità delle acque costiere. La coregistrazione delle scene PRISMA di luglio 2025 ha ridotto lo scostamento medio da circa mezzo pixel (circa 15 m) a meno di un decimo di pixel. XGBoost ha dato i risultati migliori per la clorofilla-a ($R^2 = 0,94$, RMSE = 0,44 µg/L), Extra Trees per la torbidità ($R^2 = 0,93$, RMSE = 0,10 FNU) e per i solidi sospesi ($R^2 = 0,93$, RMSE = 0,06 mg/L). Questi valori, ottenuti in validazione incrociata, misurano l'accordo con il riferimento CMDS. Il confronto con le misure in situ del 31/07/2025 mostra che le mappe riproducono l'andamento della torbidità e l'ordine di grandezza dei solidi sospesi, mentre la clorofilla-a è sovrastimata (Fig. 3): in queste acque oligotrofiche lo scarto è al limite di rilevabilità del prodotto CMDS di riferimento ed è ereditato dal modello. Le immagini PRISMA evidenziano inoltre effetti locali in prossimità degli scarichi di Maiori dopo piogge intense, con torbidità fino a 1,5 FNU e clorofilla-a fino a 1,2 µg/L. Un limite operativo è la bassa frequenza di rivisita: con sole nove scene disponibili, l'aggiornamento delle mappe risulta discontinuo, rendendo difficile il monitoraggio di eventi brevi come le perturbazioni post-pioggia. Questo vincolo sarà in parte superato dall'integrazione della costellazione IRIDE.

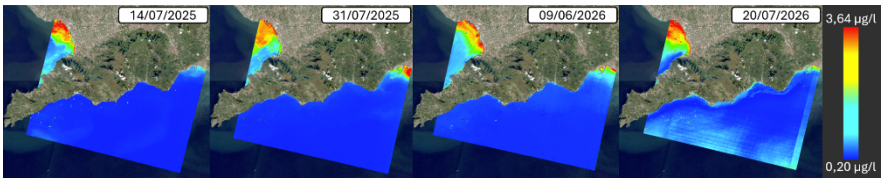


Fig. 3. Mappe di clorofilla-a stimate da PRISMA.

Modello (iv) — Corrosione atmosferica. Le analisi di corrosività mostrano un gradiente netto tra la costa e l'entroterra: dalla classe C2 (1,3-25 µm/anno) di Fisciano alla C4 (50-80 µm/anno) di Maiori e Cetara, fino alla C5 (80-200 µm/anno) del porto di Salerno. Il confronto con le misure sui provini dà $R^2 = 0,89$. La deposizione di cloruri raggiunge 350 mg/m²·d sulla costa e decresce esponenzialmente con la distanza dal mare ($k_d = 0,45$ km^{-1}) e con la quota ($k_h = 0,02$ m^{-1}). Su una costa alta e morfologicamente articolata come quella amalfitana, il decadimento altimetrico risulta particolarmente rilevante: a parità di distanza dal mare, due siti a quote diverse possono ricadere in classi di corrosività significativamente differenti, con implicazioni dirette per la scelta dei materiali e la pianificazione della manutenzione delle infrastrutture costiere.

Modello (v) — Microclima e rischio muffe nei siti storici. Per il microclima, la catena a due stadi mostra un buon accordo con le misure: il primo stadio (ERA5 → sensori esterni) dà $R^2 = 0,96$, con errori tra 1,2 e 2,2 °C; il secondo (sensori esterni → interni) dà R^2 compreso tra 0,71 e 0,97, con errori inferiori a 1,5 °C. Sulle serie storiche

l'indice individua il rischio massimo nella chiesa di Cetara nell'inverno 2025-2026 e nell'Arsenale di Amalfi nell'estate 2026; in previsione, per la settimana 18-24/09/2026, indica un rischio elevato costante nello stenditoio della Cartiera Amatruda, un ambiente con forte umidità propria. La variabilità dell'indice tra i sei siti riflette le differenze costruttive e d'uso degli ambienti monitorati: siti con murature massicce e scarso ricambio d'aria mostrano rischi più persistenti, mentre ambienti più aperti seguono più fedelmente le condizioni esterne e beneficiano di periodi di asciugatura naturale.

4 Conclusioni

Il DT MEDUSA riunisce in un'unica piattaforma interoperabile, conforme alla direttiva INSPIRE, dati satellitari, rilievi UAV, misure in situ e cinque modelli dedicati all'edificato, alla linea di riva, alla qualità delle acque, alla corrosione atmosferica e al microclima dei siti storici. Le verifiche nell'area test confermano l'affidabilità delle elaborazioni, dalla coregistrazione sub-pixel delle immagini alla misura millimetrica delle deformazioni. Le missioni nazionali COSMO-SkyMed e PRISMA si sono dimostrate adatte a una costa alta come quella amalfitana, grazie all'alta risoluzione, alla programmabilità delle acquisizioni e, per COSMO-SkyMed, a serie ormai decennali. Il limite principale è la bassa frequenza delle acquisizioni PRISMA, che condiziona l'aggiornamento delle mappe di qualità delle acque. Gli sviluppi futuri riguardano la validazione del modello sulle scene PRISMA indipendenti del 2026, l'integrazione dei dati IRIDE, che potranno aumentare la frequenza di rivisita SAR e dare continuità ai dati iperspettrali, e l'estensione dell'architettura ad altri tratti della costa mediterranea. MEDUSA costituisce uno strumento operativo a supporto delle pubbliche amministrazioni per l'adattamento climatico e la gestione del rischio costiero.

Ringraziamenti

Progetto MEDUSA finanziato dall'ASI (bando *Boosting Future in Space @ Matera Space Center Lab*, Fondo Complementare al PNRR, M1C2, Inv. 4.2). Dati COSMO-SkyMed® e PRISMA © ASI, forniti sotto licenza ASI.

Bibliografia

1. Trigila, A., Lastoria, B., Iadanza, C., et al.: Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio – Edizione 2024. Rapporti 415/2025. ISPRA, Roma (2025). https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologico-in-italia-pericolosita-e-indicatori-di-rischio-edizione-2024, ultimo accesso 2026/10/09.
2. European Parliament and Council of the European Union: Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities L 327, 1–73 (2000). https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
3. European Parliament and Council of the European Union: Directive 2008/56/EC of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). Official Journal of the European Union L 164, 19–40 (2008). https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj

4. Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., et al.: Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nature Climate Change 8(11), 972–980 (2018). https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2
5. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(1), 8–20 (2001). https://doi.org/10.1109/36.898661
6. Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., et al.: The evolution of wide-area DInSAR: from regional and national services to the European Ground Motion Service. Remote Sensing 12(12), 2043 (2020). https://doi.org/10.3390/rs12122043
7. Boak, E.H., Turner, I.L.: Shoreline definition and detection: a review. Journal of Coastal Research 21(4), 688–703 (2005). https://doi.org/10.2112/03-0071.1
8. Vos, K., Splinter, K.D., Harley, M.D., Simmons, J.A., Turner, I.L.: CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. Environmental Modelling & Software 122, 104528 (2019). https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528
9. Le Traon, P.Y., Reppucci, A., Alvarez Fanjul, E., et al.: From observation to information and users: the Copernicus Marine Service perspective. Frontiers in Marine Science 6, 234 (2019). https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00234
10. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al.: The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 146(730), 1999–2049 (2020). https://doi.org/10.1002/qj.3803
11. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A.Y.C.: Digital twin in industry: state-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics 15(4), 2405–2415 (2019). https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186
12. Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W.: A digital twin of Earth for the green transition. Nature Climate Change 11(2), 80–83 (2021). https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y
13. Tintoré, J., Pinardi, N., Álvarez-Fanjul, E., et al.: Challenges for sustained observing and forecasting systems in the Mediterranean Sea. Frontiers in Marine Science 6, 568 (2019). https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00568
14. Candela, L., D'Amato, L., Di Benedetto, A., Fiani, M., Gujski, L.M.: A pipeline for automatic building reconstruction for Digital Twins in complex urban environments. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLIX-B1-2026, 553–558 (2026). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIX-B1-2026-553-2026
15. Aufiero, F., Calvanese, V., Di Benedetto, A., Fiani, M., Petti, L., Zambrano, A., Zuchtriegel, G.: Assessment of masonry wall deformation through vertical displacement gradients using COSMO-SkyMed SAR interferometry: the case study of Archaeological Park of Pompeii. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. X-M-2-2025, 29–37 (2025). https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-2-2025-29-2025
16. Peduto, D., Nicodemo, G., Maccabiani, J., Ferlisi, S.: Multi-scale analysis of settlement-induced building damage using damage surveys and DInSAR data: a case study in The Netherlands. Engineering Geology 218, 117–133 (2017). https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.018
17. Chan, T.F., Vese, L.A.: Active contours without edges. IEEE Transactions on Image Processing 10(2), 266–277 (2001). https://doi.org/10.1109/83.902291
18. Niroumand-Jadidi, M., Bovolo, F., Bruzzone, L.: Water quality retrieval from PRISMA hyperspectral images: first experience in a turbid lake and comparison with Sentinel-2. Remote Sensing 12(23), 3984 (2020). https://doi.org/10.3390/rs12233984

Dal mondo reale alla realtà virtuale. Orientamento nelle scuole superiori attraverso il rilievo 3D

Giulia Fiorini, Anna Forte, Alessandro Lambertini, Gabriele Bitelli

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali
Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Abstract. Si presenta un laboratorio di orientamento rivolto a studenti di licei scientifici, dedicato al rilievo con tecniche geomatiche e alla creazione di modelli digitali. Attraverso fotogrammetria, laser scanning e realtà virtuale, gli studenti hanno acquisito e integrato dati spaziali relativi a un cantiere reale. Questionari finali indicano il gradimento e l'efficacia percepita dell'esperienza nel rendere più accessibili i contenuti della geomatica e nel favorire l'orientamento tecnico-scientifico.

Parole chiave: Orientamento tecnico-scientifico, Laboratorio, Didattica della Geomatica, Rilievo 3D.

1 Introduzione

La geomatica offre un contesto concreto per collegare le conoscenze matematiche e fisiche della scuola secondaria alla rappresentazione e all'analisi dello spazio. Un percorso di orientamento basato su un rilievo reale permette di rendere visibili le scelte che precedono la produzione di un modello tridimensionale e il rapporto tra misura, elaborazione e impiego del risultato. La didattica attiva costituisce un riferimento per questa impostazione: gli studi in ambito universitario STEM ne documentano i benefici, pur in contesti diversi da un breve laboratorio rivolto alle scuole superiori [1,2].

Il laboratorio «Il rilievo 3D dal mondo reale ai gemelli digitali esplorati in realtà virtuale», svolto presso il DICAM dell'Università di Bologna, si rivolge agli studenti dei licei scientifici. L'obiettivo è avvicinarli alle applicazioni della geomatica nell'ingegneria civile e ambientale, seguendo una sequenza operativa riconoscibile, dalla progettazione dell'acquisizione alla fruizione del modello. L'integrazione di fotogrammetria e scansione laser consente inoltre di introdurre la complementarità tra dati e rappresentazioni, tema consolidato nella documentazione tridimensionale [3].

Il contributo descrive l'organizzazione del percorso, i prodotti utilizzati e gli esiti qualitativi della valutazione. Il caso di un cantiere edile universitario collega l'esperienza di misura a un intervento di trasformazione dello spazio. L'interesse scientifico e didattico risiede nella continuità tra le fasi del processo e nella possibilità di discuterne i limiti, evitando che la sola efficacia visiva del modello venga assunta come indicatore di qualità metrica o di apprendimento.

2 Materiali e metodi

Il caso di studio è un cantiere attivo nel plesso universitario storico della Facoltà di Ingegneria in Bologna, relativo alla realizzazione di una vasca di raccolta e stoccaggio delle acque (Fig. 1). La presenza dello scavo, degli edifici e delle sistemazioni circostanti permette di collegare l'osservazione diretta alla lettura della geometria del sito. Il contesto in trasformazione di un cantiere attivo offre anche l'occasione di introdurre il monitoraggio multitemporale come possibile applicazione di rilievi ripetuti.



Fig. 1. Il cantiere utilizzato come caso studio del laboratorio.

2.1 Articolazione del percorso

Il laboratorio si è articolato in quattro distinti moduli, per complessive 12 ore, organizzati secondo il processo di costruzione di un modello 3D. La sequenza ha associato a ciascuna fase operativa uno specifico obiettivo conoscitivo. Il primo modulo ha introdotto i principi della geomatica e le applicazioni del rilievo tridimensionale. La progettazione dell'acquisizione sul caso studio ha messo in relazione la finalità del rilievo con la scelta dei dati necessari a descrivere lo spazio osservato.

Il secondo modulo ha riguardato la raccolta delle immagini e dei dati metrici. L'impiego della fotogrammetria digitale e del laser scanning terrestre ha consentito di presentare due diverse modalità di acquisizione e di collegare le osservazioni condotte sul campo ai dati successivamente elaborati. Inoltre, tecniche GNSS sono state impiegate per l'inquadramento geodetico del rilievo.

Il terzo modulo è stato dedicato all'elaborazione dei dati e alla generazione di diversi prodotti digitali, sia tridimensionali, come nuvole di punti e modelli mesh, sia bidimensionali, come ortofoto e DEM georeferenziati. Il quarto modulo, infine, ha riguardato la visualizzazione di questi prodotti mediante strumenti di realtà virtuale e aumentata, affiancata dall'osservazione di modelli fisici stampati in 3D. Il passaggio tra le diverse forme di rappresentazione ha reso esplicito il legame tra il dato acquisito e le differenti modalità di visualizzazione dei prodotti digitali ottenuti.

3 Acquisizione ed elaborazione dei dati

Le immagini acquisite sul campo sono state impiegate, nella seconda parte del laboratorio, in un flusso di lavoro di fotogrammetria MVS-SfM (Multi-View Stereo Structure from Motion). Nei procedimenti basati sulla SfM, la corrispondenza tra punti riconoscibili in più immagini ha permesso di stimare la posizione delle camere e la struttura della scena [4]. Questo principio ha consentito di collegare l'attività fotografica ai concetti di prospettiva, ridondanza delle osservazioni e ricostruzione spaziale, favorendo la comprensione del significato delle successive operazioni software (fig. 2).

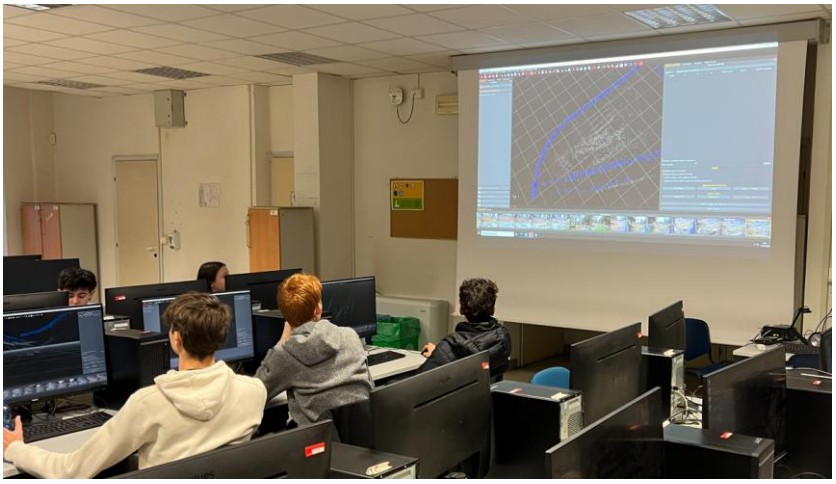


Fig. 2. Comprensione degli elementi base della fotogrammetria in ambiente SfM

Il laser scanning terrestre ha invece introdotto un diverso principio di misura, basato sull'acquisizione di punti sulla superficie degli oggetti. Il confronto con la fotogrammetria ha permesso di discutere il rapporto tra geometria e informazione visiva, nonché il ruolo delle zone non osservate.

In termini metodologici, l'integrazione di dati provenienti da sensori differenti (Fig. 3) ha richiesto l'adozione di un riferimento spaziale coerente, garantito da una rete di punti con coordinate espresse in sistemi di riferimento globali e da controlli sulla compatibilità e coerenza dei dati [3].

Nel percorso di orientamento, questi aspetti hanno fornito riferimenti utili per interpretare il processo di rilievo anche nella prospettiva dell'integrazione di dati acquisiti mediante sistemi differenti, caratterizzati da diversi principi fisici e geometrici di misura. Hanno inoltre consentito di evidenziare il ruolo dei sistemi di riferimento geodetici nei processi di georeferenziazione e integrazione multisensore, nonché di introdurre concetti fondamentali per la valutazione della qualità del dato, quali accuratezza e verifica metrica, risoluzione e scala di rappresentazione.

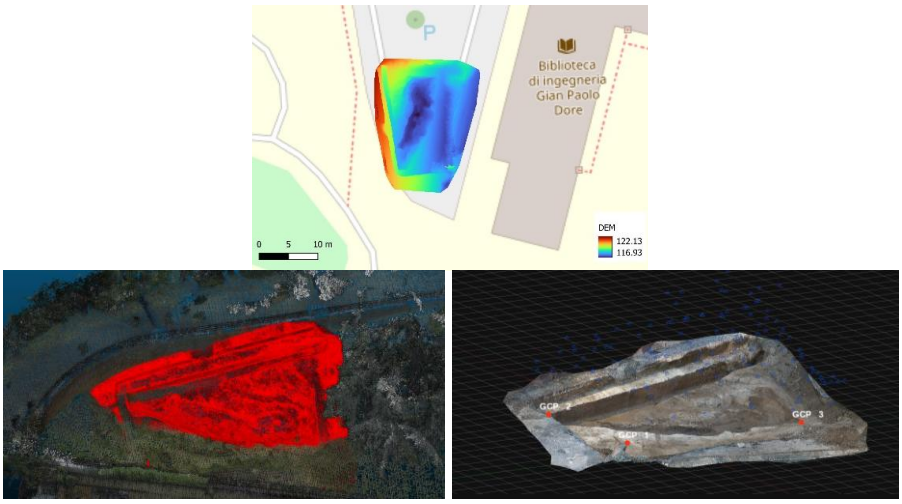


Fig. 3. Prodotti del rilievo: DEM dell'area di scavo in ambiente GIS (basemap: OpenStreetMap; RDN2008 / UTM 32N; altezze ellissoidiche). In basso, dettaglio della nuvola fotogrammetrica (rosso) co-registrata con la nuvola TLS del contesto di scavo e, a destra, mesh texturizzata da rilievo fotogrammetrico

3.1 Visualizzazione e valutazione dell'esperienza

La fase conclusiva si è invece concentrata sulla visualizzazione dei modelli digitali, grazie alla fruizione mediante visori per la Realtà Virtuale e Mista (VR e MR) e all'osservazione di stampe 3D. La scena virtuale e l'utilizzo del visore in prossimità del caso studio sono illustrati in Fig. 4. La scena a sinistra è stata ricostruita in software di rendering utilizzando i modelli ottenuti durante il laboratorio e il contesto della zona esterna alla facoltà di Ingegneria. È stata poi implementata, tramite animazioni, anche la visualizzazione immersiva del cambiamento geometrico del sito, utilizzando un modello 3D derivato da rilievi eseguiti in una fase precedente. Questo video immersivo tridimensionale è stato fruito tramite VR. L'esperienza di Realtà Mista, invece, si è avvalsa dell'uso di visori che permettono la modalità *pass-through*, in cui elementi virtuali (in questo caso, il modello del cantiere relativo alla fase precedente) vengono visualizzati immersivamente e simultaneamente sulla scena reale.

Oggetti stampati in 3D, già in possesso del gruppo di Geomatica del DICAM e non prodotti in questo contesto, hanno invece permesso di presentare una forma tangibile di visualizzazione e fruizione di oggetti tridimensionali ricostruiti con tecniche di

rilievo. Le diverse modalità di fruizione proposte hanno quindi offerto diverse modalità di lettura delle forme e delle relazioni spaziali. Il loro valore didattico dipende dalle attività proposte: la ricerca sull'apprendimento immersivo evidenzia il ruolo della presenza, della motivazione e del carico cognitivo, insieme a quello della progettazione didattica [5].



Fig. 4. A sinistra una scena della esperienza di Realtà Virtuale creata a partire dai dati raccolti e l'utilizzo del visore per la Realtà Mista presso il sito reale a destra.

La valutazione dell'attività è stata condotta mediante questionari anonimi. Gli esiti sono esaminati sul piano del gradimento espresso e dell'efficacia percepita delle attività. Queste informazioni hanno permesso di descrivere la ricezione del laboratorio e hanno fornito indicazioni per la sua revisione; vanno tuttavia distinte dalla misurazione delle conoscenze acquisite.

4 Risultati e Discussione

Il percorso ha integrato l'acquisizione di immagini e dati metrici con le successive fasi di elaborazione, modellazione e visualizzazione immersiva. I prodotti ottenuti, quali ortofoto, nuvole di punti e scene virtuali, documentano diversi livelli di restituzione del caso di studio e rendono osservabile la trasformazione dei dati acquisiti in un modello digitale esplorabile. La continuità dell'oggetto analizzato ha rappresentato il principale elemento di integrazione didattica, consentendo di ricondurre strumenti e attività a un unico processo di conoscenza e interpretazione dello spazio.

Al termine dell'esperienza, la maggior parte dei partecipanti ha espresso una valutazione molto positiva o positiva. Le fasi di elaborazione dei dati e di visualizzazione immersiva sono risultate particolarmente apprezzate, suggerendo che la possibilità di seguire il passaggio dalle misure al modello costituisca uno degli aspetti più coinvolgenti del laboratorio. Tale riscontro conferma l'interesse del percorso come proposta di orientamento tecnico-scientifico.

L'esperienza ha inoltre permesso di presentare la geomatica come un processo di costruzione e interpretazione dell'informazione spaziale. Il riferimento al cantiere ha reso esplicito il legame con l'ingegneria civile e ambientale, sebbene i medesimi principi possano essere applicati alla documentazione di siti archeologici, del

patrimonio costruito e di contesti ambientali dinamici. Il modello rilevato costituisce infine una base geometrica utile per introdurre il concetto di gemello digitale. Quest'ultimo richiede tuttavia l'integrazione di ulteriori informazioni descrittive, funzionali e temporali, nonché la definizione di relazioni aggiornabili con il sistema fisico rappresentato [6].

5 Conclusioni

In conclusione, il laboratorio di orientamento proposto ha mostrato le potenzialità di un approccio integrato, capace di collegare rilievo, elaborazione e visualizzazione all'interno di un'esperienza didattica unitaria. Il gradimento espresso dai partecipanti evidenzia in particolare l'efficacia delle attività che rendono visibile ed esplorabile la trasformazione del dato metrico. La valutazione condotta riguarda tuttavia soprattutto il livello di apprezzamento e non consente di misurare un effettivo incremento delle competenze o eventuali ricadute sulle scelte formative. Inoltre, l'interesse per gli strumenti non coincide necessariamente con la comprensione del processo metodologico. Le applicazioni future potrebbero pertanto integrare i questionari con brevi prove iniziali e finali e con attività di lettura critica dei prodotti del rilievo. Ciò permetterebbe di distinguere più chiaramente il coinvolgimento suscitato dalle tecnologie dall'acquisizione di conoscenze e capacità interpretative.

Riferimenti bibliografici

1. Bastawrous, A., Forte, A., Lambertini, A. et al. Integrating geomatics and mixed reality for heritage visualization and experiential learning in an educational context. Appl Geomat 18, 117 (2026). https://doi.org/10.1007/s12518-026-00755-6
2. Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H., Wenderoth, M.P.: Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. Proceedings of the National Academy of Sciences 111(23), 8410–8415 (2014). https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111
3. Remondino, F.: Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing 3(6), 1104–1138 (2011). https://doi.org/10.3390/rs3061104
4. Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M.: "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology 179, 300–314 (2012). https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021
5. Makransky, G., Petersen, G.B.: The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality. Educational Psychology Review 33, 937–958 (2021). https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2
6. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., Rezgui, Y.: Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. Automation in Construction 114, 103179 (2020). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179

Dalla mappa storica al sistema informativo digitale: approcci geomatici per la valorizzazione della *Tabula Chorographica Armenica*

Giulia Fiorini[1][0000-0002-1475-1556], Anna Sirinian[2][0000-0003-0540-7902], Francesco Citti[3][0000-0003-3167-8888], Gabriele Bitelli[1][0000-0002-6118-6000]

[1] Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Bologna, Italia, giulia.fiorini12, gabriele.bitelli@unibo.it
[2] Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Dipartimento di Storia Culture Civiltà, Bologna, Italia, anna.sirinian@unibo.it
[3] Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Dipartimento di Filologia Classica e Italianistica, Bologna, Italy, francesco.citti@unibo.it

Abstract. La *Tabula Chorographica Armenica*, realizzata nel 1691 e conservata presso la Biblioteca Universitaria di Bologna, costituisce una testimonianza cartografica e storica del patrimonio culturale armeno. Il documento raccoglie oltre ottocento rappresentazioni di luoghi religiosi e geografici, organizzate secondo criteri che non rispondono a una struttura cartografica metricamente coerente. Il contributo presenta l'approccio metodologico del progetto DARMAB, finalizzato alla costruzione di un sistema informativo digitale per l'integrazione e la valorizzazione dei contenuti della *Tabula*. La metodologia proposta combina strumenti GIS, cartografia storica e contemporanea, immagini satellitari e tecniche di documentazione tridimensionale, con l'obiettivo di collegare gli elementi rappresentati a informazioni geografiche, storiche, iconografiche e architettoniche. Particolare attenzione è rivolta alle criticità connesse all'identificazione e alla localizzazione geografica dei siti, alla diversa disponibilità delle fonti e alle differenti condizioni di conservazione del patrimonio documentato. L'integrazione di tali informazioni offre nuove prospettive per lo studio interdisciplinare e per lo sviluppo di modalità di consultazione interattiva, contribuendo alla conoscenza e alla valorizzazione digitale del patrimonio culturale armeno.

Parole chiave: *Tabula Chorographica Armenica,* Cartografia Storica, Patrimonio Culturale Digitale

1 Introduzione

La *Tabula Chorographica Armenica*, conservata presso la Biblioteca Universitaria di Bologna (BUB) come Rotulo 24 del Fondo Marsili, è un documento cartografico e storico di eccezionale rilevanza per lo studio del patrimonio culturale armeno. Realizzata a Costantinopoli nel 1691 da Eremia Č‘ēlēpi K‘ēōmiwrčean su richiesta del

conte bolognese Luigi Ferdinando Marsili e riscoperta nel 1991 grazie agli studi di Gabriella Uluhogian [1], la mappa è composta da sedici fogli di carta incollati su tela e raggiunge dimensioni monumentali (358 × 120 cm). Il manufatto raccoglie oltre ottocento rappresentazioni accompagnate da didascalie in lingua armena, relative principalmente a monasteri, chiese, eremi, santuari e luoghi di pellegrinaggio, nonché a elementi geografici ed eventi significativi della storia religiosa armena. La *Tabula* costituisce pertanto una testimonianza della distribuzione territoriale del patrimonio religioso armeno e, al contempo, una rappresentazione della sua identità storica e culturale [2].

Pur presentando un'organizzazione spaziale riconoscibile e numerosi riferimenti geografici identificabili, la *Tabula* non può essere interpretata come una rappresentazione cartografica metricamente coerente del territorio. La disposizione e le proporzioni degli elementi raffigurati non necessariamente rispettano le relative relazioni spaziali e metriche, ma rispondono anche a criteri storici, religiosi e simbolici. La rappresentazione conserva infatti una struttura geografica generale, nella quale sono riconoscibili importanti elementi naturali, quali il Mar Nero, il Mar Caspio, il lago di Van, il lago di Sevan e il monte Ararat, ma attribuisce particolare rilevanza ai luoghi di culto e alle sedi ecclesiastiche armene. Tale impostazione si riflette nell'impiego di colori, simboli e diverse soluzioni iconografiche per distinguere le quattro principali circoscrizioni ecclesiastiche (catholicosati) e per evidenziare l'importanza storica e religiosa dei singoli luoghi [1, 2].

Dal punto di vista geomatico, la compresenza di riferimenti geografici riconoscibili e convenzioni rappresentative non metriche rende metodologicamente inappropriata l'applicazione di una trasformazione geometrica globale finalizzata alla georeferenziazione dell'intero documento. La corrispondenza tra le posizioni raffigurate e quelle reali non può infatti essere considerata omogenea sull'intera superficie della mappa. Rimane tuttavia possibile procedere all'identificazione e alla localizzazione geografica dei singoli elementi mediante il confronto con la cartografia storica e attuale, con fonti documentarie e con dati geospaziali indipendenti. Tale approccio consente di mantenere inalterata la struttura rappresentativa originale della *Tabula*, associando progressivamente ai luoghi raffigurati informazioni territoriali e spaziali verificabili, pur tenendo conto delle incertezze connesse all'identificazione dei siti e alle trasformazioni intervenute nel corso del tempo.

In questo contesto si inserisce il progetto DARMAB (Digitization of the ARmenian MAp in Bologna), finalizzato alla costruzione di un ambiente digitale per lo studio, l'organizzazione e la fruizione integrata dei contenuti della *Tabula* [3]. L'obiettivo è sviluppare un sistema informativo capace di collegare i singoli elementi raffigurati a informazioni geografiche, storiche, iconografiche, testuali e tridimensionali, attraverso l'integrazione di fonti e metodologie differenti [4]. L'approccio proposto combina strumenti GIS, cartografia storica e attuale, immagini satellitari, tecniche di rilievo e modellazione 3D, adottando strategie differenziate in funzione dello stato di conservazione e della possibilità di identificazione dei siti. Il contributo presenta l'impostazione metodologica del progetto, con particolare attenzione alle problematiche di localizzazione geografica, all'eterogeneità delle fonti e alle potenzialità della loro

integrazione in un sistema digitale interrogabile, destinato alla ricerca interdisciplinare e alla valorizzazione del patrimonio culturale.

2 Il Progetto DARMAB

La metodologia proposta prevede l'organizzazione dei contenuti della *Tabula* attraverso un database geografico, nel quale associare ai singoli elementi rappresentati informazioni di diversa natura. Per ciascuna entità, l'apparato informativo può comprendere la trascrizione e traduzione delle didascalie originali, la localizzazione su cartografia storica e attuale, informazioni storico-architettoniche e religiose, documentazione iconografica e collegamenti a risorse digitali esterne, tra cui archivi e database relativi ai manoscritti conservati o prodotti nei monasteri.

Una delle principali criticità riguarda l'identificazione e la localizzazione geografica dei siti, la cui riconoscibilità attuale varia considerevolmente. Accanto a edifici tuttora esistenti si trovano strutture trasformate, complessi ridotti allo stato di rudere, monumenti scomparsi e luoghi ancora non identificati. L'individuazione delle possibili corrispondenze territoriali richiede pertanto il confronto tra le informazioni contenute nella *Tabula*, le fonti storiche, la cartografia di epoche differenti e i dati geografici contemporanei, tenendo conto delle trasformazioni del territorio e delle incertezze associate alle localizzazioni.

L'integrazione delle metodologie geomatiche comprende l'impiego di strumenti GIS per l'organizzazione e l'analisi delle informazioni spaziali, il confronto con cartografia storica e attuale e l'utilizzo di immagini satellitari. Il telerilevamento offre ulteriori possibilità di analisi del contesto geografico, attraverso la costruzione di livelli informativi utili alla caratterizzazione del paesaggio e al confronto multitemporale.

Un ulteriore ambito di applicazione riguarda la documentazione e la rappresentazione tridimensionale del patrimonio architettonico. Le strategie di acquisizione e modellazione variano in funzione dello stato di conservazione e della disponibilità delle fonti: per gli edifici esistenti possono essere impiegate tecniche fotogrammetriche e di scansione 3D, mentre per le strutture danneggiate, non accessibili o scomparse è possibile ricorrere a documentazione fotografica storica o amatoriale, planimetrie, sezioni architettoniche e risorse digitali già disponibili. L'integrazione di questi contenuti consente di associare alla documentazione cartografica rappresentazioni tridimensionali dei siti, contribuendo alla conoscenza e alla valorizzazione del patrimonio documentato.

3 Valorizzazione e prospettive future

L'integrazione delle informazioni associate ai singoli elementi della *Tabula* apre nuove possibilità per la consultazione e la valorizzazione del documento, sia in ambito scientifico sia nella fruizione pubblica. Il sistema informativo costituisce la base per lo sviluppo di strumenti di navigazione interattiva, attraverso i quali l'utente possa esplorare i contenuti della mappa e accedere alla documentazione relativa ai luoghi rappresentati. La consultazione potrà avvenire mediante interfacce digitali che

consentano di selezionare i singoli elementi, visualizzarne le informazioni associate e approfondirne la conoscenza attraverso il collegamento con il territorio e con le risorse documentarie disponibili.

Tali prospettive trovano applicazione anche nell'ambito della musealizzazione della *Tabula*, attualmente esposta presso il Museo Marsili della Biblioteca Universitaria di Bologna, dove l'originale viene periodicamente alternato a un facsimile per esigenze di conservazione. L'impiego di dispositivi mobili e schermi interattivi consente modalità di consultazione complementari all'osservazione diretta del manufatto, rendendo accessibili contenuti difficilmente interpretabili dalla sola lettura della rappresentazione originale. In particolare, la possibilità di visualizzare traduzioni, documentazione iconografica e modelli tridimensionali consente di approfondire la conoscenza dei monumenti rappresentati, anche quando oggi risultano danneggiati o scomparsi.

La realizzazione di un ambiente digitale interrogabile consente quindi di ampliare le modalità di accesso al patrimonio documentato dalla *Tabula*, favorendo una lettura integrata delle sue componenti storiche, geografiche e architettoniche. L'arricchimento progressivo dei contenuti offre inoltre nuove opportunità per la ricerca interdisciplinare e per la diffusione delle conoscenze relative al patrimonio culturale armeno.

4 Conclusioni

L'approccio proposto nell'ambito del progetto DARMAB evidenzia le potenzialità delle metodologie geomatiche per lo studio e la valorizzazione di documenti cartografici storici caratterizzati da rappresentazioni non metriche. L'integrazione di informazioni geografiche, storiche, iconografiche e tridimensionali consente di ampliare le possibilità di analisi del documento originale, mettendo in relazione i contenuti della *Tabula* con il territorio e le trasformazioni del patrimonio architettonico rappresentato. In questo contesto, la geomatica assume un ruolo che va oltre la restituzione e la rappresentazione spaziale, contribuendo all'organizzazione e all'interpretazione di informazioni provenienti da fonti eterogenee.

Le principali criticità metodologiche riguardano la disponibilità e l'affidabilità della documentazione, le difficoltà di identificazione e localizzazione geografica dei siti e le differenti condizioni di conservazione del patrimonio. La varietà delle situazioni documentate richiede approcci differenziati, capaci di integrare dati di natura e qualità diverse, mantenendo esplicite le incertezze associate alle informazioni disponibili. Particolare attenzione deve essere rivolta alla validazione e all'armonizzazione delle fonti, affinché la loro integrazione non comprometta l'attendibilità delle interpretazioni e delle rappresentazioni prodotte.

Le prospettive di sviluppo del progetto riguardano il progressivo arricchimento del sistema informativo e l'approfondimento delle possibilità offerte dall'integrazione tra dati geografici, documentazione storica e rappresentazioni tridimensionali. La costruzione di un ambiente digitale interrogabile costituisce così un'opportunità per favorire la ricerca interdisciplinare e sviluppare nuove modalità di accesso e interpretazione del patrimonio culturale armeno. L'approccio metodologico delineato può inoltre costituire un riferimento per iniziative analoghe dedicate alla valorizzazione

di documenti cartografici storici nei quali la componente geografica si intreccia con contenuti simbolici, culturali e documentari.

Ringraziamenti

Si ringraziano per il prezioso contributo, nell'ambito della tesi di laurea magistrale, Yara Jamil Mohammad Alkhatib e Arezoo Abbaszadeh.

Riferimenti bibliografici

1. Uluhogian, G.: Un'antica mappa dell'Armenia. Monasteri e santuari dal I al XVII secolo. Longo Editore, Ravenna (2000).
2. Uluhogian, G.: Monasteri e santuari nella Mappa di Eremia Çelebi Kēōmiwrčean (1691): una testimonianza della spiritualità armena. In: La spiritualità armena nei secoli X–XII, pp. 103–123. Congregazione Armena Mechitarista, Venezia (2004).
3. Fiorini, G., Alkhatib, Y., Sirinian, A., Citti, F., Bitelli, G.: *Tabula Chorographica Armenica*: a thematic map that tells a story. In: Tsorlini, A., Boutoura, C. (eds.), 18th ICA Conference Digital Approaches to Cartographic Heritage: Conference Proceedings, p. 197. AUTH CartoGeoLab, Thessaloniki (2024).
4. Gede, M.: Fast georeferencing/geocoding tool for old maps with large distortions. Abstracts of the International Cartographic Association, 1, 92 (2019).

SplatTwin: ricostruzione genAI georiferita di aree geografiche da voli drone

Emanuele Flebus[1], Giovanni Lughi[1], Stefano Olivucci[2], Marco Pesic[1], Matteo Roffilli[1]
[1] Bioretics srl, [e.flebus, m.pesic, g.lughi, m.roffilli]@bioretics.com
[2] Regione Emilia-Romagna, Stefano.Olivucci@regione.emilia-romagna.it

Abstract. La ricostruzione digitale fotorealistica e numericamente adeguata a scopi professionali di ampie aree geografiche viene solitamente ottenuta da voli droni o aerei dotati di tecnologie di scansioni laser come il LiDar. Quale estensione di un precedente lavoro presentato sempre ad Asita [1] proponiamo l'utilizzo di tecniche innovative di Intelligenza Artificiale Generativa quali NeRF, 2DGS, e 3DGS, per la creazione di digital twin di strutture quali ponti, argini, elettrodotti, impianti fotovoltaici, ospedali, fino a porzioni di territori o città, a partire unicamente da un insieme di fotografie o video, anche quando acquisiti con tecnologie amatoriali. La pipeline proposta, denominata SplatTwin, georeferenzia automaticamente i modelli a partire dalla telemetria del drone e li pubblica come 3D Tiles consultabili e misurabili via browser, mantenendo il dato sorgente all'interno dell'infrastruttura dell'ente.

Parole chiave: digital-twin, gemello digitale, volo drone, 3D Gaussian Splatting , Cesium, territorio.

1. Introduzione

La disponibilità di gemelli digitali tridimensionali, fotorealistici e metricamente affidabili del territorio è ormai un requisito ricorrente per la pianificazione, il monitoraggio delle infrastrutture e la gestione delle emergenze. Le tecniche consolidate di rilievo LiDAR da aeromobile o drone garantiscono accuratezze elevate ma richiedono sensori dedicati, personale specializzato e tempi di elaborazione che si misurano in giorni. Le tecniche di Intelligenza Artificiale Generativa (GenAI) per la ricostruzione di campi di radianza, dai NeRF [2,3] fino al 2D e 3D Gaussian Splatting [4,5], hanno dimostrato che una ricostruzione fotorealistica e geometricamente coerente è ottenibile a partire da un semplice video, anche amatoriale. Quale estensione del lavoro presentato ad ASITA 2024, questo contributo presenta SplatTwin, una pipeline end-to-end che da un singolo video di volo drone con traccia GPS accessoria produce in pochi minuti un modello 3D in scala metrica assoluta, correttamente posizionato e orientato sul globo, e lo pubblica automaticamente in formati standard per la fruizione via browser e l'integrazione nei GIS. Quando priva dei dati GPS la pipeline produce

comunque un modello geometricamente corretto ma senza il dimensionamento e posizionamento assoluto.

Rispetto al lavoro precedente, i contributi principali sono quattro: (i) la ricostruzione è affidata a un'implementazione del 3D Gaussian Splatting basata sulla libreria open-source gsplat [8], che a parità di qualità finale riduce sensibilmente i tempi di addestramento e consente il rendering in tempo reale; (ii) la georeferenziazione dei modelli è completamente automatica, a partire dalla sola telemetria registrata dal drone; (iii) la pubblicazione come 3D Tiles [7] su globo virtuale è integrata nella pipeline; (iv) l'approccio è validato su casi reali eterogenei: monumenti urbani, versanti montani e aree alluvionate. Il caso d'uso che meglio ne illustra l'utilità è proprio quello emergenziale: la Figura 1 mostra il modello georiferito della rottura dell'argine di Traversara ricostruito dal solo video di sorvolo fornito dalla Regione Emilia-Romagna, quando la tempestività della valutazione può fare la differenza.



Fig. 1. Modello 3D point cloud della rottura dell'argine di Traversara (Bagnacavallo, Ravenna, 2024) sul fiume Montone da video di volo drone fornito dalla Regione Emilia-Romagna.

2. La pipeline SplatTwin

La pipeline di elaborazione è articolata in stadi eseguiti in sequenza senza intervento manuale: (1) estrazione e preprocessamento dei fotogrammi dal video; (2) stima delle pose di camera e di una nuvola sparsa mediante Structure-from-Motion (COLMAP) con bundle adjustment; (3) addestramento del modello neurale di scena, mediante backend NeRF accelerato con hash encoding o 3D Gaussian Splatting implementato con gsplat [8]; (4) esportazione di una nuvola di punti densa (o degli splat stessi) e dei rendering; (5) georeferenziazione automatica mediante traccia GPS (Sezione 3); (6) pubblicazione come file semplice o online in 3D Tiles (Sezione 4). I modelli sono esportabili nei comuni formati già in uso per utilizzi tecnici e di video-produzione:

nuvole di punti .las\.ply, mesh, video di sorvolo sintetici e, per gli splat, i formati nativi delle librerie di rendering.

I tempi di elaborazione sono compatibili con scenari operativi: ad esempio sulla scena campione della statua di Piazza Cavour in Ancona (Figura 2) con 121 fotogrammi registrati l'intera pipeline, dall'ingestione del video al modello georiferito pronto per la pubblicazione, si completa in circa 25 minuti su una workstation dotata di una singola GPU commerciale (NVIDIA RTX 5070). La stessa pipeline inoltre è installata in versione prototipale sul cluster di calcolo Margherita di Regione Emilia-Romagna per l'elaborazione massiva e concorrente di più flussi video.

3. Georeferenziazione metrica automatica

I modelli prodotti dalla Structure-from-Motion sono definiti a meno di una similitudine: scala, orientamento e posizione assoluti sono indeterminati. SplatTwin li stima automaticamente dalla telemetria del volo, senza punti di appoggio a terra. La traccia GPS è estratta dai formati più diffusi quali sottotitoli SRT dei droni DJI, tracce GPX e NMEA, flight record binari delle app di volo e sincronizzata temporalmente con i fotogrammi; per le sorgenti prive di sincronizzazione nativa l'offset temporale è stimato per ricerca esaustiva, minimizzando il residuo di allineamento. Un allineamento di similarità robusto (stima di Umeyama [6] con reiezione iterativa degli outlier) fra la traiettoria delle camere e la traccia GPS proiettata in un riferimento locale ENU restituisce la trasformazione completa del modello in coordinate metriche.

Per la componente altimetrica la quota GNSS è riportata dall'altezza sul livello medio del mare all'altezza ellissoidi ca WGS84 mediante il modello di geoide EGM96; quando il dato altimetrico di bordo risulta inaffidabile, eventualità riscontrata su alcuni firmware, la quota del modello viene agganciata automaticamente al modello digitale del terreno. La nuvola densa viene infine ripulita (rimozione degli artefatti di cielo e degli outlier statistici, tipicamente il 25–30% dei punti esportati) ed esportata in formato .las georiferito, corredata di un file di metadati con tutte le trasformazioni applicate.

Sui voli di test l'allineamento converge con residui mediani di 0,15 m su traiettorie di 60–100 m, pari allo 0,2–0,3% dell'estensione del rilievo, con il 100% dei fotogrammi classificati inlier: l'errore di scala del modello risulta quindi dell'ordine del 1%. La precisione relativa delle misure effettuate sul modello (distanze, aree) è tipicamente del 1–2%, verificata confrontando elementi noti della scena con le ortofoto; l'accuratezza assoluta di posizionamento resta invece limitata dal ricevitore GNSS di bordo (1–3 m in planimetria per i droni consumer), migliorabile in prospettiva con punti di appoggio o ricevitori RTK. Sono in corso studi più approfonditi per misurare con maggior precisione gli errori di misura e posizionamento assoluti.

