Verso una stima di profondità metrica da immagini UAV per il patrimonio architettonico: il caso di Depth Anything V2

Andrea Maria Lingua[1], Filiberto Chiabrando[2], Francesca Gallitto[1], Stefania Manca[1], Alessio Martino[2], Alessandra Spadaro[1]

[1] DIATI, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy — (francesca.gallitto, andrea.lingua, stefania.manca, alessandra.spadaro)@polito.it
[2] DAD, Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125 Torino, Italy — (filiberto.chiabrando, alessio.martino)@polito.it

Abstract. Lo studio valuta Depth Anything V2 su oltre 3.000 immagini UAV di dieci siti del patrimonio architettonico, usando mappe fotogrammetriche come riferimento metrico. Il modello relativo, riscalato, e quello metrico mostrano errori legati al punto di vista; il secondo comprime sensibilmente le profondità. Un fine-tuning in due fasi, su viste oblique e nadirali, migliora la coerenza metrica, ma persistono errori ai bordi, sulle coperture a più livelli e nelle geometrie complesse.

Parole chiave: stima monoculare della profondità; UAV; patrimonio architettonico; fine-tuning; fotogrammetria; adattamento di dominio.

1 Introduzione

La stima monoculare della profondità (MDE) è passata da modelli convoluzionali specializzati per singoli scenari a modelli basati su transformer in grado di ricavare una struttura densa da una sola immagine RGB. MiDaS ha mostrato che l'addestramento su più dataset favorisce la generalizzazione senza ulteriore addestramento sul dominio di destinazione, mentre i dense prediction transformer hanno dimostrato l'utilità di integrare il contesto globale con i dettagli locali (Ranftl et al., 2022; Ranftl et al., 2021). Approcci più recenti hanno affrontato la stima metrica e il trasferimento tra domini: ZoeDepth, UniDepth, Marigold, Depth Anything V2, Depth Pro e MoGe (Bhat et al., 2023; Piccinelli et al., 2024; Ke et al., 2024; Yang et al., 2024; Bochkovskii et al., 2024; Wang et al., 2025).

Il patrimonio architettonico pone difficoltà specifiche a questi modelli. Le acquisizioni UAV oblique permettono di documentare le facciate e altre strutture verticali, integrando le viste nadirali nei rilievi di edifici storici (Aicardi et al., 2016; Masiero et al., 2019). In complessi architettonici estesi, la valutazione della qualità geometrica e l'integrazione di dati provenienti da sensori diversi costituiscono inoltre aspetti centrali del processo di documentazione (Chiabrando et al., 2019).Tessiture ripetitive, elementi decorativi sottili, discontinuità nette di profondità, ombre portate e

materiali diversi si accompagnano a frequenti passaggi tra coperture, facciate, vegetazione e cielo. Le acquisizioni da Uncrewed Aerial Vehicles (UAV) introducono inoltre viste nadirali e fortemente oblique, quote di presa e configurazioni della scena diverse da quelle delle immagini terrestri prevalenti nell'addestramento di molti sistemi MDE. Ottenere profondità metricamente attendibili è quindi più impegnativo rispetto alla generazione di di una ricostruzione visivamente plausibile. In questo studio la profondità stimata è valutata quale possibile fonte di informazione geometrica per la ricostruzione, la produzione di ortoimmagini, la premodellazione HBIM e la documentazione GIS, in integrazione con i prodotti del rilievo fotogrammetrico.

Depth Anything V2 è stato scelto perché offre modelli relativi e metrici nell'ambito di una stessa architettura, consente un adattamento controllato ed è disponibile pubblicamente (Yang et al., 2024). Il confronto tra le due configurazioni permette di distinguere la capacità di ordinare correttamente le profondità dal recupero della scala metrica nelle immagini UAV.

2 Stato dell'arte e requisiti dei dataset

I metodi pertinenti a questo studio affrontano aspetti differenti della stima della profondità da immagine singola. MiDaS apprende la profondità relativa mediante una supervisione eterogenea, ma non dispone di una scala metrica intrinseca (Ranftl et al., 2022). ZoeDepth combina stima relativa e metrica mediante componenti specifiche per dominio, mentre UniDepth mira a una previsione metrica più generalizzabile (Bhat et al., 2023; Piccinelli et al., 2024). Marigold impiega modelli di diffusione; Depth Anything V2 utilizza una supervisione teacher–student su larga scala; Depth Pro punta a contorni netti nella profondità metrica; MoGe stima una rappresentazione geometrica più articolata (Ke et al., 2024; Yang et al., 2024; Bochkovskii et al., 2024; Wang et al., 2025).

Nelle viste UAV del patrimonio costruito, la differenza rispetto ai dati di addestramento riguarda tanto la geometria quanto la radiometria. Nelle immagini terrestri, la profondità della scena è spesso organizzata attorno a strade, ambienti interni e linea dell'orizzonte. Nelle immagini aeree, le coperture possono occupare gran parte del fotogramma e l'asse ottico può essere rivolto verso il basso. Elementi a quote simili possono inoltre presentare brusche discontinuità locali. Un modello metrico addestrato su immagini terrestri può quindi comprimere l'intervallo delle profondità, anche quando conserva in parte il loro ordinamento locale.

Dataset metrici diffusi, tra cui KITTI, NYU Depth V2, ETH3D e DIML, non rappresentano pienamente i punti di vista e le distribuzioni di profondità propri dei rilievi UAV del patrimonio architettonico. Precedenti più vicini al presente studio sono ArchDepth, benchmark fotogrammetrico sintetico, e UseGeo, dataset multisensore acquisito da UAV; quest'ultimo è stato utilizzato anche per valutare la stima della profondità e la ricostruzione 3D da immagini (Welponer et al., 2022; Nex et al., 2024; Hermann et al., 2024). Il contributo qui presentato riunisce siti di interesse architettonico, viste nadirali e oblique, forti variazioni della quota relativa di volo e

riferimenti fotogrammetrici densi, predisposti per la calibrazione e l'adattamento supervisionato.

3 Il benchmark MDE4BH

L'attuale benchmark MDE4BH comprende oltre 3.000 immagini UAV relative a dieci casi di studio: isolati urbani, facciate monumentali, torri isolate, ville, una cupola, un esteso complesso architettonico e resti archeologici. Sono presenti acquisizioni nadirali, oblique e miste. Le quote relative di volo variano approssimativamente da 5 a 90 m; le immagini provengono da diverse piattaforme DJI, con differenti lunghezze focali e dimensioni del pixel. La Tabella 1 riporta la composizione dei casi di studio.

Le mappe di profondità di riferimento sono state prodotte in Agisoft Metashape mediante elaborazione a piena risoluzione e ricostruzione densa con impostazione Ultra High. Sono state mascherate le regioni di cielo, i vuoti, le superfici riflettenti e le altre aree non affidabili. Le mappe fotogrammetriche così ottenute forniscono il riferimento metrico per l'analisi dei residui, la riscalatura del modello relativo e il fine-tuning.

Tabella 1. Casi di studio del benchmark MDE4BH utilizzati per calibrazione, validazione e prove esterne.

ID	immagine	Drone/camera	n. immagini	Hrel [m]
(A) Timespan Museum (Scozia)		DJI Matrice M4E Focale 12.29 mm Pixel 3.36 mm	n. 80 nadirali incrociate n. 130 pitch ~ 60 ° n. 290 pitch ~ 45°	n. 150 ~ 20m n. 350 ~ 40 m
(B) Venaria Alto		DJI Matrice 350 Focale 35 mm Pixel 4.4 mm	n. 250 nadirali incrociate n. 180 pitch ~45°	~ 60m ~ 90 m
(C) Venaria Facciata		DJI Mini 3 Pro Focale 6.72 mm Pixel 2.4 mm	n.50 pitch ~ 90° n.25 pitch ~ 60°	18 m
(D) Torre Chianca		DJI Mavic 3M Focale 4.34 mm Pixel 3.3 mm	n. 40 pitch ~ 45° n. 55 pitch ~ 65°	n. 40 ~ 20 m n. 55 ~ 5 m
(E) Sacro Monte di Crea		DJI Mini 3 Pro Focale 6.72 mm Pixel 2.4 mm	n. 90 nadirali n. 95 pitch ~ 90° n. 30 pitch ~ 45° n. 115 pitch 60°-80°	5 m

ID	immagine	Drone/camera	n. immagini	Hrel [m]
(F) Villino Caprifoglio		DJI Spark Focale 4.4 mm Pixel 1.55 mm	n. 70 nadirali incrociate n.105 pitch 30°-70° n.25 pitch 90°	n. 130 ~ 25 m n.70 ~ 12 m
(G) Mappano		DJI Phantom 4 Pro	n. 195 nadirali incrociate n. 220 pitch 45°	80 m 60 m
(H) Cupola del Duomo di San Lorenzo		DJI Mini 3 Pro Focale 6.72 mm Pixel da 2.4 mm	n. 10 nadirali n.30 pitch 40°-60° n.90 60°-90°	13 m
(I) Castello del Valentino (To)		DJI Phantom 4 Pro Focale 8.8 mm Pixel size 2.41 µm	n. 209 Nadirali incrociate n. 67 inclinate 80 ° n. 205 inclinate 45°	n. 209 ~ 40 m n.272 ~ 60 m
(L) Bagno Arabo di Mezzagnone (RG)		DJIMini mavic 3 Focale 4.49 Pixel size 1.76	n. 229 Nadirali incorciate n. 139 inclinate 45°	n. 368 ~ 18 m

4 Protocollo sperimentale

Sono state valutate due configurazioni di riferimento. Nella prima, le previsioni del modello relativo Depth Anything V2 base sono state convertite in profondità metrica mediante regressione lineare sui soli pixel validi delle mappe fotogrammetriche. La scala e l'offset della trasformazione affine consentono di verificare quale parte della differenza tra i domini possa essere corretta con una calibrazione successiva. Nella seconda configurazione, il modello metrico outdoor è stato applicato direttamente alle immagini UAV. Il confronto impiega media e mediana dei residui, deviazione standard dei residui, radice dell'errore quadratico medio in scala logaritmica (RMSElog) ed

errore relativo assoluto (AbsRel); nelle valutazioni di dettaglio sono riportati anche SILog e le percentuali entro soglie δ.

4.1 Comportamento dei modelli di riferimento

Dopo la riscalatura, il modello relativo conserva un ordinamento utile delle profondità in alcune scene, soprattutto nelle viste urbane nadirali. Il modello metrico applicato direttamente mostra invece una marcata compressione della scala nelle geometrie di presa aeree: oggetti a circa 30–40 m dalla camera possono ricevere profondità previste di soli 5–10 m. La Tabella 2 riproduce alcune statistiche rappresentative dei modelli di riferimento.

A Mappano, le immagini nadirali sono relativamente stabili: la deviazione standard dei residui è nell'ordine di 0,5–1,3 m e gli errori relativi si collocano intorno all'1%; nelle viste oblique i valori peggiorano rispettivamente a circa 5,1–15,7 m e 5–10%. Per la facciata della Venaria, la dispersione dei residui varia da pochi decimetri a decine di metri secondo il sottoinsieme e l'angolo di vista. Strutture verticali isolate come la Torre Chianca risentono inoltre del punto di presa e della presenza del cielo. I risultati indicano che, oltre alla calibrazione della scala, occorre intervenire sulle regolarità geometriche apprese dal modello su scene terrestri.

Tabella 2. Risultati rappresentativi prima del fine-tuning; valori e segni dei residui riprendono il contributo originale (m = media, med = mediana, std = deviazione standard).

Caso	Sottoinsieme	m [m]	med [m]	std [m]	RMSElog	AbsRel
D rel. riscalato	Tutte	0,00	0,00	6,11	0,38	0,101
D rel. riscalato	Oblique 45°	0,00	0,00	4,61	0,12	0,068
D rel. riscalato	Oblique 60°	0,00	0,00	12,94	1,23	0,223
D metrico	Tutte	25,06	25,51	6,47	0,99	0,532
A rel. riscalato	Tutte	0,00	0,00	8,63	0,15	0,102
A metrico	Tutte	25,75	−24,90	17,27	0,50	0,692

4.2 Fine-tuning in due fasi

L'adattamento supervisionato è stato condotto in due fasi. La prima utilizza soprattutto immagini UAV oblique, che descrivono la geometria delle facciate e sono particolarmente critiche per il modello non adattato. La seconda riparte dal modello già aggiornato e introduce immagini oblique e nadirali per migliorare la generalizzazione rispetto al punto di vista. L'addestramento interessa principalmente il decoder e la componente di regressione della profondità; il *backbone* visivo resta congelato, o in larga parte congelato, per conservare le caratteristiche generali delle immagini e contenere il sovradattamento.

Per ciascuna fase sono state impiegate circa 1.000 immagini, con sottoinsiemi dedicati alla validazione e un insieme di prova costituito da immagini escluse

dall'addestramento. Gli ultimi due casi di studio sono stati esclusi interamente dall'addestramento. La funzione di costo combina errore L1 sulla profondità, termine logaritmico invariante alla scala e regolarizzazione della levigatezza, con pesi rispettivi di 1,0, 0,1 e 0,003. I tempi di addestramento riportati sono di circa 4–10 ore su NVIDIA RTX 4090. La funzione di costo tende a stabilizzarsi intorno a 30 epoche, prima del limite nominale di 100.

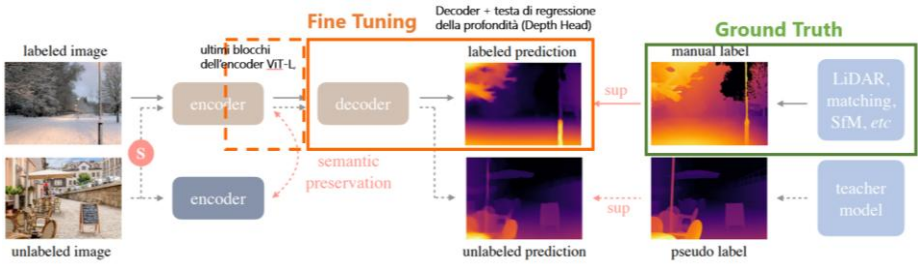


Fig. 1. Lo schema dell'algoritmo Depth Anything v2 con la parte oggetto di fine tuning

5 Risultati e discussione

Il fine-tuning migliora sensibilmente la coerenza metrica nel caso rappresentativo della Torre Chianca (D). Sull'insieme completo, la media dei residui è 0,093 m, la mediana 0,087 m e la deviazione standard 0,579 m; RMSElog è pari a 0,015 e AbsRel a 0,008. Valori simili si riscontrano nei sottoinsiemi obliqui a 45° e 60° (Tabella 3). Il miglioramento non è quindi limitato a un solo angolo di presa.

I confronti relativi al Sacro Monte di Crea, alla cupola di San Lorenzo e a Venaria Alto mostrano, dopo l'adattamento, residui medi prossimi a zero o nell'ordine di pochi decimetri. La deviazione standard diminuisce approssimativamente di un fattore compreso tra tre e quattro; gli intervalli riportati dopo l'addestramento sono rispettivamente circa 0,3–2,5 m, 1,2–2,7 m e 0,8–3,7 m, con AbsRel generalmente tra il 4% e l'11%.

Le analisi sui dettagli esclusi dall'addestramento mostrano sia i progressi sia i limiti dell'approccio. Per il dettaglio di Mappano si ottengono AbsRel 0,030, RMSE 2,01 m e il 99,96% dei pixel validi entro $\delta < 1,25$. Il dettaglio della Venaria raggiunge AbsRel 0,033 e RMSE 0,71 m. Il Sacro Monte di Crea resta più difficile: AbsRel è pari a 0,241, i residui si distribuiscono in gruppi distinti e persistono errori sulle coperture a quote differenti. Anche la non normalità dei residui, gli effetti ai bordi, le variazioni cromatiche e la geometria complessa rimangono problematici. La profondità stimata può pertanto sostenere interpretazioni geometriche rapide, integrazioni circoscritte delle lacune e procedure ibride, nel rispetto dei requisiti di accuratezza della specifica applicazione.

Infatti, le valutazioni di dettaglio, riportate a titolo d'esempio nelle fig 2 e fig. 3, mostrano comportamenti diversi nei due siti. A Mappano (fig. 2), il residuo medio è pari a 0,495 m, la deviazione standard a 1,945 m e l'AbsRel a 0,030; il 99,96% dei pixel

validi rientra nella soglia $\delta < 1{,}25$. La distribuzione dei residui resta tuttavia asimmetrica e la mappa evidenzia errori localizzati lungo i bordi e su alcune coperture.

Tabella 3. Risultati selezionati dopo l'adattamento per il caso D e per dettagli esclusi dall'addestramento (met. = metrico, fn = fine-tuning).

Caso	Sottoinsieme	Media [m]	Mediana [m]	Dev. std. [m]	RMSElog	AbsRel
D metrico fn	Tutte	0,093	0,087	0,579	0,015	0,008
D metrico fn	Oblique 45°	0,118	0,144	0,638	0,017	0,009
D metrico fn	Oblique 60°	0,053	0,054	0,535	0,014	0,009
G dettaglio	Escluso dall'addestr.	0,495	0,202	1,945	0,045	0,030
C dettaglio	Escluso dall'addestr.	0,097	0,098	0,704	0,039	0,033
E dettaglio	Escluso dall'addestr.	0,945	0,743	1,067	0,283	0,241

Al Sacro Monte di Crea (un esempio in fig. 3), pur essendo inferiore la deviazione standard (1,067 m), l'AbsRel sale a 0,241 e la quota di pixel entro $\delta < 1{,}25$ scende all'80,32%. L'istogramma presenta un secondo gruppo distinto di residui, associato nella mappa ad alcune porzioni della copertura a quote differenti. La sola dispersione complessiva non descrive quindi adeguatamente la qualità della stima: occorre considerare anche l'errore relativo e la distribuzione spaziale dei residui, soprattutto nelle geometrie architettoniche più articolate.

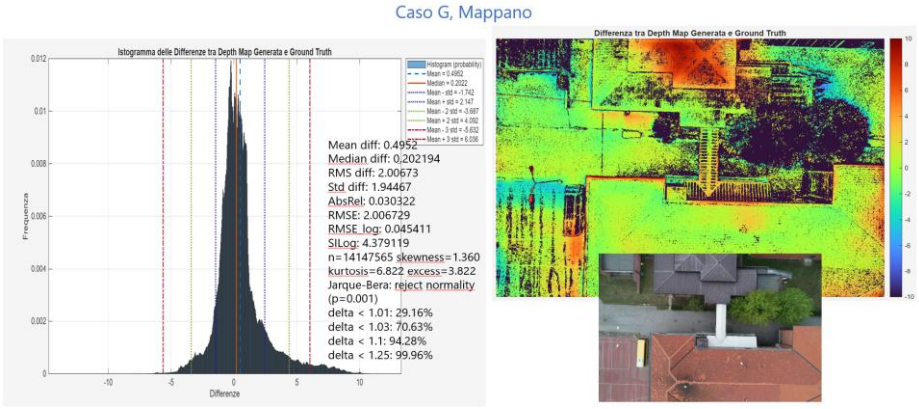


Fig. 2. Una caso esemplificativo delle valutazione di dettaglio nel caso di Mappano

6 Conclusioni

I modelli Depth Anything V2 addestrati prevalentemente su immagini terrestri non possono essere trasferiti direttamente alle immagini UAV del patrimonio architettonico quando è richiesta affidabilità metrica. Gli errori dei modelli di riferimento dipendono

fortemente dal punto di vista e dalla scala della scena; il modello metrico outdoor è particolarmente soggetto alla compressione delle profondità. Le mappe fotogrammetriche mascherate dei casi MDE4BH forniscono i dati necessari per valutare e correggere tale differenza.

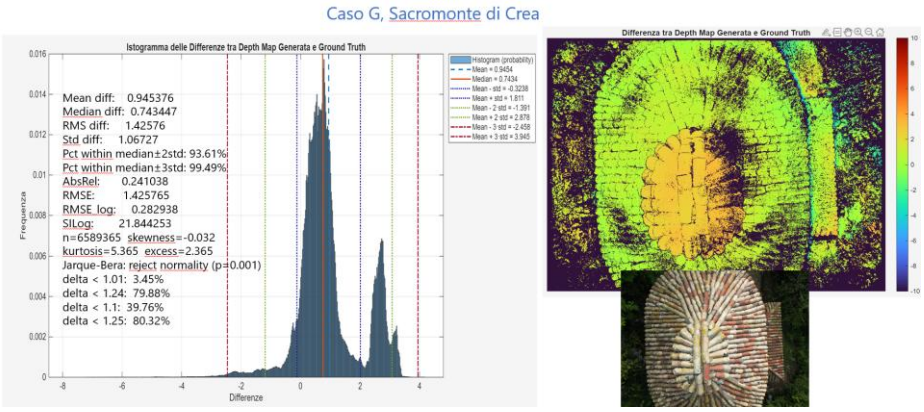


Fig. 3. Una caso esemplificativo delle valutazione di dettaglio nel caso del tetto di una cappella Sacro Monte di Crea

Un fine-tuning mirato in due fasi recupera una parte rilevante della coerenza metrica, anche in diverse viste oblique. La struttura dei residui sulle coperture complesse, ai bordi delle immagini e nei casi più difficili esclusi dall'addestramento limita tuttavia l'impiego attuale del metodo nei prodotti di rilievo ad alta precisione. La stima monoculare adattata può apportare informazione geometrica ai flussi di documentazione del patrimonio, in integrazione con la ricostruzione fotogrammetrica rigorosa.

Ringraziamenti

Lo studio è stato condotto nell'ambito del progetto FAIR — Future Artificial Intelligence Research e ha ricevuto finanziamenti dall'Unione europea — Next Generation EU (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza — PNRR, Missione 4, Componente 2, Investimento 1.3 — D.D. 1555 dell'11/10/2022, PE00000013). Il contenuto del contributo riflette esclusivamente le opinioni degli autori. Si ringra altresì il team studentesco DIRECT che ha collaborato con le acquisizioni di alcuni casi trattati, i Vigili del Fuoco sezione APR di Torino per la acquisizioni sulla Reggia di Venaria, Francesca Matrone, Marco Zerbinatti, Edward Borgogno, Beatrice Tanduo per le acquisizioni al Sacro Monte di Crea.

Riferimenti bibliografici

1. Aicardi, I., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., Spanò, A. (2016). UAV Photogrammetry with Oblique Images: First Analysis on Data Acquisition and Processing. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B1, 835–842. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-835-2016.
2. Bhat, S.F., Birkl, R., Wofk, D., Wonka, P., Mueller, M. (2023). ZoeDepth: Zero-shot transfer by combining relative and metric depth. arXiv:2302.12288. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.12288.
3. Bochkovskii, A., Delaunoy, A., Germain, H., Santos, M., Zhou, Y., Richter, S.R., Koltun, V. (2024). Depth Pro: Sharp monocular metric depth in less than a second. arXiv:2410.02073. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.02073.
4. Hermann, M., Weinmann, M., Nex, F., Stathopoulou, E.K., Remondino, F., Jutzi, B., Ruf, B. (2024). Depth estimation and 3D reconstruction from UAV-borne imagery: Evaluation on the UseGeo dataset. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 13, 100065. https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100065.
5. Ke, B., Obukhov, A., Huang, S., Metzger, N., Daudt, R.C., Schindler, K. (2024). Repurposing diffusion-based image generators for monocular depth estimation. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 9492–9502.
6. Masiero, A., Chiabrando, F., Lingua, A. M., Marino, B. G., Fissore, F., Guarnieri, A., Vettore, A. (2019). 3D Modeling of Girifalco Fortress. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9, 473–478. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-473-2019.
7. Nex, F., Stathopoulou, E.K., Remondino, F., Yang, M.Y., Madhuanand, L., Yogender, Y., Alsadik, B., Weinmann, M., Jutzi, B., Qin, R. (2024). UseGeo — A UAV-based multi-sensor dataset for geospatial research. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 13, 100070. https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100070.
8. Piccinelli, L., Yang, Y.-H., Sakaridis, C., Segu, M., Li, S., Van Gool, L., Yu, F. (2024). UniDepth: Universal monocular metric depth estimation. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 10106–10116.
9. Ranftl, R., Bochkovskiy, A., Koltun, V. (2021). Vision transformers for dense prediction. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 12179–12188.
10. Ranftl, R., Lasinger, K., Hafner, D., Schindler, K., Koltun, V. (2022). Towards robust monocular depth estimation: Mixing datasets for zero-shot cross-dataset transfer. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 44(3), 1623–1637. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3019967.
11. Wang, R., Xu, S., Dai, C., Xiang, J., Deng, Y., Tong, X., Yang, J. (2025). MoGe: Unlocking accurate monocular geometry estimation for open-domain images with optimal training supervision. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 5261–5271.
12. Welponer, M., Stathopoulou, E.K., Remondino, F. (2022). Monocular depth prediction in photogrammetric applications. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2022, 469–476. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-469-2022.
13. Yang, L., Kang, B., Huang, Z., Zhao, Z., Xu, X., Feng, J., Zhao, H. (2024). Depth Anything V2. Advances in Neural Information Processing Systems, 37. https://doi.org/10.52202/079017-0688.

Applicazione in ambito urbano di metodologie per il censimento forestale da nuvole di punti

Pietro Lombardo[1][0009-0005-3810-9663], Reyhaneh Zeynali [1][0009-0000-0840-7073], Anna Forte [1][0009-0008-8300-9057], Gabriele Bitelli [1][0000-0002-6118-6000]

[1]Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali DICAM, (pietro.lombardo4, anna.forte3, reyhaneh.zeynali2, gabriele.bitelli)@unibo.it

Parole chiave: SLAM, Censimento forestale, ITD

ABSTRACT. Lo studio valuta una procedura semi-automatica per la stima di parametri geometrici impiegati in ambito forestale, a partire da nuvole di punti ottenute tramite rilievo SLAM. La metodologia è stata testata nel parco della Scuola di Ingegneria e Architettura dell'Università di Bologna. I risultati sono stati confrontati con un sottocampione rilevato mediante tecniche convenzionali, con un errore medio assoluto di 1.9 cm e un'elevata correlazione (r = 0.99), mostrando l'efficacia della procedura.

1. INTRODUZIONE

Gli inventari forestali tradizionali, basati su metodiche quali il cavallettamento dendrometrico e la misura dell'altezza tramite clinometro, garantiscono buona accuratezza ma comportano tempistiche elevate e una alta intensità di manodopera. In questo contesto, le tecnologie di Mobile Laser Scanning (MLS) basate su algoritmi SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) rappresentano un'opportunità promettente poiché consentono di acquisire dense nuvole di punti tridimensionali con un singolo operatore in pochi minuti, ma la loro utilità per l'inventario dipende dalla disponibilità di procedure affidabili per l'estrazione automatica o semi-automatica dei parametri caratteristici delle alberature [1]. In questo studio è stata valutata l'accuratezza nella stima del Diameter at Breast Height (DBH) di una procedura sviluppata in R a partire dal pacchetto TreeX [2], ottimizzato al fine di renderlo più facilmente adattabile alle caratteristiche dell'area di studio.

I dati rilevati mediante MLS ricoprono un ruolo innovativo nelle procedure di Individual Tree Detection (ITD) e rappresentano uno strumento fondamentale per il miglioramento della gestione del verde urbano e forestale, fornendo dati spaziali accurati a livello centimetrico, dettagliati e georeferenziati. Tale soluzione consente di superare la scarsità di copertura satellitare per il posizionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) legata alla vegetazione fitta all'interno di foreste o in prossimità di elevate strutture urbane [3, 4], soprattutto se il rilievo dinamico è inquadrato in un sistema di riferimento assoluto mediante punti di controllo stabiliti al di fuori dell'area di scarsa copertura; inoltre, l'impiego di MLS potrebbe favorire l'ITD non solo all'interno di aree forestali ma anche in contesti urbani, dove sono presenti alberi di diversa età, forma e chiome con geometrie complesse che si sovrappongono tra di loro o con le infrastrutture adiacenti.

2. AREA DI STUDIO

Il rilievo è stato condotto nel parco della Scuola di Ingegneria e Architettura dell'Università di Bologna in Viale del Risorgimento, Bologna. L'area di studio, di estensione pari a circa 0.56 ha, ospita un popolamento arboreo caratterizzato da conifere di cui cedri, del libano, atlantico e deodara e da latifoglie quali ginkgo aceri e altre specie ornamentali. L'eterogeneità delle specie presenti comporta una marcata variazione delle dimensioni dei fusti da stimare con valori del DBH che risultano compresi tra 24 e 127 cm. Tale variabilità, unita alla presenza di

esemplari a portamento irregolare e di fusti talvolta inclinati, rende il sito un caso di studio rappresentativo delle condizioni tipiche sia nel contesto urbano sia in quello forestale.

Come riferimento per la validazione sono state considerate 34 alberature presenti nell'area di studio, inventariate tramite rilievo manuale. La fig. 1 riporta l'inquadramento del sito.

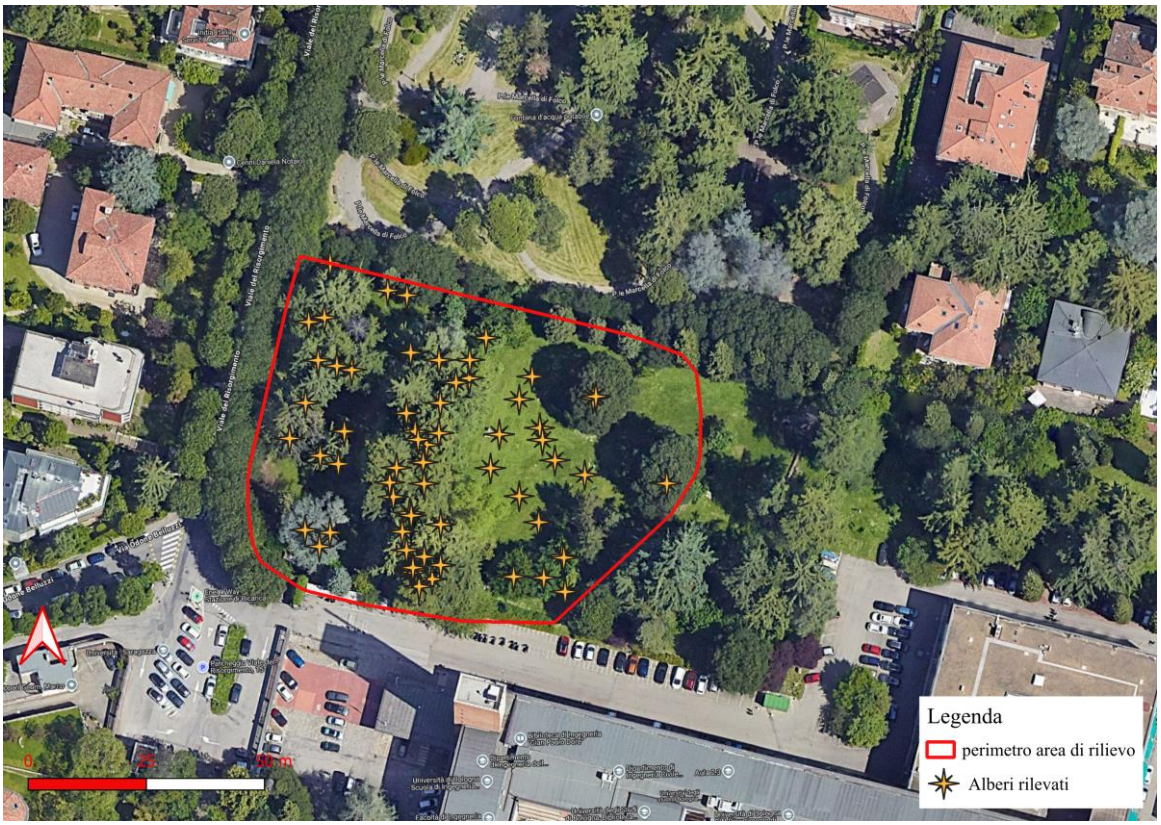


Fig. 1. L'immagine mostra l'area di studio e riporta la posizione degli alberi stimata con una metodologia automatizzata. Inquadramento geografico su base cartografica Google Hybrid (©Google)

3. METODOLOGIE DI ANALISI E VALIDAZIONE

La procedura adottata si articola in tre fasi: l'elaborazione della nuvola di punti per l'estrazione automatizzata del DBH, il rilievo manuale in campo degli alberi di maggiori dimensioni utilizzati come riferimento e il confronto statistico tra le due serie di misure. L'obiettivo è quantificare l'accuratezza della stima mediante procedimenti di calcolo semi-automatici rispetto al dato acquisito con tecniche convenzionali, assunto come ground truth. Le elaborazioni sono state condotte in ambiente R a partire dalla nuvola acquisita con uno scanner SLAM Stonex X120GO [5].

3.1 ELABORAZIONE DATO LiDAR E STIMA DEL DBH

Il dato LiDAR ricavato dal rilievo SLAM, dopo l'elaborazione con il software proprietario GoPost, è stato processato in ambiente R per estrarre, in modalità semi-automatica, la posizione e le caratteristiche dendrometriche dei fusti. Tale metodologia integra il pacchetto di comandi TreeX con una fase di clustering implementata in modo esplicito ed interamente regolabile. In una prima fase, il pacchetto di comandi TreeX esegue una segmentazione preliminare della nuvola di punti, restituendo una clusterizzazione iniziale attorno ai

punti in cui sono presenti i fusti; il risultato di questo passaggio costituisce l'input per l'elaborazione successiva. Il raffinamento della segmentazione preliminare è affidato all'algoritmo di clustering a densità DBSCAN [6]. In tale fase, il raggio di ricerca non è imposto a priori con un valore fisso, ma viene stimato in modo adattivo a partire dalla distribuzione delle distanze tra punti vicini, così da adeguarsi automaticamente alla densità e alla spaziatura effettive della nuvola analizzata; ciò rende la procedura facilmente trasferibile a popolazioni e contesti differenti, evitando lunghi processi di ricalibrazione manuale, ma garantendo un controllo iniziale sui parametri considerati. Il clustering è articolato in due fasi: una prima individuazione dei soli nuclei densi, corrispondenti al corpo centrale dei fusti, seguita da una fase di espansione in cui i punti isolati vengono assegnati al nucleo più prossimo entro una distanza limite. Tale procedura consente di bilanciare la completezza del rilievo con il contenimento dei falsi positivi.

Ciascun cluster identificato viene valutato in funzione della forma della distribuzione planimetrica dei punti definendo un indice di anisotropia, derivato dagli autovalori della matrice di covarianza: i cluster marcatamente allungati, di conseguenza non riconducibili alla sezione di un fusto di albero, vengono scartati. Sui cluster restanti il diametro è stimato interpolando una circonferenza sui punti appartenenti alla sezione con il metodo di Pratt [7, 8], assumendo il DBH pari al doppio del raggio stimato a una quota da terra pari a 1.3 m. In conclusione, viene eseguito un ulteriore filtraggio in funzione del numero di punti e del valore del diametro risultato al fine di escludere eventuali output non compatibili con un fusto reale. Per ogni albero individuato vengono riportati la posizione, il DBH, il numero di punti e l'indice di anisotropia, grandezze utili come indicatori della qualità della stima.

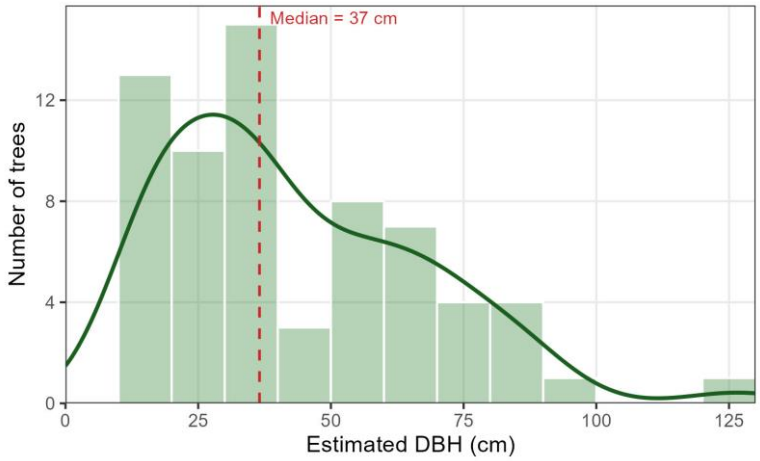


Fig. 2. Distribuzione dei DBH stimati per tutti gli alberi individuati (n = 66). Le barre indicano il numero di alberi per classe di 10 cm, la linea continua la densità di Kernel e la linea tratteggiata il valore mediano (37 cm). Si noti che, in questa circostanza, i fusti policormici sono stati considerati come singoli individui al fine di ottenere una statistica completa sui diametri stimati.

3.2 RILIEVO DI VALIDAZIONE IN CAMPO

Come riferimento per la validazione è stato eseguito un rilievo dendrometrico manuale di 34 alberature presenti all'interno del parco, misurate ad una quota da terra pari a 1.30 m (corrispondente all'altezza indicata come riferimento per il DBH) con cavalletto dendrometrico e cordella metrica, con un'incertezza stimata di circa 2 cm. Il campione, pur non comprendendo l'intera popolazione, è stato selezionato in modo da risultare rappresentativo per dimensioni e specie. Sono stati privilegiati gli esemplari più agevolmente misurabili dagli operatori, ovvero

quelli privi di ostruzioni alla base, come arbusti e vegetazione bassa, che avrebbero ostacolato l'accesso al fusto e la corretta misurazione del diametro. Dal rilievo manuale sono stati esclusi gli esemplari policormici con più di due fusti, per i quali la misura tradizionale del DBH risulta ambigua. Sono stati tuttavia misurati due casi di alberi a doppio fusto policormico, così da disporre comunque di un campione di confronto anche per questa casistica; di conseguenza il confronto riguarda un totale di 36 individui.

Per quanto riguarda la validazione delle coordinate dei centri dei fusti, durante il rilievo SLAM è stato individuato, in corrispondenza di ciascun albero, un punto caratteristico in modo manuale, posto a circa 1 metro dal fusto. Questi punti forniscono, per ogni esemplare, un riscontro di posizione che consente di verificare visivamente che la metodologia di analisi automatizzata degli alberi riconosca correttamente gli alberi effettivamente rilevabili.

Per l'identificazione degli esemplari si è fatto riferimento ai numeri riportati sui cartellini identificativi apposti dal Comune di Bologna sulle alberature del parco. Tale numerazione, fotografata durante l'attività di rilievo nella fase di definizione dei punti caratteristici, è stata utilizzata come identificativo univoco per ciascun albero, al fine di facilitare l'accoppiamento e il confronto tra il dataset manuale e quello ottenuto in ambiente R.

3.3 METRICHE DI CONFRONTO

L'accuratezza della stima è stata valutata confrontando, albero per albero, il DBH stimato con quello misurato in campo. Sono stati calcolati l'errore medio assoluto (MAE), il bias medio – differenza media tra valore stimato e misurato – e il coefficiente di correlazione di Pearson (r). É stata inoltre verificata l'eventuale dipendenza dell'errore dalla dimensione del fusto, analizzando la distribuzione dei residui in funzione del diametro. Come indicato nel sottoparagrafo precedente, l'accoppiamento delle due serie si basa sul cartellino identificativo apposto su ciascun albero, limitando il confronto metrico agli esemplari misurati anche manualmente.

4. RISULTATI

Il confronto sui 36 fusti (32 alberi a fusto singolo e 2 esemplari policormici che si biforcano in due fusti ciascuno ad un'altezza dal terreno pari o inferiore a 1.30 m) ha evidenziato un accordo molto elevato tra i valori stimati in ambiente R e il rilievo manuale. Lo scatterplot tra DBH stimato e DBH di riferimento (Fig. 3), ossia i valori misurati in campo con metodologie tradizionali, mostra un ottimo accordo con un coefficiente di correlazione di Pearson di 0.99. L'errore medio assoluto si attesta pari a 1.9 cm, valore che rientra sia nel range di incertezza propria degli strumenti tradizionali sia nella precisione dichiarata dello scanner utilizzato per il rilievo SLAM. Dall'analisi della fig.3, si può comunque evidenziare una minima tendenza a sottostimare in modo sistematico, tendenza resa evidente dal grafico di Bland-Altman (Fig .4) con un bias medio di –1.7 cm. L'unico scarto rilevante (21.8 cm), ben visibile nelle Fig. 3 e 4, ha interessato un albero a singolo fusto caratterizzato da uno sviluppo marcatamente inclinato. Escludendo tale outlier l'errore medio assoluto scende a 1.4 cm (Fig. 5); inoltre, analizzando la regressione dei residui in funzione del DBH (Fig. 6), non si osserva alcuna dipendenza significativa (pendenza = -0.014, $p = 0.20$), a conferma dell'assenza di un bias legato alla dimensione del fusto sull'intero campione.

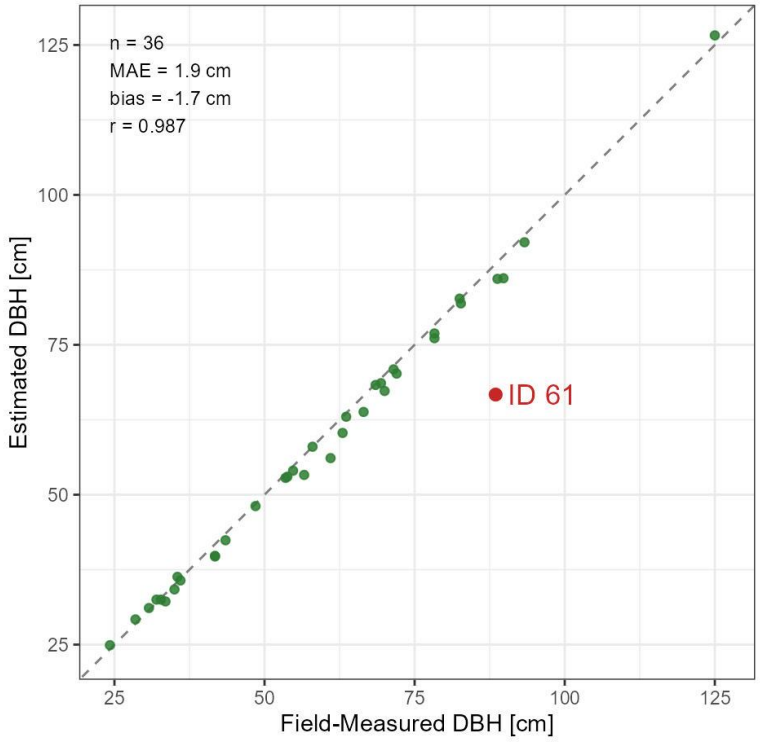


Fig. 3. Confronto tra i valori del DBH stimati con procedura automatizzata e i valori ottenuti dalle misure eseguite in campo con metodi tradizionali (numero individui campionati = 36). La linea tratteggiata rappresenta la retta 1:1 di massimo accordo; i punti si distribuiscono strettamente lungo di essa (r=0.99). In rosso viene evidenziato l'outlier corrispondente ad un fusto marcatamente inclinato

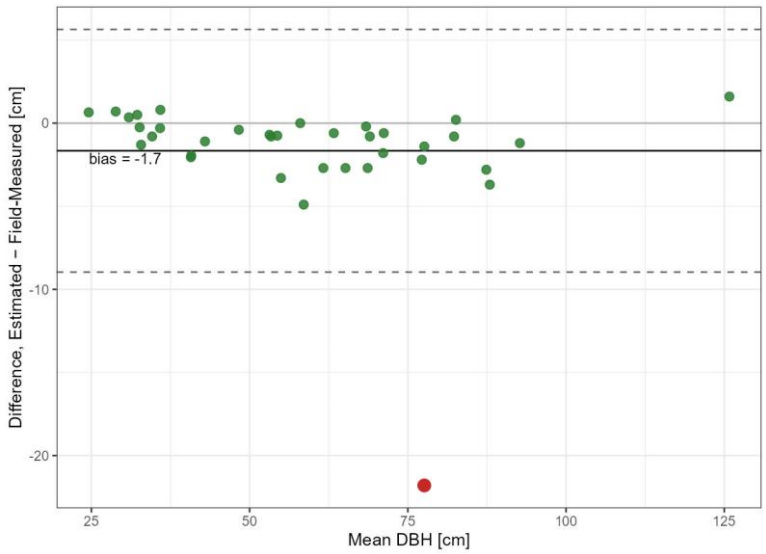


Fig. 4. Grafico di Bland-Altman: differenza tra DBH stimato e misurato in funzione del DBH medio tra i due metodi. La linea continua indica il bias medio (-1.7 cm), le linee tratteggiate i limiti di concordanza (±1.96 deviazioni standard). In rosso è riportato l'outlier.

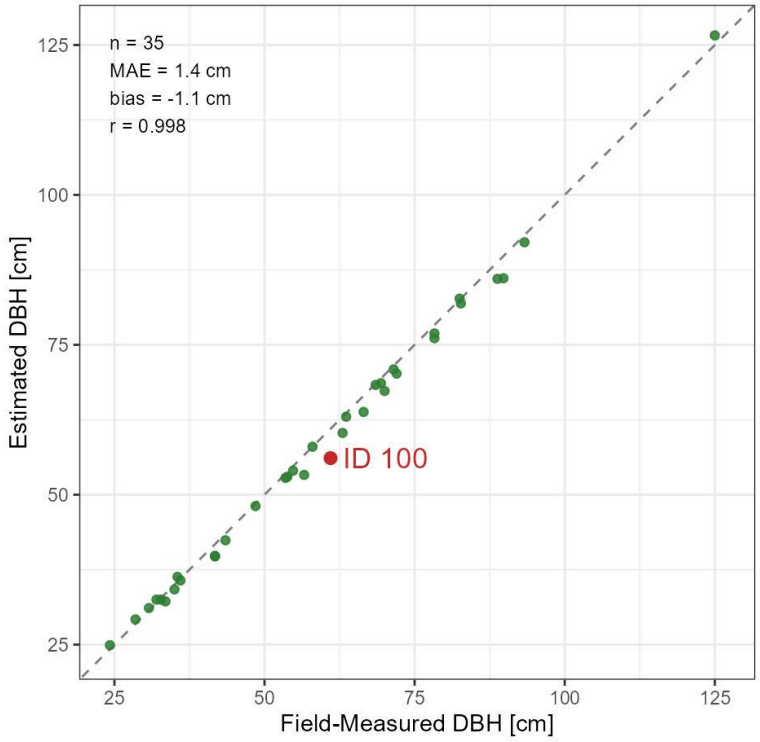


Fig. 5. Confronto tra i valori del DBH stimati con procedura automatizzata e i valori ottenuti dalle misure eseguite in campo con metodi tradizionali (numero individui campionati = 36), escludendo l'outlier (ID=61). La linea tratteggiata rappresenta la retta 1:1 di massimo accordo; i punti si distribuiscono strettamente lungo di essa (r=0.99). In rosso viene evidenziato l'individuo con il massimo scostamento una volta escluso l'ID 61.

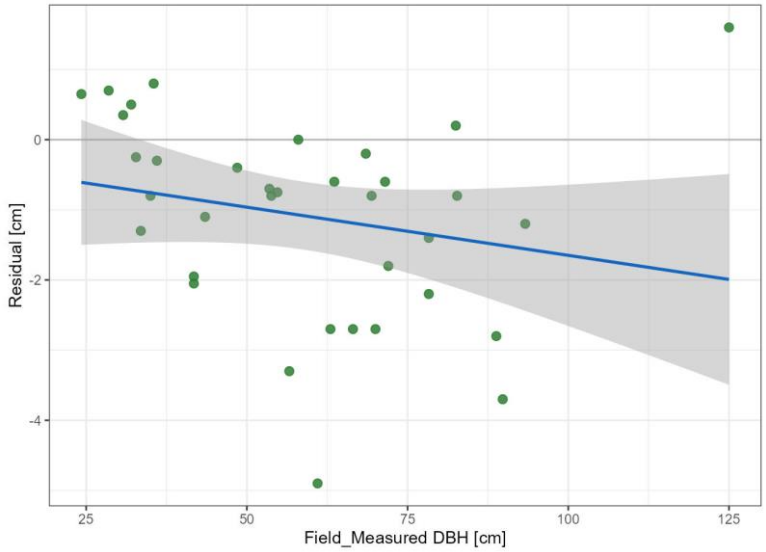


Fig. 6. Il grafico mostra l'andamento dei residui in funzione del DBH misurato in campo preso come riferimento, con esclusione dell'outlier ID 61. La retta blu rappresenta la regressione lineare dei residui e la fascia a contorno il relativo intervallo di confidenza al 95%. L'andamento (pendenza = -0.014, p = 0.20) conferma l'assenza di una distorsione in funzione del fusto.

5. CONCLUSIONE

I risultati confermano che la procedura automatizzata implementata in ambiente R consente di stimare il DBH con un'accuratezza paragonabile a quella dei metodi di analisi tradizionali. L'errore medio assoluto è dello stesso

ordine dell'incertezza tipica legata al cavallettamento manuale e l'elevata correlazione (r = 0.99) indica che la stima è affidabile sull'intero intervallo di diametri della popolazione oggetto di studio: dai fusti più piccoli a quelli di oltre un metro. La minima sottostima sistematica, resa più evidente nel grafico di Bland-Altman (bias di –1.7 cm) è coerente con quanto atteso per metodi basati sull'interpolazione di una circonferenza su una sezione della nuvola: la copertura parziale del fusto e il rumore del dato tendono a produrre un raggio stimato leggermente inferiore. Inoltre, la presenza di un individuo caratterizzato da un portamento obliquo, come nel caso dell'outlier evidenziato nel paragrafo precedente, amplifica la tendenza alla sottostima da parte dell'algoritmo impiegato: quando l'asse del tronco è marcatamente inclinato, la sezione orizzontale interseca il fusto secondo una forma non circolare, di conseguenza il circle fitting restituisce un diametro non rappresentativo con errori superiori alla media. Ciò rappresenta un'evidente direzione di miglioramento di tale metodologia automatizzata al fine di ottenere risultati maggiormente accurati.

Dal punto di vista operativo, la procedura si conferma quindi uno strumento valido per la stima automatizzata del DBH, in grado di ridurre le tempistiche delle attività in campo. Nel caso specifico, il rilievo SLAM ha richiesto circa 20 minuti ed un singolo operatore, mentre le misure manuali circa 2 ore e due operatori. A questi tempi vanno naturalmente sommati quelli di elaborazione dei dati acquisiti che variano in funzione della conoscenza dell'area: è su tale base che si impostano i valori più opportuni dei parametri, così da ottenere il miglior risultato contenendo al contempo i tempi di calcolo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dr. Paolo Ferronato che ha svolto la sua tesi di Laurea Magistrale su questa tematica.

BIBLIOGRAFIA

[1] Fan, Y., Feng, Z., Mannan, A., Khan, T.U., Shen, C., Saeed, S.: Estimating tree position, diameter at breast height, and tree height in real-time using a mobile phone with RGB-D SLAM. Remote Sensing 10(11), 1845 (2018).

[2] Tockner, A., Gollob, C., Kraßnitzer, R., Ritter, T., Nothdurft, A.: Automatic tree crown segmentation using dense forest point clouds from Personal Laser Scanning (PLS). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 114, 103025 (2022).

[3] Vandendaele, B., Martin-Ducup, O., Fournier, R.A., Pelletier, G., Lejeune, P.: Mobile laser scanning for estimating tree structural attributes in a temperate hardwood forest. Remote Sensing 14(18), 4522 (2022).

[4] Su, J., Fan, Y., Mannan, A., Wang, S., Long, L., Feng, Z.: Real-time estimation of tree position, tree height, and tree diameter at breast height point, using smartphones based on monocular SLAM. Forests 15(6), 939 (2024).

[5] Stonex S.r.l., «Laser Scanner X120GO – Laser Scanner Portatile 3D», brochure, set. 2022. [Online].

[6] Hahsler, M., Piekenbrock, M., Doran, D.: dbscan: Fast density-based clustering with R. Journal of Statistical Software 91(1), 1–30 (2019).

[7] Gama, J., Chernov, N.: conicfit: Algorithms for fitting circles, ellipses and conics based on the work by Prof. Nikolai Chernov, version 1.0.4. R package (2015).

[8] Chernov, N.: Circular and linear regression: Fitting circles and lines by least squares. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton (2010).

L’Historical GIS come strumento di analisi e valorizzazione della toponomastica antroponimica celebrativa: il caso delle (ri)denominazioni comunali post-unitarie in Italia

Chiara Lo Destro*

1 Università degli Studi di Trento
2 Istituto Geografico Militare

Il presente contributo, nell’ambito di un progetto in fase di avvio, propone l'impiego di Historical GIS (HGIS) a supporto dell'analisi e della valorizzazione della toponomastica, con particolare riferimento alle denominazioni antroponimiche comunali di carattere celebrativo, modificate, coniate (o soppresse) in Italia a partire dal 1861. Tale fenomeno di (ri)denominazione può essere interpretato come pratica di radicamento nello spazio di figure storiche, volta alla costruzione e alla trasmissione delle identità collettive e della memoria pubblica italiana. In questo senso, i toponimi non rappresentano altro che strumenti a sostegno dei processi di territorializzazione.

Sebbene tale categoria di nomi di luogo interessi oltre cento comuni italiani, la letteratura scientifica ha finora risentito della mancanza di una loro catalogazione analitica e spazializzata. Il progetto prevede, quindi, la creazione di un geodataset dedicato a scala nazionale, alimentato dall’integrazione di fonti bibliografiche, amministrative e archivistiche ai dati ISTAT relativi alle modifiche toponimiche di interesse operate a partire dall’Unità d’Italia. In questa prospettiva, l’HGIS consentirebbe di sistematizzare e tipologizzare informazioni eterogenee, quali ad esempio dati cronologici e motivazioni delle (ri)denominazioni, contesti storico-amministrativi e profili delle figure celebrate o assoggettate alla damnatio memoriae, specificandone la relazione con il territorio di riferimento e studiando la progressiva stratificazione della memoria urbana.

L’applicazione di strumenti di analisi geospaziale permette di condurre indagini diacroniche e transcalari, fondamentali per riconoscere pattern geografici e modelli di (ri)denominazione che si sono stratificati nel tempo. Attraverso l’Historical GIS, infatti, è possibile tracciare l’evoluzione spazio-temporale delle strategie di costruzione della memoria, nonché le modalità e gli oggetti di commemorazione. Lo strumento consente, inoltre, di evidenziare criticamente aree a maggiore concentrazione di specifici modelli celebrativi, rappresentando a tutti gli effetti un elemento di valorizzazione a supporto della toponomastica comunale antroponimica celebrativa come fonte geostorica per lo studio dei processi di territorializzazione avvenuti a partire dalla nascita del Regno d’Italia.

Oltre alla valenza scientifica per la geografia storica, l'HGIS risultante si configura come un supporto operativo per l’eventuale schedatura e la valorizzazione del patrimonio culturale immateriale rappresentato da questa particolare tipologia di nomi di luogo. L’integrazione tra fonti geostoriche e GIS trasforma il toponimo in una risorsa attiva, capace di catalizzare pratiche di conoscenza e di rafforzamento dell’identità delle comunità locali. Il lavoro è quindi in grado di dimostrare come la geomatica applicata alle fonti geostoriche possa offrire prospettive inedite per l’interpretazione dei nomi di luogo quali indicatori utili all’analisi del rapporto tra identità locale e costruzione della memoria collettiva

Sentinel Foundry: un framework GUI per la generazione deterministica di Analysis-Ready Data da Sentinel-1 SAR e Sentinel-2 ottico

Enrico Magazzino[1,2]

[1] TESAF Department, University of Padova, Legnaro (PD), Italia

[2] Interdepartmental Research Center of Geomatics (CIRGEO), University of Padova, Corte Benedettina, Via Roma 34, Legnaro, PD 35020, Italy

enrico.magazzino@phd.unipd.it (corresponding author)

Abstract. I dati Copernicus Sentinel sono ampiamente utilizzati nel monitoraggio ambientale e nell'analisi geospaziale, ma la generazione di Analysis-Ready Data (ARD) da immagini grezze richiede pipeline specialistiche (calibrazione radiometrica, correzione topografica, mascheratura delle nubi e calcolo di derivati spettrali e biofisici) la cui implementazione non standardizzata può compromettere la riproducibilità dei risultati e costituire una barriera tecnica significativa per utenti privi di competenze di scripting. Il presente contributo introduce Sentinel Foundry, un framework desktop open-source con interfaccia grafica per la generazione riproducibile di ARD da Sentinel-1 SAR e Sentinel-2 ottico, con applicazioni in agricoltura di precisione, monitoraggio forestale, analisi ambientale e gestione dei rischi naturali. Il sistema supporta il download da sorgenti ufficiali multiple, incluso il Copernicus Data Space, senza richiedere competenze di scripting; il codice è su GitHub. Il modulo SAR Foundry elabora i dati Sentinel-1 GRD implementando catene SNAP configurabili: calibrazione σ^0 standard o γ^0 con terrain-flattening, filtraggio speckle (Lee Sigma, Gamma Map, IDAN e altri) e correzione topografica tramite DEM esterno (predefinito: Copernicus 30 m). È supportato anche il caricamento di grafi GPT XML personalizzati. Il modulo Optical Foundry elabora Sentinel-2 L2A integrando la mascheratura basata su Scene Classification Layer e il calcolo di otto indici spettrali (NDVI, NDWI, NDII, MSAVI2, CIRE, EVI, NDRE1, MTCI). L'elemento distintivo è la stima di variabili biofisiche (LAI, CCC, CWC, FAPAR, FCOVER) tramite i modelli neurali dello SNAP Biophysical Processor, allineati alla metodologia ESA. Entrambi i moduli supportano indici personalizzati tramite formule algebriche tra bande; gli output sono Cloud-Optimized GeoTIFF con proiezione e metadati armonizzati. Rispetto alle alternative consolidate, Sentinel Foundry automatizza l'intera catena download–processing–derivati in un'unica interfaccia, superando la frammentazione di ESA SNAP e dei plugin di QGIS, e garantisce l'esecuzione locale con riproducibilità deterministica, a differenza di altre piattaforme di cloud processing. Il confronto con esecuzioni SNAP indipendenti (QGIS e sovrapposizione in Python) ha mostrato valori dei pixel identici al 100%. Sentinel Foundry contribuisce alla democratizzazione dei flussi di Earth Observation, abilitando la generazione riproducibile e user-controlled di ARD su domini SAR e ottici, e rendendo accessibili flussi di elaborazione avanzati senza rinunciare al rigore metodologico. Sviluppi futuri prevedono l'estensione alle ulteriori missioni della costellazione Sentinel per una copertura ARD unificata e multi-missione.