4. Pubblicazione: 3D Tiles e Cesium ion

Il modello georiferito viene anche pubblicato automaticamente come 3D Tiles [7], lo standard OGC per lo streaming di contenuti 3D geospaziali. In questa fase la piattaforma cloud Cesium ion svolge il ruolo di canale di stoccaggio e distribuzione: la pipeline carica la nuvola .las (o la mesh) con la posizione geografica calcolata, il servizio esegue il tiling e il modello risulta immediatamente consultabile e misurabile via browser, correttamente posizionato su terreno e ortofoto, affiancabile agli altri strati informativi di un qualunque client CesiumJS. Lo stesso flusso è integrabile con le infrastrutture di dati territoriali esistenti, a partire dal Geoportale della Regione Emilia-Romagna [9], che già espone i propri strati secondo standard OGC.

Cesium ion non è però soltanto un canale di distribuzione: la piattaforma offre a sua volta un servizio di ricostruzione e tiling 3D Gaussian Splatting a partire dalle immagini. È quindi naturale confrontare il risultato del servizio cloud con quello della nostra implementazione locale. Le Figure 2 e 3 mostrano il confronto sul rilievo della statua di Piazza Cavour in Ancona: la qualità visiva dei due risultati è molto simile; la differenza sostanziale è nei tempi e nel controllo del processo, con SplatTwin che completa la ricostruzione in circa 25 minuti su GPU commerciale mentre il servizio cloud richiede tempi sensibilmente maggiori, dipendenti dalla coda del servizio e non controllabili dall'utente. Sono in corso studi più approfonditi per misurare in dettaglio le differenze di risultato visuale mediante metriche oggettive.

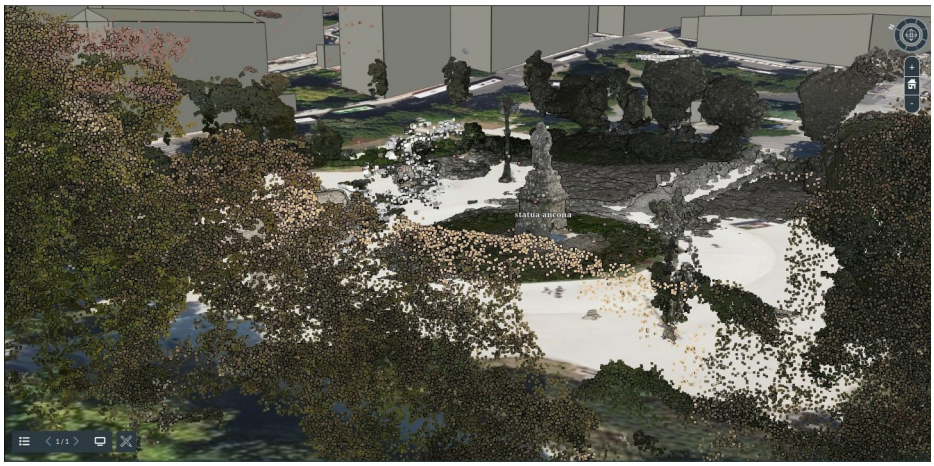


Fig. 2. Nuvola di punti georiferita della statua di Piazza Cavour (Ancona) pubblicata come 3D Tiles su Cesium ion e visualizzata sul globo virtuale, correttamente posizionata e in scala rispetto a ortofoto, terreno ed edifici OSM.

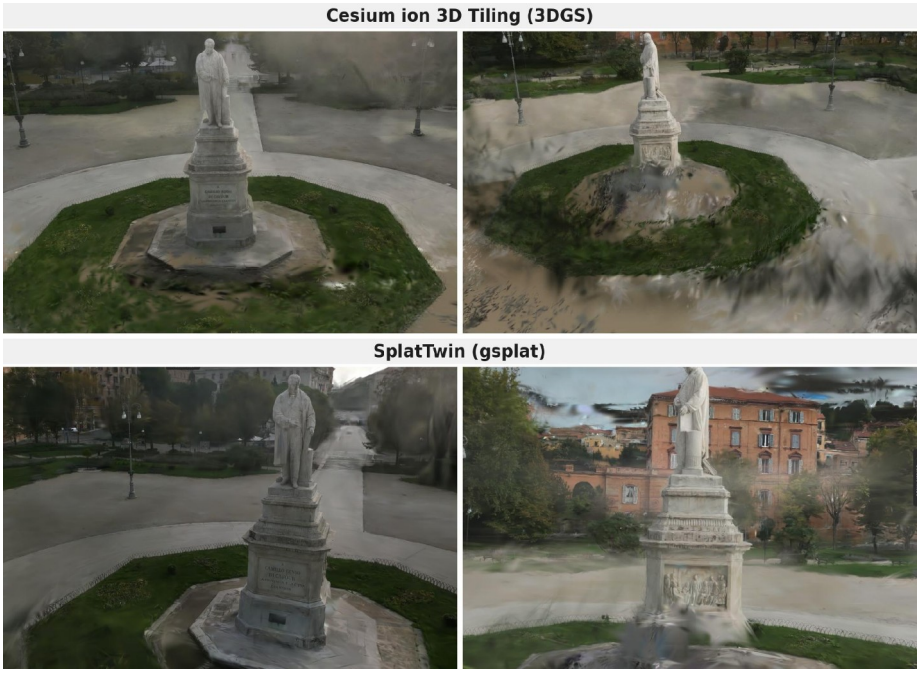


Fig. 3. Confronto qualitativo sul rilievo della statua: tiling 3D Gaussian Splatting di Cesium ion in qualità alta (in alto) e rendering dell'implementazione SplatTwin basata sulla libreria gsplat (in basso), vista frontale e laterale. I risultati visuali sono molto simili a livello qualitativo.

Un secondo elemento di valutazione è la titolarità del dato. I termini di servizio di Cesium ion (sez. 2.6, License & Warranty to Cesium) [10] prevedono che l'utente conceda a Cesium una licenza non esclusiva, mondiale, trasferibile e sub-licenziabile per usare, copiare, modificare, trasformare, distribuire e memorizzare i dati caricati e i prodotti derivati, anche al fine di migliorare i servizi della piattaforma. Con SplatTwin l'intera elaborazione dal video sorgente al modello georiferito avviene all'interno dell'infrastruttura dell'ente (workstation locale o cluster Margherita): il proprietario mantiene la sovranità sul proprio dato che non abbandona mai il perimetro di proprietà. Infatti la pubblicazione su piattaforme esterne è un passo finale opzionale, limitato ai soli prodotti derivati che si desidera effettivamente distribuire.

5. Casi di studio

L'approccio è stato validato su scenari volutamente eterogenei per scala e contenuto. Oltre al già citato caso della statua di Piazza Cavour ad Ancona (Figure 2 e 3) con 5 milioni di punti esportati, ridotti a 3,5 milioni dopo la pulizia automatica.

La Figura 4 mostra appunto il rendering di una frana nell'Appennino Romagnolo, generato dal modello addestrato su un volo drone.



Fig. 4. Esempio di rendering grafico 3D ad alta risoluzione rappresentante la porzione di una frana nell'Appennino Romagnolo: immagine generata tramite genAI a partire da un volo drone.

Alla scala del singolo monumento, la Figura 5 mostra invece la nuvola di punti della scultura “Bimba sull'altalena” nel centro storico di Cesena (FC): strutture sottili come le corde dell'altalena e la vegetazione circostante vengono ricostruite correttamente, confermando l'idoneità del metodo alla documentazione del patrimonio urbano. Alla scala territoriale, la Figura 6 mostra la ricostruzione di un rilievo montano a partire da un volo relativo all'estate 2026: la morfologia del crinale e le variazioni di copertura del versante risultano leggibili nonostante l'assenza di strutture antropiche di riferimento.

La Figura 7 torna sul tema emergenziale con la nuvola di punti dell'abitato di Faenza (RA) colpito dall'alluvione, ricostruita dalle riprese effettuate durante l'evento: edifici, corso d'acqua e aree esondate sono distinguibili e misurabili, a conferma che anche riprese non pianificate e in condizioni operative difficili costituiscono una sorgente dati sufficiente per una prima valutazione quantitativa del danno.



Fig. 5. Nuvola di punti della scultura Bimba sull'altalena (Cesena): le strutture sottili dell'altalena e il contesto murario sono ricostruiti correttamente da un breve video ravvicinato.

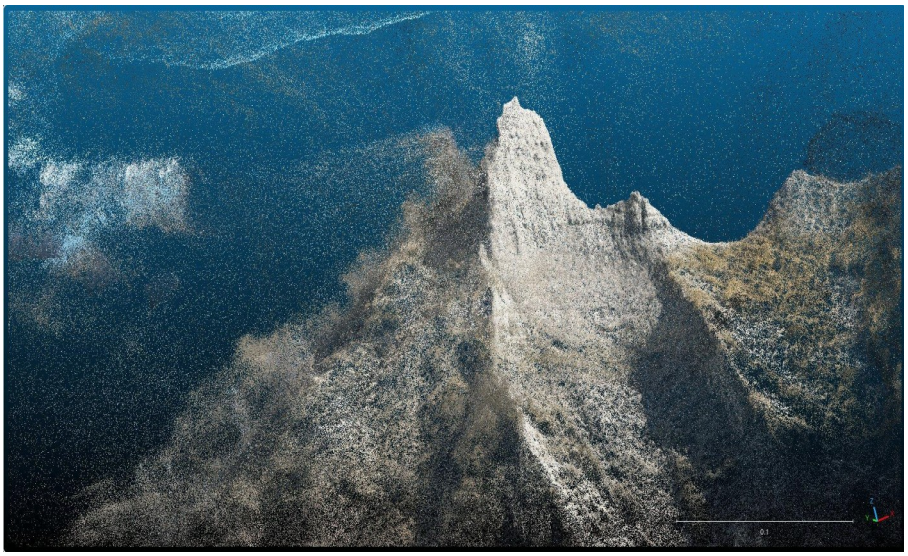


Fig. 6. Ricostruzione di un rilievo montano da volo drone: la morfologia del crinale è leggibile anche in assenza di riferimenti antropici.

Infine, un caso dedicato alle infrastrutture: il portale di una galleria ferroviaria nei pressi di Brisighella (RA), ostruito da un movimento franoso. Dal video di ispezione sono stati estratti 92 fotogrammi full HD (1920×1080); l'addestramento NeRF, 20.000 iterazioni, si completa in 14 minuti su una RTX 5070 e in 18 minuti su una RTX 3070 Super: l'intera pipeline resta quindi praticabile anche su GPU commerciali di generazione precedente. La Figura 8 affianca un fotogramma del rendering NeRF alla

nuvola di punti georiferita: portale, corpo di frana e versante sono documentati con dettaglio sufficiente per una prima valutazione dello stato dell'opera, senza accesso diretto all'area.



Fig. 7. Nuvola di punti dell'abitato di Faenza colpito dall'alluvione, ricostruita dalle riprese effettuate durante l'emergenza: aree esondate ed edifici sono distinguibili e misurabili.



Fig. 8. Galleria ferroviaria presso Brisighella (RA): rendering NeRF e nuvola di punti georiferita, da 92 fotogrammi full HD; addestramento NeRF di 20.000 iterazioni in 18 minuti (RTX 3070 Super), 14 minuti (RTX 5070) e 7,5 minuti (RTX4090).

6. Utilità per l'utilizzatore

Dal punto di vista dell'utilizzatore finale, per il tecnico di un ente territoriale, di una protezione civile o di uno studio professionale i vantaggi operativi sono concreti: (i) non servono sensori dedicati né missioni di rilievo pianificate: è sufficiente un video di drone, anche amatoriale o di repertorio; (ii) il modello è pronto in decine di minuti su hardware commerciale, non in giorni; (iii) la fruizione avviene nel browser, senza software specialistico: il modello è navigabile e misurabile direttamente sul globo virtuale, sovrapposto a terreno, ortofoto ed edificato; (iv) il dato resta sotto il controllo dell'ente, requisito spesso vincolante per le pubbliche amministrazioni; (v) i modelli georiferiti sono riutilizzabili nei flussi GIS esistenti tramite i formati standard .las e 3D Tiles.

7. Conclusioni

Abbiamo presentato SplatTwin, una pipeline completa che trasforma un video di volo drone in un gemello digitale georiferito, pubblicato automaticamente come 3D Tiles e consultabile via browser. La combinazione di 3D Gaussian Splatting su libreria gsplat, georeferenziazione automatica dalla telemetria e pubblicazione integrata porta i tempi complessivi a circa 25 minuti su GPU commerciale, con errori di scala dell'ordine del 1% e precisione relativa delle misure del 1–2%. I casi di studio di monumenti urbani, versanti montani e aree alluvionate confermano l'applicabilità del metodo a contesti molto diversi, con particolare valore nei contesti dinamici ed emergenziali. Gli sviluppi futuri riguardano il miglioramento dell'accuratezza assoluta tramite punti di appoggio e ricevitori RTK, lo streaming diretto degli splat con livelli di dettaglio, e l'integrazione sistematica dei modelli prodotti nelle infrastrutture di dati territoriali regionali. Sono in corso studi mirati per misurare con precisione la resa visuale, geometrica e di georeferenziazione del metodo proposto.

Riferimenti bibliografici

1. Pesic, M., Lughi, G., and Roffilli, M.: Intelligenza Artificiale Generativa per Digital Twin Urbanistico partecipato, ASITA 2024
2. Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., and Ng, R.: NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. ECCV 2020, arXiv:2003.08934.
3. Mazzacca, G., Karami, A., Rigon, S., Farella, E. M., Trybala, P., and Remondino, F.: NERF for heritage 3D reconstruction. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLVIII-M-2-2023, 1051-1058 (2023).

4. Huang, B., Yu, Z., Chen, A., Geiger, A., and Gao, S.: 2D Gaussian Splatting for Geometrically Accurate Radiance Fields. arXiv:2403.17888 (2024).
5. Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkühler, T., and Drettakis, G.: 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. ACM Trans. Graph. 42(4), 139 (2023).
6. Umeyama, S.: Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 13(4), 376–380 (1991).
7. Open Geospatial Consortium: 3D Tiles Specification 1.1, OGC 22-025r4 (2023).
8. Ye, V., Li, R., Kerr, J., Turkulainen, M., Yi, B., Pan, Z., Seiskari, O., Ye, J., Hu, J., Tancik, M., and Kanazawa, A.: gsplat: An Open-Source Library for Gaussian Splatting. Journal of Machine Learning Research 26(34), 1–17 (2025).
9. Regione Emilia-Romagna: Geoportale l'infrastruttura regionale dei dati territoriali. https://geoportale.regione.emilia-romagna.it (consultato ottobre 2026).

Confronto e analisi di sistemi SLAM per il rilievo 3D del patrimonio costruito: il caso della Certosa di Bologna

Anna Forte, Valentina Alena Girelli, Emanuele Mandanici, Maria Alessandra Tini
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna

Abstract. Il contributo confronta due sistemi LiDAR dinamici SLAM, Stonex X120GO e Z+F FlexScan 22, con un rilievo TLS Leica RTC360 della Sala della Pietà alla Certosa di Bologna. Distanze C2C, roughness e densità su superfici omologhe sono analizzate insieme ai tempi di acquisizione e ad altri aspetti operativi. Z+F mostra maggiore accordo con il TLS rispetto a X120GO, mentre il dato statico conserva il campionamento più denso nelle aree esaminate.

Parole chiave: LiDAR, SLAM, TLS, patrimonio culturale, Certosa.

1 Introduzione

La documentazione tridimensionale degli edifici storici richiede la selezione di tecniche di acquisizione coerenti con la complessità geometrica degli spazi, la scala di rappresentazione e le finalità conoscitive e conservative del rilievo [1]. La qualità della documentazione dipende, infatti, dalla capacità dei dati acquisiti di rappresentare le superfici, preservandone sia la continuità geometrica sia i dettagli ritenuti significativi. Il Terrestrial Laser Scanning (TLS) opera mediante acquisizioni effettuate da stazioni fisse e richiede la successiva registrazione delle singole scansioni in un unico sistema di riferimento. I sistemi LiDAR dinamici basati su Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) stimano invece, contestualmente all'acquisizione della nuvola di punti, la posizione e l'orientamento del sensore e ricostruiscono la geometria dell'ambiente durante il movimento dell'operatore. La rapidità di acquisizione e la flessibilità operativa ne favoriscono l'impiego in ambienti estesi, complessi o di difficile accesso [2]. La qualità della ricostruzione può tuttavia risentire della configurazione geometrica dello spazio, delle caratteristiche della traiettoria e della robustezza della soluzione di localizzazione [3]. La valutazione dei dati acquisiti mediante sistemi SLAM non può pertanto limitarsi alla sola concordanza geometrica tra le nuvole di punti, ma deve considerarne anche il contenuto informativo, attraverso parametri come la densità dei punti e la rumorosità locale delle superfici [4]. Tali indicatori consentono di valutare la qualità con cui vengono documentate le caratteristiche locali delle superfici. Il presente lavoro applica questo approccio comparato alla Sala della Pietà, presso il cimitero monumentale della Certosa di Bologna, confrontando le nuvole di punti acquisite con due sistemi LiDAR dinamici SLAM con un rilievo TLS assunto come riferimento.

2 Materiali e metodi

Il caso di studio è costituito dalla Sala della Pietà, situata all'interno del cimitero monumentale della Certosa di Bologna (Fig. 1) [5]. La complessa articolazione architettonica dell'ambiente, caratterizzato da uno spazio ipogeo collegato al livello superiore mediante una scalinata, offre un contesto significativo per esaminare la continuità della ricostruzione tridimensionale, la copertura delle acquisizioni e la capacità di rappresentare i dettagli. La compresenza di ambienti posti alla quota del suolo e di spazi ipogei costituisce una configurazione ricorrente nei complessi cimiteriali, soprattutto in quelli di carattere monumentale, e può introdurre specifiche criticità nelle attività di rilievo. I collegamenti verticali, le variazioni di quota, gli spazi confinati e la complessità dei percorsi possono infatti influire sia sulla pianificazione delle acquisizioni sia sulla continuità delle traiettorie rilevate mediante sistemi dinamici. I cimiteri monumentali sono inoltre spesso contraddistinti da una notevole estensione spaziale e dalla compresenza di elementi architettonici, decorativi, scultorei e pittorici. Tale eterogeneità rende questa tipologia di patrimonio culturale particolarmente significativa, ma al tempo stesso complessa dal punto di vista della documentazione tridimensionale, poiché richiede tecniche capaci di combinare rapidità operativa, continuità del rilievo e adeguata rappresentazione delle geometrie e dei dettagli. L'analisi è stata circoscritta alla porzione della sala comune alle tre acquisizioni, in modo da condurre i confronti su superfici di estensione comparabile.



Fig. 1. La Sala della Pietà nel complesso monumentale della Certosa di Bologna. Crediti dell'immagine: Comune di Bologna [5].

Le acquisizioni dinamiche sono state eseguite con Stonex X120GO, caratterizzato da un'accuratezza relativa nominale fino a 6 mm, una portata di 0,5–120 m e una frequenza di acquisizione di 320.000 punti/s [6], e con Z+F FlexScan 22, equipaggiato con sensore Z+F IMAGER 5024 SUPREME, per il quale sono dichiarati un errore di linearità nella misura della distanza ≤ 1 mm + 10 ppm, una portata di 0,3–365 m e una frequenza massima di circa 2,2 milioni di punti/s [7]. Il rilievo statico di riferimento è stato realizzato con Leica RTC360, con accuratezza nominale del punto 3D di 1,9 mm a 10 m, portata di 0,5–130 m e frequenza fino a 2 milioni di punti/s [8]. Il TLS ha richiesto circa 3 ore per 25 stazioni, mentre ciascun rilievo dinamico è durato circa 30 min. Per i sistemi SLAM sono stati eseguiti percorsi ad anello, finalizzati alla chiusura delle traiettorie (*loop closure*), e passaggi ripetuti nelle stesse aree, per aumentare la ridondanza delle osservazioni. Le stazioni TLS sono state distribuite assicurando sovrapposizioni adeguate, con particolare attenzione alla scalinata di collegamento con lo spazio ipogeo.

I dati sono stati elaborati con i software proprietari associati ai rispettivi strumenti. Le scansioni TLS sono state registrate in Cyclone REGISTER 360, ottenendo un residuo cloud-to-cloud medio di 0,002 m e una nuvola complessiva di 638.625.620 punti. I dati Stonex sono stati elaborati in GOpost mediante calcolo e ottimizzazione della traiettoria, generazione della nuvola e texturizzazione; il dataset risultante comprende 50.882.359 punti. La nuvola Z+F, elaborata in Z+F LaserControl, contiene 84.926.302 punti. Questi conteggi dipendono anche dalla frequenza di acquisizione, dalla durata e dalla geometria del percorso e dalle elaborazioni applicate. Il confronto è stato pertanto integrato con indicatori calcolati su aree omologhe estratte dalle nuvole complessive.



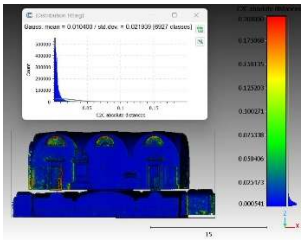
Fig. 2. Nuvole di punti acquisite con Leica RTC360 (a), Stonex X120GO (b) e Z+F FlexScan 22 (c).

2.1 Confronto tra i dati

Per rendere confrontabili i tre dataset, le nuvole di punti sono state registrate in un sistema di riferimento comune mediante allineamento rigido basato sull'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). È stata quindi individuata la medesima regione di interesse, rimuovendo manualmente le porzioni non comuni dovute alle differenti geometrie di acquisizione e alle occlusioni. Le analisi sono state eseguite in CloudCompare, assumendo la nuvola TLS come riferimento di maggiore affidabilità metrica e considerando il suo residuo di registrazione nell'interpretazione degli scarti.

- **Distanze cloud-to-cloud (C2C).** Per ciascun punto della nuvola confrontata è stata calcolata la distanza euclidea dal punto più vicino della nuvola di riferimento. Sono stati eseguiti i confronti X120GO–Z+F, X120GO–TLS e Z+F–TLS, riportando media, deviazione standard e mappe degli scarti nella Tabella 1. Nel primo confronto il riferimento è la nuvola Z+F; negli altri due è la nuvola TLS.
- **Roughness.** La roughness è stata calcolata come distanza assoluta dal piano locale stimato entro un intorno sferico [9], utilizzando raggi di 0,05 m. I valori medi ottenuti sono pari rispettivamente a 0,002 m, 0,0006 m e 0,0006 m.
- **Densità.** La densità areale è stata determinata come rapporto tra il numero di punti e l'area sul piano locale di ciascuna porzione. Il confronto è stato condotto su porzioni omologhe quasi planari di pavimento, parete e volta, di circa 4,5 m² ciascuna, selezionate nelle tre nuvole in modo da riferirsi alle medesime superfici fisiche, con limiti di ritaglio ed estensione quanto più possibile coincidenti. È stata inoltre calcolata l'interdistanza media tridimensionale dal vicino più prossimo all'interno di ciascun ritaglio, escludendo il punto stesso. I risultati sono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 1. Distanze C2C e mappe degli scarti

Confronto	Mappe C2C	Media [m]	Dev. std. [m]
X120GO–Z+F		0,010	0,022

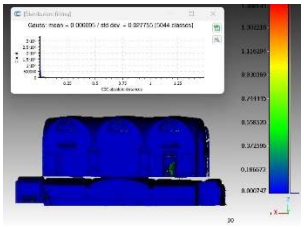
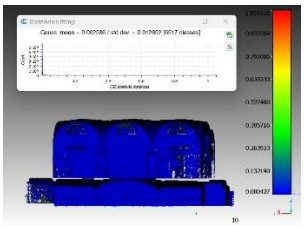
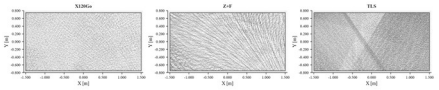
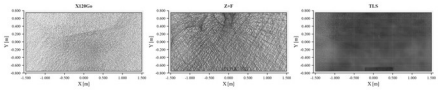
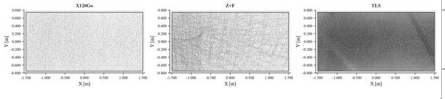
Confronto	Mappe C2C	Media [m]	Dev. std. [m]
X120GO–TLS		0,006	0,028
Z+F–TLS		0,003	0,013

Tabella 2. Densità e interdistanza media nelle tre porzioni omologhe, di circa 4,5 m² ciascuna.

Superficie e ritagli omologhi	Densità [punti/cm²]	Interdistanza media [m]
Pavimento	X120GO 5,320	X120GO 0,003
	Z+F 8,134	Z+F 0,002
	TLS 13,195	TLS 0,002
Parete	X120GO 13,170	X120GO 0,002
	Z+F 27,809	Z+F 0,001
	TLS 94,510	TLS 0,001
Volta / soffitto	X120GO 3,171	X120GO 0,003
	Z+F 7,184	Z+F 0,002
	TLS 40,628	TLS 0,002

3 Discussione

Il confronto mostra un maggiore accordo geometrico di Z+F con il riferimento TLS: dopo la registrazione ICP, la distanza media è di circa 3 mm, contro 6 mm per X120GO, con deviazioni standard rispettivamente di circa 13 e 28 mm. Questi valori esprimono

l'accordo residuo fra superfici campionate e registrate, senza misurare l'accuratezza assoluta dei sistemi. Z+F presenta una densità circa 1,5 volte quella di X120GO sul pavimento e oltre doppia su parete e volta. Sulla volta raggiunge il 18% della densità TLS, contro l'8% di X120GO: il divario può motivare verifiche della leggibilità dei dettagli superiori ed eventuali integrazioni statiche.

Sul piano operativo, entrambi i sistemi dinamici hanno ridotto a un sesto il tempo di acquisizione rispetto al TLS. Nel caso esaminato, la portabilità operativa, intesa come facilità di spostamento e continuità dell'acquisizione, risulta limitata per il TLS su treppiede, buona per Z+F e ottima per X120GO palmare. Il trasferimento e il posizionamento delle stazioni statiche richiedono maggiore impegno, soprattutto lungo la scalinata; FlexScan 22 permette l'acquisizione continua, mentre il palmare facilita i passaggi negli spazi confinati. Tale vantaggio richiede comunque traiettorie controllate, chiusure e verifiche geometriche. Per le configurazioni considerate, il confronto qualitativo dei costi d'acquisto colloca X120GO nella fascia più contenuta, Z+F in quella intermedia e il TLS in quella più elevata. Questa valutazione della dotazione va distinta dal costo complessivo del rilievo, che comprende anche licenze, risorse di calcolo e lavoro di elaborazione e controllo. I dati SLAM richiedono ricostruzione e verifica delle traiettorie, filtraggio e texturizzazione; il TLS comporta la registrazione delle stazioni e la gestione di una nuvola più numerosa.

4 Conclusioni

L'esperienza nella Sala della Pietà evidenzia compromessi differenti fra qualità geometrica del dato, campionamento, portabilità e investimento strumentale. Entrambi i sistemi dinamici riducono i tempi di acquisizione; fra essi, Z+F restituisce il maggiore accordo residuo con il TLS e il campionamento più denso nelle aree esaminate, mentre X120GO offre maggiore maneggevolezza e un costo d'acquisto più contenuto. Il TLS conserva il ruolo di riferimento metrico e la maggiore densità locale. La valutazione resta riferita al caso studio, alle superfici campione e alle condizioni di acquisizione ed elaborazione adottate.

Per la documentazione del patrimonio costruito, una strategia integrata può associare al rilievo dinamico dell'insieme scansioni statiche di controllo e approfondimento, selezionate in funzione delle tolleranze geometriche e del dettaglio richiesti. Gli sviluppi futuri dovranno comprendere acquisizioni ripetute, più aree campione, e verifica con riferimento esterno e indipendente della accuratezza metrica dei tre sistemi. Un confronto esteso all'intero processo consentirà di definire con maggiore precisione quando rapidità e portabilità compensino le differenze nel campionamento e in quali contesti possa essere necessaria un'integrazione con sistemi statici.

Riferimenti bibliografici

1. Remondino, F.: Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing 3(6), 1104–1138 (2011). https://doi.org/10.3390/rs3061104.

2. Bitelli, G.; Forte, A.; Mandanici, E.: SLAM Mobile Mapping for Complex Archaeological Environments: Integrated Above–Below-Ground Surveying. Geomatics 6, 31 (2026). https://doi.org/10.3390/geomatics6020031
3. Sammartano, G., Spanò, A.: Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. Applied Geomatics 10, 317–339 (2018). https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7.
4. Conti, A., Pagliaricci, G., Bonora, V., Tucci, G.: A comparison between terrestrial laser scanning and hand-held mobile mapping for the documentation of built heritage. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-2/W4-2024, 141–147 (2024). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-141-2024.
5. Storia e Memoria di Bologna: La Certosa. https://www.storiaememoriadibologna.it/la-certosa (ultima consultazione: ottobre 2026).
6. Stonex: X120GO. Specifiche tecniche dei sistemi SLAM. https://getintouch.stonex.it/wp-content/uploads/2025/03/Stonex_SLAM_Specifiche-tecniche.pdf (ultima consultazione: ottobre 2026).
7. Zoller + Fröhlich: Z+F FlexScan 22 e IMAGER 5024 SUPREME. Schede del produttore. https://www.zofre.de/en/laser-scanners/3d-laser-scanner/z-f-flexscan-22; https://www.zofre.de/en/laser-scanners/3d-laser-scanner/z-f-imagerr-5024s-1 (ultima consultazione: ottobre 2026).
8. Leica Geosystems: Leica RTC360 3D Laser Scanner. Scheda del produttore. https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360 (ultima consultazione: ottobre 2026).
9. CloudCompare: Roughness. Documentazione ufficiale. https://cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Roughness (ultima consultazione: ottobre 2026).

Sviluppo di percorsi di pellegrinaggio urbano in ambiente GIS: Il caso delle effigi mariane a Bologna

Anna Forte*, Veronica Montanari, Valentina Alena Girelli*

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna

Abstract. Il contributo presenta un'esperienza di documentazione e valorizzazione delle effigi mariane urbane di Bologna mediante tecnologie GIS e Mobile GIS. Le oltre cento testimonianze devozionali censite e georeferenziate sono state raccolte in un database tematico che ha permesso la definizione di tre proposte di itinerari urbani dedicati alla scoperta di questo patrimonio diffuso. Il caso di studio evidenzia il contributo della geomatica alla conoscenza e alla fruizione del patrimonio devozionale.

Parole chiave: GIS; patrimonio culturale urbano; icone mariane; QField

1 Introduzione

La città di Bologna conserva ancora oggi l'impronta del proprio nucleo medievale, che ne definisce in modo inconfondibile l'estetica e la morfologia urbana. Tra gli elementi più rappresentativi del capoluogo felsineo figurano i portici, testimonianza storica di antiche strategie di ampliamento degli spazi abitativi e, al tempo stesso, luoghi privilegiati della vita quotidiana cittadina. I portici raccontano infatti una città composta non soltanto da architetture, ma anche da persone, consuetudini e pratiche sociali che hanno lasciato tracce tuttora visibili. Sulle loro pareti si conservano numerose testimonianze di devozione urbana e popolare, spesso nate spontaneamente dall'esigenza degli abitanti di accogliere figure religiose negli spazi della vita quotidiana, al di fuori degli edifici ecclesiastici [1]. Affreschi, dipinti murali, edicole, statue e bassorilievi popolano così gli angoli del centro storico, instaurando un rapporto diretto, ravvicinato e quasi familiare con chi percorre i portici bolognesi. Queste opere costituiscono esempi significativi di patrimonio culturale diffuso, non soltanto per il loro valore artistico, talvolta considerevole, ma soprattutto perché testimoniano forme di devozione popolare che hanno caratterizzato il tessuto sociale e la vita della città storica. Proprio in ragione della loro origine spontanea e della loro collocazione nello spazio pubblico, tali testimonianze potrebbero essere considerate espressioni artistiche di rilievo minore rispetto alle opere custodite nelle chiese e nei musei. La loro esposizione nel contesto urbano le rende inoltre vulnerabili ai fenomeni di degrado e alle trasformazioni di origine sia naturale che antropica (Fig. 1). Ogni giorno abitanti e visitatori passano a pochi centimetri da queste immagini, senza sempre soffermarsi a

osservarle, mentre ancora limitate - seppur con qualche eccezione [2] - risultano le iniziative dedicate alla loro conoscenza, valorizzazione e tutela.



Fig. 1. Alcuni esempi di effigi mariane sul territorio urbano bolognese; le immagini mostrano anche il livello di degrado a cui molte sono esposte

La natura diffusa di questo patrimonio rappresenta un'ulteriore sfida. Le effigi mariane sono infatti profondamente legate alla propria dimensione urbana e territoriale, essendo distribuite capillarmente lungo i chilometri di portici del centro storico e nelle aree circostanti. Non possono pertanto essere comprese pienamente se considerate come oggetti isolati, ma devono essere analizzate in relazione agli spazi, ai percorsi e alle comunità che ne hanno determinato la presenza. Da queste considerazioni, unite alla rilevanza culturale e alla fragilità delle opere, nasce il presente progetto. Il primo e principale obiettivo è stato quello di realizzare un censimento georeferenziato delle effigi mariane, documentandole all'interno del loro contesto territoriale. Il lavoro è stato successivamente ampliato attraverso la progettazione di strumenti destinati alla conoscenza e alla valorizzazione culturale ed eventualmente turistica di questo patrimonio. L'obiettivo finale è offrire, mediante l'impiego delle tecnologie geomatiche, uno strumento operativo di documentazione e catalogazione che possa contribuire alla conoscenza delle opere e supportare eventuali attività di monitoraggio, tutela e conservazione.

2 Materiali e metodi

La metodologia adottata integra strumenti GIS (Geographic Information Systems), sia in versione desktop che mobile, secondo un approccio speditivo e a basso costo, finalizzato alla costruzione di una banca dati georeferenziata delle effigi mariane. Queste tecnologie hanno già trovato applicazione nel censimento del patrimonio culturale urbano diffuso, soprattutto nell'ambito della street art contemporanea [3,4]. Il presente contributo ne estende l'impiego a una categoria di opere storiche e devozionali finora meno indagata attraverso metodologie geomatiche.

L'impiego di software open source e di dispositivi mobili di uso comune ha consentito di combinare l'organizzazione preliminare delle informazioni, la verifica sul campo e la documentazione fotografica, senza ricorrere, in questa fase, a strumentazione topografica specialistica. L'attività preliminare si è basata sulla raccolta fotografica di Guido Barbi [5], corredata da informazioni relative alla localizzazione delle opere, non sempre però complete né esaustive. I dati disponibili sono stati confrontati con la cartografia di OpenStreetMap e con le immagini di Google Street View, così da individuare la possibile collocazione delle opere e predisporre, in ambiente QGIS, una prima mappa esplorativa comprendente circa cento elementi. Questa verifica ha tuttavia evidenziato i limiti delle riprese stradali nel riconoscimento delle effigi collocate sotto i portici, spesso nascoste alla vista o non adeguatamente distinguibili nelle immagini panoramiche. Il progetto realizzato in QGIS è stato quindi trasferito su smartphone mediante QField, con il supporto del plug-in QFieldSync [6, 7]. L'impiego di un sistema Mobile GIS ha permesso di portare sul campo la cartografia e la struttura della banca dati, rendendo possibile la verifica e l'aggiornamento diretto delle informazioni durante i sopralluoghi.

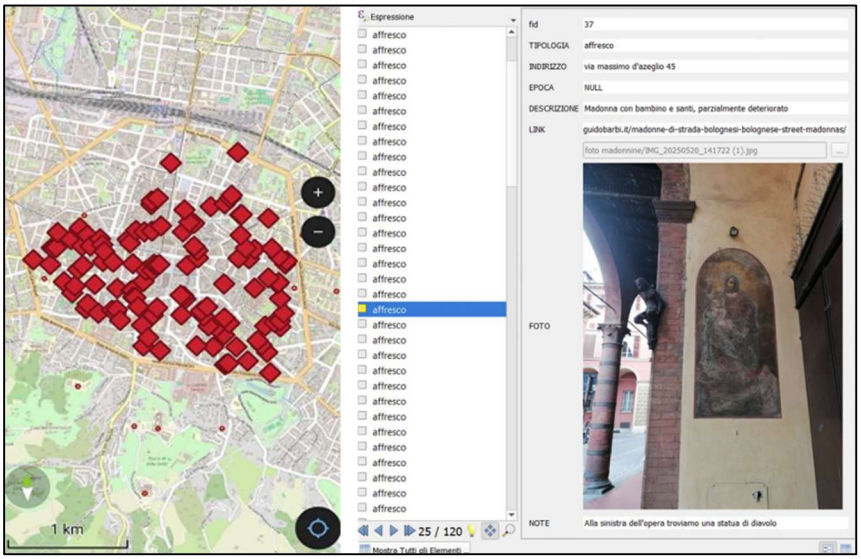


Fig. 2 Interfaccia di QField con l'individuazione delle posizioni delle effigi a seguito della ricognizione sul campo; a destra: un esempio di tabella attributi con i dati inseriti per le opere

Le attività sul campo hanno permesso di controllare gli elementi già individuati, correggerne o integrarne i dati, aggiungere nuove effigi e acquisire sia la posizione geografica, mediante il sistema di geolocalizzazione integrato nello smartphone, sia la relativa documentazione fotografica. Non essendo stata effettuata una validazione metrica indipendente delle coordinate, il rilievo non persegue finalità di posizionamento di precisione. Si configura, piuttosto, come una procedura di catalogazione speditiva, soggetta a incertezze posizionali presumibilmente nell'ordine di alcuni metri, ma adeguata all'individuazione delle opere, alla loro documentazione

e alla rappresentazione della relativa distribuzione territoriale. La banca dati finale associa a ciascun elemento un identificativo univoco e una serie di attributi descrittivi: «Tipologia», «Indirizzo», «Epoca», «Descrizione», «Link», «Foto» e «Note» (Fig. 2). La datazione è stata inserita esclusivamente nei casi in cui fosse verificabile, mentre il campo «Note» è stato utilizzato anche per registrare condizioni di particolare degrado. Infine, una rappresentazione categorizzata assegna simboli distinti alle diverse classi iconografiche e tipologiche, facilitando la lettura della distribuzione spaziale delle opere.

3 Risultati del censimento

Il censimento ha portato alla documentazione e mappatura di 120 opere, articolate in 39 affreschi, di cui 6 conservati presso il Cimitero Monumentale della Certosa; 41 bassorilievi, 16 edicole, 10 statue e 14 elementi non riconducibili alle categorie precedenti. La Figura 3 ne mostra la distribuzione spaziale ed evidenzia un nucleo di opere trasferite nel tempo presso il Cimitero della Certosa, al di fuori delle mura del centro cittadino. Per ciascun elemento, la scheda digitale consente di consultare la posizione geografica, la documentazione fotografica e le informazioni descrittive disponibili. Alcune attribuzioni cronologiche rimangono tuttavia incomplete a causa della scarsità di riscontri documentari attendibili. In una futura prosecuzione del lavoro, le schede potrebbero essere integrate con informazioni di carattere storico, stilistico, artistico e conservativo, grazie al contributo di esperti e ricercatori afferenti ai settori disciplinari pertinenti, secondo un approccio multidisciplinare.

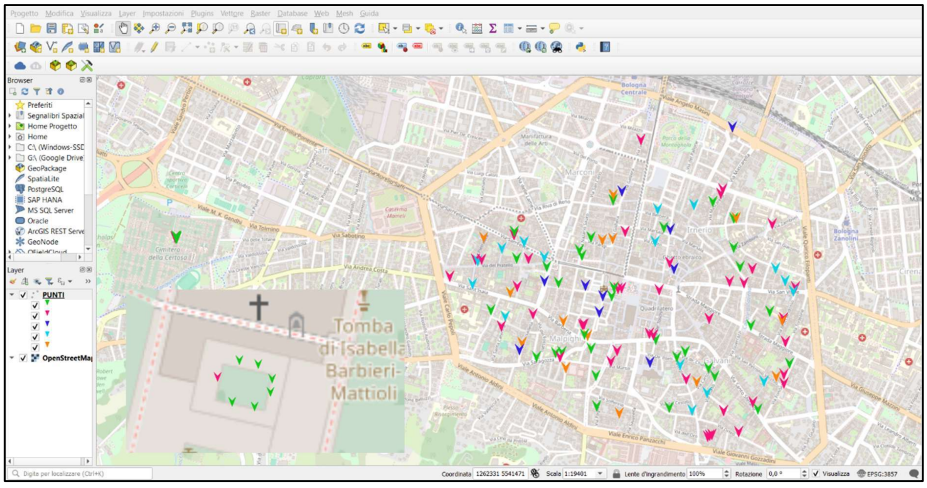


Fig. 3. Distribuzione delle effigi rilevate e dettaglio del nucleo conservato presso la Certosa

4 Itinerari tematici e discussione

A partire dai risultati del censimento, in ambiente QGIS sono stati elaborati tre itinerari pedonali tematici, progettati per collegare le opere presenti nel centro urbano secondo tracciati il più possibile continui (Fig. 4). Il primo percorso comprende gli affreschi e si sviluppa per circa 11 km, con un tempo di percorrenza stimato in 2 ore e 30 minuti; il secondo collega i bassorilievi lungo un itinerario di circa 13 km, percorribile in 3 ore; il terzo, di carattere misto, comprende edicole, statue e altre tipologie di opere, per una lunghezza complessiva di circa 12,5 km e un tempo stimato di 2 ore e 50 minuti. Le lunghezze e i tempi di percorrenza sono stati stimati mediante Google Maps, suddividendo ciascun itinerario in gruppi di tappe. Tali valori hanno pertanto carattere indicativo e non derivano da procedure di ottimizzazione automatica dei percorsi. Le opere conservate presso la Certosa, per la loro posizione e concentrazione, sono state escluse dagli itinerari del centro storico e potrebbero costituire un ambito di visita autonomo.

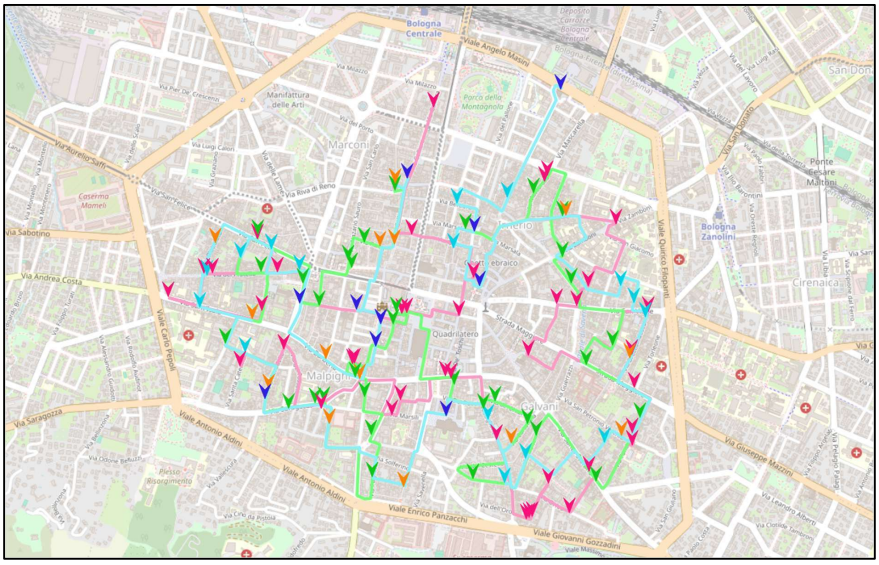


Fig. 4. I tre percorsi tematici elaborati in QGIS

5 Conclusioni

Il workflow integrato QGIS–QField ha consentito di realizzare un primo repertorio georeferenziato delle effigi mariane di Bologna e di proporre una lettura concreta delle relazioni che esse instaurano con il tessuto urbano. L'approccio adottato, speditivo e a basso costo, si è dimostrato adeguato alla documentazione e alla catalogazione preliminare di un patrimonio culturale diffuso, spesso scarsamente conosciuto e particolarmente vulnerabile. Il carattere non esaustivo del censimento e la parziale incompletezza delle informazioni storico-artistiche rendono necessarie ulteriori

campagne di verifica, finalizzate sia all'individuazione di nuove opere sia all'integrazione e all'aggiornamento delle schede esistenti. Un possibile sviluppo del progetto consiste nella pubblicazione di una mappa digitale consultabile e aggiornabile, capace di favorire la conoscenza e la fruizione delle effigi censite. L'integrazione di forme di partecipazione civica potrebbe inoltre consentire a cittadini, associazioni e studiosi di segnalare opere non ancora rilevate o variazioni nel loro stato di conservazione. I contributi raccolti dovrebbero tuttavia essere sottoposti a procedure di verifica e validazione, così da garantire l'affidabilità scientifica della banca dati. In questa prospettiva, le tecnologie GIS potrebbero contribuire non soltanto alla conoscenza e alla valorizzazione culturale e turistica del patrimonio diffuso nei contesti urbani, ma anche alla produzione e all'organizzazione di dati utili al suo monitoraggio, alla conservazione e alla tutela.