Keywords: Sentinel-1 · Sentinel-2 · Analysis-Ready Data · SAR · telerilevamento · elaborazione dati satellitari · indici spettrali · variabili biofisiche · SNAP · riproducibilità · interfaccia grafica.

1 Introduzione

Le missioni Copernicus Sentinel-1 (SAR) e Sentinel-2 (ottico) sono oggi tra le fonti di dati satellitari più utilizzate per il monitoraggio ambientale, l'agricoltura di precisione, il monitoraggio forestale e la gestione dei rischi naturali [1,2], grazie alla combinazione di copertura globale, ricorrenza temporale elevata e accesso gratuito. Il passaggio dai prodotti grezzi (Level-1 GRD per Sentinel-1, Level-2A per Sentinel-2) a dati pronti per l'analisi (Analysis-Ready Data, ARD) richiede tuttavia catene di elaborazione specialistiche: calibrazione radiometrica e correzione topografica per il SAR [3,4], mascheratura delle nubi e calcolo di indici spettrali e variabili biofisiche per l'ottico.

Per il SAR questi passaggi sono generalmente eseguiti tramite ESA SNAP, un ambiente potente ma che richiede la costruzione manuale di grafi di elaborazione (GPT graph) o competenze di scripting per l'automazione su serie temporali; per i dati ottici, oltre a SNAP, si ricorre spesso a script personalizzati in Python o R, la cui implementazione, non standardizzata, dipende dalle competenze di chi li scrive. Esistono inoltre plugin QGIS che coprono singoli passaggi della catena piuttosto che il flusso download–processing–derivati nella sua interezza. L'assenza di un'interfaccia unificata e non basata su script costituisce una barriera tecnica per utenti provenienti da discipline applicative (agronomia, scienze forestali, protezione civile) e, quando le catene di elaborazione non sono documentate o standardizzate, una minaccia alla riproducibilità dei risultati.

Il presente contributo descrive Sentinel Foundry, un framework desktop open-source con interfaccia grafica che automatizza l'intera catena (download, preprocessing, calcolo di derivati) per Sentinel-1 SAR (modulo SAR Foundry) e Sentinel-2 ottico (modulo Optical Foundry), producendo ARD in formato Cloud-Optimized GeoTIFF (COG) senza richiedere competenze di programmazione. Il codice sorgente è pubblicato su GitHub con licenza MIT [19]. Il resto dell'articolo è organizzato come segue: la Sez. 2 descrive l'architettura generale; le Sez. 3 e 4 descrivono rispettivamente SAR Foundry e Optical Foundry; la Sez. 5 confronta Sentinel Foundry con le alternative esistenti; la Sez. 6 discute lo stato della validazione; la Sez. 7 conclude con gli sviluppi futuri.

2 Architettura del sistema

Sentinel Foundry è composto da due interfacce Tkinter indipendenti (SAR Foundry e Optical Foundry), come schematizzato in Fig. 1, avviabili singolarmente o da un launcher commune che condivide un ambiente virtuale Python (venv) autoinstallante: al primo avvio ciascun modulo crea il venv e installa le proprie dipendenze da un file di requisiti a versioni fissate (pinning), così che l'ambiente ottenuto da un'installazione pulita sia riproducibile. Le dipendenze esterne non gestibili via pip (ESA SNAP con il Microwave Toolbox, necessario per i lettori Sentinel-1 e GDAL) sono rilevate e diagnosticate all'avvio da un pannello dedicato, che blocca l'esecuzione con un messaggio esplicativo se i prerequisiti non sono soddisfatti, evitando fallimenti silenziosi a metà elaborazione.

SAR Foundry non reimplementa gli algoritmi di calibrazione e correzione SAR: orchestra l'eseguibile a riga di comando gpt di ESA SNAP, costruendo ed eseguendo i grafi di elaborazione descritti in Sez. 3.2. Optical Foundry si appoggia invece alle API pubbliche di AWS EarthSearch e al processore biofisico neurale distribuito con SNAP (Sez. 4). In entrambi i casi la GUI automatizza orchestrazione, gestione dei parametri e

I/O, delegando i passaggi numericamente sensibili alle implementazioni di riferimento; una scelta progettuale che, come discusso in Sez. 6, è anche la motivazione del determinismo atteso degli output.

Gli output di entrambi i moduli seguono una convenzione comune: GeoTIFF a singola banda in formato Cloud-Optimized GeoTIFF (COG) [5], float32, proiezione UTM nativa del tile Sentinel, valore nodata esplicito (−9999) e compressione DEFLATE. Questa scelta rende gli output direttamente utilizzabili sia in ambienti GIS desktop (QGIS, ArcGIS) sia in flussi cloud-native basati su accesso a intervalli di byte (range request).

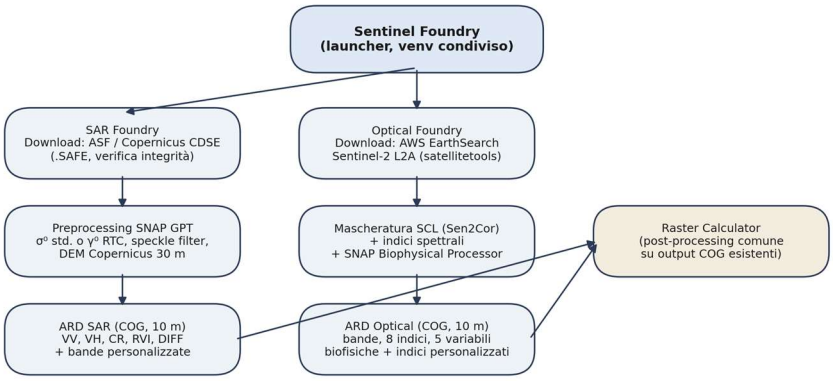


Fig. 1. Architettura di Sentinel Foundry: moduli SAR Foundry e Optical Foundry, ciascuno con acquisizione, preprocessing ed esportazione ARD in formato COG.

3 SAR Foundry: da Sentinel-1 GRD ad ARD

3.1 Acquisizione e verifica di integrità

Le scene Sentinel-1 GRD possono essere scaricate da due sorgenti alternative: Alaska Satellite Facility / NASA Earthdata (autenticazione tramite bearer token, download sequenziale; il download parallelo è disabilitato perché il server ASF può troncare la banda VV quando piú connessioni condividono lo stesso token) e Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE), autenticato tramite token OAuth2 Keycloak con rinnovo automatico e fino a 5 download paralleli, ripristinabili tramite richieste HTTP Range in caso di interruzione. L'area di interesse (AOI) è fornita come file vettoriale (.shp, .gpkg, .geojson) o disegnata interattivamente su una mappa Leaflet integrata.

Ogni archivio scaricato è sottoposto a controlli di integrità su tre livelli: 1) verifica strutturale dello zip prima dell'estrazione, 2) verifica CRC durante l'estrazione, 3) lettura effettiva delle bande tramite rasterio dopo l'estrazione in modo che un archivio corrotto (ad es. una banda VV troncata da un download parallelo instabile) venga scartato prima di raggiungere SNAP, anziché propagarsi silenziosamente nei prodotti derivati.

3.2 Catene di preprocessing SNAP GPT

La calibrazione radiometrica dei prodotti Level-1 segue la procedura ufficiale IPF documentata da ESA [6]. Sono disponibili due catene preconfigurate che a partire da

essa applicano metodologie di riferimento pubblicate, oltre al supporto per grafi personalizzati:

Opzione A: σ^0 standard *(consigliata su terreno pianeggiante)*: Apply-Orbit-File → rimozione del rumore termico e del border noise → calibrazione σ^0 → filtro speckle configurabile → correzione geometrica Range-Doppler con DEM esterno. Basata sul flusso descritto da Filipponi [4], senza terrain-flattening; adatta a contesti agricoli pianeggianti (es. Pianura Padana).

Opzione B: γ^0 con terrain-flattening *(più rigorosa su terreno inclinato)*: calibrazione β^0 → filtro speckle → terrain-flattening ($\beta^0 \rightarrow \gamma^0$) secondo Small [3] → correzione geometrica Range-Doppler. Radiometricamente più corretta su terreno con variabilità topografica significativa.

Opzione C: grafo GPT XML personalizzato: la pipeline modifica a runtime il grafo fornito dall'utente per iniettare percorso di lettura, subset sull'AOI e percorso di scrittura, a condizione che il grafo rispetti alcuni vincoli strutturali (un solo nodo Read, un solo nodo Write, output a due bande nell'ordine VH poi VV in intensità lineare). Questo meccanismo permette a utenti esperti di sostituire la catena di elaborazione mantenendo l'automazione di I/O e ritaglio sull'AOI, preservando la riproducibilità deterministica indipendentemente dalla catena scelta.

Il filtro speckle predefinito è Lee Sigma 7×7; sono inoltre tramite una finestra di configurazione dedicata, uno qualsiasi dei 9 filtri speckle di SNAP (Gamma Map , Refined Lee, IDAN, Boxcar, Median, Frost, nessun filtro). Il DEM per la correzione topografica è selezionabile tra Copernicus 30 m GLO-30 (predefinito), Copernicus 90 m, SRTM a 1 o 3 arco-secondi e ASTER GDEM; i DEM sono scaricati e memorizzati automaticamente da SNAP al primo utilizzo.

Per limitare il calcolo alla sola area di interesse, prima della scrittura la pipeline inserisce nel grafo un nodo Subset subito dopo la correzione geometrica Range-Doppler, con regione definita in coordinate di mappa dall'AOI (o dai cluster di campi, per AOI frammentate); questa sequenza, che prima geocodifica e poi ritaglia, evita lo slittamento di posizione che si avrebbe ritagliando il prodotto in geometria radar prima della correzione. Poiché il motore GPF di SNAP elabora solo i tile richiesti a valle, le porzioni di scena esterne all'AOI non vengono calcolate, mentre i tile calcolati usano la geocodifica originale. Il risparmio atteso deriva dunque dal calcolo evitato, non da una modifica del risultato; vi contribuiscono cache dei tile e heap JVM dimensionati sulla RAM disponibile. La misura quantitativa è descritta in Sez. 6. **3.3 Output e derivati**

Per ciascuna scena e direzione d'orbita (ascendente/discendente) SAR Foundry produce cinque GeoTIFF COG a singola banda, riassunti in Tabella 1, tutti in float32, con spaziatura di 10 m, nodata −9999 e compressione DEFLATE. Copie in scala logaritmica (dB) sono generabili opzionalmente per la sola visualizzazione. Sono inoltre supportate fino a tre espressioni numpy definite dall'utente ("Custom Bands") sulle variabili VV, VH, CR, RVI, DIFF, per derivati non previsti tra le bande preimpostate. Le AOI che comprendono piú frame Sentinel-1 adiacenti vengono elaborate per singolo frame e ricomposte tramite interpolazione bilineare sulla cucitura.

Convenzione di denominazione. Il nome di ogni file COG codifica l'intera configurazione di elaborazione: *S1_{data}_SNAP_{etichetta AOI}_{filtro speckle}_{DEM}_{catena}_{satellite}_{orbita}_{banda}.tif*

Tabella 1. Bande COG prodotte da SAR Foundry per ciascuna scena/orbita.

Banda	Definizione	Note
VV	Backscatter calibrato, polarizzazione VV, intensità lineare	σ^0 o γ^0 secondo la catena scelta
VH	Backscatter calibrato, polarizzazione VH, intensità lineare	σ^0 o γ^0 secondo la catena scelta
CR	VH / VV	Cross-ratio
RVI	4·VH / (VV+VH)	Radar Vegetation Index
DIFF	VH − VV	Differenza in unità lineari

4 Optical Foundry — da Sentinel-2 L2A ad ARD

4.1 Acquisizione e mascheratura

Optical Foundry scarica Sentinel-2 L2A dal bucket pubblico AWS EarthSearch (sentinel-2-l2a-cogs), tramite la libreria satellitetools [7], senza richiedere credenziali Copernicus o ESA. Poiché una singola interrogazione STAC può restituire un solo tile MGRS per data anche quando l'AOI ne interseca due, la pipeline esegue query e processing per singolo tile e ricompone il risultato con un mosaico rasterio, evitando le lacune di dato che altrimenti risulterebbero sulla porzione di AOI non coperta dal tile selezionato. La mascheratura delle nubi si basa sulla Scene Classification Layer (SCL) prodotta dal processore Sen2Cor di ESA [8], mantenuta anche come banda di controllo qualità a sé stante.

4.2 Indici spettrali

Oltre alle bande native (B2–B12 alla risoluzione nativa disponibile), il modulo calcola otto indici spettrali preimpostati a partire dalla riflettanza al top-of-canopy, elencati in Tabella 2 con la relativa fonte in letteratura. È inoltre possibile definire fino a tre indici personalizzati come espressioni numpy sulle bande B2–B12.

Tabella 2. Indici spettrali calcolati da Optical Foundry.

Indice	Formula (bande Sentinel-2)	Fonte
NDVI	(B8−B4)/(B8+B4)	Rouse et al. [9]
NDWI	(B3−B8)/(B3+B8)	McFeeters [10]
NDII	(B8−B11)/(B8+B11)	Hardisky et al. [11]
iMSAVI2	((2B8+1)−√((2B8+1)²−8(B8−B4)))/2	Qi et al. [12]
CIRE	B8/B5 − 1	Clevers & Gitelson [13]
EVI	2.5(B8−B4)/(B8+6B4−7.5B2+1)	Liu & Huete [14]
NDRE1	(B8A−B5)/(B8A+B5)	Barnes et al. [15]
MTCI	(B6−B5)/(B5−B4)	Dash & Curran [16]

4.3 Variabili biofisiche

Un elemento distintivo di Optical Foundry è la stima di cinque variabili biofisiche: Leaf Area Index (LAI), Canopy Chlorophyll Content (CCC), Canopy Water Content (CWC), Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) e Fraction of Vegetation Cover (FCOVER) tramite le reti neurali dello SNAP Biophysical Processor, documentate nell'Algorithm Theoretical Basis Document di Weiss, Baret e Jay [17] e discendenti della metodologia dei prodotti globali CYCLOPES [18]. Le reti sono addestrate su simulazioni del modello di trasferimento

radiativo PROSPECT+SAIL e costituiscono la metodologia di riferimento adottata da ESA per la stima di variabili biofisiche da Sentinel-2; Optical Foundry le rende accessibili senza che l'utente debba operare direttamente SNAP.

4.4 Output e personalizzazione

Gli output seguono la stessa convenzione COG di SAR Foundry (float32, UTM nativa, nodata −9999, DEFLATE, 10 m). L'elaborazione dei giorni nel periodo richiesto è parallelizzata (1–8 worker configurabili) con ripetizione automatica sui giorni falliti in caso di errori di rete transitori verso AWS/EarthSearch; una politica di skip/overwrite consente di riprendere elaborazioni interrotte o di estendere un intervallo di date già elaborato senza ricalcolare i file esistenti. Una scheda "Raster Calculator", comune a entrambi i moduli, applica ulteriori espressioni numpy direttamente sugli output COG già prodotti, senza dover ripetere l'intera pipeline.

Convenzione di denominazione. Lo schema è *S2_{data}_000_{etichetta AOI}_{satellite}_{prodotto}.tif*, oppure *..._mosaic_{prodotto}.tif* quando l'AOI è ricomposta da più tile MGRS. Su disco i file sono inoltre organizzati per prodotto e AOI (index=<prodotto>/aoi=<etichetta>/), così da caricare in QGIS un'intera serie temporale di un indice con un solo pattern.

5 Confronto con le alternative esistenti

ESA SNAP è l'ambiente di elaborazione più rigoroso per dati Sentinel, ma richiede la costruzione manuale di grafi GPT o competenze di scripting, un requisito non banale per utenti di discipline applicative. I plugin QGIS coprono tipicamente un solo passaggio della catena, lasciando all'utente il compito di comporne più per ottenere un ARD completo. Le piattaforme cloud (Google Earth Engine, Sentinel Hub, openEO) offrono analisi su larga scala, ma l'elaborazione avviene lato server: versioni di algoritmi e dataset ausiliari sono gestite dal fornitore, e la riproducibilità locale di una specifica esecuzione è più difficile da garantire.

Sentinel Foundry si posiziona diversamente su entrambi gli assi: automatizza l'intera catena download → preprocessing → derivati in un'unica interfaccia grafica (a differenza della frammentazione di SNAP/QGIS), pur delegando i passaggi numericamente sensibili alle stesse implementazioni di riferimento (gpt di SNAP, reti neurali del Biophysical Processor), ed esegue interamente in locale con dipendenze a versione fissata (a differenza delle piattaforme cloud), rendendo una data configurazione di elaborazione ripetibile in modo deterministico nel tempo. In SNAP l'utente deve conoscere sequenza e parametri degli operatori; i grafi GPT in batch sono più rapidi ma vanno appresi, mentre Sentinel Foundry li integra con download, ritaglio e cancellazione dei file intermedi.

6 Valutazione preliminare: affidabilità, tempo e usabilità

Poiché Sentinel Foundry orchestra le stesse implementazioni di riferimento (gpt di SNAP, Biophysical Processor) senza reimplementarle (Sez. 2), l'output atteso coincide con quello di un'esecuzione manuale degli stessi grafi. Due test, su SAR Foundry e su Optical Foundry, hanno confrontato gli output con esecuzioni SNAP indipendenti (stessi parametri, CRS e acquisizioni): i valori dei pixel, verificati manualmente e visivamente in QGIS e poi per sovrapposizione dei raster in Python, sono risultati identici al 100%. Si prevede la ripetizione su più scene.

La Tabella 3 confronta, su una scena (Sentinel-1A, 27/08/2024, tile 35TLJ, σ^0, Lee Sigma) e con una ripetizione, gli operatori SNAP avviati da GUI sulla scena intera con Sentinel Foundry. Il vantaggio di calcolo non è dovuto al solo subset (differiscono anche grafo, cache e heap); il contributo principale è rendere accessibile l'intera catena, dal download al prodotto finale, anche a utenti senza competenze di scripting o di telerilevamento. Il tempo complessivo manuale (circa 12 min) somma download (44 s), operatori SNAP (541 s) ed export (154 s) e omette estrazione, ritaglio, derivate, pulizia e tempi morti (stima per difetto), rispetto a 9,2 e 6,3 min di Sentinel Foundry per l'intera catena. L'usabilità con utenti diversi dall'autore non è ancora stata misurata ed è prevista.

Tabella 3. Confronto preliminare su una scena Sentinel-1 (una ripetizione).

Aspetto	SNAP (manuale, GUI)	Sentinel Foundry
Calcolo SNAP	circa 541 s (somma degli operatori)	428 s (AOI estesa); 266 s (9 cluster di campi)
Tempo complessivo, dal download ai file finali	almeno circa 12 min (stima per difetto)	9,2 min; 6,3 min
Operatori da avviare	6, uno alla volta; ritaglio, derivate e pulizia a parte	nessuno: un solo avvio, tutto automatico
Export GeoTIFF	circa 100 s (VV) e 54 s (VH), bande separate	incluso: file a due bande e COG per banda
Output SAR su disco	circa 6,0 GB (VV+VH, scena intera)	1,8 GB (AOI estesa); 16 MB (campi)

7 Conclusioni e sviluppi futuri

Sentinel Foundry contribuisce alla democratizzazione dei flussi di Earth Observation offrendo, in un'unica interfaccia grafica desktop, la generazione riproducibile e user-controlled di Analysis-Ready Data su domini SAR e ottici, senza richiedere competenze di scripting e senza rinunciare al rigore metodologico delle implementazioni di riferimento (SNAP, Sen2Cor, SNAP Biophysical Processor) su cui si basa. Gli sviluppi futuri comprendono: 1) la validazione quantitativa e il test di usabilità descritti in Sez. 6; 2) l'estensione ad altre missioni Sentinel; 3) la risoluzione della cucitura tra frame Sentinel-1 adiacenti tramite S1-SliceAssembly, attualmente disabilitata per un'incompatibilità nota nella cache a tessere (tile cache) di SNAP 12.

Acknowledgments. Questo software è stato sviluppato durante un dottorato di ricerca presso il Dipartimento TESAF, Università di Padova, con il finanziamento dell'Unione Europea — NextGenerationEU, nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4 "Istruzione e Ricerca", ai sensi del Decreto Ministeriale n. 630/2024.

Disclosure of Interests. L'autore dichiara di non avere interessi in conflitto rilevanti per il contenuto di questo articolo.

References

1. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., et al.: GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment 120, 9–24 (2012). doi:10.1016/j.rse.2011.05.028
2. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al.: Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment 120, 25–36 (2012). doi:10.1016/j.rse.2011.11.026
3. Small, D.: Flattening gamma: radiometric terrain correction for SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49(8), 3081–3093 (2011). doi:10.1109/TGRS.2011.2120616
4. Filipponi, F.: Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. Proceedings 18(1), 11 (2019). doi:10.3390/ECRS-3-06201
5. Cloud Optimized GeoTIFF (COG). OGC Standard 21-026. https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html (2023)
6. Miranda, N., Meadows, P.J.: Radiometric calibration of S-1 level-1 products generated by the S-1 IPF. ESA Technical Note ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002, Issue 1, Rev. 0 (2015)
7. Nevalainen, O.: ollinevalainen/satellitetools: v1.0.0 [software]. Zenodo (2022). doi:10.5281/zenodo.5993292
8. Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., Gascon, F.: Sen2Cor for Sentinel-2. In: Proc. SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, 1042704 (2017). doi:10.1117/12.2278218
9. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W.: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA SP-351, 309 (1974)
10. McFeeters, S.K.: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing 17(7), 1425–1432 (1996). doi:10.1080/01431169608948714
11. Hardisky, M.A., Klemas, V., Smart, R.M.: The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of Spartina alterniflora canopies. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 49, 77–83 (1983)
12. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S.: A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment 48(2), 119–126 (1994). doi:10.1016/0034-4257(94)90134-1
13. Clevers, J.G.P.W., Gitelson, A.A.: Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 23, 344–351 (2013). doi:10.1016/j.jag.2012.10.008
14. Liu, H.Q., Huete, A.: A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33(2), 457–465 (1995). doi:10.1109/TGRS.1995.8746027
15. Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., et al.: Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground based multispectral data. In: Proc. 5th Int. Conf. on Precision Agriculture, Bloomington, MN (2000)
16. Dash, J., Curran, P.J.: The MERIS terrestrial chlorophyll index. International Journal of Remote Sensing 25(23), 5403–5413 (2004). doi:10.1080/0143116042000274015
17. Weiss, M., Baret, F., Jay, S.: S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER, Version 2.1. Algorithm Theoretical Basis Document, INRAE / ESA, issued 24.08.2020
18. Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., et al.: LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1. Remote Sensing of Environment 110(3), 275–286 (2007). doi:10.1016/j.rse.2007.02.018
19. Magazzino, E.: Sentinel Foundry (v1.0.4) [software]. https://github.com/EnMaga/sentinel-foundry (2026)

Monitoraggio multiscala di Posidonia oceanica con GeoAI nel progetto POSEIDON

Stefania Manca[1], Alessandro Acierno[5],Edward Borgogno[2], Giulia Ceccherelli[3], Filiberto Chiabrando[2], Francesca Gallitto[1], Valeria Longhi[1], Paolo Maschio[1], Francesca Matrone[1], Fabio Menna[3], Erica Nocerino[4], Sabrina Rossi[1,6], Massimiliano Scalici[5], Silvia Secco[5], Beatrice Tanduo[2], Payam Yari[1], Andrea Maria Lingua[1]

[1] DIATI, Politecnico di Torino - (andrea.lingua, stefania.manca, francesca.gallitto, valeria.longhi, francesca.matrone, paolo.maschio, payam.yari)@polito.it
[2] DAD, Politecnico di Torino - (filiberto.chiabrando, edward.borgogno, beatrice.tanduo)@polito.it
[3] Dipartimento di Scienze chimiche, fisiche, matematiche e naturali Università degli Studi di Sassari – (cecche, fmenna)@uniss.it
[4] Dipartimento di Scienze Umanistiche e Sociali, Università degli Studi di Sassari - enocerino@uniss.it
[5] Dipartimento di Scienze, Università degli Studi Roma Tre - (alessandro.acierno , massimiliano.scalici, silvia.secco)@uniroma3.it
[6] Osservatorio Naturalistico dell'Isola di Culuccia

Abstract. l progetto POSEIDON sviluppa un workflow GeoAI multiscala per il monitoraggio di Posidonia oceanica, integrando Sentinel-2, UAV, USV, fotogrammetria subacquea, imaging iperspettrale e analisi video. La segmentazione semantica mappa le praterie e ne evidenzia variazioni temporali; DEM, rilievi UHR/BUHR e indici spettrali quantificano dinamica costiera e stato della vegetazione. SDI, WebGIS e storytelling supportano consultazione e gestione.

Parole chiave: Posidonia oceanica; GeoAI; fotogrammetria subacquea; monitoraggio multiscala; deep learning.

1 Introduzione

Posidonia oceanica (L.) Delile è una fanerogama marina endemica del Mediterraneo, presente fino a circa 40-50 m di profondità. Le praterie sostengono la biodiversità, partecipano al ciclo dei nutrienti e al sequestro del carbonio, attenuano l'energia del moto ondoso e contribuiscono alla stabilità dei litorali [1]. La loro presenza è anche un indicatore della qualità ecologica delle acque [2]. Sulla spiaggia, gli accumuli di foglie spiaggiate, o *banquette*, proteggono il sedimento dall'erosione e ospitano comunità di invertebrati. Prateria sommersa e deposito costiero formano quindi un sistema

connesso, nel quale variazioni di copertura, struttura o volume assumono significato ecologico e gestionale.
La mappatura tradizionale combina immersioni, video, fotografia e campionamenti locali. Queste tecniche forniscono osservazioni dirette, ma richiedono tempi e risorse che ne limitano la frequenza e l'estensione. La difficoltà aumenta quando si confrontano più anni: ogni campagna deve conservare geometria, risoluzione e criteri di classificazione abbastanza stabili da rendere interpretabili le differenze. Le immagini satellitari consentono un monitoraggio costiero sistematico e multitemporale ([7], [8]) e offrono archivi sistematici e ripetibili, ma in acque basse il segnale del fondale si mescola con gli effetti della colonna d'acqua, della profondità, della torbidità e dell'illuminazione. I pixel di transizione contengono inoltre più substrati e riducono la separabilità delle classi [4,5].
Random Tree e Support Vector Machine, quando applicati ai singoli pixel, utilizzano principalmente le informazioni spettrali, senza considerare direttamente il contesto spaziale circostante [13]. La segmentazione semantica considera invece spettro e vicinato: U-Net conserva i dettagli mediante connessioni encoder-decoder [5], mentre DeepLabv3 usa convoluzioni dilatate per rappresentare più scale [6]. Anche questi modelli richiedono riferimenti affidabili e una validazione distinta dalla verifica sul campo.
POSEIDON - *multitemPOral SEagrass mapping and monitoring of posIDONia meadows and banquettes for blue carbon conservation* - risponde a questi limiti collegando tre livelli di dettaglio: la scala satellitare consente osservazioni ripetute su aree estese; l'Ultra High Resolution (UHR) descrive *banquette*, batimetria e habitat costieri con dettaglio centimetrico; la Beyond Ultra High Resolution (BUHR) osserva strutture, pigmenti e fauna a scala millimetrica. La Spatial Data Infrastructure (SDI), il WebGIS e le applicazioni web conservano il nesso tra dati, metodi e risultati consentendo di passare da mappe isolate a un processo ripetibile nel quale ogni scala chiarisce limiti lasciati aperti dalla precedente.
Il contributo consiste nell'integrare questa catena osservativa con una catena interpretativa: problema, dato, elaborazione, evidenza, significato e applicazione. L'articolo valuta la trasferibilità della classificazione satellitare da Culuccia a Capo Testa-Punta Falcone e mostra come i risultati delle diverse scale possano essere comunicati mediante storytelling scientifico senza separare la narrazione dalla tracciabilità del dato.

2 Obiettivi e aree di studio

L'obiettivo generale è costruire prodotti spaziali confrontabili che sostengano monitoraggio, verifica sul campo e comunicazione. A questo scopo il progetto: (i) mappa le classi bentoniche associate a *P. oceanica*; (ii) misura variazioni tra epoche; (iii) descrive prateria e *banquette* a risoluzione crescente; (iv) stima indicatori fisiologici e biologici mediante imaging; (v) organizza dati e risultati in servizi geospaziali interoperabili; (vi) trasforma tali prodotti in una narrazione spaziale comprensibile a ricercatori, gestori e utenti del mare. Gli obiettivi non sono

indipendenti: la copertura satellitare orienta l'osservazione locale, il dettaglio UHR e BUHR aiuta a interpretare le classi e la pubblicazione digitale conserva la relazione tra evidenza e decisione.
Le attività interessano diversi settori costieri della Sardegna, Capo Testa-Punta Falcone, Culuccia, Porto Torres, Porto Conte, Capo Caccia, Capo Carbonara-Villasimius e aree dell'Area Marina Protetta Tavolara-Punta Coda Cavallo (Fig. 1).

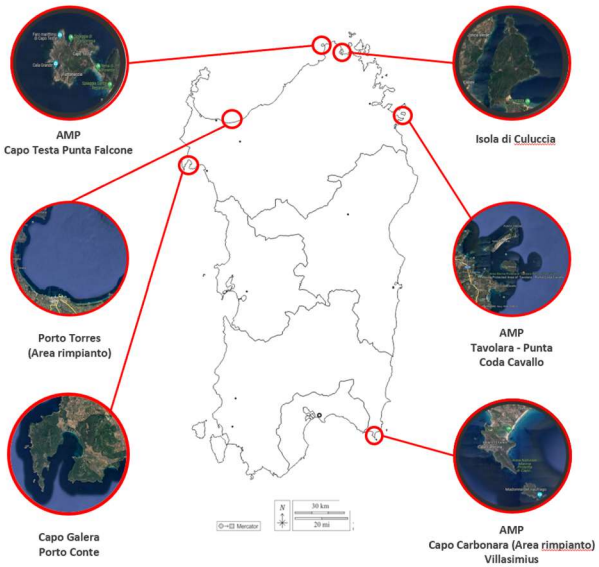


Fig. 1 Aree di studio

La validazione satellitare approfondita riguarda due siti della Sardegna settentrionale. Culuccia è l'area di studio iniziale, scelta per la disponibilità di osservazioni pregresse e conoscenza locale; Capo Testa-Punta Falcone verifica il trasferimento del workflow in un'altra area. La spiaggia Maurizio Vitale a Culuccia ospita il monitoraggio delle *banquette*; Porto Conte è il sito di integrazione tra veicolo autonomo e camera subacquea; i video ittici provengono dall'AMP Tavolara-Punta Coda Cavallo. Il disegno collega così condizioni operative diverse senza assumere che una singola configurazione sia valida ovunque.

3 Dati, piattaforme e workflow multiscala

3.1 Scala satellitare

Il livello a risoluzione media utilizza Sentinel-2 Level-2A, scelto perché fornisce riflettanza *bottom-of-atmosphere* già corretta per gli effetti atmosferici. Per la validazione metodologica sono state selezionate scene di settembre 2015: mare più calmo, torbidità contenuta e chioma della *P. oceanica* prossima al massimo stagionale

migliorano la leggibilità del fondale. Le scene candidate avevano copertura nuvolosa generalmente inferiore al 10%. Sono state impiegate B01-B09, B8A, B11 e B12; B10, dedicata ai cirri, è esclusa. Le bande native a 20 e 60 m sono ricampionate a 10 m con interpolazione bilineare. La Scene Classification Layer isola i pixel d'acqua, mentre una batimetria MaGIC [10] aggiunge un vincolo ambientale per classi spettralmente simili collocate a profondità diverse. La correzione della colonna d'acqua non è stata applicata: i test riportati non indicano un miglioramento significativo e il workflow fornisce esplicitamente la profondità al modello.

La carta di riferimento armonizza habitat EMODnet e substrati del GeoNetwork CNR-ISMAR in sei classi: Posidonia degradata o matte morta, Posidonia su matte/sabbia, Posidonia su roccia, assenza di Posidonia su sabbia, assenza di Posidonia su sedimenti misti e mare profondo. Le zone prive di informazione oltre l'isobata di 20 m sono assegnate alla classe profonda. La copertura continua evita lacune ambigue nell'estrazione dei campioni. Questa carta è però un riferimento tematico derivato da prodotti esistenti, non una ground truth di campo indipendente; le metriche misurano quindi accordo con il riferimento armonizzato.

L'impiego di modellazione DeepLabv3 ha consentito di analizzare il contesto spaziale a diverse scale, migliorando la classificazione di aree irregolari e caratterizzate da transizioni graduali. Per mitigare lo sbilanciamento del dataset e migliorare il riconoscimento delle classi meno rappresentate, vengono adottate tecniche di *oversampling*, ponderazione e bilanciamento delle classi. L'intero workflow è sviluppato in ambiente ArcGIS Pro, e attraverso la creazione di un progetto ModelBuilder, le fasi di *preprocessing*, classificazione e validazione vengono integrate in una *pipeline* automatizzata e riproducibile, applicabile alle diverse epoche di analisi.

Le prestazioni del modello sono valutate mediante matrici di confusione e indicatori statistici quali Overall Accuracy (OA), User's Accuracy (UA), Producer's Accuracy (PA) e coefficiente Kappa. La validazione metodologica viene condotta sulla scena del 2015, mentre la successiva analisi multi-temporale prevede il confronto pixel per pixel delle mappe relative al 2015, 2018, 2021 e 2024, al fine di individuare e quantificare le transizioni tra classi e le variazioni delle rispettive superfici nel tempo. Sulla scena 2015 di Culuccia, si è raggiunti (dopo 17 test) valori di OA = 0,831 e Kappa = 0,786.

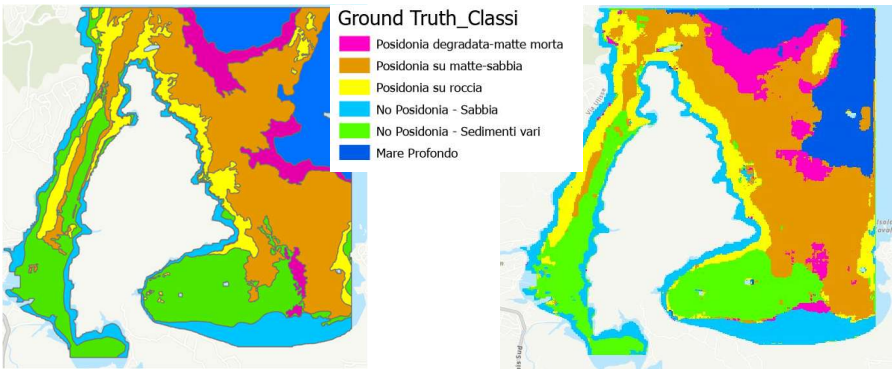


Fig. 2 Classificazione 2015, Penisola di Culuccia

I risultati ottenuti a Culuccia evidenziano inoltre un miglioramento nel riconoscimento della classe Posidonia su roccia, inizialmente poco identificata. Il trasferimento a Capo Testa-Punta Falcone produce OA = 0,883 e Kappa = 0,843, con UA tra 0,75 e 0,97 e PA tra 0,75 e 0,91. Il miglior risultato nel secondo sito conferma che la logica di *preprocessing* e *training* può essere riutilizzata, pur con *validation split* e *padding* adattati. Nell'analisi multi-temporale, l'area totale delle tre classi di Posidonia passa da 2,012 km² nel 2015 a 1,844 km² nel 2024: -0,168 km², circa -8%. Si tratta di una variazione cartografica da interpretare con le incertezze del riferimento e delle scene, non di una stima causale del degrado. L'area complessivamente monitorata mediante imaging è circa 70 km².

3.2 Scala UHR con UAV banquette e USV

Il monitoraggio dell'evoluzione delle *banquette* è stato condotto mediante rilievi UAV con acquisizione di immagini RGB, integrati con punti di controllo e verifica rilevati tramite GNSS-RTK ed elaborazioni fotogrammetriche basate sulla tecnica Structure from Motion (SfM). Tra il 2022 e il 2025 sono state effettuate quattro campagne di acquisizione, impiegando piattaforme DJI Phantom 4, DJI Matrice 300 e DJI Matrice 4. I rilievi hanno consentito di ottenere una Ground Sample Distance (GSD) compresa tra 3.1 e 17.2 mm/pixel, con un'accuratezza RTK dichiarata nell'ordine di 1–2 cm [2]. Per ciascuna campagna sono state generate ortofoto e modelli digitali di superficie (DSM) mediante Structure from Motion, utilizzati per ricostruire e confrontare la morfologia delle *banquette* nelle diverse epoche. L'analisi delle variazioni altimetriche è stata effettuata attraverso il confronto tra DSM opportunamente co-registrati, calcolandone le differenze di quota. Le variazioni ottenute sono state classificate in tre categorie (fig. 3), corrispondenti ad aumento, stabilità e diminuzione della superficie, sulla base di una soglia definita considerando l'incertezza verticale propagata, espressa dalla relazione $\sigma_{\Delta z} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$ indicando con 1 e 2 le due epoche di acquisizione comparate. Tale approccio permette di distinguere le variazioni morfologiche significative dalle differenze potenzialmente riconducibili all'incertezza delle misure.
Le variazioni volumetriche sono state quindi stimate suddividendo le superfici in aree omogenee e moltiplicando, per ciascuna di esse, l'estensione areale per la variazione altimetrica media. L'incertezza volumetrica è stata valutata a partire dall'incertezza verticale propagata e dalla superficie interessata. I risultati evidenziano una dinamica morfologica caratterizzata dall'alternanza di fenomeni erosivi, redistribuzione e accumulo del materiale spiaggiato. Nel periodo compreso tra giugno 2022 e giugno 2024 è stata stimata una perdita volumetrica di 74 ± 16 m³, accompagnata da accumuli localizzati pari a 23 ± 7 m³. Tra giugno e ottobre 2024 sono state registrate ulteriori diminuzioni di 34 ± 12 m³ e incrementi di 5 ± 3 m³. Il confronto tra giugno 2024 e luglio 2025 (Fig. 3) ha invece evidenziato perdite di 12 ± 4 m³ e accumuli più consistenti, pari a 96 ± 18 m³. Le diminuzioni volumetriche interessano prevalentemente il margine rivolto verso mare, mentre gli incrementi osservati nelle porzioni interne possono essere associati all'ispessimento dei depositi preesistenti. Gli accumuli localizzati lungo il margine esterno possono invece indicare un avanzamento della *banquette* verso mare, evidenziando la natura dinamica di queste formazioni e la loro evoluzione nel tempo.

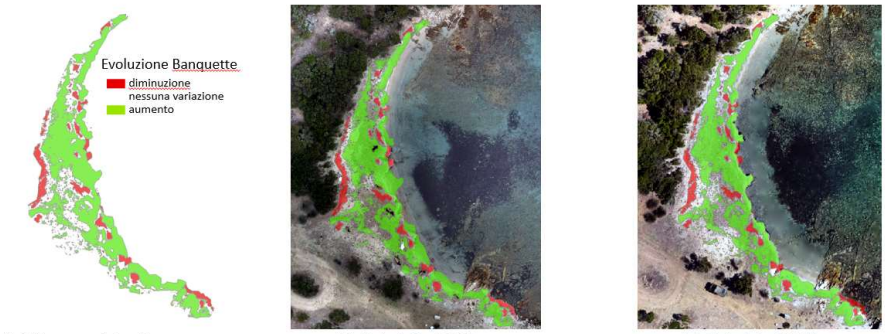


Fig. 3 Differenza DEM e ortofoto per il monitoraggio stagionale della banquette tra giugno '24 e luglio '25.

3.3 Scala BUHR con fotogrammetria e imaging iperspettrale

La scena subacquea combina attenuazione cromatica, torbidità, texture ripetitiva e movimento delle foglie. Il workflow usa immagini sovrapposte, correzione cromatica, matching, orientamento e ricostruzione densa ([8]). I metodi *learning-based* aumentano in alcuni casi densità e distribuzione dei *tie point*, ma non migliorano sistematicamente l'accuratezza metrica; risultano soprattutto più completi nelle aree difficili.

Rig stereoscopici sincronizzati riducono la decorrelazione temporale. ORCA, sviluppato nel progetto PNRA, integra due Nikon D850 da 46 MP, un controllore ottico esterno e un data logger che sincronizza camere e dati di pressione e inerziali con PRINSY; l'acquisizione quasi simultanea, dell'ordine di 0,0005 s, consente misure per triangolazione con GSD sub-millimetrico. CRAB (Calibrated Rig for Aquatic photogrammetric Bicamera system) utilizza due Sony ILX-LR1 da circa 60 MP (9504 × 6336 pixel), in custodie di alluminio stagne su base rigida, con illuminazione dedicata e cupole da 90 mm di raggio di curvatura. Le camere, sincronizzate tramite microcontrollore entro 0,01-0,02 s, sono state calibrate in ambiente controllato con pannello parzialmente immerso per mantenere fuoco e ridurre la distorsione. Il *rig*, pensato per l'uso da parte di subacquei (ma adattabile a ROV), permette di scalare i modelli SfM senza punti di controllo a terra; i primi test a 6-7 m di profondità, verificati con pannello e cubo di calibrazione, hanno confermato la ricostruzione 3D accurata. Il livellamento idrostatico PRINSY fornisce inoltre un riferimento locale con RMSE di circa 2 mm.

L'imaging iperspettrale impiega la Senop Rikola, camera snapshot a doppio sensore basata su interferometro Fabry-Pérot. La sequenza programmabile di bande copre 500-900 nm con risoluzione spettrale di 1 nm, idonea ad analizzare *Posidonia oceanica* degradata, morta o restaurata a scala sub-centimetrica. Per l'acquisizione subacquea sono disponibili una custodia stagna, due lampade alogene (Fig. 4) a spettro completo e *target* di riflettanza nota per la calibrazione. Gli ipercubi sono stati acquisiti su foglie appena prelevate lungo un transetto di 20 m a 15 m di profondità. La calibrazione geometrica in Matlab ha prodotto un errore medio di riproiezione inferiore a 1 pixel; la

co-registrazione dei sensori, basata su SURF, RANSAC e trasformazione di similitudine 2D, ha lasciato residui di circa 0,7 pixel. La calibrazione radiometrica con tre pannelli grigi ha raggiunto un errore inferiore al 2,5% di riflettanza. Sono stati calcolati 34 indici e misurati in laboratorio clorofille, carotenoidi e pigmenti totali.
Il 70% dei campioni è stato utilizzato per costruire modelli lineari, robusti, esponenziali e di potenza e il 30% per la validazione. Tra gli indici iperspettrali, ChlRI red-edge, calcolato alle lunghezze d'onda indicate nei materiali (779 e 727 nm), mostra la relazione più forte con la clorofilla totale trasformata in logaritmo ($r = -0,77$; $p < 0,0001$). SIPI, basato su 805.1, 506.3 e 675.1 nm, presenta una correlazione moderata con il rapporto carotenoidi/clorofilla totale ($r = 0.59$; $p < 0.001$). Non emerge invece una correlazione significativa per i pigmenti totali. I modelli esponenziali raggiungono R^2 circa 0,99 sul training ma generalizzano poco; modelli lineari e di potenza risultano più stabili in validazione. Il risultato sottolinea che un *fit* elevato sul *training* non è sufficiente in presenza di un campione limitato.

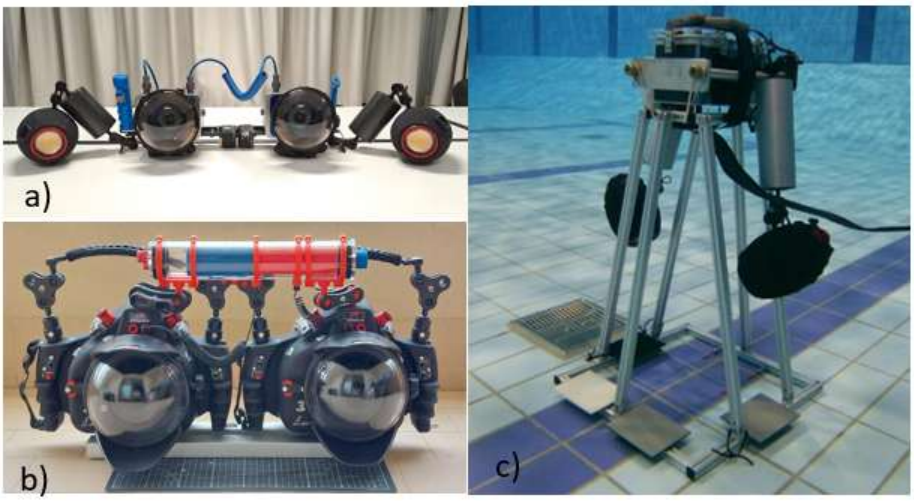


Fig. 4 a) CRAB, b) ORCA, c) Setup Rikola

Il livello UHR comprende inoltre rilievi con il veicolo autonomo BlueBoat 120. Un ecoscandaglio Alpha-Wi fornisce la batimetria, mentre una GoPro HERO10 orientata verso il fondale acquisisce sequenze ottiche. I tempi GNSS delle immagini sono sincronizzati con la traiettoria GNSS-RTK registrata da ArduPilot e le posizioni sono interpolate all'istante di scatto. Nel test di Porto Conte, svolto tra 0,5 e 3 m di profondità su circa 1000 m², i residui RMS della trasformazione di similitudine tra posizioni fotogrammetriche e traiettoria RTK sono risultati entro 5 cm; è stato prodotto un ortomosaico a 1 cm. Complessivamente, l'integrazione UAV-USV ha coperto circa 1 km².

3.4 Rilevamento e conteggio della fauna

Nell'AMP Tavolara-Punta Coda Cavallo, operatori subacquei hanno acquisito nell'agosto 2024 video con action camera 4K a 15 m di profondità, lungo un transetto lineare di 50 m percorso a 12 m/min e replicato tre volte. Il dataset SardinIA comprende 729 immagini e 28 specie ittiche endemiche del Mediterraneo; l'annotazione ha richiesto sei ore di lavoro a due esperti.
La pipeline integra object detection e multi-object tracking. Sono stati confrontati DeepFins, DeepEcomar, YOLOv8 (Fig. 5) e YOLOE; per il tracking sono stati testati SAMURAI, ByteTrack e DeepSort. Il tracciamento evita il doppio conteggio dello stesso individuo tra fotogrammi successivi. DeepSort è risultato il metodo più affidabile nel mantenimento delle identità, mentre YOLOE addestrato su SardinIA ha fornito il migliore equilibrio complessivo. I conteggi automatici sono stati confrontati con censimenti visuali subacquei e video condotti da operatori, mostrando accordo elevato sull'abbondanza totale e sulle specie dominanti.

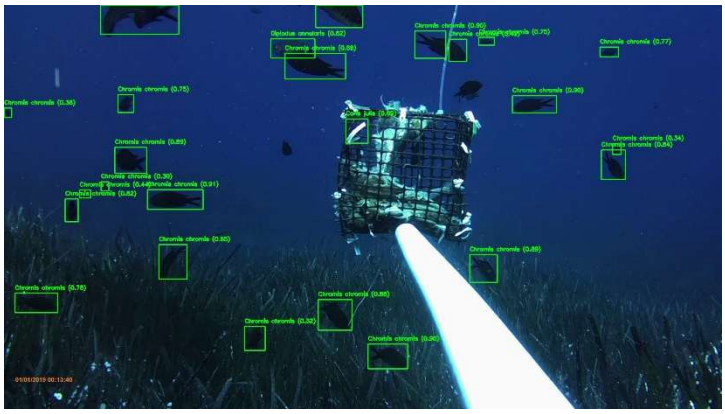


Fig. 5 Risultati ottenuti con YOLOv8 su fotogrammi selezionati.

4 Gestione e valorizzazione dei dati geospaziali

La Spatial Data Infrastructure (SDI) raccoglie prodotti satellitari, rilievi UAV, indagini geomatiche e osservazioni in situ in un geodatabase relazionale multiscala. I layers sono pubblicati e interrogati attraverso GIS e WebGIS. La POSEIDON Web App, sviluppata con ArcGIS Online e ArcGIS Experience Builder, integra servizi geografici, geolocalizzazione e dati spaziali in un'interfaccia rivolta sia alla ricerca sia agli utenti del mare. La visualizzazione della distribuzione di Posidonia e delle aree sensibili può quindi orientare la consultazione prima della navigazione e rendere leggibili risultati che, in forma di raster o tabella, resterebbero destinati a specialisti.
ArcGIS StoryMaps organizza la comunicazione in una sequenza: ruolo ecologico, pressioni, osservazioni, dati, risultati e implicazioni. La mappa regionale introduce la scala del problema, le classificazioni localizzano le classi, i confronti temporali ne mostrano il cambiamento e i prodotti UHR/BUHR chiariscono ciò che si osserva

localmente. Lo storytelling diventa così il livello interpretativo della SDI: conserva la provenienza del dato e rende consultabile la catena di elaborazione senza sostituire la documentazione tecnica.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto POSEIDON evidenzia le potenzialità di un approccio integrato e multiscala per il monitoraggio di Posidonia oceanica, combinando tecniche geomatiche, osservazioni da remoto e intelligenza artificiale. La classificazione satellitare mediante DeepLabv3-ResNet34 ha raggiunto valori di Overall Accuracy (OA) e Kappa pari a 0,831/0,786 a Culuccia e 0,883/0,843 a Capo Testa-Punta Falcone, mostrando buone prestazioni e potenzialità di trasferimento tra aree differenti. Tuttavia, la validazione è stata condotta rispetto a cartografie armonizzate e non a osservazioni indipendenti sul campo. Analogamente, la riduzione cartografica di 0,168 km² delle classi di Posidonia rilevata nel periodo 2015–2024 richiede ulteriori verifiche prima di essere interpretata come effettiva regressione della prateria.
L'integrazione di rilievi UAV e USV, fotogrammetria subacquea, analisi iperspettrali e riconoscimento automatico della fauna consente di descrivere l'ecosistema a differenti scale spaziali, integrando le informazioni satellitari con osservazioni di maggiore dettaglio. Permangono tuttavia alcune criticità legate alle condizioni ambientali, alla qualità delle acquisizioni e alla rappresentatività dei dataset utilizzati. In questo contesto, SDI, WebGIS e StoryMap (https://arcg.is/1Gyea02) favoriscono l'organizzazione, la condivisione e l'interpretazione dei risultati, mentre lo storytelling scientifico ne facilita la comunicazione a ricercatori, enti gestori e cittadini.
Gli sviluppi futuri saranno orientati all'ampliamento della validazione spaziale e temporale, alla standardizzazione dei protocolli di acquisizione e all'impiego dei dati ad altissima risoluzione per verificare e perfezionare le classificazioni satellitari. Nel complesso, POSEIDON propone un approccio metodologico potenzialmente replicabile, il cui consolidamento potrà contribuire alla conoscenza, alla conservazione e alla gestione sostenibile degli ecosistemi costieri mediterranei.

Ringraziamenti

Il progetto POSEIDON è stato finanziato dal Ministero dell'Università nell'ambito dei progetti di rilevanza nazionale (PRIN-PNRR) basato su risorse Next Generation EU. Si ringraziano BIRU srl e l'osservatorio Naturalistico dell'Isola di Culuccia per la collaborazione nell'ambito del progetto.

Riferimenti bibliografici

1. Telesca, L. et al.: Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific Reports* 5, 12505 (2015).

2. Montefalcone, M.: Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review. *Ecological Indicators* 9, 595-604 (2009).
3. Traganos, D., Reinartz, P.: Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery. *Marine Pollution Bulletin* 134, 197-209 (2018).
4. Mederos-Barrera, A., Marcello, J., Eugenio, F., Hernández, E.: Seagrass mapping using high resolution multispectral satellite imagery: a comparison of water column correction models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 113, 102990 (2022).
5. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: MICCAI, pp. 234-241. Springer (2015).
6. Chen, L.-C. et al.: DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. *IEEE TPAMI* 40(4), 834-848 (2018).
7. Zollini, S., Dominici, D., Alicandro, M., Cuevas-González, M., Angelats, E., Ribas, F., & Simarro, G. (2023). New Methodology for Shoreline Extraction Using Optical and Radar (SAR) Satellite Imagery. Journal of Marine Science and Engineering, 11(3), 627.
8. Angelini, R., Angelats, E., Luzi, G., Masiero, A., Simarro, G., & Ribas, F. (2024). Development of Methods for Satellite Shoreline Detection and Monitoring of Megacusp Undulations. Remote Sensing, 16(23), 4553
9. Balletti, C., Guerra, F., Tsioukas, V., & Vernier, P. (2014). Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes. Sensors, 14(9), 17471–17490.
10. Dipartimento della Protezione Civile. (2020). Progetto MaGIC: Marine Geohazards along the Italian Coasts. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Italia. https://www.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/progetto-magic-marine-geohazards-along-italian-coasts/
11. European Marine Observation and Data Network (EMODnet). (s.d.). EMODnet Seabed Habitats. European Commission, Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries (DG MARE). https://emodnet.ec.europa.eu/en/seabed-habitats
12. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Marine (CNR-ISMAR). (s.d.). GeoNetwork: Marine Geospatial Data Catalogue. CNR-ISMAR. https://seamap-catalog.data.ismar.cnr.it/
13. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep Learning in Remote Sensing Applications: A Meta-Analysis and Review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 152, 166–177.

Progetto SALUT - sviluppo di competenze geospaziali e integrazione di dati sensoristici per la resilienza climatica nei Caraibi orientali

Alessandra Marchese[1], Roderic Molina[1], Milva Carbonaro[1], Danny Vandenbroucke[2] e Evert Van Bever[2]

[1] Associazione GISIG, a.marchese@gisig.it, r.molina@gisig.it, m.carbonaro@gisig.it
[2] KU Leuven, danny.vandenbroucke@kuleuven.be, evert.vanbever@kuleuven.be

Abstract. SALUT, finanziato da Erasmus+ Capacity Building in VET, rafforza le competenze per la resilienza climatica a Saint Lucia (Caraibi Orientali) attraverso dati geospaziali, sensori ambientali e formazione innovativa. Il progetto realizza una rete di stazioni meteorologiche integrate nella National Spatial Data Infrastructure (NSDI) e promuove un approccio "learning-while-doing", Train-the-Trainer e citizen science, favorendo capacity building, trasferimento tecnologico e cooperazione regionale.
Il poster vuole offrire una panoramica delle attività iniziali di progetto, partendo dalla installazione delle stazioni meteorologiche presso scuole ed edifici pubblici dell'isola, e dalla costituzione di una rete di sensori i cui dati sono consultabili in tempo reale. I dati dele stazioni, nel corso del progetto, verranno da una parte integrati e interpolati su software GIS per la creazione di mappe rappresentative dei principali parametri monitorati, dall'altra utilizzati per promuovere la consapevolezza e gli effetti dei cambiamenti climatici tra i cittadini dell'isola.

Parole chiave: Infrastruttura di dati spaziali, rete di stazioni meteo, Monitoraggio ambientale, Resilienza climatica, Citizen science, Train-the-Trainers.

1 Il Progetto SALUT

1.1 Obiettivi

Il progetto SALUT (Sensors and Geospatial Technologies for Climate Resilience Capacity Building in Saint Lucia) mira a rafforzare le competenze tecniche e professionali della popolazione dell'isola di *Saint Lucia* (Caraibi Orientali) necessarie per affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici attraverso l'impiego di dati geospaziali, reti di sensori ambientali e metodologie innovative di formazione basate sull'esperienza pratica.

L'iniziativa coinvolge partner europei e caraibici con l'obiettivo di sviluppare un ecosistema di apprendimento e trasferimento tecnologico incentrato sull'isola di Saint

Lucia. Il progetto prevede la realizzazione di una rete di stazioni meteorologiche a basso costo installate presso scuole ed edifici pubblici, la raccolta e gestione di flussi di dati in tempo reale e la loro integrazione nella National Spatial Data Infrastructure (NSDI) nazionale mediante standard aperti e interoperabili. Tali dati saranno utilizzati per supportare attività di monitoraggio ambientale, analisi dei rischi climatici e pianificazione di interventi di adattamento e mitigazione.

1.2 Approccio metodologico

Un elemento distintivo di SALUT è l'approccio *learning-while-doing*, che combina formazione professionale, casi studio reali e project-based learning. Attraverso un modello Train-the-Trainer, esperti europei formeranno tecnici, funzionari pubblici e docenti locali che, a loro volta, trasferiranno conoscenze e competenze a studenti, professionisti e organizzazioni del territorio. Il progetto promuove inoltre iniziative di "Citizen Science" per aumentare la consapevolezza dei giovani sui fenomeni climatici e favorire la partecipazione attiva alla raccolta e all'analisi dei dati ambientali.

1.3 Risultati attesi

SALUT ambisce infine a trasformare Saint Lucia in un hub regionale per il trasferimento di conoscenze e competenze geospaziali nei Caraibi orientali, favorendo la cooperazione internazionale e la diffusione di buone pratiche per la resilienza climatica.

2 Attività progettuali

2.1 La rete di stazioni meteorologiche

Un elemento centrale dell'iniziativa è la realizzazione di una rete distribuita di circa 20 stazioni meteorologiche a basso costo, prevalentemente installate presso scuole ed edifici pubblici, concepita come infrastruttura locale per la raccolta di osservazioni ambientali ad alta distribuzione spaziale.

Le stazioni sono modello Ambient Weather WS-2902D. Il sistema acquisisce in tempo reale parametri quali temperatura e umidità dell'aria, pressione atmosferica, precipitazioni, velocità e direzione del vento, radiazione solare e radiazione UV.

A giugno 2026 sono state installati presso il Camille Henry Memorial School e il Sir Arthur Lewis Community College (SALCC) e connessi i primi due nodi della rete, cui sono seguite le altre installazioni (Tab 1). La distribuzione delle stazioni sul territorio consentirà di costruire un quadro più dettagliato delle condizioni ambientali locali e di analizzare le differenze microclimatiche in relazione a fattori territoriali quali vegetazione, urbanizzazione, altitudine e prossimità alla costa.