Riferimenti bibliografici

1. Fanti, M. (a cura di): Le chiese di Bologna. L'Inchiostroblu, Bologna (1992).
2. Arcidiocesi di Bologna, Ufficio pastorale dello Sport, Turismo e Tempo libero: Run for Mary. Disponibile all'indirizzo: https://sport.chiesadibologna.it/run-for-mary/ (ultima consultazione: ottobre 2026).
3. Arte per Strada Torino: Primo censimento delle opere d'arte pubblica di Torino e della cintura metropolitana. Disponibile all'indirizzo: https://www.arteperstradatorino.it/ (ultima consultazione: ottobre 2026).
4. Invader: World. Disponibile all'indirizzo: https://www.space-invaders.com/world/ (ultima consultazione: ottobre 2026).
5. Barbi, G.: Madonne di strada bolognesi – Bolognese Street Madonnas. Disponibile all'indirizzo: https://www.guidobarbi.it/madonne-di-strada-bolognesi-bolognese-street-madonnas/ (ultima consultazione: ottobre 2026).
6. QGIS Project: Manuale di formazione di QGIS, versione 3.40. Disponibile all'indirizzo: https://docs.qgis.org/3.40/it/docs/training_manual/ (ultima consultazione: 14 ottobre 2026).
7. QField: QField Ecosystem Documentation: Get Started. Disponibile all'indirizzo: https://docs.qfield.org/get-started/ (ultima consultazione: ottobre 2026).

Metriche standardizzate per la valutazione geometrica e radiometrica dei dati digitali nel progetto HERITALISE

Francesca Gallitto[1][0009-0005-5007-4723], Andrea Maria Lingua[1][0000-0002-5930-2711], Filiberto Chiabrando[2][0000-0002-4982-5236] ,Francesca Rivelli[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino, c.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia; francesca.gallitto@polito.it, andrea.lingua@polito.it, s347944@studenti.polito.it
[2] Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, v.le Mattioli 39, 10125 Torino, Italia; filiberto.chiabrando@polito.it

Abstract Il contributo propone metriche per valutare la qualità geometrica e radiometrica all'interno del progetto HERITALISE: reference-based, basate su riferimenti affidabili, e no-reference, per verificare coerenza, completezza, rumore e artefatti senza ground truth. Il metodo è applicato a un capitello e alla Reggia di Venaria Reale (scrivania Mazzarina e muro di Castellamonte). I risultati preliminari mostrano che la qualità dipende da scala d'uso, riferimento disponibile e struttura geometrica del dataset.

Parole chiave: patrimonio culturale digitale, metriche di qualità, validazione geometrica e radiometrica.

1 Introduzione

La digitalizzazione del patrimonio culturale produce oggi dati eterogenei: immagini, nuvole di punti, mesh, ortofoto, texture e prodotti multispettrali. In questo contesto, la qualità non può essere descritta da un solo indicatore. Un modello tridimensionale può essere visivamente convincente ma non adatto a una scala metrica dichiarata; allo stesso modo, un'immagine può mantenere una buona copertura radiometrica ma perdere dettaglio sui bordi, presentare una deriva cromatica o comprimere la dinamica tonale. Il progetto HERITALISE affronta questo problema proponendo un sistema di valutazione separato per dominio geometrico e radiometrico, e articolato in metriche reference-based e no-reference [13].

L'obiettivo del contributo è tradurre tale impostazione in una struttura operativa per la comunità geomatica, con particolare attenzione alla documentazione digitale del patrimonio culturale. Il criterio di fondo è che la qualità sia una proprietà relativa allo scopo: una nuvola di punti idonea alla documentazione architettonica generale può risultare insufficiente per analisi di dettaglio alla scala 1:50; una texture adatta alla visualizzazione può non esserlo per analisi conservative basate sul colore. Per questo motivo le metriche devono essere esplicite, ripetibili e collegate a tolleranze, scala di rappresentazione, risoluzione attesa e disponibilità di dati di riferimento [4, 14].

Il lavoro si colloca nel solco delle raccomandazioni internazionali per la documentazione metrica e la qualità dei dati geografici, ma introduce una lettura specifica per i flussi di lavoro HERITALISE. Le metriche geometriche includono accuratezza su punti di controllo, qualità della registrazione, distanze cloud-to-cloud e cloud-to-mesh, completezza, robustezza morfologica e coerenza interna. Le metriche radiometriche includono similarità strutturale, differenza di colore, coerenza spettrale, completezza radiometrica, artefatti di cucitura, clipping, rumore, nitidezza, consistenza multi-vista e dinamica utile [5, 8].

1.1 Oggetti di studio

I test preliminari (vedi Fig.1) considerano due livelli di complessità. Il primo è un capitello utilizzato come test bed a scala di dettaglio, utile per valutare metriche geometriche e radiometriche su un oggetto caratterizzato da superfici scolpite, sottosquadri e variazioni locali di dettaglio. Questo tipo di oggetto permette di verificare se gli indicatori siano sensibili a rugosità reale, rumore, lacune, smoothing e perdita di informazione locale. In questa fase è stata definita la metodologia.

Il secondo caso studio è la Reggia di Venaria Reale. Per la componente radiometrica è stata considerata la scrivania Mazzarina, un manufatto ligneo del XVIII secolo attribuito a Luigi Prinotto e caratterizzato da materiali differenti e superfici decorative con variazioni cromatiche e materiche. La presenza di un ColorChecker durante l'acquisizione consente di verificare la fedeltà cromatica rispetto a valori noti. Per la componente geometrica è stata analizzata una porzione del muro di Castellamonte, acquisita con fotogrammetria da UAV e confrontata con un riferimento TLS. La superficie, prevalentemente planare ma con muratura irregolare e balustrata, è adatta a verificare sia la dipendenza dalla scala sia la risposta delle metriche a drift sistematici e differenze di copertura. Vengono presentati i risultati preliminari del caso studio della Reggia di Veneria Reale [11].



Fig. 1. Inquadramento dei casi studio: capitello test bed, scrivania Mazzarina e sezione del muro di Castellamonte presso la Reggia di Venaria Reale.

2 Metodologia

La metodologia proposta organizza la valutazione in quattro famiglie: geometrica reference-based, geometrica no-reference, radiometrica reference-based e radiometrica no-reference. La distinzione è necessaria perché la disponibilità di un riferimento affidabile cambia radicalmente il significato dell'indicatore. Quando esiste un ground truth, la metrica misura una deviazione rispetto a un dato considerato più affidabile. Quando non esiste, la metrica diventa invece un indicatore diagnostico della coerenza interna del dataset.

Per evitare interpretazioni assolute, la classificazione Excellent (Exc), Ok e Critical (Crit) è associata a soglie esplicite. In geometria le soglie sono prevalentemente scale-aware, cioè dipendenti dalla tolleranza T e dal GSD o dalla risoluzione attesa. In radiometria le soglie sono definite in funzione di indici percettivi, differenze cromatiche, percentuali di copertura o profili applicativi. Ogni metrica deve produrre non solo un valore sintetico, ma anche una mappa o un report locale quando disponibile, così da distinguere problemi globali da criticità localizzate.

2.1 Metriche geometriche

La valutazione geometrica considera accuratezza, registrazione, completezza, distribuzione spaziale dei punti, coerenza locale delle superfici e qualità topologica della mesh. In un contesto di patrimonio culturale questi aspetti devono essere letti insieme: la sola distanza media non descrive le lacune, la sola completezza non descrive il drift assoluto, e una mesh topologicamente corretta può comunque non rispettare la precisione richiesta.

Reference based: le metriche geometriche reference-based (vedi Tab.1) richiedono un dato esterno più affidabile: punti di controllo indipendenti, nuvole TLS, mesh strutturate o scansioni a luce strutturata. La famiglia include il controllo preliminare della risoluzione, l'accuratezza sui check point, la qualità di co-registrazione tramite ICP, distanze cloud-to-cloud, distanze cloud-to-mesh, M3C2, indicatori di significatività rispetto al livello di detezione, Recall@tau, Precision@tau, F-score, Chamfer distance, Hausdorff robusto, coerenza delle normali e deformazione sistematica [1, 10].

L'aspetto più rilevante è la logica di scala. La tolleranza T definisce l'uso atteso del prodotto, mentre il GSD e la densità di campionamento indicano se il dato può supportare quella scala. Per esempio, per un target 1:50 la tolleranza può essere dell'ordine di pochi millimetri, mentre la stessa nuvola può risultare pienamente idonea a scale 1:200 o 1:500. Per questa ragione i risultati non devono essere comunicati come giudizi assoluti sul rilievo, ma come compatibilità rispetto a una specifica destinazione d'uso [7].

Le metriche basate su distanze robuste, come P95 cloud-to-cloud o cloud-to-mesh, limitano l'effetto di outlier isolati e sono più informative dei massimi assoluti. Gli indicatori Recall@tau e Precision@tau sono invece essenziali per distinguere

completezza e pulizia del dato: un dataset può coprire quasi tutta la superficie di riferimento e al tempo stesso essere affetto da un errore di posizionamento globale.

Tabella 1. Elenco metriche geometriche per il caso Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in input	Excellent / OK / Critical
RB_G0	Input Dnn & Sampling Resolution	mm	Optical parameters (f, p), distance (H) or SfM Report Ground Res.	Exc: ≤ Dnn (limit). OK: ≤ 1.5xDnn (limit). Crit: > 1.5xDnn (limit).
RB_G1	Checkpoint accuracy (CP)	mm	Independent check points (CP) coordinates + estimated CP coordinates	Exc: RMSE_XY ≤ T & RMSE_Z ≤ 1.5×T OK: RMSE_XY ≤ 1.5×T & RMSE_Z ≤ 2×T Crit: Above these value
RB_G2	Fine co-registration quality (ICP)	mm, %	Reconstruction cloud/mesh + reference cloud/mesh	Exc: inliers ≥ 95% & RMSE ≤ 0.75×T OK: inliers ≥ 90% & RMSE ≤ T Crit: < 90% or RMSE > T
RB_G3	C2C distance (A→B) robust statistics	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: P95 ≤ T OK: T < P95 ≤ 1.5×T Crit: > 1.5×T
RB_G4	C2C symmetric robust distance	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: sym P95 ≤ 1.5×T & asym < 20% OK: sym P95 ≤ 3×T or asym 50% Crit: sym P95 > 3xT or asym > 50%
RB_G5	C2M distance (Cloud→Mesh) robust statistics	mm	Registered cloud (reconstruction) + reference mesh (triangulated)	Exc: P95 ≤ T OK: T < P95 ≤ 1.5×T Crit: > 1.5×T
RB_G6	M3C2 distance (normal-directed) robust statistics	mm	Two registered point clouds (reconstruction and reference)	Exc: P95 ≤ T OK: T < P95 ≤ 1.5×T Crit: > 1.5×T
RB_G7	M3C2 significance / CI95 (LoD)	% points	M3C2 outputs (distance + CI95/LoD per point)	Exc: <5% OK: 5-15% Crit: >15%
RB_G8	Completeness vs Reference (Recall@τ)	%	Two registered point clouds or mesh (reconstruction and reference)	Exc: ≥95% OK: 85-95% Crit: <85%
RB_G9	Precision vs Reference (Precision@τ)	%	Registered reconstruction samples + reference	Exc: ≥95% OK: 85-95% Crit: <85%
RB_G10	F-score@τ	[0;1]	Precision@τ and Recall@τ	Exc: ≥0.95 OK: 0.85-0.95 Crit: <0.85
RB_G11	Chamfer Distance (Symmetric, Trimmed)	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: ≤ 1.5 * Dnn_target OK: ≤ 3 * Dnn_target Crit: > 3 * Dnn_target

RB_G12	Robust Hausdorff (P95)	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: ≤ 2 * Dnn_target OK: ≤ 4 * Dnn_target Crit: > 4 * Dnn_target
RB_G13	Normal consistency vs Reference	°	Registered reconstruction A + reference B (with normals)	Exc: P95 ≤ 10° OK: 10° - 20° Crit: > 20°
RB_G14	Systematic deformation amplitude	mm or multiple of Dnn	M3C2 signed distance field (CloudCompare)	Exc: ≤ 2 * Dnn_target OK: ≤ 2 - 4 * Dnn_target Crit: > 4 * Dnn_target

No reference based: le metriche geometriche no-reference (vedi Tab. 2) stimano la qualità interna senza ground truth. La proposta HERITALISE include densità locale (NR-G1), coverage ratio (NR-G2), hole ratio (NR-G3), spacing rispetto alla risoluzione attesa (NR-G4), rugosità locale (NR-G5), anomalie di planarità o curvatura (NR-G6), outlier ratio (NR-G7), double surface o ghosting (NR-G8), coerenza cloud-mesh (NR-G9), difetti topologici della mesh (NR-G10), aree anomale da clustering (NR-G11) e stabilità cross-scale (NR-G12).

Questi indicatori non certificano l'accuratezza assoluta. Servono piuttosto a riconoscere campionamenti irregolari, lacune, rumore, aree poco supportate, smoothing e artefatti che potrebbero propagarsi in texture, modelli HBIM, digital twin o classificazioni AI. La definizione della ROI è particolarmente importante per NR-G2 e NR-G3: se la regione attesa è una bounding box generica e non segue la superficie reale, la metrica può sovrastimare i vuoti. Analogamente, NR-G1 può risultare penalizzante quando la griglia di calcolo non è allineata alla superficie acquisita, come nel caso di una parete verticale analizzata su una griglia XY.

Tabella 2. Elenco metriche geometriche per il caso No Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in imput	Excellent / OK / Critical
NR-G1	Local density uniformity (CV density)	%	Point cloud (dense cloud)	Exc: ≤30% OK: 30–60% Crit: >60%
NR-G2	Coverage ratio	% area	Point cloud + ROI / expected surface region	Exc: ≥90% OK: 75–90% Crit: <75%
NR-G3	Hole ratio	% area	Point cloud + ROI / expected surface region	Exc: <10% OK: 10–25% Crit: >25%
NR-G4	Point spacing vs expected resolution	mm or ×GSD	Point cloud + expected GSD/target spacing	Exc: 0.5–2×GSD OK: 2–3×GSD / Crit: >3×GSD
NR-G5	Local roughness (plane residual)	mm or ×GSD	Point cloud	Exc: ≤1×GSD OK: 1–2×GSD

				Crit: >2×GSD
NR-G6	Abnormal planarity/curvature area	% area	Point cloud (or mesh)	Exc: <5% OK: 5–15% Crit: >15%
NR-G7	Outlier ratio (isolation/low support)	% points	Point cloud	Exc: <1% OK: 1–3% Crit: >3%
NR-G8	Double-surface / ghosting rate	% area/points	Point cloud (optionally normals)	Exc: <1% OK: 1–5% Crit: >5%
NR-G9	Mesh self-consistency (cloud↔mesh)	mm or ×GSD	Dense cloud + produced mesh	Exc: P95 ≤2×GSD OK: ≤4×GSD Crit: >4×GSD
NR-G10	Mesh topology defects	count / %	Produced mesh	low/none / moderate / high *(profile thresholds)*
NR-G11	Anomalous area (DBSCAN/HDBSCAN)	% area	Point cloud + per-cell features	Exc: <5% / OK: 5–15% Crit: >15%
NR-G12	Cross-scale stability (metric drift)	%	Point cloud/mesh at multiple scales	Exc: ≤10% OK: 10–25% Crit: >25%

2.2 Metriche radiometriche

La componente radiometrica valuta fedeltà visiva, colore, comportamento spettrale, presenza di dati validi, artefatti di cucitura e stabilità tra immagini. Nel patrimonio culturale questi aspetti sono centrali perché influenzano interpretazione materica, monitoraggio conservativo, riconoscimento di degradi, texture mapping e uso di modelli AI. Anche in questo caso è necessario separare misure con riferimento da diagnostiche interne.

Reference based: le metriche radiometriche reference-based (vedi Tab. 3) confrontano l'immagine o il prodotto valutato con un riferimento radiometricamente affidabile e geometricamente allineato. RB-R1 utilizza lo Structural Similarity Index per misurare la preservazione di luminanza, contrasto e struttura. RB-R2 usa la differenza colore CIEDE2000, calcolata nello spazio CIELAB, per stimare la fedeltà cromatica percepita. RB-R3 impiega lo Spectral Angle Mapper per confrontare firme multispettrali o iperspettrali. RB-R4 misura la completezza radiometrica come rapporto tra pixel validi nel dato valutato e pixel validi nel riferimento. RB-R5 valuta artefatti su seamline e bordi, spesso legati a mosaicking, texture blending, differenze di esposizione o piccoli disallineamenti [2, 3, 9, 12, 16].

La co-registrazione tra immagine valutata e riferimento è un prerequisito metodologico. Differenze locali di allineamento possono infatti abbassare SSIM, aumentare DeltaE00 o peggiorare RB-R5 senza che ciò dipenda necessariamente da un difetto radiometrico puro. Per questo motivo l'interpretazione deve sempre considerare la catena geometrica e quella radiometrica insieme

Tabella 3. Elenco metriche radiometriche per il caso Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in imput	Excellent / OK / Critical
RB-R1	SSIM (Structural Similarity Index Measure)vs reference	SSIM [0–1]	Reference image/ortho/texture + aligned product	Exc: ≥0.95 Ok: 0.85–0.95 Crit: <0.85
RB-R2	Color difference vs reference (ΔE00)	ΔE00	Reference + aligned product (or ColorChecker)	Exc: ≤3 Ok: : 3–5 Crit >5
RB-R3	SAM vs reference	°	Reference + aligned product (RGB/multispectral)	Exc : ≤5° Ok: 5–10° Crit : >10°
RB-R4	Radiometric comparison completeness	%	Reference + aligned product	Exc: ≥95% Ok: 85–95% Crit : <85%
RB-R5	Seam/edge artifact vs reference (optional)	relative	Reference + aligned ortho/texture	Low Moderate high

No reference based: le metriche radiometriche no-reference (vedi Tab. 4) lavorano senza immagine calibrata o target esterno. NR-R1 identifica immagini sfocate o outlier di nitidezza attraverso indicatori come varianza del Laplaciano e Tenengrad. NR-R2 e NR-R3 misurano rispettivamente clipping nelle alte luci e nelle ombre. NR-R4 valuta rumore radiometrico anomalo. NR-R5 controlla la coerenza di esposizione tra immagini sovrapposte, mentre NR-R6 valuta la consistenza multi-vista mediante SSIM o NCC su patch corrispondenti. NR-R7 misura derive di bilanciamento del bianco o color cast, NR-R8 gli artefatti interni di seam, e NR-R9 la dinamica utile effettiva.

Queste metriche sono particolarmente utili durante l'acquisizione o nelle fasi iniziali di processamento, perché permettono di intercettare problemi prima della generazione di ortofoto, texture o prodotti semantici. Tuttavia la loro robustezza dipende dalla dimensione del dataset e dalla qualità delle sovrapposizioni. Per esempio, un controllo di outlier di nitidezza su due sole immagini non ha la stessa affidabilità statistica di un controllo su un blocco fotogrammetrico più ampio.

Tabella 4. Elenco metriche radiometriche per il caso No Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in imput	Excellent / OK / Critical
NR-R1	Blur/sharpness outlier rate	% images	Input images (or texture atlas)	Exc: <5% Ok: 5–15% Crit >15%
NR-R2	Highlight clipping ratio	% pixels	Input images (or texture)	Exc: <1% Ok: 1–3% Crit >3%
NR-R3	Shadow clipping ratio	% pixels	Input images (or texture)	Exc: <5% Ok: 5–15% Crit >15%
NR-R4	Noise outlier rate	% images	Input images	Exc: <5% Ok: 5–15% Crit >15%
NR-R5	Exposure consistency in overlaps	%	Overlapping image pairs / reprojected patches	Exc: <10% Ok: 10–25% Crit >25%
NR-R6	Multi-view radiometric consistency (SSIM/NCC)	SSIM / NCC	Overlapping tiles or reprojected surface patches	Exc: P10 SSIM ≥0.85 Ok: 0.70–0.85 Crit <0.70
NR-R7	White-balance / color cast drift	Δa*, Δb*	Input images	Exc: Small Ok: Moderate Crit large *(profile thresholds)*
NR-R8	Texture seam artifact score (internal)	relative	Ortho/texture output	Exc: Low Ok: Moderate Crit :high *(profile thresholds)*
NR-R9	Effective usable dynamic range	stops (relative)	Input images	Exc: ≥8 stops Ok: 6–8 Crit :<6 *(camera-dependent)*

3 Risultati preliminari

I risultati preliminari dei due diversi casi studio della Reggia di Venaria Reale, dimostrano l'utilità di un approccio a metriche multiple. Le prove non mirano a chiudere la validazione complessiva del progetto, ma a verificare la capacità degli indicatori di descrivere situazioni reali e non banali: dati visivamente buoni ma non adeguati a una scala molto fine; immagini cromaticamente accettabili ma con perdita di bordi; metriche no-reference influenzate dalla geometria della ROI o dall'orientamento della griglia.

3.1 Metriche geometriche

Sul muro di Castellamonte la valutazione reference-based è stata impostata alla scala 1:50, con T pari a 2,5 mm e risoluzione target pari a T/4. Il dataset fotogrammetrico da UAV, acquisito con DJI Matrice 350 e Zenmuse P1, è stato confrontato con una nuvola TLS Leica RTC360. Il GSD medio riportato dal processamento è pari a 15,5 mm; tale valore è coerente con una documentazione architettonica generale, ma non con il

requisito molto più stringente della scala 1:50. Di conseguenza il controllo di risoluzione risulta Critical per quella specifica scala [6].

Il confronto con i check point indipendenti ha restituito un RMSE complessivo di 17,4 mm, mentre l'ICP tra fotogrammetria e TLS ha prodotto un RMSE di 13,21 mm con Inlier Ratio prossimo al 100%. Questa combinazione è metodologicamente significativa: l'elevato inlier ratio indica una sovrapposizione priva di gross errors, mentre l'RMSE evidenzia un drift sistematico rispetto al riferimento. Anche le distanze robuste e M3C2 risultano Critical alla scala 1:50, ma gli indicatori di completezza e pulizia del dato mostrano un quadro diverso: Recall@tau pari a 99,99%, Precision@tau pari a 100% e F-score pari a 0,9999. Il risultato conferma che il problema principale non è la copertura morfologica della superficie, bensì il posizionamento assoluto rispetto alla tolleranza dichiarata. La deformazione sistematica è contenuta; la deriva è prevalentemente rigida (vedi Fig. 2). I risultati sono riassunti in Tabella 5.

La valutazione no-reference, condotta sullo stesso dataset e con GSD atteso di 15,5 mm, ha mostrato criticità per NR-G1, NR-G2 e NR-G3. NR-G1 ha restituito 194,9360% ed è stato classificato Critical; coverage ratio e hole ratio sono risultati rispettivamente 43,1111% e 56,8889%. Tali valori sono influenzati dall'uso di una griglia XY non allineata alla parete verticale, che genera celle apparentemente vuote o densità molto disomogenee anche quando la superficie reale è campionata. Al contrario, metriche come roughness locale, planarity/curvature, outlier ratio, coerenza cloud-mesh e difetti topologici indicano risultati positivi. Questo conferma che le metriche no-reference devono essere accompagnate da scelte geometriche corrette, in particolare ROI e sistema locale orientato alla superficie.

Tabella 5. Risultai metriche geometriche reference based per il caso studio: muro di Castellamonte

Criterio	Valore	Esito
RB_G0	GSD = 15,5 mm	CRITICAL
RB_G1	RMSE CP = 17,4 mm	EXCELLENT
RB_G2	RMSE ICP = 17,7 mm & IR ≈ 99%	OK
RB_G3	P95 > 99,6 mm	CRITICAL
RB_G4	P95 > 36,42 mm	CRITICAL
RB_G5	P95 = 36,3 mm	CRITICAL
RB_G6	P95 = 22,9 mm	OK
RB_G7	Sig. Change = 98,2%	CRITICAL
RB_G8	Recall = 85,9%	OK
RB_G9	Precision = 59,6%	CRITICAL
RB_G10	F-score = 0,704	CRITICAL
RB_G11	CD = 43,64 mm	CRITICAL
RB_G12	Haus. P95 > 99,6 mm	CRITICAL
RB_G13	P95 $\Delta\theta$ = 84,96°	CRITICAL

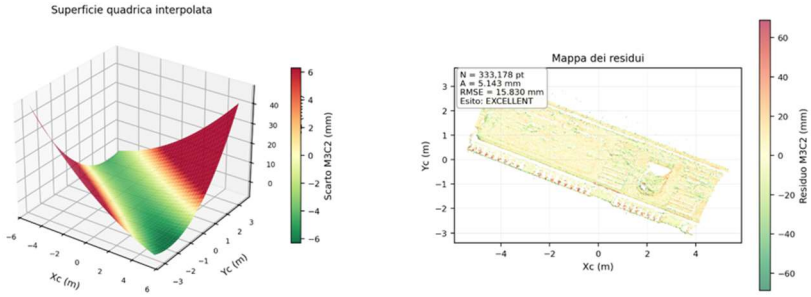


Fig 2. Report di RB_G14: fitting quadrico degli scarti M3C2 firmati sul muraglione. A sinistra: superficie quadrica fittata; a destra: mappa dei residui.

3.2 Metriche radiometriche

La scrivania Mazzarina è stata utilizzata per verificare le metriche radiometriche su un oggetto complesso per materiali, colore e riflettanza (vedi Tab. 5). Nel test reference-based, RB-R1 ha prodotto SSIM pari a 0,8874, classificato OK, indicando una buona similarità strutturale ma con differenze locali ancora presenti. RB-R2 ha restituito DeltaE00 pari a 5,6902, anch'esso classificato OK, quindi con una differenza cromatica percepibile ma entro l'intervallo accettabile adottato nel framework. RB-R3 ha prodotto SAM pari a 9,9419 gradi, classificato OK, mentre RB-R4 ha raggiunto 99,2992% ed è stato classificato Excellent, confermando una quasi completa conservazione dell'informazione radiometrica valida [15].

Il risultato più critico è RB-R5, pari a 77,7324% e classificato Critical. L'indicatore segnala una perdita di informazione sui bordi e sulle transizioni nette, compatibile con sfocatura, ricampionamento o lieve disallineamento tra immagine valutata e riferimento. In un manufatto decorato questo aspetto è rilevante perché i bordi e i dettagli fini contribuiscono alla lettura dei materiali e delle tecniche esecutive.

Nel test no-reference, NR-R2 ha indicato clipping nelle alte luci pari a 0,7579% ed NR-R3 clipping nelle ombre pari a 0,0392%, entrambi Excellent. L'immagine quindi non perde informazione in modo significativo agli estremi tonali. Tuttavia NR-R9, pari a 4,9984 stop, è Critical: la dinamica utile risulta compressa, pur in assenza di clipping elevato. Questo mostra l'importanza di usare più indicatori radiometrici: un'immagine può essere esposta senza saturazioni rilevanti ma avere comunque una gamma tonale insufficiente per distinguere variazioni sottili di materiale e superficie.

Tabella 5. Risultai metriche radiometriche reference based per il caso studio: scrivania Mazzarina.

Criterio	Valore	Esito
RB_R1	SSIM = 0,8874	OK
RB_R2	Delta E00 = 5,6902	OK
RB_R3	SAM = 9,9419	OK

RB_R4	Radiometric completness[%]=99,2992	EXCELLENT
RB_R5	Edge preservation [%]=77,7324	CRITICAL



Fig. 3. A sinistra: immagine acquisita della scrivania Mazzarina con ColorChecker. A destra: immagine calibrata per calcolo metriche radiometriche reference based.

4 Conclusioni

Il quadro di metriche HERITALISE consente di trasformare la valutazione della qualità da giudizio qualitativo a procedura esplicita, documentabile e ripetibile. La distinzione tra reference-based e no-reference è essenziale: le prime metriche quantificano lo scostamento da un riferimento affidabile, mentre le seconde forniscono diagnostiche interne utili quando un ground truth non è disponibile. In entrambi i casi, l'indicatore deve essere interpretato rispetto alla scala, al tipo di oggetto, alla ROI, alla risoluzione attesa e alla qualità della co-registrazione.

I test preliminari mostrano tre evidenze principali. Primo, la classificazione geometrica è fortemente scale-aware: il dataset del muro di Castellamonte è coerente con documentazione architettonica generale ma non con una scala 1:50 molto stringente. Secondo, completezza morfologica e accuratezza assoluta non coincidono: Recall, Precision e F-score possono essere Excellent anche in presenza di drift sistematico. Terzo, le metriche no-reference sono potenti ma richiedono una parametrizzazione coerente con la geometria dell'oggetto; una griglia non orientata alla superficie può rendere Critical indicatori di densità, coverage e hole ratio senza riflettere una reale cattiva acquisizione.

Per la componente radiometrica, le prove confermano la necessità di combinare indici percettivi, cromatici e diagnostici. SSIM, DeltaE00, SAM e completezza radiometrica descrivono aspetti complementari rispetto a bordi, clipping e dinamica utile. Lo sviluppo futuro riguarderà il consolidamento delle soglie, l'integrazione di mappe locali nei report, la gestione di dataset multi-scala e l'estensione dell'automazione nella HERITALISE Quality Tool, con particolare attenzione a ROI orientate alla superficie e controlli di affidabilità per dataset piccoli.

5 Acknowledgments

Il presente studio è stato realizzato nell'ambito del progetto HERITALISE (Horizon Europe).

6 Riferimenti bibliografici

1. Besl, P. J., McKay, N. D.: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(2), 239-256 (1992).
2. Brunet, D., Vrscay, E. R., Wang, Z.: On the mathematical properties of the structural similarity index. IEEE Transactions on Image Processing 21(4), 1488-1499 (2012).
3. Brown, M., Lowe, D. G.: Automatic panoramic image stitching using invariant features. International Journal of Computer Vision 74, 59-73 (2007).
4. CIPA Heritage Documentation: 3 x 3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture (2013).
5. European Commission: Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage. Publications Office of the European Union (2022).
6. Historic England: Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice. Historic England, Swindon (2017).
7. Historic England: Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage. Historic England, Swindon (2024).
8. International Organization for Standardization: ISO 19157-1:2023 Geographic information - Data quality - Part 1: General requirements. ISO, Geneva (2023).
9. Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., Goetz, A. F. H.: The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote Sensing of Environment 44, 145-163 (1993).
10. Lague, D., Brodu, N., Leroux, J.: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, 10-26 (2013).
11. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J.: Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 3rd edn. De Gruyter, Berlin (2020).
12. Luo, M. R., Cui, G., Rigg, B.: The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. Color Research and Application 26(5), 340-350 (2001).
13. Remondino, F., El-Hakim, S.: Image-based 3D modelling: a review. The Photogrammetric Record 21(115), 269-291 (2006).
14. Remondino, F.: Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote Sensing 3(6), 1104-1138 (2011).
15. Sharma, G., Wu, W., Dalal, E. N.: The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. Color Research and Application 30(1), 21-30 (2005).
16. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P.: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing 13(4), 600-612 (2004).

Rete Dinamica Nazionale: calcolo, consistenza, considerazioni geodetiche ed operative

Stefano Gandolfi[0000-0003-2096-5670], Maurizio Barbarella[0000-0002-6595-103X], Giorgio Del Ciondolo[0009-0007-5068-9765] e Matteo Cappuccio[0009-0007-5764-253X]

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italia

Abstract. Il sistema geodetico nazionale (ETRF2000, epoca 2008.0) è realizzato dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN). Il DICAM (Università di Bologna) ha ricalcolato in ITRF2020, in modalità PPP-AR (Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution), l'intero archivio RINEX delle 99 stazioni RDN (2001–2025), valutando la consistenza dell'archivio e le deformazioni della rete.

Parole chiave: Rete Dinamica Nazionale, PPP-AR, ITRF2020, ETRF2000.

1 Introduzione

Con il DPCM del 10 novembre 2011 [1] il Governo italiano ha adottato ufficialmente il sistema geodetico ETRF2000 (epoca 2008.0), realizzato mediante la Rete Dinamica Nazionale (RDN) di 99 stazioni GNSS permanenti. La rete fu calcolata dall'IGM nel 2008 da 28 giorni di osservazioni (23 dicembre 2007 – 19 gennaio 2008) con il software Bernese 5.0 in ITRF2005; le coordinate furono poi trasformate in ETRF2000 (2008.0) con i 14 parametri forniti da EUREF [2] e validate da diversi centri di calcolo, tra cui l'Università di Bologna [3].

L'Italia è però un territorio in costante evoluzione, per un quadro tettonico complesso a cui si aggiungono dissesti di natura idrogeologica: le velocità medie delle stazioni GNSS in ETRF2020 vanno da pochi mm/anno al Nord a circa 6 mm/anno al Sud. Se per una stazione è disponibile una serie temporale lunga (più di tre anni), se ne possono stimare posizione e velocità in ITRS e trasformarne le coordinate in ETRF2000 (2008.0) secondo le procedure EUREF; in assenza di serie lunghe, e quindi di una stima delle velocità, l'unico modo per trasformare le coordinate tra due sistemi di riferimento (ad esempio da ITRF2020 all'epoca delle osservazioni al sistema nazionale) è l'utilizzo di parametri di trasformazione. A 15 anni dal DPCM è stato quindi ricalcolato l'intero dataset in ITRF2020, calcolo propedeutico anche alla stima dei 14 parametri di trasformazione.

2 Dati e metodologia

L'attività ha previsto il recupero e l'archiviazione dei RINEX (30 s) delle 99 stazioni presenti nella sezione pubblica del portale dell'IGM, dal 1° gennaio 2001 al 20 maggio 2025 (8.906 giorni, circa 500.000 soluzioni giornaliere). Ogni sessione di 24 h è stata elaborata in modo indipendente con il software open-source PRIDE PPP-AR [4], tramite script automatici che hanno permesso di gestire una grande mole di dati grezzi e di ottimizzare il calcolo PPP attraverso processi paralleli. L'elaborazione è stata condotta in configurazione standard (cut-off di 10°, funzione di mappatura VMF1, modello di carico oceanico FES2014b, risoluzione delle ambiguità per arrotondamento). Fino al 2020 sono stati usati i prodotti combinati IGS Repro3, con costellazioni variabili nel tempo (prevalentemente GPS fino al 2007, GPS e GLONASS nel 2008–2012, anche Galileo dal 2013), e in seguito i prodotti multi-GNSS operativi.
Le soluzioni anteriori al 27 novembre 2022, espresse in ITRF2014, sono state trasformate in ITRF2020 con i parametri di trasformazione tra i due frame forniti da Altamimi e Collilieux [5], applicati all'epoca di ciascuna soluzione.
Il modello stimato per le velocità tiene conto anche delle discontinuità delle serie, localizzate in corrispondenza dei cambi di antenna.

3 Risultati

Consistenza dell'archivio. Benché la maggior parte della rete sia stata monumentata nel 2006–2007, una ventina di stazioni, soprattutto delle reti IGS ed EPN, era già operativa nei primi anni 2000. Le serie durano in media 15,9 anni: 89 stazioni dispongono di almeno 5 anni di osservazioni, 78 superano i 10 anni e 14 coprono l'intero periodo. La disponibilità effettiva di soluzioni giornaliere per ciascun vertice varia molto però, dalle 27 di COMU alle 8.663 di MEDI.

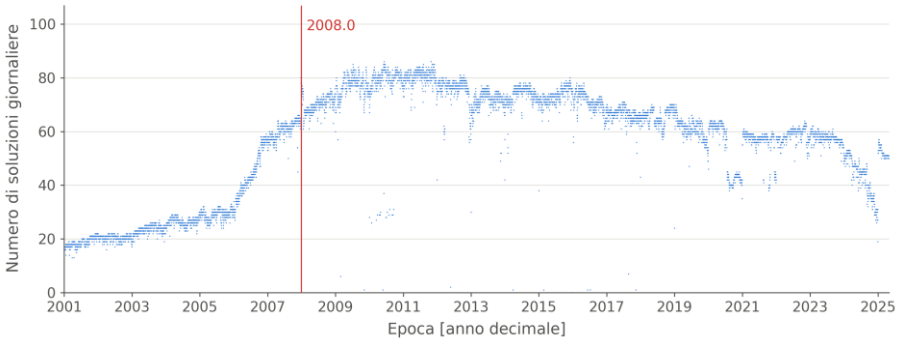


Fig. 1. Numero di soluzioni giornaliere disponibili per la rete RDN; in rosso l'epoca 2008.0.

Le stazioni con soluzione disponibile crescono rapidamente durante la realizzazione della rete (2006 -2009). Dal 2011 calano in modo quasi costante, da 86 a 53 all'inizio

del 2025 (Fig. 1), riflettendo il contenuto del repository ufficiale, non sempre completo, e non necessariamente l'inattività delle stazioni.
Per le analisi successive sono state utilizzate le soluzioni posteriori al 2008.0, epoca ufficiale di realizzazione della RDN.

Velocità e deformazioni. Le serie di circa 18 anni hanno fornito vettori velocità medi più stabili di quelli ottenuti in precedenza [6] (Fig. 2 e Tab. 1).
L'analisi delle serie ha permesso di individuare alcune stazioni con cinematiche particolari, con comportamento marcatamente non lineare o con moti non rappresentativi della cinematica crostale regionale (Tab. 2): poiché un calcolo di parametri di trasformazione presuppone per ogni sito una posizione e una velocità costante, tali stazioni andrebbero escluse.

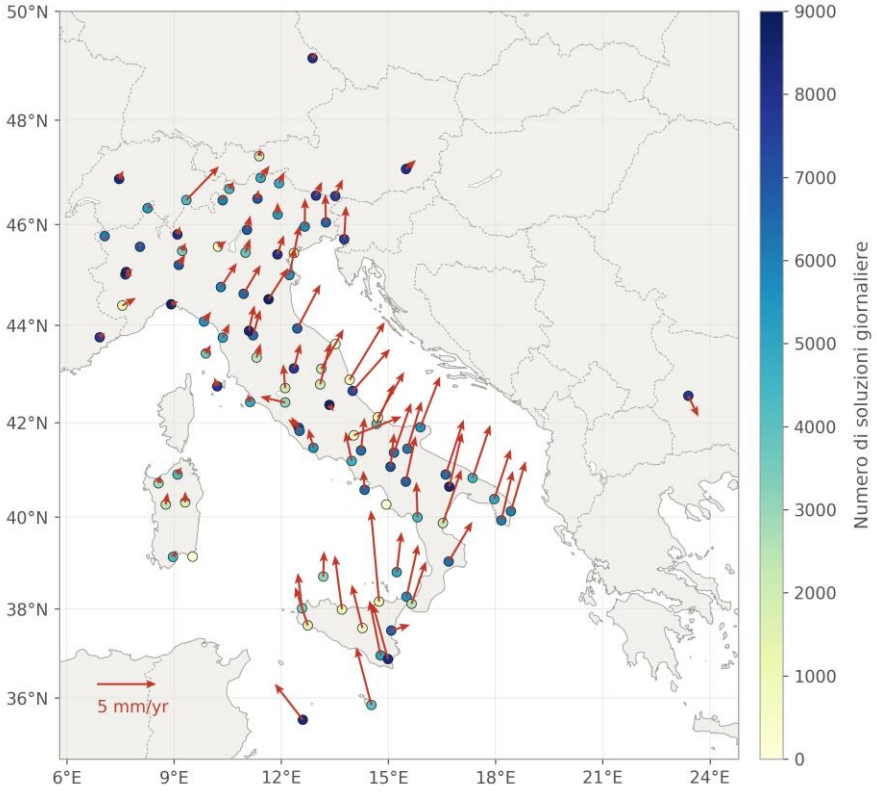


Fig. 2. Velocità orizzontali delle stazioni RDN in ETRF2020.

Tab. 1. Velocità medie (mm/anno) delle stazioni RDN in ETRF2020 (componenti Nord, Est, Up). Mancano CA06, COMU e SMAR, con serie troppo corte per stimarne la velocità.

Staz.	v_N	v_E	v_U	Staz.	v_N	v_E	v_U	Staz.	v_N	v_E	v_U	Staz.	v_N	v_E	v_U
ACOM	1.42	0.63	0.86	FRES	3.37	1.49	-0.63	MEDI	2.64	1.66	-1.73	SOFI	-1.89	0.64	-0.11
ALFE	1.58	4.03	2.06	GENO	0.25	0.61	-0.41	MILA	0.70	0.29	0.42	STBZ	1.03	0.76	1.73
AMUR	4.62	1.52	-0.13	GIUR	4.21	1.24	-0.50	MILO	2.97	-0.36	0.59	STUE	2.84	2.75	0.42
AQUI	-0.55	0.37	-4.76	GRAS	0.38	0.45	0.02	MOCO	4.18	1.45	0.20	SVIN	3.39	0.40	-1.40
BIEL	0.32	0.15	1.04	GRAZ	0.77	0.85	-0.08	MOPS	2.43	1.44	-3.34	TEMP	0.64	0.33	0.06
BORM	0.53	0.05	2.71	GROG	0.73	0.43	-0.30	MRGE	-0.33	0.16	1.96	TERM	4.56	-0.61	-0.60
BRBZ	0.96	0.45	1.35	GROT	2.83	0.30	1.51	MRLC	3.84	0.83	0.94	TGPO	2.35	0.48	-4.76
BRES	0.47	0.71	1.42	HFLK	0.61	0.12	1.48	MSRU	4.39	0.98	-0.31	TGRC	3.58	1.21	0.36
BZRG	0.76	0.08	1.44	HMDC	4.63	-0.94	-0.92	NOT1	4.65	-1.29	-0.89	TORI	0.21	0.59	0.58
CAGL	0.51	0.27	-0.12	IENG	-0.09	0.63	-0.07	NU01	0.92	0.01	-1.17	TREB	4.50	1.56	0.84
CAME	3.33	1.88	1.21	IGMI	2.14	0.61	-0.66	PADO	1.63	0.55	-1.20	TRIE	2.80	0.15	-0.27
CAMP	3.22	-1.07	-0.01	INGR	1.18	-0.69	0.50	PARM	2.02	1.34	-0.70	UDI1	2.39	-0.06	-0.07
CAPO	7.67	-0.69	-0.39	ISCH	4.27	1.66	0.13	PASS	1.02	0.00	0.85	UGEN	4.17	0.97	-0.20
CARI	2.47	-0.53	-0.16	LAMP	2.98	-2.31	-0.57	PAVI	0.89	0.54	-0.33	UNOV	2.02	-0.17	-0.41
COMO	0.68	0.25	-0.41	LASP	0.85	0.60	-0.33	PORD	2.39	0.02	-0.68	UNPG	2.09	0.56	-0.41
CUCC	2.98	-0.10	1.68	LAT1	1.62	-0.42	0.71	PRAT	2.15	0.46	-0.08	USIX	2.14	0.06	-0.55
CUNE	0.64	1.16	-2.38	M0SE	0.72	-0.90	-0.00	RENO	3.48	0.84	-0.42	VAGA	2.78	0.29	0.83
DEVE	0.24	0.36	1.83	MABZ	0.66	0.38	1.82	ROVE	1.22	0.29	0.78	VAST	3.82	2.21	-5.52
EIIV	0.50	1.58	2.17	MACO	1.01	0.17	0.26	RSMN	3.72	1.95	0.52	VEAR	2.33	0.48	-2.34
ELBA	0.51	-0.26	-0.36	MADA	1.18	0.56	0.05	RSTO	3.53	3.15	-0.38	VERO	1.19	0.39	-1.40
ENAV	1.63	-0.11	-0.04	MALT	4.85	-1.28	-0.58	SASA	4.19	1.39	-0.40	VITE	0.48	-2.09	0.71
ENNA	3.65	-0.91	-1.14	MAON	0.68	-0.22	-0.43	SASS	0.71	0.16	-0.07	WTZR	0.47	0.30	0.41
FASA	4.46	1.49	-0.10	MART	4.87	2.95	-4.33	SERS	3.35	1.99	0.77	ZIMM	0.72	0.35	0.85
FOGG	3.99	1.21	0.30	MATE	4.56	1.09	0.23	SIEN	1.19	0.34	0.24	ZOUF	1.18	0.51	1.25

Tab. 2. Stazioni con cinematiche particolari.