Tabella 1. Le stazioni meteorologiche installate presso scuole ed edifici pubblici di Saint Lucia

N.	Data	Nome del Sito	Lat	Long
1	10/06/2026	Camille Henry Memorial School	14.0201	-60.9894
2	11/06/2026	Sir Arthur Lewis Community College	13.9977	-60.9959
3	27/08/2026	Dept of Finance, NIPP	14.0169	-60.9921
4	28/09/2026	St Mary's College	14.0236	-60.9994
5	29/09/2026	Sir Ira Simons Secondary School	14.0262	-60.9796
6	29/09/2026	Castries Comprehensive Secondary School	14.0273	-60.9783
7	29/09/2026	Dame Pearlette Louisy Primary School	14.0267	-60.9608
8	29/09/2026	Gordon & Walcott Memorial Methodist School	14.0136	-60.9877
9	30/09/2026	Patricia D James Secondary School	14.0189	-60.9825
10	30/09/2026	Carmen Rene Memorial School	14.0171	-60.9903
11	30/09/2026	Ave Maria Primary School	14.0086	-60.9888
12	30/09/2026	Bishop Charles Gachet R. C. School	14.0035	-60.9837
13	30/09/2026	Ti Rocher Combined School	13.9932	-60.9673
14	30/09/2026	Ciceron R.C Combined School	13.9904	-61.0092
15	30/09/2026	St Joseph's Convent	14.0062	-60.9823
16	30/09/2026	Entrepot Secondary School	14.0042	-60.9816
17	30/09/2026	Leon Hess Comprehensive Secondary School	14.0000	-60.9788
18	30/09/2026	Bocage Secondary School	14.0054	-60.97
19	30/09/2026	Morne Du Don Primary School	14.0116	-60.9788
20	09/10/2026	MET Services	14.0202	-60.9949
21	12/10/2026	WRMA Min. of Agriculture	14.0207	-60.9618



Fig. 1. La stazione meteo low-cost installata dal progetto SALUT sul tetto del Sir Arthur Lewis Community College.

2.2 Il data processing e la creazione di mappe

Dal punto di vista geospaziale, SALUT affronta quindi il passaggio dalla singola osservazione puntuale alla costruzione di una rete territoriale di dati ambientali, ponendo particolare attenzione alla gestione, documentazione e valorizzazione dell'informazione geografica.

Il processamento dei dati acquisiti dalle stazioni meteorologiche costituisce un passaggio fondamentale per la trasformazione delle misurazioni puntuali in informazioni geospaziali a copertura territoriale. Nell'ambito del progetto SALUT, i dati meteorologici vengono organizzati e processati in ambiente GIS attraverso il software open source QGIS. Il workflow prevede l'acquisizione e l'integrazione dei dati delle stazioni con i relativi metadati geografici e temporali, la selezione delle misurazioni riferite a specifici intervalli temporali e il controllo della validità dei dati, con la successiva conversione dei valori in formato numerico. Le misurazioni puntuali, georeferenziate e opportunamente riproiettate, vengono quindi sottoposte a tecniche di interpolazione spaziale, al fine di stimare la distribuzione continua della temperatura nelle aree non direttamente monitorate. I risultati vengono rappresentati attraverso mappe tematiche raster e isolinee di temperatura, che consentono di visualizzare la variabilità spaziale del fenomeno e di ottenere una rappresentazione territoriale più dettagliata delle condizioni microclimatiche. Questo approccio permette di valorizzare i dati raccolti dalle reti di stazioni meteorologiche, trasformandoli in prodotti cartografici a supporto dell'analisi ambientale, del monitoraggio climatico e delle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici. Inoltre, il fine ultimo del progetto è proprio quello di favorire l'integrazione dei nuovi layers generati partendo dai dati in tempo reale all'interno della National Spatial Data Infrastructure (NSDI) di Saint Lucia.

2.3 Capacity Building per il rafforzamento della National Spatial Data Infrastructure (NSDI)

La NSDI di Saint Lucia si trova attualmente in una fase iniziale di sviluppo. Sebbene sia già disponibile un patrimonio significativo di dati geospaziali, persistono criticità legate all'aggiornamento dei principali dataset, alla loro integrazione e, in particolare, alla disponibilità di dati dinamici ed event-based. L'NSDI non dispone infatti, allo stato attuale, di un'integrazione strutturata con flussi di dati provenienti da sensori in tempo reale, limitando la possibilità di rappresentare e monitorare fenomeni ambientali caratterizzati da elevata variabilità temporale.

In questo contesto, le attività di capacity building assumono un ruolo strategico non solo per lo sviluppo delle competenze degli operatori, ma anche come strumento per sostenere l'evoluzione dell'infrastruttura stessa. La formazione è orientata alla gestione dell'intero processo di integrazione del dato sensoristico nell'ecosistema geospaziale: dall'acquisizione e controllo dei dati, al loro processamento e alla produzione di informazioni georiferite, fino alla pubblicazione e condivisione nell'ambito della NSDI. Particolare attenzione è rivolta allo sviluppo di competenze relative all'utilizzo

dei sensori come nuove fonti di dati e alla loro integrazione secondo principi di interoperabilità e standardizzazione.

L'introduzione di una rete dimostrativa di stazioni meteorologiche costituisce, in tale prospettiva, un caso applicativo per sperimentare l'inserimento di real-time data streams nell'infrastruttura nazionale. I dati acquisiti consentono di generare nuovi layer tematici relativi ai principali parametri meteorologici, quali temperatura, precipitazione, vento e umidità, arricchendo progressivamente il patrimonio informativo della NSDI. Il processamento e l'interpolazione spaziale dei dati puntuali permettono inoltre di trasformare le osservazioni provenienti dalle stazioni in superfici continue e prodotti cartografici utilizzabili per l'analisi territoriale e climatica.

L'approccio adottato mira quindi a creare un collegamento più stretto tra competenze, sensoristica e infrastruttura geospaziale, favorendo il passaggio da una NSDI basata prevalentemente su dataset statici a un ambiente capace di integrare e valorizzare dati aggiornati e dinamici. Il rafforzamento delle competenze degli operatori e la produzione di nuovi layer costituiscono pertanto due componenti complementari dello stesso processo di modernizzazione e consolidamento della NSDI di Saint Lucia.

Le attività di capacity building hanno incluso sessioni dedicate a Geographic Information Systems (GIS), Spatial Data Infrastructures (SDI) e gestione dei dati provenienti dai sensori meteorologici. La formazione ha riguardato le modalità di gestione e condivisione dei dati spaziali, il controllo della qualità, i metadati e il processo di trasformazione delle osservazioni dei sensori in informazioni geografiche e cartografiche.

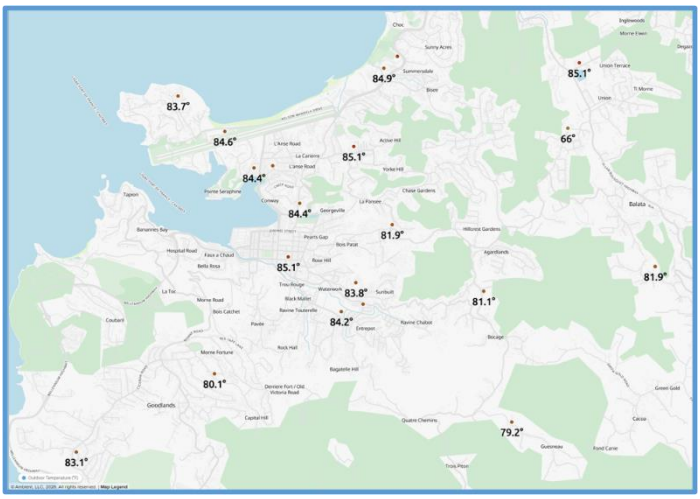


Fig. 2. La rete delle stazioni meteorologiche installate nel bacino di Castries (Saint Lucia) raffigurate attraverso il sistema di visualizzazione dati in tempo reale di Ambient Weather WS-2902D.

Riferimenti bibliografici

1. SALUT Grant Agreement, Contract N. 101242780
2. SALUT Web Site, https://www.salut-project.eu/.
3. Ambient Weather WS-2902D Wi-Fi Solar-Powered Wireless Weather Station User Manual, Version 1.29, 2022.
4. SALUT Newsletter #1, September 2026
5. SALUT Deliverable 2.2 “Preparing the Sensors Network”

Applicazione di tecniche di GeoAI per l'aggiornamento speditivo del Database Geotopografico regionale alla scala 1:5000

Carlo Masetto[1], Sara Nordio[2], Andrea Ghirardi[3], Alessandra Amoroso[1], Laura Magnabosco[1], Daniele Savio[1], Umberto Trivelloni[1], Virgilio Cima[4]

[1] 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
[2] IRS, nordio@i-r-s.it
[3] Pr.El.Cart, a.ghirardi@prelcart.it
[4] Libero professionista, virgiliocima@gmail.com

Abstract. La Regione del Veneto ha introdotto metodologie di GeoAI per l'aggiornamento speditivo dei Database Geotopografici. Il progetto ha interessato circa 4.500 km², con rilievi aerofotogrammetrici e ortofoto a 15 cm. Tecniche di GeoAI consentono l'estrazione semiautomatica di edifici, strade, corpi idrici e vegetazione. I controlli di qualità mirano a garantire la coerenza dei dati e la compatibilità con la scala 1:5000, riducendo tempi e costi rispetto ai metodi tradizionali.

Parole chiave: Geodatabase, CTR, GeoAI, Machine Learning.

Introduzione

La Regione del Veneto, ai sensi della L.R. 16 luglio 1976, n. 28, si occupa di produrre e aggiornare la Carta Tecnica Regionale (CTR) alle scale 1: 5000 e 1:10000 e, a seguito della L.R. 23 aprile 2004, n. 11 "Norme per il governo del territorio e in materia di paesaggio", anche alla scala 1:2000 per la formazione dei Quadri Conoscitivi su cui si basano gli strumenti di pianificazione urbanistica a livello locale. Nel corso degli anni, l'evoluzione tecnologica ha trasformato la tradizionale CTR analogica prima nella cartografia numerica (CTRN) e, successivamente, nella struttura in forma di Database Geotopografico (DBGT) come sancito dal DM del 10 novembre 2011 "Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici".

All'evoluzione dello strumento cartografico di base, si è accompagnato il percorso di trasformazione dal Sistema Informativo Territoriale all'Infrastruttura di Dati Territoriali della Regione del Veneto (IDT-RV), realizzata secondo quanto stabilito dalla direttiva 2007/2/CE "INSPIRE", e in osservanza del D.Lgs. 7 marzo 2005, n. 82 "Codice dell'amministrazione Digitale".

Tutte le informazioni georiferite che popolano IDT-RV (dati topografici, cartografie storiche, banche dati tematiche, dati satellitari, modelli digitali dell'elevazione etc.) si

basano sulla CTR, strutturata come DBGT; per questo motivo risulta di primaria importanza perseguire il costante aggiornamento e, ove possibile, il miglioramento di questo dato di base.
L'aggiornamento cartografico secondo i metodi tradizionali basati sull'aerofotogrammetria, prevede complesse fasi di produzione che, come noto, comprendono: il rilievo aerofotogrammetrico nadirale (con contestuale produzione di ortofoto), l'inquadramento plano-altimetrico, la restituzione, la ricognizione in campagna e la formazione del DBGT.
Il processo produttivo appena descritto si rivela molto efficace in termini di qualità dei dati prodotti, ma risulta limitante in termini di tempistiche di produzione e costi; entrambe le criticità sono dovute al necessario massiccio ricorso a operatori ad alto livello di specializzazione nelle diverse fasi di realizzazione.
Proprio al fine di abbattere tempi e costi di produzione delle cartografie di base, si stanno esplorando, con crescente successo, metodologie di Intelligenza Artificiale Spaziale (GeoAI) [1] . Nel recente passato possono citarsi simili esempi, principalmente per gli elementi cartografici relativi all'edificato [4].
L'impiego di tali tecniche per l'ottimizzazione, tramite procedure semi-automatiche, di cartografie e DBGT rappresenta infatti una delle frontiere più promettenti per lo sviluppo nel prossimo futuro, anche alla luce del progressivo miglioramento degli aspetti computazionali e degli algoritmi [2]; sovente tali tecniche sono mutuate dalle produzioni di cartografie tematiche, ove di fatto si classificano oggetti territoriali di dimensioni più consistenti e i rilievi vengono eseguiti a scale nominali non superiori a 1:10000.
In questo quadro d'insieme, la Regione del Veneto ha già realizzato una produzione cartografica con supporto di tecniche GeoAI nel territorio del Bacino Imbrifero Montano dell'Adige nella provincia di Verona, dove è stato effettuato un rilevamento da piattaforma aeromobile tra luglio e agosto 2023, ricavandone esiti molto promettenti che hanno consentito di individuare utili prescrizioni da inserire nei capitolati tecnici di successivi rilievi analoghi [3]. Poiché si è rilevata la percorribilità di ricorrere a procedure di GeoAI per ottenere alcune classi di oggetti con accuratezze metriche paragonabili a quelle proprie della scala 1:5000 e con affidabilità pari al 95%, si è ritenuto di riproporre la metodologia in un successivo servizio di produzione cartografica che, per le metodologie utilizzate dalle Imprese affidatarie (IRS Italian Remote Sensing S.R.L. per la ripresa aerofotogrammetrica e Pr.El.Cart. Europe Engineering S.R.L. per la produzione di dati mediante tecniche di A.I.) e per le azioni di verifica di conformità messe in atto dalla Direzione Pianificazione Territoriale, ha fornito ottimi esiti che si ritengono meritevoli di descrizione nei successivi paragrafi.

Descrizione del Servizio

Il Servizio, che si è svolto nelle annualità 2025 e 2026, ha avuto come oggetto il rilevamento da piattaforma aeromobile del territorio dell'intera provincia di Treviso e di parte delle province di Venezia, Verona e Vicenza e la formazione di prodotti derivati dai dati acquisiti dal volo. L'area interessata dal progetto è pari a 4.591 km².
Sono state quindi realizzate le documentazioni di seguito elencate:

- ripresa aerea con un Ground Sample Distance (GSD) nominale di 0,10 m e relativa Triangolazione Aerea (T.A.), con le caratteristiche idonee all'utilizzo per il rilievo fotogrammetrico;
- ortofoto digitale a colori con dimensione nominale del pixel al suolo di 0,15 m;
- livelli informativi vettoriali generati con procedure automatiche relativamente a: edificato, viabilità, idrografia, vegetazione.

Nell'immagine seguente (Fig. 1) sono indicate le aree della regione del Veneto oggetto di aggiornamento cartografico.

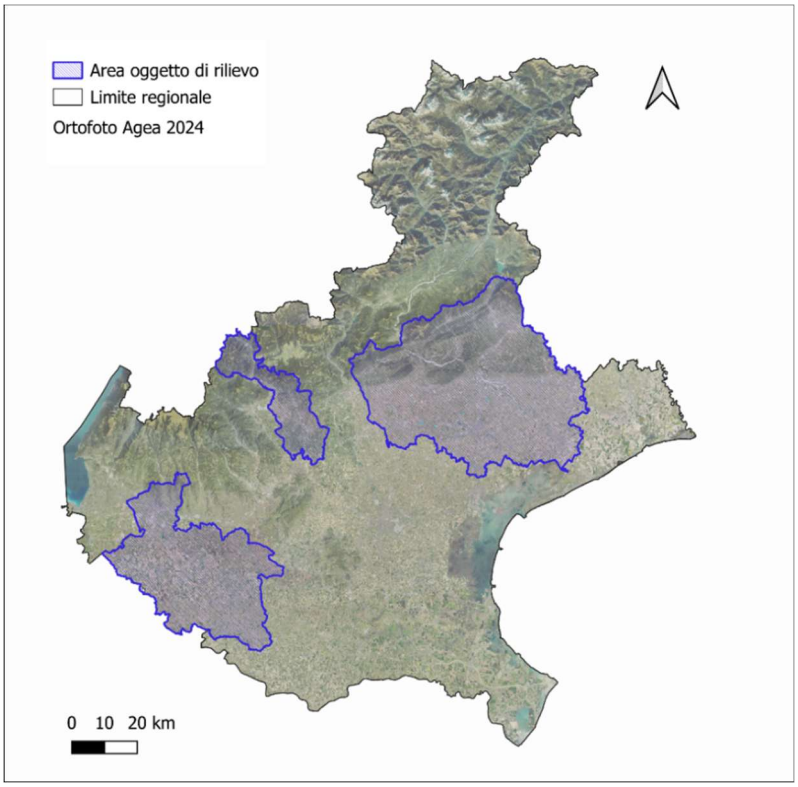


Fig. 1. Individuazione delle aree interessate dall'aggiornamento cartografico (intera provincia di Treviso, parte della provincia di Venezia, Verona e Vicenza).

Le prescrizioni del Capitolato [5], redatto basandosi sui risultati delle positive esperienze precedenti [3], prevedevano nello specifico il georiferimento dei dati nel Sistema di Riferimento Geodetico Nazionale ETRF2000 (RDN2008) all'epoca 2008.0, Fuso 12, con quote geoidiche riferite al sistema verticale Genova 1942 mediante il modello di geoide Italgeo2005. Le ortofoto digitali dovevano presentare una dimensione nominale del pixel al suolo di 0,15 metri con un'accuratezza posizionale planimetrica con errore inferiore a 0,60 metri al livello di confidenza del 97%. I livelli informativi vettoriali estratti mediante algoritmi di Intelligenza Artificiale (edificato, strade e ponti, acque interne e vegetazione arborea) dovevano rispettare una tolleranza

planimetrica e di altezza di 1,5 metri nel 95% dei casi. L'estrazione prevedeva una superficie minima di 16 metri quadrati per i poligoni generici e una larghezza minima di 2 metri per gli elementi stradali lineari. Per la classe dell'edificato era espressamente richiesta la caratterizzazione dell'altezza del corpo di fabbrica come attributo e la separazione dei volumi adiacenti quando presente una differenza di altezza superiore a 3 metri. I dataset automatici sono stati sottoposti a procedure rigorose di editing a video, smoothing geometrico e sgrondatura automatica delle coperture, per poi essere corredati da metadati conformi agli standard stabiliti dalle norme nazionali e comunitarie.

Caratteristiche del rilievo aerofotogrammetrico

Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito mediante acquisizione aerea con sistema UltraCam Osprey 4.2 di Vexcel, adottando una metodologia di acquisizione e di elaborazione finalizzata non solo al raggiungimento di elevati standard di accuratezza geometrica, ma anche alla conservazione della qualità radiometrica del dato e alla produzione di una base fotogrammetrica ottimizzata per le successive attività di restituzione automatica mediante tecniche di Intelligenza Artificiale.

Le scelte metodologiche adottate hanno riguardato in particolare due aspetti:

- la gestione e uniformazione della componente radiometrica, mediante il workflow proprietario Vexcel per ridurre le discontinuità tra strisciate;
- l'adozione di una sovrapposizione fotogrammetrica significativamente superiore a quella convenzionale, finalizzata alla generazione di modelli tridimensionali più robusti e geometricamente affidabili.

Queste scelte hanno consentito di ottenere un prodotto caratterizzato da elevata continuità radiometrica, stabilità temporale del segnale e migliori caratteristiche geometriche, particolarmente importanti nell'ambito di processi di restituzione automatica.

Nello specifico delle strategie di acquisizione, al fine di garantire la massima uniformità dei prodotti, il rilievo è stato pianificato ed eseguito concentrando le operazioni di volo nel minor intervallo temporale possibile. Questa scelta ha consentito di minimizzare le variazioni naturali della scena dovute al cambiamento delle condizioni atmosferiche, dell'illuminazione solare e, più in generale, all'evoluzione temporale delle condizioni ambientali e stagionali.

La combinazione tra acquisizione concentrata temporalmente, controllo delle condizioni di volo e workflow proprietario di bilanciamento radiometrico Vexcel ha permesso di ottenere un dataset caratterizzato da elevata uniformità radiometrica e continuità dell'informazione, riducendo le discontinuità tra strisciate e tra differenti sessioni di acquisizione.

Per quanto concerne la sovrapposizione tra immagini si evidenzia che per la realizzazione dei modelli tridimensionali utilizzati nelle successive fasi di elaborazione è stata adottata una configurazione con sovrapposizione longitudinale pari al 60% e trasversale pari all'80% (60/80), significativamente superiore alla configurazione convenzionale generalmente adottata nei rilievi fotogrammetrici, tipicamente nell'ordine del 30%-60%. Tale caratteristica è stata scelta specificamente in funzione della successiva generazione dei modelli DTM e DSM attraverso procedure di

correlazione automatica e di autocorrelazione, con l'obiettivo di migliorare la robustezza della ricostruzione tridimensionale. L'elevata sovrapposizione adottata consente di disporre di un numero maggiore di osservazioni dello stesso elemento da differenti posizioni della camera. Questo permette ai processi di correlazione di individuare e verificare più efficacemente i corrispondenti omologhi presenti nelle diverse immagini, migliorando la geometria della ricostruzione tridimensionale.
Particolare attenzione è stata posta alla qualità geometrica delle superfici ricostruite. La configurazione 60/80 è stata infatti adottata con l'obiettivo di ottenere geometrie il più possibile prossime alla reale configurazione verticale degli elementi presenti sul territorio, riducendo le deformazioni prospettiche e le ambiguità che possono risultare più evidenti nei processi automatici di ricostruzione basati su una minore ridondanza delle immagini. Il maggiore numero di osservazioni consente infatti di migliorare la capacità del modello di ricostruire correttamente sia la geometria complessiva sia i dettagli locali.
Le metodologie adottate, oltre a garantire la massima accuratezza metrica, hanno in sostanza dato luogo ad un'ottimizzazione dei prodotti aerofotogrammetrici per la restituzione cartografica automatica mediante IA che, come noto, operano su informazioni geometriche e radiometriche con la qualità del dato di ingresso che influenza direttamente la capacità del sistema di riconoscere, interpretare e ricostruire correttamente gli elementi territoriali.
Il risultato è un dataset nel quale qualità radiometrica, accuratezza geometrica e capacità di conservazione del dettaglio sono state considerate come componenti integrate dello stesso processo, con l'obiettivo finale di ottenere una cartografia automatizzata caratterizzata dal miglior livello possibile di affidabilità e dettaglio.

Soluzione metodologica basata sull'AI

Per raggiungere lo scopo prefissato dal Capitolato, è stata adottata una procedura metodologica basata sull'algoritmo di machine learning non supervisionato *k-means*, applicato a uno stack multispettrale e altimetrico a 5 bande. Il pacchetto di input (stack) integra i tre canali del visibile (Rosso, Verde, Blu), la banda dell'Infrarosso Vicino (NIR) e la quota derivata dal Modello Digitale della Superficie (DSM). Per garantire l'omogeneità computazionale ed evitare che la differente scala metrica del DSM distorca il calcolo delle distanze euclidee dell'algoritmo, tutte le bande sono state ricampionate sulla medesima griglia geografica e sottoposte a un riscalamento lineare dei valori di intensità nell'intervallo 0–255 (profondità di radiometria a 8 bit). Tale normalizzazione assicura pari peso statistico a ciascun layer informativo [6].
Per superare i limiti tipici della segmentazione puramente spettrale — che fatica a distinguere oggetti con firma ottica analoga ma differente natura geometrica e altimetrica (es. coperture edili e pavimentazioni stradali, oppure chiome arboree e prati) — il processo di clusterizzazione è stato vincolato da un'analisi spaziale dei gradienti:

1. Estrazione del massimo gradiente [7]: Mediante un filtro di convoluzione spaziale (operatore di Sobel 3×3) applicato alle singole bande, è stata calcolata la variazione locale di intensità dei pixel. Dall'inviluppo dei risultati è stato estratto il valore di massimo gradiente multicanale.

2. Generazione della maschera: Applicando una soglia opportuna, i pixel caratterizzati da elevata discontinuità spettrale e altimetrica sono stati isolati per comporre una maschera dei bordi.
3. Clusterizzazione vincolata (*k-means*): Ciascun pixel, rappresentato da un vettore a 5 dimensioni, è stato raggruppato tramite l'algoritmo *k-means*. La maschera di discontinuità agisce da vincolo topologico interrompendo la continuità dei cluster: in questo modo aree spettralmente omogenee, ma separate da marcate variazioni di quota o di riflettanza, vengono suddivise in segmenti spazialmente distinti e geometricamente coerenti.

Dalla fase di segmentazione non supervisionata si sono ottenuti aggregati di pixel (cluster) privi di significato semantico diretto. Il passaggio dai segmenti alle classi tematiche definitive dell'aggiornamento cartografico è avenuto attraverso una fase di classificazione e contestualizzazione supervisionata, in cui le caratteristiche spettrali e altimetriche medie dei singoli segmenti sono state confrontate con firme di riferimento e validate dall'operatore (o incrociate con banche dati ausiliarie) per l'attribuzione della classe corrispondente.

Verifiche di conformità

Nel corso dello svolgimento del servizio vi sono state numerose verifiche intermedie dei prodotti cartografici in fase di realizzazione con frequenti occasioni di confronto tra la Stazione Appaltante e le Imprese, sia attraverso la modalità della videoconferenza sia con l'esecuzione di verifiche in campagna. Tanto in corso d'opera quanto a conclusione delle attività, sono stati oggetto di verifica di rispondenza alle prescrizioni del capitolato i fotogrammi realizzati (con verifica della sovrapposizione longitudinale e trasversale, e del rispetto del GSD prescritto), l'ortofoto prodotta, le misure topografiche associate, la rispondenza della cartografia derivata attraverso procedure semiautomatiche dalle riprese aerofotogrammetriche. Le attività hanno incluso anche le verifiche metriche, effettuate tramite rilievi speditivi eseguiti in quattro diverse campagne tra l'autunno del 2025 e l'estate del 2026 con l'individuazione di 46 zone campione per complessivi 2598 punti campione. Tutte le verifiche eseguite hanno dato esito positivo, come da Certificato di Regolare Esecuzione emesso il 7 ottobre del 2026. Una particolare attenzione è stata dedicata ai prodotti vettoriali ottenuti con le procedure descritte in precedenza; i controlli sono stati molto frequenti e hanno contemplato verifiche a campione dapprima su successivi stralci di consegna, poi sull'intero materiale trasmesso dalle Imprese. Lo sviluppo temporale delle verifiche, che si sono orientate a valutare la correttezza dell'effettivo contenuto informativo e geometrico dei dataset, è stato particolarmente virtuoso proprio per la positiva dialettica che si è instaurata tra la Stazione Appaltante e le Imprese; si è infatti verificato un progressivo miglioramento qualitativo nelle procedure adottate con conseguente ampio miglioramento della qualità dei prodotti.

Le analisi hanno interessato tutti i livelli informativi oggetto del servizio e hanno fornito esiti soddisfacenti; in particolare si evidenzia come i livelli qualitativi previsti dal capitolato siano stati ampiamente superati per il layer dell'edificato e per quello delle coperture arboree, particolarmente apprezzabili in zona urbana. Si sono segnalate

soltanto modeste criticità puntuali, trascurabili nel quadro di produzione complessivo, e situazioni di complessità interpretativa, peraltro tipiche anche di altre tecniche di produzione, nei centri urbani densi e specialmente nei centri storici.
Le immagini che seguono offrono alcuni esempi circa la qualità della rappresentazione ottenuta sull'intero territorio oggetto del servizio.

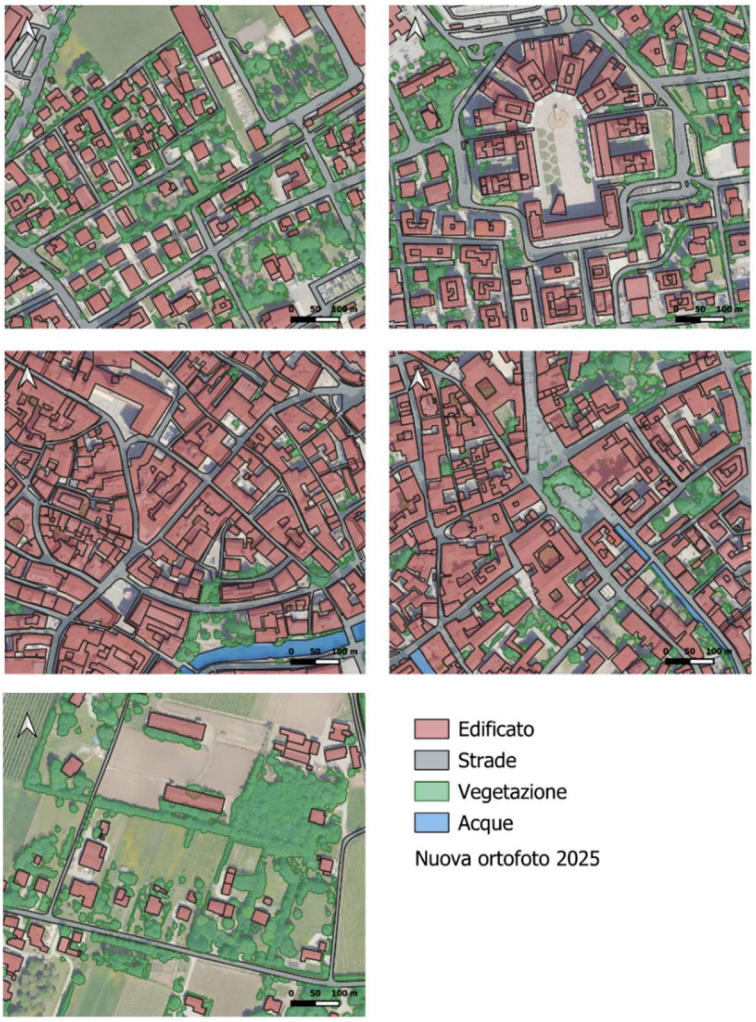


Fig. 2. Esempi dei prodotti cartografici finali: livelli vettoriali derivati sovrapposti alla base ortofoto 2025 (Treviso).

Conclusioni

La valutazione degli esiti del percorso effettuato parte dagli aspetti di natura tecnica, che hanno evidenziato come l'elevata qualità delle riprese aerofotogrammetriche comporti non solo un miglioramento dei prodotti ottenuti in modo diretto, ma costituisca

un fattore determinante per poter applicare con successo metodologie basate sull'Intelligenza Artificiale. A proposito di quest'ultima si evidenzia come l'uso combinato di quota e maschera di gradiente consenta di generare segmenti con bordi aderenti alle discontinuità reali, riducendo la fusione tra classi spettralmente affini. Il metodo richiede solo due parametri (k - numero di cluster e T - soglia). La metodologia si è rivelata particolarmente efficace nell'acquisizione della vegetazione e dell'edificato. Per le acque e la viabilità la componente del massimo gradiente influisce sulla segmentazione in modo inferiore, rischiando talvolta di introdurre rumorosità nel dato. Per tale ragione nell'estrazione di queste classi si è attribuito un peso maggiore alla componente *k-means* al fine di ottimizzare il risultato finale.
Sul piano strategico, si rileva, anche rispetto alle esperienze precedenti, una marcata crescita qualitativa negli esiti di queste procedure a carattere fortemente innovativo; ciò, in virtù della crescente maturità tecnologica di queste soluzioni, rafforza l'indirizzo di adottare tali metodologie per aggiornare speditivamente anche le cartografie di base per scale nominali non superiori a 1:5000. La conseguenza diretta è la prospettiva di un'oggettiva sensibile riduzione dei costi di produzione, valutabile pari a un ordine di grandezza, in ragione del minor intervento di operatori esperti che restano, al momento, indispensabili per la produzione di cartografie a scale superiori. Pare infine opportuno sottolineare come, trattandosi di dinamiche in costante evoluzione, siano da prendere in considerazione anche specifiche prescrizioni in modo da modulare livelli di attenzione diversi in ragione delle differenti caratteristiche dei territori da rilevare. A titolo di esempio, si può citare la necessità di prevedere operazioni di ricognizione in campagna nei centri storici, oppure di eseguire fasi di editing più spinte in casi di specifiche criticità.

Riferimenti bibliografici

1. Li, W. (2021). GeoAI and Deep Learning. In International Encyclopedia of Geography (eds D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu and R.A. Marston). https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg2083.
2. Li, W., Batty, M., Goodchild, M. F., Hu, Y., Gao, S., Wang, S., & Zhang, F. (2024). GeoAI for Science and the Science of GeoAI. Journal of Spatial Information Science, (29), 1–17. https://doi.org/10.5311/JOSIS.2024.29.384.
3. Magnabosco L., Masetto C., Trivelloni U., Cima V.: Analisi comparativa di metodologie per l'aggiornamento speditivo di cartografie di base alle scale 1:5000 e 1:2000. Atti della 27ª Conferenza ASITA (2024).
4. Olivucci S., Nerieri M., Ruggieri G., Romani M., Ceresini S. e Gentili G. (2019) Il nuovo strato Edificato da tecniche "deep learning" come fonte per l'aggiornamento del Database Topografico e per il monitoraggio del consumo di suolo. ATTI ASITA 2019
5. Ciarapica A., Trivelloni U., Cima V., Mazzi C., Milan P. (2018) Preparazione di modelli di capitolato per le varie tipologie di rilevamento. ATTI ASITA 2018
6. MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol. 1, pp. 281–297. University of California Press, Berkeley (1967).
7. Gonzalez, R.C., Woods, R.E.: Digital Image Processing. 4a ed. Pearson, New York (2018).

Monitoraggio ed evoluzione dell'uso del suolo in Emilia-Romagna: aggiornamento e ambiti dal 1976-1978 al 2023

Sara Masi[1], Daniele Lenzi[2], Stefano Olivucci[3], Marco Li Pera[3]

[1] masi.sara@gmail.com
[2] daniele.lenzi.biologo@gmail.com
[3] Regione Emilia-Romagna, Settore Innovazione digitale, dati, tecnologia e polo archivistico, stefano.olivucci@regione.emilia-romagna.it, marco.lipera@regione.emilia-romagna.it

Abstract. A partire dagli anni Settanta, le informazioni relative all'uso del suolo rappresentano una delle basi dati geografiche regionali più richieste e impiegate da Enti Locali e professionisti del settore. Per rispondere in modo adeguato alle esigenze conoscitive connesse alla pianificazione urbanistica e, in particolare, al monitoraggio del consumo e impermeabilizzazione di suolo, il database Uso del Suolo 2023 è stato realizzato con le medesime caratteristiche in continuità con le versioni precedenti; il territorio regionale risulta così interamente coperto dai seguenti database riferiti agli anni: 1976-78, 1994, 2003, 2008, 2014 e 2017, 2020 e 2023.

La realizzazione dei database dell'Uso del Suolo si basa sulle specifiche europee del progetto Corine Land Cover, dalle quali sono stati derivati i primi tre livelli. Il quarto livello descrive invece le categorie di maggiore dettaglio, in gran parte definite dal Gruppo di Lavoro Uso del Suolo, attivo negli anni passati nell'ambito del CPSG-CISIS. La legenda comprende complessivamente 90 categorie di uso del suolo, individuate con un'area minima di 0,16 ettari.

Il confronto fra i database ha permesso di evidenziare le dinamiche di trasformazione dell'uso del suolo in Emilia-Romagna, sia in riferimento alle macrocategorie del primo livello, sia a quelle dei livelli di maggior dettaglio e di caratterizzare i cambiamenti in questi anni di grande espansione socio-economica negli ambiti di particolare interesse utili alla pianificazione come ad esempio, lo sviluppo delle aree urbane e produttive, le dinamiche agricole nelle zone di pianura e collina, l'evoluzione degli alvei fluviali, dei boschi e delle aree naturali in montagna.

La disponibilità di questi database ha consentito inoltre di elaborare indici di impermeabilizzazione che, applicati ai database di dettaglio dell'uso del suolo, permettono di stimare automaticamente con buona precisione le superfici impermeabilizzate presenti nei diversi ambiti territoriali. Gli indici sono stati realizzati per i database di uso del suolo di dettaglio riferiti agli anni 1976-78, 2008/2014, 2017 e 2023.

Parole chiave: Uso del suolo, Consumo di suolo, Indici di impermeabilizzazione, Regione Emilia-Romagna, Corine Land Cover, Monitoraggio, Aggiornamento, Dinamiche di trasformazione, Pianificazione urbanistica, Database geografici, Analisi multitemporale.

1 Materiali e metodi

La metodologia presentata in questo lavoro si inserisce nel solco degli sviluppi già discussi e validati in occasione della Conferenza Nazionale ASITA di Padova 2024 [1]. Il presente contributo si propone di adottare e consolidare tale impianto metodologico,

approfondendone l'applicazione pratica attraverso la definizione degli ambiti e degli indici di impermeabilizzazione e aggiungendo i dati del 2023 alle elaborazioni.

Per la realizzazione dei database uso del suolo di dettaglio sono state utilizzate come riferimento le specifiche europee del progetto Corine Land Cover (CLC) [2] da cui sono stati derivati i primi tre livelli. Nel quarto livello [3] sono poi rappresentate le categorie di dettaglio, in gran parte definite dal Gruppo di Lavoro Uso del Suolo che ha operato negli anni passati nell'ambito del CPSG-CISIS, utilizzando un'area minima di grande dettaglio di 0,16 ettari e una dimensione minima di 7 metri per gli elementi a sviluppo lineare come reti stradali e ferroviarie, corsi d'acqua e canali, per un totale di 90 categorie di legenda di uso del suolo [4].

Questa metodologia ha permesso quindi di mantenere la confrontabilità e omogeneità nei vari set in un lungo intervallo temporale che va dal 1976-78 al 2023. Le ortofoto utilizzate per la produzione dei database di uso del suolo di dettaglio sono illustrate nella tabella 1.

Tabella 1. Immagini utilizzate per la produzione dei database di uso del suolo di dettaglio [5].

Set	Anni di ripresa	Caratteristiche
1976-78	1970-1978 per il territorio regionale e per i Comuni di Montecopiolo e Sassofeltrio 1977-79	a colori con pixel di 30cm, scala 1: 13.000 Montecopiolo e Sassofeltrio B/N alla scala 1:10.000
1994	Volo Italia 1994	pancromatiche B/N scala 1:25.000
2003	Quickbird 2003	immagini satellitari pancromatiche con pixel 60 cm
2008	AGEA 2008, AGEA 2007 per la Valmarecchia	a colori ed infrarosso con pixel 50 cm, a colori per la zona della Valmarecchia
2014	TeA 2014	a colori e infrarosso con pixel 50 cm
2017	TeA 2017	a colori e infrarosso con pixel 20 cm
2020	AGEA 2020	a colori e infrarosso con pixel 20 cm
2023	AGEA 2023	a colori e infrarosso con pixel 20 cm

2 Risultati

Il confronto tra i database dell'uso del suolo di dettaglio restituisce un'immagine continuativa delle trasformazioni del paesaggio dell'Emilia-Romagna dalla fine degli anni Settanta ad oggi. Questo rende possibile evidenziare le dinamiche di trasformazione dell'uso del suolo, sia in riferimento alle macrocategorie del primo livello, sia a quelle dei livelli di maggior dettaglio e di caratterizzare i cambiamenti in questi anni di grande espansione socio-economica negli ambiti di particolare interesse utili alla pianificazione. Tutti i dati nel dettaglio sono disponibili sul Geoportale della Regione Emilia-Romagna [6].

Tabella 2. Accorpamento al primo livello dei dati del database di uso del suolo di dettaglio

	% superficie regionale							
Livelli	**1976**	**1994**	**2003**	**2008**	**2014**	**2017**	**2020**	**2023**
1 Territori modellati artificialmente	8,2	10,2	11,1	11,7	12,1	12,2	12,3	12,4
2 Territori agricoli	62,2	56,6	55,1	54,3	53,9	53,6	53,3	53,0
3 Territori boscati e ambienti seminaturali	25,8	29,3	29,7	29,9	30,0	30,2	30,3	30,5
4 Ambiente umido	0,96	1,00	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16
5 Ambiente delle acque	2,82	2,88	2,89	2,90	2,91	2,96	2,98	2,99

La distribuzione percentuale della copertura regionale di tutte le novanta categorie di dettaglio negli anni considerati è rappresentata in Figura 1.

Il confronto tra i database di dettaglio dell'uso del suolo offre una ricostruzione continua delle trasformazioni del paesaggio in Emilia-Romagna dalla fine degli anni Settanta a oggi. Questa analisi consente di evidenziare le dinamiche evolutive del territorio, operando sia a livello di macrocategorie sia di ambiti territoriali utili alla pianificazione.

Questo set di dati ha permesso infatti un monitoraggio costante del territorio e la produzione di specifici indici di impermeabilizzazione, configurandosi come uno strumento fondamentale per la pianificazione territoriale.

3 Conclusioni

Il confronto tra i database di dettaglio dell'uso del suolo offre una ricostruzione continua delle trasformazioni del paesaggio in Emilia-Romagna dalla fine degli anni Settanta a oggi. Questa analisi consente, da un lato, di monitorare le dinamiche evolutive del territorio — operando sia a livello di macrocategorie sia di ambiti territoriali utili alla pianificazione — e, dall'altro, la possibilità di produrre specifici indici di impermeabilizzazione, configurandosi come uno strumento fondamentale per la pianificazione territoriale.

3.1 Monitoraggio

Da questi confronti emergono importanti variazioni: i territori artificializzati registrano un considerevole incremento passando dall'8,2% della superficie regionale nel 1976-78 al 12,4% nel 2023. È da notare un'importante decelerazione di questo incremento già a partire dal 2008 ma soprattutto nei periodi successivi. Ciò riflette gli sforzi della Regione Emilia-Romagna nel limitare il consumo del suolo, con il monitoraggio iniziato già dal 2008 [7] e l'applicazione della legge regionale n.24/2017 "Disciplina sulla tutela e l'uso del territorio" [8]. I territori agricoli subiscono una riduzione passando dal 62,2% nel 1976-78 al 53,0% nel 2023. I territori boscati aumentano passando dal 25,8% nel 1976-78 raggiungendo il 30,5% nel 2023. Gli ambienti umidi e gli ambienti delle acque seguono lo stesso andamento di crescita degli ambienti boscati e seminaturali anche se con variazioni più contenute.

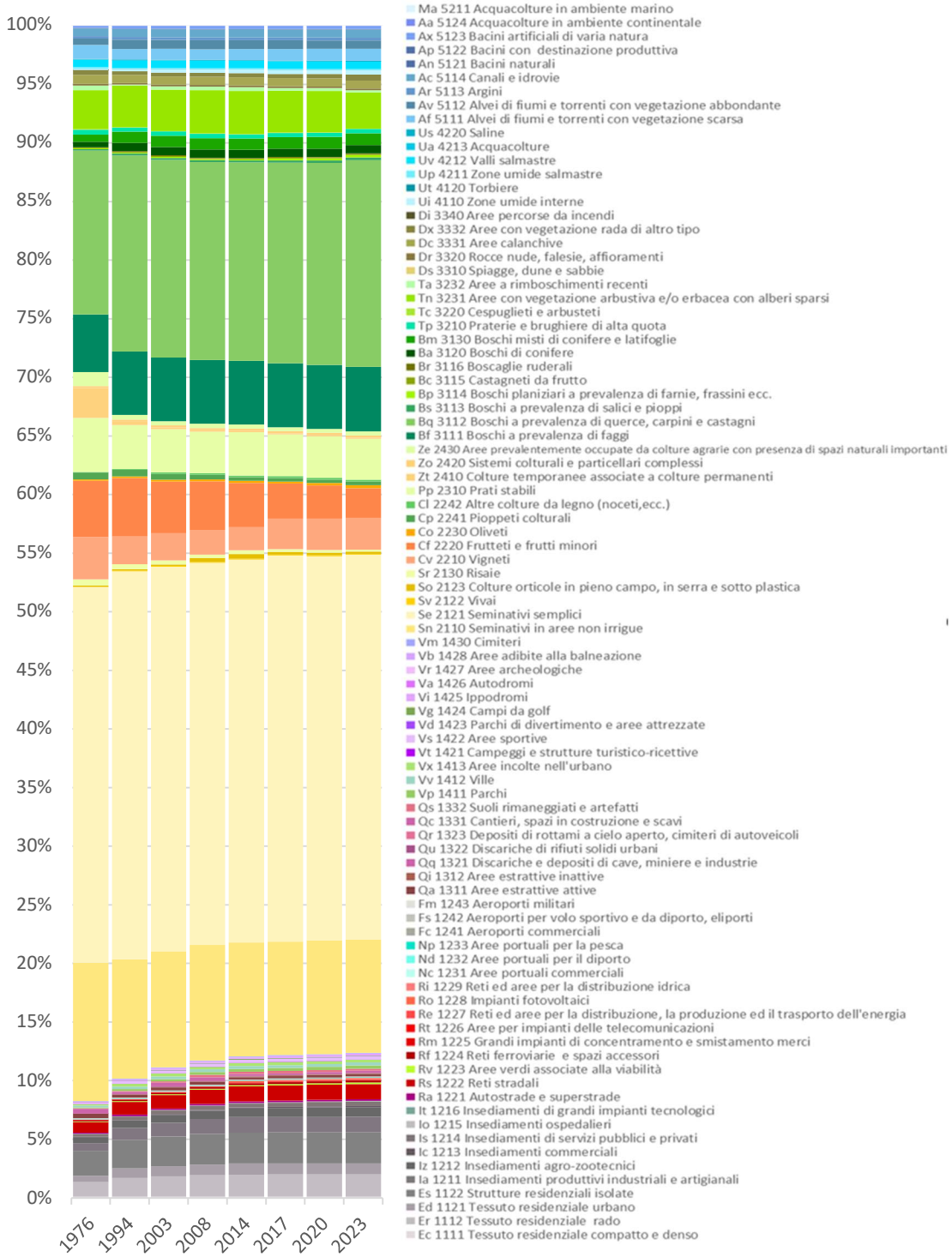


Fig. 1. Grafico della distribuzione percentuale della copertura delle 90 categorie di uso del suolo di dettaglio (livello IV) nei database analizzati.

Alcuni ambiti risultano avere dinamiche di particolare interesse:
Zone residenziali e insediamenti industriali e commerciali. Le categorie relative alle zone residenziali e agli insediamenti industriali e commerciali registrano una forte crescita principalmente nel periodo tra il 1976-78 e il 1994 continuando con notevoli incrementi fino al 2008 per poi rallentare la crescita.

Nell'ultimo intervallo di tempo questo ambito mostra una fase di stabilità anche se gli Insediamenti commerciali (1.2.1.3) registrano un nuovo lieve incremento.

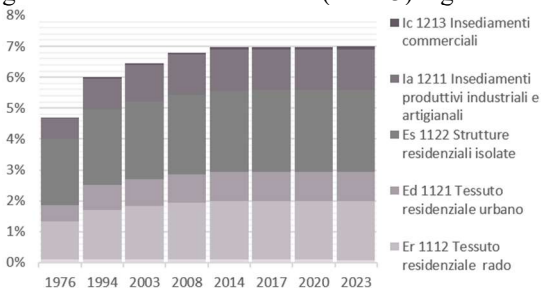


Fig. 2. Grafico della distribuzione percentuale dell'ambito delle Zone residenziali e insediamenti industriali e commerciali nei database analizzati.

Infrastrutture e servizi. Questo ambito individua le infrastrutture e i servizi associati alle aree urbane e industriali: cimiteri, aree sportive, parchi urbani, discariche, reti idriche, impianti fotovoltaici, aree per la gestione dell'energia e delle telecomunicazioni, impianti di smistamento merci, impianti tecnologici e ospedalieri e insediamenti di servizi. Si può notare come la quantità e la composizione di queste categorie rappresenti una situazione socio-economica destinata a cambiare notevolmente nel periodo analizzato: nel 1976-78 sono totalmente assenti gli impianti fotovoltaici e la presenza di discariche di rifiuti solidi urbani e di depuratori è minima. Le aree per la distribuzione di energia, idrica, delle comunicazioni, delle merci e gli ospedali risultano poco rilevanti in termini percentuali mentre i servizi, i parchi, le aree sportive e i cimiteri risultano presenti con discrete percentuali.

Osservando i dati si nota come vi sia un forte incremento di tutte queste categorie fino al 2023 con un ulteriore accelerazione dal 2008, anno in cui si rilevano i primi impianti fotovoltaici in Regione. In particolare, il recente incremento degli impianti di smistamento merci riflette l'evoluzione dei poli logistici legati alla grande distribuzione e al commercio on-line.

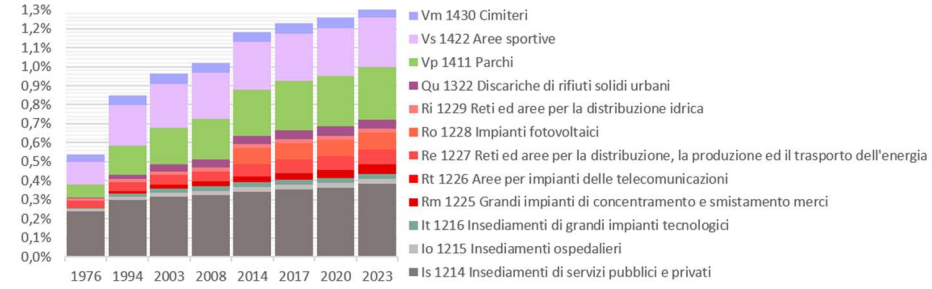


Fig. 3. Grafico della distribuzione percentuale dell'ambito delle Infrastrutture e servizi nei database analizzati.

Reti stradali e ferroviarie. L'analisi dei dati di copertura percentuale associati a questo ambito documenta anch'essa la grande accelerazione dello sviluppo socio-economico dagli anni Settanta fino al 2014, anno in cui si è completata la costruzione della ferrovia Alta Velocità Milano-Bologna-Roma e dell'autostrada A1 "Variante di Valico". Negli anni successivi la crescita delle reti è molto più contenuta.

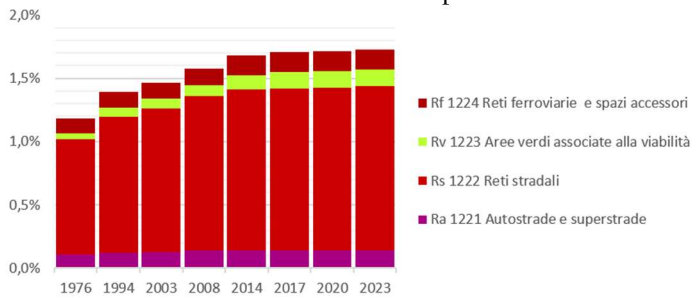


Fig. 4. Grafico della distribuzione percentuale dell'ambito delle Reti stradali e ferroviarie nei database analizzati.

Cantieri e cave. Questo ambito è naturalmente legato ai precedenti, si osserva nel 1976-78 la percentuale più elevata di cave e cantieri a sottolineare il boom economico in corso in quegli anni. Negli anni successivi si rileva una presenza variabile di queste categorie di legenda con picchi tra il 2003 e 2008. Negli ultimi intervalli si registra un nuovo trend di crescita a partire dal 2017 fino al 2023.

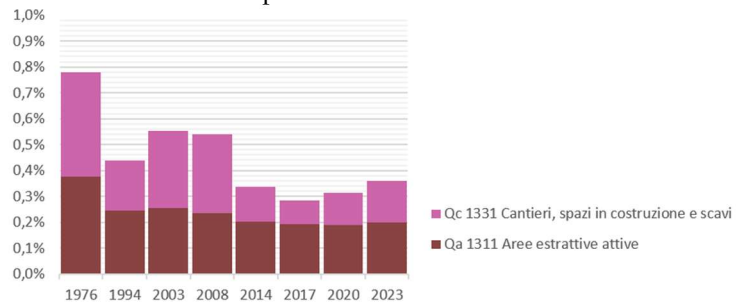


Fig. 5. Grafico della distribuzione percentuale dell'ambito delle Cave e dei cantieri nei database analizzati.

Colture permanenti. Nel 1976-78, un buon contributo percentuale era fornito dalla "piantata emiliana", elemento caratteristico del paesaggio padano oltre che componente fondamentale dell'economia rurale dall'epoca etrusca fino alla Seconda Guerra mondiale [9]. La piantata ricade nella voce "colture temporanee associate a colture permanenti" (2.4.1.0), dai dati si può osservare un brusco calo da 2,54% a 0,27% nel 1994 per poi continuare a diminuire fino allo 0,11% del 2023. I vigneti (2.2.1.0) calano in modo rilevante dal 1976-78 (3,62%) fino al 1994 (2,36%) toccando il minimo nel 2014 (1,95%), i dati del 2023 confermano una ripresa costante a partire dal 2017 fino al 2,71%. I frutteti (2.2.2.0) registrano un calo continuo durante tutto il periodo analizzato passando dal 4,79% del 1976-78 al 2,54% del 2023, facendo registrare quasi un dimezzamento della superficie coltivata nel periodo considerato.

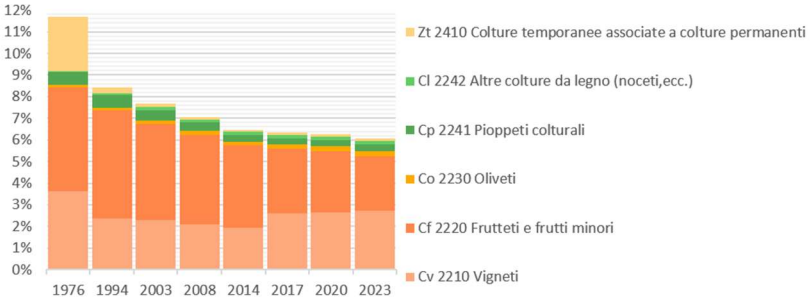


Fig. 6. Grafico della distribuzione percentuale dell'ambito delle Colture permanenti nei database analizzati.

Collina e montagna. In questo ambito emerge la dinamica della trasformazione della collina e della montagna che nel 1976-78 era ancora caratterizzata dallo sfruttamento ad uso agricolo, pratica che però nel corso degli anni è stata abbandonata permettendo la rinaturalizzazione del territorio. I seminativi di collina (2.1.1.0) calano dal 11,80% del 1976-78 al 9,64% del 2023. Anche i prati e i pascoli (2.3.1.0) che sono caratteristici del territorio di collina calano passando dal 4,61% del 1976-78 al 3,49% del 2023. Al contrario i boschi di querce (3.1.1.2) aumentano passando dal 13,97% del 1976-78 al 17,63% del 2023.



Fig. 7. Grafico della distribuzione percentuale dell'ambito della Collina e montagna nei database analizzati.

3.2 Indici di impermeabilizzazione

Al fine di monitorare nel tempo le superfici impermeabilizzate presenti nella Regione Emilia-Romagna, sono stati calcolati nuovi indici di impermeabilizzazione applicabili ai diversi database relativi all'uso del suolo degli anni 1976-78, 2008-14, 2017 e 2023, in continuazione con la metodologia decritta alla Conferenza Nazionale ASITA 2018 [10]. L'applicazione degli indici di impermeabilizzazione consente il calcolo automatico delle superfici impermeabilizzate per ciascuna categoria di uso del suolo, nonché a livello di macrocategorie e a livello regionale. È inoltre possibile effettuare rapidamente tale analisi su vari contesti territoriali quali Provincia, Comune, comunità montana, bacino, fascia altitudinale e ambito paesaggistico. Questi indici rappresentano

uno strumento efficace a sostegno della nuova legge urbanistica per il contenimento di consumo del suolo.

Dall'applicazione degli indici all'intera superficie regionale si ottengono le stime di superfici impermeabilizzate nell'intero periodo rappresentate nell'immagine seguente:

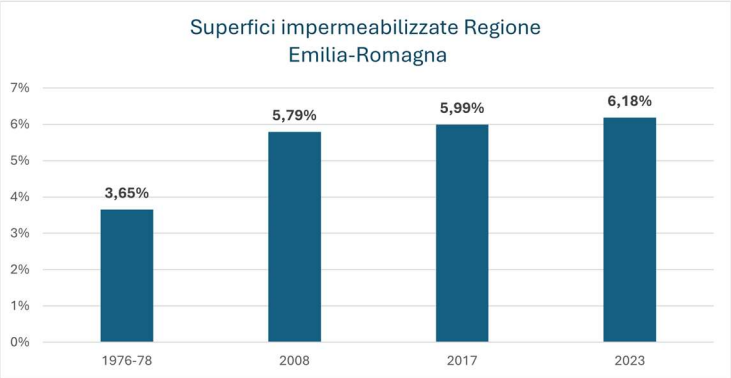


Fig. 7. Superficie impermeabilizzata della Regione Emilia-Romagna riferita al 1976-78, 2008, 2017 e 2023.

Riferimenti bibliografici

1. Masi S. Lenzi D., Garberi M. L., Olivucci S. (2024) Uso del suolo: 44 anni di evoluzione del territorio della Regione Emilia-Romagna. Atti della Conferenza ASITA, Padova 9-13 dicembre 2024, 385-392.
2. European Environmental Agency - European Topic Center - Terrestrial Environment. (2002) Corine land Cover update. I&CLC2000 project. Technical Guidelines. European Environmental Agency.
3. Bologna S., Chirici G., Corona P., Marchetti M., Pugliese A., Munafò M. (2004) Sviluppo e implementazione del IV livello Corine Land Cover 2000 per i territori boscati e ambienti seminaturali in Italia. Atti della 8° Conferenza Nazionale ASITA, Roma, 1: 467-472.
4. Bocci M., Corticelli S., Garberi M.L., Mariani M.C., Masi S., Volpi V. (2018) I nuovi database di dettaglio dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna. Atti 22° Conferenza Nazionale ASITA, 27 – 29 novembre 2018, Bolzano, 179-188.
5. Monaldi et al. (2008) Collaborazione tra AGEA e Regione Emilia-Romagna per la definizione, realizzazione e validazione di "Ortofoto multifunzione" Atti della 12° Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 1511-1516.
6. Regione Emilia-Romagna, Geoportale, https://geoportale.regionale.emilia-romagna.it/approfondimenti/database-uso-del-suolo, ultimo accesso 15/10/2026.
7. Monti C., Tondelli S., Conticelli E, (2008), Analisi delle dinamiche territoriali, Regione Emilia-Romagna, Servizio Pianificazione urbanistica, paesaggio e uso sostenibile del territorio.
8. Regione Emilia-Romagna (2017) Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio, Legge n. 24 del 21 dicembre 2017.
9. Sarti A. (2018) "La piantata, l'antico matrimonio tra la vite e l'albero", Taccuino agricolo.
10. Corticelli S., Mariani M.C., Masi S. (2018), Indici di impermeabilizzazione calcolati dai DB uso del suolo di dettaglio 2008-2014 della Regione Emilia-Romagna. Atti della 22ª Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 27-29 novembre 2018, 393-40.