Stazione	Motivo
AQUI	Effetti co- e post-sismici del terremoto dell'Aquila (6 aprile 2009, M_w 6.3)
EIIV	Deformazioni locali di origine vulcanica (Etna)
MRLC	Velocità non costante nel tempo
RSTO	Deformazioni co- e post-sismiche (terremoti)
BRES	Spostamento fisico della stazione

4 Considerazioni geodetiche ed operative

La RDN ha allineato l'Italia agli standard geodetici internazionali dell'epoca, ma il quadro del DPCM, che resta a oggi il documento ufficiale più recente dell'IGM in materia, è incompleto: ai gestori di reti GNSS mancano le informazioni per allinearsi in modo rigoroso al sistema nazionale. La rete, inoltre, risulta sempre meno attiva e non mantenuta: alcune delle stazioni originarie non sono più operative, il numero di stazioni con dati disponibili cala in modo quasi costante dal 2011 (Fig. 1) e l'archivio pubblico non è sempre completo.

Il ricalcolo del repository ha consentito una determinazione aggiornata delle velocità dei vertici RDN per il periodo dal 2001 al 2025 consentendo una descrizione dei movimenti su tutto il territorio nazionale.

È stato possibile inoltre valutare la consistenza dell'archivio e le deformazioni della rete dall'epoca di realizzazione, e costituisce la base di partenza per il calcolo di parametri di trasformazione dall'attuale sistema di riferimento, alle varie epoche, al sistema nazionale.

Riferimenti bibliografici

1. DPCM 10 novembre 2011: Adozione del Sistema di riferimento geodetico nazionale. Gazzetta Ufficiale n. 48 del 27 febbraio 2012, S.O. n. 37.
2. Baroni, L., Cauli, F., Farolfi, G., Maseroli, R.: Final results of the Italian Rete Dinamica Nazionale (RDN) of Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI) and its alignment to ETRF2000. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini 68(3), 287–320 (2009).
3. Barbarella, M., Gandolfi, S., Ricucci, L., Zanutta, A.: The new Italian geodetic reference network (RDN): a comparison of solutions using different software packages. In: Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Florence, Italy, 27–30 May 2009, pp. 1–13. EUREF (2013).
4. Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., Zhang, K.: PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. GPS Solutions 23, 91 (2019).
5. Altamimi, Z., Collilieux, X.: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. EUREF Technical Note 1, version March 4, 2024. https://etrs89.ign.fr/pub/EUREF-TN-1-Mar-04-2024.pdf
6. Barbarella, M., Gandolfi, S., Tavasci, L.: Monitoring of the Italian GNSS geodetic reference frame. In: Cefalo, R., Zieliński, J., Barbarella, M. (eds.) New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques. LNGC, pp. 59–71. Springer, Cham (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56218-6_5

Possibilità di “rigenerazione” della cartografia catastale implementando il Progetto TAF 2.0 - presentazione del test nell’area bolognese del Lazzaretto

Gavaruzzi Roberto [1] e Barbarella Maurizio [2]

[1] Pensionato, ex Regione Emilia-Romagna, roberto.gavaruzzi@gmail.com
[2] Università degli Studi di Bologna, maurizio.barbarella@unibo.it

Abstract.
Oggetto della presente ricerca è la valutazione della possibilità di miglioramento, ufficiale e condiviso, della georeferenziazione dei dati cartografici catastali nelle aree in forte sviluppo urbano finalizzato sia a una loro maggiore sovrapponibilità a dati topografici degli Enti Locali, sia a facilitarne l’uso, in ambienti BIM e GIS, per la gestione di progetti di trasformazione territoriale georiferiti in ETRF2000. Il contesto operativo è dato dal Progetto TAF 2.0 dell’Agenzia delle Entrate; esso prevede di attribuire ai Punti Fiduciali catastali (PF) le coordinate satellitari ETRF2000 agendo con due modalità: a) mantenendone la materializzazione se “rilevabile con artefici semplici”; b) sostituendone la materializzazione per ottenere una “libera e facile accessibilità stazionabile in centro”. Nel test abbiamo scelto la modalità a) e utilizzato dei PF preesistenti materializzati da spigoli di fabbricato e ben visibili da aree pubbliche; per ogni PF abbiamo materializzato due fuori centro con chiodi topografici, misurato in modo ridondante le loro coordinate in modalità NRTK e, stazionando su di essi, collimato ripetutamente i PF per misurare di angoli, distanze ottenendo le loro coordinate in ETRF2000. Le coordinate così misurate risultano affidabili perché derivanti da uno specifico protocollo di acquisizioni ridondanti e calcolo di compensazione messo a punto e sperimentato nel test. Le distanze tra i PF definite dalle nostre misure e quelle precedenti dei professionisti presenti nel repertorio TAF mostrano discrepanze di pochi centimetri, mentre le coordinate dei PF da noi misurate e quelle presenti nelle monografie del Catasto presentano discrepanze di pochi metri, piccole ma non trascurabili.
Considerazioni: (a) le distanze relative tra i PF nel foglio da noi misurate e quelle di repertorio sono tra loro congruenti; quindi eventuali variazioni di coordinate ETRF2000 ai dati territoriali catastali non produrranno variazioni sostanziali (di distanze e di superfici); (b) le coordinate ETRF2000 dei PF suggeriscono l’opportunità, almeno per questa specifica area, di una nuova edizione ufficiale “rigenerata” della cartografia; (c) il nostro metodo di misura richiede tempi di rilevamento leggermente incrementati con l’utilizzazione di un secondo servizio di posizionamento e la collimazione ripetuta dei fabbricati; (d) vista la possibilità di intervenire anche per piccole zone corrispondenti alle aree di fogli analogici catastali, riteniamo che la maggiorazione dei costi per l’utilizzazione della nostro metodo di misura e calcolo possa essere finanziata da Enti Locali quando interessati ad utilizzare una nuova edizione ufficiale georiferita in ETRF2000

della carta catastale che faciliti la gestione delle trasformazioni territoriali in ambienti BIM e GIS.

Parole chiave: Rilevamento satellitare di alta precisione, Punti Fiduciali catastali (PF), Progetto TAF 2.0, integrazione elaborazioni BIM e GIS, rilevamento NRTK, rilevamento Total Station.

1 Scenario e prospettive

1.1 Prospettive BIM nel Catasto: edifici 3D e terreni 2D

Nel 2023 sulla rivista Territorio dell'Agenzia delle Entrate (pag. 65-90) V. Lucchese et alii [1] raccontano delle prospettive di utilizzazione del sw BIM per il Catasto in Italia e in Europa, essi scrivono: "l'integrazione del BIM nei sistemi catastali rappresenta una frontiera chiave per la trasformazione digitale della Pubblica Amministrazione, mirando a superare i tradizionali rilievi bidimensionali attraverso modelli informativi tridimensionali georeferenziati". Per lo sviluppo del caso italiano gli autori ipotizzano l'adozione del modello "ibrido": particelle catastali 2D, edifici 3D; attività da loro ritenuta relativamente facile da progettare per le nuove costruzioni, mentre per le costruzioni esistenti le informazioni nel DB Catastale "rendono la progettazione della modellazione 3D complessa" ed ancora da sviluppare.

Riteniamo che già nel breve periodo questa complessità sarà facilmente affrontabile se si utilizzeranno modelli 3D degli edifici forniti dai programmi di telerilevamento IRIDE, missione diventata operativa questa estate [2]. Si tratta di una missione gestita da ASI avente per obiettivo di "mettere a disposizione dati geospaziali affidabili e tempestivi a supporto delle decisioni della Pubblica Amministrazione e degli operatori privati per favorire una gestione più efficace delle risorse naturali e delle emergenze". A regime IRIDE comprenderà 68 satelliti appartenenti a sei costellazioni caratterizzate da sensori radar e ottici con differenti risoluzioni spaziali, temporali e spettrali. In tale contesto sarà realizzato anche un costante "monitoraggio delle infrastrutture e del consumo di suolo". Attività che potrà anche fornire al Catasto una costante e accurata modellazione 3D degli edifici.

1.2 Modalità di georeferenziazione della Cartografia catastale

La cartografia catastale italiana è stata rilevata nel periodo 1886-1956 e disegnata complessivamente in 310.000 fogli. Denominati "fogli di mappa" ed in genere disegnati alla scala 1:2.000; fogli caratterizzati da essere disegnati a perimetro chiuso, ovvero delimitati dalla rappresentazione di corsi d'acqua, strade ed altri particolari lineari presenti sul territorio.

La cartografia è stata gestita con disegno manuale fino agli anni ottanta; poi si passò alla gestione numerica digitalizzando, georeferenziando e mosaicando i fogli. Nelle attività di digitalizzazione fu completata la conversione di georeferenziazione tra i vari

sistemi iniziali (Cassini-Soldner, Sanson-Flamsteed ed altri) nel sistema di rappresentazione Gauss-Boaga collegato al sistema di riferimento nazionale Roma40.

Nel 1988 (circolare 2 del 26 febbraio) fu introdotta la procedura digitale PreGeo [3]; essa è caratterizzata dalla realizzazione degli aggiornamenti con dati georeferenziati solo relativamente a una selezione di particolari cartografici ben individuabili sul terreno, interdistanti mediamente 300 metri, denominati Punti Fiduciali catastali (PF).

Nel 2008 l'Istituto Geografico Militare (IGM) stipulò accordi di collaborazione con i gestori di cento stazioni permanenti satellitari (interdistanti circa 100 chilometri) per l'utilizzazione dei loro dati registrati in modo permanente. L'IGM con i primi dati calcolò la posizione (georeferenziazione) delle suddette stazioni permanenti. Calcoli confermati sia dalla loro ripetizione indipendente da tre poli universitari italiani, sia dalla supervisione delle relative attività scientifiche da parte del competente organismo europeo EUREF. Dal 2008 questo insieme di cento stazioni è conosciuto come Rete Dinamica Nazionale (RDN), con il suo calcolo si determinò un nuovo sistema di riferimento geodetico nazionale l'ETRF2000 epoca 2008. Sistema adottato dalla pubblica amministrazione con il DPCM del 10 novembre 2011 [4], in esso fu previsto che i successivi rilevamenti topografici fossero georeferenziati direttamente in ETRF2000 utilizzando Servizi di posizionamento (reti di stazioni satellitari permanenti); mentre per le cartografie topografiche già esistenti fu prevista la conversione dal sistema Gauss-Boaga [Roma 1940] all'ETRF2000 con le procedure IGM che utilizzano come punti in doppie coordinate i vertici IGM95, interdistanti mediamente una ventina di chilometri.

Una interdistanza eccessiva per le esigenze cartografiche catastali derivanti dalla digitalizzazione dei fogli analogici di mappa a perimetro chiuso: un puzzle mosaicato a regola d'arte ma si tratta (complessivamente sul territorio nazionale) di circa 310.000 fogli. Quindi la versione ETRF2000 della cartografia catastale è una versione secondaria oggi pubblicata per ottemperare all'art. 2 del suddetto decreto 2011, mentre la versione primaria e gestionale topografica è rimasta quella in Gauss-Boaga.

1.3 Possibile integrazione tra il progetto TAF 2.0 e l'acquisizione di dati per la "rigenerazione" della mappa

Il progetto TAF 2.0 [5] prevede la nuova misurazione delle coordinate ETRF2000 dei PF mediante rilevamento topografico satellitare e potrà anche fornire punti in doppie coordinate (Gauss-Boaga e ETRF2000) di spigoli di edifici a interdistanza molto più densa rispetto a quella attualmente utilizzata (da interdistanza attuale circa di 20 km a futura interdistanza di poche centinaia di m). Si tratta di sfruttare, come vedremo in seguito, la parte del progetto TAF 2.0 relativa a esistenti PF definiti da spigoli di fabbricato nei casi in cui essi siano visibili da fronte strada. Ciò potrebbe consentire la realizzazione di una nuova edizione della carta catastale senza precludere le informazioni metriche catastali locali pregresse (dimensione di edifici e di particelle).

Abbiamo denominato questa ipotesi operativa di nuova edizione "rigenerazione" locale (anche per piccole aree corrispondenti ad un insieme dei fogli analogici catastali) della georeferenziazione ETRF2000 della cartografia catastale. L'edizione "rigenerata"

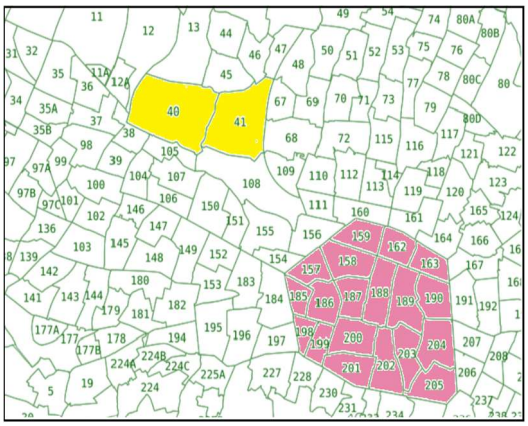
sarà estremamente utile nel medio e lungo periodo perché fornirà una migliore sovrapponibilità con i futuri (e più accurati) dati satellitari ordinariamente georeferenziati in ETRF2000; conseguentemente ciò favorirà ulteriormente la diffusione, anche in Italia, delle tecniche di integrazione tra ambienti BIM e GIS.

2. Test nell'area bolognese del Lazzaretto

2.1 Consistenza e ubicazione del test

La metodologia di rilievo sperimentata in questo test ha utilizzato sia una doppia acquisizione delle misure NRTK (per la definizione delle coordinate dei due chiodi materializzanti i fuori centro per ogni PF spigolo di fabbricato), sia la realizzazione di una doppia intersezione in avanti (per la collimazione, facendo stazione sui fuori centro, dello spigolo di fabbricato materializzante il PF). La finalità di questa metodologia è stata quella di effettuare misure controllabili oltre che precise, al fine di evitare errori grossolani ancorché piccoli.

Sono stati scelti 5 PF catastali in prossimità della Facoltà di Ingegneria in Via Terracini compresi nei fogli 40 e 41 di Bologna materializzati da spigoli di fabbricato e visibili da fronte strada. (fogli catastali 40 e 41 in giallo, centro storico di Bologna in magenta).



Elenco Punti Fiduciali utilizzati nel test

1. PF 03/0400/A944 alias PF 4003
2. PF 06/0410/A944 alias PF 4106
3. PF 07/0410/A944 alias PF 4107
4. PF 09/0410/A944 alias PF 4109
5. PF 10/0410/A944 alias PF 4110

Fig. 1. Ubicazione e consistenza del test

2.2 Metodologia di rilevamento satellitare NRTK dei fuoricentro

Per ogni PF spigolo di fabbricato sono prima stati materializzati due fuori centro con chiodi topografici; stazionando su di essi sono state realizzate due acquisizioni NRTK: la prima utilizzando il Servizio di posizionamento NetGEO, la seconda Servizio di posizionamento SmartNET; su ogni chiodo sono stati realizzati tempi di acquisizione di tre minuti per ciascuno dei due servizi; il confronto delle posizioni (v. tab. 1) rilevate risulta molto congruente e ne conferma la validità.

Chiodi fuori centro	4003.01	4003.03	4106.01	4106.03	4107.03
Differenze NORD	0,010	-0,004	0,010	0,007	0,005
Differenze EST	0,010	0,003	-0,010	0,001	0,002
Differenze in quota	-0,03	-0,038	-0,040	-0,001	0,002
Chiodi fuori centro	**4107.04**	**4109.01**	**4109.02**	**4110.02**	**4110.03**
Differenze NORD	-0,011	0,010	0,010	0,010	0,013
Differenze EST	0,010	0,000	0,000	0,000	0,008
Differenze in quota	0,000	-0,060	-0,040	-0,020	-0,017

Tab. 1. Differenze in metri tra acquisizioni servizio NetGEO e servizio SmartNET

2.3 **Metodologia di rilevamento dei Punti Fiduciali** (PF)



Fig. 2 Punto Fiduciale 06/0410/A944 alias PF 4106 e relativi fuori centro

Sui chiodi fuoricentro abbiamo messo in stazione una Total Station e misurato angoli e distanze sia sullo spigolo di edificio adottato come PF, sia sul corrispondente fuoricentro. Abbiamo collimato lo spigolo a due altezze differenti: quella classica a circa un metro dal piano di campagna (in giallo nella fig. 2); quella di seconda acquisizione a circa un metro sotto il tetto (in rosso nella fig. 2). Il numero ridondante di misure ci ha consentito di eseguire una compensazione in blocco.

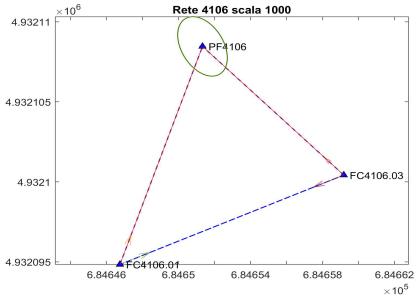


Fig. 3 Intersezione semplice

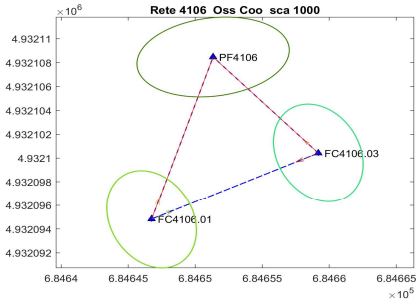


Fig. 4 Intersezione ridondante

In figura 3 lo schema di calcolo tradizionale di intersezione semplice; nella nostra metodologia, di misure ridondanti a quote diverse dello spigolo di fabbricato, abbiamo ridotto le misure alle distanze planimetriche e scelto un programma di compensazione in blocco (v. fig. 4); ciò ci ha permesso di considerare, oltre alla indeterminazione associata alle misure (angoli e distanze), anche quella associata alle posizioni dei tre vertici del triangolo (i due fuori centro e lo spigolo di fabbricato).

2.4 Primo confronto tra le distanze misurate e quelle nel repertorio TAF

Un primo confronto è stato realizzato tra le distanze misurate sul terreno dai professionisti (dati inclusi nelle pratiche di aggiornamento con procedure PreGeo e pubblicati nella TAF - Tabella Attuale dei punti Fiduciali) e le distanze da noi calcolate nel test. Questo primo confronto ha fornito discrepanze minime (v. tab. 2). Quindi abbiamo valutato che i dati dimensionali in TAF risultano congruenti con quelli misurati nel nostro test.

Distanze tra i PF (m)	4003-4107	4003-4109	4106-4109	4107-4109	4107-4110	4109-4110
Dist. calcolate nel test	556,26	953,77	150,07	409,92	589,82	554,66
Media dist. in TAF	556,29	953,76	150,06	409,91	589,99	554,66
Diff. tra calcolate e TAF	-0,03	0,01	0,01	0,01	-0,17	0,00

Tab. 2 Differenze in metri tra le distanze calcolate e quelle in TAF

2.5 Secondo confronto tra ETRF2000 misurate e quelle in monografia catastale

Il secondo confronto è stato realizzato tra le coordinate satellitari misurate e le coordinate catastali Gauss-Boaga nelle monografie catastali trasformate in ETRF2000 con le procedure IGM (Verto on line). Questo secondo confronto indica che le differenze sono piccole ma non trascurabili; riteniamo quindi che sarebbe opportuno utilizzare le coordinate satellitari dei PF per adattare, senza modificare i dati geometrici relativi, la cartografia alle nuove coordinate misurate. Abbiamo chiamato questa nuova versione “copia conforme rigenerata” della carta catastale.

Punto Fiduciale	4003	4106	4107	4109	4110
Differenze in X (m)	- 0,66	- 0,23	- 1,77	- 0,78	- 1,13
Differenze in Y (m)	- 1,02	0,55	2,42	0,13	1,49

Tab. 3 Differenze tra le coordinate misurate e quelle in monografia

3 Conclusioni:

- Le coordinate dei Punti Fiduciali ottenute nella nostra sperimentazione risultano affidabili perché derivanti da uno specifico protocollo di misure ridondanti e di calcolo messo a punto e sperimentato nel test. Inoltre le distanze tra i PF qui illustrate e quelle

precedenti dei professionisti presenti nel repertorio TAF mostrano discrepanze di pochi centimetri (v. 2.4). Ciò significa una conferma locale dei dati cartografici catastali. Invece il confronto tra le coordinate ETRF2000 attuali nelle monografie dei PF e quelle da noi calcolate presentano discrepanze di pochi metri, piccole ma non trascurabili. La causa di ciò deriva dal fatto che quelle attuali derivano (v. 1.2) da punti in doppie coordinate (Gauss-Boaga e ETRF2000) distanti mediamente venti chilometri mentre quelle quelle da noi calcolate distano poche centinaia di metri.

- Sarebbe quindi opportuno, anche solo localmente per aree corrispondenti a insiemi di fogli analogici, riadattare la cartografia catastale alle coordinate ETRF2000 derivati da questa ulteriore valorizzazione del progetto TAF 2.0; ciò ne migliorerebbe notevolmente la corrispondenza con i dati telerilevati attuali e quelli ancora più accurati previsti nel medio periodo (v. 1.1). Abbiamo denominato questa opportunità "rigenerazione" della cartografia catastale. La sua realizzazione agevolerebbe notevolmente la gestione delle trasformazioni territoriali in ambienti BIM e GIS.

- Il metodo di misura illustrato nel test (v. 2.2 e 2.3) prevede misure ridondanti e una loro accurata elaborazione finalizzata a garantire la qualità delle nuove coordinate ETRF2000; metodo facilmente utilizzabile dai tecnici topografi ma con tempi di stazionamento leggermente più lunghi e con la necessità di utilizzare due servizi di posizionamento satellitare. Riteniamo che la durata maggiore delle acquisizioni non incrementi in modo rilevante i tempi generali condizionati soprattutto dai trasferimenti e dalla scelta e per la materializzazione con i chiodi dei fuori centro. Inoltre nella maggior parte del territorio italiano sono presenti anche Servizi di posizionamento delle Regioni gratuiti (R. Abruzzo, R. Campania, R. R. Friuli Venezia Giulia, R. Emilia-Romagna, R. Lazio, R. Liguria, R. Lombardia, R. Piemonte, R. Valle d'Aosta, R. Veneto, P. Bolzano, P. Trento, R. Puglia, R. Umbria). La metodologia di elaborazione dei dati misurati con la Total Station (v. 2.3) non è usuale ma prossimamente verrà pubblicata.

- Riteniamo che gli Enti Locali interessati alla "rigenerazione" della cartografia catastale possano realizzare, a costi contenuti, convenzioni con i tecnici topografi per fornire, nell'ambito del progetto TAF 2.0, all'Amministrazione catastale coordinate satellitari dei PF rilevate e calcolate secondo la procedura descritta in questa nota.

Citazioni

[1] Lucchese V:et alii: Rivista Territorio dell'Agenzia delle Entrate 2023 – pag. 65

[2] Agenzia Spaziale Italiana (ASI) - Programma di telerilevamento IRIDE 2026

[3] Circolare 2 del 26 febbraio 1988, – Min. Finanze - Catasto e Servizi Tecnici Erariali. "Nuove procedure per il trattamento automatizzato degli aggiornamenti cartografici. Disposizioni per la gestione degli atti geometrici di aggiornamento"

[4[DPCM “Adozione del Sistema di riferimento geodetico nazionale” – 10 /11/2011

[5] Galardini A. 2024 – Agenzia Entrate: “Evoluzioni dei servizi di consultazione ed aggiornamento del Catasto Terreni e della Cartografia” Salerno 2024

Riferimenti bibliografici

1 Barbarella M, Gandolfi S. et alii “Rilievo di Punti Fiduciali catastali con tecnica RTK” Rimini, Atti ASITA 2002

2 Barbarella M, Gandolfi S. et alii “Caratteristiche delle stazioni GNSS permanenti italiane” Lecco, Atti ASITA 2015 - http://atti.asita.it/ASITA2015/index.html

3 Brioli R., Gavaruzzi R. et alii “Analisi automatica di dati cartografici catastali ai fini della individuazione di discontinuità areali e della loro genesi” – Aquila, Atti ASITA 2008 - http://atti.asita.it/Asita2008/Autori/980.html

4 Ferrante F., Poma D.: “Metadatazione della Georeferenziazione delle mappe catastali nei sistemi di riferimento nazionali” – Roma, Rivista del Territorio 2024

5 Gavaruzzi R, Mazzotta D.: “Trasformazioni di coordinate catastali in coordinate WGS84 nel contesto del progetto SIGMATER” – Catania, Atti ASITA 2005

6 Gavaruzzi R.: "Servizi di posizionamento e potenzialità degli atti di aggiornamento cartografico in coordinate assolute ETRF2000" – Bologna, Università di Bologna 2013 - https://amsdottorato.unibo.it/id/eprint/5864/

7 Gavaruzzi R., Olivucci S., Gandolfi S.: “Prove preliminari di “riposizionamento” del Data Base Topografico di Regione Emilia-Romagna” – Verona, atti ASITA 2018 - http://atti.asita.it/ASITA2018/Pdf/028.pdf

8 Maseroli R.: Geometrie della terra – MicroGeo, Giannini 2022

Rilevamento geomatico integrato a supporto della valorizzazione di un bene culturale: Forte Puin a Genova

Iacopo Gentile[1][0009-0008-4608-7777], Antonio Cuomo[2][0009-0007-3437-7788], Gaia Di Pasquale[1][0009-0006-1041-1999], Simone Giardino[1][0009-0002-9427-6579], Alessia Annarita Maiello[1][0009-0006-9633-5375], Gioia Panizzi[1][0009-0004-3663-1872], Lara Tedesco[1][0009-0005-1095-7564], Domenico Sguerso[2][0000-0001-7683-3306], Paola Salmona[2][0000-0001-7165-0762]

[1] Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Antichità Filosofia e Storia, s5704185@studenti.unige.it
[2] Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica e Ambientale, paola.salmona@unige.it

Abstract. A seguito del recente restauro del Forte Puin svolto nell'ambito di un progetto parte del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, l'associazione che lo gestisce ha ritenuto utile poter disporre di un suo rilievo completo. L'esigenza è divenuta un caso studio per gli studenti di archeologia e ingegneria dell'Università di Genova iscritti al Laboratorio di Rilevamento Archeologico (LaRA), che hanno colto l'occasione per effettuare anche una comparazione tra due software di ricostruzione fotogrammetrica.

Parole chiave: Rilievo integrato, Confronto tra nuvole di punti, Formazione, Patrimonio culturale, Pubblica fruizione.

1 Storia, struttura architettonica e finalità del rilievo

Il rilievo integrato oggetto di questo articolo ha avuto come fine la progettazione, realizzazione e analisi di un modello tridimensionale dell'ottocentesco Forte Puin mediante nuvola di punti georiferita, per lo studio, la valorizzazione e la conservazione dell'edificio. La struttura in questione è ubicata sulle alture di Genova a circa 500 m sul livello del mare e fa parte di un sistema difensivo più ampio comprendente numerose altre fortificazioni erette tra il XVIII e il XIX secolo a protezione della città. Il processo che portò alla sua edificazione prese avvio sotto il governo napoleonico, che ritenne utile la fortificazione di un'area già stata teatro di un aspro combattimento tra i francesi – che controllavano la città – e gli austriaci. All'epoca di questo scontro esistevano solo i resti di una ridotta settecentesca in muratura, parte di una più ampia fortificazione provvisoria esterna alle mura che, partendo dal Forte Sperone, percorreva il crinale in direzione nord fino a raggiungere le creste del Monte dei Due Fratelli, a settentrione del Puin (Fig. 1). Tra il 1801 e il 1805 il Corpo del Genio Militare napoleonico elaborò numerose proposte per il rafforzamento degli apprestamenti sopra menzionati e probabilmente diede inizio ai lavori, che vennero però ultimati, almeno per quanto concerne il Puin, tra il 1815 e il

1828 per mano del Genio sabaudo [3]. Sono anni che videro una generale opera di ammodernamento e potenziamento delle difese della piazzaforte genovese, considerata l'ultimo baluardo per i Savoia nel caso di una nuova invasione del Piemonte da parte di potenze straniere.



Fig. 1. Veduta del territorio a meridione del Forte: sulla sinistra si può osservare la Val Bisagno, mentre sulla destra, in lontananza, è visibile la cima su cui insiste il Forte Sperone e da cui parte il crinale che giunge fino al Puin per poi proseguire verso i Due Fratelli.

Le forme assunte entro il terzo decennio dell'Ottocento sono pressappoco quelle ancora oggi osservabili (Fig. 2): un recinto bastionato di pianta rettangolare rinforzato da cinque baluardi (due pentagonali agli estremi del lato sud e una triade stellare su quello nord), un terrapieno da esso racchiuso e, infine, una torre collocata al suo centro, il cui primo piano è protetto a nord dal terrapieno (di quota maggiore nella parte settentrionale).



Fig. 2. Veduta complessiva del Forte Puin.

La torre consiste in una massiccia costruzione a cubo in pietra calcarea coperta a terrazza, il cui perimetro è difeso dalle caditoie che sporgono dai lati di quest'ultima (quella del prospetto principale non esiste più) e da due ordini di feritoie; l'accesso avviene tramite una piccola porta posta al centro della facciata e raggiungibile per mezzo di un'ampia scala [4]. L'interno è a due piani coperti da una volta a botte e suddivisi ciascuno in due ambienti da una grossa muratura di spina; in un quadrante laterale della superficie interna sono stati ricavati una piccola scala, un cucinino al piano terreno e un gabinetto di servizio al primo piano, mentre al di sotto del piano terra si trovano i magazzini, formati da tre locali. Sul lato settentrionale dell'edificio è addossata una piccola casamatta, accessibile dall'esterno. I tratti caratterizzanti degli interventi sardi – al Puin come altrove – sono da individuarsi nell'uso sistematico del mattone per il rivestimento esterno e l'incorniciatura delle feritoie e nell'incremento del numero di queste ultime. [4]

Nel 1913, con il disarmo della maggior parte dei forti genovesi, iniziò per essi un periodo di abbandono interrotto solo da provvisori riutilizzi durante i due conflitti mondiali, che li videro assolvere alla funzione di carceri o postazioni dell'antiaerea. Nel 1958 il forte venne dato in concessione ad un privato che lo ristrutturò, utilizzandolo poi come abitazione per una ventina d'anni. Tra gli interventi effettuati vanno segnalati, per le modifiche apportate alla costruzione originaria, l'innalzamento di una tramezza volto a ricavare due locali nel vano nord del primo piano, la realizzazione dei servizi igienici e l'inserimento di merli ghibellini al centro del parapetto del prospetto principale. Infine, dopo decenni di indifferenza, negli anni '90 si assistette a un rinnovato interesse della Pubblica Amministrazione verso queste opere militari, interesse che portò alla risistemazione e apertura al pubblico di alcune di esse, tra le quali il Forte Puin. [3]

Nel 2023 il Forte è stato oggetto di un nuovo restauro [5] nell'ambito del progetto di Valorizzazione della Cinta Muraria e del Sistema dei Forti Genovesi promosso dall'allora Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo (MiBACT) – oggi Ministero della Cultura (MiC) - nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), avviato con lo scopo di promuovere la salvaguardia e la fruizione dell'area collinare posta alle spalle della città, caratterizzato dalla presenza delle mura seicentesche e di numerosi forti. Oggi il Forte Puin è in ottimo stato di conservazione. Ha inoltre assunto la funzione di punto di sosta e ristoro lungo i percorsi escursionistici della Strada dei Forti e ospita le attività dell'associazione Outdoor Experience Genova, che dal 2021 ne ha la concessione e ne garantisce la fruibilità. Ad essa si deve la necessità di un rilievo al fine di registrare l'attuale stato del Forte. Questa esigenza è stata trasformata in opportunità, facendone materia di studio per gli studenti di archeologia e ingegneria iscritti al Laboratorio di Rilevamento Archeologico (LaRA) dell'Ateneo genovese [8]. Con la supervisione dei docenti, gli studenti hanno progettato ed effettuato una campagna di rilievo tramite fotogrammetria da drone e da terra e laser scanner. Hanno quindi proceduto all'elaborazione come nuvole di punti dei dati rilevati e alla costruzione del modello tridimensionale del forte. Particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione della qualità delle nuvole di punti, comparando i risultati ottenuti utilizzando due diversi software di elaborazione fotogrammetrica.

2 Progettazione ed esecuzione della campagna di rilievo

Il rilievo integrato è stato eseguito mediante l'utilizzo combinato di fotogrammetria – sia da drone (Mavic 2 Pro) che da terra con fotocamera (Canon EOS D40) – e laser scanner (SLAM Leica BLK 2 ARC) e GNSS (Stonex S850+). Sebbene il Forte non sia di grandi dimensioni, l'esecuzione del rilievo ha richiesto un'attenta progettazione, sia per la sua posizione orografica che a causa della fitta vegetazione. Nello specifico, la fotogrammetria è stata impiegata per modellare l'esterno del Forte e parte del territorio ad esso circostante. Il laser scanner è invece servito per acquisire la geometria degli ambienti esterni ed interni e per aggiungere alla nuvola di punti fotogrammetrica i dettagli dei parapetti e del terrapieno non totalmente visibili dalle riprese aeree, come ad esempio le feritoie. Tramite rilievo satellitare GNSS in tempo reale NRTK, in appoggio al Servizio di Posizionamento della Regione Liguria, inquadrato nel Sistema di Riferimento nazionale ETRF2000-2008.0, sono stati georiferiti quattordici target (Fig. 3) utilizzati quali punti di appoggio o Ground Control Point (GCP) per la georeferenziazione delle nuvole fotogrammetrica e laser scanner.

I target sono stati disposti in modo da vincolare il più possibile la geometria della struttura sul territorio: alcuni sono stati collocati lungo il sentiero che corre tutto intorno al recinto, gli altri sul terrapieno, sia in corrispondenza dei bastioni che intorno alla torre, e, per ultimo, è stato posto un target sul terrazzo di quest'ultima. In tal modo le nuvole di punti sono state inquadrate all'interno del medesimo sistema di riferimento, permettendo la comparazione finale dei risultati ottenuti attraverso le elaborazioni condotte mediante due differenti software.



Fig. 3. Alcuni dei target utilizzati.

3 Elaborazione dei dati

3.1 Laser scanner

Per l'acquisizione dell'interno del Forte e un rilievo più accurato della piazza d'armi, è stato impiegato il laser scanner SLAM [6] Leica BLK ARC. Per diverse

Integrazione tra Dati Limnologici In Situ e Osservazioni Satellitari Multi-Sensore per il Monitoraggio dei Laghi Subalpini Italiani

Nicola Ghirardi[1,2], Raffaella Frank[1], Monica Pinardi[1], Salvatore Mangano[1], Anna Joelle Greife[1,3], Claudia Giardino[1], Mariano Bresciani[1]

[1] CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Via Alfonso Corti 12, 20133 Milano, Italia (ghirardi.n@irea.cnr.it, frank.r@irea.cnr.it, pinardi.m@irea.cnr.it, mangano.s@irea.cnr.it, greife.j@irea.cnr.it, giardino.c@irea.cnr.it, bresciani.m@irea.cnr.it)
[2] CNR – Istituto per la BioEconomia, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italia
[3] Università di Milano – Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali, Via Giovanni Celoria, 2, 20133 Milano, Italia

Abstract. Gli ecosistemi lacustri sono attualmente sottoposti a pressioni antropiche e climatiche, rendendo prioritario un monitoraggio efficace. L'integrazione tra dati satellitari e misurazioni in situ fornisce informazioni cruciali per la caratterizzazione e la tutela della qualità delle acque. Inoltre, l'utilizzo congiunto di diversi sensori ottici satellitari consente di valutare la variabilità intragiornaliera di alcuni parametri chiave, quali la concentrazione di clorofilla-a e solidi sospesi.

Parole chiave: Telerilevamento, Limnologia, Laghi subalpini, Qualità delle acque.

1 Introduzione

I laghi subalpini sono attualmente sottoposti a crescenti pressioni antropiche, tra cui il turismo intensivo, l'eutrofizzazione e gli impatti sempre più marcati dei cambiamenti climatici. Tali fattori di stress stanno compromettendo gli ecosistemi d'acqua dolce favorendo la comparsa sempre più frequente di fioriture algali e cianobatteriche, compromettendo la biodiversità e la qualità complessiva delle acque. Per affrontare queste criticità si rende necessario lo sviluppo di sistemi di monitoraggio efficaci, continuativi e integrati. In questo contesto si inseriscono diversi progetti di ricerca nazionali e internazionali volti a coniugare le innovative tecniche di telerilevamento con la gestione ambientale legata alla limnologia classica.

Il Progetto DiMark è un'iniziativa transnazionale focalizzata sulla regione alpina e subalpina con l'obiettivo di migliorare la gestione delle acque dolci, l'adattamento climatico e la prevenzione dei rischi idrici. A tale scopo si propone di integrare dati limnologici tradizionali misurati in situ ed osservazioni satellitari per sviluppare strumenti di visualizzazione e modelli di preallarme per il rischio cianobatterico, a supporto delle decisioni di enti pubblici e gestori del territorio.

Il Progetto Space It Up è invece un programma di ricerca nazionale finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiani e dal Ministero dell'Università e della Ricerca, volto a rafforzare le competenze scientifiche e tecnologiche dell'Italia nel settore spaziale. Nell'ambito dello Spoke 7, dedicato allo sviluppo di tecnologie per il monitoraggio ambientale e la sostenibilità, l'attività del nostro gruppo di ricerca si inserisce nella sperimentazione di metodologie innovative per la stima degli indicatori della qualità dell'acqua e per l'analisi delle dinamiche ambientali in contesti lacustri caratterizzati da diverse proprietà ottiche.

Il progetto AQST lago di Varese, finanziato da Regione Lombardia, mira alla salvaguardia e al risanamento del lago di Varese, con il fine di raggiungere il buono stato chimico ed ecologico delle acque tramite approfondimenti tecnico-scientifici e interventi infrastrutturali mirati. In questo contesto, l'attività di monitoraggio prevede la mappatura della distribuzione delle macrofite e della concentrazione di clorofilla-a da immagini satellitari, consentendo un'analisi spazio-temporale dei produttori primari.

Il presente lavoro si colloca a cavallo di questi progetti, combinando dataset limnologici in situ ed osservazioni satellitari multi- e iperspettrali per valutare l'efficacia del telerilevamento nel monitoraggio della qualità delle acque lacustri. Nello specifico gli obiettivi principali sono: I) Valutare il grado di concordanza tra misure limnologiche in situ (temperatura superficiale dell'acqua, trasparenza e concentrazione di clorofilla-a) e prodotti satellitari multispettrali a lungo termine, con un focus su due laghi target italiani (Como e Garda). II) Valutare un approccio multi-sensore basato sull'integrazione di immagini multi- e iperspettrali per catturare eventuali variazioni intragiornaliere dei parametri di qualità dell'acqua (concentrazioni di clorofilla-a e solidi sospesi) sui laghi di Garda e Varese.

2 Materiali & Metodi

2.1 Aree di studio

Per questo studio sono state selezionate tre aree di studio italiane: i laghi di Como, Garda e Varese (Fig. 1).

Il Lago di Como è uno dei più grandi laghi subalpini profondi del Nord Italia (45.990° N, 9.262° E). Caratterizzato da una superficie di 146 km^2 e un volume d'acqua di 22.5 km^3, raggiunge una profondità media di 154 m. A causa della sua morfologia e delle condizioni climatiche locali, nei periodi più caldi dell'anno si sviluppa una marcata stratificazione termica, mentre la miscelazione completa si verifica solamente in corrispondenza di inverni particolarmente rigidi [2]. Sotto il profilo trofico, il Lago di Como è classificato come meso-eutrofico, con concentrazioni primaverili di fosforo totale pari a circa 25 mg m^{-3} [3].

Con una superficie di 368 km^2 e un volume d'acqua di 49 km^3, il Lago di Garda costituisce il maggior bacino italiano e rappresenta uno dei principali laghi subalpini profondi del Nord Italia (45.633° N, 10.667° E). Dal punto di vista morfologico, la porzione settentrionale raggiunge una profondità massima di 350 m, mentre il settore meridionale si allarga in un bacino più ampio e meno profondo, caratterizzato da una profondità media di 65 m. Il regime termico è caratterizzato dalla formazione estiva

della termoclina, mentre la circolazione olo-omomittica si verifica solo durante gli inverni più rigidi e ventosi [4]. Classificato come lago oligo-mesotrofico, il Garda presenta marcate fluttuazioni stagionali della qualità dell'acqua: la concentrazione di clorofilla-a può variare da 0.5 mg m^{-3} in inverno fino a picchi estivi di 12 mg m^{-3}, mentre la concentrazione di solidi sospesi oscilla tra 0.1 e i 5.5 g m^{-3} [5].

Infine, il Lago di Varese è un bacino prealpino di origine glaciale situato anch'esso in Nord Italia (45.817° N, 8.733° E), caratterizzato da una superficie di circa 14.8 km^2 e una profondità media di 10.7 m. A causa della ridotta profondità e della conformazione del bacino, il lago sviluppa una marcata stratificazione termica estiva, seguita da una miscelazione completa delle acque nei mesi invernali. Sotto il profilo trofico, nonostante i continui sforzi di gestione, il lago rimane eutrofico, con ricorrenti fioriture algali e condizioni di ipossia nei mesi più caldi [5].

2.2 Confronto tra i prodotti DiMark e Alplakes

Per la validazione dei prodotti satellitari nei laghi di Como e Garda sono stati utilizzati i dati raccolti in situ ed integrati all'interno del dataset DiMark. Questo archivio raccoglie misure relative a 42 laghi e comprende 11 differenti parametri limnologici misurati nell'arco temporale compreso tra il 1974 e il 2025.

Ai fini del presente studio sono stati selezionati tre parametri chiave per il monitoraggio della qualità delle acque: la temperatura superficiale dell'acqua (LSWT), la trasparenza misurata tramite disco di Secchi (SD) e la concentrazione di clorofilla-a (CHL). Questi dati in situ sono stati confrontati con i prodotti satellitari estratti dalla piattaforma Alplakes, contenente osservazioni acquisite da sensori ottici quali Sentinel-2 MSI (S2), Sentinel-3 OLCI (S3) e da sensori termici quali Landsat-8 TIRS (L8) e Landsat-9 TIRS-2 (L9).

L'estrazione dei valori satellitari in corrispondenza delle stazioni di campionamento in situ è stata effettuata definendo una regione di interesse (ROI) centrata sulle coordinate geografiche dei dati in situ, con una finestra spaziale di 3x3 pixel. Per garantire un confronto robusto dal punto di vista statistico, sono stati considerati validi i match-up caratterizzati da una discrepanza massima temporale di ±2 giorni. L'accuratezza dei confronti è stata valutata mediante le seguenti metriche statistiche: il coefficiente di correlazione di Pearson (r), il Mean Absolute Error (MAE), il Root Mean Square Error (RMSE) e il Median Absolute Percentage Error (MdAPE).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i-y_i|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MdAPE = \text{median}\left(\left|\frac{y_i-x_i}{x_i}\right| 100\%\right), i = 1, \dots N \quad (4)$$

dove x_i rappresenta i valori in situ, y_i rappresenta i valori satellitare derivati da Alplakes, e n rappresenta il numero totale di osservazioni.

2.3 Analisi delle dinamiche intra-giornaliere

Per cogliere le dinamiche intra-giornaliere dei laghi di Garda e Varese sono state impiegate immagini ottiche satellitari acquisite da diversi sensori multi- e iperspettrali. Le caratteristiche tecniche di ciascun sensore sono riassunte nella Tabella 1.

Tab. 1. Caratteristiche principali dei sensori utilizzati in questo studio.