Segmentazione semantica neuro-simbolica di nuvole di punti per il patrimonio architettonico mediante Logic Tensor Network

Francesca Matrone[1*] [0000-0002-9160-1674], Shuming Si[2] [0009-0005-2347-5580], Fabio Gigante[2], Francesco Manigrasso[2] [0000-0002-4151-8880], Lia Morra[2] [0000-0003-2122-7178]

[1] Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, francesca.matrone@polito.it
[2] Dipartimento di Automatica e Informatica (DAUIN), Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, (shumin.si, francesco.manigrasso, lia.morra)@polito.it

1 Introduzione

La segmentazione semantica delle nuvole di punti rappresenta un passaggio fondamentale per la documentazione digitale del patrimonio architettonico e per lo sviluppo di processi automatizzati scan-to-HBIM. Sebbene le recenti tecniche di Deep Learning abbiano migliorato significativamente il riconoscimento degli elementi architettonici, permangono criticità legate alla complessità geometrica, alla somiglianza tra categorie semantiche e allo sbilanciamento delle classi nei dataset di addestramento. Inoltre, gli approcci esclusivamente neurali apprendono implicitamente le relazioni architettoniche, senza sfruttare direttamente conoscenze geometriche e spaziali esplicite o regole logiche. Il presente lavoro propone un approccio neuro-simbolico che integra Deep Learning e logica differenziabile per migliorare l'accuratezza e la coerenza della segmentazione semantica del patrimonio costruito.

2 Metodologia

L'approccio proposto, denominato PTv3-LTN, combina Point Transformer V3 (PTv3) [1], utilizzato per la classificazione semantica dei punti, con le Logic Tensor Networks (LTN) [2], che consentono di integrare conoscenze architettoniche sotto forma di regole logiche differenziabili durante l'addestramento. Le regole sono definite mediante quattro descrittori geometrici locali (omnivarianza, variazione superficiale, planarità e verticalità) e comprendono vincoli puntuali (*pointwise*), relativi alla compatibilità tra geometria e classi semantiche, e relazionali (*pairwise*), basati sulle proprietà geometriche e spaziali di punti vicini. Per limitare fenomeni di *shortcut learning* sono introdotti meccanismi di regolarizzazione dell'entropia e ricostruzione degli attributi geometrici. L'addestramento prevede due fasi: una prima ottimizzazione con 20 regole candidate e una successiva selezione delle 10 più idonee, utilizzate nella seconda fase. La sperimentazione è condotta sul benchmark ArCH, considerando dieci classi semantiche e due scene di test relative al Sacro Monte di Varallo (SMV) e al Sacro Monte di Ghiffa (SMG).

3 Risultati

Il confronto con la baseline PTv3 evidenzia un miglioramento complessivo delle prestazioni mediante l'integrazione delle LTN (Fig. 1). Considerando congiuntamente le due scene di test, la *mean Intersection over Union* (mIoU) aumenta dal 65,89% al 67,64% (+1,75 punti percentuali), mentre la *mean Accuracy* passa dal 76,28% al 78,35% e l'*Overall Accuracy* dall'85,79% all'87,03%. I miglioramenti della mIoU risultano più marcati nella scena SMV (+1,92 punti) rispetto alla SMG (+0,48 punti). L'analisi per classe mostra incrementi particolarmente significativi per pavimenti (+4,62 punti), archi (+3,52) e categoria other (+2,80). Il confronto visivo evidenzia inoltre una migliore identificazione di modanature, archi e altri elementi architettonici complessi, nonché una maggiore precisione nella delimitazione della linea di demarcazione tra superfici quali muri e volte. Permangono tuttavia difficoltà nella classificazione di alcuni elementi decorativi e porzioni delle coperture. Nel complesso, i risultati confermano le potenzialità dell'approccio neuro-simbolico nell'integrare esplicitamente conoscenze architettoniche nei modelli di Deep Learning, oltre a supportare la classificazione di elementi (annotati nella classe "other") scarsamente rappresentati nelle scene di addestramento, come grondaie e balaustre.

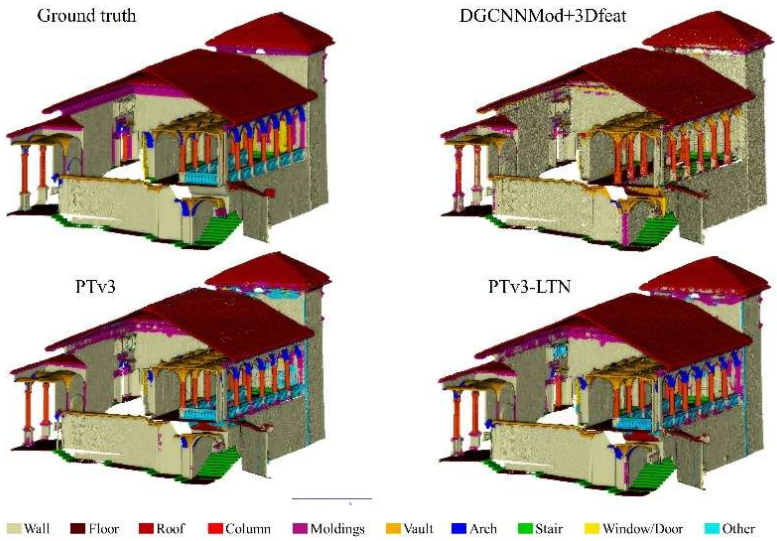


Figura 1. Confronto tra la *ground truth* e le nuvole di punti predette.

Riferimenti bibliografici

1. Wu, X., Jiang, L., Wang, P.-S., Liu, Z., Liu, X., Qiao, Y., Ouyang, W., He, T., & Zhao, H.. Point Transformer V3: Simpler, Faster, Stronger. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 4840–4851 (2024).
2. Badreddine, S., Garcez, A. d'Avila, Serafini, L., & Spranger, M.. Logic Tensor Networks. Artificial Intelligence, 303, 103649 (2022).

GeoAI per la temperatura dell'aria in ambiente urbano: Random Forest multi-scala e SHAP su osservazioni MeteoTracker a Roma

Mattia Niccoli[1], Costanza Borghi[1,*], Elia Vangi[1], Giovanni D'Amico[1], Gioele Tiberi[2], Andrea Cecilia[3], Lorenzo Marinelli[3], Giampietro Casasanta[3], Juri Iurato[4], Stefania Argentini[3] e Gherardo Chirici[1,5]

[1] Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Via San Bonaventura 13, 50145 Firenze; mattia.niccoli@unifi.it, costanza.borghi@unifi.it, elia.vangi@unifi.it, giovanni.damico@unifi.it, gherardo.chirici@unifi.it

[2] Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura (DIDA), Via della Mattonaia 8, 50121 Firenze; gioele.tiberi@unifi.it

[3] Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Via Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma; andrea.cecilia@artov.isac.cnr.it, lorenzomarinelli@cnr.it, giampietro.casasanta@cnr.it, stefania.argentini@cnr.it

[4] Iotopon S.r.l., 09126 Cagliari; juri.iur@gmail.com

[5] Fondazione per il Futuro delle Città, Via Sardegna 49, 00187 Roma

[*] Autore corrispondente: costanza.borghi@unifi.it

Abstract. Oltre un milione di misure di temperatura dell'aria da sensori MeteoTracker su autobus (Roma, agosto 2024) sono analizzate con un flusso GeoAI: 140 predittori su buffer di 50–10.000 m, Random Forest orari validati con blocchi spaziali e interpretati con SHAP. Per ogni fattore emergono scala, ora e contributo in °C: impermeabilizzazione di notte a 1000–5000 m (2–2,4 °C), vegetazione e acqua di giorno a 2500–10.000 m (fino a circa 1 °C), distanza dal mare, di segno opposto tra notte e pomeriggio.

Parole chiave: GeoAI, Intelligenza artificiale interpretabile, Random Forest, SHAP, Sensori mobili, Isola di calore urbana.

1 Introduzione

La temperatura dell'aria (Tair) è la grandezza più direttamente legata al comfort termico e ai rischi per la salute in città, ma è difficile osservarla con la densità necessaria a descrivere l'isola di calore urbana (UHI) [1, 2]. Per misurare la Tair vengono solitamente utilizzate reti di stazioni fisse, spesso troppo rade o di qualità non controllata per descrivere la variabilità interna alla città a scala fine [3]. I sensori mobili, come i MeteoTracker (MT) montati sui mezzi pubblici, producono invece grandi quantità di osservazioni georeferenziate ad alta risoluzione spazio-temporale [4, 5]. Si tratta di dati eterogenei e difficili da trattare con i metodi tradizionali di analisi spaziale,

che si prestano invece ad approcci di intelligenza artificiale geospaziale (GeoAI) [6, 7], applicati all'analisi dell'isola di calore [8].

Il legame tra Tair e ambiente urbano cambia con la scala spaziale e con l'ora del giorno. I materiali impermeabili rilasciano di notte il calore accumulato durante il giorno e un basso *Sky View Factor* (SVF) rallenta il raffreddamento notturno, mentre la vegetazione agisce soprattutto di giorno e mare e corpi idrici intervengono con l'inerzia termica [1, 9]. Questi processi operano a scale diverse, descritte di solito con buffer di raggio crescente attorno ai punti di misura [10], e le relazioni tra forma urbana e Tair possono non essere lineari [11]. I modelli Random Forest (RF) [12], che non richiedono ipotesi a priori, sono infatti un riferimento per la mappatura di Tair a scala molto fine [10] e, su misure mobili, hanno fornito prestazioni superiori alla regressione lineare [11].

Applicare questi modelli a misure mobili richiede però alcune cautele. Ogni osservazione combina un luogo e un'ora di acquisizione, e osservazioni consecutive distano pochi metri: la dipendenza spaziale che ne deriva porta una validazione casuale a sovrastimare le prestazioni dei modelli [13]. I predittori calcolati su buffer concentrici sono inoltre fortemente correlati, e questo rende instabile l'attribuzione dei contributi ai singoli predittori [14]. La letteratura sulla GeoAI indica poi, tra i limiti principali da superare, la scarsa attenzione alla scala spaziale e la natura di "scatola nera" dei modelli di *machine learning* [7, 8]. Su quest'ultimo punto, le *SHapley Additive exPlanations* (SHAP) [15], uno strumento dell'intelligenza artificiale interpretabile (*eXplainable AI*, XAI) [16], offrono interpretabilità ai risultati di RF e sono state applicate di recente ai fattori dell'UHI [17].

Poiché l'analisi congiunta di questi processi nello spazio e nel tempo ad alta risoluzione resta poco esplorata, il contributo propone un flusso di lavoro GeoAI multi-scala e interpretabile che affronta esplicitamente questi aspetti per capire quando e a quale scala spaziale (50–10.000 m) è più forte la relazione fra Tair, misurata a Roma nel mese di agosto 2024 (Fig. 1), e tre gruppi di fattori: (Q1) la morfologia urbana, o infrastruttura grigia; (Q2) la vegetazione, o infrastruttura verde; (Q3) il contesto geografico, cioè mare, acque interne e topografia. A strumenti di analisi *single-variable* (PCA e correlazioni) si affiancano RF orarie, validate con blocchi spaziali e interpretate con SHAP.

2 Dati e flusso di lavoro GeoAI

Il flusso di lavoro è riassunto in Fig. 2.

2.1 Osservazioni e regimi meteorologici

Quindici MT (IoTopon S.r.l.), installati su autobus ATAC nell'ambito del progetto TRAMS (ATAC S.p.A. e CNR-ISAC), hanno raccolto 1.063.267 osservazioni georeferenziate di Tair tra il 1° e il 31 agosto 2024, una ogni 5 secondi, lungo la rete stradale principale di Roma [5]. Il sensore registra solo con il mezzo in movimento e sopra i 7 km/h corregge l'errore radiativo, con un'accuratezza di ±0,3 °C [18]. Per

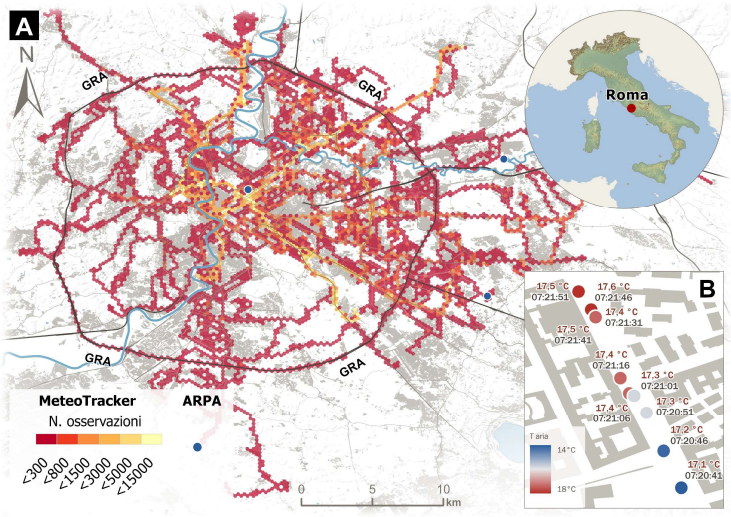


Fig. 1. (A) Densità delle osservazioni MeteoTracker raccolte a Roma nell'agosto 2024 (numero di osservazioni per esagono). Sono riportati anche il Grande Raccordo Anulare (GRA), la rete stradale principale, il reticolo idrografico e le stazioni ARPA Lazio. (B) Dettaglio di osservazioni MT lungo la rete stradale, colorate in base alla temperatura dell'aria: un esempio dell'elevata risoluzione spazio-temporale delle acquisizioni.

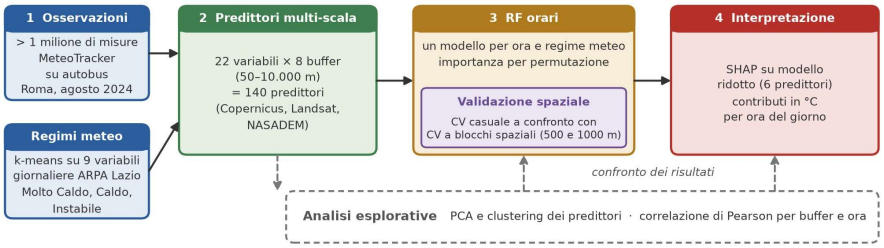


Fig. 2. Schema del flusso di lavoro: dalle osservazioni MeteoTracker e dai regimi meteorologici, attraverso i predittori geospaziali multi-scala, ai modelli Random Forest orari, verificati con la validazione spaziale e interpretati con SHAP. Le analisi esplorative (PCA e correlazione), esterne al flusso GeoAI, utilizzano gli stessi predittori e i loro risultati sono confrontati con l'importanza dei predittori nei modelli RF e con i valori SHAP.

confrontare giorni con condizioni sinottiche simili, i giorni sono stati classificati con il k-means (k = 3, *Elbow Method*) in base alle medie giornaliere standardizzate di nove variabili misurate da tre stazioni ARPA Lazio. Ne risultano tre regimi meteo: Molto Caldo (VH, 16 giorni), Caldo (H, 11) e Instabile (U, 3). I risultati riportati riguardano il regime VH, quello in cui l'UHI è più intensa [9].

Poiché i percorsi degli autobus determinano i luoghi campionati, è stata verificata la stabilità del campionamento nel corso della giornata: le mappe orarie delle osservazioni sono simili tra loro (correlazione di Spearman mediana 0,65 su una griglia di 500 m) e

gli ambienti campionati coprono la stessa gamma di condizioni urbane a tutte le ore, anche di notte, quando il servizio è ridotto. Le differenze tra i modelli orari riflettono quindi l'ora del giorno più che uno spostamento dei luoghi campionati.

2.2 Predittori geospaziali multi-scala

Per ogni osservazione MT sono state estratte 22 variabili entro otto buffer concentrici (50, 100, 200, 500, 1000, 2500, 5000 e 10.000 m) [10], per un totale di 140 predittori. Impermeabilizzazione [19], altezza degli edifici [20], Sky View Factor (SVF), copertura arborea [21], altezza degli alberi [22] e NDVI sono descritti da media e deviazione standard; superfici sigillate, forestali, erbacee e d'acqua dalla proporzione di pixel [23]. Distanza dal mare e dalle acque interne, quota, pendenza ed esposizione [24], sei bande Landsat e LST entrano invece come valori puntuali. In questo modo la scala spaziale diventa una dimensione dell'insieme dei predittori: la scala a cui ogni variabile è più informativa emerge dal modello, invece di essere fissata a priori. La letteratura GeoAI distingue i modelli *spatially explicit*, che incorporano lo spazio nella propria formulazione o nei dati di input [6, 7]. Nel flusso proposto lo spazio entra attraverso i buffer, cioè gli intorni a più scale di ciascuna osservazione MT, e attraverso la validazione a blocchi spaziali, mentre l'algoritmo RF non utilizza direttamente coordinate o relazioni di vicinato.

2.3 Analisi esplorative, modelli RF e SHAP

Come analisi esplorative, la struttura dei predittori è stata descritta con l'analisi delle componenti principali (PCA) e con il clustering gerarchico, e la correlazione di Pearson ha misurato l'associazione tra ciascun predittore e Tair per ogni buffer e ogni ora.

Per ogni ora e regime meteo è stato poi addestrato un modello RF sui 140 predittori, usando solo le osservazioni di quell'ora; l'importanza per permutazione di ciascun predittore, calcolata per ogni buffer e ogni ora, indica la scala e il momento in cui è più rilevante. Le prestazioni sono state stimate con una validazione incrociata (CV) casuale a 10 fold e con una CV a blocchi spaziali, in cui celle quadrate di 500 e 1000 m sono assegnate per intero a uno dei dieci fold, così che osservazioni vicine non finiscano sia nell'insieme di addestramento sia in quello di verifica [13].

I valori SHAP, calcolati con TreeSHAP [25], attribuiscono a ogni osservazione il contributo in °C di ciascun predittore alla Tair stimata. Poiché i buffer concentrici di una stessa variabile sono fortemente correlati [14], SHAP è stato applicato a un modello ridotto con sei predittori, ciascuno al buffer di massima importanza media e fisso nelle 24 ore: impermeabilizzazione (2500 m), SVF (5000 m), copertura arborea (5000 m), superfici d'acqua (10.000 m), distanza dal mare e quota. La scala rilevante in ogni ora si legge quindi dall'importanza del modello completo, mentre SHAP ne quantifica segno e intensità alla scala scelta.

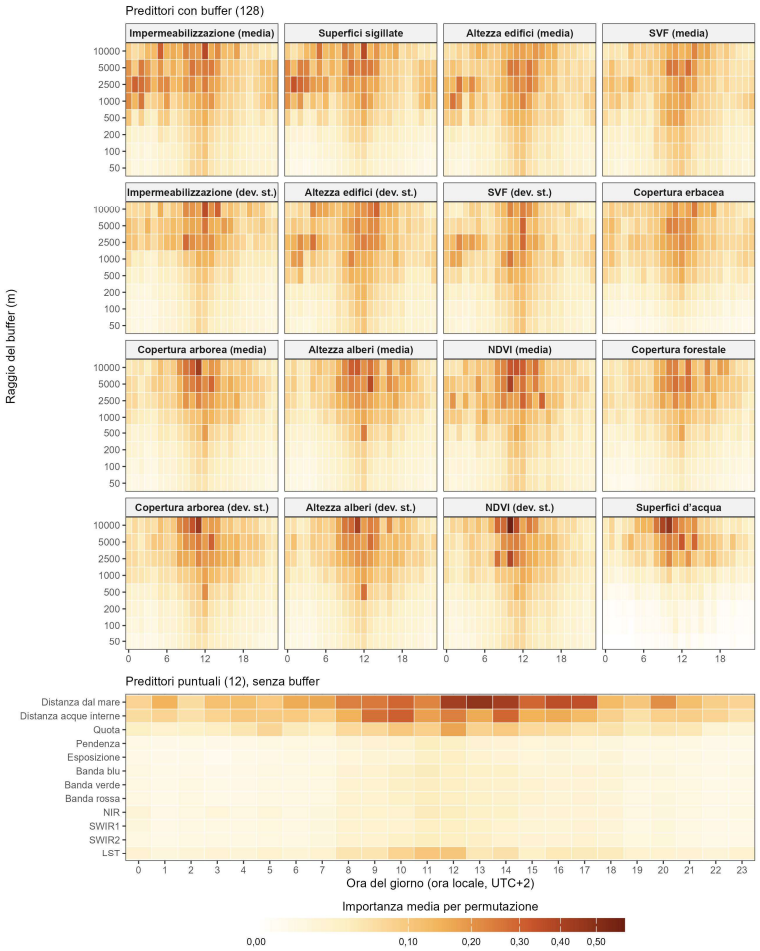


Fig. 3. Importanza media per permutazione dei 140 predittori nei modelli RF orari del regime VH: i 128 predittori con buffer, per raggio e ora (in alto), e i 12 predittori puntuali (in basso), con la stessa scala di colore.

3 Risultati

3.1 Analisi esplorative

Le prime due componenti principali spiegano il 56% della varianza dei predittori: la PC1 (33,5%) è legata soprattutto ad altezza degli edifici, SVF e impermeabilizzazione, la PC2 (22,5%) a copertura e altezza degli alberi, NDVI e copertura forestale. Il clustering gerarchico sulla PCA distingue quattro gruppi: l'infrastruttura grigia;

vegetazione e acqua a scala ampia (2500–10.000 m); vegetazione e acqua a scala piccola e media (50–1000 m); gli indicatori di apertura (SVF medio e copertura erbacea). Le correlazioni anticipano gli schemi che emergono dai modelli: l'impermeabilizzazione è fortemente correlata con Tair di notte e al primo mattino ($r \approx 0,7$), con un massimo tra 2500 e 5000 m; la copertura arborea è correlata negativamente, di notte soprattutto a scala piccola e media e al mattino e nel tardo pomeriggio a scala ampia; la distanza dal mare ha correlazione negativa tra le 02:00 e le 10:00 e positiva tra le 13:00 e le 20:00.

3.2 Modelli RF: prestazioni, scale e ore rilevanti

Applicando una CV casuale, l'RMSE mediano dei 24 modelli orari è 0,87 °C ($R^2 = 0,49$); con blocchi spaziali di 500 e 1000 m sale a 0,97 e 1,01 °C, un aumento vicino o inferiore all'accuratezza dei sensori, mentre l'R^2 scende a 0,34. Le prestazioni sono migliori di notte e il modello ridotto a sei predittori mantiene gran parte della capacità predittiva (RMSE mediano 0,90 °C con la CV casuale e 1,02 e 1,07 °C con blocchi di 500 e 1000 m).

Quasi a ogni ora l'importanza dei predittori con buffer si concentra sui raggi di 1000 m e oltre, ma le scale coinvolte cambiano nel corso della giornata (Fig. 3). Di notte impermeabilizzazione e superfici sigillate sono più rilevanti tra 1000 e 5000 m. Vegetazione e acqua raggiungono la massima importanza tra le 08:00 e le 14:00, a 2500–10.000 m. Tra i predittori puntuali, la distanza dal mare è il più importante quasi a ogni ora tra le 12:00 e le 17:00. Raggruppando i predittori secondo i gruppi della PCA, di notte la morfologia urbana ha una quota di importanza pari a 1,5–1,9 volte quella attesa in base al numero di predittori del gruppo, mentre vegetazione e acqua a scala ampia arrivano a circa il doppio dell'atteso tra le 08:00 e le 11:00 e tra le 18:00 e le 20:00: gli stessi momenti e le stesse scale indicati dalle correlazioni.

3.3 Contributi dei predittori stimati con SHAP

SHAP traduce queste associazioni in contributi espressi in °C (Fig. 4). Tra le 00:00 e le 04:00 il contributo mediano del quartile più impermeabilizzato supera di circa 2–2,4 °C quello del quartile meno impermeabilizzato, con una dispersione delle singole osservazioni fino a circa 4 °C durante le ore notturne; il contrasto si attenua di giorno e torna a crescere dopo le 21:00. La copertura arborea ha contributi modesti di notte e negativi alle 08:00–09:00 e alle 18:00–19:00 (contrasto mediano 0,2–0,5 °C, fino a circa −2 °C per singole osservazioni). Le superfici d'acqua mostrano un segnale netto e crescente tra il primo mattino e la tarda mattinata, con un massimo intorno alle 10:00: aree con una maggiore superficie blu sono associate a temperature più fresche rispetto a zone meno ricche d'acqua, fino a 1 °C considerando gli SHAP mediani e fino a 3 °C sulle singole osservazioni. Per la distanza dal mare il segno si inverte: tra le 03:00 e le 10:00 le località più interne mostrano temperature più basse di circa 0,5 °C sui valori mediani e fino a 3 °C sulle singole osservazioni rispetto a quelle costiere, dalle 13:00 alle 22:00 superiori di 0,2–1,1 °C (valori mediani), con un massimo verso le 16:00.

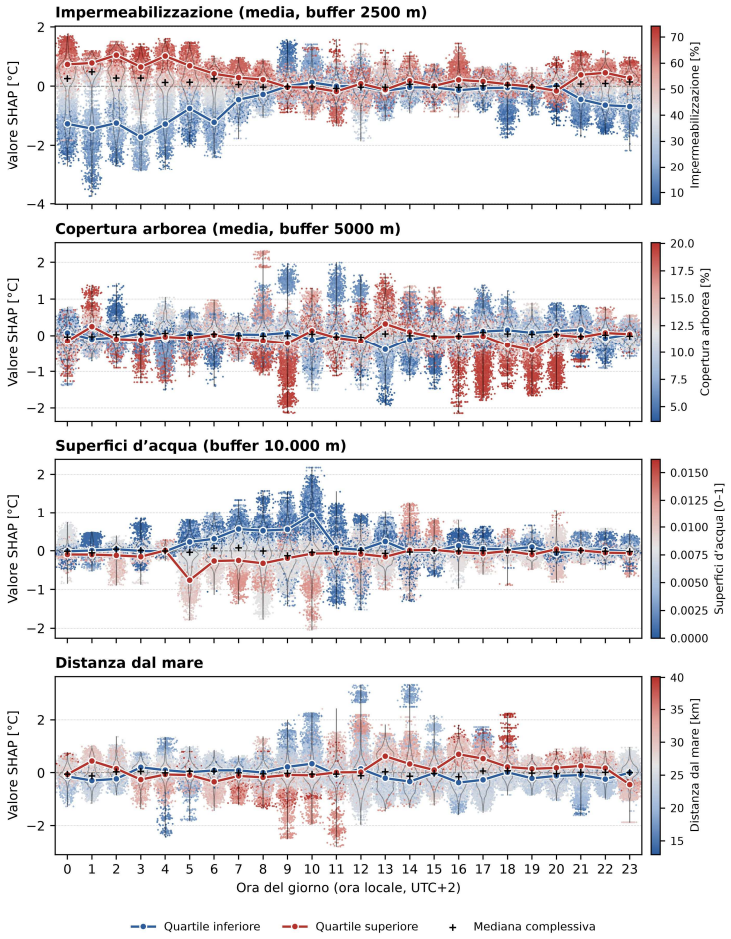


Fig. 4. Valori SHAP orari nel regime VH per impermeabilizzazione, copertura arborea, superfici d'acqua e distanza dal mare. Ogni punto è una singola osservazione MT, colorata in base al valore del predittore (rosso: alto, blu: basso); le linee indicano la mediana oraria di SHAP nel quartile inferiore (blu) e superiore (rosso) del predittore.

4 Discussione e conclusioni

Il flusso GeoAI associa a ogni fattore una combinazione caratteristica di scala e ora. La morfologia urbana prevale di notte, a buffer di 1000–5000 m, in modo coerente con l'accumulo di calore nei materiali impermeabili durante il giorno e con il minore raffreddamento radiativo dei tessuti compatti; l'ordine di grandezza dei contrasti è in linea con l'UHI notturna di 3–4 °C stimata a Roma con la stessa rete [5]. Vegetazione e superfici d'acqua a scala ampia sono associate a temperature più basse soprattutto al

mattino e, per la vegetazione, nel tardo pomeriggio, quando ombreggiamento ed evapotraspirazione diventano i processi principali. La distanza dal mare inverte invece il segno della propria associazione tra notte e pomeriggio, in accordo con l'effetto di mitigazione del mare e con l'esposizione alla brezza [26].

Le analisi esplorative, pur non appartenendo alla GeoAI, convergono con RF e SHAP sugli stessi schemi, e questo rafforza l'interpretazione dei modelli. La validazione a blocchi spaziali, un aspetto centrale nella GeoAI per via della dipendenza tra osservazioni vicine, mostra che le prestazioni sono sovrastimate solo in misura modesta in termini di RMSE e fornisce la stima più prudente della trasferibilità dei modelli alle parti della città non campionate. I buffer concentrici permettono di far emergere la scala dal modello, ma obbligano a usare un modello ridotto per SHAP, che descrive ogni predittore a una sola scala fissa. Lo studio presenta alcuni limiti: la sovrapposizione tra spazio e tempo, attenuata ma non eliminata dall'aggregazione oraria; la limitazione ai corridoi stradali serviti dagli autobus; l'assenza di descrittori della ventilazione; il riferimento a una sola città e a un solo mese.

Sviluppi futuri potrebbero rendere il flusso più esplicitamente spaziale, ad esempio con varianti di RF che tengono conto dell'eterogeneità spaziale delle relazioni o con estensioni di SHAP che trattano la posizione come un predittore [8], e utilizzarlo per produrre mappe continue di Tair. Il rilevamento mobile ad alta densità, unito a modelli di *machine learning* validati spazialmente e interpretabili, permette di indicare dove e quando concentrare gli interventi di mitigazione del calore.

Ringraziamenti

Questo contributo è la versione estesa in italiano di un articolo in revisione presso *Sustainable Cities and Society*. Si ringraziano i progetti LIFE17 CCA/GR/000108, LIFE-SIRIUS (LIFE21-GIE-EL-LIFE), PRIN 2022 RESTART (Prot. 2022KZ2AJE) e Space It Up (ASI e MUR, Contratto n. 2024-5-E.0, CUP I53D24000060005), ATAC S.p.A. per la flotta di autobus della campagna TRAMS, l'Ufficio Clima di Roma Capitale, ed in particolare la persona di Alessandro Conidi, e Iotopon S.r.l., produttore dei MeteoTracker.

Riferimenti bibliografici

1. Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A.: Urban Climates. Cambridge University Press, Cambridge (2017).
2. Good, E.J.: An in situ-based analysis of the relationship between land surface "skin" and screen-level air temperatures. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 121 (15), 8801–8819 (2016).
3. Napoly, A., Grassmann, T., Meier, F., Fenner, D.: Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. Frontiers in Earth Science 6, 118 (2018).
4. Zanetti, C., Rubert, L., De Marchi, M., Pappalardo, S.E.: Bridging the gap: matching data from low-cost mobile sensors and satellite for urban heat island research. A case study in

Padua, Italy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W10-2024, 205–211 (2024).
5. Cecilia, A., Marinelli, L., Borghi, C., Casasanta, G., Chirici, G., et al.: The impact of tree canopy cover and imperviousness on air temperature during summer using low cost sensors on public transportation in Rome, Italy. Urban Climate 66, 102832 (2026).
6. Janowicz, K., Gao, S., McKenzie, G., Hu, Y., Bhaduri, B.: GeoAI: spatially explicit artificial intelligence techniques for geographic knowledge discovery and beyond. International Journal of Geographical Information Science 34 (4), 625–636 (2020).
7. Liu, P., Biljecki, F.: A review of spatially-explicit GeoAI applications in Urban Geography. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 112, 102936 (2022).
8. Mai, G., Xie, Y., Jia, X., Lao, N., Rao, J., et al.: Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 136, 104368 (2025).
9. Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J.: Urban climates and climate change. Annual Review of Environment and Resources 45, 411–444 (2020).
10. Venter, Z.S., Brousse, O., Esau, I., Meier, F.: Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. Remote Sensing of Environment 242, 111791 (2020).
11. Tian, L., Hao, T., He, X., Chan, I., Niu, J., et al.: Examining the non-linear relationship between urban form and air temperature at street level: a case of Hong Kong. Building and Environment 264, 111884 (2024).
12. Breiman, L.: Random forests. Machine Learning 45 (1), 5–32 (2001).
13. Ploton, P., Mortier, F., Réjou-Méchain, M., Barbier, N., Picard, N., et al.: Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. Nature Communications 11, 4540 (2020).
14. Aas, K., Jullum, M., Løland, A.: Explaining individual predictions when features are dependent: more accurate approximations to Shapley values. Artificial Intelligence 298, 103502 (2021).
15. Lundberg, S.M., Lee, S.-I.: A unified approach to interpreting model predictions. In: Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017). Curran Associates (2017).
16. Longo, L., Brcic, M., Cabitza, F., Choi, J., Confalonieri, R., et al.: Explainable Artificial Intelligence (XAI) 2.0: a manifesto of open challenges and interdisciplinary research directions. Information Fusion 106, 102301 (2024).
17. Hong, T., Yim, S.H.L., Heo, Y.: Interpreting complex relationships between urban and meteorological factors and street-level urban heat islands: application of random forest and SHAP method. Sustainable Cities and Society 126, 106353 (2025).
18. Barbano, F., Brattich, E., Cintolesi, C., Ghafoor Nizamani, A., Di Sabatino, S., et al.: Performance evaluation of MeteoTracker mobile sensor for outdoor applications. Atmospheric Measurement Techniques 17 (10), 3255–3278 (2024).
19. Copernicus Land Monitoring Service: Imperviousness Density 2018 (raster 10 m), Europe, 3-yearly, https://doi.org/10.2909/3bf542bd-eebd-4d73-b53c-a0243f2ed862, ultimo accesso 2026/10/12.
20. Copernicus Land Monitoring Service: Urban Atlas Building Height 2012 (raster 10 m), Europe, version 3, https://doi.org/10.2909/42690e05-edf4-43fc-8020-33e130f62023, ultimo accesso 2026/10/12.
21. Copernicus Land Monitoring Service: Tree Cover Density 2018–present (raster 10 m), Europe, yearly, https://doi.org/10.2909/e677441e-fb94-431c-b4f9-304f10e4dfd8, ultimo accesso 2026/10/12.

22. Tolan, J., Yang, H.-I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H.V., 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).
23. Copernicus Land Monitoring Service: CLCplus Backbone 2021 (raster 10 m), Europe, 3-yearly, https://doi.org/10.2909/71fc9d1b-479f-4da1-aa66-662a2fff2cf7, ultimo accesso 2026/10/12.
24. NASA JPL: NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-nasadem-hgt-001, ultimo accesso 2026/10/12.
25. Lundberg, S.M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J.M., et al.: From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. Nature Machine Intelligence 2 (1), 56–67 (2020).
26. Potgieter, J., Nazarian, N., Lipson, M.J., Hart, M.A., Ulpiani, G., et al.: Combining high-resolution land use data with crowdsourced air temperature to investigate intra-urban microclimate. Frontiers in Environmental Science 9, 720323 (2021).

Casi di studio nell'applicazione del TLS e della fotogrammetria digitale per l'analisi delle caratteristiche strutturali di alberi isolati in contesti forestali

Cristian Pedaso[1], Adriano Voltolini[1], Maria Rizzo[1], Antonio Floris[1]

[1] Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'Analisi dell'Economia agraria (CREA) – Centro di ricerca Foreste e Legno, Trento (IT)
pedasoc7@gmail.com
adrianovoltolini@yahoo.it
maria.rizzo@crea.gov.it
antonio.floris@crea.gov.it

Riassunto. Negli ultimi anni, il Terrestrial Laser Scanning e la fotogrammetria digitale stereoscopica hanno mostrato un crescente potenziale per la caratterizzazione tridimensionale della vegetazione arborea. Il presente contributo confronta tali tecniche con le misurazioni tradizionali, analizzandone l'efficacia nella caratterizzazione morfologica delle chiome di alberi a chioma libera in ambiente forestale del Trentino-Alto Adige.

Parole chiave: Laser Scanner Terrestre, stereofotogrammetria digitale, struttura della chioma arborea, misure forestali.

Abstract. In recent years, Terrestrial Laser Scanning and digital stereoscopic photogrammetry have shown increasing potential for the three-dimensional characterization of tree vegetation. This study compares these techniques with traditional measurements, assessing their effectiveness in the morphological characterization of crowns of open-grown trees in a forest environment in Trentino-Alto Adige, Italy.

Keywords: Terrestrial Laser Scanner, digital stereo-photogrammetry, tree crown structure, forest measurements.

1. Introduzione

La struttura della chioma è fondamentale per la descrizione morfologica e funzionale degli alberi, influenzando processi quali intercettazione della luce, fotosintesi, traspirazione e competizione per le risorse. Parametri come estensione, forma e profondità della chioma sono ampiamente utilizzati in ecologia forestale, nella stima di biomassa e carbonio e nel monitoraggio vegetativo [1; 2].

Tradizionalmente, la caratterizzazione della chioma si basa su misure dirette in campo, semplici ma sottoposte a semplificazioni e alla soggettività dell'operatore. Il Terrestrial Laser Scanning (TLS) consente, invece, una ricostruzione tridimensionale dettagliata degli alberi mediante nuvole di punti ad alta densità [2; 3]. I sistemi mobili basati su algoritmi SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) ne hanno inoltre semplificato e velocizzato l'acquisizione [4].

Il presente lavoro confronta la geometria delle chiome di campioni di alberi isolati rilevati mediante sistema mobile TLS Lixel 2 Pro XGRIDS®, misure su immagini aeree stereoscopiche e misure tradizionali, analizzando la concordanza tra i diversi approcci e il potenziale informativo delle nuvole di punti.

2. Area di studio

Gli alberi campione sono stati selezionati in due località del Trentino-Alto Adige per le quali era stata preliminarmente verificata la disponibilità di immagini stereoscopiche. Dopo screening preliminare su ortofoto digitali sono state individuate la zona di Malga Cislon a Trodena (46°19'12" N; 11°19'17" E - BZ) e Malga Malosco in località Regole di Malosco (46°26'42" N; 11°11'59" E - TN). Entrambe le località sono caratterizzate dalla presenza di boschi radi e pascoli arborati, con alberi isolati cresciuti in condizioni di chioma libera. Con un successivo sopralluogo in campo sono stati individuati i singoli alberi idonei al rilievo, verificando in particolare la presenza di un unico fusto, condizione impossibile da valutare sulle immagini aeree. Sono stati quindi scelti 22 alberi campione le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Descrizione del campione.

Caratteristica	Valore
n. totale alberi	22
Area studio Malosco	13 conifere
Area studio Trodena	9 latifoglie
Specie rappresentate	*Larix decidua* (12), *Betula pendula* (2), *Fraxinus angustifolia* (2), *Picea abies* (1), *Acer platanoides* (1), *Acer pseudoplatanus* (1), *Fraxinus excelsior* (1), *Fagus sylvatica* (1) e *Fraxinus ornus* (1)
DBH (cm)	min: 24.0; max: 82.0; media: 54.2; mediana: 55.8
h tot (m)	min: 7.5; max: 24.0; media: 16.1; mediana: 16.7
h inserzione chioma (m)	min: 1.7; max: 6.2; media: 2.9; mediana: 2.8

3. Raccolta dei dati

Per ciascun albero campione sono stati rilevati tramite misurazioni dendrometriche tradizionali: diametro a 1.30 m (DBH), altezza totale, ampiezza della chioma lungo otto

raggi disposti sulle direzioni cardinali a 45° di distanza, altezza della chioma dal terreno in corrispondenza delle quattro direzioni cardinali principali (N, E, S, W). Sono state inoltre rilevate le altezze di inserzione della chioma, non impiegate nelle analisi del presente studio, ma potenzialmente utili per futuri approfondimenti. Per queste misure sono stati usati: cavalletto dendrometrico e diametrometro, ipsometro Haglof Vertex III, clino-bussola Suunto Tandem, ipso-distanziometro Haglof Vertex Laser 360, asta telescopica graduata di 6 m.

Per ogni albero è stata inoltre acquisita una scansione tridimensionale ad alta densità mediante TLS. L'acquisizione è stata effettuata percorrendo un tragitto circolare attorno all'albero seguito da un secondo percorso sotto la chioma, al fine di garantire una copertura completa della struttura.

Per le due aree di studio, infine, sono stati utilizzati fotogrammi aerei acquisiti secondo criteri idonei alla ricostruzione stereoscopica e fotogrammetrica (campagne di volo AGEA 2023). Tali immagini sono state successivamente impiegate per la generazione dei modelli tridimensionali e per l'estrazione delle variabili dendrometriche descritte nei paragrafi successivi.

4. Elaborazione dei dati

Il flusso di lavoro ha previsto l'impiego di differenti ambienti software. Le scansioni TLS sono state inizialmente elaborate con il software LixelStudio 4.0.1.2 [5] per la generazione delle nuvole di punti e l'esportazione dei dati in formato *.las*.

Le successive elaborazioni sono state effettuate mediante il software CloudCompare v2.13.2 [6] su cui, per ciascun albero, è stato generato un modello digitale del terreno (DTM) tramite uno script Python basato sulla libreria *Dendromatics* [7; 8; 9]. Successivamente, la nuvola di punti è stata normalizzata rispetto al terreno e la proiezione al suolo della chioma è stata esportata in formato raster idoneo per le successive analisi su ImageJ 1.54g [10].

I blocchi stereoscopici per entrambe le aree di studio sono stati realizzati con il software proprietario ERDAS IMAGINE [11], inserendo nelle varie fasi della procedura di realizzazione tutti i parametri necessari alla corretta esecuzione della stessa (calibrazione interna della camera ed esterna del piano di volo, risoluzione, un adeguato numero di GCP, DTM ecc.).

Parallelamente, la *pipeline* di ricostruzione densa implementata nel software COLMAP 4.0.3 [12; 13; 14] è stata utilizzata per generare nuvole di punti tridimensionali a partire dalle coppie stereoscopiche. Le nuvole ottenute per le aree studio sono state successivamente importate in CloudCompare per la misura dei parametri dimensionali degli alberi.

5. Misure e calcoli

5.1 Determinazione dell'altezza degli alberi

Per ciascun albero sono state ottenute cinque misure dell'altezza mediante rilievi diretti, restituzione stereoscopica e analisi di nuvole di punti. Le diverse altezze sono state successivamente confrontate utilizzando come riferimento quella misurata in campo. Le misure considerate sono state:

- altezza totale degli alberi rilevata in campo mediante strumentazione dendrometrica tradizionale (Vertex in Fig. 1);
- altezza misurata sui blocchi stereoscopici realizzati mediante ERDAS IMAGINE, ottenuta come differenza tra la quota del terreno alla base del fusto e quella corrispondente all'apice della chioma (ERDAS in Fig. 1);
- altezza derivata dalle nuvole di punti generate con COLMAP e successivamente elaborate in CloudCompare, determinata calcolando la differenza tra la quota dell'apice della chioma e quella del terreno sottostante (COLMAP in Fig. 1);
- altezza massima derivata sulle nuvole di punti TLS normalizzate rispetto al terreno, definita come la quota del punto più elevato appartenente alla chioma (Hmax) (Hmax in Fig. 1);
- altezza corrispondente al percentile 99.9 (P99.9) della distribuzione delle quote dei punti appartenenti a ciascun albero, adottata come stima robusta dell'altezza massima al fine di limitare l'effetto di punti anomali (outlier) presenti nella nuvola TLS o errori di ricostruzione (P99.9 in Fig. 1).

5.2 Determinazione dell'area della chioma

L'area della chioma è stata calcolata mediante differenti approcci basati sia sui rilievi effettuati direttamente in campo sia sulle proiezioni al suolo ottenute dall'elaborazione delle scansioni TLS. Gli approcci adottati sono stati i seguenti:

- raggio quadratico medio (RQM): calcolato a partire dagli otto raggi della chioma misurati nelle direzioni cardinali e intercardinali. L'area della chioma è stata stimata assumendo una forma circolare equivalente, avente come raggio il valore ottenuto. Questo approccio consente di sintetizzare in un unico parametro le diverse dimensioni della chioma, attribuendo un peso maggiore ai raggi di maggiore ampiezza e riducendo l'influenza di eventuali valori particolarmente piccoli.
- somma di triangoli (STRI): la proiezione della chioma è stata assimilata a un poligono definito dagli otto raggi misurati nelle direzioni cardinali e intercardinali. L'area è stata calcolata suddividendo il poligono in otto triangoli individuati da coppie di raggi consecutivi e sommando successivamente le superfici dei singoli triangoli. Il procedimento è stato applicato sia ai raggi rilevati direttamente in campo sia ai raggi misurati sulle proiezioni della chioma elaborate mediante ImageJ.
- interpolazione PCHIP: per ottenere una rappresentazione continua e realistica del profilo della chioma è stato utilizzato il metodo Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP), meno sensibile alle asimmetrie e privo delle oscillazioni tipiche di altri metodi di interpolazione [15]. La curva è stata campionata

ogni grado azimutale e utilizzata per il calcolo dell'area mediante integrazione numerica in coordinate polari. Il metodo è stato applicato sia ai raggi misurati in campo sia a quelli ricavati dalle proiezioni della chioma elaborate con ImageJ.

- elaborazione automatica in ImageJ (AUIJ): le proiezioni della chioma esportate da CloudCompare in formato .png sono state elaborate mediante il software ImageJ. Poiché le immagini raster prodotte presentavano una risoluzione spaziale di 1 cm, l'area della chioma è stata determinata automaticamente attraverso il conteggio dei pixel appartenenti alla proiezione. Prima dell'elaborazione è stata applicata la funzione *Fill Holes* per eliminare eventuali vuoti presenti all'interno della proiezione e ottenere una rappresentazione continua della chioma.

Le suddette metodologie sono state successivamente confrontate adottando come riferimento, in quanto il più utilizzato nella letteratura consultata, l'area derivata con alpha shape della nuvola TLS (AS). L'area di alpha shape della proiezione della chioma è stata calcolata tramite l'uso di uno script Python che sfrutta le librerie *Shapely* [16] e *Alpha_Shapes* [17]. L'alpha shape è una generalizzazione del *convex hull* in cui il parametro α determina quanto concavo sia il poligono che racchiude i punti della nuvola. Per ogni albero è stato utilizzato un alpha diverso, pari al valore più alto possibile senza dividere i punti della proiezione in più poligoni. Gli eventuali buchi interni della chioma sono stati riempiti prima di calcolare l'area totale della figura.

6. Risultati

Assumendo come metodo di riferimento la misura di campo con Vertex, non perché più accurata ma in quanto attualmente più diffusa nei rilievi forestali, il confronto tra le diverse stime di altezza evidenzia una maggiore concordanza dei valori ottenuti mediante TLS rispetto agli altri approcci. Le altezze ottenute mediante restituzione stereoscopica nel software ERDAS IMAGINE e quelle derivate dalle nuvole di punti ottenute tramite COLMAP hanno mostrato prestazioni inferiori presentando una variabilità significativamente maggiore e una corrispondenza sensibilmente inferiore rispetto agli altri metodi (vedi Fig. 1).

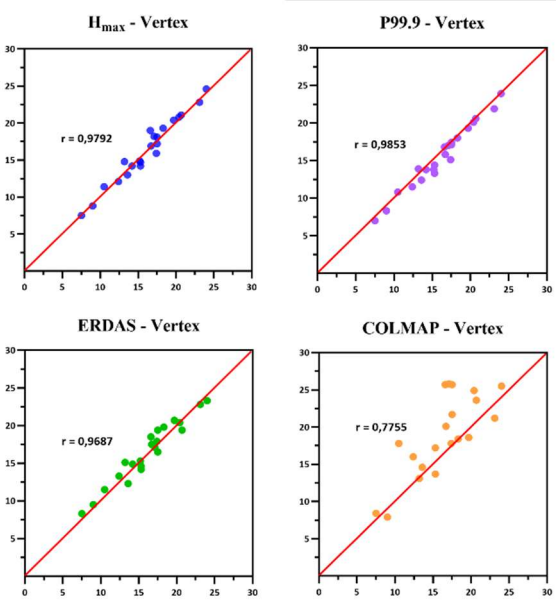


Fig. 1. Confronto fra i diversi metodi di misura dell'altezza totale (asse delle ordinate), rispetto a quella misurata in campo con Vertex (asse delle ascisse).

Tra le metriche estratte dalle nuvole di punti TLS, sia l'altezza massima (Hmax) sia il percentile 99.9 (P99.9) hanno evidenziato una maggiore concordanza con i valori misurati in campo. Tuttavia, il P99.9 ha fornito risultati generalmente più robusti, risultando meno influenzato dalla presenza di punti isolati nella porzione apicale della chioma. Tale comportamento è coerente con quanto riportato in letteratura, dove l'impiego di percentili elevati viene indicato come una soluzione efficace per ridurre l'effetto di outlier e anomalie presenti nelle nuvole di punti [18; 19].

Relativamente alle misure dell'altezza totale su immagini stereoscopiche, nonostante siano state effettuate dallo stesso operatore allo scopo di ridurre la variabilità associata a differenti criteri interpretativi, la determinazione dell'altezza degli alberi si è rivelata complessa. Diversi studi hanno evidenziato come l'individuazione dell'apice della chioma e della base del fusto rappresentino una delle principali fonti di incertezza nelle misure fotogrammetriche delle altezze arboree; piccole differenze nell'interpretazione della struttura tridimensionale della chioma possono quindi tradursi in errori dell'ordine di alcuni decimetri o, nei casi più complessi, superiori al metro [20; 21].

Le altezze derivate dalle nuvole di punti ottenute mediante COLMAP hanno mostrato una maggiore dispersione rispetto a quelle ricavate dal TLS. Una possibile spiegazione è che alle difficoltà nell'individuazione dell'apice della chioma e della base del fusto si aggiungano eventuali incertezze in fase di generazione della nuvola di punti.

Per quanto riguarda la determinazione dell'area di proiezione della chioma, i diversi approcci adottati hanno mostrato differenze talvolta non trascurabili rispetto ai valori di riferimento (AS), legate alle modalità con cui viene rappresentato il contorno della chioma (vedi Tab. 2).

Tabella 2. Misure dell'area della chioma (m^2) ottenute con i diversi metodi a confronto.

		Misure di campo			Misure da nuvola di punti		
ID albero	AS	RQM	STRI	PCHIP	STRI	PCHIP	AUIJ
LA1	83.4	79.1	70.3	79.2	74.7	83.5	76.3
LA 2	36.4	32.2	27.5	31.9	34.4	39.5	35.4
LA3	71.1	66.3	57.8	66.7	61.7	71.4	66.5
LA4	59.4	52.4	44.2	50.5	54.8	61.7	56.5
LA5	50.5	36.6	31.5	35.4	45.5	50.9	48.2
LA6	65.7	64.6	57.9	64.7	65.6	72.9	62.5
LA7	77.9	71.6	62.2	69.2	73.6	81.4	74.4
LA8	38.3	29.2	25.5	29.1	31.7	36.0	36.9
LA9	54.4	55.5	47.0	56.5	49.3	58.2	51.9
LA10	65.8	53.4	47.4	52.4	59.3	65.9	62.5
LA11	45.8	38.1	33.5	37.8	36.9	41.6	42.2
LA12	61.5	42.2	36.4	40.3	54.7	60.6	58.4
AR13	41.7	28.9	24.9	28.6	34.7	38.3	40.4
ACR1	78.2	71.4	63.4	71.5	69.0	78.3	77.8
ACM2	159.6	160.5	142.2	159.5	139.2	158.3	157.7
BE3	46.2	43.9	39.1	44.5	42.8	47.9	44.9
FR4	96.5	96.4	85.8	96.8	84.0	95.1	95.0
FR5	64.5	55.8	49.6	56.4	53.4	61.1	62.8
FR6	107.3	103.8	92.1	104.1	97.3	110.1	106.3
BR8	28.5	29.1	25.9	28.9	22.8	25.4	27.7
FA14	79.6	83.9	75.1	84.4	74.0	83.4	77.7
OR15	26.9	22.7	20.4	22.5	24.9	27.6	26.8

Il metodo basato sul raggio quadratico medio è risultato il più vicino ad alpha shape tra quelli che utilizzano le misure manuali dei raggi in campo. Questo comportamento è legato al maggiore peso attribuito ai raggi di ampiezza più elevata, che tendono a compensare eventuali irregolarità locali della chioma.

La procedura basata sulla somma dei triangoli, applicata sia ai raggi misurati in campo che sulla nuvola di punti, oltre a fornire i valori più distanti dal metodo di riferimento, tende sistematicamente a fornire valori inferiori rispetto agli altri approcci, poiché approssima il perimetro della chioma mediante segmenti rettilinei che semplificano la reale forma della proiezione.

L'impiego dell'interpolazione PCHIP ha consentito di ottenere una rappresentazione più continua e realistica del contorno, e di conseguenza valori di area più vicini a quelli calcolati con alpha shape.

I comportamenti degli ultimi due metodi citati sono coerenti con quanto riportato in letteratura [15], dove si evidenziano i vantaggi degli approcci interpolativi nella

rappresentazione di chiome asimmetriche e irregolari rispetto alle tradizionali approssimazioni geometriche.

Le aree ottenute dalle proiezioni TLS elaborate in CloudCompare e ImageJ mostrano nel complesso una buona concordanza con i valori derivati da alpha shape. In particolare, l'elaborazione automatica mediante ImageJ fornisce i risultati più vicini a quelli ottenuti con alpha shape (vedi Fig. 2), suggerendo che anche procedure relativamente semplici possano restituire valori affidabili quando sono disponibili proiezioni della chioma di buona qualità.

Nel complesso, i risultati suggeriscono che le metodologie basate su nuvole di punti tridimensionali consentono una rappresentazione più realistica della geometria delle chiome rispetto alle tradizionali approssimazioni geometriche basate sui raggi. La possibilità di descrivere direttamente la complessità e l'irregolarità della struttura arborea costituisce infatti uno dei principali vantaggi delle tecniche TLS nella caratterizzazione morfologica delle chiome [1; 2].

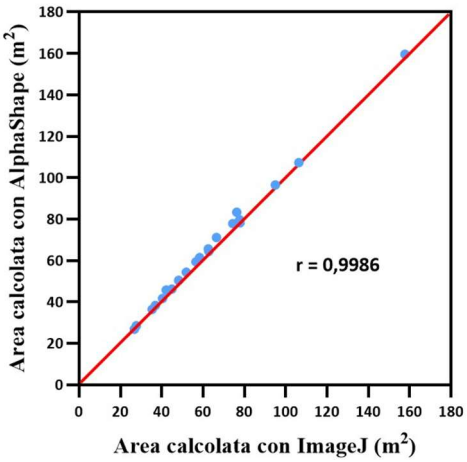


Fig. 2. Confronto fra AlphaShape e ImageJ nel calcolo dell'area di proiezione della chioma.

7. Discussione e conclusioni

Le finalità di questo test preliminare sono state: verificare l'idoneità e l'efficacia del TLS (Terrestrial Laser Scanning) per la ricostruzione tridimensionale di alberi forestali cresciuti a chioma libera; valutare l'affidabilità delle misure ottenute mediante tecniche tradizionali, nelle situazioni in cui il TLS risulti difficilmente utilizzabile; esplorare il potenziale informativo derivante dall'integrazione tra rilievi terrestri e dati ottenuti da immagini stereoscopiche aeree.

I risultati ottenuti, sia per l'altezza totale che per l'area di insidenza della chioma, confermano che il TLS rappresenta la tecnica più completa tra quelle considerate. La possibilità di acquisire nuvole di punti tridimensionali ad elevata densità consente infatti una descrizione dettagliata dell'architettura dell'albero e la stima di numerosi parametri strutturali difficilmente misurabili con i metodi convenzionali confermando che il TLS rappresenta uno degli strumenti più promettenti per lo studio della struttura arborea forestale [22; 23].

Le misure eseguite manualmente con ERDAS IMAGINE sulle restituzioni stereoscopiche di immagini aeree, sebbene possano fornire utili informazioni sull'altezza di singoli alberi, richiedono operatori particolarmente addestrati e possono comportare importante stanchezza visiva con conseguenti limitazioni alla durata delle sessioni di lavoro.

I valori di altezza ottenuti mediante COLMAP sono stati invece meno soddisfacenti. Sebbene il software consenta di generare nuvole di punti tridimensionali attraverso procedure open source ampiamente automatizzabili, le ricostruzioni ottenute hanno evidenziato errori sistematici e una minore accuratezza delle stime.

Le misure tradizionali effettuate in campo, in particolare se abbinate al corretto metodo di calcolo dell'area di chioma, hanno mostrato un buon livello di affidabilità e rimangono uno strumento fondamentale nelle attività operative e inventariali. Pur fornendo una rappresentazione semplificata della struttura della chioma, esse richiedono strumentazione relativamente economica, metodologie consolidate e tempi di elaborazione contenuti. In contesti caratterizzati da elevata pendenza, vegetazione fitta, difficoltà logistiche o limitata accessibilità, tali approcci possono pertanto rappresentare una soluzione alternativa all'uso del TLS efficiente e facilmente applicabile.

Riferimenti bibliografici

1. Pretzsch H., Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands. Forest Ecology and Management, 327, 251-264 (2014)
2. Disney M., Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. New Phytologist, 222, 1736-1741 (2019)
3. Åkerblom M., Kaitaniemi P., Terrestrial laser scanning: a new standard of forest measuring and modelling? Annals of Botany, 128(6), 653-662 (2021)
4. Gollob C., Ritter T., Nothdurft A., Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and SLAM technology. Remote Sensing 12(9), Article 1509 (2020). https://doi.org/10.3390/rs12091509
5. XGRIDS, 2026 – LixelStudio (versione 4.0.1.2) [proprietary software]. Shenzhen, China. https://xgrids.com/
6. CloudCompare (versione 2.13.2) [GPL software]. (2024). http://www.cloudcompare.org/
7. Carlos C., Ordóñez C., López-Sánchez C. A., Armesto J., Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 69, 2018, 164-174, ISSN 1569-8432 (2018)

8. Prendes C., Cabo C., Ordoñez C., Majada J., & Canga, E. An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in Pinus pinaster. GIScience & Remote Sensing, 58(7), 1130–1150 (2021).
9. Zhang et al., An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation, Remote Sensing, 8(6), 501 (2016)
10. Schneider C., Rasband W. & Eliceiri K. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat Methods 9, 671–675 (2012). https://doi.org/10.1038/nmeth.2089
11. Hexagon AB, 2023 – ERDAS IMAGINE (versione 16.8.0 Build 2100) [proprietary software]. Stockholm, Sweden.
12. Schönberger J. L. and Frahm J.M., "Structure-from-Motion Revisited," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 4104-4113, (2016). https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445.
13. Schönberger J.L., Zheng E., Frahm J.M., Pollefeys, M. Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. In: Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. (eds) Computer Vision – ECCV 2016 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9907, pp. 501-518). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46487-9_31
14. Pan L., Baráth D., Pollefeys M., Schönberger J.L. Global Structure-from-Motion Revisited. In: Leonardis, A., Ricci, E., Roth, S., Russakovsky, O., Sattler, T., Varol, G. (eds) Computer Vision – ECCV 2024. ECCV 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15098. Springer, Cham. (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-031-73661-2_4
15. Zhang M., Bi H., Jin X., McLean M. A new method of calculating crown projection area and its comparative accuracy with conventional calculations for asymmetric tree crowns. Journal of Forestry Research, 35, 79-92, (2024).
16. Gillies S., van der Wel C., Van den Bossche J., Taves M. W., Arnott J., Ward, B. C., & others. Shapely (Version 2.1.1). (2025).
17. Panagiotis Zestanakis, GitHub - panosz/alpha_shapes: A Python library for working with alpha shapes (2023). https://github.com/panosz/alpha_shapes
18. St-Onge B., Jumelet J., Cobello M., Véga C. (2004). Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. Canadian Journal of Forest Research, 34, 2122-2130, (2023).
19. Krause S., Sanders T.G.M., Mund J.P., Greve K. UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. Remote Sensing, 11, Article 758, (2019).
20. Wasser L., Day R., Chasmer L., Taylor A. Influence of Vegetation Structure on Lidar-derived Canopy Height and Fractional Cover in Forested Riparian Buffers During Leaf-Off and Leaf-On Conditions. PLoS ONE, 8(1), Article e54776, (2013).
21. Olofsson K., Holmgren J., Olsson H. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. Remote Sensing, 6, 4323-4344, (2014).
22. Arrizza S., Marras S., Ferrara R., Pellizzaro G. Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: a review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 36, Article 101364, (2024).
23. Wardius Y., Hein S. Terrestrial laser scanning vs. manual methods for assessing complex forest stand structure: a comparative analysis on planter forests. Eur J Forest Res 143, 635-649, (2024).