Satellite	Sensore	Risoluzione spaziale	Numero di bande	Risoluzione spettrale	Tempo di rivisitazione
PRISMA	PRISMA	30 m	55	10-12 nm	7-29 giorni
EnMap	EnMap	30 m	79	6.5-10 nm	4-27 giorni
ISS	EMIT	60 m	70	7.4 nm	3-5 giorni
PACE	OCI	1000 m	159	5 nm	1 giorno
Landsat-8	OLI	30 m	5	10-20 nm	16 giorni
Landsat-9	OLI+	30 m	5	10-20 nm	16 giorni
Sentinel-2	MSI	10 m	9	20-30 nm	5 giorni
Sentinel-3	OLCI	300 m	15	5-20 nm	1 giorno
Aqua	MODIS	1000 m	10	5-13 nm	1-2 giorni
Terra	MODIS	1000 m	10	5-13 nm	1-2 giorni
SNPP	VIIRS	750 m	5	20-21 nm	1 giorno
JPSS	VIIRS	750 m	5	18-20 nm	1 giorno

L'approccio metodologico applicato nel presente lavoro è stato originariamente sviluppato da Ghirardi et al. (2026) sul Lago Trasimeno [6]. La catena di elaborazione prevede l'acquisizione del dato satellitare grezzo, l'applicazione della correzione atmosferica per la stima delle Remote Sensing Reflectances (Rrs) e la successiva implementazione di un modello bio-ottico per generare mappe di concentrazione dei parametri di qualità dell'acqua.

Per valutarne la scalabilità, la metodologia è stata estesa a bacini caratterizzati da differenti condizioni trofiche. Nello specifico, la selezione delle date definitive è stata effettuata sulla base di tre criteri principali: la presenza di almeno un'immagine iperspettrale, condizioni meteorologiche favorevoli (assenza o ridotta copertura nuvolosa) e la disponibilità simultanea di almeno due immagini multispettrali per la medesima giornata. In dettaglio, sono state identificate 11 date per il Lago di Garda e 6 date per il Lago di Varese nel periodo compreso tra il 2020 e il 2025.

Analogamente a quanto svolto per il Lago Trasimeno, i prodotti iperspettrali (PRISMA, EnMap, PACE) e le immagini MODIS e VIIRS, sono state acquisite come prodotti L2 (già corretti atmosfericamente). Al contrario, i dati S3, S2 e Landsat 8/9 sono stati scaricati come L1 e successivamente sottoposti a correzione atmosferica

mediante algoritmi specifici: POLYMER [7,8] per S3, Sen2Water [9] per S2 e il codice di trasferimento radiativo 6SV [10] per i dati Landsat. Le immagini così elaborate sono state ritagliate spazialmente tramite uno shapefile relativo alle acque otticamente profonde, mascherando contestualmente i pixel contaminati da nuvole, ombre o glint superficiale. Ove necessario, i dati sono stati convertiti in Rrs dividendo per π.

Infine, la stima dei parametri di qualità dell'acqua quali CHL e SPM, è stata effettuata applicando ai dati Rrs il modello bio-ottico BOMBER [11], basato sui risultati di Lee et al. (1999) [12] per la ricostruzione delle proprietà ottiche della colonna d'acqua. Il modello è stato eseguito nella configurazione "deep water", in modo da escludere l'influenza del fondale dal segnale spettrale.

3 Risultati e Discussione

3.1 Confronto tra dati in situ e dati satellitari

I risultati ottenuti dal confronto tra i dati in situ presenti all'interno del dataset DiMark e i corrispondenti dati satellitari sono mostrati nella Tabella 2.

Dai risultati emerge una buona coerenza complessiva tra i dati satellitari e quelli in situ, con le migliori prestazioni registrate per la LSWT, che mostra una correlazione quasi perfetta in entrambi i laghi target. Al contrario, i restanti due parametri presentano un margine di errore relativo più elevato, con le metriche della CHL che evidenziano la maggiore dispersione e sovrastima soprattutto nei valori bassi, in particolare nel Lago di Como.

Tab. 2. Metriche statistiche ricavate dal confronto tra dati in situ e dati satellitari, con una discrepanza massima di ±2 giorni. LSWT (temperatura superficiale del lago), SD (profondità del Disco di Secchi) e CHL (concentrazione di clorofilla-a).

Lago/Parametro	N	MAE	RMSE	MdAPE	r Person
Como – LSWT [°C]	45	1.46	1.84	8.24	0.97
Como – SD [m]	27	1.98	2.48	24.42	0.84
Como – CHL [mg m^{-3}]	28	2.27	2.64	68.16	0.87
Garda – LSWT [°C]	67	1.25	1.86	4.54	0.97
Garda – SD [m]	68	1.46	1.79	16.45	0.70
Garda – CHL [mg m^{-3}]	58	0.76	0.93	25.23	0.54

3.2 Dinamiche intra-giornaliere per i laghi di Garda e Varese

L'efficacia dell'approccio multi-sensore ha mostrato dinamiche differenti in funzione del livello trofico dei bacini analizzati.

In un lago oligo-mesotrofico come il Garda, le condizioni di qualità dell'acqua si sono mantenute complessivamente stabili durante i giorni presi in analisi: le concentrazioni di SPM e CHL sono risultate basse e prive di variazioni evidenti intra-giornaliere. Ciononostante, le stime derivate dalle immagini multi- e iperspettrali hanno

evidenziato una notevole coerenza inter-sensore, confermando l'efficacia degli algoritmi di correzione atmosferica applicati e avvalorando la robustezza dell'approccio multi-sensore. In Figura 1 sono riportati un paio di esempi esplicativi.

I vantaggi di questo metodo si manifestano in modo più evidente in contesti eutrofici come il Lago di Varese, dove la qualità dell'acqua è notevolmente più dinamica. L'integrazione di più sensori satellitari ha infatti permesso di rilevare variazioni a breve termine in due giorni distinti. L'11 aprile 2025, la concentrazione di CHL ha registrato un moderato incremento nelle prime ore del mattino seguito da una graduale diminuzione (Fig. 2A), suggerendo una dinamica diurna potenzialmente legata alla risalita del fitoplancton dagli strati più profondi indotta dal vento o dalle correnti. Per contro, l'11 agosto 2025 è stato osservato un progressivo aumento della CHL tra le 9:20 UTC e le 14:15 UTC (Fig. 2B), che può essere riconducibile all'incremento dell'irraggiamento solare e della temperatura dell'aria, in accordo con quanto riportato da Schuback e Tortell (2019) [13]. Al contrario, le concentrazioni di SPM si sono mantenute sostanzialmente stabili in entrambe le giornate osservate.

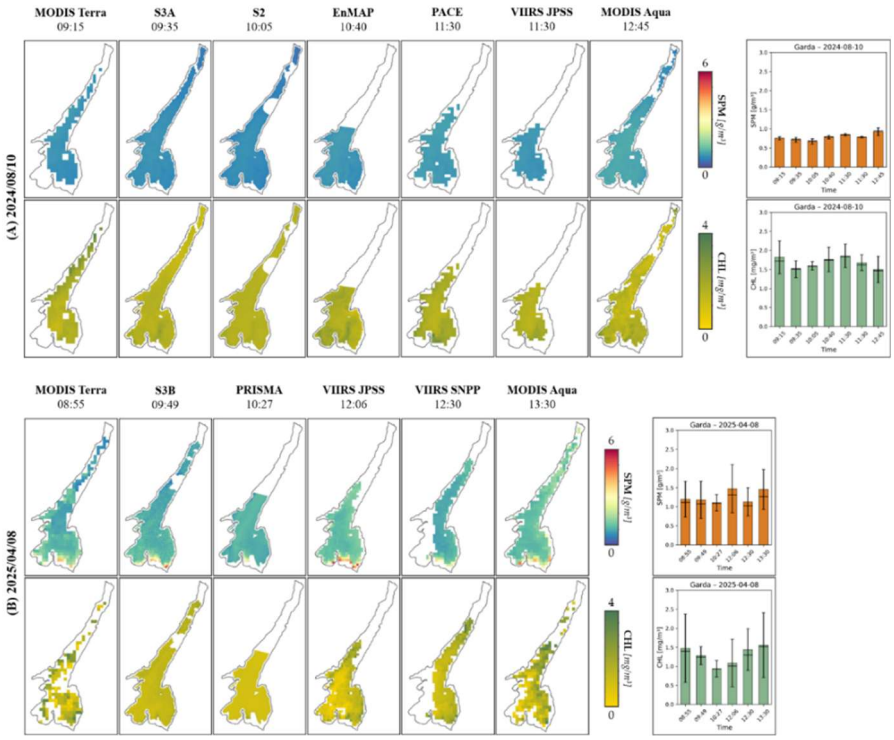


Fig. 1. Mappe di concentrazione di SPM e CHL per il Lago di Garda acquisite con diversi sensori multi- e iperspettrali in due date selezionate: 10/08/2024 (A) e 08/04/2025 (B). A destra sono riportati i valori medi, le mediane e le deviazioni standard delle concentrazioni.

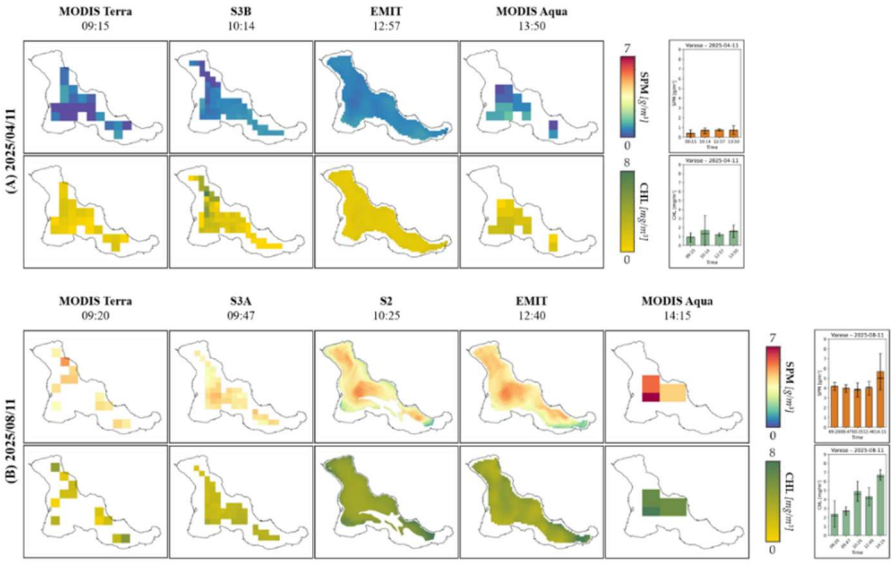


Fig. 2. Mappe di concentrazione di SPM e CHL per il Lago di Varese acquisite con diversi sensori multi- e iperspettrali in due date selezionate: 11/04/2025 (A) e 11/08/2025 (B). A destra sono riportati i valori medi, le mediane e le deviazioni standard delle concentrazioni.

4 Conclusioni

Il presente lavoro ha valutato la coerenza e l'efficacia dell'integrazione tra dati limnologici in situ e osservazioni satellitari multi- e iperspettrali per il monitoraggio della qualità delle acque in una serie di laghi target italiani.

Il confronto tra i dati in situ e quelli satellitari sui laghi di Como e Garda ha confermato l'elevata affidabilità del telerilevamento. In particolare, è emerso un ottimo accordo per la LSWT e una buona coerenza per la trasparenza e la concentrazione di CHL, sebbene per questi ultimi due parametri ci sia una maggiore dispersione dei dati.

L'analisi delle dinamiche intra-giornaliere ha evidenziato come, nei laghi oligotrofici, i parametri di CHL e SPM si mantengono stabili nell'arco della giornata, avvalorando la robustezza della correzione atmosferica e la scalabilità dell'approccio multi-sensore. In bacini eutrofici, la frequenza temporale garantita dalla combinazione di più sensori ha consentito invece di rilevare repentine variazioni intra-giornaliere della concentrazione di CHL.

A livello applicativo, la sfida principale risiede nella selezione di algoritmi di correzione atmosferica adeguati a ciascun sensore e area di studio. Una seconda priorità riguarda l'ampliamento del dataset di immagini disponibili, prospettiva che sarà a breve concretizzata da lancio di nuove missioni iperspettrali (es. CHIME).

Ringraziamenti

Il presente studio è stato condotto nell'ambito del progetto "Space It Up", finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) (contratto n. 2024-5-E.0 – CUP n. I53D24000060005). La ricerca è stata inoltre supportata e cofinanziata dal progetto DiMark, all'interno del programma Interreg Alpine Space, con il contributo dell'Unione Europea, dell'Ufficio federale svizzero per lo sviluppo territoriale e dei cantoni di Appenzello Interno, Lucerna, Nidvaldo, Svitto, Turgovia, Uri, Vallese, Zugo e Zurigo. Si ringrazia, infine, l'Accordo Quadro di Sviluppo Territoriale (AQST) Lago di Varese, finanziato da Regione Lombardia.

Riferimenti bibliografici

1. Alplakes Homepage, https://www.alplakes.eawag.ch/, ultimo accesso 2026/09/09.
2. Salmaso, N., & Mosello, R. Limnological research in the deep southern subalpine lakes: synthesis, directions and perspectives. Advances in Oceanography and Limnology, 1(1), 29-66 (2010).
3. Salmaso, N., Buzzi, F., Cerasino, L., Garibaldi, L., Leoni, B., Morabito, G., ... & Simona, M. Influence of atmospheric modes of variability on the limnological characteristics of large lakes south of the Alps: a new emerging paradigm. Hydrobiologia, 731(1), 31-48 (2014).
4. Salmaso, N. Vertical mixing as a determinant of trophic status in deep lakes: a case study from two lakes south of the Alps (Lake Garda and Lake Iseo). Journal of Limnology. (2003).
5. Premazzi, G., Dalmiglio, A., Cardoso, A.C., & Chiaudani, G. Lake management in Italy: the implications of the Water Framework Directive. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 8(1), 41-59 (2003).
6. Ghirardi, N., Bresciani, M., Fabbretto, A., Pellegrino, A., Panizza, L., Padula, R., ... & Giardino, C. Intra-day analysis of water quality parameters in a highly dynamic shallow lake from multiple satellite sensors. Water Quality Research Journal, 61(3), 223–246 (2026).
7. Steinmetz, F., Deschamps, P.Y., & Ramon, D. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. Optics express, 19(10), 9783-9800 (2011).
8. Steinmetz, F., & Ramon, D. Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI consistent ocean colour products using POLYMER. In Remote sensing of the open and coastal ocean and inland waters, 10778, 46-55 (2018).
9. Sen2Water GitHub, https://github.com/bcdev/sen2water.git, ultimo accesso 2026/09/09.
10. Vermote, E.F., Tanré, D., Deuze, J.L., Herman, M., & Morcette, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 35(3), 675-686 (1997).
11. Giardino, C., Candiani, G., Bresciani, M., Lee, Z., Gagliano, S., & Pepe, M. BOMBER: A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images. Computers & Geosciences, 45, 313-318 (2012).
12. Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., and Patch, J.S. Hypespectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. Applied Optics, 38, 3831-3843 (1999).
13. Schuback, N., & Tortell, P.D. Diurnal regulation of photosynthetic light absorption, electron transport and carbon fixation in two contrasting oceanic environments. Biogeosciences, 16(7), 1381-1399 (2019).

problematiche occorse nel rilievo, hanno portato alla realizzazione di sette nuvole di punti disgiunte che sono state pulite da informazioni non rilevanti, come la vegetazione, mediante il software Cloud Compare [2]. Successivamente sono state allineate utilizzando i target ed una serie di punti naturali in corrispondenza degli elementi architettonici maggiormente riconoscibili all'interno delle diverse acquisizioni. Infine, la nuvola così ottenuta è stata georiferita mediante rototraslazione basata sulle coordinate GNSS dei target rilevate in campo, ottenendo uno scarto quadratico medio inferiore a 3 cm (Fig. 4). È importante, tuttavia, evidenziare che per una svista il target posizionato sul terrazzo non risulta purtroppo identificabile nella nuvola di punti complessiva.



Fig. 4. Pulizia, assemblaggio e georeferenziazione della nuvola di punti laser scanner SLAM

3.2 Fotogrammetria

Il rilievo fotogrammetrico da drone è stato integrato con quello da terra per includere alcune parti scarsamente visibili dall'alto e per cogliere maggiori dettagli. Il dataset risultante è stato quindi importato ed elaborato separatamente in due diversi software, Agisoft Metashape [1], comunemente utilizzato in ambito geomatico, e RealityScan [7], prodotto da Epic Games e gratuito entro certe condizioni di carattere commerciale, con lo o scopo di comparare le procedure di elaborazione e i risultati ottenuti nei due modi. In entrambi i casi si è proceduto ad un primo allineamento delle immagini e alla calibrazione delle camere. Successivamente si è passati alla fase di collimazione dei Ground Control Point (GCP) georeferenziati. Tale fase si è rivelata più complessa del previsto, poiché una parte consistente delle immagini da drone è risultata sovraesposta. Per motivi logistici, infatti, i voli sono stati effettuati nelle ore centrali della giornata, in una situazione caratterizzata da forte luce solare, causando localmente la perdita di contrasto e conseguente dettaglio. Per garantire un numero adeguato di punti omologhi sono stati quindi collimati manualmente punti naturali, stabili e facilmente riconoscibili. I target che in questa fase hanno portato a maggiori problemi sono stati soprattutto quello sul tetto e quelli lungo i sentieri prossimi alle mura del recinto. Completata la collimazione è stato eseguito un nuovo allineamento del blocco fotogrammetrico in entrambi i software, con conseguente stima dei parametri di orientamento delle camere e produzione della cosiddetta nuvola di punti sparsa.

Successivamente, i processi di elaborazione fotogrammetrica delle cosiddette nuvole dense, sono stati condotti in parallelo in Metashape e RealityScan, seguendo le differenti procedure in relazione alle specifiche modalità di gestione ed integrazione dei dati adottate dai due software.
La nuvola densa ottenuta con Metashape (Fig. 5) e quella ottenuta con RealityScan (Fig. 6) sono entrambe qualitativamente valide, ma per un confronto quantitativo occorre tenere conto del fatto che quest'ultimo introduce l'informazione geometrica proveniente dal rilievo laser nella stessa realizzazione della nuvola sparsa. RealityScan, infatti, importa i dataset SLAM, consentendo di individuare manualmente le corrispondenze tra il dataset fotogrammetrico e quello laser scanner. Sulla base di tali vincoli è stato quindi effettuato l'allineamento delle immagini, ottenendo una nuvola sparsa allineata con il rilievo SLAM.



Fig. 5. Nuvola di punti densa georiferita ottenuta in Metashape.



Fig. 6. Nuvola di punti densa georiferita ottenuta in RealityScan.

4 Confronto

Nell'ultima fase del progetto sono state confrontate quantitativamente le nuvole dense fotogrammetriche generate utilizzando Metashape e RealityScan relativamente ad un'area campione corrispondente alla facciata principale della torre. Preliminarmente le due nuvole sono state filtrate e rese omogenee dal punto di vista della densità di punti mediante un sotto campionamento spaziale con passo pari ad 1 cm, al fine di ridurre possibili influenze sul confronto delle differenti distribuzioni dei punti. A partire dai Data set così ottenuti sono stati quindi generati due DSM (Digital Surface Model) delle superfici con risoluzione 1 cm, utilizzando come direzione di proiezione la normale alla superficie stessa e assumendo per ciascuna cella il valore mediano. I DSM sono stati successivamente confrontati mediante l'algoritmo di CloudCompare M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison), assumendo il DSM derivato da RealityScan come riferimento. Il confronto ha restituito i valori delle distanze tra le due superfici rappresentandole in un istogramma (Fig. 7); la distribuzione evidenzia una maggiore concentrazione prossima allo zero con una marcata dispersione dei valori. La distanza media risulta pari a circa +2,8 cm, la mediana a circa +2 cm con deviazione standard pari a circa 11 cm; circa il 42% dei valori ricade entro ±5 cm, il 63% entro ±10 cm, mentre il 90% entro ±20 cm. Tali risultati non sono certamente soddisfacenti e per comprenderne le cause occorre valutarne la distribuzione spaziale; la mappa M3C2 evidenzia infatti un gradiente pressoché continuo, con valori prevalentemente negativi nella parte inferiore a sinistra della facciata e progressivamente positivi procedendo in diagonale verso destra. Tale comportamento indica un sistematismo riconducibile ad una leggera rotazione tra le nuvole ottenute con Metashape e con RealityScan.

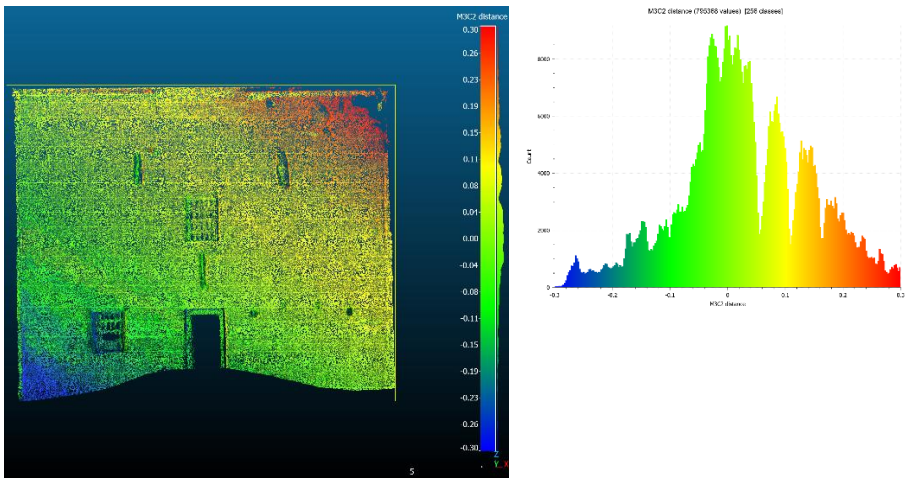


Fig. 7. Distribuzione e spaziale e relativo istogramma delle distanze tra le nuvole di punti fotogrammetriche dense della facciata principale della torre, generate in Metashape e RealityScan, confrontate con l'algoritmo M3C2 in CloudCompare.

Il risultato appare compatibile con il differente processo adottato nei due software: in Metashape infatti il risultato è maggiormente dipendente dalla collimazione dei GCP e dei punti naturali. In particolare, siccome il punto rilevato sulla copertura e all'esterno del recinto erano difficilmente identificabili nelle immagini a causa della forte sovraesposizione, l'incertezza della loro collimazione potrebbe avere influenzato il posizionamento globale del blocco fotogrammetrico, introducendo una componente rotazionale residua che è stata evidenziata dal processo.

In RealityScan, l'integrazione della nuvola da SLAM ha contribuito a ridurre l'influenza dei possibili errori di collimazione dei GCP, fornendo un riferimento geometrico aggiuntivo e rendendo più robusto l'orientamento complessivo del modello. Tuttavia, l'impossibilità di collimare sulla nuvola laser il target presente sul terrazzo in quota, potrebbe avere reso labile la rotazione della stessa nuvola densa.

In conclusione, si rinnova l'importanza di un buon rilievo integrato fotogrammetrico e laser scanner, sia come progettazione geometrica, sia in termini di qualità delle immagini e di una buona distribuzione dei Ground Control Point. Infatti se la geometria del laser scanner può essere considerata un valido appoggio, dall'altro il suo inquadramento nel sistema di riferimento comune è di particolare importanza.

Riferimenti bibliografici

1. Agisoft Metashape https://www.agisoftmetashape.com
2. Cloud Compare 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project https://www.cloudcompare.org
3. Finauri, S.: Forti di Genova – Storia, tecnica e architettura dei fortini difensivi. Edizioni Servizi Editoriali, Genova (2007) ISBN 8889384271, 9788889384275
4. Forti, L. C.: Le fortificazioni di Genova. 3a ed. Stringa Editore, Genova (1971).
5. Ministero della Cultura - Programmazione e Attuazione Strategica Nazionale e Comunitaria, sottoprogetto Forte Puin https://programmazionestrategica.cultura.gov.it/forte-puin/
6. Paris, L., Rossi, M.L., Quantità e qualità nell'utilizzo della tecnologia SLAM per il rilievo dell'architettura. in: Misura/Dismisura 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Congresso della Unione Italiana per il Disegno. pp. 1857-1876, Franco Angeli (2024) ISBN 9788835166948
7. RealityScan https://www.realityscan.com
8. Università di Genova, Laboratori del Corso di Laurea Magistrale Archeologie: Professione e Saperi (ArcheoPES), A.A: 2026-2027 https://corsi.unige.it/corsi/11936/studenti-laboratori

Georeferenziazione diretta per elaborazioni fotogrammetriche da dati UAV: limiti e potenzialità

Giordano C.M.[1[0009-0001-1901-7844]], Lambertini A.[1[0000-0002-5896-1088]], Mandanici E.[1[0000-0003-4822-1577]], Tini M.A.[1[0000-0001-7745-640X]], Girelli V.A.[1[0000-0001-9257-9803]], Zanutta A.[1[0000-0003-4872-5222]]

[1] Dipartimento DICAM, Università di Bologna, (carmenmaria.giordano, alessandro.lambertini, emanuele.mandanici, mariaalessandra.tini, valentina.girelli, antonio.zanutta)@unibo.it

Abstract. L'integrazione delle coordinate di scatto consente la georeferenziazione diretta del modello, senza tuttavia garantirne l'accuratezza. La geometria dei voli nadirali è infatti poco favorevole alla calibrazione della camera, soprattutto alla stima della distanza principale, con ripercussioni sulla componente altimetrica. Lo studio propone sottoinsiemi di calibrazione acquisibili rapidamente e integrabili automaticamente nelle missioni, con risultati comparabili all'impiego di punti di appoggio a terra.

Parole chiave: Fotogrammetria; UAV; calibrazione; georeferenziazione diretta.

1 Introduzione

L'impiego di *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) [1,2] equipaggiati con camere RGB per rilievi di media e piccola estensione è oggi ampiamente diffuso grazie alla rapidità di acquisizione, ai costi contenuti e alla qualità dei prodotti ottenibili.
Alcuni UAV integrano moduli GNSS (*Global Navigation Satellite System)* in modalità RTK (*Real-Time Kinematic*), NRTK (*Network Real-Time Kinematic*) o PPK (*Post-Processed Kinematic*), consentendo il posizionamento accurato del velivolo durante l'acquisizione, in tempo reale o in post-processing. Conoscendo la posizione del velivolo e la geometria relativa tra antenna GNSS, IMU (*Inertial Measurement Unit*), e sensore (*lever-arm offsets, boresight angles*), è possibile ricavare le posizioni di scatto e l'assetto della camera.
Ma qual è l'impatto dell'integrazione delle informazioni di posizione e/o assetto all'interno dell'elaborazione fotogrammetrica?
I software fotogrammetrici impiegati attualmente si basano sulla tecnica *Structure-from-Motion* (SfM), il cui vantaggio risiede nella possibilità di stimare i parametri di orientamento interno ed esterno anche in assenza di informazioni a priori. Sebbene la tecnica SfM non richieda informazioni di posizione a priori, la loro integrazione può migliorare sia l'efficienza computazionale, riducendo la ricerca dei punti di legame alle immagini spazialmente vicine, sia la robustezza del processo, vincolando il network fotogrammetrico. In aggiunta a questi benefici, l'integrazione delle posizioni di scatto consente un approccio di georeferenziazione diretta del modello, ovvero in assenza di punti misurati sull'oggetto; contrapponendosi alla georeferenziazione indiretta che

risulta unicamente basata sull'utilizzo di punti di appoggio (GCP - *ground control points*), e alla georeferenziazione integrata la quale è basata sulla compensazione di entrambe queste informazioni (coordinate dei GCP e coordinate di scatto) [3].
Data quindi la possibilità di conoscere, con buona accuratezza, le posizioni di scatto, e la fattibilità di introdurle nell'elaborazione, emergono alcune questioni operative:

(i) L'utilizzo di UAV in modalità RTK, NRTK, PPK rende inessenziale la misurazione dei GCP?
(ii) Qual è l'errore atteso da una procedura di georeferenziazione diretta?
(iii) Qual è la ripetibilità di questa metodologia?

In linea generale, l'accuratezza dei prodotti fotogrammetrici dipende sia dalle incertezze associate al posizionamento sia da quelle introdotte durante l'elaborazione. Tuttavia, la variabilità dei risultati riportati in letteratura, con errori spesso riscontrati nella componente altimetrica, è verosimilmente riconducibile a una calibrazione errata della camera. Le criticità associate alla stima dei parametri di orientamento interno sono ampiamente documentate, anche nell'ambito dei sistemi UAV, indagando diverse strategie di ottimizzazione [4–7], tra cui l'uso di calibrazioni preventivamente stimate, l'adozione di differenti modelli di distorsione, l'integrazione di immagini oblique e l'impiego di punti di appoggio opportunamente distribuiti. Nonostante queste conoscenze consolidate, nei moderni flussi di elaborazione basati sulla tecnica *Structure-from-Motion*, la possibilità di stimare automaticamente i parametri di orientamento interno (*self-calibration*) può indurre a sottovalutare l'importanza delle condizioni geometriche necessarie per una corretta calibrazione della camera [8]. Tale criticità assume particolare rilevanza alla luce della crescente diffusione di UAV nei quali la disponibilità di coordinate di scatto precise [9–11] può erroneamente essere interpretata come una garanzia dell'accuratezza complessiva della ricostruzione fotogrammetrica.

2 Approccio metodologico e principali risultati

Nei moderni workflow SfM, i parametri di orientamento interno vengono generalmente stimati simultaneamente a quelli esterni (*self-calibration*). Tuttavia, ciò non garantisce necessariamente l'affidabilità della calibrazione, poiché non tutti gli schemi di presa risultano geometricamente adeguati. Un corretto calcolo dei parametri di orientamento interno richiede una geometria di presa robusta, includendo immagini convergenti, variazioni di scala e differenti orientamenti [12,13]. Questa assunzione si contrappone alla praticità di impiego, in numerosi contesti applicativi, di voli con camera in assetto nadirale, caratterizzati tuttavia da una geometria di presa debole, soprattutto ai fini della stima della lunghezza principale.
Il caso di studio in esame è servito quindi per due questioni:

(i) Analizzare e quantificare, sia dal punto di vista empirico che teorico, gli effetti di una non corretta calibrazione della camera sul modello finale;
(ii) Sperimentare un approccio operativo volto a mitigare gli errori di calibrazione della camera, garantendo al contempo il rispetto dei requisiti di automazione e rapidità, così da preservare l'efficienza operativa dei sistemi UAV.

Il dataset utilizzato per i test corrisponde all'acquisizione di un lembo lungo la costa adriatica ravennate [14,15] di estensione circa 100 x 1500 m. La porzione è acquisita tramite piattaforma DJI Matrice 300 RTK equipaggiata con camera P1 ed ottica da 24 mm. L'acquisizione è stata eseguita tramite volo automatico controllato via software DJI Pilot (v.9.0.5.5) con sovrapposizione longitudinale e trasversale rispettivamente dell'80% e 60%, ad una altezza di volo di 45 m, risultando in un GSD (*Ground Sampling Distance*) di circa 0.82 cm. Il posizionamento del velivolo è stato controllato in campo in modalità RTK, con base installata nell'area, ma i dati sono stati poi processati con approccio PPK, in modo da rimuovere, preliminarmente all'elaborazione fotogrammetrica, errori derivanti da una temporanea perdita di comunicazione [16] tra base, stazione di controllo e velivolo.
In aggiunta al dataset nadirale, lo stesso giorno è stato acquisito un sottoinsieme di scatti, eseguibile automaticamente via software UgCS (v. 5.1.2), composto da immagini acquisite a diverse altezze sia in assetto nadirale che convergente, con uno scarso impatto sul costo operativo (circa 3 minuti).
L'elaborazione fotogrammetrica è stata eseguita via Metashape (v. 2.2.2), andando ad integrare il sottoinsieme di calibrazione secondo due approcci: (1) integrazione dei dataset (nadirale + calibrazione); (2) integrazione dei soli parametri di calibrazione, derivanti dal sottoinsieme. Successivamente, i risultati delle diverse elaborazioni sono stati analizzati secondo diverse modalità: (1) RMSE su check point indipendenti; (2) analisi della stima della distanza principale; (3) analisi delle correlazioni fra i parametri di calibrazione; (4) analisi dei plot dei residui.
I risultati sui check point possono fornire una indicazione sulla bontà dei test, però in questo caso offrono solo una limitata rappresentazione del problema. Infatti, essendo gli errori legati alla calibrazione della camera, risulta essenziale in primo luogo analizzare sia la stima della lunghezza principale che le correlazioni fra i parametri di calibrazione. In particolare, quest'ultima analisi permette di evidenziare come negli approcci meramente nadirali ci sia generalmente un'alta correlazione fra i parametri di calibrazione, e quindi maggiore incertezza nella loro definizione. Tra questi un punto critico è appunto la stima della distanza principale il cui errore si propaga nella componente verticale seguendo in buona approssimazione la seguente formula:

$$\sigma_Z = \pm m \cdot |\sigma_c| \tag{1}$$

L'errore sulla componente verticale (σ_Z) risulta proporzionale all'errore di stima della distanza principale (σ_c) e al fattore di scala del fotogramma (m).
Questa formulazione cela due criticità:

(i) La correlazione con il fattore di scala del fotogramma implica che la deviazione non si manifesti necessariamente come un bias sistematico, ma possa, in presenza di variazioni di profondità e quindi della distanza di presa, compromettere non solo l'accuratezza della ricostruzione altimetrica assoluta, ma anche quella relativa, con conseguenze negative sull'affidabilità di analisi morfologiche e volumetriche.

(ii) L'errore nella stima della lunghezza principale non è quantificabile a priori; pertanto, solo un controllo basato su misure indipendenti consente di verificare l'eventuale presenza di errori sistematici.

Tuttavia, nel caso in esame, tali criticità risultano significativamente attenuate grazie all'integrazione del sottoinsieme di immagini dedicate alla calibrazione. In particolare, questa integrazione si dimostra efficace nel ridurre le correlazioni tra i parametri di calibrazione della camera, garantendo una maggiore stabilità nella stima della distanza principale, dei prodotti dell'elaborazione e dei valori riscontrati di RMSE sui punti di controllo, in modo comparabile a risultati ottenibili mediante l'impiego di punti di appoggio a terra.

3 Conclusioni

L'integrazione delle informazioni di scatto nelle elaborazioni fotogrammetriche consente di ridurre l'onere computazionale, incrementare la robustezza del calcolo e, soprattutto, adottare un approccio di georeferenziazione diretta, che prescinde dalla disponibilità di misurazioni sull'oggetto. Tuttavia, la sola conoscenza della posizione del velivolo non è sufficiente a garantire l'accuratezza della ricostruzione tridimensionale, poiché la corretta calibrazione della camera riveste un ruolo centrale. In particolare, errori nella stima della lunghezza principale possono introdurre deformazioni sistematiche nel modello. In questo contesto, i tradizionali voli con camera in assetto nadirale, pur risultando particolarmente efficienti dal punto di vista operativo, presentano una geometria di presa poco favorevole alla calibrazione, rendendo necessaria l'adozione di strategie volte a mitigare tali criticità. Una soluzione diffusa consiste nell'integrare acquisizioni oblique al volo nadirale, così da rafforzare la geometria di presa e migliorare la stima dei parametri di orientamento interno. Tale approccio comporta, tuttavia, un incremento dei tempi di acquisizione ed elaborazione. In alternativa, il presente studio propone l'impiego di sottoinsiemi di immagini rispondenti ai crismi della calibrazione, rapidamente integrabili nelle missioni automatiche e nei successivi processi di elaborazione, consentendo di ottenere risultati comparabili a quelli raggiungibili mediante l'impiego di punti di appoggio a terra.

Sebbene il ricorso a misure indipendenti rimanga fondamentale per la validazione dei prodotti fotogrammetrici in numerose applicazioni, contesti emergenziali [17] o aree difficilmente accessibili possono rendere necessario adottare strategie di rilievo prive di punti di appoggio a terra, senza tuttavia compromettere la coerenza geometrica e spaziale dei modelli ricostruiti. In tali circostanze, la georeferenziazione diretta rappresenta una soluzione necessaria, la cui affidabilità dipende non soltanto dall'accuratezza delle informazioni di posizionamento del velivolo, ma anche dalla corretta determinazione dei parametri di calibrazione della camera. Sebbene l'effettiva presenza di errori sistematici possa essere accertata esclusivamente attraverso il confronto con misure indipendenti, l'analisi dei risultati della calibrazione e delle correlazioni tra i parametri stimati può fornire indicazioni sulla robustezza della geometria di presa e, di conseguenza, sull'affidabilità della stima dei parametri di orientamento interno e possibilità di presenza di deformazioni nel modello.

Riferimenti bibliografici

1. Nex, F.; Armenakis, C.; Cramer, M.; Cucci, D.A.; Gerke, M.; Honkavaara, E.; Kukko, A.; Persello, C.; Skaloud, J. UAV in the Advent of the Twenties: Where We Stand and What Is Next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2022**, *184*, 215–242, doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006.
2. Colomina, I.; Molina, P. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2014**, *92*, 79–97, doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
3. Eltner, A.; Sofia, G. Chapter 1 - Structure from Motion Photogrammetric Technique. In *Developments in Earth Surface Processes*; Tarolli, P., Mudd, S.M., Eds.; Remote Sensing of Geomorphology; Elsevier, 2020; Vol. 23, pp. 1–24.
4. Elias, M.; Isfort, S.; Eltner, A.; Maas, H.-G. UAS Photogrammetry for Precise Digital Elevation Models of Complex Topography: A Strategy Guide. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2024**, *X-2–2024*, 57–64, doi:10.5194/isprs-annals-X-2-2024-57-2024.
5. Martin Štroner; Urban, R.; Seidl, J.; Reindl, T.; Brouček, J. Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without GCPs. *Remote Sensing* **2021**, *13*, 1336, doi:10.3390/rs13071336.
6. Losè, L.T.; Chiabrando, F.; Tonolo, F.G. Boosting the Timeliness of UAV Large Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **2020**, *9*, 578, doi:10.3390/ijgi9100578.
7. Cledat, E.; Cucci, D.A.; Skaloud, J. CAMERA CALIBRATION MODELS AND METHODS FOR CORRIDOR MAPPING WITH UAVS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2020**, *V-1–2020*, 231–238, doi:10.5194/isprs-annals-V-1-2020-231-2020.
8. Fraser, C.S. Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **2013**, *79*, 381–388, doi:10.14358/PERS.79.4.381.
9. Zhang, H.; Aldana-Jague, E.; Clapuyt, F.; Wilken, F.; Vanacker, V.; Van Oost, K. Evaluating the Potential of Post-Processing Kinematic (PPK) Georeferencing for UAV-Based Structure- from-Motion (SfM) Photogrammetry and Surface Change Detection. *Earth Surface Dynamics* **2019**, *7*, 807–827, doi:10.5194/esurf-7-807-2019.
10. Kim, H.; Hyun, C.-U.; Park, H.-D.; Cha, J. Image Mapping Accuracy Evaluation Using UAV with Standalone, Differential (RTK), and PPP GNSS Positioning Techniques in an Abandoned Mine Site. *Sensors* **2023**, *23*, 5858, doi:10.3390/s23135858.
11. Pilartes-Congo, J.A.; Simpson, C.; Starek, M.J.; Berryhill, J.; Parrish, C.E.; Slocum, R.K. Empirical Evaluation and Simulation of GNSS Solutions on UAS-SfM Accuracy for Shoreline Mapping. *Drones* **2024**, *8*, 646, doi:10.3390/drones8110646.
12. Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Boehm, J. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*; 4th ed.; De Gruyter: Berlin, 2023; ISBN 978-3-11-102935-1.
13. Remondino, F.; Fraser, Cl. Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons. *ISPRS Archives* **2006**, *XXXVI*, 266–272, doi:10.3929/ethz-b-000158067.
14. Del Bianco, F.; Avellini, G.; Marucci, F.; Costantini, F.; Pezzolesi, L.; Silvestri, S.; Giambastiani, B.M.S.; Guerrini, F.; Turicchia, E.; Franchini, M.; et al. *Baseline Report.*

Deliverable 2.1 of the LIFE NatuReef Project: Nature-Based Reef Solution for Coastal Protection and Marine Biodiversity Enhancement. LIFE22-NAT-IT-LIFE-NatuReef/101113742; Zenodo, 2024;

15. Giordano, C.M.; Girelli, V.A.; Lambertini, A.; Tini, M.A.; Zanutta, A. UAV Data Collection Co-Registration: LiDAR and Photogrammetric Surveys for Coastal Monitoring. *Drones* **2025**, *9*, 49, doi:10.3390/drones9010049.
16. Giordano, C.M.; Girelli, V.A.; Lambertini, A.; Mandanici, E.; Tini, M.A.; Archetti, R.; Ponti, M.; Zanutta, A. Evaluating Direct Georeferencing of UAV-LiDAR Data Through QGIS Tools: An Application to a Coastal Area. *Remote Sensing* **2026**, *18*, 7, doi:10.3390/rs18010007.
17. Chiabrando, F.; Giulio Tonolo, F.; Lingua, A. UAV DIRECT GEOREFERENCING APPROACH IN AN EMERGENCY MAPPING CONTEXT. THE 2016 CENTRAL ITALY EARTHQUAKE CASE STUDY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2019**, *XLII-2-W13*, 247–253, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-247-2019.

Mappatura delle Local Climate Zones e downscaling della temperatura superficiale per lo studio multitemporale della Surface Urban Heat Island

Sveva Annamaria Ellenia Giovannetti[1][0009-0002-3444-741X], Marco Ventura[1][0009-0009-3173-3438], Gabriele Lo Grasso[0009-0004-7206-3235] Emanuele Mandanici[1][0000-0003-4822-1577], Gabriele Bitelli[1][0000-0002-6118-6000]

[1] DICAM - Università degli studi di Bologna, (sveva.giovannetti2, marco.ventura9, gabriele.lograsso2, emanuele.mandanici, gabriele.bitelli)@unibo.it

Abstract. Il contributo presenta un approccio basato sulla classificazione ad oggetti per la mappatura delle Local Climate Zones nella città di Bologna. Il workflow integra immagini Sentinel-2 e WorldView-3 con Urban Canopy Parameters, segmentazione multi-livello e classificazioni rule-based e Random Forest, valutando il contributo delle diverse informazioni alla caratterizzazione della struttura urbana. In modo complementare alla mappatura delle LCZ, il contributo affronta inoltre il downscaling delle osservazioni giornaliere di Land Surface Temperature (LST) del sensore MODIS, con l'obiettivo di ottenere prodotti a una risoluzione spaziale di 100 m sull'area di Bologna. Questa componente metodologica mira a generare un dataset multitemporale utilizzabile per lo studio dei pattern termici superficiali a una scala spaziale più dettagliata. Nel loro insieme, i due approcci costituiscono una base metodologica preliminare per future analisi statistiche della variabilità della LST nelle diverse classi LCZ. In questa fase, il lavoro si concentra sullo sviluppo delle due metodologie e sulla preparazione dei rispettivi dataset, mentre la validazione rigorosa e l'interpretazione statistica delle differenze di tempoeratura tra le diverse classi LCZ rappresenterà uno sviluppo successivo.

Parole chiave: Local Climate Zones, Object-Based Image Analysis, Earth Observation, Machine Learning, Urban Remote Sensing, Land Surface Temperature, Downscaling.

1 Introduzione

La crescente urbanizzazione e gli effetti associati ai cambiamenti climatici rendono sempre più importante la caratterizzazione della struttura fisica e del comportamento termico delle città. La distribuzione degli edifici, la geometria degli spazi urbani, la presenza di vegetazione e le caratteristiche dei materiali superficiali influenzano infatti il bilancio energetico della superficie e contribuiscono a determinare la variabilità spaziale e temporale della temperatura urbana. Per comprendere tali dinamiche, risulta

quindi fondamentale integrare la caratterizzazione morfologica degli ambienti urbani con l'analisi dei loro pattern termici.

In questo contesto, il sistema delle *Local Climate Zones* (LCZ), proposto da Stewart e Oke [2], rappresenta uno standard per la classificazione degli ambienti urbani e naturali sulla base delle loro caratteristiche morfologiche, radiative e di copertura del suolo. L'integrazione di immagini satellitari a diversa risoluzione spaziale con approcci *Object-Based Image Analysis* (OBIA) consente di descrivere la complessità della struttura urbana attraverso l'analisi congiunta delle informazioni spettrali e delle caratteristiche geometriche degli oggetti [3,4]. Nel presente lavoro, le LCZ della città di Bologna sono mappate mediante un workflow gerarchico OBIA, implementato nel software eCognition (v. 10.5) e applicato a dati Sentinel-2 e WorldView-3 integrati con *Urban Canopy Parameters*.