La Carta Tecnica Regionale dell'Emilia-Romagna: esordi, fasi iniziali, contesto politico

Stefano Piastra[1], Stefano Olivucci[2], Renato Tegoni[3]

[1] Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze dell'Educazione, stefano.piastra@unibo.it
[2] Regione Emilia-Romagna, Stefano.Olivucci@regione.emilia-romagna.it
[3] Archivio Cartografico della Regione Emilia-Romagna, Mapservice SRL, rtegoni@eft.it

Abstract. In Emilia-Romagna il processo elaborativo della Carta Tecnica Regionale prese avvio con la Legge Regionale n. 24, 19 aprile 1975, poi lievemente modificata dalla L.R. n. 32, 8 luglio 1977. Essa prevedeva la realizzazione di cartografia regionale sia di base, sia tematica, nonché di fotografie aeree; la scala cartografica di impianto era individuata nell'1:5000. Il contributo discute gli esordi, le fasi iniziali, il contesto politico di tale produzione cartografica.

Parole chiave: Carta Tecnica Regionale dell'Emilia-Romagna, Legge Regionale dell'Emilia-Romagna n. 24, 19 aprile 1975, Legge Regionale dell'Emilia-Romagna n. 32, 8 luglio 1977, Decentramento amministrativo e Regioni a statuto ordinario, Modello emiliano-romagnolo.

1 Introduzione

Com'è noto, le Regioni a statuto ordinario erano già previste dalla Costituzione repubblicana (Parte II, Titolo V, artt. 114-131), ma esse diventarono effettive solamente nel 1970 in seguito alle prime elezioni regionali.

Il trasferimento dallo Stato alle Regioni delle funzioni amministrative interessate avvenne col D.P.R. n. 8, 15 gennaio 1972, poi perfezionato dal D.P.R. n. 616, 24 luglio 1977 (Motta, 1980, p. 86), rendendole pienamente operative.

Si inaugurò a quel punto la stagione di decentramento amministrativo dello Stato, da lungo atteso e a cui l'Italia repubblicana giunse in una fase storica in cui il *boom* economico, nelle sue tante dimensioni e conseguenze (economiche, sociali, di ipersfruttamento delle risorse, di degrado ambientale, ecc.), si era ormai già concluso.

L'intero processo ebbe, tra le varie implicazioni, la nascita degli uffici cartografici regionali e la creazione di Carte Tecniche Regionali (CTR), produzione cartografica parallela rispetto alla cartografia ufficiale dello Stato facente capo all'Istituto Geografico Militare (IGM), sino ad allora l'unica disponibile in relazione alle scale topografiche (Marussi, 1979, p. 18).

La produzione cartografica diventò quindi uno dei banchi di prova della reale efficacia ed effettività della devoluzione di alcune funzioni alle Regioni, in quanto interrelata a temi di grande importanza come le urbanizzazioni, le infrastrutture, la

gestione del territorio (tutte questioni che necessitavano urgentemente di carte a scala più grande rispetto a quanto sino ad allora fornito dall'IGM).

Si trattava inoltre di uno scarto significativo anche in relazione alla committenza e alle finalità del prodotto cartografico: si passava infatti per la prima volta da cartografia realizzata da un ente militare quale l'IGM (con tutto ciò che ne conseguiva: divieto di riproduzione, utilizzo del meridiano di Roma Monte Mario come meridiano di riferimento, ecc.), per fini originariamente bellici, a una cartografia creata da un ente locale (peraltro spesso appaltata, nella sua stesura pratica, a società private), per finalità civili, applicative e di governo del territorio.

Nonostante i tentativi di coordinamento interregionale (Rigamonti, 1980), gli esiti finali furono, sul piano cartografico, molto variegati da Regione a Regione, sulla base del differente impegno economico, di processi e volontà politici più o meno lineari (il cambiamento di "colore politico" attraverso le legislature regionali poteva infatti avere impatti sul proseguimento o il potenziamento delle CTR), di scelte tecniche e tecnologiche diverse.

Di seguito si discuteranno le fasi di esordio dell'elaborazione e della realizzazione della Carta Tecnica Regionale della Regione Emilia-Romagna e di altra cartografia tematica da essa prodotta fra anni Settanta e primi anni Ottanta del XX secolo, sul più ampio sfondo politico del "modello emiliano-romagnolo".

2 Le fasi elaborativa e realizzativa

In Emilia-Romagna la Legge Regionale n. 24, 19 aprile 1975, *Formazione di una cartografia regionale* (https://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/articolo?urn=urn:nir:regione.emilia.romagna:legge:1975-04-19;24), poi lievemente modificata dalla L.R. n. 32, 8 luglio 1977 (https://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/articolo?urn=er:assemblealegislativa:legge:1977;32), dettò il perimetro, istitutivo, applicativo e di scopo, della cartografia regionale emiliano-romagnola (Vianello, 1980, p. 183). L'art. 1 descriveva programmaticamente gli obiettivi della Carta Tecnica Regionale che si voleva allestire:

> La Regione Emilia-Romagna, per assolvere le funzioni di programmazione e di pianificazione territoriale, per favorire l'attività di pianificazione degli enti territoriali nonché l'attività di ricerca dell'istituto dei beni culturali si doterà di una carta plano-altimetrica di base denominata «Carta Tecnica Regionale» (C.T.R.) e di carte operative di ambito regionale o sub-regionale riguardanti i fenomeni ecologici, economici, culturali, amministrativi, demografici, urbanistici e sanitari.

Come si vede, sin dagli esordi la Regione Emilia-Romagna pianificava di realizzare anche cartografia tematica a partire dalla base topografica delle neocostituite CTR.

Ai vari elaborati veniva riconosciuta una spendibilità, in ottica applicativa, entro la pianificazione, ma anche per fini di ricerca entro l'Istituto per i beni artistici, culturali e naturali (IBC) della Regione Emilia-Romagna, organo tecnico-scientifico e strumento

della programmazione regionale nel settore culturale, fondato nel 1974 e infine chiuso nel 2020.

La scala cartografica di impianto era individuata in "elementi" a 1:5000 (Regione Emilia-Romagna, 1976, pp. 11, 19; Regione Emilia-Romagna, 1980, p. 19), prescelta in quanto intermedia tra quella delle mappe catastali a 1:1000 e 1:2000 e quella delle tavolette IGM a 1:25.000. A livello nazionale, il panorama fu variegato al riguardo: varie Regioni fecero scelte analoghe a quelle emiliano-romagnole, mentre altre si focalizzarono sul taglio cartografico 1:10.000 (Fondelli, 1980, p. 176).

Ogni "elemento" era identificato da un codice numerico e dal toponimo della località più importante ivi rappresentata, indicando i riferimenti delle carte omologhe IGM, a scala più piccola, a cui si sovrapponevano (Motta, 1980, p. 98).

La longitudine si basava sul meridiano di Greenwich (Regione Emilia-Romagna, 1980, p. 5), e non su quello di Roma Monte Mario.

Trattandosi di una carta "tecnica", ogni emergenza del terreno doveva essere rappresentata nella scala dell'"elemento", senza ricorrere a un aumento artificioso delle dimensioni grafiche del rispettivo simbolo allo scopo di farlo risaltare (Regione Emilia-Romagna, 1976, p. 12; cfr. anche p. 41):

> Nella cartografia tecnica l'aspetto metrico assume una importanza fondamentale; i particolari topografici, quindi, vengono rappresentati «a misura» ogni volta che la dimensione lo consente e, in generale, ogni linea o segno rappresentato devono corrispondere alla effettiva posizione geometrica del particolare. L'impiego del convenzionalismo «esaltato», l'alterazione delle dimensioni e gli spostamenti dei particolari resi necessari dallo spessore del segno grafico sono limitati allo stretto necessario.

Sul piano tecnico, si affermava esplicitamente l'adesione al metodo aerofotogrammetrico (Regione Emilia-Romagna, 1976, p. 12). I voli fotogrammetrici erano regolati analiticamente: essi potevano essere effettuati in funzione del lavoro cartografico solo dal 15 febbraio al 15 novembre, esclusivamente nelle fasce orarie centrali della giornata (al fine di evitare la luce radente e le relative ombre) e in assenza di copertura nevosa (la quale, se invece presente, avrebbe pesantemente limitato la lettura del territorio) (Regione Emilia-Romagna, 1980, pp. 22-23).

Le operazioni cartografiche erano riassunte in cinque fasi principali (Regione Emilia-Romagna, 1976, p. 22): voli fotogrammetrici; rete geodetica di inquadramento, raffittamento e appoggio; restituzione dei fotogrammi; ricognizione; disegno e approntamento dei tipi.

Come si evince da quanto appena esposto, pur basandosi sul metodo aerofotogrammetrico, erano comunque previsti ricognizioni e controlli sul terreno.

In relazione alla toponomastica, le linee guida redazionali della CTR emiliano-romagnola prevedevano la ricezione di toponimi ufficiali desunti dalla cartografia IGM e catastale, ma anche da documenti comunali, provinciali e dell'Istituto Centrale di Statistica. In parallelo, in occasione delle ricognizioni sul campo, si auspicava una «raccolta dei toponimi (…) anche interrogando gli abitanti e le persone pratiche dei luoghi, che ne confermano l'attendibilità, la grafia e la corrispondenza del riferimento» (Regione Emilia-Romagna, 1980, p. 21).

Sul piano della visione e della genesi del programma, le pubblicazioni regionali del tempo insistevano sull'imprescindibilità di una carta regionale a grande scala in funzione del buon governo del territorio (Regione Emilia-Romagna, 1976, p. 3):

> Una cartografia di base per una moderna programmazione e pianificazione urbanistica, industriale, agricola, per la conoscenza e la razionale utilizzazione delle risorse dell'ambiente naturale, per la prevenzione dei dissesti e dell'inquinamento del suolo è assolutamente necessaria.

Infine, conosciamo analiticamente i costi sostenuti dalla Regione Emilia-Romagna per la progettazione e la realizzazione del primo stralcio del programma: oltre 5 miliardi di lire nel solo intervallo temporale tra 1976 e 1979 (Comitato Organizzatore della Conferenza Nazionale sulla Cartografia, 1980, p. 549). Si trattava di una somma notevole, tra le più alte stanziate dagli enti regionali a livello nazionale.

Tra i primi territori coperti dalle CTR figuravano i comuni dell'Appennino reggiano. Qui i voli aerofotogrammetrici funzionali alle redazioni delle carte si datavano già al 1973, posti sotto l'egida della Comunità Montana dell'Appennino Reggiano, e a inizi di giugno 1975, ossia meno di due mesi dopo la Legge Regionale n. 24 di quell'anno, veniva qui conclusa una prima edizione, provvisoria e sperimentale, di alcuni "elementi" della Carta Tecnica Regionale. È il caso, ad esempio, dell'"elemento" 218033 Brugna (Casina, RE) (Fig. 1).

A conferma di una spinta verso una ricezione immediata del nuovo strumento cartografico, nel 1978 la Regione Emilia-Romagna promulgava la Legge Regionale n. 47, 7 dicembre 1978, *Tutela ed uso del territorio*. Il provvedimento, incentrato sull'utilizzo del suolo e le infrastrutture, prescriveva esplicitamente che gli strumenti urbanistici elaborati dai Comuni avrebbero dovuto impiegare carte CTR (Vianello, 1980, p. 184).

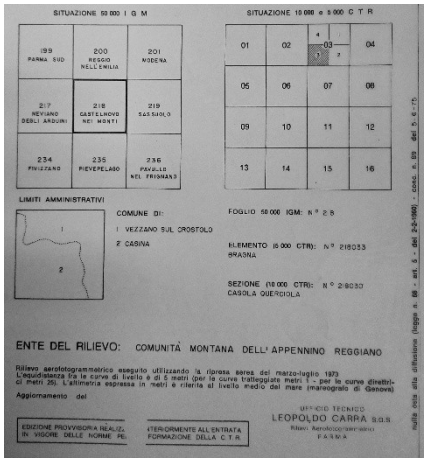


Fig. 1. I dati dell'"elemento" 218033 Brugna (Casina, RE), edizione provvisoria della CTR della Regione Emilia-Romagna (giugno 1975, su voli aerofotogrammetrici del 1973).

3 Le prime carte regionali dell'Emilia-Romagna

Gli anni immediatamente successivi alla Legge Regionale n. 24, 19 aprile 1975, costituirono una stagione di intenso lavoro cartografico.

Poiché la gran parte delle operazioni veniva delegata, tramite appalti, a ditte private, il deposito di cauzioni a monte dei lavori da parte dei vincitori degli appalti e un calendario tassativo di consegne dei prodotti cartografici costituirono la garanzia per tempi certi in funzione di una conclusione rapida dell'opera.

Entro la fine degli anni Settanta la Carta Tecnica Regionale dell'Emilia-Romagna poteva quindi dirsi conclusa.

Già la Legge Regionale istitutiva del 1975 faceva però riferimento a carte tematiche basate sulla cartografia regionale. Coerentemente con ciò, la Regione Emilia-Romagna cominciava, sin dagli anni elaborativi della CTR stessa, la stesura di tali carte.

Una delle primissime (1976) fu una carta dell'uso del suolo regionale in scala 1:25.000, adottando quindi in questo caso il taglio cartografico delle tavolette IGM (Motta, 1980, p. 114, n. 83; Vianello, 1981; https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download-data/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo/1976-coperture-vettoriali-uso-suolo-semi-dettaglio).

Focalizzarsi sin dagli esordi su una carta dell'uso del suolo regionale rispondeva a una delle ragioni fondative stesse, già analizzata *supra*, della CTR, ossia il suo impiego in sede di pianificazione territoriale e in funzione della realizzazione di urbanizzazioni e infrastrutture.

Nel 1977 l'ente regionale promuoveva alcune "Carte dell'insediamento storico", ossia carte tematiche con la georeferenziazione delle emergenze archeologiche e storico-architettoniche di lunghissimo periodo, dalla preistoria all'età contemporanea (Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e dei Suoli, 1977a; Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e dei Suoli, 1977b). Negli anni, questa esperienza sarebbe poi confluita nella collana "IBC dossier" dell'Istituto per i beni artistici, culturali e naturali della Regione Emilia-Romagna, organizzata in saggi introduttivi, schede di censimento e cartografia tematica su base CTR.

Nei primissimi anni Ottanta era poi la volta di carte della vegetazione su scala corografica (Ferrari, 1981) oppure locale (Ubaldi, 1981), sempre derivata dalla CTR. La precoce enfasi dedicata alla cartografia della vegetazione regionale (cfr. anche Pirola, 1977) si ricollegava direttamente al coevo programma di istituzione di aree protette regionali in Emilia-Romagna, altro argomento di delega dallo Stato alle Regioni a statuto ordinario: sulla base della Legge Regionale n. 2, 24 gennaio 1977, *Provvedimenti per la salvaguardia della flora regionale* (https://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/articolo?urn=er:assemblealegislativa:legge:1977;2), e di nuovo ancorandosi, in relazione a confini, progettazione e zonizzazione, alle nuove CTR, nel 1982 veniva istituito il Parco regionale Boschi di Carrega (Collecchio e Sala Baganza, PR), primo parco regionale dell'Emilia-Romagna (Decreto Presidente Giunta regionale n. 136, 2 marzo 1982; https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-

natura2000/consultazione/normativa/norme-rer/istituzione-parchi-regionali). Nasceva a quel punto, anche grazie alla cartografia regionale, l'embrione del sistema delle aree protette dell'Emilia-Romagna, in un territorio che allora non ospitava alcun Parco nazionale, unica tipologia di area protetta esistente sino a quel tempo.

4 Conclusioni

Quelle sintetizzate sopra sono state le traiettorie esplicite di genesi e primo sviluppo della Carta Tecnica Regionale della Regione Emilia-Romagna e delle carte tematiche regionali da essa derivate.

Esiste però anche una dimensione implicita, sottotraccia dell'intero processo, non dichiarata eppure ben visibile in filigrana.

I già citati D.P.R. n. 8, 15 gennaio 1972, e D.P.R. n. 616, 24 luglio 1977, avevano devoluto alle Regioni a statuto ordinario materie significative.

Nel contesto nazionale di governo centrale a guida della Democrazia Cristiana e di governo regionale emiliano-romagnolo a guida del Partito Comunista Italiano sin dalla prima legislatura regionale, e nell'ancor più vasto quadro della Guerra Fredda, il produrre, in tempi certi e a costi ragionevoli, uno strumento accurato, efficace e imprescindibile come la CTR in campi come la programmazione territoriale, la gestione del territorio, la sfera ambientale, veniva assurto a dimostrazione, nei fatti, del buongoverno regionale in opposizione ai tempi spesso lunghi e alla frequente inefficienza del governo centrale.

Non solo: proprio un tema come una pianificazione coordinata ed entro le "regole", che da questo momento poteva essere progettata e monitorata tramite la CTR regionale, costituiva un argomento storico della sinistra italiana di scontro con la DC in relazione alle frequenti "amnesie" in fatto di edilizia, nuove urbanizzazioni, tutela dei centri storici.

In estrema sintesi, in una Regione come l'Emilia-Romagna che mantenne nel tempo, attraverso tutte le legislature regionali, il medesimo "colore politico", la CTR diventava una delle tante evidenze di quello che è poi stato definito "modello emiliano-romagnolo" (De Maria, 2024), contemporaneamente attento alle istanze sociali e ambientali, così come a quelle del mondo produttivo ed economico.

Emblematica dei significati, del dibattito e delle aspettative, politici e scientifici, connessi alla produzione cartografica emiliano-romagnola fu la tavola rotonda *La cartografia tematica nella pianificazione regionale*, tenutasi nel 1976 sotto l'egida della Regione Emilia-Romagna, i cui atti vennero editi l'anno successivo. L'intervento di apertura di Sergio Cavina (1977, pp. 5-6), Presidente della Giunta della Regione Emilia-Romagna, concludeva infatti che

> Sul controllo dell'uso del suolo e sulla sua tutela si gioca oggi la partita per uno sviluppo economico diverso. Occorre però, affinché le regioni difendano gli interessi della collettività, che i lavoratori prendano coscienza dei reali problemi che sono alla base dello scontro per l'uso del territorio; occorre cioè puntare decisamente su una partecipazione che realizzi un sistema di democrazia effettiva, da qui nascerà la consapevolezza degli squilibri territoriali. (…) È infatti ormai generale convinzione che il possesso di una moderna cartografia sia

> assolutamente essenziale per la moderna pianificazione e programmazione industriale, urbanistica, agricola; per la conoscenza dell'ambiente naturale, per l'utilizzazione delle sue risorse, la prevenzione del suo dissesto e del suo inquinamento, ed in generale per una razionale ed armoniosa regolazione del rapporto tra l'uomo e la terra su cui vive. (…) È in questo spirito che la Regione Emilia-Romagna si è fornita, come Voi tutti sapete, di una legge per la formazione di una cartografia regionale di cui l'art. 1 pone in evidenza i due scopi fondamentali del provvedimento. L'uno di dotare la Regione di una carta planoaltimetrica di base in scala 1:5000 mediante restituzione aereofotogrammetrica [sic], l'altra di dotare la Regione di una esauriente cartografia tematica e delle apparecchiature e strumenti necessari, nonché di favorire ricerche e studi a livello scientifico per la conoscenza del territorio.

Sul piano culturale ed epistemologico, negli stessi atti i geografi Lucio Gambi (1920-2006) e Massimo Quaini (1941-2017) rimarcavano la grande novità di una carta di elaborazione e usi civili quali la CTR. Se Gambi (1977, p. 18), in quegli anni Presidente dell'IBC della Regione Emilia-Romagna (ente, come visto, che sfruttava la neonata produzione cartografica regionale), sottolineava come la cartografia regionale risentisse talvolta troppo del "carattere militare" delle carte IGM ad essa antecedente, enfatizzando ad esempio gli elementi di ostruzione o di facilitazione all'eventuale passaggio delle truppe (dai campi recintati, ai corsi d'acqua, ecc.), Quaini (1977, p. 80) paventava i rischi connessi a considerare le CTR un fine, e non un mezzo: secondo lui, più che istituti cartografici, le Regioni si sarebbero dovute dotare di istituti di ricerca applicata che producevano e utilizzavano la cartografia.

Ad essi rispondeva, entro lo stesso volume, Carlo Traversi (1977), già in servizio presso l'IGM, difendendo il secolare lavoro svolto dall'Istituto Geografico Militare, peraltro istituzionalmente affidatogli dal Regno d'Italia prima e dalla Repubblica italiana poi.

Dibattiti a parte, il supporto cartografico a grande scala da tempo atteso e fortemente voluto era ora pronto in Emilia-Romagna, in sensibile anticipo rispetto a molte Regioni italiane.

Riferimenti bibliografici

Cavina, S.: [Senza titolo]. In: La cartografia tematica nella programmazione territoriale. Atti della tavola rotonda (Bologna, 30 settembre 1976), pp. 5-8. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1977).

Comitato Organizzatore della Conferenza Nazionale sulla Cartografia: Allegato alla relazione sullo "Stato e prospettive di sviluppo dei servizi cartografici nazionali". Dati ed indagini preliminari. In: Regione Toscana, Giunta Regionale, Conferenza nazionale sulla cartografia (Firenze, 9-11 aprile 1979), pp. 533-563. Regione Toscana, Pisa (1980).

De Maria, C. (a cura di): Il "modello emiliano" nella storia d'Italia. Tra culture politiche e pratiche di governo locale, Bradypus, Bologna (2014).

Ferrari, C. La cartografia della vegetazione in Emilia-Romagna. In: Testoni, P. (a cura di) La cartografia della vegetazione per la gestione del territorio, pp. 33-52. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1981).

Fondelli, M.: Le strutture operative. In: Regione Toscana, Giunta Regionale, Conferenza nazionale sulla cartografia (Firenze, 9-11 aprile 1979), pp. 168-185. Regione Toscana, Pisa (1980).

Gambi, L.: Come intendere la storicità di una cartografia regionale ai fini della pianificazione. In: La cartografia tematica nella programmazione territoriale. Atti della tavola rotonda (Bologna, 30 settembre 1976), pp. 15-18. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1977).

Marussi, A.: La carta tecnica integrale ed il governo del territorio. In: Giunta Regionale del Veneto, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Cartografia integrale per la gestione del territorio. Atti del Convegno (Venezia, 6-8 aprile 1978), pp. 17-21. Giunta Regionale del Veneto, Vicenza (1979).

Motta, G.: La cartografia italiana e le sue tendenze attuali. In: Di Blasi, A., Zunica, M. (a cura di) Cartografia tematica regionale. Strumento per la conoscenza e la programmazione territoriale. Atti del convegno (Catania, 13-15 settembre 1979), pp. 59-118. A.Ge.I, Roma (1980).

Pirola, A.: Precisazioni sul tema “vegetazione”. In: La cartografia tematica nella programmazione territoriale. Atti della tavola rotonda (Bologna, 30 settembre 1976), pp. 77-78. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1977).

Quaini, M.: [senza titolo]. In: La cartografia tematica nella programmazione territoriale. Atti della tavola rotonda (Bologna, 30 settembre 1976), pp. 79-80. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1977).

Regione Emilia-Romagna: Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5000. Formazione della C.T.R., capitolato speciale d’appalto, norme per il disegno e segni convenzionali. Calderini, Bologna (1976).

Regione Emilia-Romagna: Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5000. Formazione della C.T.R., capitolato speciale d’appalto, contenuto, norme per il disegno e segni convenzionali, II edizione. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1980).

Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e dei Suoli: Gropparello. Carta dell’insediamento storico. Rilevamento e ricerche. Giunta Regionale dell’Emilia-Romagna, Bologna (1977a).

Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e dei Suoli: Mercato Saraceno. Carta dell’insediamento storico. Centro Stampa della Regione Emilia-Romagna, Bologna (1977b).

Rigamonti, P.: Relazione a cura del gruppo tecnico interregionale. In: Regione Toscana, Giunta Regionale, Conferenza nazionale sulla cartografia (Firenze, 9-11 aprile 1979), pp. 32-44. Regione Toscana, Pisa (1980).

Traversi, C.: Didattica cartografica tematica. In: La cartografia tematica nella programmazione territoriale. Atti della tavola rotonda (Bologna, 30 settembre 1976), p. 55. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1977).

Ubaldi, D.: La vegetazione di Monte Sole (Bologna) con carta 1:10.000. In: Testoni, P. (a cura di) La cartografia della vegetazione per la gestione del territorio, pp. 85-104. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1981).

Vianello, G.: Una moderna cartografia come strumento di base per la pianificazione territoriale. L’esperienza dell’Emilia-Romagna. In: Di Blasi, A., Zunica, M. (a cura di) Cartografia tematica regionale. Strumento per la conoscenza e la programmazione territoriale. Atti del convegno (Catania, 13-15 settembre 1979), pp. 181-192. A.Ge.I, Roma (1980).

Vianello, G.: La cartografia dell'utilizzazione reale del suolo come strumento di base per una corretta gestione del territorio. In: Testoni, P. (a cura di) La cartografia della vegetazione per la gestione del territorio, pp. 53-64. Regione Emilia-Romagna, Bologna (1981).

Sitografia

https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/consultazione/normativa/norme-rer/istituzione-parchi-regionali.
https://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/articolo?urn=urn:nir:regione.emilia.romagna:legge:1975-04-19;24, ultimo accesso 2026/10/02.
https://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/articolo?urn=er:assemblealegislativa:legge:1977;32, ultimo accesso 2026/10/02.
https://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/articolo?urn=er:assemblealegislativa:legge:1977;2, ultimo accesso 2026/10/02.
https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download-data/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo/1976-coperture-vettoriali-uso-suolo-semi-dettaglio, ultimo accesso 2026/10/02.

Il ruolo della Carta da Difesa di Ignazio Porro nel Deep Mapping di Genova

Matteo Previtera

[1] Comune di Genova, Area Opere Pubbliche e Manutenzioni, Direzione Progettazione
mprevitera@comune.genova.it

Abstract. L'evoluzione delle metodologie di analisi e del dibattito scientifico sulla rappresentazione dei luoghi geografici negli ultimi decenni sono virati verso concetti più complessi che correlano tra loro una pluralità di discipline.

La semplice mappatura in senso puramente tecnico si integra con il *Deep Mapping*, quale intreccio tra il luogo fisico, le storie che lo accompagnano, le memorie (vere e leggendarie), le pratiche vissute e le espressioni artistiche.

Da alcuni anni il Comune di Genova studia in maniera approfondita la *Carta da Difesa* della città realizzata da Ignazio Porro nel 1838.

Quest'articolo vuole dimostrare come una carta storica possa costituire il nucleo generativo del Deep Mapping di Genova.

Parole chiave: Deep Mapping, Carta da Difesa di Ignazio Porro, Cartografia Storica.

1 Introduzione

La rappresentazione della città storica sconta il problema di fondo del grado di attendibilità delle fonti prese in considerazione. Non si tratta, perlopiù, di mettere in discussione l'affidabilità del dato, quanto piuttosto la sufficiente rispondenza geometrica della rappresentazione. Questo in quanto la base conoscitiva primaria della ricostruzione della forma urbana della città storica fa riferimento a cartografie dell'epoca presa in esame dallo studio.

È noto come la comparazione tra la cartografia contemporanea e quella storica possa avere senso a partire dalla rivoluzione scientifica Sette-Ottocentesca.

Gli ultimi decenni hanno visto crescere l'interesse degli specialisti nei confronti della cartografia storica, considerata l'imprescindibile strumento di conoscenza di una città che non esiste più nelle forme, nel concetto abitativo, di uso del suolo e di sviluppo urbano di quando la mappa fu disegnata.

Trattandosi tuttavia di cartografia tradizionale, l'embrione dei primi studi si scontrò con i limiti del modello cartaceo, bidimensionale (sia per ciò che riguarda il limite della rappresentazione altimetrica, sia in senso lato per ciò che riguarda la stratificazione dell'informazione).

La digitalizzazione ha posto rimedio a questi problemi permettendo la georeferenziazione della cartografia storica e la sua successiva vettorializzazione, consentendo, al contempo, la creazione di una serie di layer in grado di dividere oggetti e creare topologie.

Il concetto di Deep Mapping è l'ultima evoluzione in tema di analisi e rappresentazione territoriale. In realtà il concetto viene ampliato oltre i limiti del contesto geografico, consistendo in un approccio multidisciplinare che abbraccia storia

urbana, architettura, urbanistica, ecologia, geologia, antropologia e può esplicarsi negli ambiti del turismo, della gestione dei beni culturali, del patrimonio museale.

Una nuova prospettiva che vede l'utilizzo del GIS non più come mero strumento cartografico, bensì come vero e proprio ambiente di ricerca.

Da alcuni anni il Comune di Genova studia in maniera approfondita la *Carta da Difesa* della città realizzata da Ignazio Porro nel 1838.

Si tratta di una serie di elaborati di alto valore scientifico, la cui storia della realizzazione è ampiamente documentata ed è stata in grado di fornire una molteplicità di conoscenze che proiettano i suoi contenuti oltre lo scopo per cui erano stati realizzati.

Questo articolo intende analizzare le possibilità dell'applicazione del Deep Mapping alla cartografia militare ottocentesca di Ignazio Porro, quale strumento per ricostruire l'evoluzione urbana di Genova e trasformare una carta storica in un sistema informativo spaziale multidimensionale.

Un caso studio che potrà essere facilmente replicato applicandolo ad altre città, creando un'impalcatura logica che si collochi tra storia della cartografia**,** Spatial Humanities[1]**,** Knowledge Graph[2]**,** Digital Heritage[3] **e** Historical Digital Twins[4].

L'Historical Digital Twins costituirà inoltre un ulteriore sviluppo del Deep Mapping, permettendo di andare oltre le conoscenze intrinseche delle singole fonti che popoleranno il database spaziale, generandone di nuove e inedite.

2 Ignazio Porro e la nascita della cartografia moderna

A Genova, tra il 1835 e il 1838, Ignazio Porro[5] sperimentò il suo innovativo metodo di rilievo (da lui denominato *Celerimensura*[6]) che gli permise di realizzare una cartografia il cui dettaglio non aveva precedenti.

Partendo da una triangolazione generale, a cui affiancò l'invenzione del primo tacheometro, l'utilizzo della stadimetria grazie alla correzione strumentale e teorica della formula di von Reichenbach (oltre all'adozione delle tavole logaritmiche di Gunter e uno tra i primi utilizzi in Italia della rappresentazione altimetrica tramite l'uso delle curve di livello), Porro fu in grado di realizzare la sintesi perfetta tra alta geodesia e

[1]Le Spatial Humanities sono un campo di studio che unisce sinergicamente le scienze umanistiche e la geografia attraverso mappe e strumenti digitali. La storia, l'arte e la letteratura vengono analizzate attraverso i luoghi cui si riferiscono e lo spazio che le racchiude.

[2]Il Knowledge Graph (anche detto grafo delle conoscenze) è una rete che collega tra loro concetti, luoghi, cose e persone individuando le relazioni che li accomunano.

[3]Il Digital Heritage è l'insieme digitale delle risorse culturali, artistiche, storiche e scientifiche.

[4]Anche detto Gemello Digitale Storico, è la versione evoluta della copia virtuale di un oggetto reale (Digital Twin), in grado di interagire attraverso l'elemento temporale per analizzare eventi trascorsi in grado di spiegare il comportamento attuale del modello.

[5]Ignazio Porro (1801-1875) fu un mirabile scienziato, teorico, inventore e costruttore nel campo dell'ottica di precisione. Al tempo ufficiale del Regno di Sardegna, fu inviato a Genova allo scopo di realizzare una cartografia che descrivesse il sistema difensivo della città nel modo più accurato e preciso possibile. Genova era infatti diventata parte del Regno di Sardegna e la conoscenza geografica della città era indispensabile ai Savoia per apprendere, amministrare e, in maniera sottaciuta, controllare il dissenso della popolazione.

[6]Tacheometria, nella versione francese

geometria pratica[7].

Creò una mappa di una città ottocentesca che solo pochi anni dopo cambiò integralmente e in maniera violenta i proprio connotati, espandendosi oltre la cinta muraria difensiva cinquecentesca, creando nuovi assi di collegamento e nuovi quartieri di abitazione.

La carta di Porro ci restituisce, quindi, una Genova inedita, dalle forme e dalle attitudini non dissimili da una città di antico regime, le cui pulsioni che indirizzavano l'espansione urbana erano già evidenti e parzialmente in atto.

2.1 Il quadro d'unione, ossia Carta Sinerografica

Il quadro d'unione, denominato Carta Sinerografica, è costituito da una matrice quadrata 10x10 all'interno della quale sono collocati i fogli del rilievo in scala 1:2000. La numerazione delle tavole non è consecutiva, bensì rispetta un criterio posizionale all'interno della matrice. Non tutte le posizioni della matrice sono occupate dai fogli del rilievo: ciò spiega il fatto che l'ultimo dei fogli sia il novantasettesimo ma che il numero complessivo delle tavole sia settantaquattro.

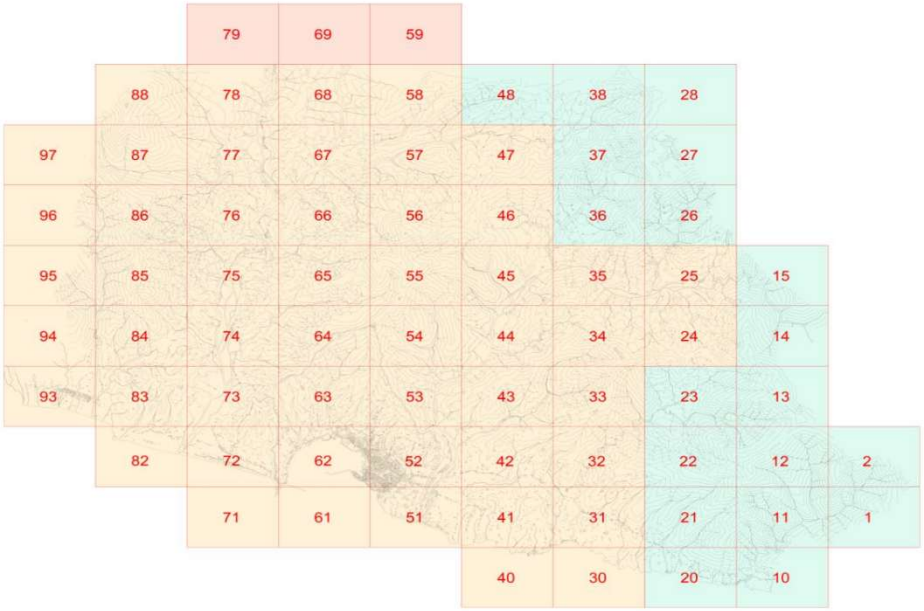


Fig. 1. La Carta Sinerografica

[7]L'insieme delle tecniche e degli strumenti ad applicazione dei concetti matematici nella misura dello spazio.

2.2 Analisi su un'ipotesi di Poligonazione

Il rilievo di dettaglio avvenne con la tecnica della celerimensura, un'invenzione di Ignazio Porro che proprio attraverso questa carta pose a battesimo.

Nello specifico si è scelto quale campione per quest'analisi il foglio 52 della Carta di Porro che abbraccia la porzione orientale della città vecchia, parte della sua cinta muraria bastionata che corre lungo il torrente Bisagno ed una limitata porzione di territorio extraurbano, nella valle del Bisagno stesso.

Il foglio marca la presenza di 88 stazioni topografiche[8], contrassegnate da numerazione romana. Purtroppo senza l'ausilio dei *libretti di campagna*[9], contenenti le misure angolari, si può solo ipotizzare il percorso seguito dalla poligonazione.

Fino a che il percorso ha mantenuto una sua coerenza logica, pertanto, si è privilegiata l'unione delle stazioni topografiche numericamente successive, l'una nei confronti dell'altra.

Ma è a questo punto, al termine del censimento delle stazioni presenti nel foglio, che l'analisi ha evidenziato la presenza di diversi punti stazione aventi la medesima numerazione. Ciò è probabilmente spiegabile dal fatto che all'interno del foglio si incontrano due lotti di rilevazione differenti, l'uno misurato internamente alle mura, l'altro sulle fronti esterne delle mura stesse.

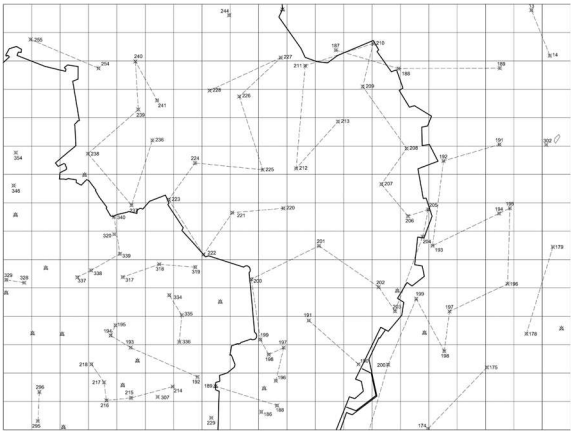


Fig. 2. Analisi del foglio 52

[8] Il punto stazione rappresenta in pianta la posizione assunta dallo strumento topografico, per rilevare radialmente una porzione di territorio, attraverso il calcolo delle coordinate dei singoli punti di dettaglio. I vari punti stazione, uniti tra loro, rappresentano i vertici della poligonazione. L'unione tramite poligonazione, consente l'aggregazione delle singole porzioni rilevate, in un unico compendio cartografico. Le stazioni topografiche presenti sulla carta di Porro non riportano mai la notazione altimetrica del punto, probabilmente per una pura ragione di risparmio dello spazio.

[9] Il Libretto di Campagna (o libretto delle misure), era il quaderno in cui venivano annotate le misure angolari azimutali e zenitali e le letture alla stadia graduata, di ogni singolo punto rilevato. Questi dati sarebbero stati ulteriormente elaborati a tavolino mediante il calcolo delle coordinate tridimensionali.

2.3 Le basi misurate della triangolazione

L'analisi della cartografia rivela la presenza di ben quattro diverse basi misurate segnate sulle tavole componenti il rilievo.

A tratteggio, lungo la linea di costa, e perpendicolare al torrente Polcevera, corre una "*antica base*", probabilmente creata dai cartografi francesi all'epoca in cui Genova faceva parte dell'impero napoleonico.

Lungo il Polcevera è ben individuata quella che è a tutti gli effetti la base ufficiale utilizzata per rapportare la triangolazione.

Ai piedi della Lanterna corre una base cortissima.

Lungo il torrente Bisagno, inoltre, è segnata un'ulteriore base che unisce due soli punti contrapposti denominata "*base di verificazione progettata*".

Ho elencato qui di seguito la collocazione delle quattro basi sui rispettivi fogli della Carta di Porro, al fine di facilitarne l'individuazione cartografica.

Tabella 1. Elenco delle basi misurate della triangolazione

Base	Collocazione	Note
Base del Polcevera	Foglio **73** Foglio **74** Foglio **75**	Il tracciato ricalca quello della base di von Zach, come espressamente riferito nella relazione, da Porro. Seppure con una differenza di punti intermedi, che nella versione di Porro sono molto meno.
Antica base	Foglio **72** Foglio **82**	Perpendicolare alla precedente, lungo la via di costa
Base (cosiddetta) *di verificazione progettata*	Foglio **43** Foglio **44** Foglio **45**	Pur non essendovi conferme circa il suo effettivo utilizzo, la sua presenza sui fogli di rilievo anche solo a tratteggio, fa comunque propendere per quest'ipotesi.
Base (cortissima) presso la Lanterna	Foglio **62**	

3 La Carta *da Difesa* di Genova come "nucleo generativo" di un Sistema di Deep Mapping

La Carta di Porro, al di là del suo intrinseco valore di fonte storica, viene considerata quale sistema informativo pre-digitale.

Col suo estro anticipatore e la sua lungimiranza che andò ben oltre la previsione di quello che sarebbero riuscite a fare le generazioni immediatamente a lui successive[10],

[10]Il progetto visionario di Porro mirava a organizzare tutta la cartografia successiva a quella, utilizzando il suo metodo. Egli si spinse a ipotizzare di racchiudere il rilievo in un elenco di coordinate tridimensionali in grado di soppiantare la mappa cartacea. Un'anticipazione

creò una mappa che era un autentico contenitore strutturato di informazioni.

Il Comune di Genova ha già avviato sperimentazioni di integrazione tra questa carta e il suo modello digitale tridimensionale della città.

Ciò permetterà di ottenere una rappresentazione digitale della Genova del 1838 per mezzo di una suddivisione articolata dei dati, attraverso livelli gerarchici dell'informazione riguardanti la geometria, gli edifici, la viabilità, le opere militari e le fortificazioni, le quote altimetriche rilevate, la vegetazione, la morfologia e l'idrografia, la toponomastica, la simbologia e le annotazioni presenti sulla carta.

Sarà altresì possibile ricostruire in parte la storia vera e propria della rilevazione, sia attraverso la fonte principale costituita dalla Relazione Finale del lavoro redatta da Ignazio Porro[11], sia attraverso le costruzioni grafiche che lo stesso autore della carta ci ha voluto inusualmente lasciare. Sono infatti presenti tutte le stazioni topografiche di rilievo del dettaglio, il tracciato della base misurata utilizzata per rapportare la carta (oltre, come visto nel paragrafo precedente, ad altre tre basi misurate collocate in vari punti della città), la carta riassuntiva della triangolazione generale.

4 La carta storica come fonte di conoscenza del territorio

Nell'era digitale in cui ormai siamo immersi, occorre ripensare integralmente il concetto di cartografia storica.

Per molti anni le carte antiche sono state ritenute prevalentemente puro documento iconografico descrittivo di un determinato e ben limitato periodo storico. Nella realtà ogni carta è frutto della società che ne ha commissionato la realizzazione e la rappresentazione in essa contenuta non è quasi mai oggettiva e indipendente.

Il cartografo dell'epoca operava secondo selezione e omissione: selezione degli oggetti che la carta intende rappresentare e ai quali attribuire maggior enfasi rispetto al contesto; omissione di ciò che è ritenuto non importante o non opportuno mostrare, anche in una logica di segretezza militare.

La carta di Porro dovrà essere analizzata accuratamente in modo tale che eventuali intenti di piegare la realtà a esigenze di convenienza siano individuati e opportunamente valutati e mitigati in sede di sintesi.

Ma già da una prima lettura si può ragionevolmente affermare che la rappresentazione genovese di Porro sia essenzialmente fedele e completa, oltre che geometricamente rispondente ai criteri di precisione che la nuova realtà imponeva.

Il motivo che fa supporre l'attendibilità della carta riguarda la natura stessa dell'opera: si tratta di una carta militare e non di una rappresentazione di propaganda. Tutti gli elementi rilevati sono di estremo interesse e costituiscono il principale motivo di realizzazione della cartografia, cioè quello della conoscenza del territorio da parte della nuova gerarchia dominante: nulla (per quanto è possibile valutare), sembra volutamente essere stato omesso.

Inoltre si può facilmente notare che anche le opere di natura militare, le

teorica di quella che è la carta numerica come la conosciamo oggi.

[11]La relazione integrale è stata pubblicata in A. Fara *La carta di Ignazio Porro. Cartografia per l'architettura militare nella Genova della prima metà dell'ottocento*, Roma, Stato Maggiore dell'Esercito-Ufficio Storico, 1986

fortificazioni e la cinta muraria difensiva non trovano particolare enfasi rispetto al contesto della rappresentazione circostante che, anzi, ne completa il disegno in un'illustrazione armonica del territorio, in cui nessun elemento prevarica l'altro.

Ci si trova al cospetto di una carta assai moderna nella sua rigida determinazione a riprodurre tutto ciò che l'occhio del cartografo fosse in grado di individuare durante la campagna di rilevazione.

Parrebbe un aspetto singolare, se non si conoscesse l'ossessione di Porro per la ricerca della perfezione. E allora tutto ciò, visto sotto questa lente, giustifica l'eccezione rappresentata dalla Carta di Genova.

5 La digitalizzazione della mappa e il cambio di paradigma informativo

L'integrazione tra sistemi digitali e carte storiche può avvenire solo attraverso la scansione ad alta risoluzione della mappa originale. Questo passaggio, se vogliamo dire, banale, accompagnato dalla necessaria georeferenziazione della carta con strumenti GIS, permette l'estrazione di una quantità di informazioni superiori a quelle deducibili dal documento primario nella sua forma cartacea.

La prospettiva viene sovvertita e la mappa non mostra più necessariamente solo quello che viene in esso rappresentato, ma si apre a una più complessa analisi delle conoscenze territoriali che possono essere ricavate attraverso la correlazione di più elementi opportunamente distinti e catalogati.

Il passaggio concettuale tra contenuti GIS e vero e proprio Deep Mapping è costituito dalla diversa interpretazione delle informazioni e dalla loro continua interconnessione, in grado di generare contenuti che vanno oltre le singole specificità e oltre la loro semplice rappresentazione spaziale.

In ciò la mappa rimane elemento cruciale di collegamento ma non è più necessariamente il medium privilegiato nella rappresentazione della sintesi dei risultati.

In un futuro prossimo alcune di queste attività di sintesi in formato testuale di relazione e tabelle potranno essere svolte da agenti IA opportunamente istruiti.

Dovremo imparare a sostituire alcune delle parole chiave tipiche della concezione dei database spaziali; i *layer* diventeranno *relazioni*, le *geometrie* potranno essere interpretate più diffusamente come *conoscenze*, i *database* assumeranno un ruolo più evocativo se intesi come *narrazioni*, dagli *oggetti statici* passeremo a descrivere dei *processi dinamici*, la *precisione* diventerà *interpretazione*.

6 Problemi e criticità di questo nuovo approccio

Come ogni cambiamento particolarmente innovativo nel modo di concepire la rappresentazione del territorio, non mancano una serie di problemi che occorre analizzare e risolvere ancor prima di affrontare l'iter di realizzazione del Deep Mapping.

La prima criticità si pone fin dall'acquisizione della carta, comporta inevitabilmente una riduzione digitale della fonte. Ciò implica una selezione che riduce il grado di informazione desunto e quindi una perdita di dati. Si tratta di un problema non banale, che si può riscontrare anche nel momento dell'interpretazione cartografica.

Paradossalmente la costruzione del modello digitale della carta storica può risultare più preciso della fonte da cui proviene. Questo perché talvolta la carta storica indugia laddove non arriva la conoscenza del rilevatore, mentre l'operatore (umano o automatizzato che sia), cui è demandata la fase della vettorializzazione, non si può permettere indecisioni o, peggio ancora, vuoti di rappresentazione.

Il modello digitale che deriva dalla carta storica, inoltre, non è mai neutro in quanto può interpretare in maniera differente categorie e relazioni. Occorre distinguere in maniera netta e inequivocabile le eventuali operazioni di modellazione di elementi desunti dalla carta storica dalla mappa originale stessa. La modellazione più banale rappresenta sempre e comunque un'interpretazione potenzialmente distorcente del segno cartografico originale.

Una soluzione mitigatrice a questi problemi è quella di non trascurare mai la figura dello storico in sede di analisi e creazione del Deep Mapping. Sebbene appaia scontato che a occuparsi di cartografia storica siano chiamati degli specialisti della materia, lo è meno quando l'attenzione è tutta rivolta all'aspetto tecnico-informatico della trasposizione della mappa nel suo corrispondente modello digitale. Avere una figura competente, in grado di interpretare correttamente il linguaggio della mappa (che per inciso varia da mappa a mappa, da periodo storico a periodo storico e da cartografo a cartografo), solleva l'informatico da una serie di decisioni per le quali non avrebbe tutte le competenze necessarie.

La complessità del modello, infine, può essere causa di una difficile comprensione e una complessa interrogazione. Se si aspira alla creazione di modelli ricchi di informazioni bisogna utilizzare strumenti di analisi in grado di semplificarne la lettura.

7 Il concetto di Deep Mapping applicato alla Carta di Porro

In questo senso realizzare un Deep Mapping partendo da una carta storica e, nello specifico caso in questione, dalla Carta di Porro, significa capire che la carta non dovrà mai essere considerata come l'obiettivo finale del lavoro, ma piuttosto costituire il punto di ingresso verso una conoscenza multidimensionale.

Differentemente da quanto avviene con la cartografia storica, dove la carta è il vero centro di interesse di chi ne fruisce, il Deep Mapping si focalizza sul territorio e sulla rete di conoscenze che lo descrivono.

Usare la Carta ottocentesca di Porro vuol dire stabilire un punto zero della conformazione urbana della città. Una fotografia geometrica la cui precisione è sufficiente a dialogare con le carte contemporanee e rappresentare la base di partenza per la ricostruzione a ritroso della Genova preottocentesca.

Le mappe precedenti saranno utilizzate come contenitore di preziose informazioni in grado di descrivere una città ormai sparita o pesantemente modificata.

Queste mappe, che potremmo impropriamente definire pre-geometriche, subiranno un'opera di georeferenziazione e normalizzazione attraverso la loro inclusione nel sistema spaziale comune costituito a partire dalla Carta di Porro, correggendo le deformazioni e le differenze di scala, rendendo confrontabili dati prodotti in periodi storici differenti.

Un'operazione che sarà il più possibile automatizzata ma che dovrà inizialmente

subire un rigoroso controllo formale da parte di un operatore, al fine di minimizzare gli errori interpretativi che le interferenze tra più cartografie dovessero eventualmente generare.

Il processo di creazione di questo database spaziale sarà forzosamente più lento nella fase di acquisizione dei dati spaziali che precedono il punto zero costituito dalla Carta di Porro, per poi diventare praticamente istantaneo allorquando il caricamento delle informazioni avverrà a partire dal GIS strutturato e adottato dal Comune di Genova.

Questa operazione, che mette in relazione tra loro le varie carte storiche della città in una cronologia che definisce la mutazione della forma urbana di Genova, consente di aggiungere la dimensione temporale a quella spaziale, generando un processo di storicizzazione dell'ambiente geografico.

Operando con il giusto rigore filologico, il modello finale costituirà una sorta di macchina del tempo attraverso cui muoversi avanti e indietro nei secoli in una città che cambia sotto gli occhi dell'osservatore.

Ma la carta non è solo elemento geometrico: è anche e, soprattutto, un'eccezionale testimonianza del proprio tempo. Da essa può essere estratta una pluralità di dati di estremo interesse.

Da un possibile studio sui toponimi, a quello sulla rete di edifici di carattere militare, a tutti i complessi monastici, le chiese, i conventi e tutto ciò che era all'epoca il patrimonio immobiliare ecclesiale.

L'assetto del territorio in funzione delle grandi trasformazioni urbane che negli anni successivi avrebbero stravolto la città.

La mappatura di tutti i cimiteri preesistenti alla costruzione di quello monumentale di Staglieno.

Uno studio sull'uso del suolo legato all'agricoltura, con l'individuazione delle differenti colture, i sistemi di canali irrigui, i numerosi mulini ad acqua per la macina di grano e olive.

8 Conclusioni

L'analisi sviluppata consente di affermare come la Carta da Difesa di Porro assuma un ruolo che trascende quello di semplice fonte cartografica**,** diventando una struttura informativa complessa che anticipa, per metodo di rappresentazione e organizzazione dei dati, alcuni dei principi moderni che caratterizzano i sistemi informativi geografici contemporanei.

Ciò si deve alla particolarità stessa della mappa presa a campione e di un nuovo modo di concepire la fonte cartografica che prescinde dall'applicazione di nuove tecnologie digitali a carte storiche.

Il Deep Mapping offre il quadro metodologico all'interno del quale trasferire una carta storica in un ambiente digitale multidimensionale, capace di integrare dati geometrici, documentali, iconografici e narrativi.

E la carta può essere considerata contemporaneamente sia *documento storico*, sia *rappresentazione territoriale*, sia *dato* (in quanto i suoi contenuti possono essere estratti e trasformati in informazioni strutturate), sia *relazione* di collegamento tra oggetti e fenomeni territoriali, sia *interfaccia* di interconnessione tra informazioni eterogenee,

sia *strato temporale* all'interno di una timeline costituita dalle informazioni desunte dalle cartografie più antiche fino alle digitali contemporanee, *nodo di conoscenza* in quanto permette il collegamento ad altre fonti e, infine, *strumento narrativo* della storia dei luoghi.

Si tratta di un metodo replicabile in quanto la procedura sviluppata per la Carta di Genova potrebbe essere applicata ad altre carte storiche di grande valore scientifico, configurandosi come un modello generale per la valorizzazione digitale del patrimonio cartografico.

La digitalizzazione di una carta storica non fa, di per sé, il Deep Mapping, ma una particolare mappa come quella realizzata da Porro è un elemento cardine per un Deep Mapping che voglia porre le sue basi sullo sviluppo urbano della città.

Successivamente sarà possibile integrare il modello digitale derivato dalla carta attraverso le fonti più disparate, e la messa in relazione dei dati consentirà quel salto di qualità necessario ad andare oltre una struttura GIS tradizionalmente intesa.

Che poi non è altro che la trasposizione in chiave moderna del desiderio mai realizzato di Ignazio Porro, quando si batteva affinché la futura cartografia del regno e poi la carta catastale venissero realizzate attraverso l'utilizzo della celerimensura.

Riferimenti bibliografici

1. Bodenhamer D.J., Corrigan J., Harris T.M.,: Deep Maps and Spatial Narratives. Indiana Univ Pr. (2015)
2. Bodenhamer D.J., Corrigan J., Harris T.M.,: Making Deep Maps: Foundations, Approaches, and Methods. Londra e New York, NY: Routledge, (2022)
3. Least Heat-Moon W.,: PrairyErth: A Deep Map. Houghton Mifflin Company. (1991)
4. Palmer P., Bourke E., Mac a' Ghoill P.: Decolonial Deep Mapping, Published online by Cambridge University, (2025)
5. Previtera M., Coordinate per il futuro. Ignazio Porro e la Carta di Genova, dalla celerimensura alla cartografia numerica. 8/900-Rivista annuale del Centro Studi sulle letterature, le arti, la storia e l'economia, Fondazione Franzoni ETS, Genova. (2026).

Validazione di prodotti globali e regionali di area bruciata (Burned Area) nel progetto ESA FireCCI

Forough Rajabi[1[0009-0009-0952-0794]] e Daniela Stroppiana[1[0000-0002-5619-4305]]

[1] Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (CNR-IREA), Milano, Italy

Abstract. In questo lavoro viene presentato il protocollo di validazione del primo prodotto di aree bruciate a scala globale derivato da dati Sentinel-2 per l'anno 2023 nell'ambito del progetto ESA FireCCI. La validazione si basa sul confronto del prodotto con i perimetri di riferimento generati dalla classificazione di immagini ad alta risoluzione spaziale PlanetScope (3m).

Parole chiave: PlanetScope, Sentinel-2, metriche di accuratezza.

1 Introduzione

La validazione rappresenta il processo attraverso il quale viene valutata l'accuratezza dei prodotti regionali e globali di mappatura delle aree bruciate (*Burned Area*, BA). In questo lavoro è stato definito un protocollo per la validazione del primo prodotto di aree bruciate a scala globale generato da dati Sentinel-2 per l'anno 2023 nell'ambito del progetto ESA FireCCI (https://climate.esa.int/en/projects/fire/about/). Il protocollo include tutti i passaggi della metodologia di validazione: dalla definizione del dataset di riferimento al calcolo delle metriche di accuratezza.

2 Materiali e metodi

La validazione si basa sul confronto tra dato di riferimento e prodotto; il dato di riferimento rappresenta, per quanto possibile, la verità a terra. Tuttavia, a scala globale non è possibile raccogliere osservazioni e dati *in situ* e la procedura comunemente utilizzata si basa sulla costruzione del dataset di riferimento a partire da immagini satellitari a più alta risoluzione rispetto al dato utilizzato per generare il prodotto (in questo caso Sentinel-2) [1]. Il confronto tra riferimento e prodotto viene condotto su una serie di siti di validazione selezionati per rappresentare diverse condizioni del fenomeno osservato. In questo lavoro sono stati selezionati circa 100 siti di validazione distribuiti a scala globale. Per ciascun sito, sono stati generati perimetri di riferimento da coppie di immagini multispettrali PlanetScope (PS) (3m) e confrontati con il prodotto per il calcolo delle metriche di accuratezza (e.g., errori di omissione e commissione, coefficiente di Dice) per l'anno 2023.

I perimetri di riferimento sono stati generati mediante una procedura semi-automatica, basata sull'algoritmo XGBoost (eXtreme Gradient Boosting), applicato alle coppie di immagini PS. L'algoritmo utilizza come variabili di ingresso la riflettanza

spettrale nelle bande visibile e infrarosso, gli indici spettrali (NDVI, GEMI) e le rispettive differenze temporali calcolate tra le due date pre-incendio e post-incendio. In ciascun sito di validazione, l'algoritmo XGB è stato addestrato tramite raccolta di aree campione in condizioni bruciato e non bruciato; la classificazione automatica è stata successivamente verificata manualmente tramite fotointerpretazione per ottenere un riferimento il più accurato possibile (Fig. 1).



Fig. 1. Esempio di generazione dei perimetri di riferimento da una coppia di immagini (pre- e post-incendio) per un sito di validazione in Sud America. La classificazione automatica XGB viene ispezionata in modo sistematico tramite fotointerpretazione.

Per ciascun sito, il prodotto S-2 è stato estratto dal prodotto globale per il range di date corrispondenti all'intervallo del dataset di riferimento e ricampionato a 3m sull'area coperta dal sito. Dal confronto è stata generata la matrice di confusione e le corrispondenti metriche di accuratezza (Tabella 1).

3 Risultati

La tabella 1 rappresenta la matrice di confusione e le metriche di accuratezza derivate per un sito di validazione. Le metriche ottenute per tutti i siti sono state analizzate in funzione delle caratteristiche della vegetazione e dei regimi di incendio.

Tabella 1. Matrice di confusione per un sito di validazione (Asia); i numeri rappresentano il numero di pixel (3m) nelle diverse classi. Missed Burned/ unburned = pixel classificati come bruciati/non bruciati nel riferimento e non bruciati/bruciati nel prodotto. Metriche associate: errore di commissione=6.62%, errore di omissione=32.92%, coefficiente di Dice=78.07%.

Livello di Titolo	Agreement burned	Agreement unburned	Missed Burned	Missed unburned
N pixel x10^6	0,67	48.9	0,32	0,047

Questo lavoro è stato finanziato dal progetto FireCCI (Contratto ESA n. 4000126706/19/I-NB) dell'European Space Agency (ESA).

Riferimenti bibliografici

1. Boschetti, L., Roy, D. P., Justice, C. O.: International Global Burned Area Satellite Product Validation Protocol Part I–production and standardization of validation reference data (to be followed by part II–accuracy reporting), Committee on Earth Observation Satellites: Maryland, MD, USA, 2009.

Dai dati Copernicus all'adattamento urbano: mappatura e valutazione delle infrastrutture verdi e blu a supporto della mitigazione dell'isola di calore in Piemonte (M²UHIP)

Chiara Richiardi[1], Francesco Niccoli[1], Maria Rita Minciardi[1], Giorgio Pelassa[3], Maria Adamo[2], Mariella Aquilino[2], Marica De Lucia[2], e Saverio Vicario[2]

[1] ENEA, SSPT-IMPACT, Italia

[2] CNR-ITIAm, Italia

[3] Regione Piemonte, Italia

chiara.richiardi@enea.it

Abstract. Ricerca in itinere. Si presenta l'architettura del WP5 del progetto M²UHIP (ASI, programma I4DP_PA) per mappare e valutare le infrastrutture verdi e blu (IV/IB) del Piemonte a supporto della mitigazione dell'isola di calore urbana: una classificazione conforme a EAGLE basata su prodotti Copernicus e cartografia regionale, e una rete di 85 sensori termoigrometrici in situ. Si riportano il controllo di qualità biofisico, l'intercalibrazione dei sensori e le lezioni operative.

Parole chiave: Infrastrutture verdi e blu · Isola di calore urbana · Copernicus · EAGLE · Reti di sensori in situ · Servizi downstream.

1 Introduzione

Le infrastrutture verdi e blu (IV/IB) sono riconosciute dalla Strategia europea per la biodiversità 2030 e dal Green Deal come un cardine dell'adattamento climatico delle aree urbane, con un ruolo particolarmente rilevante nel contenimento dell'isola di calore urbana (*Urban Heat Island*, UHI). Alla chiarezza dell'indirizzo politico non corrisponde, tuttavia, una disponibilità altrettanto chiara di servizi *downstream* operativi, riproducibili e trasferibili tra città, che consentano alle pubbliche amministrazioni di mappare le IV/IB alla scala regionale e di valutarne la capacità di fornire servizi di regolazione climatica. Colmare questo divario richiede di integrare fonti eterogenee che operano a scale spaziali e temporali molto diverse: osservazione della Terra da satellite, cartografia tematica semanticamente ricca e misure in situ ad alta densità.

Questo contributo descrive l'architettura e lo stato di avanzamento, a ottobre 2026, delle attività di ENEA nel progetto M²UHIP (*Mapping and Monitoring of Urban Heat Islands in Piedmont*, CUP F13C25001160001), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana nell'ambito del programma *Innovation for Downstream Preparation – Public Administrations* (I4DP_PA) e realizzato da Regione Piemonte, ENEA, CNR-ITiAM, Università di Torino e ARPA Piemonte. I pacchetti di lavoro coordinati da ENEA (WP5101, WP5103 e WP5104) sono organizzati in due pilastri complementari: la mappatura delle IV/IB, mediante una classificazione conforme al modello EAGLE [1], e la valutazione della loro funzionalità termica, mediante una rete dedicata di sensori in situ affiancata da indicatori termici satellitari. Il downscaling della temperatura superficiale a 70 m sviluppato da CNR-ITIAm (WP6102) si colloca a valle di entrambi i pilastri e utilizza la rete in situ come fonte primaria di validazione indipendente.

Il progetto è in corso e la campagna di misura si concluderà alla fine del 2027: si documentano quindi il disegno metodologico, le scelte di qualità del dato, i controlli già eseguiti e i limiti noti, mentre i risultati funzionali, che dipendono dalla serie temporale completa, sono indicati come sviluppo.

2 Architettura complessiva

La Fig. 1 riassume il flusso dei dati. Il primo pilastro (WP5103, DEL 5.1.1 [11]) produce un GeoPackage di poligoni IV/IB attribuiti secondo le componenti EAGLE; il secondo (WP5104) usa tipologie e stratificazione del primo per progettare e interpretare le misure termiche. I dati sono tutti aperti: Sentinel-2 L2A, gli *High Resolution Layers* (HRL) Copernicus (*Tree Cover Density*, *Imperviousness*, *Grassland*), CLC+ Backbone, il *Canopy Height Model* (CHM) a 1 m di Meta/WRI, Urban Atlas 2021, *Street Tree Layer* 2021, Land Cover Piemonte (LCP), BDTRE e OpenStreetMap (OSM); per la componente termica Landsat 8/9 TIRS, Sentinel-3 SLSTR ed ECOSTRESS. Il LiDAR ALS della Città di Torino non è un dato open ed è riservato alla validazione.

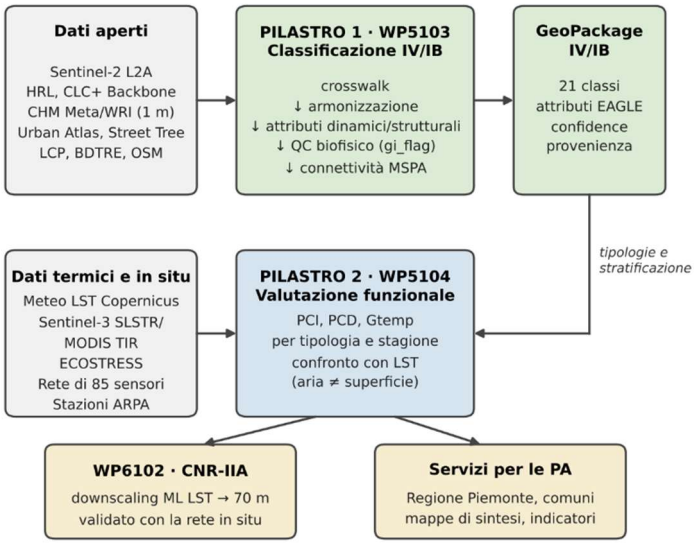


Fig. 1. Flusso dati di M²UHIP per i pacchetti ENEA e interfaccia con il WP6102 (CNR-ITIAm).

3 Pilastro 1: classificazione delle IV/IB conforme a EAGLE

3.1 Schema di classificazione e principi di integrazione

Lo schema ha due livelli: il livello 1 definisce la categoria funzionale di copertura del suolo, il livello 2 la formazione vegetale strutturale. Le classi sono 21, di cui 15 di infrastruttura verde (verde naturale GN1–GN7, verde urbano gestito GU1–GU6, verde su struttura GS1–GS2) e 6 di infrastruttura blu (BI1–BI6), riassunte in Tab. 1; la pipeline operativa gestisce inoltre tre classi aggiuntive (GA1–GA3), di tipologie di copertura agricola peri-urbana.

Tabella 1. Classi IV/IB del DEL 5.1.1 e fonte principale di geometria o attribuzione.

Categoria	Classi	Fonte principale
Verde naturale	GN1–GN4	Classi LCP/CLC (311, 312, 313, 321)
	GN5–GN7	Tag OSM (zone umide, arbusteto, vegetazione rada)
Verde urbano gestito	GU1, GU4, GU6	LCP/CLC (141, 242, 142) più OSM
	GU2	OSM *tree_row*, geometria derivata dal CHM
	GU3, GU5	BDTRE AR_VRD; OSM *cemetery*
Verde su struttura	GS1–GS2	OSM (tetti verdi, pareti verdi)
Blu naturale	BI1–BI3	LCP/CLC (511, 512, 411)

Blu gestita	BI4–BI6	OSM (canali, bacini, fontane)

Le geometrie di LCP restano intatte e ogni altra fonte è agganciata come attributo, senza segmentazioni. L'unica eccezione dichiarata è BDTRE AR_VRD, seconda fonte di geometria: genera righe aggiuntive con un campo *geom_source* distinto e non riclassifica mai il poligono LCP. Lo stesso vale per gli elementi OSM secondari e per le geometrie derivate: gli elementi lineari, a larghezza nulla, diventano poligoni cercando nel CHM, entro un corridoio di 10 m, la chioma effettiva dei filari stradali (GU2), e usando metà del tag *width* oppure l'indice MNDWI (B03, B11, soglia 0,3) per i canali artificiali (BI4). Ogni caso non gestito produce un valore esplicito (per esempio *NON_GI*) e mai un valore mancante silenzioso, e per ogni poligono è conservato un registro di provenienza.

3.2 Attributi dinamici, strutturali e connettività

Gli attributi dinamici derivano da compositi mediani stagionali Sentinel-2 L2A (2020–2026, quattro stagioni per anno, bande B02–B12; maschera nuvole che conserva le classi SCL 4, 5, 6): vigoria (NDVI, EVI, CIre), stato idrico (NDMI, MNDWI), fenologia e scarti normalizzati rispetto a una *baseline* pluriennale per l'individuazione precoce di anomalie. Gli attributi strutturali comprendono la classe di altezza (arborea, arbustiva, erbacea) da CLC+ Backbone e tessitura GLCM nel vicino infrarosso, la densità di chioma con un approccio *fraccover* che fonde HRL *Tree Cover Density*, CHM e NDVI estivo, e la permeabilità sotto chioma dall'indice BSI invernale su latifoglie defogliate, con ripiego su HRL *Imperviousness* per le sempreverdi. La connettività è calcolata con l'analisi morfologica dei pattern spaziali (MSPA [3]) come modulo intra-urbano a grana fine; la scala regionale è fuori dall'ambito del pacchetto. La pipeline è orchestrata per comune su 14 aree pilota (il nucleo metropolitano di Torino, sette comuni isolati da Cuneo a Novara e Ciriè), con un margine di estensione per non troncare gli elementi di confine.

3.3 Controllo di qualità biofisico e calibrazione della soglia

Il livello di confidenza *gi_flag* di ciascuna classe è definito dal DEL su base bibliografica (1 = infrastruttura verde confermata, 0,5 = parziale, 0 = non IV). Il flag finale è il minimo tra il valore di classe e l'evidenza biofisica del poligono: *gi_flag_finale = min(gi_flag_base, frazione_evidenza)*, dove la frazione di evidenza è la quota di poligono con NDVI (B08, B04) sopra soglia per le categorie vegetate. Il QC è applicato a tutte le classi e non modifica mai il codice di classe, ma solo l'attributo derivato.

La soglia NDVI di 0,15 per il pixel vegetato era provvisoria, estrapolata dall'intervallo estivo di GN7 nel DEL e mai verificata su dati reali. È stata calibrata con l'indice di Youden [4] sulla curva ROC, con due riferimenti indipendenti dalla classificazione e derivati dagli HRL: non vegetato = *Imperviousness Density* ≥ 90 %; vegetato = celle erbacee (*Grassland* = 1) e arboree (*Tree Cover Density* ≥ 80 %). I punti, campionati a caso nei 14 comuni (obiettivo 3000 per gruppo), hanno NDVI

estratto dal composito estivo 2026. La soglia ottimale è 0,168 per l'erbaceo (AUC 0,999) e 0,174 per l'arboreo (AUC 1,000): valori vicini, che giustificano una soglia unica. Si è scelto di mantenere 0,15, deliberatamente più permissiva, documentando entrambi i valori. Il limite va dichiarato: AUC prossime a 1 sono attese perché i riferimenti HRL sono i casi facili, agli estremi dello spettro, e non misurano la discriminazione su pixel ambigui o misti (prato semi-secco, cortile a copertura mista), che sono il caso più rilevante per classi come GU3 e GU5. Un controllo visivo su GU3 ha mostrato che gran parte delle riduzioni di flag è marginale (per esempio 0,9997 contro 1, rumore di bordo pixel) e che il segnale informativo è nella coda bassa della distribuzione, per esempio nei cortili del tutto privi di vegetazione.

Il lato blu del QC (MNDWI) è sospeso: per BI il flag resta al valore di base. Le cause sono due: un mascheramento SCL troppo aggressivo sull'acqua nei compositi, da correggere a monte, e la dinamicità geomorfologica dei corsi d'acqua naturali rispetto a un poligono statico. Il codice CLC 511 riunisce però corsi naturali e canali artificiali e serve un attributo aggiuntivo (tipologia idrografica BDTRE o tag OSM) non ancora disponibile.

4 Pilastro 2: rete di monitoraggio termoigrometrico in situ

4.1 Disegno della rete

La rete usa sensori SwitchBot Outdoor Meter IP65 con chip Sensirion SHT40 (accuratezza tipica ±0,2 °C [10]), installati a 4-5 m dal suolo, con schermo antiradiazione passivo, registrazione continua e scarico manuale via Bluetooth. Il basso costo consente una densità di punti elevata ma ha due conseguenze, affrontate nel protocollo [12]. Il *bias* da radiazione degli schermi passivi può raggiungere 2–2,5 °C con sole intenso e vento inferiore a 1 m/s [5,6] ed è differenziale tra le posizioni del transetto, per cui può amplificare il gradiente nelle ore di picco; lo si mitiga con schermo standardizzato, calibrazione e marcatura dei dati diurni a bassa nuvolosità. Vento e radiazione non sono misurati in situ e provengono dalle stazioni ARPA; per un confronto diretto della temperatura dell'aria sono utilizzabili solo quelle con sensore a quota compatibile con il posizionamento (Vallere e Giardini Reali), non le stazioni su tetto.

Gli indicatori, standard nella letteratura sul raffrescamento dei parchi [8,9], sono l'intensità dell'isola fresca (PCI, differenza tra un sito di riferimento urbano e il nucleo dell'IV), la distanza di raffrescamento (PCD, distanza dal bordo oltre cui la temperatura rientra entro ±0,3 °C dal riferimento) e il gradiente termico (Gtemp, in °C/100 m lungo il transetto esterno). Servono perciò sensori dentro l'IV e a distanze progressive fuori, più almeno due siti di riferimento urbano impermeabilizzati nella stessa zona climatica locale [2], senza verde nel raggio di 200 m (Fig. 2).

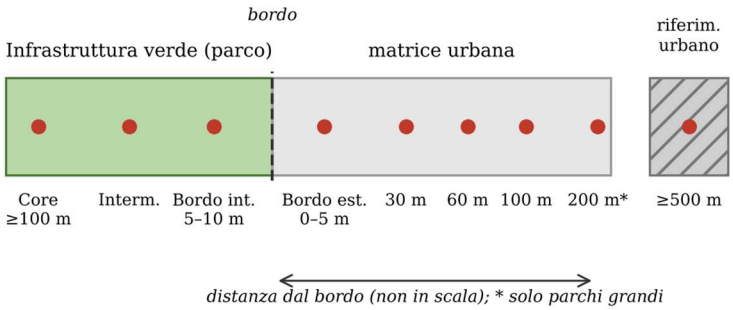


Fig. 2. Schema del transetto per un parco urbano: posizioni dei sensori rispetto al bordo dell'IV e sito di riferimento urbano (distanze indicative, protocollo [12]).

4.2 Intercalibrazione dei sensori

Tra il 7 e il 15 luglio 2026 tutti i sensori sono stati co-localizzati nelle stesse condizioni di esposizione per stimare gli scostamenti sistematici, che il protocollo prevede di applicare come correzione additiva rispetto alla mediana dell'insieme. Il 100 % dei sensori rientra nella soglia operativa di ±0,4 °C, pari al doppio dell'accuratezza dichiarata e scelta come margine conservativo; le anomalie residue sono dominate dalla radiazione solare tra le 12:00 e le 17:00. Tre sensori (ENEA_074, 063 e 022) mostrano un andamento notturno anomalo non spiegato: l'ipotesi di condensa è stata scartata e il caso resta aperto. L'analisi è stata condotta sull'intera finestra e sulla sola fascia notturna (22:00–05:00), meno soggetta al *bias* da radiazione; gli schermi sono stati poi installati su tutti i sensori.

5 Discussione: trasferibilità e vincoli operativi

L'esperienza finora maturata suggerisce quattro indicazioni per replicare servizi di questo tipo presso altre amministrazioni. La prima è la tracciabilità: conservare per ogni poligono fonte, valore e modulo che lo ha prodotto, ed esplicitare ogni caso non gestito, permette all'ente destinatario di capire perché una classe è stata assegnata o declassata e di correggere gli input senza rifare la classificazione. La seconda è la calibrazione delle soglie: anche una soglia semplice come quella NDVI va verificata su riferimenti indipendenti, dichiarando i casi su cui la verifica non informa. La terza riguarda i dati ausiliari europei: gli errori sugli HRL sono emersi da valori fuori intervallo, e controlli di intervallo sistematici all'ingresso di ogni prodotto li avrebbero intercettati. La quarta riguarda la rete in situ: i vincoli di un sensore economico (radiazione, assenza di vento, quota unica) sono compatibili con gli obiettivi solo se dichiarati e gestiti nelle analisi, e il numero di tipologie e di città determina la generalizzabilità; oggi la rete comprende tre tipologie a Torino e due contesti a Ciriè, mentre boschi e verde minuto previsti dal protocollo non sono rappresentati nella configurazione attuale.

6 Conclusioni e sviluppi

La prima fase di M²UHIP ha prodotto un'architettura documentata e in parte già operativa per la mappatura e la valutazione funzionale delle IV/IB, e una rete in situ intercalibrata e in acquisizione. Gli sviluppi immediati sono la consegna della mappa classificata delle aree pilota e del codice, la quantificazione dell'accuratezza con validazione LiDAR su campione stratificato, la ripresa del lato blu del QC, il completamento dell'installazione e la risoluzione dei punti di riferimento urbano mancanti in alcuni siti. Il confronto tra i gradienti in situ e i prodotti derivati da osservazione da remoto non sono ancora disponibile: richiedendo una serie più estesa andrà condotto distinguendo temperatura dell'aria e superficiale. Infatti, utilizzando prodotti satellitari a diverse risoluzioni spaziali e temporali il progetto prevede di produrre un prodotto integrato di temperatura superficiale a 100m di risoluzione mediante un Gaussian process per diverse finestre temporali notturne ed una diurna. Questo prodotto corredato dal suo errore verrà poi usato per delle stime di temperature dell'aria a 2m nell'ambito di un modello di machine learning che farà anche uso delle informazioni prodotte nel pilastro 1 sulle infrastrutture verdi, blu e grigie. Il prodotto t2m verrà poi utilizzato per stimare PCD, PCI e Gtemp nelle finestre temporali disponibili.
Su questa base saranno forniti a Regione Piemonte e ai comuni mappe di sintesi e indicatori leggibili senza competenze specialistiche, da affinare in co-progettazione con gli enti destinatari.

Ringraziamenti. Lavoro svolto nell'ambito del progetto M²UHIP (CUP F13C25001160001), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana nel programma I4DP_PA. Si ringraziano gli uffici tecnici dei Comuni di Torino e Ciriè e di IREN S.p.A. che hanno garantito supporto operativo, logistico e autorizzativo nelle diverse fasi dell'intervento.

7 Riferimenti bibliografici

1. Arnold, S. et al.: The EAGLE concept – a vision of a future European Land Monitoring Framework. In: Proceedings of the 33rd EARSeL Symposium, Matera (2013).
2. Stewart, I.D., Oke, T.R.: Local Climate Zones for urban temperature studies. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93(12), 1879–1900 (2012).
3. Soille, P., Vogt, P.: Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognit. Lett. 30, 456–459 (2009).
4. Youden, W.J.: Index for rating diagnostic tests. Cancer 3(1), 32–35 (1950).
5. Nakamura, R., Mahrt, L.: Air temperature measurement errors in naturally ventilated radiation shields. J. Atmos. Ocean. Technol. 22(7), 1046–1058 (2005).
6. Gubler, M. et al.: Assessing the thermal performance of low-cost temperature measurement solutions in outdoor urban microclimate monitoring. Urban Clim. 37, 100856 (2021).
7. WMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), 2021 edn. World Meteorological Organization, Geneva (2021).
8. Algretawee, H. et al.: The effect of graduated urban park size on park cooling island and distance relative to land surface temperature. Urban For. Urban Green. 74, 127677 (2022).

9. Spronken-Smith, R.A., Oke, T.R.: The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. Int. J. Remote Sens. 19(11), 2085–2104 (1998).
10. Sensirion AG: SHT40 Datasheet, v1.2. Sensirion, Stäfa (2023).
11. ENEA: M²UHIP – DEL 5.1.1 Classificazione delle Infrastrutture Verdi e Blu, WP5101. Documento di progetto, maggio 2026.

Downscaling a conservazione di massa di prodotti ODIAC su emissioni di CO_2 fossile con predittori di Osservazione della Terra: Shanghai Pudong e Città Metropolitana di Milano

Nicola Romanato[1,2][0009-0007-3190-1249], Denis Maragno[1]

[1] Dipartimento di Architettura e Arti, Università Iuav di Venezia, nromanato@iuav.it, dmaragno@iuav.it
[2] Dottorato Nazionale in Osservazione della Terra, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma

Abstract. Gli inventari globali di CO_2 fossile garantiscono confronti omogenei tra città, ma non raggiungono la scala dell'azione climatica locale. Si propone un downscaling a conservazione di massa che porta ODIAC da ≈1 km a ≈250 m con un Random Forest e dieci predittori di Osservazione della Terra globali e open, senza luci notturne, evitando la circolarità con il proxy di costruzione dell'inventario. A configurazione fissa, Shanghai Pudong e Milano raggiungono R^2 in validazione spaziale di 0,65 e 0,67 con predittori dominanti diversi (quota, NO_2): la procedura è trasferibile, i pesi appresi no. Il prodotto conserva i totali dell'inventario e restituisce emissioni pro capite per unità amministrativa, con un divario Pudong–Milano tra 1,98× e 3,06× a parità di densità.

Parole chiave: Downscaling delle emissioni di CO_2, ODIAC, Random Forest, Sentinel-5P TROPOMI, Google Earth Engine.

1 Dagli inventari globali alla scala urbana: circolarità e trasferibilità del downscaling

Gli inventari globali grigliati di CO_2 fossile consentono confronti omogenei tra città, ma la loro risoluzione è più ampia rispetto alle unità urbane all'interno delle quali si pianifica l'azione climatica. ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO_2) distribuisce emissioni mensili a 1/120°, allocando le sorgenti diffuse con la radianza delle luci notturne osservate da satellite e le grandi sorgenti puntuali con un database georiferito [1, 2]. Il downscaling con apprendimento automatico, basato su proxy ad alta risoluzione, anomalie di XCO_2 da satellite o Random Forest addestrati su ODIAC [3–5], lascia aperte due questioni: la circolarità delle luci notturne usate come predittore rispetto al proxy di costruzione di ODIAC e la trasferibilità dei pesi appresi tra città di morfologia diversa [6].

Si presenta una pipeline che ridistribuisce ODIAC da 1/120° (≈1 km) a 1/480° (≈250 m) con un Random Forest a conservazione di massa e soli predittori di

Osservazione della Terra (OT) open-source, elaborati in Google Earth Engine (GEE) [7]. La stessa configurazione è applicata a Shanghai Pudong, nodo costiero-industriale dominato da sorgenti puntuali, e alla Città Metropolitana di Milano, area continentale a regime emissivo diffuso, per valutare abilità predittiva, gerarchia dei predittori appresa ed emissioni pro capite a parità di densità.

2 Pipeline per il downscaling a conservazione di massa in Google Earth Engine

2.1 ODIAC 2023 come target: Shanghai Pudong e Città Metropolitana di Milano

Il target è ODIAC 2023 (release 2024), come proxy delle emissioni di CO_2 da combustione fossile [2], con i dodici raster mensili sommati in un raster annuale (tCO_2 cella^{-1} anno^{-1}). La trasformazione affine dell'estensione ritagliata è la griglia di riferimento di tutte le esportazioni da GEE, così che target e predittori siano allineati al pixel. L'AOI di Pudong (1 402,5 km^2, 36 jiedao, 8 670 celle ODIAC, 68,0 $MtCO_2$ anno^{-1}) include il polo termoelettrico e portuale di Waigaoqiao; quella di Milano (1 560,2 km^2, 140 unità amministrative tra comuni e municipi, 5 040 celle, 4,78 $MtCO_2$ anno^{-1}) la centrale di Turbigo.

2.2 Dieci predittori derivati dall'Osservazione della Terra



Fig. 1. Stack dei dieci predittori di OT per Shanghai Pudong (A1–A5: morfologia urbana e attività antropica; B1–B5: copertura del suolo e paesaggio fisico); in ogni pannello, risoluzione nativa (sinistra) e griglia di modellazione (destra).

Dieci bande riferite al 2023 sono estratte da GEE (Tabella 1, Fig. 1) da cinque famiglie di prodotti di OT: Global Human Settlement Layer P2023A, con superficie edificata da compositi Sentinel-2 e Landsat e popolazione residente [8, 9]; ESA WorldCover v200, classificazione a 10 m di Sentinel-1 e Sentinel-2 [10]; Sentinel-5P TROPOMI [11]; Sentinel-2 L2A [12]; NASADEM [13]. L'NO_2 troposferico è la media annua del prodotto L3 OFFL; l'NDVI la mediana annua delle scene con nuvolosità ≤ 20 % e

maschera QA60; le classi WorldCover sono convertite in indicatori binari prima del ricampionamento bilineare, così che il valore ricampionato approssimi la quota areale della classe.

Tabella 1. Predittori di OT (riferimento 2023; WorldCover 2021) e profilo delle AOI: mediana tra zone delle mediane zonali; quota % dell'AOI per WorldCover; densità media per A3. Aggregazione a 1/120°: media, più massimo per A1–A3.

ID	Banda [unità del profilo]	Prodotto di OT (sensore)	Ris. nativa	Pudong	Milano
A1	built_frac [–]	GHS-BUILT-S P2023A (Sentinel-2, Landsat)	10 m	0,225	0,147
A2	built_nres_frac [–]	GHS-BUILT-S P2023A (non residenziale)	10 m	0,042	0,061
A3	pop_count [ab km^{-2}]	GHS-POP P2023A	100 m	7 027	2 851
A4	wc_built [%]	ESA WorldCover v200 (Sentinel-1/2)	10 m	49,3	29,6
A5	no2_trop [µmol m^{-2}]	Sentinel-5P TROPOMI, L3 OFFL	3,5×5,5 km	237,2	106,0
B1	ndvi [–]	Sentinel-2 L2A, mediana annua	10 m	0,318	0,488
B2	wc_tree [%]	ESA WorldCover v200 (Sentinel-1/2)	10 m	10,4	17,6
B3	wc_crop [%]	ESA WorldCover v200 (Sentinel-1/2)	10 m	25,2	35,8
B4	wc_water [%]	ESA WorldCover v200 (Sentinel-1/2)	10 m	3,5	0,9
B5	elevation [m s.l.m.]	NASADEM (SRTM rielaborato)	30 m	4,0	135,0

Le bande sono riproiettate sulla griglia ODIAC con *crsTransform* e fattore di scala 4: ogni cella è suddivisa in 16 sottopixel a 1/480° (232 m in latitudine; 200 m e 163 m in longitudine a Pudong e a Milano). L'addestramento avviene a 1/120° con un doppio operatore di aggregazione: media di blocco delle $K = 10$ bande e massimo di blocco delle $M = 3$ bande strutturali (built_frac, built_nres_frac, pop_count):

$$z_c = \left[\bar{x}_c^1, \ldots, \bar{x}_c^K, \max_{p \in P_c} x_p^{k_1}, \ldots, \max_{p \in P_c} x_p^{k_M}\right] \quad (1)$$

dove x_p^k è il valore della banda k nel pixel fine p e P_c l'insieme dei 16 pixel della cella c. Il massimo conserva il picco sub-cella che la media attenua; per l'NO_2, la cui impronta (3,5 × 5,5 km) supera la cella, non sarebbe informativo.

2.3 Random Forest con validazione incrociata a blocchi spaziali

Il campione contiene un'osservazione per cella ODIAC; il target y_c è troncato al 99,5° percentile e modellato come $\log(1 + y_c)$. Il Random Forest (scikit-learn 1.4 [14]; 3 variabili per nodo) è ottimizzato su 56 configurazioni (7 × 4 × 2 valori di max_depth tra 3 e 10, min_samples_leaf tra 10 e 30, n_estimators 200 e 300) con validazione incrociata a blocchi spaziali [15]: GroupKFold a cinque fold su blocchi di 8 × 8 celle (≈8 × 8 km), 1,45 volte il lato maggiore dell'impronta TROPOMI, così che un retrieval di NO_2 non cada sia nell'addestramento sia nel test (143 blocchi a Pudong, 84 a Milano). La configurazione selezionata massimizza R^2_{CV} con un vincolo sullo scarto train–CV:

$$\theta^* = \arg\max_{\theta} R^2_{\mathrm{CV}}(\theta), \qquad \Delta(\theta) = R^2_{\mathrm{train}}(\theta) - R^2_{\mathrm{CV}}(\theta) \leq \delta \tag{2}$$

con δ = 0,15 e metriche calcolate nello spazio log1p; nella Sez. 3 R^2 è ricalcolato nello spazio delle emissioni dopo retrotrasformazione. Come riferimento si valutano un predittore costante e un Random Forest sul solo built_frac medio, peso di allocazione corrente nella prassi di disaggregazione. L'importanza dei predittori è stimata con Mean Decrease Impurity (MDI) e per permutazione (20 ripetizioni) [16].

2.4 Ridistribuzione a 1/480° vincolata ai totali di cella ODIAC

In predizione il vettore di ogni pixel fine replica i valori di banda nelle posizioni di medie e massimi (il massimo su un pixel coincide con il pixel): è l'ipotesi operativa di invarianza di scala della relazione appresa a 1/120°. Il punteggio $s_p = \exp(T^{-1}\Sigma_t h_t(\mathbf{x}_p)) - 1$, con h_t il t-esimo dei T alberi, non è un'emissione: ne contano solo i rapporti entro la cella madre, che ripartiscono il totale ODIAC E_c:

$$e_p = \frac{s_p}{\sum_{k \in P_c} s_k} \cdot E_c, \qquad \sum_{p \in P_c} e_p = E_c \tag{3}$$

La massa è conservata per costruzione (residuo < 10^{-3} % in entrambe le aree). Un bootstrap a blocchi spaziali (50 repliche con riaddestramento) misura la dispersione delle quote di ridistribuzione, cioè la loro stabilità condizionata a ODIAC, di cui non propaga l'incertezza.

2.5 Emissioni pro capite zonali e classi di densità per città

Le statistiche zonali sono calcolate sul raster a 1/480° mascherato con il poligono dell'AOI, assegnando ogni pixel all'unità che ne contiene il centroide; l'emissione pro capite di zona è $e_z = \Sigma_{p \in z} e_p / N_z$, con N_z popolazione GHS-POP (escluse le zone con meno di 25 pixel di popolazione o 500 residenti). Le zone con e_z superiore a cinque volte la mediana cittadina sono classificate CO_2-OUTLIER; le restanti sono suddivise con i quartili Q25 e Q75 della densità di popolazione, calcolati per città, in DENSITY-HIGH, DENSITY-MID e DENSITY-LOW (25/50/25).

3 Risultati: abilità predittiva confrontabile, relazioni apprese divergenti

3.1 Prestazioni del modello

In validazione spaziale a blocchi il modello raggiunge R^2CV = 0,650 a Pudong e 0,666 a Milano, con scarti train–CV quasi identici (0,094 e 0,096): l'abilità predittiva è confrontabile nei due domini e in entrambe le città la configurazione selezionata rispetta il vincolo sullo scarto dell'Eq. (2). I modelli di riferimento permettono di leggere questi valori. Il predittore costante ha R^2CV negativo (−0,009 e −0,021), per cui la partizione

a blocchi non lascia segnale spaziale sfruttabile in modo banale. Il solo built_frac raggiunge 0,308 a Pudong e 0,167 a Milano, cioè meno della metà e circa un quarto dell'abilità dello stack completo. Il troncamento del target al 99,5° percentile è determinante: senza di esso R^2CV scende a 0,185 e 0,296.

3.2 Gerarchia dei predittori RF: Feature e Permutation Importance

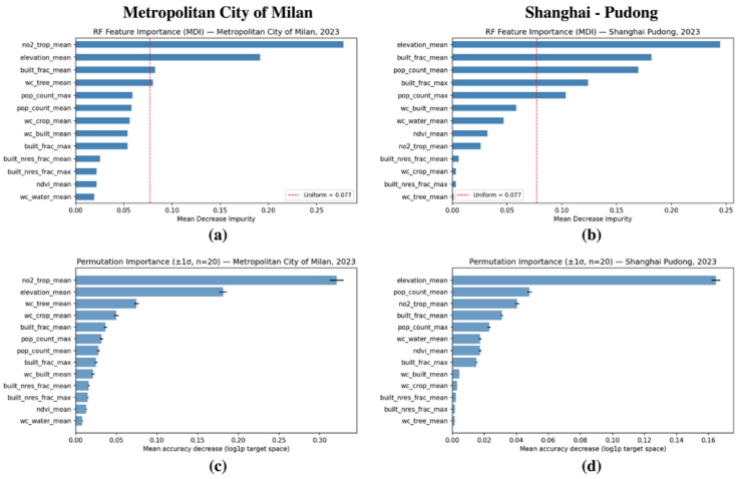


Fig. 2. Importanza dei predittori, Milano (sinistra) e Shanghai Pudong (destra): MDI (a–b) e permutazione in spazio log1p, 20 ripetizioni (c–d); tratteggio: riferimento uniforme 1/13.

Le gerarchie apprese divergono (Fig. 2). A Milano domina l'NO_2 troposferico (MDI 0,278; permutazione 0,321), seguito dalla quota (0,191; 0,181). A Pudong domina la quota (MDI 0,244; permutazione 0,165), seguita per MDI da built_frac (0,182) e pop_count (0,170); l'NO_2 è nono per MDI (0,026) e terzo per permutazione (0,040). Il predittore dominante è lo stesso con entrambe le metriche: il contrasto non è un artefatto dell'MDI. Il profilo di OT (Tabella 1) ne mostra i gradienti: a Pudong quota mediana di 4 m (escursione 33 m) e colonna di NO_2 2,2 volte quella milanese; a Milano escursione di 205 m, NDVI e seminativo più estesi.

3.3 Hotspot costiero-industriale a Pudong, struttura monocentrica a Milano

Nelle superfici ridistribuite (Fig. 3), a Pudong (P5–P95: 36–3 382 tCO_2 $pixel^{-1}$ $anno^{-1}$) il cluster di massima emissione occupa il settore nord-occidentale, in corrispondenza del complesso industriale-portuale di Waigaoqiao, su un'estensione inferiore a quella di qualsiasi jiedao, e decresce verso l'interno agricolo meridionale. A Milano (P5–P95: 6–232 tCO_2 $pixel^{-1}$ $anno^{-1}$) la struttura è monocentrica, con massimo nel capoluogo, decadimento radiale verso la pianura e un hotspot isolato a ovest in corrispondenza della centrale di Turbigo. Normalizzate per la popolazione (Fig. 3c–d), le superfici si frammentano in massimi locali su un fondo basso.

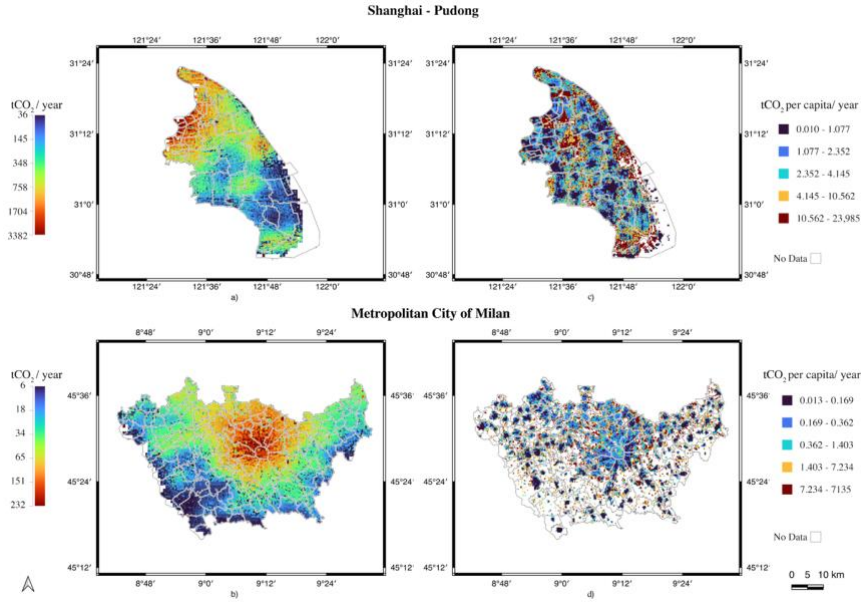


Fig. 3. Emissioni ridistribuite a 1/480° da ODIAC 2023 (release 2024), Pudong in alto e Milano in basso: totali (a–b, tCO_2 $pixel^{-1}$ $anno^{-1}$; tacche al 5°, 25°, 50°, 75°, 95° percentile) e pro capite (c–d, tCO_2 ab^{-1} $anno^{-1}$; pixel diviso per la popolazione GHS-POP co-localizzata).

3.4 Divario pro capite Pudong–Milano a parità di densità

A Pudong 35 jiedao hanno popolazione valida (esclusa Nánhuì Xīnchéng, priva di popolazione in GHS-POP): Gāodōng, coincidente con il cluster di Waigaoqiao, è CO_2-OUTLIER e le altre 34 zone sono stratificate in 9/16/9. A Milano i CO_2-OUTLIER sono 4 (Turbigo, sorgente puntuale, e tre comuni rurali con denominatore demografico ridotto) e 136 unità sono stratificate in 34/68/34. La mediana pro capite di zona è 1,560 tCO_2 ab^{-1} $anno^{-1}$ a Pudong e 0,571 a Milano (rapporto 2,73×), ma l'intervallo interquartile della densità di Pudong è un ordine di grandezza più ampio (Tabella 2): il rapporto aggregato confonde composizione e intensità. A parità di classe il rapporto resta superiore a uno ma varia da 1,98× (DENSITY-LOW) a 3,06× (DENSITY-MID), con intervalli bootstrap non sovrapposti (CV mediano delle quote di ridistribuzione: 0,158 a Pudong, 0,081 a Milano). A Milano l'emissione pro capite decresce al crescere della densità (0,802 → 0,571 → 0,389); a Pudong la classe intermedia (1,749) supera sia la bassa (1,586) sia l'alta (1,117).

Tabella 2. Emissioni pro capite di zona per classe (tCO_2 ab^{-1} $anno^{-1}$; mediana [IQR] tra zone). Soglie Q25/Q75 della densità: 3 898/27 465 ab km^{-2} (Pudong), 982/3 494 ab km^{-2} (Milano). Intervallo del rapporto: 5°–95° percentile del bootstrap a blocchi spaziali.

Classe	n PD	n MI	Pudong	Milano	PD/MI [5–95 %]
DENSITY-HIGH	9	34	1,117 [0,915–1,222]	0,389 [0,279–0,481]	2,87× [2,84–2,91]
DENSITY-MID	16	68	1,749 [1,270–2,761]	0,571 [0,436–0,790]	3,06× [3,02–3,10]
DENSITY-LOW	9	34	1,586 [1,521–2,712]	0,802 [0,606–1,039]	1,98× [1,96–2,01]
CO_2-OUTLIER	1	4	31,875	5,817 [3,049–18,627]	5,48× [5,35–5,66]

4 Conclusioni, limiti e sviluppi

A configurazione fissa le due città ottengono abilità predittiva confrontabile attraverso relazioni diverse: a Milano la ridistribuzione è guidata dall'NO_2, coerente con un regime di combustione diffusa dominato dai trasporti; a Pudong dalla quota, espressione spaziale della concentrazione di infrastrutture energetiche e industriali nella fascia costiera bassa, che ODIAC contabilizza come emissione territoriale diretta. Come per i modelli basati sulle luci notturne, i cui coefficienti risultano specifici della città [6], la procedura è trasferibile, i pesi appresi no: il confronto dell'importanza dei predittori tra siti a configurazione fissa è una diagnostica di trasferibilità che non richiede dati di riferimento ad alta risoluzione.

I limiti sono quattro. (1) La validazione opera alla risoluzione di addestramento: in assenza di riferimenti osservativi sub-chilometrici di CO_2 antropica, il prodotto a 1/480° è un prior spazialmente raffinato di ODIAC, non una mappa validata in modo indipendente, e il bootstrap ne misura la stabilità, non l'accuratezza [17]. (2) Il prodotto eredita ambito settoriale, anno ed errori di allocazione di ODIAC ed esclude le emissioni indirette da consumo elettrico. (3) Il predittore dominante a Milano è il più grossolano: l'impronta NO_2 TROPOMI è circa quattro volte la dimensione lineare della cella di addestramento. (4) La stabilità interannuale delle relazioni apprese non è verificata. La pipeline, basata solo su prodotti di OT globali in GEE, è aggiornabile a ogni release di ODIAC.

Nel modello proposto il vincolo principale resta l'inventario di partenza, non la procedura di apprendimento: questa può essere riaddestrata a ogni nuova release di ODIAC e per ogni nuova città, mentre la qualità della ridistribuzione resta limitata da quella del target globale. Lo sviluppo naturale è integrare nel target dati emissivi e misure a scala locale, che renderebbero possibile anche la validazione indipendente a scala sub-chilometrica oggi assente.

Riferimenti bibliografici

1. Oda, T., Maksyutov, S.: A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO_2 emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights. Atmospheric Chemistry and Physics 11, 543–556 (2011).
2. Oda, T., Maksyutov, S., Andres, R.J.: The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO_2, version 2016 (ODIAC2016): a global monthly fossil fuel CO_2 gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. Earth System Science Data 10, 87–107 (2018).
3. Wang, R., Zhang, Y., Zhao, S., Wang, X.: Open-data-based city-scale gridded carbon dioxide emission inventory: supporting urban carbon monitoring in Chengdu, China. Carbon Footprints 3, 14 (2024).
4. Cui, L., Yang, H., Martin, M., et al.: Mapping high-resolution carbon emission spatial distribution combined with carbon satellite and multi-source data. Remote Sensing 17(17), 3125 (2025).
5. Zhang, Y., Liu, X., Lei, L., Liu, L.: Estimating global anthropogenic CO_2 gridded emissions using a data-driven stacked random forest regression model. Remote Sensing 14, 3899 (2022).
6. Han, J., Meng, X., Liang, H., et al.: An improved nightlight-based method for modeling urban CO_2 emissions. Environmental Modelling & Software 107, 307–320 (2018).
7. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., et al.: Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment 202, 18–27 (2017).
8. Pesaresi, M., Schiavina, M., Politis, P., et al.: Advances on the Global Human Settlement Layer by joint assessment of Earth Observation and population survey data. International Journal of Digital Earth 17, 2390454 (2024).
9. Schiavina, M., Freire, S., Carioli, A., MacManus, K.: GHS-POP R2023A – GHS population grid multitemporal (1975–2030) [dataset]. European Commission, Joint Research Centre (2023).
10. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., et al.: ESA WorldCover 10 m 2021 v200 [dataset]. Zenodo (2022).
11. Veefkind, J.P., Aben, I., McMullan, K., et al.: TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sensing of Environment 120, 70–83 (2012).
12. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al.: Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment 120, 25–36 (2012).
13. Crippen, R., Buckley, S., Agram, P., et al.: NASADEM global elevation model: methods and progress. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B4, 125–128 (2016).
14. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al.: Scikit-learn: machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research 12, 2825–2830 (2011).
15. Roberts, D.R., Bahn, V., Ciuti, S., et al.: Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. Ecography 40, 913–929 (2017).
16. Strobl, C., Boulesteix, A.-L., Kneib, T., Augustin, T., Zeileis, A.: Conditional variable importance for random forests. BMC Bioinformatics 9, 307 (2008).
17. Gurney, K.R., Liang, J., O'Keeffe, D., et al.: Comparison of global downscaled versus bottom-up fossil fuel CO_2 emissions at the urban scale in four U.S. urban areas. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 124, 2823–2840 (2019).

Estensione del framework nazionale di interoperabilità dei dati geospaziali. Il modello dati delle Specifiche di contenuto della pianificazione urbanistica comunale di Regione Umbria

Antonio Romano[1], Leonardo Donnaloia[1], Antonio Rotundo[1], Pierpaolo Milan[2]
Leonardo Naldini[3], Angela Fortuni[3], Sandra Togni[3], Domenico Bertoldi[3]
Leonardo Arcaleni[4], Maria Elena Franceschetti[4], Cinzia Ciavarroni[4], Gianluca Roscini[4],
Debora Berti[5], Luca Brunori[5], Sabrina Tosti[5]

[1] Agenzia per l'Italia Digitale (AgID), Area interoperabilità, dati e accessibilità - romano@agid.gov.it
[2] Esperto di settore
[3] Regione Umbria, Servizio infrastrutture per la mobilità e trasporto pubblico locale, Sezione autorizzazioni e concessioni infrastrutturali - cartografia regionale - lnaldini@regione.umbria.it
[4] Regione Umbria, Servizio urbanistica, edilizia, politiche della casa, paesaggio e rigenerazione urbana, Sezione urbanistica - larcaleni@regione.umbria.it
[5] Comune di Bastia Umbra, Settore pianificazione e gestione del territorio - debora.berti@comune.bastia.pg.it

Abstract. Il contributo illustra il progetto "Specifiche di contenuto dei PRG Regione Umbria", finalizzato alla definizione di un modello dati interoperabile per la pianificazione urbanistica comunale. Nell'ambito del Sistema Informativo Ambientale e Territoriale, le Specifiche integrano i contenuti del Piano Regolatore Generale nel DBGT regionale, estendendo il modello nazionale dei DBGT secondo il framework nazionale di interoperabilità dei dati geospaziali di AgID. Le Specifiche sono formalizzate mediante la GeoUML methodology e sperimentate sul PRG parte strutturale del Comune di Bastia Umbra.

Parole chiave: Interoperabilità e Specifiche di contenuto e Pianificazione urbanistica.

1 Framework Nazionale di Interoperabilità dei Dati Geospaziali di AGID

I dati geospaziali rappresentano una risorsa strategica per conoscere, pianificare e gestire il territorio. Per valorizzarne appieno il potenziale è necessario assicurare, fin dalla progettazione, la qualità, la conformità agli standard di riferimento, l'interoperabilità e adeguati modelli di governance, in grado di garantirne una gestione efficace lungo l'intero ciclo di vita dei dati. Questa è la visione che ispira le strategie

europee sui dati, che riconoscono nella disponibilità, nella qualità e nella condivisione delle informazioni un fattore abilitante per l'innovazione e la competitività degli Stati membri.

La diffusione dei sistemi di intelligenza artificiale in ambito geospaziale accresce ulteriormente il valore strategico del patrimonio informativo di riferimento, rendendo sempre più essenziale la disponibilità di dati affidabili, aggiornati e di elevata qualità.

L'iniziativa in oggetto si inserisce in un percorso ormai consolidato, già illustrato in diverse pubblicazioni scientifiche, realizzato in collaborazione con amministrazioni centrali e territoriali, che ha portato alla definizione di Specifiche di riferimento in domini quali SINFI (per MIMIT e Infratel Italia - Sistema Informativo Federato delle Infrastrutture), PELL-IP (per ENEA - efficientamento energetico illuminazione pubblica), ecc… In particolare, la nuova specifica sviluppata in collaborazione con la Regione Umbria arricchisce ulteriormente questo patrimonio condiviso, estendendo i principi di armonizzazione e interoperabilità dei dati geospaziali al dominio della pianificazione urbanistica.

In continuità con il percorso metodologico consolidato da AgID, le Specifiche di contenuto della pianificazione urbanistica comunale della Regione Umbria sono state sviluppate mediante gli strumenti della GeoUML methodology, appositamente progettati per la gestione e la manutenzione di qualsivoglia base di dati spaziali.

In particolare, il GeoUML Catalogue ha supportato la definizione delle Specifiche tecniche e dei modelli implementativi, mentre il GeoUML Validator sarà utilizzato per verificare la conformità dei dati alle regole e ai modelli definiti.

In un'ottica di evoluzione continua, e in considerazione della notevole diffusione degli strumenti GeoUML, AgID, d'intesa con il Gruppo di lavoro Cartografia della Commissione Infrastrutture, Mobilità e Governo del Territorio della Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome, ha avviato un programma di evoluzione della suite GeoUML, volto a migliorarne le funzionalità, correggere bug, assicurarne l'aggiornamento e favorirne la progressiva erogazione in modalità online.

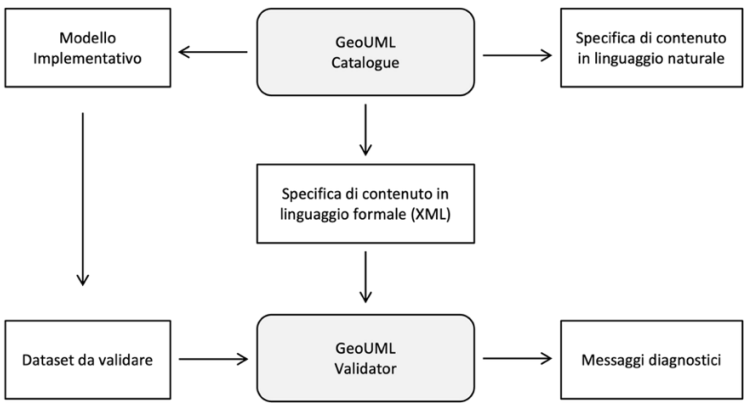


Fig. 1. Il flusso di gestione della GeoUML methodology.

2 LR 1/2015 – Contesto urbanistico della Regione Umbria

Il quadro normativo in materia di governo del territorio della Regione Umbria è attualmente disciplinato dalla Legge Regionale 21 gennaio 2015, n. 1, "Testo unico Governo del territorio e materie correlate" (TU). Attraverso il governo del territorio, le politiche pubbliche trovano coerenza, integrazione e sinergia, sulla base di elementi conoscitivi e valutativi condivisi sullo stato e sulle dinamiche del territorio. La normativa regionale individua una serie di strumenti di programmazione e pianificazione territoriale, paesaggistica e urbanistica, articolati ai diversi livelli istituzionali. Il Piano Regolatore Generale (PRG), strumento di scala e livello comunale o intercomunale è articolato in: PRG, parte strutturale, di dimensione strategica, programmatica e, ove previsto dalla relativa disciplina, parzialmente conformativa e PRG, parte operativa, di dimensione regolativa e conformativa.

Il PRG parte strutturale è costituito dai contenuti stabiliti dall'art. 21 del TU. L'art. 80 del TU individua i principali tematismi della pianificazione finalizzati alla valorizzazione del territorio e delle sue potenzialità, secondo una prospettiva di sviluppo sostenibile e durevole. Tali tematismi sono articolati nei seguenti sistemi: sistema ambientale, spazio rurale, ambiti urbani e insediamenti, sistemi infrastrutturali, rischio territoriale e ambientale. Questa articolazione tematica costituisce, pertanto, un riferimento per l'organizzazione delle informazioni territoriali e per la costruzione di quadri conoscitivi integrati a supporto dei processi di pianificazione e governo del territorio. La normativa regionale prevede inoltre un flusso informativo tra il livello comunale e quello regionale ai sensi dell'art. 252 del TU.

Nell'ambito della disciplina relativa alla formazione e alla gestione degli strumenti urbanistici, assume particolare rilevanza la componente informativa e geografica. L'art. 98 del Regolamento Regionale 18 febbraio 2015, n. 2 richiama, infatti, gli indirizzi per la rappresentazione cartografica delle informazioni e dei contenuti del PRG comunale in formato numerico georeferenziato, ai fini dell'acquisizione di dati statistici a scala regionale. In particolare, in applicazione della Deliberazione della Giunta Regionale 26 gennaio 2006, n. 102, la rappresentazione dei dati relativi ai contenuti del PRG a scala regionale, è effettuata secondo i contenuti delle tabelle di cui all'Allegato 1 del RR 2/2015. Tali tabelle definiscono i singoli strati informativi e i relativi attributi che costituiscono la parte strutturale e la parte operativa del piano**.**

3 Il Sistema Informativo regionale Ambientale e Territoriale (SIAT) della Regione Umbria

All'interno del quadro normativo regionale, l'art 254 del TU definisce le funzioni e i compiti del Sistema Informativo regionale Ambientale e Territoriale (SIAT) che assume un ruolo centrale quale infrastruttura conoscitiva a supporto dei processi di governo del territorio e per la verifica dei relativi effetti. Il SIAT è assegnato al Servizio infrastrutture per la mobilità e trasporto pubblico locale della Direzione regionale governo del territorio, ambiente, protezione civile, riqualificazione urbana, coordinamento PNRR. Il TU attribuisce al SIAT funzioni finalizzate alla costruzione

di un quadro informativo unitario e al raccordo tra le diverse amministrazioni per favorire la realizzazione di un sistema diffuso di conoscenze attinenti al territorio.

In tale ambito, la Regione promuove, in collaborazione con gli Enti locali, la rete informativa delle autonomie locali per il territorio, attraverso la definizione di standard informatici e informativi per l'elaborazione e la rappresentazione dei dati relativi ai procedimenti edilizi e agli strumenti urbanistici, nonché mediante la realizzazione di sistemi informativi territoriali interoperabili, finalizzati all'erogazione di servizi geografici evoluti rivolti all'utenza pubblica e privata. In questo contesto, il SIAT regionale, fin dalla sua istituzione ha avviato un processo sistematico di costruzione di basi di dati geografiche, organizzate alle diverse scale territoriali. Tali basi informative costituiscono un quadro di riferimento per il livello locale, in particolare per la predisposizione dei PRG comunali, parte strutturale.

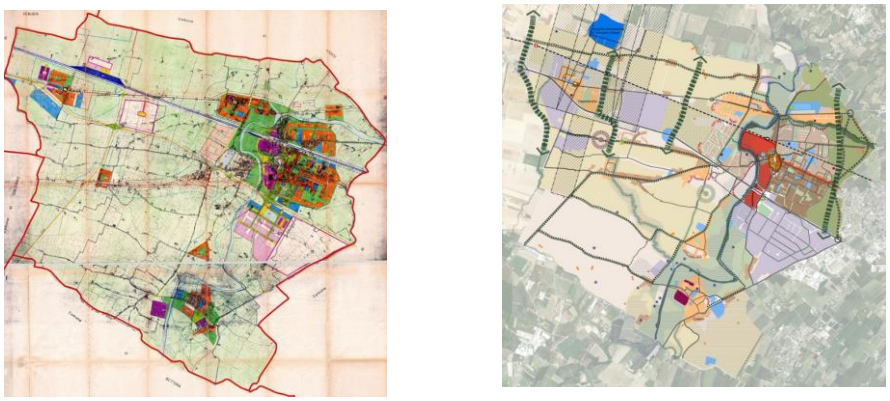
La disponibilità di un quadro informativo condiviso assume particolare rilevanza nell'ambito dei processi di pianificazione locale. La redazione degli strumenti urbanistici richiede, infatti, la circolarità di informazioni riconosciute e validate, sulla cui base sviluppare processi effettivi di concertazione, integrazione e condivisione tra i diversi soggetti coinvolti nel governo del territorio. In tale prospettiva, risulta necessario favorire il pieno utilizzo delle risorse informative disponibili, limitando la duplicazione delle attività di acquisizione e gestione dei dati e promuovendo, al contempo, il reciproco aggiornamento delle basi informative esistenti. Il valore del sistema informativo non risiede, pertanto, esclusivamente nella disponibilità dei singoli dataset, ma anche nella capacità di mettere in relazione informazioni prodotte da soggetti diversi, garantirne l'interoperabilità e renderle disponibili all'interno di un quadro conoscitivo condiviso.

La pianificazione e la programmazione degli interventi sul territorio richiedono, infatti, che le amministrazioni comunali possano disporre degli elaborati e delle informazioni relativi alle previsioni e agli interventi messi in campo dai diversi enti operanti sul medesimo territorio. Il SIAT si configura quindi come elemento di raccordo tra le diverse fonti informative territoriali, favorendo la costruzione di un patrimonio conoscitivo integrato a supporto dei processi decisionali e della pianificazione alle diverse scale. Per la condivisione, l'integrazione e la fruizione delle informazioni geografiche e territoriali tramite servizi geografici, il SIAT si avvale della Infrastruttura geografica regionale UmbriaGeo https://umbriageo.regione.umbria.it/.

4 Il PRG parte strutturale del Comune di Bastia Umbra

Il PRG parte strutturale del Comune di Bastia Umbra è stato assunto come caso applicativo in ragione della varietà e della complessità delle componenti territoriali rappresentate. Il territorio comunale, collocato nella Valle Umbra lungo l'asse Perugia–Foligno, presenta infatti un sistema insediativo sviluppatosi in stretta relazione con le infrastrutture sovracomunali, le aree produttive e commerciali, il reticolo idrografico del Chiascio e del Tescio e le principali dotazioni di servizio. Il piano deve pertanto ricondurre a un quadro unitario tessuti urbani consolidati, nuclei frazionali, spazi agricoli, sistemi ambientali, condizioni di rischio e previsioni infrastrutturali.

Il confronto con il Piano Astengo del 1971 consente di leggere l'intensità delle trasformazioni intervenute nel secondo dopoguerra. Alla struttura urbana più compatta del piano storico si è progressivamente sostituito un assetto policentrico e funzionalmente articolato, caratterizzato dall'espansione delle aree residenziali, dal consolidamento dei comparti produttivi e dall'incremento delle superfici destinate ad attrezzature e servizi. La lettura temporale non assume quindi un valore meramente descrittivo, ma costituisce la base per riconoscere permanenze, discontinuità e relazioni territoriali che il nuovo PRG parte strutturale è chiamato a governare.