La classificazione LCZ fornisce pertanto una rappresentazione spaziale degli ambienti urbani che può essere messa in relazione con la distribuzione della temperatura superficiale, contribuendo a interpretare le differenze termiche tra contesti caratterizzati da differenti configurazioni morfologiche e coperture del suolo. Per indagare tali relazioni non è tuttavia sufficiente disporre di una classificazione spaziale dettagliata: è necessario anche un prodotto termico che garantisca un adeguato dettaglio spaziale e una sufficiente copertura temporale. In questo senso, i prodotti MODIS forniscono osservazioni giornaliere della *Land Surface Temperature* (LST), ma la loro risoluzione spaziale di circa 1 km limita la capacità di rappresentare i gradienti termici all'interno del tessuto urbano e di distinguere le differenze associate alle singole classi LCZ.

Il *downscaling* della LST rappresenta una possibile soluzione a questo limite, consentendo di ricostruire la variabilità termica a scale spaziali più fini mediante l'integrazione delle osservazioni satellitari con informazioni descrittive della superficie [5]. In particolare, gli approcci di *machine learning*, tra cui la regressione *Random Forest*, permettono di modellare relazioni non lineari tra le caratteristiche della superficie e la distribuzione della temperatura [6]. L'integrazione tra mappatura LCZ e downscaling della LST consente così di combinare una descrizione dettagliata della struttura urbana con una rappresentazione della dinamica termica caratterizzata da una maggiore risoluzione spaziale e da una frequenza temporale giornaliera.

In questa prospettiva, il presente studio affianca alla mappatura delle LCZ di Bologna un contributo metodologico complementare, basato sul downscaling delle osservazioni giornaliere di LST MODIS fino a una risoluzione spaziale di 100 m, mantenendo il dato MODIS come riferimento termico. I prodotti ricostruiti sono destinati a supportare successive analisi statistiche della variabilità della temperatura superficiale nelle diverse classi LCZ, con l'obiettivo di mettere in relazione la configurazione spaziale degli ambienti urbani con l'evoluzione temporale dei pattern termici superficiali.

2 Area di studio e dati

L'area di studio comprende la città di Bologna, caratterizzata da una struttura urbana eterogenea nella quale coesistono il centro storico compatto, aree residenziali con differenti densità edilizie, zone produttive, infrastrutture, aree verdi e superfici naturali.

2.1 Dati per la mappatura delle Local Climate Zones

Per lo sviluppo della classificazione delle LCZ sono state utilizzate due immagini multispettrali acquisite da differenti sistemi satellitari: un'immagine Sentinel-2 Level-2A (2019) e un'immagine WorldView-3 OR2A (2017). La diversa risoluzione spaziale dei due sensori consente di analizzare la metodologia OBIA a differenti livelli di dettaglio.

Alle informazioni spettrali sono stati associati diversi parametri rappresentativi delle caratteristiche fisiche della superficie urbana. Gli Urban Canopy Parameters considerati comprendono informazioni relative alla morfologia degli edifici, alla presenza di superfici impermeabili e vegetate e alle proprietà radiative e termiche delle superfici.

Nel caso dei dati WorldView-3 è stato inoltre utilizzato un Digital Surface Model (DSM) della città di Bologna ottenuto attraverso un approccio Structure from Motion. L'integrazione del DSM con un Digital Terrain Model (DTM) [7] e con le informazioni disponibili nella Carta Tecnica Comunale (1:2000) della città di Bologna [8] ha permesso di derivare informazioni relative all'altezza degli edifici con elevato livello di dettaglio.

2.2 Dati per il downscaling della LST

La componente relativa al downscaling della LST si basa sulle osservazioni giornaliere del sensore MODIS, caratterizzate da una risoluzione spaziale originaria di circa 1 km. Questi dati forniscono la copertura temporale necessaria per studiare l'evoluzione dei pattern termici superficiali nell'area di studio. All'interno del modello vengono utilizzati dati ausiliari di tipo spaziale e ambientale, finalizzati a descrivere la variabilità delle superfici e a stimare la temperatura a una risoluzione spaziale più dettagliata, pari a 100 m.

Il dataset risultante è concepito per fornire stime giornaliere di LST a 100 m sull'area di Bologna, integrando la mappa LCZ con una dimensione temporale. I due dataset potranno essere utilizzati nelle successive analisi della variabilità termica superficiale nelle diverse tipologie urbane. La copertura temporale effettiva dei prodotti dipende dalla disponibilità e dalla qualità delle osservazioni in ingresso.

3 Metodologia

3.1 Workflow gerarchico OBIA per la mappatura delle LCZ

La classificazione delle Local Climate Zones è stata sviluppata in ambiente eCognition mediante un approccio gerarchico di Object-Based Image Analysis articolato su due livelli di segmentazione. In una prima fase, una MultiResolution Segmentation a scala fine ha definito il Level-0, sul quale è stata applicata una classificazione rule-based per individuare le principali componenti di copertura del suolo, tra cui vegetazione, alberi, edifici, superfici impermeabili e corpi idrici.

Successivamente, una seconda MultiResolution Segmentation ha aggregato gli oggetti del Level-0 in unità spaziali più ampie, formando il Level-1, maggiormente coerente con la scala delle LCZ e in grado di mantenere le informazioni derivate dal livello inferiore.

La struttura gerarchica dei due livelli di segmentazione è mostrata in Fig. 1, dove è possibile osservare il maggiore livello di dettaglio degli oggetti del Level-0 rispetto alle unità spaziali individuate al Level-1.

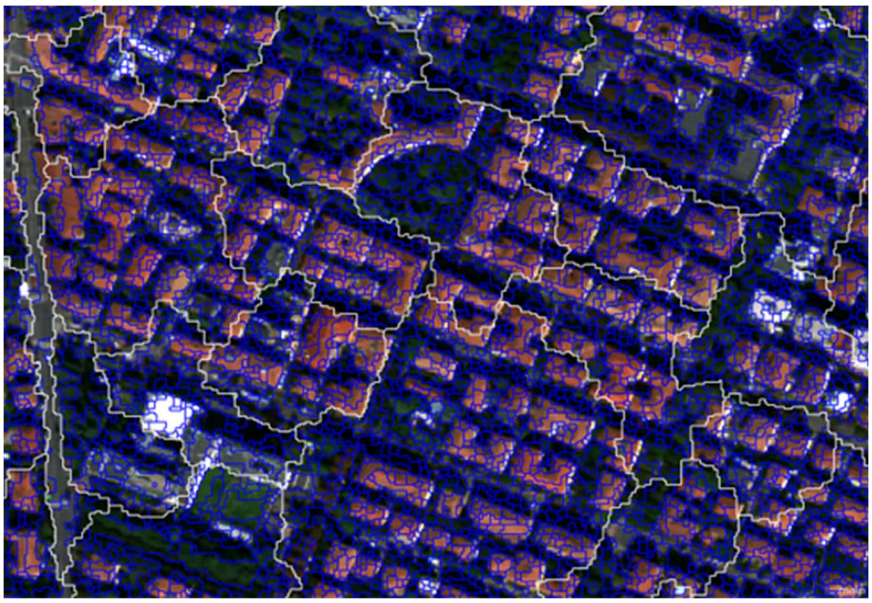


Fig. 1. Esempio della segmentazione gerarchica utilizzata nel workflow OBIA. In blu sono rappresentati gli oggetti del Level-0, mentre i contorni chiari identificano gli oggetti di dimensioni maggiori appartenenti al Level-1.

La classificazione finale delle LCZ è stata eseguita sul Level-1 mediante Random Forest, utilizzando caratteristiche spettrali e geometriche, Urban Canopy Parameters e

informazioni derivate dalla classificazione del Level-0. La stessa metodologia è stata applicata ai dati Sentinel-2 e WorldView-3 per confrontare i risultati ottenuti a differenti risoluzioni spaziali.

3.2 Downscaling della LST MODIS a 100 m

Il workflow di downscaling è finalizzato alla generazione di stime giornaliere di LST a una risoluzione spaziale di 100 m a partire dalle osservazioni MODIS a risoluzione più grossolana. A tale scopo viene utilizzato un approccio di regressione basato su Random Forest, che modella la relazione tra la LST MODIS e un insieme di variabili ausiliarie rappresentative delle caratteristiche spaziali delle superfici e delle condizioni ambientali.

Il framework modellistico prevede modelli distinti per differenti regimi termici, consentendo di variare la configurazione delle variabili predittive in funzione delle condizioni rappresentate dai dati in ingresso. I modelli addestrati vengono quindi applicati per generare stime di LST a maggiore dettaglio spaziale, mantenendo la dimensione temporale delle osservazioni MODIS.

I prodotti ottenuti sono destinati a fornire un dataset coerente per le successive analisi dei pattern termici superficiali urbani. La loro futura integrazione con la mappa LCZ consentirà di studiare la distribuzione delle temperature e la loro variabilità temporale nelle diverse tipologie urbane. Tale integrazione costituisce una fase analitica successiva e non una componente già completata del workflow attuale.

4 Valutazione della classificazione e risultati preliminari

4.1 Prestazioni e risultati della classificazione LCZ

La valutazione della classificazione è stata effettuata mediante campioni indipendenti di validazione e matrici di confusione, considerando Overall Accuracy, coefficiente Kappa, User’s Accuracy, Producer’s Accuracy e F1-score.

I risultati preliminari mostrano come la struttura gerarchica del workflow permetta di utilizzare le informazioni relative alle componenti di copertura individuate al Level-0 nella successiva classificazione delle LCZ al Level-1. Dal punto di vista quantitativo, la classificazione basata su WorldView-3 ha raggiunto un’Overall Accuracy pari all’84%, mentre quella basata su Sentinel-2 ha ottenuto un valore di circa il 73%. Tale differenza può essere ricondotta anche alla diversa risoluzione spaziale dei due dataset, che influenza il livello di dettaglio con cui vengono rappresentate le strutture urbane e definiti gli oggetti.

Le principali confusioni si osservano tra classi con caratteristiche morfologiche simili, in particolare tra Open Mid-rise e Open Low-rise. Questo evidenzia come la

separazione tra tipologie urbane vicine rimanga una delle principali criticità della classificazione.

4.2 Risultati preliminari del downscaling della LST

I risultati preliminari relativi alla componente di downscaling riguardano l'implementazione del workflow modellistico e la generazione di prodotti giornalieri di LST a una risoluzione spaziale di 100 m. Il dataset risultante è finalizzato ad aumentare il dettaglio spaziale disponibile per lo studio dei pattern termici superficiali urbani, mantenendo la copertura temporale offerta dalle osservazioni MODIS.

In questa fase, il lavoro si concentra sulla preparazione e sulla generazione dei prodotti a risoluzione spaziale più elevata. È necessaria un'ulteriore valutazione quantitativa per caratterizzare l'accuratezza e i limiti delle stime ottenute. In particolare, la verifica delle prestazioni dei prodotti di downscaling e della loro coerenza con osservazioni termiche indipendenti rappresenterà un passaggio importante prima di procedere con le analisi statistiche comparative tra le classi LCZ.

La caratterizzazione statistica della distribuzione della LST e della sua variabilità temporale nelle diverse classi LCZ mappate non è stata ancora effettuata. Tale analisi costituirà il successivo sviluppo della ricerca, dopo la valutazione dei prodotti di downscaling e la predisposizione di un riferimento spaziale e temporale coerente per il confronto con la mappa LCZ.

5 Conclusioni

Il lavoro ha permesso di sviluppare un workflow gerarchico di Object-Based Image Analysis per la mappatura delle Local Climate Zones nella città di Bologna, integrando informazioni spettrali e morfologiche a differenti scale spaziali. L’applicazione ai dati Sentinel-2 e WorldView-3 ha evidenziato l’influenza della risoluzione spaziale sulla classificazione e l’importanza dei parametri morfologici nella distinzione tra classi LCZ simili.

Gli sviluppi futuri riguarderanno l’analisi del contributo delle diverse feature, l’ottimizzazione dei parametri di segmentazione e l’approfondimento delle classi maggiormente soggette a confusione.

Parallelamente, lo sviluppo del workflow di downscaling della LST rappresenta un contributo complementare allo studio multitemporale dei pattern termici urbani. La generazione di prodotti giornalieri di LST a una risoluzione spaziale di 100 m costituisce una base preliminare per indagare la relazione tra le tipologie urbane e la temperatura superficiale. Gli sviluppi futuri riguarderanno la valutazione quantitativa dei prodotti ottenuti e la successiva analisi statistica della variabilità della LST nelle

diverse classi LCZ. Queste analisi permetteranno di valutare le potenzialità dell'integrazione tra informazioni sulla struttura urbana e dati satellitari multitemporali di temperatura superficiale nell'ambito degli studi sulla Surface Urban Heat Island a Bologna.

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito dello Spoke 7, "Space for the Sustainable Development of the Planet," attività 7.4, "Zero Emission Society," e sottosezione 7.4.2, "Monitoring Urban and Suburban Environments," del progetto Space It Up, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, ASI, e il Ministero dell'Università e della Ricerca, MUR, sotto il contratto n. 2024-5-E.0 - CUP n. I53D24000060005.

Riferimenti bibliografici

[1] Oke, T.R.: *Boundary Layer Climates*. Routledge, London (1987).

[2] Stewart, I.D., Oke, T.R.: Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12), 1879–1900 (2012).

[3] Weng, Q.: Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment* 117, 34–49 (2012).

[4] Bechtel, B., Demuzere, M., Stewart, I.D., et al.: LCZ Generator: A framework for the global mapping of local climate zones. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8(1), 19 (2019).

[5] C. Yoo, J. Im, S. Park, and D. Cho: Spatial downscaling of MODIS land surface temperature: Recent research trends, challenges, and future directions. *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. 4, pp. 609–626 (2020).

[6] C. Hutengs and M. Vohland: Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. *Remote Sensing of Environment*, vol. 178, pp. 127–141 (2016).

[7] Geoportale Regione Emilia-Romagna, dati altimetrici.

[8] Open Data Emilia-Romagna, Carta Tecnica Comunale – edifici volumetrici.

Analisi spettrale per il riconoscimento dei nidi di farfalla Euphydryas maturna con sensori multispettrali montati su UAV

Chiara Graziani[1][0009-0000-9608-8542], Andrea Maria Lingua[1][0000-0002-5930-2711], Paolo Felice Maschio[1][0000-0001-7706-9354], Beatrice Gammino[2]

[1] Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, Italia, andrea.lingua@polito.it, chiara.graziani@polito.it paolo.maschio@polito.it

[2] Aree Protette Alpi Marittime, beatrice.gammino@areeprotettealpimarittime.it

Abstract. *Euphydryas maturna* è un lepidottero diurno, presente in Italia solo in Valle Stura di Demonte (CN), le cui larve costruiscono nidi sericei sulle foglie di frassino. Il seguente lavoro descrive e valida un processo automatico di individuazione dei nidi da immagini multispettrali acquisite da drone mediante una procedura rigorosa di coregistrazione delle componenti spettrali, che permette l'applicazione di un algoritmo di classificazione deep learning basato su visual transformer.

Parole chiave: *Euphydryas maturna*, coregistrazione RGB-multispettrale, segmentazione semantica.

1 Introduzione

Euphydryas maturna (Linné, 1758) è un lepidottero diurno presente in buona parte d'Europa, ma severamente minacciato in tutto il suo areale [1]. La specie è protetta e inserita negli Allegati II e IV della Direttiva Habitat (Direttiva 92/43/CEE) ed è inoltre classificata come "Critically endangered" nella Lista Rossa delle Farfalle italiane [2]. In Italia è presente con una sola popolazione situata in valle Stura di Demonte (Cuneo): per la sua conservazione è stata istituita la Zona Speciale di Conservazione (ZSC) IT1160067 "Vallone dell'Arma" (Fig. 1) [3], sito della Rete Natura 2000 in gestione all'Ente di gestione delle Aree Protette Alpi Marittime (APAM).

L'adulto misura 3,7-4,5 cm di apertura alare e predilige habitat ecotonali caratterizzati da prati pascolo al margine di boschi misti di latifoglie con abbondanza di frassino, dove è possibile osservarla in volo tra giugno e luglio [4].

La femmina di E. maturna depone le uova in gruppi, chiamate ovature, sulla pagina inferiore delle foglie del frassino maggiore (Fraxinus excelsior). Una volta fuoriuscite dalle uova, le larve iniziano a cibarsi delle foglie di frassino, avvolte dal materiale sericeo che producono come strategia antipredatoria. Lo sviluppo si arresta in autunno quando le larve scendono dai frassini per trascorrere l'inverno all'interno della lettiera.

In primavera, i bruchi riprendono lo sviluppo nutrendosi di piante erbacee quali Ligustrum vulgare, Melampyrum pratense o Plantago sp.. Trascorsi circa 20 giorni i bruchi si impupano nella crisalide all'interno della quale avverrà la fase finale della metamorfosi e da cui uscirà l'adulto [5] [6].

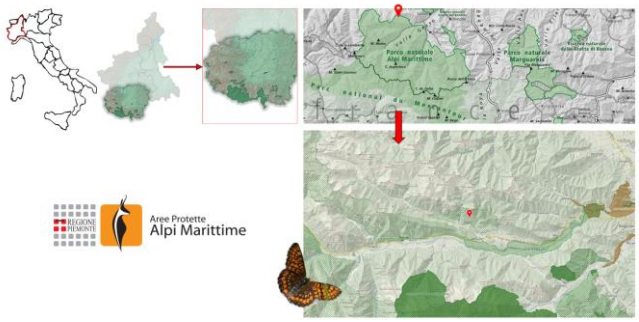


Fig. 1. Area di studio: Vallone dell'Arma (CN). La ZSC si estende su una superficie di 796,41 ettari [7].

Il monoraggio della fase larvale della specie prevede il conteggio dei nidi sericei sulle foglie di frassino, attività oggi svolta prevalentemente tramite osservazione visiva da parte di operatori esperti. Tale procedura, pur essendo fondamentale per la conservazione della specie, può risultare onerosa e limitata dalla visibilità dei nidi, dalla loro posizione sulla chioma e dalle condizioni operative in campo.
In questo contesto, la collaborazione tra APAM e il Politecnico di Torino mira a valutare la possibilità di individuare i nidi dall'alto mediante immagini multispettrali acquisite da UAV. Il lavoro presentato costituisce una prima fase sperimentale, finalizzata alla verifica della separabilità spettrale tra i nidi e gli altri elementi presenti sui rami di frassino, prima del passaggio ad acquisizioni operative da drone, nonché l'addestramento di un modello di intelligenza artificiale per il riconoscimento dei nidi.

2 Metodologia

La procedura sperimentale è stata organizzata in una sequenza di fasi successive, dalla verifica preliminare della separabilità spettrale fino alla valutazione del modello di segmentazione, come sintetizzato in Fig. 2. Il flusso comprende l'acquisizione e l'annotazione dei dati, la coregistrazione RGB–multispettrale, la costruzione del dataset, l'addestramento di SegFormer-B2 e la successiva validazione e verifica su test indipendente.



Fig. 2. Schema del flusso metodologico adottato.

2.1 Studi preliminari mediante spettrometria

Il primo passaggio è stato acquisire firme spettrali a terra mediante spettrometro Ocean Optics (Fig. 3), considerando sette classi principali (vedi Fig. 4).

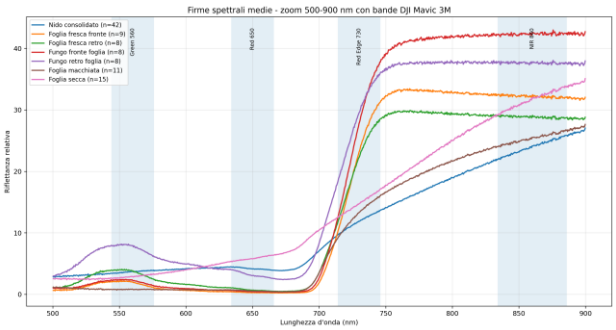


Fig. 3. Acquisizione delle firme spettrali tramite spettrometro.

Le firme, costituite da 2068 punti spettrali nel range circa 194–1116 nm, sono state ricondotte alle bande Green, Red, Red Edge e NIR del DJI Mavic 3M, calcolando la media nelle rispettive finestre spettrali (Fig. 3).
Le acquisizioni meno coerenti con le classi sono state rimosse attraverso un test diagnostico robusto basato sulla Median Absolute Deviation (MAD) [8], escludendo così 10 firme considerate non valide per la classe nido e altre sei firme per le altre classi.
La valutazione della separabilità delle classi è avvenuta attraverso tre livelli:

1. Analisi qualitativa delle differenze tra le firme lungo lo spettro.
2. Il calcolo di indici di separazione per meglio discriminare le classi, sfruttando il contrasto tra Green e Red: NGRDI, Green/Red, G-RE, GNDVI, EVI2.
3. Linear Discriminant Analysis (LDA) , validata con approccio leave-one-out, sia in configurazione multi-classe sia in modalità binaria Nido/Altro. [9]

Le metriche scelte per valutare la bontà della separabilità sono l'Accuracy, la Precisione della classe Nido, Recall della classe Nido, F1-score e la conta dei falsi positivi.



Nido di farfalla (52 firme spettrali)
Foglia fresca fronte (10 firme spettrali)
Foglia fresca retro (10 firme spettrali)
Foglia macchiata (14 firme spettrali)
Foglia secca (16 firme spettrali)
Fungo su fronte foglia (10 firme spettrali)
Fungo su retro foglia (10 firme spettrali)

Fig. 4. Firme spettrali delle classi analizzate e corrispondenza con le bande operative della camera multispettrale del DJI Mavic 3M.

2.2 I risultati delle analisi spettrometriche

L'analisi delle bande spettrali ha evidenziato una sovrapposizione significativa tra alcune classi, in particolare tra nido e foglia secca, indicando che le sole bande multispettrali non garantiscono una separazione robusta. Dopo il filtraggio MAD, il dataset spettrometrico finale è risultato composto da 101 firme, di cui 42 relative alla classe nido.

I risultati preliminari indicano che la classificazione binaria tramite LDA rappresenta l'approccio più promettente per un futuro utilizzo operativo. Il modello Nido/Altro ha raggiunto un'accuratezza globale pari al 95%, con precisione del 100%, recall dell'88.1% e assenza di falsi positivi nel dataset filtrato. Tali risultati suggeriscono che l'informazione acquisita con drone possa essere utilizzata come primo filtro per individuare candidati nido, pur richiedendo ulteriori verifiche su immagini UAV reali.

Nel complesso, la spettrometria ha confermato l'esistenza di informazione discriminante utile, ma anche una sovrapposizione non trascurabile con componenti vegetali e foglie senescenti. Questo risultato ha motivato il passaggio dalla classificazione puramente spettrale alla segmentazione diretta delle immagini UAV, nella quale informazione radiometrica, texture e contesto spaziale vengono apprese congiuntamente.

2.3 La definizione del dataset di riferimento

Il 20 luglio 2026 è stata condotta una seconda campagna per l'acquisizione di immagini RGB e multispettrali mediante DJI Mavic 3M. Il sistema integra una camera RGB da 20 MP (5280×3956 pixel) e quattro camere multispettrali da 5 MP nelle bande Green, Red, Red Edge e NIR [10].La campagna ha prodotto 913 immagini multispettrali relative alle quattro bande, associate alle corrispondenti acquisizioni RGB.
Le acquisizioni hanno interessato frassini con nidi larvali annotabili nelle immagini RGB. La geometria tridimensionale della chioma, caratterizzata da rami e foglie posti a distanze differenti dalla camera, rende non sufficiente una semplice trasformazione planare globale per sovrapporre con precisione le immagini RGB e multispettrali.



Fig. 5. Annotazione dei nidi con Segment Anything 2.0. su software CVAT [11], esportate in formato Datumaro 1.0.

2.4 Coregistrazione RGB–multispettrale

La coregistrazione tra immagine RGB e bande multispettrali è stata impostata tenendo conto della configurazione multicamera del DJI Mavic 3M e della marcata tridimensionalità delle chiome osservate a breve distanza. Sono state utilizzate le intrinseche e le distorsioni note dei singoli sensori, evitando di ricondurre il problema a una semplice trasformazione planare: i sensori RGB e multispettrali possiedono infatti centri di proiezione differenti e la posizione del punto omologo varia con la profondità della scena. L'applicazione dei soli parametri di calibrazione e distorsione forniti dal costruttore non è risultata sufficiente per ottenere una coregistrazione pixel-level: su un set diagnostico di 79 corrispondenze comuni il residuo di registrazione presentava un TRE mediano di 43,08 pixel, un RMSE di 43,79 pixel e un P95 di 48,82 pixel, evidenziando la necessità di una successiva stima della geometria relativa tra i sensori.

La geometria relativa tra la camera RGB e ciascuna banda multispettrale è stata stimata direttamente sulle immagini originali mediante estrazione e matching di feature, seguiti dalla stima robusta della matrice essenziale sui raggi calibrati. Per le bande Green, Red e RedEdge sono state impiegate corrispondenze basate su SIFT; per la banda NIR, caratterizzata da una maggiore differenza radiometrica rispetto all'RGB, è stato invece utilizzato RIFT2 (Radiation-Invariant Feature Transform 2) [12] con criterio di matching mutuale, più adatto al confronto tra immagini multimodali. [13].

La sola geometria epipolare non è tuttavia sufficiente a compensare la parallasse introdotta dalla struttura tridimensionale della vegetazione. La correzione è stata quindi completata mediante stima monoculare della geometria con MoGe-2 [14]. La relazione tra profondità e disparità è stata ricalibrata, per ciascuna immagine e per ogni banda, utilizzando le corrispondenze omologhe osservate, così da adattare scala e bias della profondità stimata alle condizioni reali di acquisizione.

L'intera catena geometrica è stata implementata attraverso la composizione numerica delle trasformazioni, mantenendo come riferimento la griglia RGB originale. Le immagini RGB e le relative annotazioni non vengono quindi ricampionate; ciascuna banda multispettrale viene invece letta direttamente dal dato RAW e campionata sul reticolo RGB mediante una sola interpolazione bilineare, evitando ricampionamenti successivi e limitando la degradazione dell'informazione radiometrica.

La calibrazione finale disparità–profondità ha prodotto MAE mediane di circa 2,3–2,7 pixel per Green, Red e RedEdge e 5,27 pixel per NIR; nel trasferimento operativo delle annotazioni, 196 dei 218 nidi sono risultati validi contemporaneamente in tutte le quattro bande.

2.5 Modello di intelligenza artificiale

La segmentazione semantica binaria distingue ogni pixel tra nido e background. È stata adottata l'architettura SegFormer-B2 [15], basata su Vision Transformer con encoder gerarchico multiscala e decoder MLP. Il modello, inizializzato da un checkpoint pre-addestrato su ADE20K, è stato adattato a un'unica classe di output.

Una prima fase sperimentale è stata dedicata alla valutazione del contributo delle bande multispettrali. Sono state confrontate tre configurazioni: A) RGB, B) Green–Red–RedEdge–NIR e C) RGB+multispettrale. Per ciascuna configurazione sono stati

eseguiti quattro esperimenti leave-one-session-out (LOSO), utilizzando a turno una delle quattro sessioni come test e mantenendo invariati tile, maschere di validità e protocollo di addestramento. La normalizzazione delle bande multispettrali è stata stimata esclusivamente sui dati appartenenti al training session, evitando contaminazioni con validation e test.
I principali parametri utilizzati nella fase comparativa sono riportati in Tab. 1.
La metrica primaria è stata $F_2 = 5PR/(4P+R)$ che attribuisce maggiore importanza alla Recall R rispetto alla Precision P, coerentemente con l'obiettivo del monitoraggio: la mancata individuazione di un nido è stata considerata più critica di una sovrasegmentazione successivamente verificabile. La soglia decisionale τ è stata ottimizzata esclusivamente sui dati di validation; il test non è stato utilizzato né per l'early stopping né per la selezione del checkpoint.
Il confronto LOSO ha prodotto un F_2 medio pari a 0,630 per RGB, 0,404 per il solo multispettrale e 0,654 per RGB+MS. Il vantaggio della configurazione combinata rispetto all'RGB è risultato quindi limitato e non uniforme tra le sessioni, mentre l'utilizzo delle bande multispettrali richiedeva una procedura aggiuntiva di coregistrazione e introduceva ulteriori vincoli di validità dei dati. Per questo motivo la soluzione operativa finale è stata sviluppata utilizzando esclusivamente l'informazione RGB.
Il dataset RGB finale comprende 218 nidi annotati e 900 tile, di cui 450 positivi e 450 negativi. La suddivisione è stata effettuata a livello di immagine sorgente e separatamente all'interno di ciascuna sessione, in modo che tile sovrapposti derivati dalla stessa immagine non potessero appartenere a insiemi differenti. Sono stati ottenuti 604 tile di training, 204 di validation e 92 di test; tutte le quattro sessioni sono rappresentate nei tre insiemi e nessuna immagine sorgente è condivisa tra essi.
Per l'addestramento finale RGB sono stati mantenuti gli stessi criteri della fase comparativa.

Tab. 1. Principali parametri utilizzati per l'addestramento e la selezione del modello SegFormer-B2 nella fase di confronto tra configurazioni RGB e multispettrali.

Parametro	Impostazione	Parametro	Impostazione
Architettura	SegFormer-B2	Configurazioni confrontate	RGB; MS; RGB+MS
Dimensione tile	768 × 768 px	Schema di valutazione	4-fold LOSO per sessione
Batch size	1	Gradient accumulation	8
Batch effettivo	8	Ottimizzatore	AdamW
Learning rate	6×10^{-5}	Weight decay	0,01
Warm-up	100 step	Gradient clipping	1
Max optimizer step	2000	Valutazione	ogni 100 step
Early stopping	6 valutazioni senza miglioramento	Data augmentation	rotazioni 90°, flip H/V

Parametro	Impostazione	Parametro	Impostazione
Loss	0,5 Focal + 0,5 Dice	Focal Loss	$\alpha = 0{,}75$; $\gamma = 2$
Metrica di selezione	F2	Soglia τ	0,05–0,95
Passo di τ	0,001	Selezione checkpoint	max F2 su validation
Uso del test	escluso da selezione e calibrazione	Pre-training	ADE20K

3 Risultati

Nel training finale RGB il valore F2 sulla validation cresce rapidamente nelle prime iterazioni, passando da 0,867 allo step 100 a valori superiori a 0,90 a partire dallo step 300. Il massimo F2 di validation, pari a 0,910, è stato raggiunto allo step 700; il training è proseguito fino allo step 1300, quando è intervenuto l'early stopping. Il checkpoint dello step 700 è stato quindi congelato come modello finale.
La soglia decisionale ottimale selezionata sulla validation è risultata $\tau = 0{,}097$. Con tale soglia il modello ha ottenuto in validation F2 = 0,910, Dice = 0,851, IoU = 0,741, precisione = 0,769 e recall = 0,954. La soglia e il checkpoint sono stati definiti senza accedere al test, successivamente valutato una sola volta.

Tab. 2. Prestazioni del modello RGB finale sulla validation e sul test.

Metrica	Validation	Test
F2	0,910	0,903
Dice	0,851	0,803
IoU	0,741	0,671
Precisione	0,769	0,678
Recall	0,954	0,985
Specificità	0,980	0,958

Sul test composto da 92 tile (46 positivi e 46 negativi), il modello ha raggiunto F_2 = 0,903, recall = 0,985, precisione = 0,678 e Dice = 0,803. La riduzione di F_2 rispetto alla validation è contenuta (−0,007), mentre il recall aumenta ulteriormente. Il comportamento è coerente con la metrica di selezione adottata: il modello privilegia la sensibilità nella localizzazione del nido, accettando una maggiore sovrasegmentazione. Le prestazioni non sono però uniformi tra le quattro sessioni, per le quali F_2 varia da 0,618 a 0,909. Tale eterogeneità suggerisce che illuminazione, struttura della chioma e dimensione apparente dei nidi continuino a influenzare la risposta del classificatore.
La valutazione qualitativa sulle immagini complete conferma che la segmentazione ricostruisce in modo generalmente coerente la posizione e l'estensione dei nidi. Per la lettura visiva dei risultati è utile sovrapporre sull'RGB il contorno della ground truth in

rosso e quello della predizione in blu, soluzione che mantiene leggibile la vegetazione e consente di individuare immediatamente omissioni e sovrasegmentazioni (Fig. 7).

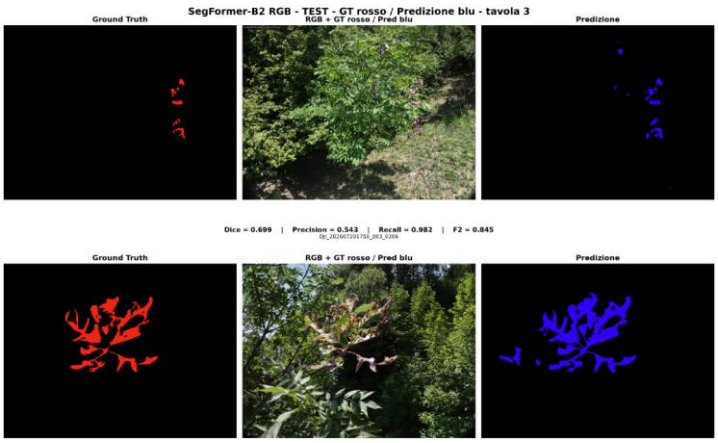


Fig. 7. Ground truth (rosso) e predizione del modello (blu). Nel caso in alto, il modello ha sovrastimato degli elementi presenti sull'alberto di frassino, nell'immagine in basso è invece riuscito a identificare un altro nido che non era stato segnalato nell'annotazione manuale.

4 Conclusioni

Il lavoro ha seguito un percorso progressivo dalla caratterizzazione spettrale dei materiali presenti sulla chioma alla segmentazione semantica delle immagini UAV. Le firme acquisite a terra hanno mostrato che i nidi di Euphydryas maturna possiedono caratteristiche spettrali riconoscibili, ma non completamente separabili da foglie secche, alterazioni e altri elementi vegetali. La classificazione LDA binaria ha fornito risultati molto buoni sul dataset spettrometrico filtrato, ma l'esperimento su immagini reali ha evidenziato che la sola informazione multispettrale non è sufficiente a sostenere una segmentazione robusta.

La coregistrazione RGB–multispettrale ha permesso di costruire un dataset multimodale coerente e di confrontare in condizioni controllate tre differenti configurazioni di input. I 12 esperimenti LOSO mostrano che la fusione RGB+multispettrale migliora solo marginalmente il valore medio di F_2 rispetto all'RGB e che il vantaggio è concentrato in una sola sessione. Considerando la maggiore risoluzione spaziale della camera RGB, la semplicità della catena di elaborazione e la possibilità di utilizzare tutte le annotazioni disponibili, la configurazione RGB-only è stata quindi adottata come soluzione operativa.

Il SegFormer-B2 finale raggiunge valori che indicano una buona capacità di individuazione dei nidi nelle acquisizioni considerate. Il test è stato separato a livello di capture, ma le quattro sessioni sono comunque rappresentate anche nel training; sarà quindi necessario verificare la robustezza del modello su campagne indipendenti, in differenti condizioni fenologiche, di illuminazione e di geometria di presa.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il personale del parco Aree Protette Alpi Marittime per il loro supporto durante le acquisizioni delle immagini da drone.

Riferimenti bibliografici

1. Swaay, Chris & Cuttelod, Annabelle & Collins, S. & Maes, Dirk & Munguira, M. & Šašić, Martina & Settele, Josef & Verovnik, Rudi & Verstrael, T & Warren, Martin & Wiemers, Martin & Wynhoff, Irma. (2010). European Red List of Butterfies.
2. Balletto, E., Bonelli, S., Barbero, F., Casacci, L.P., Sbordoni, V., Dapporto, L., Scalercio, S., Zilli, A., Battistoni, A., Teofili, C., Rondinini, C. (compilatori): Lista Rossa IUCN delle Farfalle Italiane - Ropaloceri. Comitato Italiano IUCN e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma (2015; stampa 2016).
3. Aree Protette Alpi Marittime: Un tesoro nascosto nel Vallone dell'Arma: la farfalla Euphydryas maturna. https://www.areeprotettealpimarittime.it/news/4549/un-tesoro-nascosto-nel-vallone-dell-arma-la-farfalla-euphydryas-, ultimo accesso 2026/10/13.
4. Freese, A., Benes, J., Bolz, R., Cizek, O., Dolek, M., Geyer, A., Gros, P., Konvicka, M., Liegl, A., Stettmer, C. (2006) Habitat use of the endangered butterfly Euphydryas maturna and forestry in Central Europe. Animal Conservation, 9, 3883397.
5. Wahlberg, N. (2000) Comparative descriptions of the immature stages and ecology of five Finnish melitaeine butterfly species (Lepidoptera: Nymphalidae). Entomol Fenn 11:1673 174.
6. Dolek, M., Freese-Hager, A., Geyer, A., Balletto, E., Bonelli, S. (2013) Multiple oviposition and larval feeding strategies in Euphydryas maturna (Linne, 1758) (Nymphalidae) at two disjoint European sites. Journal of Insect Conservation, 17 (2), 357-366.
7. Aree Protette Alpi Marittime: Vallone dell'Arma, ZSC IT1160067. https://www.areeprotettealpimarittime.it/ente-di-gestione-aree-protette-alpi-marittime/rete-natura-2000/vallone-dell-arma, ultimo accesso 2026/10/13.
8. Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., Licata, L.: Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. Journal of Experimental Social Psychology 49(4), 764–766 (2013). https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013.
9. Graf, R., Zeldovich, M., & Friedrich, S.: Comparing linear discriminant analysis and supervised learning algorithms for binary classification—A method comparison study. Biometrical Journal, 66, 2200098 (2022). https://doi.org/10.1002/bimj.202200098.
10. DJI Enterprise: DJI Mavic 3M - Specifications. https://enterprise.dji.com/it/mavic-3-m/specs, ultimo accesso 13/10/2026.
11. Sekachev, B., Manovich, N., Zhavoronkov, A.: Computer Vision Annotation Tool (CVAT). Zenodo (2019). https://doi.org/10.5281/zenodo.3497106.
12. Li, J., Shi, P., Hu, Q., Zhang, Y.: RIFT2: Speeding-up RIFT with A New Rotation-Invariance Technique. arXiv preprint arXiv:2303.00319 (2023). doi:10.48550/arXiv.2303.00319.
13. Li, J., Hu, Q., Ai, M.: RIFT: Multi-modal Image Matching Based on Radiation-Variation Insensitive Feature Transform. IEEE Transactions on Image Processing, 29, 3296–3310 (2020).

14. Wang, R., Xu, S., Dong, Y., Deng, Y., Xiang, J., Lv, Z., Sun, G., Tong, X., Yang, J.: MoGe-2: Accurate Monocular Geometry with Metric Scale and Sharp Details. Advances in Neural Information Processing Systems 38, 40377–40408 (2025). https://doi.org/10.52202/085713-1207.
15. Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J.M., Luo, P.: SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers. Advances in Neural Information Processing Systems 34, 12077–12090 (2021).

Mappatura di stati idroclimatici latenti nel karst mediterraneo mediante l'Hidden Markov Model

Filippo Gregori[1,2], Peter Naylor[3], Nataša Ravbar[4], Michaela De Giglio[2], Marco Dubbini[2]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma; filippo.gregori@uniroma1.it
[2] Dipartimento di Storia Culture Civiltà (DiSCi), sezione Geografia, Università di Bologna, via Guerrazzi 20, 40125 Bologna; filippo.gregori3@unibo.it, michaela.degiglio@unibo.it, marco.dubbini@unibo.it
[3] Agenzia Spaziale Europea, ESRIN, Via Galileo Galilei, 00044 Frascati; peter.jack.naylor@gmail.com
[4] ZRC SAZU, Istituto di Ricerca sul Carso, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenia; natasa.ravbar@zrc-sazu.si

Abstract. Un Hidden Markov Model gaussiano non supervisionato, applicato a sette variabili idroclimatiche mensili (1999–2016) in tre aree carsiche mediterranee, recupera dieci stati latenti ordinati da secco a umido, senza soglie predefinite. Gli stati formano unità spazialmente coerenti e una struttura di transizione quasi indipendente per area. Portata fluviale e albedo satellitare, mai usati dal modello, confermano il gradiente mappato.

Parole chiave: Hidden Markov Model, carso, mediterraneo, data-driven, climatic reanalysis, indice di aridità

1 Introduzione

Il bacino del Mediterraneo è un hotspot riconosciuto del cambiamento climatico: temperature in aumento, precipitazioni estive in calo, siccità sempre più intense. Il carso, che copre fino al 40% del territorio mediterraneo [1,2], è tra gli ambienti più esposti: suoli sottili, praticamente irrimpiazzabili su scala umana, e una connessione idraulica diretta tra superficie e sottosuolo che trasmette lo stress climatico quasi senza filtro dell'acquifero [3,4]. Il substrato carbonatico rende inoltre l'eventuale perdita di suolo sostanzialmente irreversibile alla scala temporale umana. Le mappe di riferimento oggi disponibili, l'indice di aridità United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) [5], la classificazione di Köppen-Geiger e l'indice Mediterranean Desertification and Land Use, Environmental Sensitivity Area Index (MEDALUS ESAI), offrono ciascuna una classificazione consolidata e ampiamente utilizzata, assegnando un singolo indice o una singola classe a ogni località. Resta non rappresentata una dimensione ulteriore, complementare a questa classificazione: quanto essa sia certa in un dato momento e quanto tenda a durare nel tempo. Questo lavoro

propone una rappresentazione dello stato idroclimatico come una distribuzione di probabilità su un insieme di regimi latenti, stimati senza soglie predefinite né dati di addestramento etichettati, e corredata da incertezza e persistenza esplicite.

Il metodo impiegato, un Hidden Markov Model (HMM) gaussiano, è uno strumento statistico consolidato [6], non specifico del carso: lo stesso procedimento potrebbe essere applicato, senza modifiche, a qualunque paesaggio mediterraneo semi-arido. È il contesto carsico, con la sua connessione idraulica diretta e l'irreversibilità del danno al suolo, a rendere più gravi le conseguenze pratiche del segnale che il metodo rileva, non una specificità del metodo stesso.

2 Aree di studio e dati

Lo studio copre tre aree carsiche mediterranee (AOI) lungo un gradiente da secco a umido.

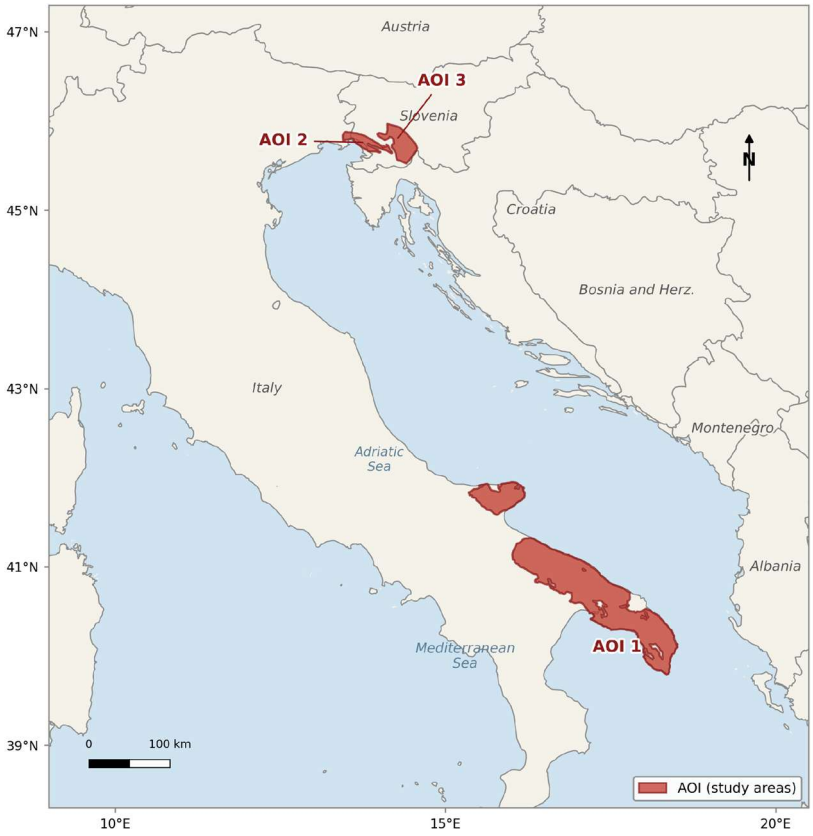


Fig. 1. Le tre aree di studio nel Mediterraneo centrale: Carso pugliese (AOI 1), Carso Classico (AOI 2) e Carso della Notranjska (AOI 3).

L'AOI 1, il Carso pugliese (Italia meridionale, circa 11.660 km²), ha un clima mediterraneo a estate calda (Köppen Csa), con un deficit idrico estivo marcato e suoli di Terra Rossa sottili e discontinui. L'AOI 2, il Carso Classico (confine Italia-Slovenia), è la località tipo da cui deriva il termine «karst» stesso, con un clima più umido (Cfb: temperato, senza stagione secca, estate calda) e una storia di spopolamento rurale e rimboschimento a pino nero. L'AOI 3, il Carso della Notranjska (Slovenia), ha un clima diviso tra le sue due classi di Köppen principali, Cfb (temperato, senza stagione secca, estate calda) e Dfb (continentale, senza stagione secca, estate calda), ed è dominato da un ampio acquifero carsico con un denso reticolo di cavità e polje (ampie depressioni carsiche a fondo pianeggiante, soggette ad allagamento stagionale), con foreste di faggio e abete gestite a copertura continua.

Le tre aree condividono un substrato carbonatico ma differiscono per clima, copertura forestale e struttura del suolo, offrendo un test naturale della generalità del metodo.

2.1 **Dataset**

Sette variabili idroclimatiche mensili (precipitazione, temperatura massima e minima, radiazione a onde corte, deficit di pressione di vapore, Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index a 12 mesi (SPEI-12) [7], indice di umidità climatica (CMI) sono ricavate dalla rianalisi climatica Climatologies at High resolution for the Earth's Land Surface Areas (CHELSA) v2.1 [8] su griglia di ~1 km, da giugno 1999 a giugno 2016 (205 mesi). Ogni variabile è scomposta in due componenti distinte: la componente di base, una media mobile calcolata sui 12 mesi precedenti, che riflette la condizione climatica tipica e persistente del pixel; e la componente di anomalia, cioè quanto il valore di un singolo mese si discosta da questa base, per un totale di 14 feature standardizzate per pixel-mese. Albedo satellitare (Copernicus C3S, SPOT-VGT/PROBA-V) e portata fluviale osservata (stazioni idrometriche slovene sui fiumi Reka e Unica, anni idrologici 2000–2015, gli anni idrologici completi all'interno della finestra dati 1999–2016) sono assemblate come variabili indipendenti, mai fornite al modello, per una verifica a posteriori. Le aree edificate (Global Human Settlement Layer) sono escluse dalla maschera di validità, che conserva 18.290 pixel di terreno naturale o seminaturale sulle tre AOI.

3 Metodo

3.1 **Hidden Markov Model**

Un Hidden Markov Model è definito da tre componenti: un insieme di K stati latenti, non osservabili direttamente; una matrice di transizione A, dove ogni elemento dà la probabilità di passare dallo stato i allo stato j in un mese; e una distribuzione di

emissione per ciascuno stato: il profilo tipico delle 14 variabili climatiche quando il sistema si trova in quello stato, cioè i valori attesi e il modo in cui tendono a variare insieme. Qui si usa una gaussiana multivariata a covarianza «piena»: il modello include anche le correlazioni tra le variabili, non solo la loro variabilità individuale. I parametri sono stimati con l'algoritmo di Baum-Welch (un caso particolare di Expectation-Maximisation) [9] su un campione di 1.863 pixel, stratificato per AOI secondo il metodo di Cochran [10] per garantire una rappresentazione equa delle tre aree indipendentemente dalla loro estensione. Il modello stimato è poi applicato in sola inferenza a tutti i 18.290 pixel validi, tramite il decodificatore Maximum Posterior Marginal [11], che assegna ogni pixel-mese allo stato di probabilità a posteriori più alta.

3.2 **Selezione di K e caratterizzazione degli stati**

Il numero di stati è scelto su quattro criteri congiunti — riproducibilità tra semi casuali (Adjusted Rand Index), separabilità (distanza di Jeffreys-Matusita), assenza di stati di durata troppo breve, e certezza a posteriori media — anziché sul minimo di un singolo criterio statistico: Bayesian Information Criterion (BIC), Akaike Information Criterion (AIC) e Integrated Completed Likelihood (ICL) diminuiscono infatti monotonicamente da K=5 a K=14, senza un minimo interno, un comportamento già documentato in letteratura per modelli HMM costruiti per stati interpretabili piuttosto che per la sola stima di densità. Su questa base, K=10 è il valore scelto. Ogni stato è poi ordinato post-hoc lungo l'indice di aridità UNCCD (AI = P/PET, con P la precipitazione media e PET l'evapotraspirazione potenziale media), calcolato dalle sue medie di emissione fisiche, da Classe 1 (la più secca) a Classe 10 (la più umida). La Tabella 1 riassume la posizione lungo il gradiente dei dieci stati; la Fig. 5 ne mostra i valori medi di baseline per le sette variabili climatiche di base.

Tab. 1. Indice di aridità (AI = P/PET) e fascia United Nations Environment Programme (UNEP) / UNCCD [12] per i dieci stati.

Stato	**AI**	**Fascia UNEP/UNCCD**	**AOI dominante**
Classe 1	0.41	Semi-arido	Puglia (100%)
Classe 2	0.57	Sub-umido secco	Puglia (100%)
Classe 3	0.58	Sub-umido secco	Puglia (100%)
Classe 4	1.52	Umido	Carso Classico (99.8%)
Classe 5	1.82	Umido	Notranjska (96.9%)
Classe 6	1.83	Umido	Carso Classico (100%)
Classe 7	1.94	Umido	Carso Classico / Notranjska
Classe 8	2.24	Umido	Carso Classico (99.8%)
Classe 9	2.31	Umido	Notranjska (90.5%)
Classe 10	2.44	Umido	Notranjska (99.3%)

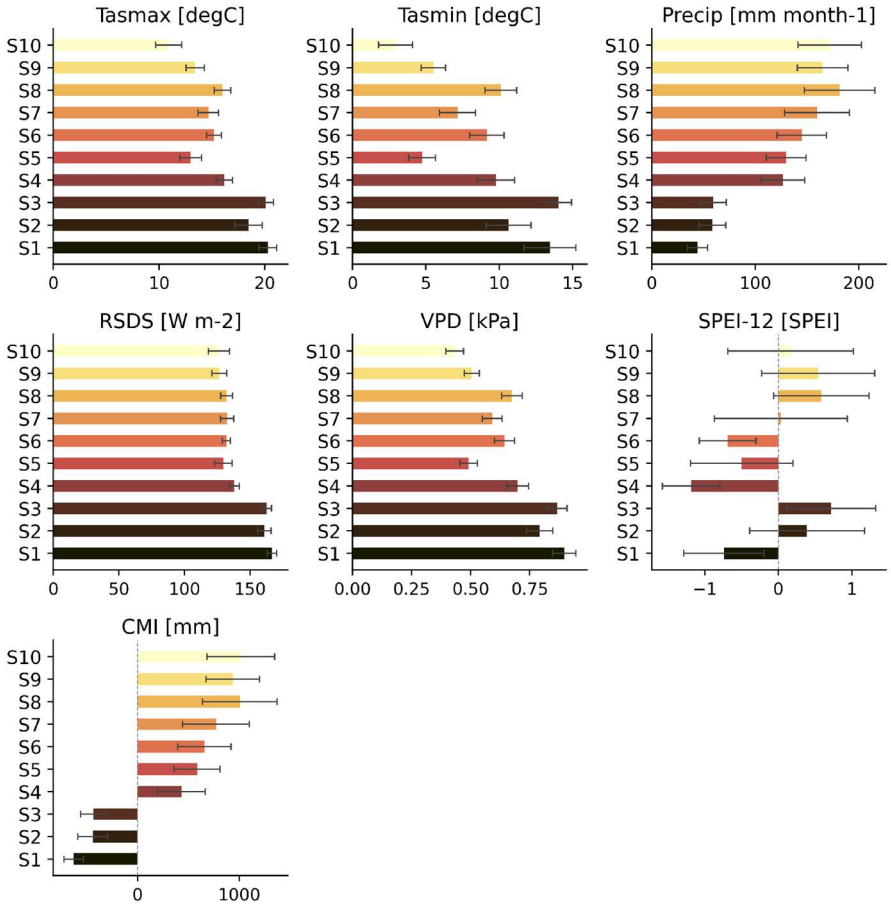


Fig. 5. Valori medi di baseline (± deviazione standard) delle sette variabili climatiche di base, per ciascuno dei dieci stati, in unità fisiche: temperatura massima e minima (Tasmax, Tasmin), precipitazione (Precip), radiazione a onde corte (RSDS), deficit di pressione di vapore (VPD), SPEI-12 e indice di umidità climatica (CMI).

4 Risultati

4.1 Distribuzione spaziale degli stati

I dieci stati recuperati si distribuiscono coerentemente con la geografia reale, pur non avendo mai ricevuto l'informazione di appartenenza ad un'area: tre stati (i più secchi, Classi 1-3) sono quasi esclusivi del Carso pugliese, gli altri sette si ripartiscono tra le due aree slovene. Gli stati disegnano regioni spazialmente coerenti sulla mappa (Fig. 2), non un mosaico casuale di pixel, un'ulteriore evidenza diretta che il modello segue un campo climatico spazialmente coerente e non rumore a livello di singolo pixel.

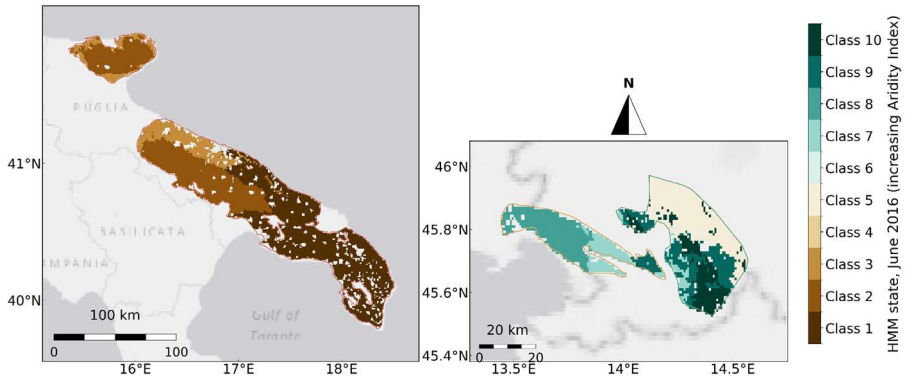


Fig. 2. Distribuzione spaziale dello stato decodificato a giugno 2016, dieci stati ordinati per indice di aridità, palette marrone per gli stati più secchi e verde-blu per quelli più umidi [13].

4.2 Struttura delle transizioni

La matrice di transizione stimata (Fig. 3) è quasi a blocchi, e i blocchi coincidono con la ripartizione spaziale tra AOI, non con un raggruppamento imposto al modello: su 3.731.160 transizioni mensili decodificate nell'intero periodo, solo 54 attraversano il confine del blocco pugliese: un isolamento dinamico quasi totale. Tra le due aree slovene i pixel passano dall'una all'altra in modo più permeabile ma comunque debole (0.03–0.25% al mese per cella). Ogni stato tende a persistere per molti mesi prima di cambiare: il tempo di permanenza teorico varia da circa 10 mesi (Classe 4, la meno stabile) a oltre 85 mesi, oltre sette anni (Classe 10, la più stabile), coerentemente con un sistema climatico che evolve con continuità, non a scatti casuali.

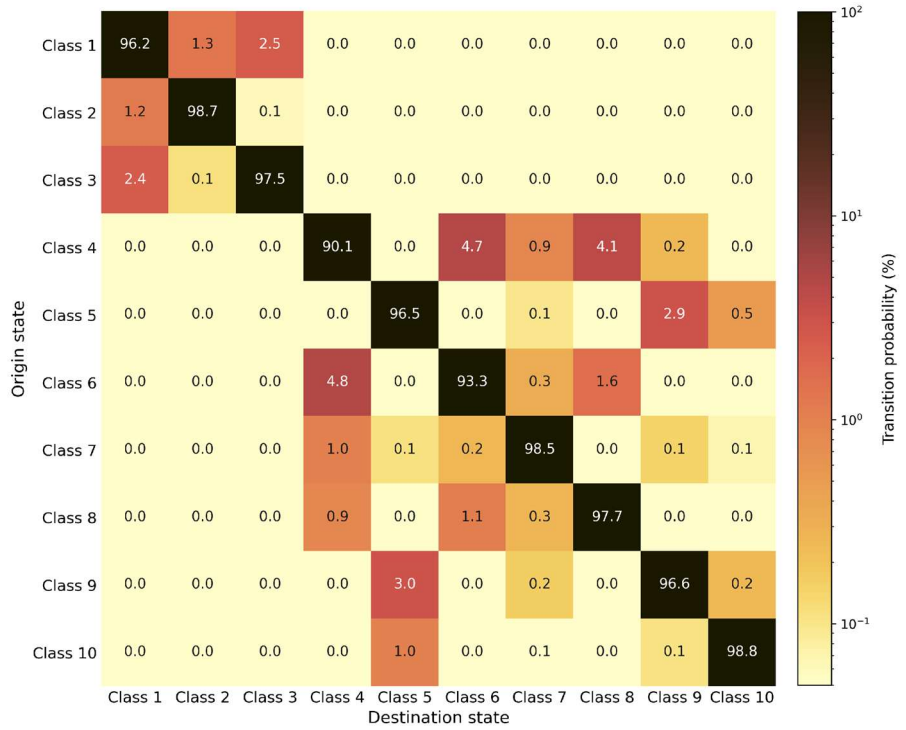


Fig. 3. Matrice di transizione (probabilità % per cella, scala di colore logaritmica), riga = stato di origine, colonna = stato di destinazione, entrambi in ordine di indice di aridità.

4.3 **Verifica indipendente**

Il gradiente mappato trova conferma nelle due variabili indipendenti introdotte nel §2.1. L'albedo satellitare correla fortemente con l'indice di aridità per stato ($r=-0.90$, ρ di Spearman$=-0.79$): gli stati più secchi riflettono sistematicamente più luce, coerentemente con una minore copertura vegetale e una maggiore esposizione del suolo nudo. La portata fluviale osservata, nelle due aree slovene dotate di idrometro, correla in modo significativo con l'indice di aridità ponderato a posteriori dal modello, aggregato per anno idrologico (ρ di Spearman$=0.81$ nel Carso Classico e 0.82 nella Notranjska, $p<0.001$ in entrambi i casi, Fig. 4): quando il modello indica una fase più umida, il fiume porta davvero più acqua.

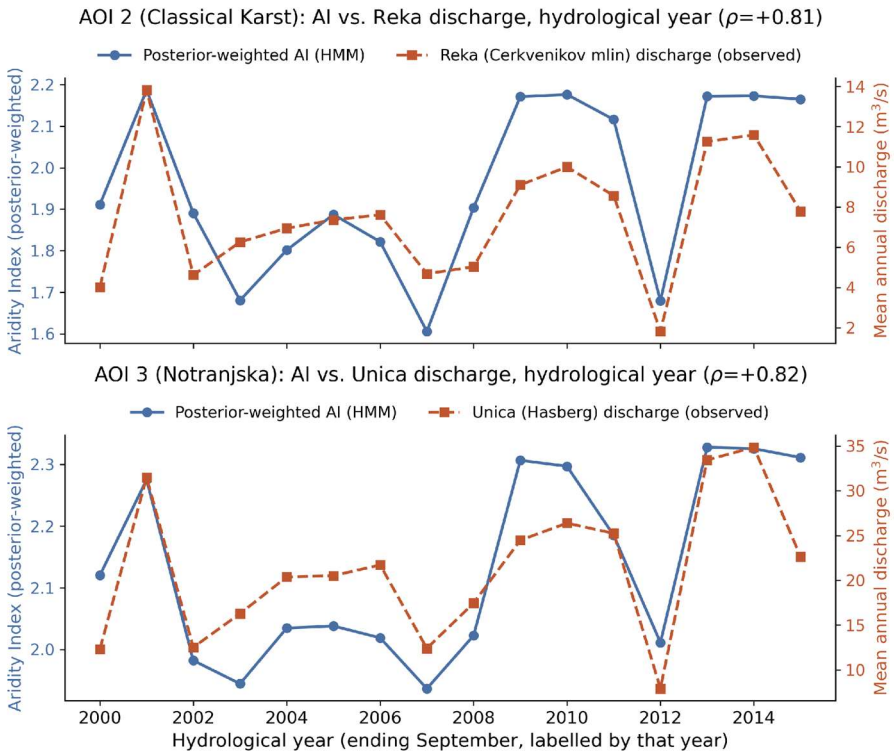


Fig. 4. Indice di aridità ponderato a posteriori (blu) contro portata fluviale osservata (arancio), per anno idrologico, fiumi Reka (AOI 2) e Unica (AOI 3).

4.4 **Controlli di robustezza**

Sei controlli indipendenti verificano la tenuta del modello. Un test di esclusione temporale (addestramento 1999–2011, verifica 2012–2016) mostra una log-verosimiglianza predittiva, quanto bene il modello si adatta a dati che non ha mai visto in fase di stima, leggermente migliore sui mesi esclusi dall'addestramento che su quelli usati per stimarlo, evidenza contro il sovradattamento. La sensibilità a K=9 e K=11 conferma la stessa struttura a blocchi. Un dubbio legittimo è che il modello aggregato stia semplicemente riconoscendo a quale AOI appartiene un pixel, senza misurare nulla di realmente climatico: per escluderlo, l'intera procedura di selezione e stima è stata ripetuta indipendentemente su ciascuna AOI, isolandola dalle altre due, senza accesso alcuno alle altre. Se il modello aggregato si limitasse effettivamente a rietichettare la posizione geografica, isolare ogni area dovrebbe sistematicamente peggiorare la distinzione tra gli stati, poiché verrebbe a mancare proprio l'informazione geografica su cui tale distinzione si baserebbe. Non è ciò che si osserva: il risultato è quantificato dal rapporto di sovrapposizione, un indice che misura quanto gli stati si sovrappongano tra loro (valori prossimi a zero indicano stati ben separati, valori prossimi a 1 indicano

stati indistinguibili). Isolando singolarmente ciascuna area, il rapporto è 0.25 in Puglia, 0.09 nel Carso Classico e 0.16 nella Notranjska, contro 0.22 nel modello aggregato: in due casi su tre la separazione migliora rispetto al modello aggregato, e nel terzo peggiora solo lievemente. Se la separazione tra stati dipendesse dall'accesso simultaneo alle tre aree, isolarle dovrebbe deteriorarla in modo sistematico; non è quanto si osserva, il che esclude che il modello si limiti a rietichettare l'appartenenza geografica. Questi controlli, insieme alla verifica indipendente del §4.3, forniscono un quadro coerente di un segnale fisico genuino, non di un artefatto statistico.

5 Conclusioni

Un Hidden Markov Model non supervisionato, applicato a sole variabili climatiche globalmente disponibili, recupera una struttura idroclimatica latente coerente con la geografia e confermata da osservazioni fisiche esterne al modello stesso. Il contributo cartografico originale è la mappa della distribuzione di probabilità sugli stati, con incertezza e persistenza esplicite, invece del singolo indice o classe delle mappe di riferimento oggi in uso.

Tre direzioni di sviluppo futuro emergono direttamente dai limiti del lavoro. La prima riguarda la scala: ri-addestrare l'HMM su circa 900.000 pixel (ERA5-Land + MODIS, dal 1950 a oggi) per produrre la prima mappa mensile dello stato idroclimatico latente per l'intero karst mediterraneo e confrontare aree con caratteristiche idroclimatiche simili. La seconda riguarda la struttura del modello: un'estensione semi-markoviana, con tempi di permanenza esplicitamente dipendenti dalla durata già trascorsa in uno stato. La terza riguarda la validazione: estendere il confronto con la portata fluviale e dati dataset da sorgenti di altri bacini carsici mediterranei, e verificare se la relazione con l'albedo osservata qui regga anche fuori dalle tre aree studiate.

Riferimenti bibliografici

1. Xanke, J., Goldscheider, N., Bakalowicz, M., Barberá, J.A., Broda, S., Chen, Z., Ghanmi, M., Günther, A., Hartmann, A., Jourde, H., Liesch, T., Mudarra, M., Petitta, M., Ravbar, N., Stevanović, Z.: Carbonate rocks and karst water resources in the Mediterranean region. Hydrogeology Journal 32, 1397–1418 (2024).
2. Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., Veni, G.: Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. Hydrogeology Journal 28, 1661–1677 (2020).
3. D'Ettorre, U.S., Liso, I.S., Parise, M.: Desertification in karst areas: A review. Earth-Science Reviews 253, 104786 (2024).
4. Lavee, H., Imeson, A.C., Sarah, P.: The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean-arid transect. Land Degradation & Development 9(5), 407–422 (1998).
5. United Nations: United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. United Nations, Paris (1994).
6. McClintock, B.T., Langrock, R., Gimenez, O., et al.: Uncovering ecological state dynamics with hidden Markov models. Ecology Letters 23(12), 1878–1903 (2020).
7. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I.: A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate 23(7), 1696–1718 (2010).
8. Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., et al.: Climatologies at high resolution for the Earth's land surface areas. Scientific Data 4, 170122 (2017).
9. Rabiner, L.R.: A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE 77(2), 257–286 (1989).
10. Cochran, W.G.: Sampling Techniques. 3rd edn. Wiley, New York (1977).
11. Zucchini, W., MacDonald, I.L., Langrock, R.: Hidden Markov Models for Time Series: An Introduction Using R. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton (2016).
12. Middleton, N.J., Thomas, D.S.G. (eds.): World Atlas of Desertification. 2nd edn. UNEP/Arnold, London (1997).
13. Crameri, F., Shephard, G.E., Heron, P.J.: The misuse of colour in science communication. Nature Communications 11, 5444 (2020).

ASITA 2026

Modellazione delle interazioni tra pacchetti di conoscenza nella pianificazione urbana

Robert Laurini [0000-0003-0426-4030]

INSA, Université de Lyon, France
Robert.Laurini@liris.cnrs.fr

Abstract. Da tempo, la pianificazione urbana convenzionale si basa principalmente sui dati, ma la pratica contemporanea integra sempre più un'ampia gamma di pacchetti di conoscenze. Questi pacchetti provengono da diverse discipline e fonti: analisi di esperti, quadri normativi, know-how tecnico, lezioni apprese da progetti passati, approfondimenti storici locali, risultati della partecipazione pubblica, ingegneria civile, pianificazione ambientale, pratiche cartografiche, ecc. Inoltre, devono essere prese in considerazione anche le lezioni apprese attraverso la simulazione dei modelli di gemelli digitali della città. Data questa diversità, diventa essenziale non solo inventariare gli elementi di conoscenza rilevanti per la pianificazione, ma anche articolare un modello concettuale coerente in grado di integrarli, conoscence esperte e conoscenze shallow. Per rispondere a questa esigenza, il paper propone un modello visuale che rappresenta le interazioni tra questi pacchetti di conoscenze eterogenei. Particolare attenzione è data al potenziale dell'intelligenza artificiale generativa per sintetizzare il contributo dei cittadini ed estrarre modelli e suggerimenti significativi dall'opinione pubblica.

Parole chiave: Ingegneria della conoscenza; pianificazione urbana; modellazione visuale.

1 Introduzione

Nella pianificazione urbana, per decenni, il mantra dominante è stato "fare rilievi prima della pianificazione" con la connotazione di attività assistita dai dati. Molte città hanno progettato sistemi informativi per questo scopo [1]. Ora, sta arrivando una nuova era sotto l'ombrello dell'intelligenza urbana, definita dalla sinergia tra IA e intelligenza collettiva umana.

Dal momento che la pianificazione urbana è un'attività multidisciplinare, è necessario mobilitare molti diversi pacchetti di conoscenze, dall'architettura all'economia, dall'ingegneria civile agli aspetti legali, dalla lotta all'inquinamento allo sport e alla cultura. L'obiettivo di questo articolo è identificare e caratterizzare le articolazioni di questi diversi pacchetti di conoscenze nell'ambito dell'operatività. In informatica, la conoscenza è generalmente definita come informazione che può guidare l'azione o risolvere problemi. I pacchetti di conoscenza possono avere origini diverse, ad esempio normative, documenti scritti, rapporti, immagini satellitari, foto aeree, know-how di esperti, data mining, ecc. Il problema principale non è solo compilarli, ma soprattutto organizzarli per aiutare il ragionamento a trovare soluzioni.

Tuttavia, gran parte delle conoscenze acquisite dagli urbanisti rimane tacita o non viene riconosciuta come una risorsa vitale per la città; dovrebbe invece essere compresa e gestita come una ricchezza collettiva condivisa. Dal punto di vista pratico, i pacchetti di conoscenza possono essere regole (sia fisiche sia giuridiche), migliori pratiche, lezioni apprese, schemi riconosciuti, affermazioni verificate, ecc. In questa categoria si possono aggiungere raccomandazioni e suggerimenti.

Bennet e Bennet [2] distinguono tre livelli di conoscenza: superficiale, shallow (poco profonda) ed esperta. Nel campo della pianificazione urbana, le autorità locali possono essere considerate come proprietari dei progetti, mentre per alcuni aspetti, le aziende specializzate funzionano tipicamente come project manager o subappaltatori. In altre parole, questi attori esterni possiedono anche una conoscenza esperta, mentre i pianificatori all'interno delle autorità locali hanno di solito competenze più limitate, cioé conoscenza shallow. Quindi, in questo studio, saranno considerati solo pacchetti di conoscenza esperta e shallow nella pianificazione urbana.

Questo documento è organizzato come segue: inizierà con una rapida panoramica sullo stato della modellazione della conoscenza della pianificazione urbana e poi alcuni problemi legati al suo contesto. Successivamente, il nucleo del documento svilupperà diversi pacchetti nel dominio multidisciplinare legato alla pianificazione urbana, insieme alla modellazione per concludere il processo di pianificazione.

2 Modello di pacchetti di conoscenza

Nello stato dell'arte sulla modellazione della conoscenza, esistono diverse famiglie principali di approcci, tra cui quelli basati su reti e su regole [3, 4]. Qui, abbiamo bisogno di un modello che aiuti a progettare un piano. In questo articolo, verrà utilizzato un approccio top-down per presentare i principali pacchetti di conoscenza per la pianificazione urbana. Naturalmente, per quanto riguarda il contesto, devono essere considerati ulteriori pacchetti. Per modellare i collegamenti tra diversi pacchetti di conoscenza, verrà definito un vocabolario visuale come nella Figura 1 in cui un esagono rappresenta un pachetto (o sottopacchetto) di conoscenza e una pergamena viene utilizzata per qualsiasi tipo di regolamento, esistente o generato.

Per modellare qualsiasi tipo di ricettacoli, verrà utilizzato un cilindro, non solo per rappresentare qualsiasi tipo di database multimediali, ma anche corpora testuali o dizionari dei toponimi. Verranno usati due tipi di frecce, la prima per il collegamento tra un sottopacchetto di conoscenza e il suo corrispondente pacchetto superiore, e l'altra per la generazione di un nuovo tipo di conoscenza. Il processo di generazione della conoscenza può essere umano (ad esempio data da un esperto) o basato su computer (ad esempio tramite data mining o attraverso intelligenza artificiale generativa). Le due frecce “if-any” (con puntini) sono introdotte principalmente a causa dei contesti nazionali che differiscono da paese a paese, sia per assenza che per non obbligatorietà. Verranno utilizzati i colori per indicare se un insieme è il focus (pacchetti principale), un sottopacchetto o conoscenza poco profonda (shallow).

Dunque, useremo questo formalismo per modellare i collegamenti tra i pacchetti di conoscenza in qualsiasi organizzazione, come le aziende, e qui nella pianificazione. La completa descrizione del formalismo con regole sintactiche è data in [5].

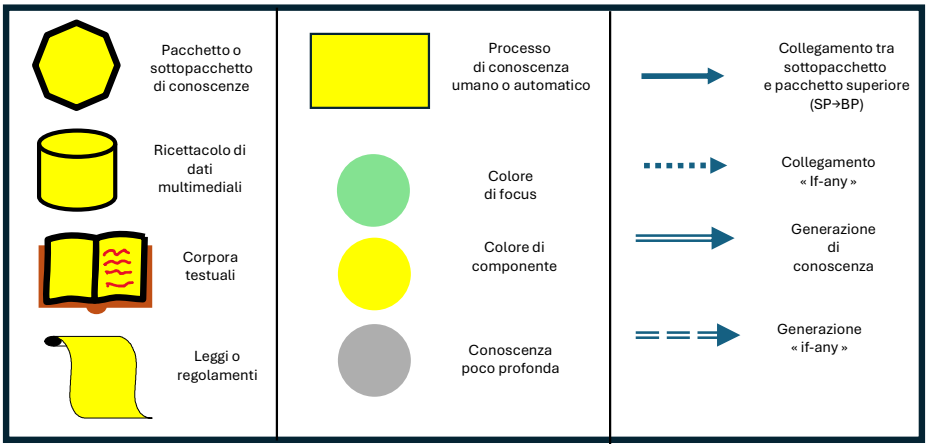


Fig. 1. Vocabolario visuale per modellare i collegamenti tra i pacchetti di conoscenza urbana.

2.1 Quadro giuridico

Di solito, la pianificazione urbana è definita come la modellazione coordinata degli spazi fisici, delle infrastrutture e delle politiche di una città per supportare comunità sostenibili, funzionali e vivibili. Può essere vista come un componente proattivo della governance urbana. A questo scopo, la maggior parte dei paesi ha creato leggi o più precisamente regolamenti per organizzare la pianificazione urbana.

2.2 Definizione degli obiettivi di pianificazione

Ogni stakeholder ha la propria visione del futuro della città, basata sulle proprie conoscenze della città e su alcune esperienze interessanti acquisite in altre città.

Ad ogni modo, esiste un meccanismo per selezionare queste visioni o per fare una sorta di compromesso tra di esse in base alle opportunità del territorio e a qualche stima dei costi. Questo meccanismo può essere un voto effettuato dal consiglio locale. Vengono redatti parecchi documenti: l'elenco degli obiettivi strategici insieme alla loro priorità e alcuni progetti strutturanti, quelli corrispondenti agli strumenti di pianificazione. Eventualmente, sono integrati da alcune raccomandazioni riguardanti la partecipazione dei cittadini.

2.3 Conoscenze coinvolte nella metodologia

Una volta definiti gli obiettivi strategici, la metodologia inizierà studiando i piani precedenti per scoprire le parti attualmente in corso o non ancora implementate, e dichiarando se sono ancora in considerazione. Poi, sarà una sorta di amalgama del know-how degli esperti, delle migliori pratiche, delle metodologie convenzionali e delle lezioni apprese dal passato (nella città stessa e anche altrove). Se la città ha implementato un gemello digitale, diverse simulazioni possono dare indicazioni e suggerimenti sugli esiti potenziali.

2.4 Informazioni sulla conoscenza geolocalizzata interna ed esterna

Ricorda la Legge di Tobler [6], spesso considerata la Prima Legge della Geografia: "*Tutto è correlato a tutto il resto, ma le cose vicine sono più correlate di quelle lontane*". Questo implica di non limitarsi alla giurisdizione, ma anche di considerare le influenze esterne, in altre parole, la conoscenza esterna. Per esempi: (*i*) la sede di uno stabilimento – situata nella mia città – si trova a New York e il suo CEO ha deciso di chiuderla; aumentando così la disoccupazione locale; (*ii*) una città situata in un altro paese ha implementato un'attività originale di noleggio biciclette e questa attività potrebbe essere introdotta anche nella mia città; (*iii*) la regione ha deciso di progettare un nuovo sistema ferroviario che attraversa la mia città, ma la stazione principale non si trova nella mia città; (*iv*) un disastro naturale o tecnologico in una città vicina può avere conseguenze per la mia città.

Quindi, definiamo la conoscenza esterna come informazioni che descrivono influenze esterne rilevanti per un determinato territorio. Possono essere distinte diverse categorie di questa conoscenza: (*i*) conoscenza a breve distanza o vicina, cioè conoscenza situata nelle vicinanze della giurisdizione; una soluzione può essere quella di determinare una zona cuscinetto esterna intorno alla giurisdizione e considerare la conoscenza all'interno di questa zona cuscinetto; (*ii*) la conoscenza a lunga distanza include le fonti e i contenuti delle influenze esterne provenienti magari da decisioni prese altrove. Qui, dobbiamo considerare che le autorità locali hanno solo una conoscenza shallow di queste influenze. (*iii*) i monitoraggi tecnologico e sociologic possono essere inclusi nella conoscenza esterna di tipo shallow.

3 Modelli multidisciplinari dettagliati

In questa sezione verranno presentati diversi modelli di pacchetti di conoscenze. È importante sottolineare che sono solo a scopo di pianificazione. Per scopi di pianificazione, invece, sarà mobilitata solo una conoscenza shallow riguardo a molte attività in città.

3.1 Conoscenze generali sulla città

Questo pacchetto raggruppa 6 sottopacchetti, riguardanti in particolare peculiarità locali, storia locale, la città come sistema, monumenti elencati, bisogni della popolazione e rischi e disastri (Figura 2a). Naturalmente, è necessario menzionare le conoscenze provenienti da database, sistemi informativi geografici inclusi dati 2D e talvolta 3D, foto aeree e forse immagini satellitari.

3.2 Peculiarità locali

Non tutte le città sono simili; ciascuna ha le proprie peculiarità locali dovute alla storia e alla sua posizione geografica (montagna, mare, ecc.). Per esempio, i problemi generati dall'esistenza di un porto o di importanti luoghi turistici possono influenzare il suo sviluppo, come stazioni sciistiche o un sito archeologico (Figura 2b). Inoltre, avere un aeroporto o un ospedale regionale sono risorse importanti per lo sviluppo economico.

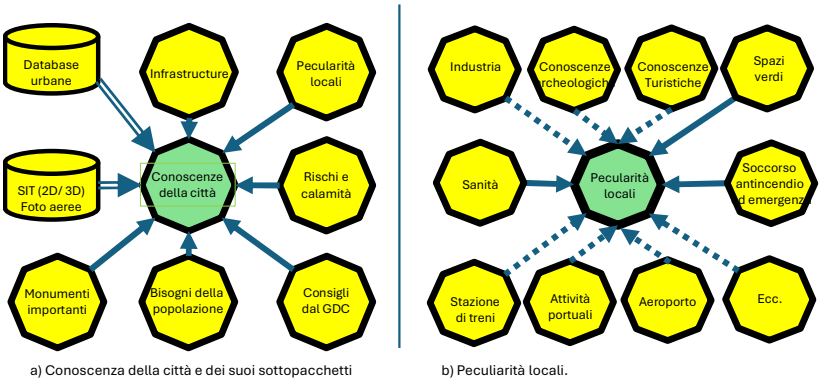


Fig. 2. Pacchetti e sottopachetti sulla conoscenza della città e le sue peculiarità locali.

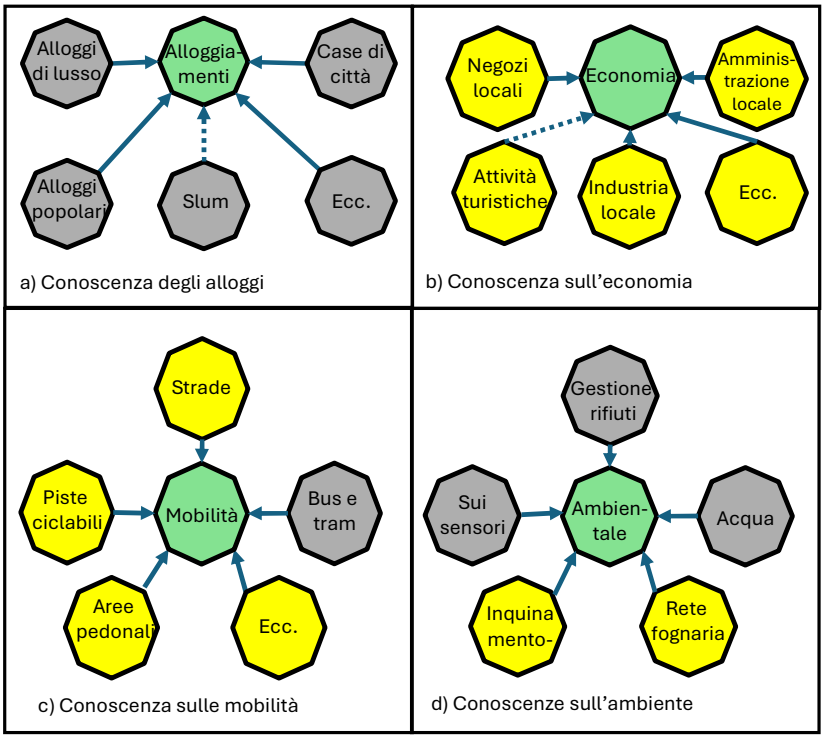


Fig. 3. Modelli di vari sottopacchetti.

3.3 Vari modelli multidisciplinari

La vasta gamma di attività urbane permette di progettare diversi modelli di sottopacchetti. La Figura 3 illustra una selezione di questi modelli; tuttavia, possono essere considerate anche molte altre varianti.

3.4 Consigli appresi dai gemelli digitali della città

Esistono diverse definizioni del concetto di Gemello Digitale della Città (GDC) [7]. In sostanza, una città gemello digitale rappresenta una replica virtuale dinamica e basata sui dati di un ambiente urbano reale. Il sistema integra dati provenienti da sensori, immagini satellitari, flussi di traffico, rilevamenti ambientali e metriche delle prestazioni delle infrastrutture per mantenere precisione e rilevanza.

La cosa più importante nel nostro ambito è il modo in cui scienziati, politici e pianificatori interagiscono con le città reali riguardo alla loro comprensione, previsione e progettazione. Il sistema di gemello digitale della città integra una gamma di modelli spaziali, dalle simulazioni analitiche dei quartieri locali a sistemi su larga scala di città e sistemi urbani, e descrive brevemente le sfide computazionali che le applicazioni geospaziali nelle città pongono.

Praticamente, gli utenti sviluppano alcuni scenari di evoluzione che vengono inviati al modello GDC e generano output simulati (Figura 4). Poi, questi output vengono valutati attraverso alcuni criteri (efficienza, costo, ecc.). Alla fine di questo processo, alcuni suggerimenti appresi vengono elencati come pacchetti di conoscenza.

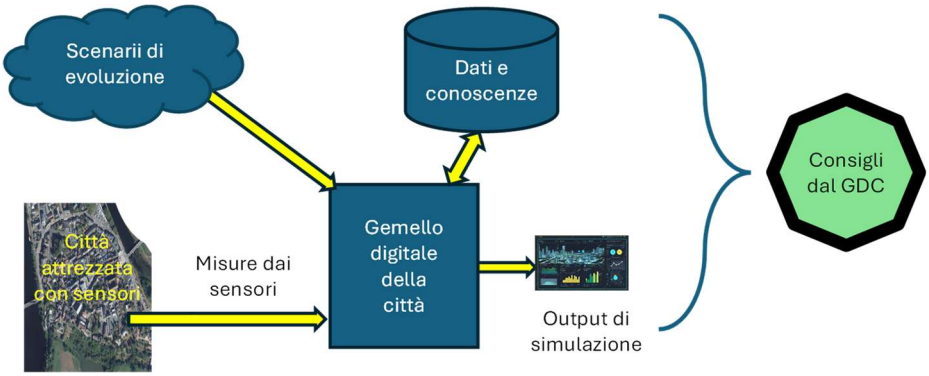


Fig. 4. Conoscenze (consigli) derivanti dall'uso del sistema di gemello digitale della città.

3.5 Conoscenza e Partecipazione Pubblica

Bisogna considerare due tipi di conoscenza: primo, il modo di gestire i contributi raccolti dai cittadini e secondo, riguardo alla sua struttura organizzativa. In alcuni paesi, esistono regolamenti sull'organizzazione, sui documenti da presentare ai cittadini, sulla durata, sui verbali, ecc. Tuttavia, più efficace è l'organizzazione, più è probabile che i cittadini sentano che le loro opinioni vengono prese in considerazione. I pacchetti di conoscenza dovrebbero essere mantenuti sui modi più efficaci per presentare il piano, comprese mappe e materiali esplicativi, l'evoluzione della città, gli scenari di sviluppo futuro, i progetti chiave e l'organizzazione delle audizioni pubbliche. Alcuni facilitatori possono essere formati per spiegare alle persone tutti i dettagli del piano e per incoraggiarle a esprimere la loro opinione. È importante menzionare che i pacchetti di conoscenze presentati devono essere considerati come conoscenze shallow nei paesi in cui la partecipazione dei cittadini non è organizzata legalmente (Figura 5).

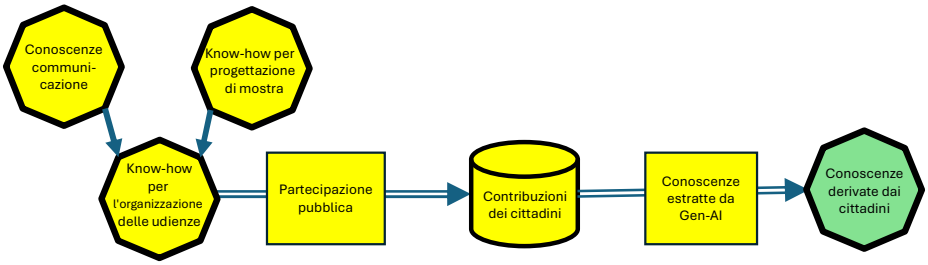


Fig. 5. Pacchetti di conoscenze necessari per ottenere i contributi dei cittadini tramite la partecipazione pubblica (PP).

Nella governance urbana, è comune organizzare sondaggi pubblici, consultazioni o audizioni in cui i cittadini possono dare le loro opinioni o suggerimenti sui progetti proposti nei piani. In altre parole, quei suggerimenti sono posizionati in un'area e possono costituire frammenti di conoscenza provenienti direttamente dalle persone.

Sembra possibile usare l'IA generativa per estrarre modelli significativi da grandi volumi di suggerimenti dei cittadini, generare riepiloghi e evidenziare preoccupazioni principali o buone idee e, alla fine, simulare scenari di progettazione urbana basati sulle preferenze del pubblico.

3.6 Osservazioni finali

Il modello può anche essere esteso per includere altri pacchetti di conoscenza. Esempi includono sistemi infrastrutturali, come reti stradali e servizi pubblici (elettricità, telecomunicazioni, illuminazione pubblica, gestione del traffico e teleriscaldamento), oltre ai servizi pubblici legati a sanità, cultura, sport, amministrazione locale, polizia e svago. In base al contesto giuridico, tali aspetti potrebbero non essere gestiti dalla città, ma da altre amministrazioni o aziende private. All'interno di questo modello, però, saranno spesso rappresentati come conoscenza shallow per i pianificatori.

Questi pacchetti shallow sono tipicamente affidati a partner con maggiore esperienza nei rispettivi settori.Si possono menzionare due soluzioni: costruire un elenco di potenziali partner e contattarne uno, oppure scrivere un bando aperto.

4 Meccanismi di conoscenza necessari per concludere il processo di pianificazione

Una volta completato, i pianificatori devono preparare diversi progetti dai quali due sono i più comuni: un rapporto scritto e una mappa (Figura 6a).

Il rapporto scritto includerà gli obiettivi della pianificazione e i dettagli per ciascuna zona; una parte sostanziale di questo rapporto sarà la base per le normative locali. Per quanto riguarda la mappa, deve essere coerente con il rapporto scritto.

Secondo la legislazione, esiste un meccanismo per l'approvazione delle bozze dei progetti; ad esempio, il consiglio locale può votare per approvarlo, dando così origine a un piano generale esecutivo. Dal punto di vista del pianificatore, progettando il piano,

sono state apprese alcune lezioni, e verrà generata una sorta di ciclo di feedback di apprendimento, come illustrato nella Figura 6b. Questo feedback può influenzare qualsiasi tipo di pacchetto di conoscenze elencato in questo documento.