Piano Astengo

Nuovo PRG – Documento

Fig. 2. Confronto tra il PRG del 1971 (Piano Astengo) e il nuovo PRG - Documento Programmatico. Fonte: Comune di Bastia Umbra.

Il PRG parte strutturale, adottato nel 2023 e oggi oggetto di revisione ai fini della riadozione, è stato assunto come riferimento per costruire una rappresentazione organica delle componenti territoriali che non si limitasse alla restituzione grafica delle previsioni. Il piano comprende infatti sistemi naturali e ambientali, componenti paesaggistiche, condizioni di rischio, insediamenti esistenti e di nuova previsione, infrastrutture e dotazioni territoriali. Questi contenuti devono essere letti congiuntamente, poiché ciascuna scelta insediativa si colloca entro un insieme di vincoli, tutele, relazioni funzionali e condizioni di sostenibilità.

La fase di revisione successiva all'adozione del 2023 costituisce, inoltre, una condizione significativa per la sperimentazione. La modifica di alcune scelte pianificatorie richiede infatti di individuare con chiarezza gli oggetti interessati, aggiornare le relative informazioni e verificare le conseguenze sulle componenti connesse. Il caso applicativo permetterà così di osservare l'efficacia della Specifica di contenuto non soltanto nella fase di formazione del piano, ma anche durante un processo reale di revisione e riadozione.

L'esperienza di Bastia Umbra evidenzierà pertanto il valore operativo di una base conoscitiva capace di seguire l'evoluzione del piano e di documentare in modo controllabile le variazioni introdotte. Il contributo specifico del Comune consiste nel

mettere a disposizione un insieme articolato di contenuti urbanistici e cartografici sul quale verificare, in condizioni concrete, la completezza delle informazioni, la coerenza delle relazioni territoriali e l'effettiva aggiornabilità dei dati.

5 Il progetto "Specifiche di contenuto dei PRG Regione Umbria"

In tale contesto normativo e informativo si inserisce il progetto "Specifiche di contenuto dei PRG Regione Umbria", finalizzato alla standardizzazione e alla normalizzazione degli strati informativi del Piano Regolatore Generale comunale (PRG), secondo le Regole tecniche per i Data Base GeoTopografici (DBGT) di cui al DM 10 novembre 2011. Il progetto coinvolge il Servizio infrastrutture per la mobilità e trasporto pubblico locale con la Sezione autorizzazioni e concessioni infrastrutturali – cartografia regionale per le materie del SIAT, il Servizio urbanistica, edilizia, politiche della casa, paesaggio e rigenerazione urbana con la Sezione urbanistica entrambi ricompresi nella Direzione regionale governo del territorio, ambiente, protezione civile, riqualificazione urbana, coordinamento PNRR, nonché il Settore pianificazione e gestione del territorio del Comune di Bastia Umbra, con il supporto specialistico dell'Area interoperabilità, dati e accessibilità dell'Agenzia per l'Italia Digitale (AgID).

Il progetto, caratterizzato da un approccio multidisciplinare e intersettoriale, persegue i seguenti obiettivi principali:

- definire un modello dati unico per la standardizzazione e l'integrazione delle informazioni del PRG parte strutturale nel più generale modello dati rappresentato dal Data Base GeoTopografico regionale, favorendo l'interoperabilità tra gli enti e garantendo coerenza con le direttive e gli indirizzi nazionali ed europei;
- formalizzare una Specifica di contenuto dei PRG (Specifica PRG) secondo la GeoUML methodology, quale estensione della Specifica per i DBGT di cui al DM 10 novembre 2011, organizzando le informazioni secondo una struttura articolata in Strati, Temi e Classi normalizzate, che integra il contenuto nel più generale framework nazionale di interoperabilità dei dati geospaziali definito da AgID;
- sperimentare l'applicazione delle Specifiche PRG con i contenuti del PRG parte strutturale del Comune di Bastia Umbra;
- definire e implementare un modello organizzativo e di governance dei dati condiviso, in una prima fase tra Regione e Comuni e, successivamente, con gli enti sovraordinati, finalizzato a migliorare i processi tecnico-amministrativi di interscambio informativo e a favorire la ricomposizione di un quadro unitario della pianificazione urbanistica a scala regionale. Tale modello è inoltre finalizzato allo sviluppo di servizi digitali accessibili attraverso l'infrastruttura geografica regionale UmbriaGeo da soggetti pubblici e privati;
- attivare processi di miglioramento continuo e di monitoraggio delle Specifiche PRG, favorendone l'adeguamento all'evoluzione degli standard, delle procedure e dei modelli dati e valorizzando le buone pratiche attraverso un approccio iterativo ed evolutivo;

- promuovere azioni di supporto e formazione finalizzate allo sviluppo, alla diffusione e all'utilizzo delle Specifiche PRG, rivolte ai Comuni, alla Rete delle professioni tecniche dell'Umbria, agli enti e soggetti interessati.

Nel complesso, il progetto si configura quindi come un percorso finalizzato non soltanto alla standardizzazione dei contenuti informativi della pianificazione urbanistica, ma anche alla definizione di un modello condiviso per la loro produzione, gestione, integrazione e diffusione. L'obiettivo è favorire la progressiva costruzione di un patrimonio informativo urbanistico regionale interoperabile, nel quale le informazioni prodotte ai diversi livelli amministrativi possano essere ricondotte a un modello comune. Tale patrimonio consentirà di sviluppare quadri conoscitivi integrati, supportare la redazione della componente strutturale del PRG comunale e la successiva mosaicatura a scala regionale, nonché favorire l'erogazione di servizi.

Le attività progettuali si basano sul modello dati del Data Base GeoTopografico multirisoluzione, realizzato dalla Regione Umbria nel 2014 per una vasta porzione del territorio regionale, comprendente l'asta del fiume Tevere e il Lago Trasimeno. Tale modello assicura la coerenza semantica e strutturale con il riferimento nazionale definito dalle Specifiche di contenuto dei DBGT, di cui al DM 10 novembre 2011. In continuità con questo impianto informativo, nel 2024 è stata inoltre realizzata la banca dati del Catasto Strade regionale, sviluppata secondo le relative Specifiche di contenuto.

Nelle Specifiche di contenuto è stato pertanto introdotto lo Strato 14 – Specifiche per i PRG parte strutturale, nel quale le componenti informative previste dall'Allegato 1 del RR 2/2015 sono state organizzate e formalizzate in Temi e Classi, secondo una struttura omogenea e coerente con il modello dati di riferimento. Lo Strato 14 si articola nei seguenti 12 Temi:

- Sistema delle componenti naturali e ambientali (1401);
- Aree agricole, cave e miniere (1402);
- Insediamenti esistenti e di nuova previsione, protezione civile (1403);
- Insediamenti esistenti, aree ed elementi del territorio che rivestono valore storico-culturale (art. 96 del TU) (1404);
- Edifici sparsi nel territorio che rivestono interesse storico, architettonico e culturale (art. 89, comma 4 del tu) (1405);
- Rischi: aree instabili per caratteristiche geomorfologiche ed idrogeologiche PAI e altre indagini - aree a rischio (1406);
- Beni paesaggistici (d.lgs. 42/2004 - parte terza) (1407);
- Aree paesaggisticamente rilevanti (1408);
- Infrastrutture lineari e nodali per la mobilità (1409);
- Infrastrutture tecnologiche (1410);
- Elementi insediativi, funzionali e infrastrutturali costituenti la Struttura Urbana Minima (SUM) (1411);
- Fasce di rispetto (1412).

A questi si aggiungono lo strato topologico relativo allo Zoning PRG che contiene un vincolo di copertura riferito alle Classi che nel loro insieme garantiscono la copertura dell'intero territorio comunale e i Metadati di istanza che, fra gli altri, comprendono

l'indicazione dell'Amministrazione titolare del dato di cui all'art 1, comma 2, lettera i) e art. 4, comma 2 del DM 10.11.2011.

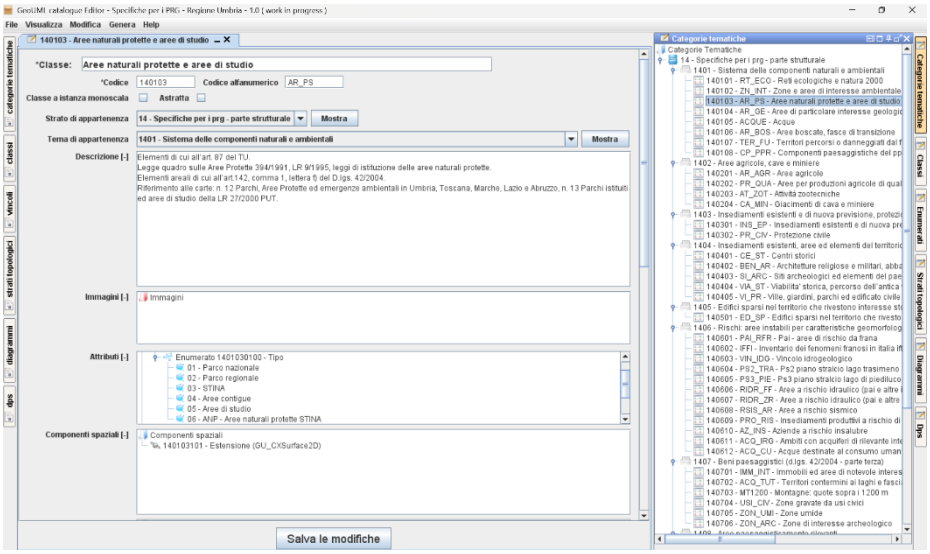


Fig. 4. Specifiche di contenuto dei PRG parte strutturale Regione Umbria gestita dal GeoUML Catalogue.

6 Conclusioni

L'implementazione della Specifica sui dati del PRG parte strutturale del Comune di Bastia Umbra ha evidenziato la necessità di mantenere e consolidare un confronto continuo, sia sugli aspetti di natura urbanistica sia sulle modalità di strutturazione e modellazione dei dati secondo il paradigma della GeoUML methodology. Tale attività risulta funzionale alla costruzione della mosaicatura dei PRG parte strutturale a scala regionale e a garantire il progressivo aggiornamento e adeguamento delle Specifiche PRG alle disposizioni normative vigenti e al framework di interoperabilità nazionale, nonché a orientare lo sviluppo degli strumenti di supporto alla gestione, validazione e aggiornamento dei dati della pianificazione comunale.

L'estensione del processo di implementazione agli altri Comuni si configura come un percorso progressivo e incrementale, strettamente correlato alle strategie di coinvolgimento, accompagnamento e supporto che l'Amministrazione regionale potrà promuovere nei confronti degli Enti locali. Tale processo dovrà inoltre tenere conto delle attività di formazione e delle fasi di adeguamento degli strumenti urbanistici comunali alle disposizioni della LR 1/2015, nonché delle esigenze e dei contributi provenienti dagli ulteriori soggetti coinvolti nel processo di evoluzione verso una infrastruttura territoriale regionale interoperabile.

Mappatura automatizzata degli impianti eolici in Italia mediante super-risoluzione di immagini Sentinel-2 e algoritmi di Machine Learning

Giulia Ronchetti [0000-0003-0951-0878], Matteo Gobbi Frattini [0009-0008-1390-8436] e Martina Aiello [0000-0002-4832-662X]

Dipartimento di Sviluppo Sostenibile e Fonti Energetiche, Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A., via Rubattino 54, 20134 Milano, Italia;
giulia.ronchetti@rse-web.it, matteo.gobbifrattini@rse-web.it, martina.aiello@rse-web.it

Abstract. Si propone una metodologia automatizzata per la mappatura degli aerogeneratori in Italia, basata su immagini Sentinel-2, algoritmi di super-risoluzione e classificazione Random Forest. Sono confrontati dati alla risoluzione originale e immagini ricampionate a 5 e 2.5 m. I risultati mostrano un miglioramento del dettaglio visivo, ma variazioni limitate nell'accuratezza della classificazione pixel-based, suggerendo l'impiego di approcci object-based per valorizzare le informazioni geometriche degli impianti.

Parole chiave: Sentinel-2, Super-risoluzione, Impianti eolici.

1 Introduzione

Lo sviluppo dell'energia eolica rappresenta uno dei pilastri fondamentali della transizione energetica in Italia e del raggiungimento degli obiettivi nazionali di decarbonizzazione definiti dal PNIEC (Piano Nazionale Integrato Energia e Clima). In questo scenario, come richiamato dal D.Lgs. 199/2021 per la creazione della Piattaforma Aree Idonee, la disponibilità di dati geografici aggiornati, interoperabili e liberamente accessibili è un requisito imprescindibile per valutare l'uso del suolo e supportare la pianificazione territoriale delle amministrazioni regionali. Tuttavia, sussiste una costante difficoltà nel reperire dati geolocalizzati accurati e aggiornati sull'effettiva ubicazione degli impianti: le informazioni in possesso degli operatori di settore non sono generalmente di libero accesso e, anche quando rese pubbliche, tendono a diventare rapidamente obsolete di fronte alla rapida espansione e trasformazione del settore [1].

Le metodologie per la mappatura degli impianti eolici spaziano dall'uso di dati collaborativi al telerilevamento satellitare. In letteratura, la creazione di database geografici specifici per le fonti rinnovabili viene talvolta affidata a iniziative di *crowdsourcing* (come OpenStreetMap), mappatura volontaria o campagne di misura [2], [3]. Tuttavia, per un monitoraggio oggettivo, esteso e continuo, il telerilevamento satellitare costituisce la soluzione preferibile, pur scontrandosi con vincoli tecnici ed

economici, dovuti alla relazione tra la dimensione dell'area di indagine, la dimensione degli aerogeneratori stessi e la risoluzione delle immagini satellitari. Da un lato, l'impiego di immagini ad alta (< 5 m) o altissima risoluzione (< 1 m), derivanti da costellazioni commerciali come WorldView, RapidEye o PlanetScope, garantisce il livello di dettaglio spaziale necessario per identificare i singoli aerogeneratori, ma è limitato ad aree geografiche ristrette ed è fortemente condizionato dai costi elevati dei dati. Dall'altro lato, le immagini a media risoluzione spaziale (10 - 30 m), in particolare quelle fornite gratuitamente dalla costellazione Sentinel-2 (S2), consentono l'analisi di interi contesti regionali e nazionali. Tuttavia, a una risoluzione di 10 m non è possibile individuare la singola pala eolica, bensì soltanto la piazzola di montaggio (corrispondente a circa 1–5 pixel), la quale viene facilmente confusa con elementi territoriali spettralmente simili quali rocce nude o strade sterrate [4]. Questa sovrapposizione spettrale genera elevati livelli di incertezza e impone un gravoso sforzo di fotointerpretazione manuale per la rimozione dei falsi positivi, riducendo la replicabilità e l'automazione del processo di mappatura su vasta scala.

Per superare questo collo di bottiglia e coniugare il dettaglio dell'alta risoluzione con la copertura gratuita e periodica di S2, la ricerca si è orientata verso l'uso di algoritmi di super-risoluzione (SR). Un algoritmo di SR è una tecnica computazionale che consente di aumentare la risoluzione spaziale di un'immagine, ovvero di migliorarne il livello di dettaglio. Questi algoritmi ricostruiscono informazioni ad alta definizione a partire da immagini a media/bassa risoluzione, utilizzando metodi basati su modelli statistici, apprendimento automatico o Deep Learning. Nello specifico dei dati S2, la letteratura si articola in due filoni principali: il primo mira a omogeneizzare le bande spettrali a minore risoluzione (20 m e 60 m) uniformandole alla risoluzione di 10 m [5], [6]; il secondo si focalizza invece sull'incremento del dettaglio spaziale delle bande RGBNIR a 10 m per portarle a risoluzioni di 5 m, 3 m o fino a 2 m [7]. Quest'ultimo approccio impiega sia metodi interpolativi tradizionali (es. interpolazione bicubica) sia modelli complessi quali Reti Neurali Convoluzionali (CNN) [8] e Reti Generative Avversarie (GAN) [9], addestrate su coppie di immagini ad alta (es. WorldView, RapidEye o costellazione Dove) e media risoluzione acquisite sulla stessa area, fino a soluzioni avanzate di *data fusion* e serie multitemporali, come l'algoritmo *DeepSent* [10]. Sebbene tali modelli siano stati applicati con successo in diverse applicazioni, principalmente in ambito di classificazione del territorio [11], attualmente non risultano in letteratura studi che abbiano applicato algoritmi di super-risoluzione a immagini Sentinel-2 per la mappatura e il riconoscimento specifico degli aerogeneratori eolici.

Per colmare questo divario, il presente lavoro propone una metodologia innovativa e automatizzata per il riconoscimento degli aerogeneratori sul territorio italiano, integrando l'uso di immagini Sentinel-2, algoritmi di super-risoluzione e modelli di Machine Learning. La procedura si articola in tre fasi principali: 1) l'applicazione della super-risoluzione alle bande RGBNIR delle immagini Sentinel-2 per aumentarne il livello di dettaglio spaziale; 2) la classificazione supervisionata tramite Machine Learning per l'identificazione automatica degli aerogeneratori; 3) la validazione dei risultati ottenuti attraverso il confronto con i database di riferimento esistenti. L'obiettivo principale è superare i vincoli di risoluzione delle immagini S2 e ridurre gli interventi manuali per la mappatura degli impianti eolici in Italia, sviluppando uno

strumento replicabile, scalabile e basato su dati ad accesso libero. Questo contributo intende così fornire un supporto concreto e continuo al monitoraggio del territorio, alla pianificazione energetica regionale e all'aggiornamento delle banche dati nazionali sulle fonti energetiche rinnovabili.

2 Materiali e metodi

2.1 Aree di studio

La metodologia proposta in questo studio è stata sviluppata a partire da 16 differenti aree di studio, posizionate nel sud Italia, in una zona ricca di impianti eolici, tra le regioni Molise, Campania, Puglia, Basilicata e Sicilia. Tra queste aree, 7 sono state selezionate come aree di training per addestrare l'algoritmo di classificazione (rappresentate in arancione in **Fig. 1**) e le rimanenti 9 come aree di test (in color ciano in **Fig. 1**).

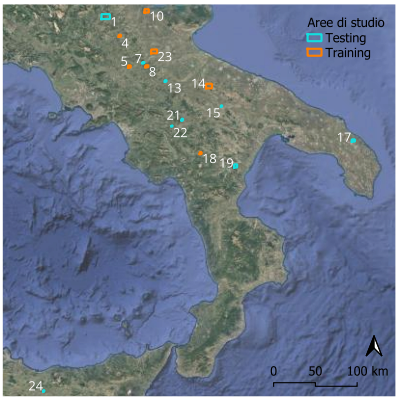


Fig. 1. Aree di studio e relativo utilizzo nella fase di training o testing dell'algoritmo.

Per ciascuna di queste aree di studio è stata selezionata una immagine della costellazione Sentinel-2, in una range temporale tra gli anni 2018 e 2024, in vari mesi dell'anno.

2.2 Metodologia

La metodologia proposta si divide in tre fasi principali, schematizzate nel *workflow* di **Fig. 2**. La prima fase della metodologia è dedicata alla super-risoluzione delle immagini S2 selezionate, limitatamente alle bande spettrali RGBNIR, con un fattore di scala da 2 a 4 volte, raggiungendo quindi un dettaglio da 5 m fino a 2.5 m. Considerando il livello raggiunto dalla comunità scientifica nello sviluppo di metodi di super-risoluzione per immagini S2, si è scelto di utilizzare algoritmi già disponibili in letteratura, dai meno complessi (es. *bicubic interpolation*) ai più avanzati (es. *deep learning*), con l'intento di mantenere la metodologia semplice e facilmente replicabile.

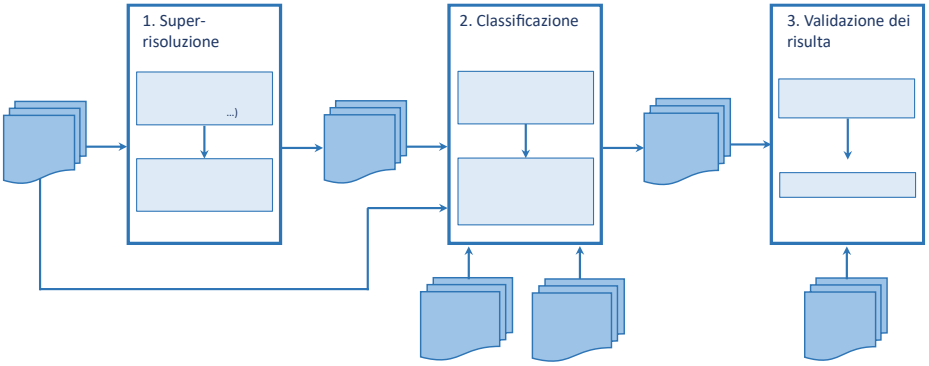


Fig. 2. Diagramma di flusso rappresentante le tre fasi principali della metodologia qui proposta.

Nella seconda fase della metodologia, si procede con la mappatura degli aerogeneratori mediante algoritmi di *machine learning* dedicati alla classificazione, in particolare l'algoritmo di classificazione supervisionato *Random Forest* [12]. In questo studio, è stata implementata una classificazione a 4 classi, comprendente: 1. WTG; 2. Aree agricole; 3. Aree naturali e bosco; 4. Strade. Per ciascuna classe sono stati utilizzati da 200 (per le classi meno presenti nelle aree di studio, WTG e aree naturali) a 400 (per le classi più presenti nelle aree di studio, aree agricole e strade) campioni per la fase di addestramento dell'algoritmo. Per ovviare allo sbilanciamento tra le classi, tra i parametri del *Random Forest* è stato selezionato "*balanced subsample*". A seguito della classificazione, i risultati sono stati post-processati con algoritmo *Sieve* per rimuovere rumore ed effetto sale e pepe nelle mappe e, come nel precedente studio [4], per ridurre il rischio di falsi positivi, la classificazione delle immagini è stata limitata esclusivamente alle aree in cui è alta la probabilità di installazione di impianti eolici, escludendo a priori aree tecnicamente non idonee (es. zone umide, corpi idrici, superfici urbane, etc.) o aree soggette a vincoli ambientali tramite l'uso di cartografia di base. Infine, la terza fase della metodologia consiste nella validazione delle mappe prodotte attraverso il calcolo della matrice di confusione, e delle relative accuratezze, tramite confronto degli aerogeneratori riconosciuti con un dataset che rappresenta la verità a terra opportunamente campionato. Per verificare l'efficacia della super-risoluzione sulle classificazioni finali, le mappe, la matrice di confusione e le metriche di accuratezza sono calcolate a partire dalla classificazione delle immagini ricampionate tramite le due metodologie, ma anche a partire dalle immagini alla risoluzione originale.
Algoritmi di super-risoluzione. Per incrementare il livello di dettaglio spaziale delle immagini Sentinel-2 (S2), sono stati applicati due algoritmi di super-risoluzione, caratterizzati da differenti fattori di scala.

1. Interpolazione bicubica (fattore 2): applicata mediante la libreria Python *rasterio* [13], consente di portare la risoluzione spaziale delle bande originali da 10 m a 5 m, attraverso una ricampionatura basata sull'interpolazione dei pixel vicini.
2. ESA OpenSR (fattore 4): utilizza il modello *Latent Diffusion Super-Resolution for Sentinel-2* (LDSR-S2), basato sulla diffusione latente, per ricostruire le bande

RGBNIR a una risoluzione spaziale di 2.5 m. Il modello impiega il campionamento DDIM (*Denoising Diffusion Implicit Models*), condizionato alle osservazioni originali a 10 m, per generare dettagli e texture mantenendo la coerenza con la struttura della scena [14].

L'impiego dei due approcci consente di confrontare una tecnica di ricampionamento convenzionale con un metodo basato su *deep learning* generativo.

Nel seguito dell'articolo, i risultati ottenuti dalle immagini alla risoluzione originale, sottoposte a super-risoluzione bicubica e a super-risoluzione tramite ESA OpenSR saranno identificati, rispettivamente, dai suffissi 1x, 2x e 4x.

3 Risultati

3.1 Immagini post super-risoluzione

In questo paragrafo sono mostrati alcuni esempi delle immagini originali e delle rispettive immagini sottoposte a super-risoluzione bicubica e ESA OpenSR (**Fig. 3**). All'aumentare del fattore di scala, si nota un miglioramento effettivo nel riconoscimento visivo dei dettagli dell'immagine, rendendo la scena stessa più intelleggibile anche per l'utente.

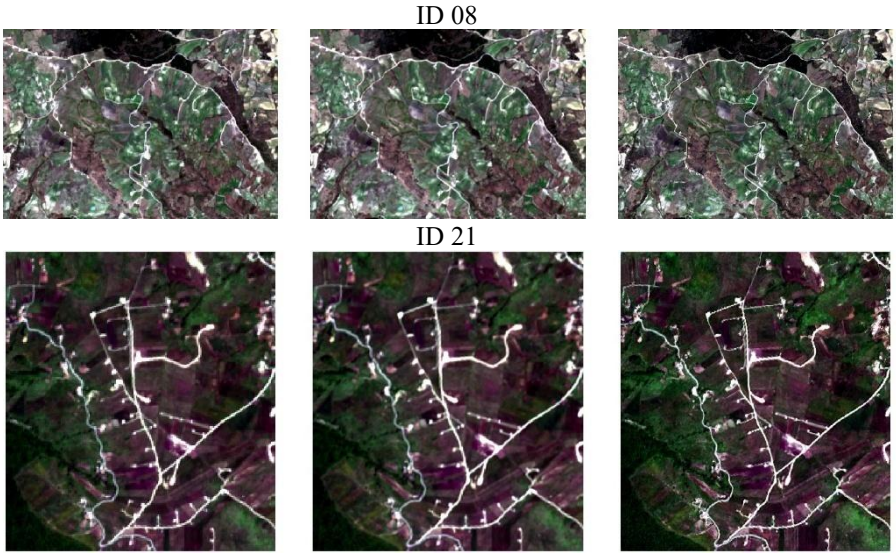


Fig. 3. Rappresentazione RGB per le immagini delle aree di studio ID 08 e ID 21, al variare della risoluzione: 1x (a sinistra), 2x (al centro), 4x (a destra).

Inoltre, viene mantenuta coerenza spettrale tra le bande alle diverse risoluzioni, come rappresentato dagli istogrammi dei valori dei pixel in **Fig. 4** (limitatamente alle immagini sull'area ID 21, per esigenze di spazio). In **Fig. 4**, gli istogrammi dei valori per i tre fattori di scala risultano praticamente sovrapposti, dimostrando che l'informazione spettrale rimane invariata al variare della risoluzione.

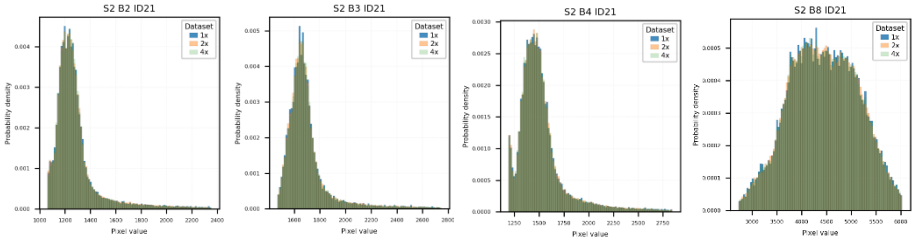
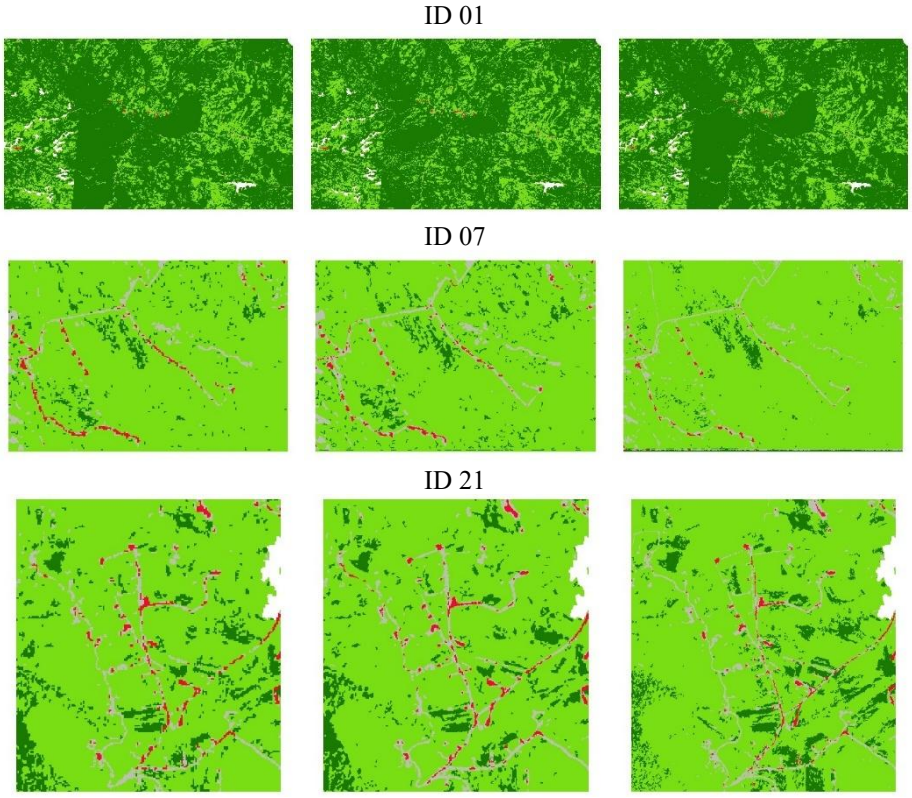


Fig. 4. Istogrammi dei valori per le 4 bande delle immagini relative all'area ID 21.

3.2 Mappe di WTGs

In **Fig. 5** vengono mostrate le mappature prodotte per alcune aree di studio utilizzate in fase di test (per esigenze di spazio). Nelle mappe, le 4 classi sono rappresentate rispettivamente con questi colori: *WTG* in rosso, *Aree agricole* in verde chiaro, *Aree naturali e bosco* in verde scuro, *Strade* in grigio.



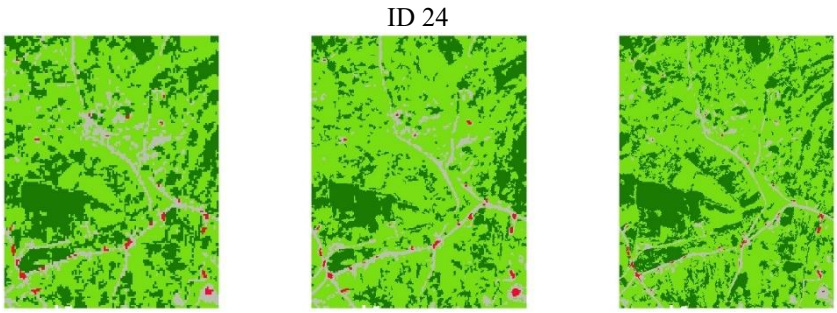


Fig. 5. Mappature generate per alcune delle aree di studio utilizzate in fase test, al variare della risoluzione: 1x (a sinistra), 2x (al centro), 4x (a destra).

3.3 Metriche di accuratezza

In

Table 1, sono mostrate le metriche di accuratezza ricavate tramite il calcolo delle matrici di confusione per le mappe generate su tutte le aree di studio test, specificatamente per la classe degli aerogeneratori.

In

Table 1: TP = *True Positive*; FP = *False Positive*; FN = *False Negative*; TN = *True Negative*.

Table 1. Metriche di accuratezza al variare della risoluzione delle immagini.

Mappa	TP	FP	FN	TN	Recall	Precision	F1-score	IoU
1x	114	91	50	934	69.5%	55.6%	61.8%	44%
2x	116	97	48	928	70.7%	54.5%	61.5%	44%
4x	109	78	55	947	66.5%	58.3%	62.1%	45%

4 Conclusioni

In questo studio sono stati testati algoritmi di super-risoluzione applicati alle immagini Sentinel-2 per la mappatura degli aerogeneratori (WTG) in alcune aree di studio italiane. Gli algoritmi mantengono la coerenza spettrale tra le bande RGBNIR alle diverse risoluzioni, migliorando al contempo il dettaglio e l'interpretabilità visiva delle immagini. Nell'ambito della classificazione pixel-based, basata sulle caratteristiche spettrali, non sono emersi miglioramenti significativi all'aumentare della risoluzione, ad eccezione di una lieve riduzione dei falsi positivi. Il maggiore dettaglio geometrico suggerisce tuttavia di esplorare approcci object-based, basati sulla segmentazione delle immagini e sul riconoscimento di forme e geometrie degli oggetti target, integrando così l'informazione spaziale e morfologica con quella spettrale.

Riferimenti bibliografici

[1] G. Ronchetti, I. Galbiati, and E. Garofalo, 'Analyzing wind and photovoltaic plant development toward the energy transition in Italy', *Next Energy*, vol. 8, p. 100265, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.nxener.2025.100265.

[2] S. Dunnett, A. Sorichetta, G. Taylor, and F. Eigenbrod, 'Harmonised global datasets of wind and solar farm locations and power', *Sci Data*, vol. 7, no. 1, p. 130, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41597-020-0469-8.

[3] R. Peters, J. Berlekamp, K. Tockner, and C. Zarfl, 'RePP Africa – a georeferenced and curated database on existing and proposed wind, solar, and hydropower plants', *Sci Data*, vol. 10, no. 1, p. 16, Jan. 2023, doi: 10.1038/s41597-022-01922-1.

[4] M. Aiello, D. Airoldi, and E. Garofalo, 'Mapping onshore wind turbine generators in Italy from Sentinel-2 data', *GEOmedia*, vol. 26, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2022.

[5] C. Lanaras, J. Bioucas-Dias, S. Galliani, E. Baltsavias, and K. Schindler, 'Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 146, pp. 305–319, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.018.

[6] S. E. Armannsson, M. O. Ulfarsson, and J. Sigurdsson, 'A Learned Reduced-Rank Sharpening Method for Multiresolution Satellite Imagery', *Remote Sensing*, vol. 17, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2025, doi: 10.3390/rs17030432.

[7] M. Galar, R. Sesma, C. Ayala, and C. Aranda, 'SUPER-RESOLUTION FOR SENTINEL-2 IMAGES', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2-W16, pp. 95–102, Sep. 2019, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-95-2019.

[8] M. Galar, R. Sesma, C. Ayala, L. Albizua, and C. Aranda, 'Super-Resolution of Sentinel-2 Images Using Convolutional Neural Networks and Real Ground Truth Data', *Remote Sensing*, vol. 12, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12182941.

[9] L. Salgueiro Romero, J. Marcello, and V. Vilaplana, 'Super-Resolution of Sentinel-2 Imagery Using Generative Adversarial Networks', *Remote Sensing*, vol. 12, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12152424.

[10] T. Tarasiewicz *et al.*, 'Multitemporal and multispectral data fusion for super-resolution of Sentinel-2 images', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1109/TGRS.2023.3311622.

[11] M. Chanev, I. Kamenova, P. Dimitrov, and L. Filchev, 'Evaluation of Sentinel-2 Deep Resolution 3.0 Data for Winter Crop Identification and Organic Barley Yield Prediction', *Remote Sensing*, vol. 17, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2025, doi: 10.3390/rs17060957.

[12] L. Breiman, 'Random Forests', *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.

[13] 'Rasterio: access to geospatial raster data — rasterio 1.4.4 documentation'. Accessed: Oct. 13, 2026. [Online]. Available: https://rasterio.readthedocs.io/en/stable/

[14] S. Donike, C. Aybar, L. Gómez-Chova, and F. Kalaitzis, 'Trustworthy Super-Resolution of Multispectral Sentinel-2 Imagery With Latent Diffusion', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 18, pp. 6940–6952, 2025, doi: 10.1109/JSTARS.2025.3542220.

151. QGIS e viewshed-analysis per lo studio dell'impatto dell'intervisibilità degli impianti eolici e fotovoltaici

Ilaria Scatarzi, Laura Tinarelli

Presentazione e discussione di casi studio reali su intervisibilità e studio dell’impatto visivo di nuovi impianti energetici attraverso l’utilizzo del plug-in viewshed-analysis, l’impostazione dei parametri di altezza e distanza di osservazione, del modello digitale del terreno e successivi calcoli e approfondimenti sia sui dati raster ottenuti dal plugin che da elaborazioni che meglio definiscono la morfologia del terreno. In un contesto come quello attuale, nel quale si contrappongono la domanda crescente di energia da fonti rinnovabili e la tutela paesaggistica, l’utilizzo di QGIS capace di elaborare da un punto di vista quali-quantitativo, si pone come mezzo potente ed efficace per analizzare gli impatti prevedibili e guidare le progettazioni ad una minimizzazione degli effetti su paesaggio e territorio.

In particolare si analizzerà il diverso approccio metodologico fra studio di intervisibilità di impianti eolici e quello di impianti fotovoltaici, rapportando i risultati potenziali “puri” derivati da tali analisi, con le reali condizioni di visibilità dei luoghi, presentando carte che tengano conto oltre che della morfologia dei luoghi anche della presenza di vegetazione e di parametri di visibilità dell’occhio umano, con calcolo dei pixel interessati e delle superfici riportate nelle categorie di visibilità e determinazione di fasce di nitidezza per interpretare più coerentemente i risultati.

La presentazione porrà l’attenzione anche sulla resa grafica e la conseguente lettura di tali informazioni nonché sulla produzione di carte con legenda bivariata per uno studio approfondito degli impatti di intervisibiltà cumulativa.

GAP-SOLAR (GeoAI Photovoltaic Solar Mapping Piemonte) GeoAI e telerilevamento per la governance energetica: Mappatura automatizzata e monitoraggio continuo del parco fotovoltaico in Piemonte

Enrico Suozzi[1], Andrea Di Dio[1], Angelo Robotto[2], Elisa Guiot[3], Mario Ancilli[4], Stefano Campus[4], Gianbartolomeo Siletto[4]

1 [Staff della Direzione Ambiente, Energia e Territorio, Regione Piemonte, Torino, Italia] – [enrico.suozzi@regione.piemonte.it – andrea.didio@regione.piemonte.it]
2 [Direttore della Giunta Regionale Regione Piemonte, Torino, Italia] – [angelo.robotto@regione.piemonte.it]
3 [Settore A1616A – Sviluppo energetico sostenibile della Direzione Ambiente, Energia e Territorio, Regione Piemonte, Torino, Italia] – [elisa.guiot@regione.piemonte.it]
4 [Settore A1613B – Sistema informativo territoriale e ambientale della Direzione Ambiente, Energia e Territorio, Regione Piemonte, Torino, Italia] – [mario.ancilli@regione.piemonte.it – stefano.campus@regione.piemonte.it gianbartolomeo.siletto@regione.piemonte.it]

Abstract. La crescita rapida della potenza fotovoltaica installata mette in difficoltà gli enti territoriali, che devono monitorare gli impianti, pianificare l'energia e tenere aggiornati gli inventari regionali: su vaste aree i metodi di censimento tradizionali costano troppo e rendono poco. In questo lavoro presentiamo una pipeline GeoAI end-to-end e modulare, scritta in Python, che mappa, segmenta e georeferenzia in automatico gli impianti solari a partire da immagini telerilevate. A riconoscere gli impianti è lo strumento GeoAI Solar Panel Detection (OpenGeoAI), addestrato e validato con una libreria costruita da noi su 50 tipologie diverse di impianti fotovoltaici, individuate nelle ortofoto AGEA dell'intero territorio regionale. La pipeline è organizzata in quattro moduli: audit puntuale, scansione massiva comunale, spatial join e rilevamento di precisione. Negli impianti industriali più estesi il tiling frammenta e taglia i poligoni; per limitare il problema abbiamo messo a punto una strategia di inferenza multi-offset a croce, con cinque passaggi traslati (±100 m) e un'unione geometrica finale. I risultati preliminari mostrano un compromesso netto tra tempi e accuratezza. I moduli più rapidi rispondono in pochi secondi, ma con un'accuratezza del 60-80%; il modulo multi-offset supera il 90% (valore stimato) e riduce la frammentazione geometrica del 14%. Ne esce uno strumento operativo e scalabile per le pubbliche amministrazioni, che in futuro potrà accogliere dati satellitari multi-temporali (Sentinel, IRIDE).

Parole chiave: GeoAI, Solar Panel Detection, OpenGeoAI, Segmentazione Semantica, Deep Learning, Ortofoto AGEA, Multi-Offset Inference, GIS.

1 Introduzione

In Italia e nel resto dell'Unione Europea la transizione energetica ha fatto crescere in modo marcato la potenza fotovoltaica installata, tanto sui tetti delle case quanto negli impianti a terra di scala industriale. Per gli enti pubblici questo significa più lavoro: bisogna monitorare gli impianti, pianificare il territorio, valutarne l'impatto sul paesaggio e tenere aggiornate le basi dati. I metodi classici di censimento, cioè sopralluoghi e fotointerpretazione manuale, diventano troppo onerosi quando l'area da coprire è un comune, una provincia o un'intera regione.

Nel frattempo l'intelligenza artificiale applicata all'osservazione della Terra (GeoAI) è maturata, e i dati geospaziali ad alta risoluzione sono sempre più accessibili, sia in streaming tramite servizi Web Map Service (WMS) sia da archivi ortofotogrammetrici ufficiali come quello AGEA (Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura). Oggi è quindi possibile individuare e vettorializzare i moduli fotovoltaici in automatico, con un'accuratezza compatibile con l'uso operativo. Da qui parte il nostro lavoro, che descrive progettazione, architettura e validazione preliminare di una pipeline GeoAI modulare per mappare e georeferenziare in automatico gli impianti solari.

Il contributo è di due tipi. Il primo è un'architettura a quattro moduli, ciascuno pensato per un caso d'uso preciso: audit puntuale, scansione massiva, integrazione con le ortofoto locali e rilevamento di precisione sui grandi impianti. Chi la usa può così scegliere l'equilibrio giusto tra accuratezza e tempo di calcolo. Il secondo è una strategia originale di inferenza multi-offset a croce, che serve a ridurre la troncatura dei poligoni ai bordi delle finestre di elaborazione della rete neurale, un problema ricorrente quando si segmentano oggetti di grandi dimensioni con il tiling.

2 Stato dell'arte

Nell'ultimo decennio il deep learning è stato usato sempre più spesso per estrarre infrastrutture energetiche dalle immagini di telerilevamento. I modelli di segmentazione semantica su immagini aeree e satellitari, in particolare, hanno permesso di monitorare in automatico gli impianti fotovoltaici, anche su aree estese grazie a strategie di mosaicking e finestre mobili. [1]

Mettere insieme sistemi informativi geografici (GIS), dati di osservazione della Terra e metodi multicriterio è utile per la pianificazione energetica sostenibile e per trovare i siti adatti agli impianti rinnovabili [2].

Dal punto di vista metodologico, la segmentazione semantica è uno degli approcci principali per estrarre oggetti planari da immagini raster. Minaee et al. ne hanno fatto una rassegna che ordina architetture, dataset e criteri di valutazione delle principali famiglie di modelli di deep learning [3]. Gli studi recenti sull'estrazione di array fotovoltaici da immagini ad alta risoluzione mostrano che distribuzione e scala delle feature, insieme al post-processing, incidono parecchio sulla continuità e sull'accuratezza delle geometrie estratte. Noi affrontiamo il problema con una strategia di inferenza multi-offset, pensata per attenuare gli effetti di bordo introdotti dal tiling [4].

Molti di questi lavori si concentrano soprattutto sull'ottimizzazione del modello di segmentazione. Il nostro invece si muove a livello di sistema: propone un'architettura operativa end-to-end, dalla scelta della ROI fino a output vettoriali georeferenziati, pensata per essere usata direttamente dagli enti territoriali.

3 Materiali e metodi

La pipeline è scritta interamente in Python. GeoPandas gestisce i dati vettoriali, Rasterio legge, scrive e georeferenzia i raster, Shapely si occupa delle operazioni geometriche. Il tutto lavora insieme a servizi Web Map Service conformi allo standard OGC WMS 1.3.0 e a un modello di deep learning per l'object detection e la segmentazione dei moduli fotovoltaici. L'operatore interagisce con il sistema tramite semplici interfacce grafiche basate su matplotlib.widgets.

3.1 Modello AI e costruzione del dataset di addestramento

Il cuore di intelligenza artificiale della pipeline si appoggia all'architettura e al flusso metodologico di GeoAI Solar Panel Detection (OpenGeoAI, https://opengeoai.org/examples/solar_panel_detection/). Il territorio piemontese è molto eterogeneo: per adattare il modello abbiamo costruito una libreria di ground truth su misura, a partire dalle ortofoto ad alta risoluzione dell'archivio AGEA.

Per addestrare e affinare il modello abbiamo selezionato, annotato e classificato 50 tipologie diverse di impianti e pannelli fotovoltaici presenti sul territorio regionale. Le tipologie cambiano per geometria, inclinazione, orientamento, materiale, colore di riflettanza e contesto di installazione (ad esempio coperture industriali, tetti residenziali, impianti a terra, agrivoltaico). Questa libreria è la base di conoscenza che permette alla rete neurale di generalizzare l'estrazione e la segmentazione dei moduli fotovoltaici in tutti i moduli operativi della pipeline, descritti qui sotto.

3.2 Architettura generale della pipeline

Il flusso di elaborazione ha quattro passi: acquisizione dei dati (WMS o raster locale) → grigliatura e spatial join tra centroide dei pannelli e grigliato AGEA → inferenza GeoAI → dissolve multi-offset. Come input usiamo servizi WMS interrogati alla risoluzione massima di 20 cm/pixel, oppure archivi offline in GeoTIFF con i relativi file di georeferenziazione TFW. Il risultato finale è un insieme di geometrie vettoriali in GeoJSON, accompagnate dal raster ritagliato e georeferenziato in GeoTIFF, che si importano direttamente in ambiente GIS.

3.3 Script 1 – Selettore interattivo WMS (Target Audit)

Il primo modulo serve per le verifiche puntuali e per il rapido scouting di singoli impianti. L'operatore sceglie la Regione di Interesse (ROI) da un'interfaccia grafica, selezionando Provincia e Comune. Lo script scarica il mosaico WMS di quell'area alla

risoluzione massima di 20 cm/pixel e passa il crop assemblato alla rete neurale, che restituisce un file GeoJSON con le geometrie individuate e un GeoTIFF georeferenziato dell'area analizzata.

3.4 Script 2 – Analisi comunale massiva (Bulk Scan)

Il secondo modulo scansiona in automatico interi territori comunali. Il territorio viene diviso in una maglia regolare di celle da 750 m di lato, e si elaborano solo le celle che intersecano il comune: così le chiamate API calano, secondo le nostre stime, del 40%. Su territori estesi il rischio è saturare la RAM o incorrere in timeout di rete, per questo l'architettura pulisce sistematicamente i dati temporanei e può riprendere il lavoro dallo stato salvato.

3.5 Script 3 – Spatial join e raccolta ortofoto AGEA

Il terzo modulo fa da ponte tra i poligoni preliminari trovati dagli Script 1 e 2 e le ortofoto ad alta risoluzione disponibili in locale (archivio AGEA). Per prima cosa controlla e allinea i sistemi di riferimento (CRS) dei due dataset, ad esempio riproiettando il layer AGEA nel sistema dei poligoni rilevati, con l'operazione riportata in (1).

gdf_agea = gdf_agea.to_crs(gdf_pannelli.crs) (1)

Poi esegue uno spatial join per associare i poligoni al grigliato ufficiale AGEA. Se alcune immagini hanno una georeferenziazione interna incompleta, il modulo ricostruisce la corretta matrice di trasformazione affine leggendo i file world (.tfw) associati: in questo modo raster e vettori restano coerenti nello spazio nelle analisi successive.

3.6 Script 4 – Analisi avanzata Multi-Offset

Nei grandi impianti fotovoltaici industriali le finestre di elaborazione della rete neurale (tiling) si incontrano spesso proprio sopra i pannelli, che finiscono troncati vicino ai bordi delle tile. Per ridurre sistematicamente l'errore, lo Script 4 esegue un crop centrato di 600×600 m e lo ripete in cinque passaggi traslati a croce: (i) crop centrato sul centroide esatto del poligono pre-rilevato; (ii) spostamento di +100 m verso Est; (iii) −100 m verso Ovest; (iv) +100 m verso Nord; (v) −100 m verso Sud.

Le predizioni dei cinque passaggi vengono poi fuse con un'unione geometrica non distruttiva (unary_union). Si ottiene così il contorno esatto del poligono, senza discontinuità né tagli residui dovuti al tiling.

3.7 Protocollo di valutazione

Abbiamo confrontato i moduli su accuratezza attesa, tempi di esecuzione e ambito d'uso. I valori della Sezione 4 vanno letti come stime preliminari, basate su verifiche empiriche.

4 Risultati

La Tabella 1 mette a confronto i tre moduli principali della pipeline: ambito di utilizzo, sorgente dei dati, gestione dell'overlap tra tile, tempi di esecuzione e accuratezza attesa.

Tabella 1. Confronto prestazionale tra i moduli della pipeline GeoAI.

Metrica / Parametro	**Script 1 (Target Audit)**	**Script 2 (Comune Bulk)**	**Script 4 (Multi-Offset)**
Ambito di utilizzo	Ispezione visiva interattiva	Inventario massivo comunale	Rilevamento geometrico di precisione
Sorgente immagini	WMS	WMS	Ortofoto locali GeoTIFF + TFW
Tecnica di overlap	Finestra standard (512×512 px)	Finestra standard (512×512 px)	5 passaggi a croce (±100 m)
Tempo di esecuzione	Pochi secondi	Da 2 Ore in su (in base al territorio)	Da minuti a ore
Accuratezza attesa*	70% – 80%	60% – 70%	> 90%

** Stima preliminare basata su verifiche empiriche; da consolidare con protocollo di validazione quantitativo (cfr. §3.6).*

I risultati mostrano un chiaro compromesso tra velocità e accuratezza geometrica. Lo Script 1 risponde in pochi secondi ed è ideale per le verifiche puntuali, ma la sua accuratezza attesa è più bassa (70–80%). Lo Script 2 copre l'intero territorio comunale e ha un'accuratezza attesa leggermente inferiore (60–70%); la causa più probabile è la maggiore eterogeneità del ricampionamento WMS su aree estese.

Il modulo Multi-Offset (Script 4) supera il 90% di accuratezza attesa, ma richiede tempi più lunghi. In particolare, i cinque passaggi traslati a croce riducono del 14% la frammentazione delle geometrie nei grandi impianti industriali, rispetto alla griglia standard a finestra singola. È una conferma dell'efficacia della strategia contro la troncatura ai bordi delle tile discussa in letteratura [4].

5 Discussione

5.1 Implicazioni operative

Grazie alla struttura modulare la pipeline si adatta a scenari diversi: dal controllo su un singolo impianto, utile nelle fasi di verifica, fino al censimento sistematico a scala comunale o regionale, che serve alla pianificazione energetica del territorio. Lo Script 4 è più oneroso dal punto di vista computazionale, ma la sua alta accuratezza lo rende adatto soprattutto all'inventario dei grandi impianti industriali.

5.2 Limiti dello studio

Il limite principale è la disomogeneità temporale tra le campagne di acquisizione: le variazioni stagionali e il tempo trascorso tra la ripresa e oggi possono creare disallineamenti rispetto allo stato reale del territorio. Il secondo limite è che al momento manca un protocollo di validazione quantitativo standardizzato, basato su ground truth indipendente.

5.3 Sviluppi futuri

In futuro vorremmo sviluppare pipeline dedicate alla ricucitura (temporal stitching) dei vuoti temporali tra voli ortofotogrammetrici consecutivi, e integrare costellazioni satellitari a media-alta risoluzione, come Sentinel e la nuova costellazione italiana IRIDE, insieme a piattaforme cloud come Google Earth Engine. L'obiettivo è ampliare la copertura temporale e spaziale della pipeline.

6 Conclusioni

Abbiamo descritto l'architettura e la validazione preliminare di una pipeline GeoAI modulare per mappare e georeferenziare in automatico gli impianti fotovoltaici, che unisce sorgenti WMS e ortofoto AGEA ad alta risoluzione con modelli di deep learning per la segmentazione. I quattro moduli permettono di bilanciare velocità di elaborazione e accuratezza geometrica, mentre la strategia multi-offset a croce si è rivelata efficace nel ridurre la frammentazione delle geometrie nei grandi impianti industriali.

I risultati preliminari sono incoraggianti, ma prima di considerarli definitivi serve una validazione quantitativa più rigorosa, con dataset di ground truth indipendenti. I prossimi passi sono l'integrazione di dati satellitari multi-temporali e la standardizzazione del protocollo di valutazione.

7 Riferimenti bibliografici

1. Soudani, K., et al.: Remote sensing for monitoring photovoltaic solar plants in Brazil using deep semantic segmentation. Energies 14(10), 2960 (2021). https://doi.org/10.3390/en14102960
2. Spyridonidou, S., Sismani, G., Loukogeorgaki, E., Vagiona, D. G., Ulanovsky, H., Madar, D.: Sustainable spatial energy planning of large-scale wind and PV farms in Israel: A collaborative and participatory planning approach. Energies 14(3), 551 (2021). https://doi.org/10.3390/en14030551
3. Minaee, S., Boykov, Y. Y., Porikli, F., Plaza, A. J., Kehtarnavaz, N., Terzopoulos, D.: Image segmentation using deep learning: A survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 44(7), 3523–3542 (2022). https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3059968
4. Li, D., et al.: Impact of deep convolutional neural network structure on photovoltaic array extraction from high spatial resolution remote sensing images. Remote Sensing 15(18), 4554 (2023). https://doi.org/10.3390/rs15184554
5. Gillies, S., et al.: Rasterio: Geospatial raster I/O for Python programmers. GitHub repository. https://github.com/rasterio/rasterio
6. Jordahl, K., et al.: GeoPandas: Python tools for geographic data. Zenodo (2020).
7. Open Geospatial Consortium: Web Map Service Implementation Specification, Version 1.3.0. OGC 06-042 (2006). https://www.ogc.org/standards/wms/

Segmentazione delle chiome arboree da ortofoto RGB mediante deep learning per la modellazione dei servizi ecosistemici a scala di singolo albero: il caso di Firenze

Gioele Tiberi[1], Costanza Borghi[2,3,*], Mattia Niccoli[2], Elia Vangi[2], Giovanni D'Amico[2], Gherardo Chirici[2,3]

[1] Dipartimento di Architettura (DIDA), Università degli Studi di Firenze, Via della Mattonaia 8, 50121 Firenze, gioele.tiberi@unifi.it
[2] geoLAB – Laboratorio di Geomatica Forestale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Via San Bonaventura 13, 50145 Firenze, costanza.borghi@unifi.it, mattia.niccoli@unifi.it, elia.vangi@unifi.it, giovanni.damico@unifi.it, gherardo.chirici@unifi.it
[3] FFC – Fondazione per il Futuro delle Città, Firenze

Autore corrispondente: costanza.borghi@unifi.it

Abstract. Si presenta un flusso di lavoro GeoAI per delineare le singole chiome arboree (ITC) da ortofoto RGB regionali a 20 cm, con un rilevatore di deep learning e un filtro NDVI–CHM. In tre aree verdi di Firenze sono state delineate 645 chiome (55 specie): il rilevatore ne ha delineate correttamente l'83,4% (precisione 0,88, *recall* 0,83, F1 0,86), mentre le chiome contigue hanno richiesto correzione manuale. Gli attributi derivati hanno alimentato il modello AIRTREE a scala di singolo albero.

Parole chiave: GeoAI, Deep learning, Segmentazione, Ortofoto RGB, Foresta urbana

1 Introduzione

Gli alberi urbani forniscono servizi ecosistemici essenziali, tra cui la rimozione degli inquinanti atmosferici, l'assorbimento di carbonio e la mitigazione dell'isola di calore [1, 2]. La capacità di fornire tali servizi dipende in larga misura dalle dimensioni e dalla forma della chioma, oltre che da tratti specie-specifici [3]. L'informazione a scala di singolo albero proviene tradizionalmente da inventari rilevati in campo [4]: rilievi costosi e in genere limitati agli alberi pubblici [5]. Il telerilevamento e, più di recente, l'intelligenza artificiale geospaziale (GeoAI) offrono la possibilità di produrre la stessa informazione su aree estese, includendo anche la componente privata del verde urbano. Il rilevamento dei singoli alberi da LiDAR aereo è stato ampiamente indagato, soprattutto con metodi non supervisionati [6], mentre il rilevamento su ortofoto RGB ha ricevuto meno attenzione [7]. Le ortofoto RGB, prive di informazione tridimensionale diretta, sono però meno costose e più semplici da elaborare, e la crescente disponibilità di immagini ad altissima risoluzione potrebbe rendere disponibili dati per singolo albero su territori molto ampi [8, 9]. I primi metodi su immagini ottiche, basati su massimi locali di luminosità, *watershed* o regole geometriche [10], vanno calibrati su forme e dimensioni specifiche delle chiome e si trasferiscono con difficoltà all'eterogeneità urbana [7]. Il deep learning è oggi l'approccio di riferimento per

l'*object detection* su immagini RGB, ed è stato applicato con successo alla delineazione delle chiome [8, 11], fino alla scala metropolitana [9].
Gli studi di rilevamento, tuttavia, si fermano per lo più alla delineazione geometrica delle chiome [9, 11], mentre i modelli ecofisiologici per la stima dei servizi ecosistemici, come AIRTREE, sono di norma parametrizzati con dati di campo, valori medi per specie o dati aggregati per area [12, 13]. Le due linee di ricerca si sono quindi sviluppate in larga parte separatamente. Il presente lavoro, con un'attenzione prevalente alla componente GeoAI, si propone di: (i) implementare e valutare una procedura di deep learning per la delineazione delle singole chiome (*individual tree crown*, ITC) da ortofoto RGB regionali liberamente accessibili; (ii) derivare per ciascun albero gli attributi strutturali richiesti dalla modellazione, integrando LiDAR e machine learning; (iii) verificarne l'uso come input di un modello ecofisiologico multistrato.

2 Materiali e metodi

2.1 Area di studio e dati di riferimento

La procedura è stata applicata a tre aree verdi del Comune di Firenze: due piazze del centro cittadino (Piazza d'Azeglio e Piazza dell'Indipendenza) e un parco urbano (Giardino Lippi). La città è caratterizzata da un clima sub-mediterraneo con estati calde e secche e da un'elevata stabilità atmosferica, che favorisce lo stress termico e l'accumulo di inquinanti [2]. Come dato di riferimento è stato utilizzato l'inventario arboreo pubblico del Comune di Firenze, disponibile sul portale Open Data della Regione Toscana (https://dati.toscana.it/dataset/42cd1073-521f-4040-9491-e993d03663a4): il dataset è costituito da punti georeferenziati rilevati con GPS e riporta, per ciascun albero, identificativo, sito, quartiere, specie botanica, nome comune e circonferenza del fusto.