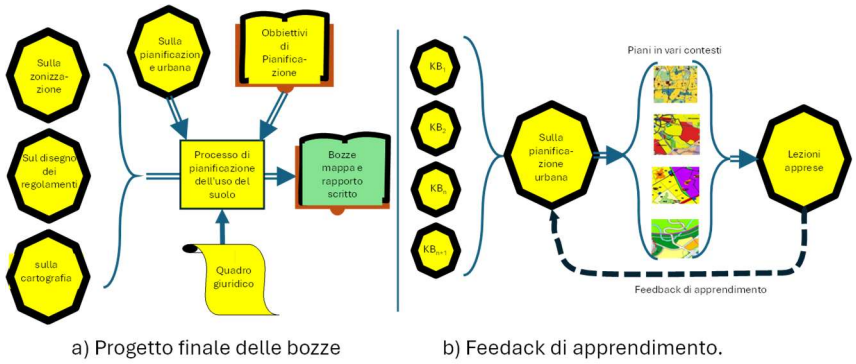


Fig. 6. Attività finali. a) Bozze del progetto finale, b) Feedback di apprendimento.

5 Conclusione

In sostanza, la pianificazione urbana è un compito multidisciplinare. Quindi, lo scopo di questo documento era esaminare le articolazioni dei pacchetti di conoscenze che i pianificatori devono padroneggiare tramite un vocabolario visuale. Sono stati identificati due livelli di pacchetti di conoscenze: conoscenze esperte e conoscenze shaloow. Naturalmente, possono essere sviluppati ed integrati anche molti altri modelli.

Il passo successivo è definire modelli appropriati non solo per memorizzare tutti i tipi di pacchetti, ma anche per permettere ragionamenti su di essi. Completando e convalidando questo framework, si può immaginare una nuova forma di pianificazione urbana assistita dalla conoscenza.

Riferimenti

1. Laurini R.: Information Systems for Urban Planning: A Hypermedia Cooperative Approach. London, U.K.: Taylor & Francis, Feb. 2001, p. 308.
2. Bennet A. and Bennet D.: The depth of knowledge: Surface, shallow or deep? VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems, vol. 38, no. 4, pp. 405–420, 2008,
3. Laurini R.: A mathematical language for the modeling of geospatial static rules, Journal of Visual Languages and Computing, vol. 51, pp. 1–13, 2019.
4. Liu Y., Ding J., Fu Y, and Yi L.: UrbanKG: An urban knowledge graph system, ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, vol. 14, no. 4, Art. no. 60, pp. 1–25, 2023, doi: 10.1145/3588577.
5. Laurini R.: A Visual Formalism for Modeling the Interconnections between Bundles of Knowledge. Journal of Visual Language and Computing. In press. 2026.
6. Tobler W.R: A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, Economic Geography, vol. 46, no. 2, pp. 234–240, 1970.
7. Batty M.: Digital twins in city planning, Nature Computational Science, vol. 4, pp. 192–199, 2024, doi: 10.1038/s43588-024-00606-7.

Fotogrammetria UAV low-cost e open source per il controllo tecnico-ambientale di cantieri produttivi: applicazione al caso dello stabilimento AL.MAR. di Acireale

Marco Leone[1], Patrizia Spicuzza[1], Massimiliano Russo[1], Giovanni Castorina[2], Stefano Avanzato[3]

[1] Studio Tecnico Leone, studio.tecnico.leone@gmail.com
[2] AL.MAR. di Castorina Luigi Alberto S.r.l., marealmarsrl@gmail.com
[3] Ingegneria Costruzioni Colombrita, stefano.avanzato@costruzionicolombrita.it

Abstract. Nel presente lavoro viene testata una procedura per il confronto di DSM multitemporali ottenuti da rilievi UAV low-cost, attraverso il caso studio del cantiere AL.MAR. di Acireale. La piattaforma open source WebODM utilizzata ha consentito l'elaborazione fotogrammetrica delle immagini, mentre la procedura Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC), sviluppata in ambiente GIS e Python, ha permesso di quantificare le variazioni altimetriche e i volumi di scavo e riporto a supporto dei SAL.

Parole chiave: WebODM, MRVC, UAV, DSM, open source, volumi di scavo.

1 Introduzione

Il controllo tecnico-ambientale dei cantieri produttivi richiede strumenti capaci di documentare le trasformazioni morfologiche del terreno, verificare l'avanzamento delle lavorazioni e fornire riscontri quantitativi sui volumi movimentati.

La fotogrammetria mediante UAV consente acquisizioni periodiche ad alta risoluzione, con tempi e costi contenuti. La diffusione di droni consumer ha progressivamente ridotto i costi di acquisizione dei dati, mentre l'impiego di software specialistici proprietari può ancora rappresentare una voce economica significativa per studi professionali e piccole imprese.

Un contributo importante all'accessibilità di queste tecnologie è rappresentato da WebODM, piattaforma open source per l'elaborazione fotogrammetrica delle immagini acquisite mediante UAV. Dal 6 aprile 2026, WebODM ha intrapreso un percorso di sviluppo autonomo rispetto a OpenDroneMap, introducendo un motore di elaborazione dedicato, denominato ODX [7]. Questa evoluzione rappresenta un ulteriore passo verso la diffusione di strumenti fotogrammetrici aperti, capaci di produrre ortofoto, nuvole di punti e modelli digitali della superficie, favorendo l'interoperabilità dei dati e il contenimento dei costi di elaborazione.

Il presente lavoro esamina l'applicazione della fotogrammetria UAV low-cost al monitoraggio tecnico-ambientale del cantiere dello stabilimento AL.MAR. di Acireale (CT), mediante acquisizioni effettuate con un drone consumer DJI Mavic Air di prima generazione, introdotto sul mercato nel 2018.



Fig. 1. UAV DJI Mavic Air

L'esperienza si inserisce nel percorso di sperimentazione già avviato nell'impiego di UAV non professionali per applicazioni ingegneristiche, con particolare riferimento al rilievo fotogrammetrico a supporto della modellazione idraulica presentato alla Conferenza Nazionale ASITA del 2019 [8].

Nell'ambito dello studio è stata sviluppata una procedura denominata Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC), finalizzata al confronto di modelli digitali della superficie (DSM) acquisiti in differenti fasi di lavorazione. La metodologia integra strumenti GIS e script Python per l'analisi delle variazioni altimetriche e il calcolo automatico dei volumi di scavo e riporto, fornendo un supporto quantitativo alla documentazione tecnico-contabile degli stati di avanzamento dei lavori (SAL). L'obiettivo del contributo è illustrare le potenzialità di una filiera tecnologica basata sull'integrazione tra UAV consumer, elaborazione fotogrammetrica open source mediante WebODM e procedura MRVC.

Le elaborazioni fotogrammetriche di confronto del caso studio sono state effettuate mediante Agisoft Metashape Professional, utilizzato come riferimento per le attività di controllo.

2 Area di studio e dati disponibili

Il caso studio riguarda il cantiere dello stabilimento AL.MAR. ad Acireale (CT), interessato da bonifica, livellamento, sbancamenti e realizzazione delle fondazioni.

La metodologia proposta è articolata in tre fasi: acquisizione delle immagini mediante UAV consumer, elaborazione fotogrammetrica con WebODM e confronto volumetrico dei DSM attraverso lo script Python Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC).

I rilievi UAV consumer sono stati organizzati in una fase A, con cinque acquisizioni progressive AR1–AR5, e una successiva fase B relativa agli scavi per le fondazioni. Il confronto multi temporale riguarda i DSM AR1-5 e il DSM BR1.

I dati elaborati comprendono DSM, ortofoto georeferenziate, report fotogrammetrici, perimetri di analisi e documentazione tecnico-contabile. I raster sono riferiti a WGS 84 / UTM zona 33N (EPSG:32633). Il poligono di controllo si estende per circa 6.025 m², ma la superficie effettivamente confrontabile è limitata alla copertura comune dei due modelli. I materiali di scavo depositati in aree esterne alla copertura del rilievo della fase A non sono stati quantificati direttamente mediante il confronto differenziale dei DSM AR5–BR1, in assenza di una superficie altimetrica iniziale di riferimento.

Tali depositi saranno pertanto valutati separatamente ai fini della ricostruzione del bilancio complessivo dei materiali movimentati.

Le acquisizioni della fase A sono state elaborate ottenendo ortofoto e modelli digitali della superficie ad alta risoluzione spaziale.

Le campagne hanno prodotto mediamente circa 400 immagini per rilievo, con GSD di 6,00 mm/pixel e risoluzione spaziale del DSM di 0,80 cm/pixel. È riportato un RMSE complessivo sui punti di controllo di circa 4,00 cm, da considerare nell'interpretazione metrica dei risultati.

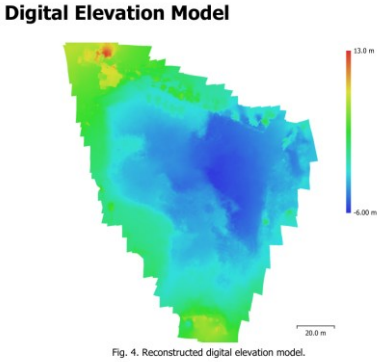


Fig. 2. Modello digitale di elevazioni - Fase A (rapporto Metashape 8 febbraio 2026)

3 Metodologia MRVC (Multitemporal Raster Volume Comparison)

La metodologia proposta prevede l'acquisizione fotogrammetrica, la ricostruzione di ortofoto e DSM e il confronto quantitativo fra differenti epoche di rilievo.

3.1 Acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica con WebODM

Le riprese sono state effettuate con DJI Mavic Air di prima generazione, dotato di fotocamera da 12 MP, sensore CMOS da 1/2,3" e risoluzione fotografica di 4056 × 3040 pixel. La pianificazione dei voli è stata svolta mediante Map Pilot, per definire le traiettorie di volo e la sovrapposizione delle immagini. Sono state effettuate riprese con quota di 20-25 m e sovrapposizioni dell'80% longitudinale e del 70% trasversale.

WebODM ha consentito di gestire il processo fotogrammetrico dalla serie d'immagini alla nuvola di punti, all'ortofoto e al DSM. Successivamente l'esportazione dei prodotti georeferenziati ha permesso la successiva elaborazione in ambiente GIS e Python.

Per il caso applicativo, i DSM sottoposti ad analisi MRVC derivano anche da "Agisoft Metashape Professional" assunto quale riferimento tecnico di controllo.

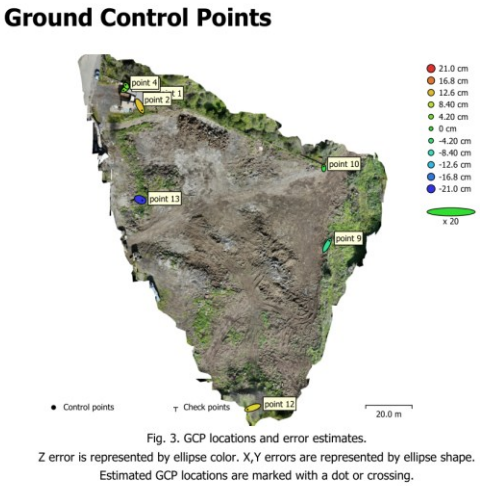


Fig. 3. Distribuzione dei punti di controllo e residui altimetrici nel report - fase A.

3.2 Sviluppo dello script Python MRVC con il supporto dell'intelligenza artificiale

Lo sviluppo dello script Python Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC) si è avvalso delle potenzialità offerte dall'intelligenza artificiale generativa quale strumento di supporto alla programmazione e all'implementazione degli algoritmi di elaborazione raster. Nello specifico, è stato utilizzato ChatGPT, sviluppato da OpenAI, per la scrittura del codice Python. Tale approccio ha consentito di tradurre le operazioni di analisi geospaziale in una procedura computazionale automatizzata.

Lo script MRVC è stato sviluppato con l'obiettivo di automatizzare il confronto altimetrico tra modelli digitali della superficie acquisiti in epoche successive, consentendo la quantificazione distinta dei volumi di scavo e riporto e la produzione di elaborati cartografici e risultati numerici a supporto del monitoraggio e della contabilizzazione delle lavorazioni.

La procedura MRVC è stata articolata in sei operazioni: (i) lettura dei DSM georeferenziati in formato GeoTIFF; (ii) verifica del sistema di riferimento, della risoluzione e dell'allineamento delle griglie, con eventuale ricampionamento; (iii) definizione del dominio comune mediante maschere delle celle valide e del poligono di analisi; (iv) eventuale correzione del dislivello sistematico stimato su superfici stabili; (v) calcolo della differenza altimetrica cella per cella e applicazione della

soglia di significatività; (vi) integrazione dei contributi volumetrici ed esportazione della mappa differenziale e del rapporto quantitativo.

Il dominio di analisi Ω è stato individuato mediante l'intersezione fra il poligono di analisi e le celle valide dei due DSM, preventivamente riferiti alla medesima griglia. Per ogni cella *i* è stata calcolata la differenza altimetrica $\Delta h_i = zAR5_{,i} - zBR1_{,i}$, assumendo valori positivi per gli abbassamenti del terreno (scavi) e negativi per gli innalzamenti (riporti). È stata adottata una soglia di significatività $\tau = 0{,}30$ m, al fine di selezionare le variazioni altimetriche considerate rilevanti. I volumi sono stati determinati integrando le differenze altimetriche selezionate rispetto all'area planimetrica delle celle.

$V_scavo = \Sigma_\{i \in \Omega,\ \Delta h_i > \tau\}\ (\Delta h_i \cdot A_i)$
$V_riporto = \Sigma_\{i \in \Omega,\ \Delta h_i < -\tau\}\ (-\Delta h_i \cdot A_i)$

Le due componenti volumetriche sono state quantificate separatamente, mentre il volume netto di scavo è stato ottenuto sottraendo il volume dei riporti da quello complessivo degli scavi.

Nel confronto AR5–BR1 è stato stimato un volume netto di scavo pari a circa 9.162 m³. Di seguito è riportato un estratto illustrativo del codice Python MRVC, riferito a DSM già allineati sulla medesima griglia:

```
valid = np.isfinite(z0) & np.isfinite(z1) & mask
dh = z0 - z1
V_scavo = np.sum(dh[valid & (dh > tau)]) * area_cella
V_riporto = np.sum(-dh[valid & (dh < -tau)]) * area_cella
V_netto = V_scavo - V_riporto
```

L'attendibilità della stima volumetrica viene considerata in relazione all'accuratezza altimetrica dei DSM, alla qualità della registrazione geometrica e alle eventuali interpolazioni necessarie per la ricostruzione delle superfici.

3.3 Scavo, riporto e gestione delle aree non confrontabili

Le aree prive di copertura comune, inclusa quella di deposito a nord-est, sono escluse dal calcolo differenziale: senza superficie iniziale non è possibile quantificare direttamente il materiale accumulato. MRVC restituisce variazioni geometriche in banco, non un bilancio di massa né il volume sciolto trasportato. La riproducibilità richiede la conservazione dei DSM, delle maschere, delle impostazioni di griglia e soglia e dei parametri di registrazione.

È prevista l'integrazione della procedura in un'applicazione dedicata, da distribuire con licenza open source attraverso il sito https://www.marealmar.it/.

4 Risultati del caso applicativo

L'applicazione della procedura Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC) al cantiere AL.MAR. ha consentito di ricostruire le principali trasformazioni morfologiche intervenute durante le successive fasi di sbancamento e preparazione delle fondazioni.

Il confronto tra i modelli digitali della superficie AR5 e BR1, esteso a un'area di analisi di circa 6.025 m², ha evidenziato le variazioni altimetriche negative, riconducibili alle operazioni di scavo. Applicando una soglia di significatività di 0,30 m, sono stati stimati circa 9.244 m³ di scavo e 82 m³ di riporto, corrispondenti a un volume netto di scavo di circa 9.162 m³. Ai fini della documentazione tecnico-contabile del primo SAL della fase B è stato adottato un valore prudenziale di circa 9.200 m³.

La rappresentazione cartografica delle differenze altimetriche evidenzia un abbassamento particolarmente marcato nel settore meridionale del lotto, interessato dalle operazioni di scavo del banco lavico. La distribuzione spaziale delle variazioni permette di individuare le aree maggiormente trasformate e di associare le quantità volumetriche alle effettive lavorazioni eseguite.

Un ulteriore riscontro è fornito dalla documentazione relativa al SAL del periodo 29 gennaio–5 febbraio 2026, riferito alla precedente fase A. In tale occasione, il rilievo fotogrammetrico ha consentito di documentare una movimentazione complessiva di circa 2.523 m³, con quantità contabili di 2.300 m³ di scavo e 200 m³ di riporto. Il materiale sciolto è stato stimato in circa 2.669 m³, corrispondenti a 137 viaggi di trasporto. Il rapporto tra volume sciolto e volume di scavo in banco restituisce un coefficiente operativo di scompattamento pari a circa 1,16.

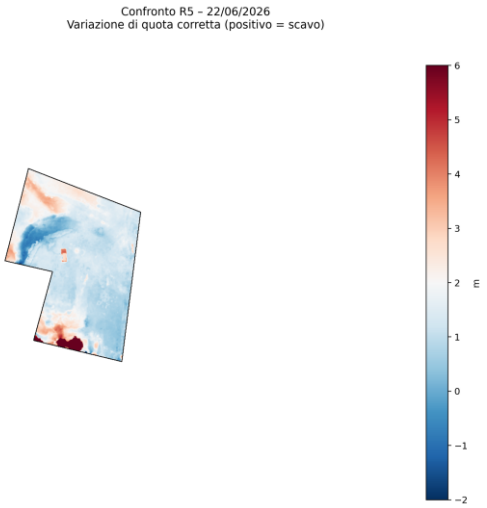


Fig. 4. Mappa delle differenze altimetriche AR5–BR1

L'ultimo riscontro tecnico è stato ottenuto dall'analisi comparativa con il giornale dei lavori relativo al periodo 12 maggio–1 luglio 2026, nel quale risultano annotate quantità operative complessive pari a circa 12.415 m³. Lo scostamento rispetto al volume geometrico di scavo, stimato mediante analisi differenziale dei DSM in circa 9.240 m³, è attribuibile alla diversa natura delle grandezze considerate e ai rispettivi domini di misurazione. Le quantità registrate dall'impresa comprendono infatti operazioni di estrazione, movimentazione interna e lavorazioni accessorie, mentre il metodo MRVC quantifica esclusivamente le variazioni volumetriche comprese nel dominio spaziale comune ai rilievi AR5 e BR1. L'analisi fotogrammetrica ha pertanto consentito di determinare un volume geometrico indipendente dalle stime operative di cantiere, fornendo un riferimento quantitativo oggettivo a supporto della contabilizzazione del primo SAL della fase B.

Nel complesso, i risultati ottenuti evidenziano la validità applicativa della metodologia proposta, dimostrando come l'integrazione tra rilievi UAV, elaborazione fotogrammetrica open source e analisi volumetrica mediante MRVC possa fornire riscontri quantitativi utili e tecnicamente coerenti con le esigenze di monitoraggio e contabilizzazione delle lavorazioni di cantiere.

5 Conclusioni

L'esperienza condotta presso il cantiere dello stabilimento AL.MAR. di Acireale ha evidenziato le potenzialità della fotogrammetria open source con droni consumer, anche di prima generazione, per il monitoraggio delle trasformazioni morfologiche del terreno e per il supporto alle attività di verifica tecnico-contabile.

L'elaborazione delle immagini eseguita mediante la piattaforma open source WebODM disponibile all'indirizzo https://webodm.org, ha consentito di ricostruire nuvole di punti, ortofoto e modelli digitali della superficie, rendendo disponibili dati georeferenziati per le successive analisi in ambiente GIS.

La disponibilità del codice sorgente, l'interoperabilità dei formati e l'evoluzione autonoma della piattaforma avviata nell'aprile 2026 [7] ne confermano l'interesse per applicazioni di monitoraggio periodico, anche in contesti professionali caratterizzati da risorse economiche e strumentali limitate. Il riferimento tecnico impiegato per le verifiche delle elaborazioni fotogrammetriche è stato Agisoft Metashape Professional.

Per automatizzare il confronto altimetrico fra DSM acquisiti in epoche successive è stato sviluppato, mediante ChatGPT basato sul modello GPT-6 di OpenAI, lo script Python Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC), mediante il quale è stata eseguita l'integrazione delle operazioni di allineamento delle griglie, la delimitazione delle superfici confrontabili, la gestione dei dati non validi e l'applicazione delle soglie altimetriche. Ciò ha consentito di quantificare separatamente i volumi di scavo e riporto e il confronto con la documentazione giornaliera delle lavorazioni ha ulteriormente evidenziato l'utilità dell'analisi fotogrammetrica quale strumento di riscontro quantitativo indipendente dalle stime operative dell'impresa.

Pur considerando le incertezze proprie delle ricostruzioni tridimensionali e le limitazioni derivanti dalla copertura spaziale dei rilievi, i risultati ottenuti confermano

l'efficacia applicativa della metodologia nel documentare l'evoluzione morfologica del cantiere e nel fornire elementi oggettivi a supporto della contabilizzazione dei lavori.

Gli sviluppi successivi riguarderanno l'integrazione delle funzionalità MRVC in un'applicazione dedicata, destinata alla distribuzione con licenza open source attraverso il sito https://www.marealmar.it.

Nel complesso, l'integrazione fra acquisizioni UAV low-cost, elaborazione fotogrammetrica mediante WebODM e analisi volumetrica automatizzata con MRVC ha dimostrato la concreta applicabilità di una procedura tecnologica accessibile per il controllo tecnico-ambientale dei cantieri produttivi, con particolare riferimento alla documentazione delle trasformazioni del terreno e alla quantificazione delle lavorazioni eseguite.

Riferimenti bibliografici

1. OpenDroneMap contributors. OpenDroneMap, progetto open source per la fotogrammetria da immagini aeree. https://www.opendronemap.org/.
2. Schönberger, J.L., Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. Proceedings CVPR, 4104–4113.
3. James, M.R., Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117, F03017.
4. Documentazione tecnica AL.MAR. (2026). Stato avanzamento lavori.
5. Agisoft LLC (2026). Metashape Processing Report, 8 febbraio 2026 (rapporto tecnico di campagna, 9 pp.).
6. WebODM contributors. WebODM, interfaccia e strumenti per elaborazioni fotogrammetriche UAV. https://webodm.org/.
7. Toffanin, P. (2026). WebODM has officially decoupled from OpenDroneMap, 6 aprile 2026. https://webodm.org/blog/announcement/
8. Laudani Fichera, D., Pulvirenti, G., Spicuzza, P., Leone, M., Vecchio Nicosia, F. (2019). Il rilievo fotogrammetrico da SAPR a supporto della modellazione idraulica. XXIII Conferenza Nazionale ASITA, Trieste, 12–14 novembre 2019.

ModelRAIL: navigazione autonoma di UAV commerciali per il monitoraggio ferroviario

Andrea Maria Lingua[1], Filiberto Chiabrando[2], Edward Borgogno[2], Chiara Graziani[1]

[1] Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia
andrea.lingua@polito.it, chiara.graziani@polito.it
[2] Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125 Torino, Italia
filiberto.chiabrando@polito.it, edward.borgogno@polito.it

Abstract. Per il monitoraggio ferroviario con UAV, ModelRAIL integra segmentazione delle rotaie e navigazione visiva. Un dataset annotato in CVAT permette di confrontare YOLO11n-seg e YOLO26n-seg. Dalle maschere si ricavano la mezzeria e i riferimenti di guida, simulati fuori linea mediante telemetria GNSS e un modello cinematico semplice. La prova sul radiocomando, con la camera del drone rivolta a un video preregistrato, documenta il riconoscimento e prepara la validazione in campo.

Parole chiave: Monitoraggio ferroviario, UAV, segmentazione di istanza, navigazione visiva, telemetria GNSS.

1 Introduzione

Per descrivere lo stato di una linea ferroviaria occorre rilevare con continuità il binario e lo spazio che lo circonda. Accanto alle rotaie interessano la massicciata, la vegetazione, le opere e i versanti, le cui variazioni acquistano significato solo se le acquisizioni sono confrontabili nel tempo. La fotogrammetria da Uncrewed Aerial Vehicle (UAV) permette di osservare tratti estesi, ma l'utilità metrica dei prodotti dipende dalla geometria di presa e dalla qualità della georeferenziazione [1]. Cuypers et al. [2] hanno esaminato l'estrazione planimetrica delle rotaie da immagini aeree; Ghassoun et al. [3] hanno verificato un procedimento fotogrammetrico sui binari di una gru portuale. In entrambi i casi, al riconoscimento dell'elemento si affianca il problema della sua localizzazione affidabile.

ModelRAIL affronta questi problemi nel quadro di un gemello digitale dell'infrastruttura, alimentato da rilievi ripetuti e modelli tridimensionali. Affinchè le immagini raccolte siano efficaci lungo la tratta, il drone deve mantenere il binario nel campo di vista anche dove il tracciato curva o le rotaie sono parzialmente coperte. Ombre, prospettiva e oggetti lineari estranei possono rendere instabile la segmentazione [4, 5]. La questione di ricerca riguarda quindi il passaggio dalla maschera di una rotaia, valutata su un singolo fotogramma, a una mezzeria coerente nel tempo e utilizzabile

per la guida. Il controllo visivo fornisce l'impostazione metodologica [6]; la sua applicazione richiede però che gli errori percettivi siano riconosciuti prima di trasformarsi in comandi.

Il lavoro descrive la catena sperimentale, dalla scelta della configurazione DJI Mini 3 Pro–DJI RC Pro alla segmentazione delle rotaie, alla stima della mezzeria e alla generazione dei riferimenti di guida in modalità virtual stick. I comandi sono propagati fuori linea con un modello di moto semplificato, inizializzato con telemetria GNSS preregistrata.

2 Progetto preliminare del sistema

Nel progetto preliminare viene scelto il drone DJI Mini 3 Pro che acquisisce immagini e telemetria, mentre il DJI RC Pro ospita l'ambiente applicativo previsto per Mobile SDK v5. L'abbinamento fra i due dispositivi è riportato nella documentazione DJI [7]. La catena è articolata in acquisizione, segmentazione, ricostruzione della geometria e calcolo dei riferimenti di guida (Fig. 1); stabilizzazione e attuazione restano affidate al controllore di volo. Le elaborazioni descritte nelle sezioni seguenti sono state sviluppate su dati registrati. La schermata acquisita sul radiocomando documenta una prova della parte percettiva, distinta dall'impiego dei comandi per muovere il velivolo.

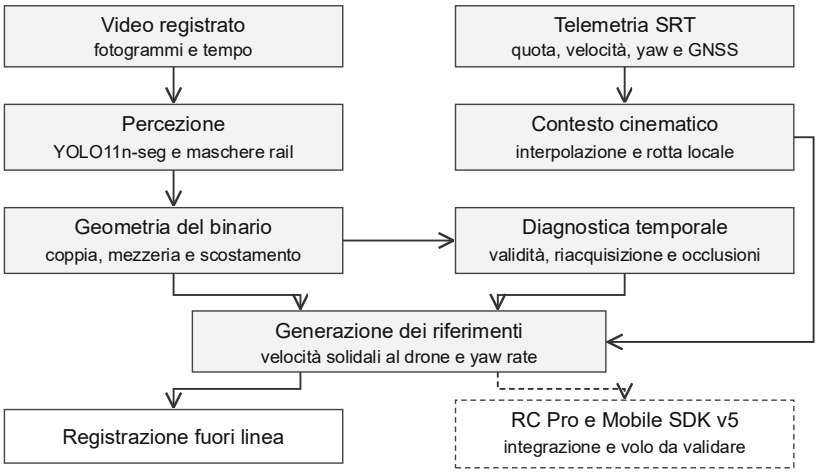


Fig. 1. Architettura ModelRAIL. Il ramo continuo rappresenta la generazione dei riferimenti fuori linea; il collegamento tratteggiato individua l'integrazione con Mobile SDK v5 da verificare per l'attuazione.

I riferimenti calcolati dal prototipo sono espressi secondo le convenzioni della modalità virtual stick dell'SDK [7]. Prima dell'attuazione occorrerà verificare sul radiocomando segni, sistemi di riferimento, cadenza dei comandi e gestione delle interruzioni del riconoscimento. La compatibilità con l'SDK non implica la disponibilità di tutte le funzioni di volo: nell'elenco DJI dei velivoli con evitamento degli ostacoli in modalità

virtual stick avanzata non compare il Mini 3 Pro [7], l'architettura non attribuisce pertanto tale funzione alla configurazione studiata. Si progetta un volo che stia entro la sagoma del treno, sotto i cavi elettrici a circa 2-3 m di altezza dai binari.

3 Annotazione e produzione del dataset

Per proporre un algoritmo di riconoscimento automatico dei binari, si definisce un dataset composto da 5 sequenze con punti di vista differenti su 2 tratte differenti. I fotogrammi obliqui dei 4 video indicati in tabella 1 sono destinati all'addestramento; quelli più nadirali di DJI_0150.MP4 alla validazione, per valutare il modello su una sequenza indipendente da quelle utilizzate per l'addestramento e con una geometria differente.
Il campionamento procede con un passo di tre fotogrammi e produce i conteggi riassunti nella Tabella 1. Si usano nel complesso oltre 2200 fotogrammi per l'addestramento e 241 per la validazione.

Tabella 1. Composizione del dataset secondo i conteggi della campagna di annotazione.

Caratteristica	Addestramento	Test
Video	DJI_0070.MP4 DJI_20250325175730_0002_W.MP4 DJI_20231111163709_0001_W.MP4 DJI_20240611114108_0445_S.MP4	DJI_0150.MP4
Vista	Obliqua	Nadirale
Intervallo dei frame	300–1500 390-1800 4000-7200 90-3450	30–750
Passo di campionamento	3 frame	3 frame
Frame dichiarati	400 451 718 1104	241
Annotazioni manuali	100 129 118 109	70
Altre annotazioni Interpolate	300 322 600 996	171

L'annotazione descrive la singola rotaia con la classe rail, senza distinguere sinistra e destra. In CVAT sono state tracciate manualmente polilinee su fotogrammi chiave di ciascuna sequenza, utilizzando la modalità Track per interpolare le annotazioni nei fotogrammi intermedi ([8]). Le annotazioni così ottenute sono state verificate visivamente.

4 Addestramento e verifica dei segmentatori

4.1 Impostazione del confronto

L'esplorazione iniziale ha incluso Rail-Net, che localizza le rotaie lungo righe dell'immagine [5], e un procedimento classico fondato sulla ricerca di minimi e sulla stima robusta delle linee. Rail-Net, applicato direttamente alle riprese oblique disponibili, non ha restituito una geometria utilizzabile con continuità. Il confronto principale riguarda perciò due reti di segmentazione di istanza in configurazione nano per potenziale compatibilità con le prestazioni del RC Pro, YOLO11n-seg [9] e YOLO26n-seg [10], entrambe adattate alla sola classe *rail*. Ciascuna fornisce una maschera e una confidenza per ogni rotaia candidata. Per entrambi gli addestramenti la migliore epoca riportata è la 84.

Tabella 2. Confronto delle metriche delle maschere e dei tempi per immagine. F1 è ricalcolato da precisione e richiamo; i tempi derivano da due misure per modello.

Indicatore	YOLO11n-seg	YOLO26n-seg
Migliore epoca	84	84
Precisione maschere	0,963	0,949
Richiamo maschere	0,971	0,965
F1 ricalcolato	0,967	0,957
mAP50 riportata	0,945	0,957
mAP50–95 riportata	0,351	0,903
Tempo totale (ms)	19,0–19,2	19,9–20,9
Immagini/s teoriche	52,1–52,6	47,8–50,3

La Tabella 2 riporta precisione e richiamo delle maschere elevati per entrambe le reti. Le mAP indicate sono maggiori per YOLO26n-seg, soprattutto nell'intervallo di soglie IoU 0,50–0,95. Nella scena illustrata in Fig. 2, tuttavia, YOLO26n-seg individua una rotaia, mentre YOLO11n-seg ne individua due: il caso rende visibile un errore rilevante per la mezzeria, senza dire quanto spesso si verifichi.

4.2 Prestazioni temporali e scelta

Sull'ingresso di 544 × 960 pixel i tempi complessivi di preparazione, inferenza e post-elaborazione sono 19,0–19,2 ms per YOLO11n-seg e 19,9–20,9 ms per YOLO26n-seg. I reciproci corrispondono a circa 52 e 48–50 immagini al secondo, realizzate su DELL Precision 5490 con CPU Ultra 9 185 H 2500 MHz, 64 GB RAM, NVIDIA RTX 3000 ADA 8GB dedicati con CUDA driver. YOLO11n-seg è stato adottato nel prototipo per i tempi di elaborazione leggermente inferiori e perché, nelle prove condotte, YOLO26n-seg individuava talvolta una sola delle due rotaie, impedendo la stima diretta della mezzeria.

La Fig. 2 mostra un esempio in cui YOLO11n-seg individua entrambe le rotaie necessarie alla navigazione (immagine a sinistra), mentre YOLO26n-seg non rileva la rotaia sinistra del binario (immagine a destra). La scelta riguarda questo impiego: le mAP riportate suggeriscono un diverso ordinamento e la continuità della mezzeria dovrà essere quantificata su sequenze indipendenti.

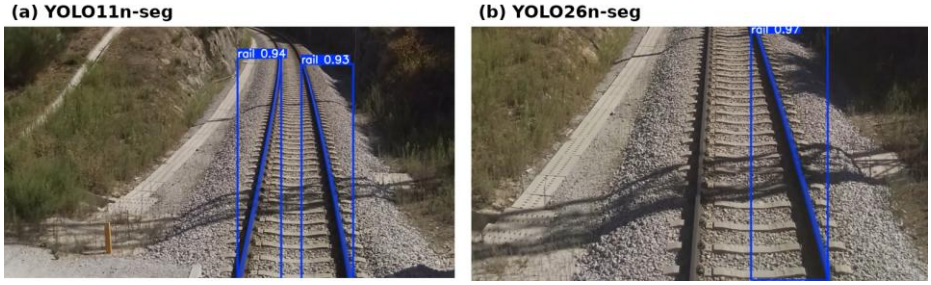


Fig. 2. Esempi di segmentazione della classe rail nello stesso contesto ferroviario: (a) YOLO11n-seg individua due rotaie; (b) YOLO26n-seg ne individua una.

5 Ricostruzione del binario e navigazione

5.1 Selezione delle rotaie e stima della mezzeria

Nelle prove fuori linea YOLO11n-seg riaddestrato viene utilizzato per segmentare i video con una soglia di confidenza di 0,60. La ricerca è concentrata nel 70% inferiore dell'immagine, dove le rotaie sono più vicine alla camera. Area, estensione verticale e posizione delle maschere escludono i candidati troppo piccoli o lontani dalla zona utile; la distanza fra i due assi e la concordanza con il fotogramma precedente orientano poi la scelta della coppia. Questi vincoli riducono il rischio di seguire un elemento lineare estraneo al binario. La qualifica di rotaia sinistra o destra compare soltanto a questo punto, ordinando le due curve secondo la loro posizione nella parte bassa del fotogramma. Quando un tratto è occluso, la geometria precedente può sostenere una previsione breve, esplicitamente distinta da una nuova osservazione.

Per ogni ordinata y comune alle due maschere, siano $x_L(y)$ e $x_R(y)$ le ascisse dei rispettivi assi. La loro media definisce la mezzeria nell'immagine:

$$x_c(y) = \frac{x_L(y) + x_R(y)}{2} \quad (1)$$

Si considerino una sezione y_n vicina al bordo inferiore e una sezione intermedia y_m. Lo scostamento rispetto al centro del fotogramma di larghezza W è $epx = x_c(y_n) - W/2$; la variazione della mezzeria fra le due sezioni fornisce l'orientamento apparente $\theta_{img} = atan2[x_c(y_n) - x_c(y_m), y_n - y_m]$. Quest'ultimo è un angolo nel piano immagine, non l'azimut del binario. Assumendo per il prototipo una distanza d = 1,505 m fra gli assi delle teste delle rotaie, la separazione apparente $g(y_n)$ dà una scala locale $e_m \approx epx\ d/g(y_n)$. La relazione è utile per il riferimento di guida, ma risente della prospettiva, dell'assetto della camera e della definizione delle maschere: non va letta come una misura metrica validata.

5.2 Riferimenti virtual stick e modello di moto

Dallo scostamento laterale e dall'orientamento apparente, integrati con la velocità disponibile e con lo stato della soluzione, il prototipo ricava i segnali normalizzati ROLL, PITCH, YAW e THR. Un controllo proporzionale filtrato li trasforma in riferimenti di velocità laterale, longitudinale e verticale e in una velocità d'imbardata, secondo le convenzioni dell'SDK [7]. Il filtraggio e i limiti di variazione attenuano i salti fra fotogrammi. Se la coppia di rotaie perde affidabilità, il modulo diagnostico evita di trattare la previsione temporale come una nuova misura; guadagni e durata ammissibile della previsione dovranno essere tarati sulla risposta effettiva del velivolo.

La propagazione dei riferimenti è descritta con un modello cinematico discreto. Si indichino con v_f e v_r le velocità comandate in avanti e verso destra nel sistema solidale al drone, con v_u la velocità verticale, con ψ l'azimut misurato in senso orario dal Nord e con ω la velocità d'imbardata. In coordinate locali Est–Nord, al passo Δt valgono:

$$\begin{aligned} E_{k+1} &= E_k + \Delta t(vf \sin \psi_k + vr \cos \psi_k) \\ N_{k+1} &= N_k + \Delta t(vf \cos \psi_k - vr \sin \psi_k) \\ h_{k+1} &= h_k + \Delta t\ vu\ e\ \psi_{k+1} = \psi_k + \Delta t\ \omega. \end{aligned} \quad (2)$$

Il modello integra i set-point associati agli stick simulati; non riproduce inerzia, vento o risposta del controllore di bordo.

6 Simulazione fuori linea e dimostrazione sul radiocomando

La riproduzione fuori linea associa i fotogrammi di DJI_0070.MP4 ai dati del file DJI_0070.srt che contengono i parametri di posizione e assetto angolare del drone con una frequenza pari a 1 Hz. Le grandezze telemetriche vengono interpolate ai tempi dei fotogrammi: posizione GNSS, quota, velocità e imbardata servono a inizializzare e contestualizzare il moto simulato. L'interpolazione non migliora la risoluzione temporale delle osservazioni originarie. Anche rotta e imbardata hanno significati diversi: la prima deriva dallo spostamento tra posizioni successive, la seconda dall'orientamento del drone. La traiettoria GNSS registrata descrive il volo da cui proviene il video, non una misura indipendente dell'errore della guida simulata. Visto

che i comandi calcolati non modificano le immagini già acquisite, questa prova verifica la catena di elaborazione senza chiudere l'anello fra moto e osservazione.



Fig. 3. Tracking fuori linea: rotaie e mezzeria su un fotogramma registrato. Stato OK; scostamento −83 pixel, corrispondenti a −0,36 m nella stima locale. I campi SRT e il tempo di elaborazione non sono disponibili in questo fotogramma.

Una verifica preliminare della percezione è stata svolta sul radiocomando implementando il modello YOLO11n-seg riaddestrato con la funzione di predizione in ambiente Android mediante Android Studio. Quindi, la funzionalità è stata verificata dirigendo la camera del Mini 3 Pro verso uno schermo che riproduce il video ferroviario preregistrato. Nell'interfaccia compaiono due rilevamenti rail (Fig. 4). La schermata documenta il riconoscimento in tale configurazione ottica; la latenza visualizzata, pari a 689 ms, si riferisce a un singolo istante e l'indicatore di frequenza mostra 0,0. Non se ne può ricavare una frequenza di esercizio. Il passaggio alla guida sul campo richiederà la misura continuativa dei tempi, la verifica dell'invio dei riferimenti virtual stick e la valutazione della traiettoria ottenuta.

7 Conclusioni

La sperimentazione ha collegato la segmentazione delle rotaie alla selezione geometrica della coppia, alla stima della mezzeria e alla simulazione dei riferimenti di guida. YOLO11n-seg è stato impiegato nel prototipo per la capacità di restituire entrambe le rotaie nella scena esaminata e per i tempi misurati leggermente inferiori Rispetto a Yolo26n-seg; La prova sul radiocomando aggiunge una verifica del riconoscimento sul flusso ottico. Le successive misure dell'intera catena e dell'errore di traiettoria sul

campo permetteranno di valutare se la guida visiva fornisca acquisizioni abbastanza regolari per il monitoraggio ripetuto della linea.

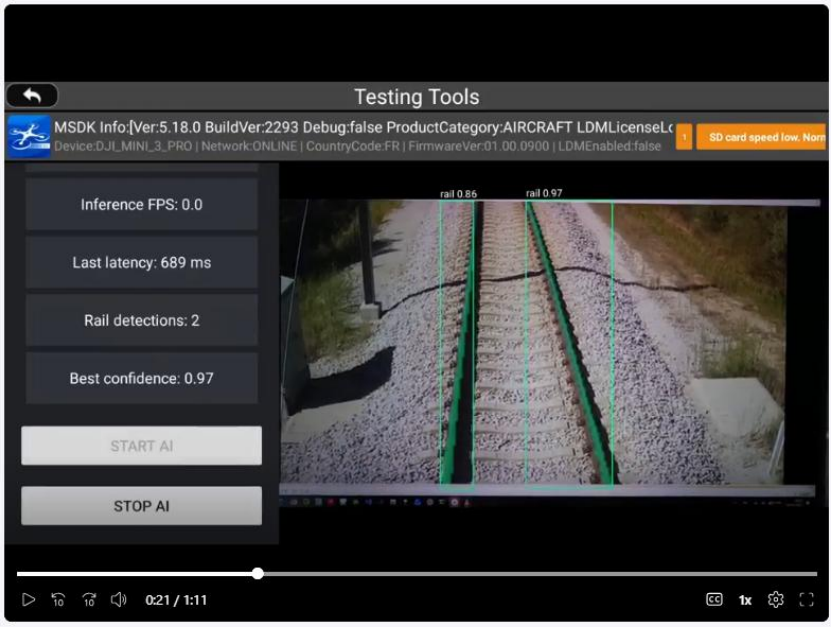


Fig. 4. Prova di riconoscimento sul radiocomando. La camera del drone riprende un video preregistrato riprodotto su schermo; l'interfaccia mostra due rilevamenti della classe rail. Immagine fornita dagli autori.

Ringraziamenti

Lo studio è stato finanziato dalla Regione Piemonte nell'ambito dei progetti SWITCH. Gli autori ringraziano Zirak, partner di progetto, e i colleghi del gruppo di Rappresentazione del DISEG per la collaborazione.

Riferimenti bibliografici

1. Colomina, I., Molina, P.: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, 79–97 (2014). https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
2. Cuypers, S., De Winter, H., Bassier, M., Vergauwen, M.: Planimetric rail positioning using UAV photogrammetry: Towards automated and safe railway infrastructure monitoring. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLVIII-1/W2-2023, 589–596 (2023). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-589-2023

3. Ghassoun, Y., Gerke, M., Khedar, Y., Backhaus, J., Bobbe, M., Meissner, H., Tiwary, P.K., Heyen, R.: Implementation and Validation of a High Accuracy UAV-Photogrammetry Based Rail Track Inspection System. Remote Sensing 13, 384 (2021). https://doi.org/10.3390/rs13030384
4. Yang, H., Li, X., Guo, Y., Jia, L.: RT-GAN: GAN Based Architecture for Precise Segmentation of Railway Tracks. Applied Sciences 12, 12044 (2022). https://doi.org/10.3390/app122312044
5. Li, X., Peng, X.: Rail Detection: An Efficient Row-based Network and A New Benchmark. Proc. 30th ACM International Conference on Multimedia (MM '22) (2022). https://doi.org/10.1145/3503161.3548050
6. Chaumette, F., Hutchinson, S.: Visual servo control. I. Basic approaches. IEEE Robotics & Automation Magazine 13(4), 82–90 (2006). https://doi.org/10.1109/MRA.2006.250573
7. DJI: Mobile SDK v5, Supported Product List e IVirtualStickManager. Documentazione tecnica ufficiale. https://developer.dji.com/doc/mobile-sdk-tutorial/en/ ; https://developer.dji.com/api-reference-v5/android-api/Components/IVirtualStickManager/IVirtualStickManager.html (consultati il 14/10/2026)
8. Ravi, N., et al.: SAM 2: Segment Anything in Images and Videos. arXiv:2408.00714 (2024). https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.00714
9. Jocher, G., Qiu, J.: Ultralytics YOLO11, software, versione iniziale 11.0.0 (2024). https://github.com/ultralytics/ultralytics
10. Jocher, G., Qiu, J., Liu, M., Lyu, S., Akyon, F.C., Kalfaoglu, M.E.: Ultralytics YOLO26: Unified Real-Time End-to-End Vision Models. arXiv:2606.03748 (2026). https://doi.org/10.48550/arXiv.2606.03748