2.2 Dati telerilevati

Per la delineazione delle chiome sono state utilizzate le ortofoto della campagna regionale OFC 2023, acquisite in volo estivo da CGR S.p.A. per conto della Regione Toscana, con risoluzione a terra (GSD) di 20 cm, quattro bande (RGB e NIR) e profondità radiometrica di 8 bit per canale, accessibili tramite servizio WMS dell'infrastruttura regionale Geoscopio (https://www.regione.toscana.it/-/geoscopio). Le bande RGB sono state impiegate per il rilevamento delle chiome, mentre la banda NIR ha consentito il calcolo dell'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Il modello delle altezze della vegetazione (*Canopy Height Model*, CHM) è stato ricavato dal rilievo LiDAR 2023 del Comune di Firenze, i cui modelli digitali della superficie (DSM) e del terreno (DTM) sono pubblicati tramite servizio WMS comunale (strati DSM_Lidar_2023 e DTM_Lidar_2023), per differenza tra le due griglie:

$$\mathrm{CHM} = \mathrm{DSM} - \mathrm{DTM} \tag{1}$$

Il CHM è stato filtrato per rimuovere rumore, strutture non vegetali (edifici, linee elettriche) e valori negativi, ed è stato utilizzato sia come soglia strutturale per il rilevamento sia per derivare l'altezza totale di ciascun albero.

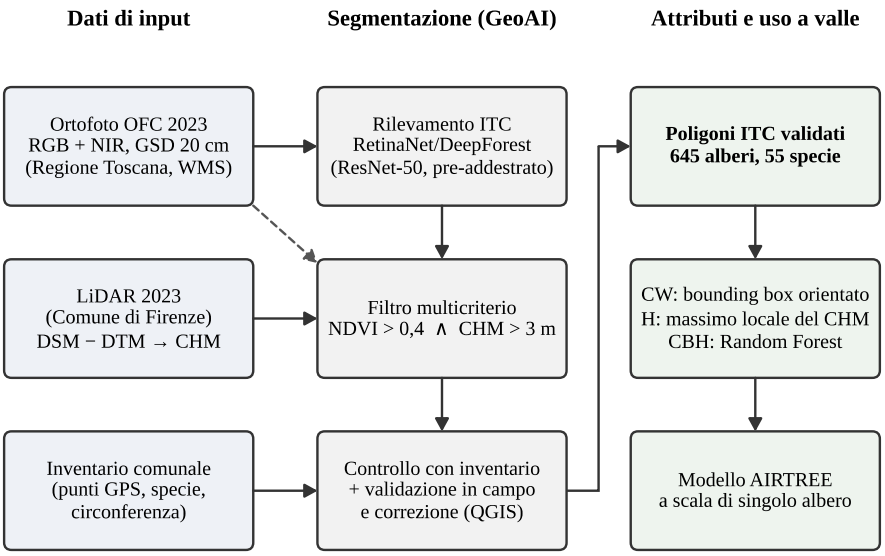


Fig. 1. Flusso di lavoro: dati di input, segmentazione delle singole chiome (ITC) con deep learning e filtro multicriterio, controllo con l'inventario e validazione in campo, derivazione degli attributi strutturali e loro uso nel modello AIRTREE.

2.3 Segmentazione delle singole chiome

La delineazione delle chiome (Fig. 1) è stata eseguita sulle ortofoto estive a 20 cm con un modello di deep learning pre-addestrato (Esri Deep Learning Model Package basato sull'architettura RetinaNet/DeepForest). Il modello implementa il flusso semi-supervisionato proposto da Weinstein et al. [7], che combina un pre-addestramento non supervisionato basato su dati LiDAR con un numero limitato di annotazioni manuali. Il rilevatore è una rete RetinaNet con estrattore di caratteristiche ResNet-50, che individua le chiome candidate come riquadri (*bounding box*), successivamente trattati come poligoni ITC.

Per eliminare falsi positivi, superfici non vegetate e vegetazione bassa, è stato applicato un filtro spaziale multicriterio che combina una soglia spettrale (NDVI > 0,4) e una strutturale (CHM > 3 m). La soglia NDVI separa la vegetazione attiva da superfici impermeabili, suolo nudo e ombre senza escludere porzioni di chioma in stress idrico estivo o auto-ombreggiate, condizioni che portano spesso l'NDVI delle latifoglie urbane sotto 0,6 [14]; la soglia di 3 m elimina prati e arbusti bassi ad alto NDVI.

Il risultato è stato sottoposto a un controllo di qualità in due fasi: nella prima, l'inventario comunale è stato usato come riferimento per individuare i poligoni contenenti più punti-albero, indicatori di possibile sotto-segmentazione (fusione di chiome adiacenti); nella seconda, ogni poligono ITC è stato verificato in campo e, dove necessario, corretto in ambiente QGIS. Ciascun poligono è stato quindi classificato come correttamente delineato o da correggere, e il dataset finale costituisce un insieme di chiome interamente validato, utilizzabile come verità a terra.

L'accuratezza è stata valutata confrontando l'output grezzo del rilevatore con i poligoni validati e corretti, assunti come riferimento. Per ciascun sito, i poligoni grezzi

e quelli di riferimento sono stati abbinati uno-a-uno massimizzando l'*Intersection over Union* (IoU) complessiva (algoritmo ungherese); seguendo Weinstein et al. [7], le coppie con IoU ≥ 0,5 sono state considerate veri positivi (TP), i poligoni grezzi non abbinati falsi positivi (FP) e le chiome di riferimento non abbinate falsi negativi (FN), da cui sono state calcolate precisione, *recall* e F1. A Giardino Lippi sono stati esclusi 57 poligoni grezzi relativi ad alberi più bassi di 3 m o abbattuti dopo il 2023, esterni al dataset di riferimento. Gli errori sono stati classificati come sotto-segmentazione (un poligono grezzo contiene due o più chiome di riferimento) o sovra-segmentazione (una chioma di riferimento è coperta da due o più poligoni grezzi, ciascuno per almeno il 20% della sua area). Infine, per le coppie TP, larghezza (§ 2.4) e area di proiezione della chioma sono state confrontate tramite bias, RMSE, RMSE% e R^2, per stimare come l'errore di segmentazione si propaghi agli input di AIRTREE.

2.4 Attributi strutturali

Larghezza della chioma. Per tenere conto della geometria irregolare delle chiome, a ciascun poligono ITC è stato adattato un rettangolo orientato di area minima (*Oriented Bounding Box*, OBB), libero di ruotare secondo la direzione principale di sviluppo della chioma. Dai due assi ortogonali del rettangolo, maggiore (W_{max}) e minore (W_{min}), la larghezza media della chioma è stata calcolata come media aritmetica, in analogia con la stima su due direzioni perpendicolari adottata nella segmentazione da telerilevamento [6]:

$$CW = (W_{max} + W_{min}) / 2 \quad (2)$$

Altezza totale e altezza di inserzione della chioma. L'altezza totale (H) è stata assunta pari al massimo locale del CHM all'interno di ciascun poligono, mentre il diametro a petto d'uomo (DBH) è stato ricavato dalla circonferenza riportata nell'inventario. L'altezza di inserzione della chioma (*Crown Base Height*, CBH), non osservabile da immagini aeree, è stata stimata con un modello Random Forest (RF). I dati di addestramento provengono dal dataset di Borghi et al. [15]: 4.507 alberi misurati in 180 aree di saggio circolari (r = 13 m) distribuite lungo un gradiente urbano–periurbano in 12 parchi di tre città italiane (Firenze, Roma e Campobasso). Il modello usa come predittori DBH, H e specie; il dataset è stato suddiviso casualmente in un insieme di addestramento (70%) e uno di test indipendente (30%), su cui sono stati calcolati coefficiente di determinazione (R^2), errore quadratico medio (RMSE) e RMSE relativo (RMSE%).

2.5 Il modello AIRTREE

Per verificarne l'utilizzabilità, gli attributi derivati sono stati usati come input di AIRTREE, un modello ecofisiologico multistrato che stima gli scambi di CO_2, O_3, NO_2, CO e particolato tra foglie e atmosfera [12, 16]. Il modello lavora separatamente per ciascuno dei 645 alberi, assegnando i parametri ecofisiologici dal database specie-specifico di Zappitelli et al. [13] (integrato con il database TRY), con forzanti meteorologiche GLDAS e concentrazioni di fondo CAMS EAC4 coerenti con l'anno di acquisizione.

3 Risultati

3.1 Accuratezza della segmentazione

La validazione in campo ha interessato tutti i 645 poligoni: 538 chiome (83,4%) erano correttamente delineate dal rilevatore, mentre le restanti 107 (16,6%) sono state ridisegnate manualmente e 71 poligoni falsi sono stati eliminati. Sugli individui isolati la delineazione è risultata affidabile e il filtro multicriterio ha rimosso efficacemente strutture non vegetali, arbusti e prati; gli errori si sono concentrati nelle chiome contigue.

Rispetto al riferimento validato in campo, l'output grezzo del rilevatore ha raggiunto, con IoU ≥ 0,5, una precisione complessiva di 0,88, una *recall* di 0,83 e un F1 di 0,86 (538 TP, 71 FP e 107 FN; Tab. 1). L'accuratezza è stata massima a Piazza dell'Indipendenza e Giardino Lippi (F1 = 0,92 in entrambi i siti), dove le chiome sono per lo più isolate o regolarmente distanziate, e minima a Piazza d'Azeglio (F1 = 0,69), dove la *recall* è scesa a 0,62. La sotto-segmentazione è stata l'errore prevalente: 24 poligoni grezzi hanno fuso 54 chiome di riferimento, e 19 di questi poligoni (44 chiome) si trovano a Piazza d'Azeglio, dove le grandi chiome mature di *Platanus* × *acerifolia* e *Celtis australis* sono contigue; la sovra-segmentazione ha interessato 28 chiome, 17 delle quali a Piazza d'Azeglio. Le chiome correttamente rilevate sono state delineate con elevata concordanza geometrica (IoU medio = 0,90): per queste, la larghezza della chioma ricavata dai poligoni grezzi differisce dal riferimento con un bias di −0,11 m e un RMSE di 0,59 m (RMSE% = 8,6%; R^2 = 0,98), e l'area di proiezione con un RMSE di 9,3 m^2 (RMSE% = 20,3%; R^2 = 0,96). Dove il rilevatore isola correttamente una chioma, la larghezza che ne deriva può quindi essere usata direttamente come input di AIRTREE.

Tab. 1. Accuratezza dell'output grezzo del rilevatore rispetto alle chiome di riferimento validate in campo (IoU ≥ 0,5). Grezzi = poligoni prodotti dal rilevatore; Rif. = chiome di riferimento; Prec. = precisione; IoU = IoU medio delle chiome correttamente rilevate; RMSE CW = RMSE (m) della larghezza delle chiome correttamente rilevate. * Esclusi 57 poligoni relativi ad alberi più bassi di 3 m o abbattuti dopo il 2023.

Sito	Grezzi (n)	Rif. (n)	TP	FP	FN	Prec.	Recall	F1	IoU	RMSE CW
Giardino Lippi	279*	278	256	23	22	0,92	0,92	0,92	0,88	0,48
Piazza d'Azeglio	150	187	116	34	71	0,77	0,62	0,69	0,93	0,83
Piazza dell'Indipendenza	180	180	166	14	14	0,92	0,92	0,92	0,92	0,55
Totale	**609**	**645**	**538**	**71**	**107**	**0,88**	**0,83**	**0,86**	**0,90**	**0,59**

Il dataset finale comprende 645 alberi appartenenti a 55 specie, per una superficie di chioma complessiva di 27.386 m^2 (2,7 ha). Composizione e struttura variano sensibilmente tra i tre siti: Giardino Lippi (278 alberi, 49 specie) presenta il maggior numero di alberi e la maggiore ricchezza specifica, con individui giovani (DBH raramente > 60 cm, H < 20 m); Piazza d'Azeglio (187 alberi, 15 specie) è caratterizzata da latifoglie mature (DBH fino a 125 cm, H fino a circa 30 m); Piazza dell'Indipendenza (180 alberi, 6 specie) presenta la massima uniformità, con netta prevalenza di *Tilia* × *europaea* (H max 18–20 m, DBH fino a 100 cm). Nel complesso, la struttura è dominata

da quattro latifoglie: *Tilia* × *europaea*, *Celtis australis*, *Platanus* × *acerifolia* e *Quercus ilex*.

3.2 Attributi strutturali

Il modello RF per la CBH (500 alberi decisionali), addestrato su 3.154 alberi e valutato su un insieme di test indipendente di 1.353 alberi, ha ottenuto R^2 = 0,53, RMSE = 1,97 m e RMSE% = 39,4%, con una varianza spiegata *out-of-bag* del 57,1%. L'altezza totale è risultata il predittore più importante, seguita da DBH e specie.

3.3 Uso del prodotto nella modellazione a scala di singolo albero

L'esecuzione di AIRTREE albero per albero ha messo in evidenza il peso degli attributi derivati dalla segmentazione. A parità di specie e sito, l'individuo più grande e quello più piccolo differiscono di 50–70 volte: in Piazza d'Azeglio il *Platanus* × *acerifolia* più grande (DBH 104 cm, area di chioma 258 m^2) raggiunge una produzione primaria netta (NPP) di 3,12 kg CO_2 d^{-1}, contro 0,06 kg CO_2 d^{-1} di un individuo giovane della stessa specie (DBH 4,5 cm, 5 m^2); in Piazza dell'Indipendenza la NPP di *Tilia* × *europaea* varia da 0,01 a 0,68 kg CO_2 d^{-1}. L'area e la larghezza della chioma, ossia le grandezze prodotte dalla segmentazione, condizionano quindi direttamente le stime: un errore di delineazione si trasferisce senza attenuazione al servizio stimato per il singolo albero.

4 Discussione

Il comportamento del rilevatore, affidabile su chiome isolate e soggetto a sotto-segmentazione su chiome contigue, non è un artefatto dell'implementazione ma una proprietà documentata dell'approccio. Weinstein et al. [7], che hanno sviluppato il flusso semi-supervisionato qui adottato, riportano in un bosco aperto di querce e pini una *recall* di 0,69 e una precisione di 0,61 (IoU ≥ 0,5), con una sotto-segmentazione crescente al crescere della complessità della copertura; in ambito urbano, Ventura et al. [9] ottengono su circa 43,5 milioni di alberi in otto città californiane una precisione del 73,6% e una *recall* del 73,3%, con errori concentrati nelle coperture dense. I valori ottenuti qui (F1 = 0,86), pur su un'area molto più limitata, sono superiori e confermano lo stesso schema: gli errori si concentrano dove le chiome sono contigue, come a Piazza d'Azeglio. Né il problema si risolve con una maggiore accuratezza a livello di pixel: la segmentazione semantica della copertura arborea urbana raggiunge F1 superiori al 91% [17], ma separa la chioma dal resto dell'immagine, non una chioma dall'altra.

La scelta metodologica adottata, la validazione integrale di ogni poligono, rende esplicito il compromesso tra estensione e accuratezza: le stime ottenute sono svincolate dall'errore di segmentazione, ma la procedura non è ancora trasferibile alla scala comunale senza intervento manuale. Il confronto tra output grezzo e dataset corretto (Tab. 1) mostra che la correzione manuale incide soprattutto sul numero e sull'identità delle chiome nelle coperture contigue, più che sulla geometria di quelle isolate (RMSE della larghezza = 0,59 m). Proprio per questo il dataset prodotto può costituire un riferimento per validare e confrontare metodi di segmentazione completamente automatici in contesto urbano.

Quanto agli attributi strutturali, l'RMSE ottenuto per la CBH (1,97 m) rientra nell'intervallo riportato in letteratura, compreso tra 1,59 e 2,51 m [18, 19], sebbene quei modelli riguardino popolamenti forestali. In ambito urbano la CBH è raramente stimata da telerilevamento ed è più spesso assunta o sostituita da valori medi per specie [13]: la stima tramite RF fornisce invece un descrittore verticale specifico per ciascun albero.

Prospettive GeoAI. L'automazione della segmentazione delle chiome contigue richiede di passare dal rilevamento per *bounding box* alla segmentazione a livello di istanza (ad es. Mask R-CNN o architetture *promptable*), di integrare nuvole di punti LiDAR ad alta densità e di sfruttare immagini multi-temporali, in cui l'asincronia fenologica tra individui adiacenti fornisce la discontinuità spettrale che una singola acquisizione estiva non offre. Un secondo limite riguarda la specie, qui ottenuta dall'inventario comunale e quindi nota solo per gli alberi pubblici: una mappa delle chiome di Firenze esiste già [20], ma è orientata alla classificazione delle specie e non fornisce altezza e CBH, per cui l'estensione al verde privato richiede una classificazione delle specie da dati multi- o iperspettrali.

5 Conclusioni

Il lavoro ha mostrato che ortofoto RGB regionali a 20 cm, elaborate con un rilevatore di deep learning pre-addestrato e un filtro multicriterio NDVI–CHM, consentono di delineare le singole chiome urbane con buona affidabilità sugli individui isolati (F1 = 0,92 a Giardino Lippi e Piazza dell'Indipendenza), mentre le chiome contigue richiedono ancora una revisione in campo (F1 = 0,69 a Piazza d'Azeglio). Integrando LiDAR e Random Forest, l'output è stato usato come input di un modello ecofisiologico alla scala del singolo albero, la stessa a cui le amministrazioni decidono abbattimenti, sostituzioni e scelta delle specie. Il dataset validato, disponibile su richiesta, può servire come riferimento per il confronto di approcci di segmentazione automatica; segmentazione a livello di istanza e classificazione delle specie sono i passi necessari per estendere la procedura all'intera città.

Ringraziamenti

Studio parzialmente finanziato dai progetti europei FORWARDS (n. 101084481), MONIFUN (n. 101134991), NextGenCarbon (n. 101184989) e NextBON (n. 101287608) e dal progetto Space It Up! (ASI–MUR, n. 2024-5-E.0, CUP I53D24000060005).

Riferimenti bibliografici

1. Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J.C.: Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. Urban Forestry & Urban Greening 4(3–4), 115–123 (2006).
2. Bottalico, F., Chirici, G., Giannetti, F., De Marco, A., Nocentini, S., Paoletti, E., et al.: Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence. Agriculture and Agricultural Science Procedia 8, 243–251 (2016).
3. Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorim, J.H., Cariñanos, P., Churkina, G., et al.: Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. Frontiers in Ecology and the Environment 14(10), 543–550 (2016).

4. Nielsen, A.B., Östberg, J., Delshammar, T.: Review of urban tree inventory methods used to collect data at single-tree level. Arboriculture & Urban Forestry 40(2), 96–111 (2014).
5. Wallace, L., Sun, Q.C., Hally, B., Hillman, S., Both, A., Hurley, J., Saldias, D.S.M.: Linking urban tree inventories to remote sensing data for individual tree mapping. Urban Forestry & Urban Greening 61, 127106 (2021).
6. Yun, T., Jiang, K., Li, G., Eichhorn, M.P., Fan, J., Liu, F., Chen, B., An, F., Cao, L.: Individual tree crown segmentation from airborne LiDAR data using a novel Gaussian filter and energy function minimization-based approach. Remote Sensing of Environment 256, 112307 (2021).
7. Weinstein, B.G., Marconi, S., Bohlman, S., Zare, A., White, E.: Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks. Remote Sensing 11(11), 1309 (2019).
8. Weinstein, B.G., Marconi, S., Bohlman, S.A., Zare, A., White, E.P.: Cross-site learning in deep learning RGB tree crown detection. Ecological Informatics 56, 101061 (2020).
9. Ventura, J., Pawlak, C., Honsberger, M., Gonsalves, C., Rice, J., Love, N.L.R., et al.: Individual tree detection in large-scale urban environments using high-resolution multispectral imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 130, 103848 (2024).
10. Ardila, J.P., Bijker, W., Tolpekin, V.A., Stein, A.: Context-sensitive extraction of tree crown objects in urban areas using VHR satellite images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 15, 57–69 (2012).
11. Zamboni, P., Junior, J.M., Silva, J.D.A., Miyoshi, G.T., Matsubara, E.T., Nogueira, K., Gonçalves, W.N.: Benchmarking anchor-based and anchor-free state-of-the-art deep learning methods for individual tree detection in RGB high-resolution images. Remote Sensing 13(13), 2482 (2021).
12. Fares, S., Conte, A., Alivernini, A., Chianucci, F., Grotti, M., Zappitelli, I., et al.: Testing removal of carbon dioxide, ozone, and atmospheric particles by urban parks in Italy. Environmental Science & Technology 54(23), 14910–14922 (2020).
13. Zappitelli, I., Conte, A., Alivernini, A., Finardi, S., Fares, S.: Species-specific contribution to atmospheric carbon and pollutant removal: case studies in two Italian municipalities. Atmosphere 14(2), 285 (2023).
14. Alonzo, M., Bookhagen, B., Roberts, D.A.: Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. Remote Sensing of Environment 148, 70–83 (2014).
15. Borghi, C., Versace, S., Di Pirro, E., Travaglini, D., Chirici, G., Lasserre, B., et al.: A dataset on forest stand structures, deadwood, and tree-related microhabitats along an urban-periurban gradient in Central Italy. Data in Brief 60, 111561 (2025).
16. Bosso, L., Alivernini, A., Zappitelli, I., Conte, A., Fares, S.: AIRTREE v2.0: predicting ecosystem services provided by Italian urban parks under climate change scenarios. Journal of Environmental Management 416, 130738 (2026).
17. Martins, J.A.C., Nogueira, K., Osco, L.P., Gomes, F.D.G., Furuya, D.E.G., Gonçalves, W.N., et al.: Semantic segmentation of tree-canopy in urban environment with pixel-wise deep learning. Remote Sensing 13(16), 3054 (2021).
18. Allensworth, E., Temesgen, H., Frank, B., Gray, A.: Imputation to predict height to crown base for trees with predicted heights. Forest Ecology and Management 498, 119574 (2021).
19. Yang, Z., Yang, H., Zhou, Z., Wan, X., Zhang, H., Duan, G.: LiDAR-based modeling of individual tree height to crown base in Picea crassifolia Kom. in northern China: comparing Bayesian, Gaussian process, and random forest approaches. Forests 15(11), 1940 (2024).
20. Sicard, P., Coulibaly, F., Lameiro, M., Araminiene, V., De Marco, A., Sorrentino, B., et al.: Object-based classification of urban plant species from very high-resolution satellite imagery. Urban Forestry & Urban Greening 81, 127866 (2023).

Il futuro di ieri: una storia di mappe e trasformazioni a Genova

Stefania Traverso[1], Martino Terrone[1] e Claudio Tosi[1]

[1] Comune di Genova; stefaniatraverso@ comune.genova.it; mterrone@comune.genova.it; C.Tosi@liguriadigitale.it

Abstract. L'Ufficio Sistemi Informativi Territoriali (SIT) della Direzione Servizi Informativi del Comune di Genova, vuole presentare un'esperienza di Deep Mapping a servizio delle trasformazioni urbane, tra memoria, cartografia e visioni del futuro, realizzata attraverso una mostra sostenuta dal progetto PN Metro Plus e Città Medie del Sud 2021-2027 GE1.1.2.1.G Genova UnderOverground. L'esperienza si lega ai temi promossi dal Tavolo della Cultura genovese per il 2025 e 2026, e unisce l'Ottocento alle Trasformazioni Urbane con un viaggio attraverso la storia che va almeno, ma non solo, dal 1815 al 2126.

Parole chiave: Deep Mapping, trasformazioni urbane, cartografia storica, GIS, Genova, scenari.

1 Introduzione

Una città vive anche nelle mappe che la rappresentano. La cartografia non registra soltanto ciò che esiste in un determinato momento: rende visibili i modi con cui una società misura, interpreta e immagina il proprio territorio. Nel caso genovese, la mappa è contemporaneamente testimonianza e progetto, memoria delle trasformazioni e dispositivo operativo per orientare quelle future.

L'esperienza descritta mette in relazione cartografia storica, rilievo avanzato, informazione geografica e innovazione urbana digitale. Questi ambiti, spesso attribuiti rispettivamente al passato, al presente e al futuro, costituiscono invece fasi successive di una medesima cultura tecnica e civica: conoscere la città, governarne le trasformazioni e assumere decisioni informate. Il Digital Twin urbano non è quindi una discontinuità tecnologica, ma l'espressione contemporanea di una lunga tradizione di misura, rappresentazione e conoscenza condivisa.

L'articolo presenta l'impostazione scientifica e divulgativa della mostra 'Il futuro di ieri', organizzata come esperienza di Deep Mapping. Il percorso attraversa cinque tempi narrativi, dalla città antica agli scenari possibili, e utilizza mappe, fotografie, modelli tridimensionali e sistemi informativi per collegare patrimonio, infrastrutture, rischio e pianificazione.

2 Le motivazioni

L'Ufficio Sistemi Informativi Territoriali (SIT) del Comune di Genova ha realizzato un'esperienza di Deep Mapping a servizio delle trasformazioni urbane, tra memoria, cartografia e visioni del futuro, attraverso una mostra sostenuta dal progetto PN Metro Plus e Città Medie del Sud 2021-2027 GE1.1.2.1.G Genova UnderOverground. L'esperienza si lega ai temi promossi dal Tavolo della Cultura genovese per il 2025 e 2026, e unisce l'Ottocento alle Trasformazioni Urbane con un viaggio attraverso la storia che va almeno, ma non solo, dal 1815 al 2126. L'esposizione è avvenuta presso il Palazzo della Nuova Borsa Valori di Genova, con apertura per qualche settimana a Marzo e poi a Settembre 2026, e ha raggiunto quasi 10.000 presenze. Questo numero di presenze sorprendenti per le medie tipiche stagionali del territorio

può rappresentare bene anche le possibilità e l'attesa di disseminazione sulle scienze geospaziali. in un ventaglio che va dal grande pubblico non specialista ai tecnici di settore.

Il concetto che accompagna il visitatore lungo tutto il percorso della mostra è il rapporto continuo tra memoria, trasformazione urbana e progettazione del futuro, attraverso la misura, l'analisi e la rappresentazione del territorio. La cartografia è strumento di interpretazione profonda della realtà, di consapevolezza dei fenomeni e di responsabilità collettiva.

L'esposizione si sviluppa in cinque tempi, divisi da imponenti portali fisici identificati da differenti colori: dal rosso dogale al viola per l'Ottocento al verde liberty al blu del presente all'argento degli scenari futuri. Il visitatore vive un percorso per scoprire, comprendere, monitorare, prevenire, riprogettare. Uno degli aspetti più significativi dell'esposizione è proprio la capacità di rendere visibile un lavoro spesso poco conosciuto dal pubblico. Non soltanto i risultati finali, ma anche gli strumenti, i processi e le attività che supportano quotidianamente la gestione della città e la conoscenza collettiva. I mezzi per vivere questo viaggio sono talvolta mappe esposte come una quadreria, pareti in dimensione reale di riproduzioni cartografiche, video basati su fotografie storiche rielaborate con strumenti di intelligenza artificiale, pannelli didattici, schermi dedicati ai grandi progetti di gestione urbana della città, racconti di futuri visionari, progetti mai costruiti o successivamente scomparsi.

La mostra evidenzia inoltre il carattere interdisciplinare del lavoro sul territorio. Università, enti, tecnici, ricercatori e amministrazioni vengono coinvolti in un racconto comune che restituisce la complessità delle competenze necessarie alla costruzione e alla gestione della città contemporanea. La mostra è un esperimento di Deep Mapping che evidenzia come sia risultato significativo il rapporto che molti visitatori hanno instaurato con le cartografie storiche. Le mappe diventano spesso strumenti di riconoscimento e memoria personale: quartieri, piazze, edifici e trasformazioni urbane vengono riletti attraverso esperienze familiari, ricordi e riferimenti condivisi. La cartografia è elemento fondamentale dello spazio vissuto, legato all'identità della città e delle persone che la abitano.

3 Dalla cartografia storica al modello numerico

3.1 La costruzione della città misurabile

Il 1815 segna un cambiamento politico e cartografico: dopo il Congresso di Vienna la Liguria viene annessa al Regno di Sardegna. Le autorità sabaude ereditano rilievi locali, vedute, sperimentazioni settecentesche e il catasto napoleonico, ma non una rappresentazione unitaria e geometricamente affidabile della città e del territorio.

Le esperienze precedenti avevano già avvicinato la rappresentazione all'azione amministrativa. I Padri del Comune utilizzavano disegni per porto, acque, strade e territorio; Matteo Vinzoni legava il rilievo alla gestione delle acque, alla sorveglianza sanitaria costiera e all'amministrazione; Giacomo Brusco univa rigore topografico e leggibilità pittorica. Il catasto geometrico particellare introdusse particelle numerate, misura metrica e una base verificabile per l'amministrazione della proprietà. Con il piano di Carlo Barabino del 1825, la mappa divenne esplicitamente strumento di trasformazione urbana.

3.2 Ignazio Porro e il passaggio al dato

Chiamato a Genova nel 1832, Ignazio Porro affrontò un territorio difficile e un incarico ambizioso: produrre un rilievo moderno utile al governo, al progetto e alla difesa. La celerimensura combinava principi geodetici e uno strumento ottico capace di stimare distanze, determinare rapidamente le quote e separare l'osservazione sul campo dalla restituzione grafica. Anche l'organizzazione del lavoro fu innovativa: in assenza di personale specializzato, Porro formò zappatori militari all'uso degli strumenti, alla misura e agli schizzi di campagna.

La Carta di Difesa di Genova integra tessuto edificato, viabilità, fortificazioni e topografia in un terreno tridimensionale misurabile. Quote e curve di livello interpolate rendono rilievo e linea di costa componenti esplicite della cartografia urbana. Il salto concettuale può essere sintetizzato in quattro passaggi: osservare angoli, distanze e quote; registrare misure numeriche; calcolare mediante triangolazione e interpolazione; rappresentare attraverso curve e forme cartografiche. La carta non è più l'unico esito del rilievo, ma una delle possibili rappresentazioni di un processo numerico.



Fig. 1. Particolare dell'installazione espositiva temporanea realizzata presso la Sala delle Grida, Palazzo della Nuova Borsa Valori, Via XX Settembre 44, Genova

4 Verso la Grande Genova: fonti e trasformazioni

Con l'Unità d'Italia, la standardizzazione amministrativa e le infrastrutture nazionali accompagnano la crescita ferroviaria, portuale e industriale. Le serie dell'Istituto Geografico Militare alle scale 1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000 consolidano un linguaggio cartografico comune. Dal 1877 il Comune produce rilievi urbani di dettaglio alle scale 1:500 e 1:200, nei quali edifici e strade esistenti sono generalmente in nero e le opere in costruzione in rosso: la dimensione temporale entra nel codice grafico della pianta.

La cartografia marittima, dai portolani all'idrografia moderna, documenta le infrastrutture che orientano lo sviluppo lungo costa. Parallelamente, la fotografia entra nell'archivio urbano e rende percepibile il costo fisico delle trasformazioni: demolizioni, arginature, lavori stradali e rimodellamento dei versanti. Mappe, immagini e rilievi costruiscono così una registrazione multimediale e multitemporale della morfologia genovese. Particolare rilievo assume l'acqua, memoria e vincolo: l'espansione urbana sopra i corsi d'acqua ha lasciato nel sottosuolo una geografia essenziale per comprendere le criticità contemporanee.

5 Metodo: il Deep Mapping come infrastruttura narrativa

La mostra assume il Deep Mapping come metodo di integrazione e comunicazione. Il territorio non è descritto da un'unica fonte, ma da un sistema di evidenze georiferite: cartografie storiche, fotografie, documenti, modelli del terreno, rilievi tridimensionali, dati geologici e memorie. L'obiettivo è mettere in relazione scale, tempi e linguaggi differenti, senza ridurre la complessità della città a una sola rappresentazione.

L'esperienza espositiva traduce questo metodo in cinque atti: città antica, nuove idee, Grande Genova, città contemporanea e possibili futuri. Mappe presentate come una quadreria, riproduzioni a parete in scala reale, video da fotografie storiche, pannelli didattici e schermi dedicati ai progetti urbani trasformano il lavoro tecnico in racconto accessibile. Il visitatore è invitato a scoprire, comprendere, monitorare, prevenire e riprogettare. La fruizione permette inoltre alle persone di riconoscere quartieri, piazze ed edifici e di collegare la cartografia alla memoria personale e collettiva.

6 L'infrastruttura geospaziale contemporanea

L'attuale infrastruttura civica integra quattro componenti. Il Database topografico costituisce il riferimento spaziale mantenuto dall'amministrazione; il Geoportale rende accessibili temi ambientali, geologici, culturali e di servizio; il Deep Mapping interpreta cartografie e memorie rispetto alla città attuale; il Digital Twin urbano offre modelli tridimensionali navigabili e misurabili, alimentati da fonti eterogenee.

6.1 Ricostruire la Genova storica

La ricostruzione tridimensionale della superficie storica combina cartografia, infrastrutture GIS e geologia urbana. Il confronto con la superficie attuale consente di leggere forme del terreno occultate da trasformazioni successive, soprattutto nei quartieri collinari. La differenza tra le due superfici identifica, con valori positivi, riempimenti e materiali riportati e, con valori negativi, scavi o sbancamenti. Il modello sostiene sia l'interpretazione culturale sia la comprensione di potenziali criticità geo-idrologiche connesse a corsi d'acqua tombinati e terreni modificati.



Fig. 2. Ricostruzione tridimensionale della superficie storica e lettura della morfologia nascosta.

6.2 Conoscere la città sotterranea

L'espansione urbana verso le alture ha progressivamente coperto tratti del reticolo idrografico, mentre l'impermeabilizzazione è aumentata. La strategia di rilievo mira quindi a passare da cavità isolate a un sistema conoscitivo urbano, selezionando siti rappresentativi di opere militari, infrastrutture idrauliche, cisterne e sistemi storici di distribuzione dell'acqua.

I casi comprendono i passaggi cinquecenteschi del Bastione dell'Acquasola, il bunker della Villetta Di Negro, l'acquedotto storico in Corso Paganini, la cisterna di Palazzo Belimbau e il sistema di fontana, cisterna e sorgente di Piazza Fontane Marose. In quest'ultimo caso, l'interpretazione richiede di leggere il manufatto insieme al tessuto urbano e al Rio Sant'Anna. Nel bunker della Villetta Di Negro, il rilievo ha prodotto un modello 3D e ha contribuito a individuare e risolvere una rilevante perdita della rete acquedottistica, mostrando l'utilità operativa della reality capture.

6.3 Un flusso integrato e replicabile

La prova di concetto realizzata nel 2025 sul Rio Sant'Anna e in Piazza Corvetto combina reality capture mobile, scansione statica e georadar multi-antenna. Il flusso operativo prevede: verifica di accessibilità e vincoli; costruzione di un riferimento geometrico accurato; acquisizione delle risposte del sottosuolo; interpretazione mediante sezioni e time/depth slice; estensione progressiva ad altre aree. Strategicamente, il processo localizza gli elementi, acquisisce evidenze complementari, integra osservazioni eterogenee e produce conoscenza utilizzabile per manutenzione, rischio, patrimonio e pianificazione.

7 Genova 2126: scenari territoriali futuri

La quinta sezione dell'esposizione estende la lettura diacronica del territorio agli scenari futuri, assumendo il 2126 come orizzonte temporale di riferimento. La scelta deriva dal centenario della costituzione della Grande Genova nel 1926, quando l'aggregazione di diciannove comuni determinò una profonda ridefinizione della scala amministrativa e territoriale della città. Il confronto tra le configurazioni urbane del 1926 e del 2026 costituisce il punto di partenza per interrogarsi sulle trasformazioni possibili nei successivi cento anni. In questa prospettiva, l'analisi delle dinamiche insediative, dell'evoluzione delle infrastrutture, delle modificazioni morfologiche e delle relazioni tra sistema urbano e ambiente naturale introduce una riflessione sugli scenari di adattamento della città alle condizioni future. Particolare rilievo assumono gli effetti del cambiamento climatico, la vulnerabilità idrogeologica, l'evoluzione del rapporto tra città e mare, la sostenibilità delle trasformazioni e la necessità di integrare prevenzione e resilienza nei processi di pianificazione. Il 2126 non rappresenta pertanto una previsione deterministica dell'assetto urbano, ma un orizzonte esplorativo entro il quale confrontare ipotesi evolutive e valutare le implicazioni territoriali delle scelte contemporanee. La ricostruzione storica e la modellazione geospaziale concorrono così a definire un quadro conoscitivo multitemporale nel quale le trasformazioni documentate del passato costituiscono un riferimento per l'interpretazione del presente e per l'elaborazione di possibili configurazioni future. La rappresentazione cartografica assume quindi anche una funzione prospettica, rendendo leggibili non soltanto le trasformazioni avvenute, ma le condizioni e i vincoli entro cui potranno svilupparsi quelle successive.

8 Risultati e discussione

L'esperienza evidenzia tre risultati principali.

Il primo è conoscitivo: fonti storiche e tecnologie attuali, collocate in uno stesso riferimento spaziale, consentono di ricostruire processi di trasformazione altrimenti frammentari.

Il secondo è operativo: la modellazione tridimensionale e l'integrazione tra rilievo superficiale e indagine geofisica rendono osservabili infrastrutture nascoste e supportano attività di gestione.

Il terzo è culturale: la mostra rende visibili strumenti, procedure e competenze che normalmente restano fuori dalla percezione pubblica.

Il Digital Twin che ne deriva non coincide con un modello 3D statico. È un quadro operativo nel quale dati aggiornabili, variabili urbane e scenari alternativi possono sostenere gestione delle risorse, studi di resilienza climatica, servizi e partecipazione. Rimangono rilevanti le sfide di interoperabilità, aggiornamento, qualità del dato e collaborazione tra discipline. La storia della Carta di Difesa di Genova, innovativa ma a lungo dimenticata, ricorda inoltre che formazione, reti professionali e comunicazione sono condizioni essenziali affinché l'innovazione diventi patrimonio durevole.

9 Conclusioni

La lettura diacronica proposta mostra la continuità tra rilievi storici e sistemi geospaziali contemporanei. Cambiano strumenti, precisione e capacità di calcolo, ma resta costante la necessità di collegare il ‘che cosa’ al ‘dove’ e il ‘perché’ al ‘come’. La cartografia conserva la memoria del passato, misura il presente e rende discutibili scenari di futuro.

Nel contesto genovese, il Deep Mapping costituisce sia un metodo scientifico di integrazione delle fonti sia un dispositivo di disseminazione. L’incontro tra cartografia storica, GIS, rilievo 3D, georadar e Digital Twin permette di connettere identità urbana, gestione delle infrastrutture, mitigazione del rischio e progettazione. Il valore non risiede nella singola tecnologia, ma nella costruzione di modelli spaziali condivisi, evidenze complementari e applicazioni capaci di trasformare dati eterogenei in conoscenza pubblica utilizzabile.

10 Riferimenti bibliografici

[1] Comune di Genova: Il futuro di ieri. Materiali scientifici e divulgativi della mostra, Genova (2026).

Relazioni tra clima, fenologia e produttività delle principali specie forestali italiane da prodotti Copernicus HR-VPP

Elia Vangi[1,2], Giovanni D'Amico[1], Vincenzo Saponaro[2,3], Mattia Niccoli[1], Gioele Tiberi[4], Saverio Francini[5], Costanza Borghi[1], Alessio Collalti[2], Francesco Parisi[6,7] e Gherardo Chirici[1,8]

[1] geoLAB, Laboratorio di Geomatica Forestale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Via San Bonaventura 13, 50145 Firenze
[2] Forest Modelling Laboratory, Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAFOM), Via Madonna Alta 128, 06128 Perugia
[3] Facoltà di Scienze Agrarie, Ambientali e Alimentari, Libera Università di Bolzano, Piazza Università, 39100 Bolzano
[4] Dipartimento di Architettura (DIDA), Università degli Studi di Firenze, Via della Mattonaia 8, 50121 Firenze
[5] Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari (DISTAL), Università di Bologna, 40126 Bologna
[6] Dipartimento di Bioscienze e Territorio, Università degli Studi del Molise, Contrada Fonte Lappone, 86090 Pesche (IS)
[7] NBFC, National Biodiversity Future Center, 90133 Palermo
[8] Fondazione per il Futuro delle Città, Firenze
elia.vangi@unifi.it

Abstract. In questo studio, analizziamo le tempistiche fenologiche e la produttività stagionale complessiva di diverse specie forestali italiane distribuite in ambienti mediterranei, temperati e montani, avvalendoci del nuovo prodotto ad alta risoluzione sulla produttività e sulla fenologia della vegetazione del Copernicus Land Monitoring Service, di modelli di machine learning (random forest) e di analisi basate sull'intelligenza artificiale spiegabile (SHAP). I risultati indicano una tendenza generale all'allungamento della stagione vegetativa, guidata principalmente dall'accumulo di freddo invernale e dalle temperature primaverili. Le condizioni più calde anticipano l'inizio della stagione di 1-10 giorni, a seconda della specie, mentre gli effetti combinati di temperatura, radiazione e umidità possono prolungare la stagione vegetativa di 20-30 giorni. Le dinamiche di fine stagione e la sua durata sono influenzate più dalla disponibilità di luce e di acqua che dalla sola temperatura. In diverse specie mediterranee, la fine della stagione può anticipare fino a 40 giorni a causa della siccità estiva, dell'elevato deficit di pressione di vapore e dell'esposizione del sito. A causa delle variazioni fenologiche, la durata complessiva della stagione risulta spesso disaccoppiata dalla produttività, evidenziando risposte al cambiamento climatico specifiche

per specie e sito. I risultati sottolineano l'importante vantaggio della combinazione di dati di telerilevamento e tecniche di machine learning per approfondire la comprensione della fenologia e della produttività forestale lungo ampi gradienti spaziali e climatici.

Parole chiave: Fenologia, Inventario Forestale Nazionale, Sentinel-2, Copernicus HR-VPP, SHAP.

1 Introduzione

Le foreste italiane si distribuiscono lungo uno dei gradienti ambientali più ampi d'Europa. In poco più di 11° di latitudine si passa dalle formazioni alpine, limitate dalla temperatura, agli ecosistemi mediterranei, limitati dalla disponibilità idrica. Su questo gradiente, il cambiamento climatico agisce in modo disomogeneo e la fenologia della vegetazione è uno degli indicatori più sensibili dei suoi effetti [1]. Nell'Europa centrale e settentrionale l'allungamento della stagione vegetativa è stato spesso associato a un aumento della crescita e dell'assorbimento di carbonio [2]. Studi recenti mostrano, però, che la senescenza fogliare può avvenire indipendentemente dalla fine dell'attività fotosintetica [3, 4]. Nell'Italia meridionale, inoltre, la capacità di assorbimento del carbonio risulta già disaccoppiata dall'incremento di area basimetrica [5]. Resta quindi aperta la domanda se una stagione più lunga corrisponda davvero a una foresta più produttiva, soprattutto dove l'acqua e la radiazione diventano fattori limitanti.

Rispondere a questa domanda su scala nazionale richiede osservazioni fenologiche dense e a una risoluzione compatibile con quella dei popolamenti. Le osservazioni di campo sono specie-specifiche ma costose e spazialmente limitate. I sensori a bassa risoluzione come MODIS, d'altra parte, aggregano nello stesso pixel specie, quote e usi del suolo diversi, un limite particolarmente evidente nei paesaggi eterogenei del Mediterraneo. Dal 2023 il Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) distribuisce la suite High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP), che deriva fenologie annuali a 10 m dalle serie temporali del Plant Phenology Index (PPI) di Sentinel-2 [6, 7]. Il PPI è un indice basato su misure fisiche, linearmente correlato al Leaf Area Index (LAI) e poco sensibile alla copertura nevosa, e per questo si presta bene a seguire le fasi della chioma.

Le relazioni tra fenologia e clima non sono lineari e le variabili climatiche sono fortemente correlate tra loro. Gli algoritmi di machine learning (ML) gestiscono bene queste condizioni, ma producono modelli difficili da interpretare. I metodi di explainable artificial intelligence (XAI), e in particolare le SHapley Additive exPlanations (SHAP) [8], scompongono ogni previsione nel contributo delle singole variabili, espresso nella stessa unità di misura della variabile di risposta (giorni o valori di PPI).

Questo contributo sintetizza i risultati di Vangi et al. [9], uno dei pochi studi, a nostra conoscenza, che combina le fenometriche HR-VPP, i dati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC) e l'XAI per analizzare fenologia e produttività di più specie forestali a scala nazionale. Gli obiettivi erano due: verificare se un approccio ML automatizzato riproduce i pattern macroecologici noti

per dieci specie, e testare l'ipotesi che l'allungamento della stagione indotto dal riscaldamento sia disaccoppiato dalla produttività negli ambienti mediterranei.

2 Materiali e metodi

2.1 Area di studio e dati inventariali

Lo studio copre l'intero territorio nazionale, dove le foreste occupano oltre il 35% della superficie (circa 11,05 milioni di ettari) e sono dominate dalle latifoglie, che rappresentano il 68% della superficie forestale [10]. Le aree di saggio provengono dalla terza fase dell'INFC2015, in cui i dati quantitativi sono rilevati in aree circolari di raggio 13 m su un campione di 6174 punti [10]. Per ridurre il rumore dovuto ai popolamenti misti sono state selezionate solo le aree in cui la specie dominante rappresentava almeno l'80% dell'area basimetrica. Tra queste sono state mantenute le specie presenti in almeno 100 aree. Il campione finale comprende 2453 aree e dieci specie (Fig. 1): *Castanea sativa* Mill., *Fagus sylvatica* L., *Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus halepensis* Mill., *Pinus nigra* J.F. Arnold, *Quercus cerris* L., *Quercus ilex* L., *Quercus pubescens* Willd. e *Quercus suber* L.

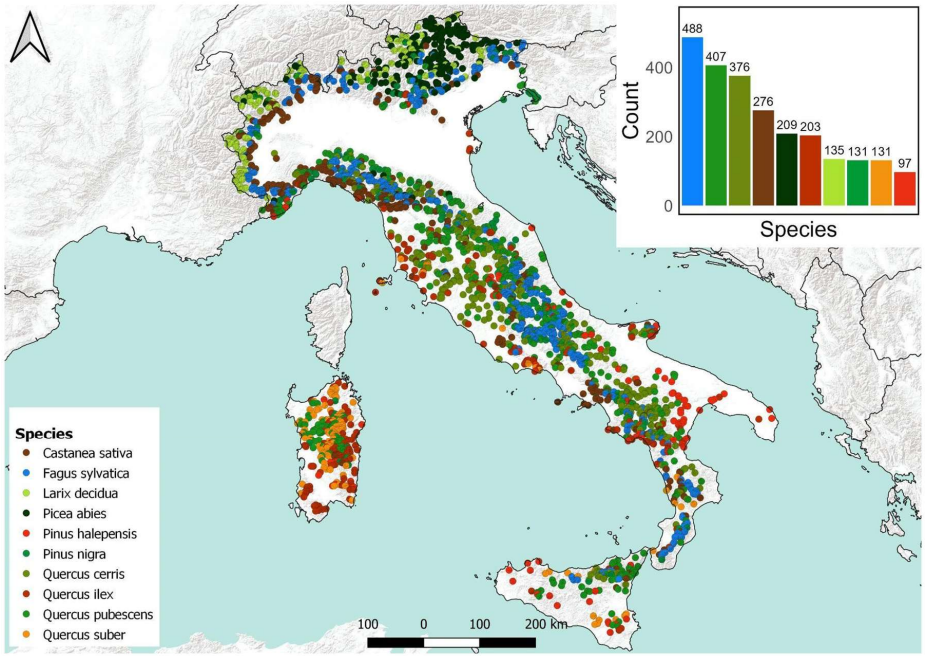


Fig. 1. Distribuzione delle 2453 aree INFC analizzate. Il grafico in alto a destra riporta il numero di aree per specie (da [9], licenza CC BY 4.0).

2.2 Fenometriche e variabili predittive

Dalla suite HR-VPP sono state scaricate, tramite le API del catalogo WEkEO, quattro fenometriche per il periodo 2017–2023: data di inizio (SOSD) e di fine (EOSD) della stagione vegetativa, durata della stagione (LOS) e produttività stagionale totale (TPROD), cioè l'integrale del PPI tra SOSD ed EOSD. Il dataset completo comprende 3584 tile, per circa 400 GB. Le fenometriche sono generate con TIMESAT [7], che filtra nuvole, ombre e outlier dalle serie PPI e adatta una funzione logistica doppia a ciascuna stagione. SOSD ed EOSD corrispondono ai giorni in cui il PPI raggiunge, rispettivamente, il 25% e il 15% dell'ampiezza stagionale. Per garantire un allineamento coerente con i predittori climatici annuali è stata considerata solo la prima stagione di ogni anno, purché iniziata e conclusa nello stesso anno solare.

Le variabili climatiche derivano dalla rianalisi ERA5 regionalizzata sull'Italia a 2,2 km con il modello COSMO-CLM [11]. Dai dati orari di temperatura, radiazione solare, precipitazione e deficit di pressione di vapore (VPD) sono state calcolate, per ogni anno, 176 metriche mensili e stagionali. Queste descrivono la forzante termica primaverile, l'accumulo di freddo invernale (chilling), la radiazione e lo stress idrico. Quota, pendenza ed esposizione sono state ricavate dal modello digitale del terreno TINITALY a 10 m [12], a cui si aggiungono la latitudine, la distanza dal mare e l'età del popolamento. Tutte le variabili sono state estratte come media (moda per le date) in un intorno di 13 m dal centro di ciascuna area. Il database finale conta 17.171 osservazioni (2453 aree × 7 anni) e 185 variabili.

2.3 Selezione delle variabili, modellizzazione e interpretazione

Data la brevità della serie HR-VPP, le fenometriche e i predittori sono stati mediati per area nel periodo 2017–2023. L'analisi segue quindi un approccio di sostituzione spazio-temporale, che sfrutta l'ampio gradiente ambientale occupato da ciascuna specie. Per ciascuna delle 40 combinazioni specie-fenometriche, le variabili sono state selezionate con l'algoritmo VSURF [13], che individua, in tre passaggi, il sottoinsieme minimo di predittori con una capacità predittiva accettabile, limitando gli effetti della collinearità. Con le variabili selezionate è stato addestrato un random forest condizionale (pacchetto R *party* [14]), valutato tramite l'errore quadratico medio (RMSE) out-of-bag.

Le previsioni di ciascun modello sono state interpretate con l'approccio SHAP condizionale basato su alberi di inferenza condizionale [15], implementato nel pacchetto R *shapr* e adatto a predittori dipendenti. Un valore SHAP positivo indica un ritardo di SOSD ed EOSD, un allungamento di LOS o un aumento di TPROD, mentre un valore negativo indica l'effetto opposto. Per la visualizzazione le variabili sono state raggruppate in cinque classi (temperatura invernale e chilling, temperatura primaverile, disponibilità idrica, fotoperiodo e topografia), sommando i valori SHAP grazie alla loro additività. Infine, per verificare il disaccoppiamento tra la durata della stagione e la produttività, le anomalie interannuali standardizzate (z-score) di TPROD sono state regredite su quelle di LOS. Il coefficiente di determinazione (R^2) di questa regressione misura il grado di correlazione tra le due grandezze.

3 Risultati

3.1 Prestazioni dei modelli e variabili selezionate

VSURF ha selezionato, in media, sei variabili per combinazione, da un minimo di due (TPROD in *P. nigra*) a un massimo di dieci (LOS in *Q. pubescens*). Le metriche di temperatura e precipitazione dominano la selezione per quasi tutte le fenometriche. Quota e pendenza sono comunque spesso tra le variabili più importanti, in particolare per *C. sativa*, *F. sylvatica* e *L. decidua*. L'inizio della stagione presenta un RMSE medio di 11,5 giorni, mentre la fine della stagione è molto più difficile da modellare, con un RMSE medio di 28 giorni (Table 1). Gli errori più elevati si concentrano nelle specie mediterranee: in *P. halepensis*, *Q. pubescens* e *Q. suber* l'RMSE di EOSD varia tra 39 e 56 giorni.

Table 1. RMSE out-of-bag dei modelli per specie e fenometrica (da [9]). SOSD, EOSD e LOS sono espressi in giorni, TPROD in unità di PPI.

Specie	SOSD	EOSD	LOS	TPROD
Castanea sativa	9	15	16	60
Fagus sylvatica	8	13	16	72
Larix decidua	10	15	19	51
Picea abies	14	14	22	57
Pinus halepensis	15	56	50	52
Pinus nigra	13	25	28	71
Quercus cerris	11	28	26	63
Quercus ilex	11	20	23	49
Quercus pubescens	12	42	33	57
Quercus suber	10	39	34	46

3.2 Inizio, fine e durata della stagione

Le temperature minime e massime di gennaio, febbraio e aprile sono i principali determinanti di SOSD per la maggior parte delle specie. Nelle specie mediterranee l'inizio della stagione è più sensibile al chilling invernale, con un anticipo di circa 0,5 giorni per grado contro circa 0,3 giorni nelle specie montane. Queste ultime rispondono invece maggiormente alla temperatura primaverile, con un anticipo fino a 0,75 giorni per grado. Nel complesso, condizioni più calde anticipano l'inizio della stagione di 1–10 giorni e l'effetto combinato di temperatura, radiazione e umidità può allungarla di 20–30 giorni.

La fine della stagione e la sua durata dipendono più da luce e disponibilità idrica che dalla sola temperatura. In *P. halepensis*, *Q. ilex* e *Q. suber*, la radiazione e il VPD primaverili ed estivi, insieme alle precipitazioni, possono anticipare l'EOSD fino a 40 giorni. Nelle specie montane (*L. decidua* e *P. abies*) prevalgono la quota e la radiazione estiva, mentre la pendenza riduce la durata della stagione in *P. nigra*, *Q. cerris* e *Q. pubescens*. La Fig. 2 riassume il contributo dei cinque gruppi di variabili a LOS. La

durata della stagione varia complessivamente fino a 20 giorni, con una tendenza all'accorciamento nelle specie mediterranee e all'allungamento in quelle montane.

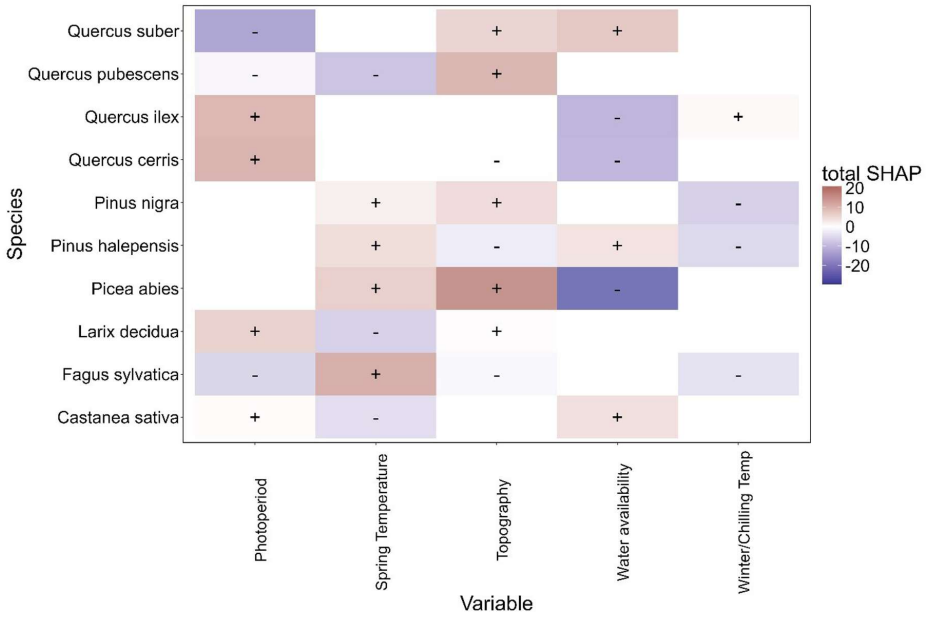


Fig. 2. Valore SHAP totale di LOS per gruppo di variabili (asse x) e specie (asse y), espresso in giorni rispetto alla previsione media. I segni "+" e "–" indicano il verso del contributo (da [9], licenza CC BY 4.0).

3.3 Produttività

La radiazione solare primaverile e autunnale è il principale driver di TPROD in *P. nigra* e *C. sativa*, mentre nelle specie montane domina ancora la quota. Nelle specie mediterranee, la produttività risponde in modo non lineare ai predittori autunnali, con evidenti effetti a soglia. La variazione della radiazione in autunno, ad esempio, ha un effetto positivo solo quando la riduzione stagionale è moderata (pendenza della regressione lineare > −2). L'esposizione influenza TPROD in *F. sylvatica*, *Q. cerris* e *Q. pubescens*, con contributi positivi tra 0° e 90° e tra 250° e 360°. Il legame interannuale tra anomalie di LOS e di TPROD è debole per tutte le specie. R^2 resta sempre inferiore a 0,2, con un massimo di 0,14 in *L. decidua* e valori inferiori a 0,01 per tutte le querce.

4 Discussione

I risultati confermano, con un approccio interamente guidato dai dati, il comportamento atteso per le specie forestali italiane: inverni e primavere più caldi anticipano l'inizio della stagione. Il peso delle temperature minime invernali e delle massime di aprile

suggerisce che contino sia l'accumulo di freddo sia la forzante primaverile, in accordo con il ruolo del chilling nella quiescenza e nel germogliamento [16]. Nelle specie alpine la quota sintetizza una buona parte dell'informazione climatica, molto probabilmente perché il modello del terreno a 10 m descrive gradienti microclimatici che la rianalisi a 2,2 km non riesce a risolvere.

La fine della stagione resta la fase più difficile da prevedere, in linea con l'assenza di consenso nella letteratura sui suoi determinanti. Le specie mediterranee rispondono in modo diverso alla siccità estiva, verosimilmente in base alla loro strategia idraulica. Nelle specie più isoidriche (*P. halepensis*, *Q. ilex*, *Q. suber*) la chiusura stomatica e la perdita fogliare, che limitano il rischio di cavitazione, anticipano la fine della stagione [17]. Nelle specie più tolleranti alla siccità, come *Q. pubescens* e *Q. cerris*, la crescita si arresta durante l'estate e riprende con le piogge autunnali, ritardando la senescenza. Questi spostamenti compensativi tra l'inizio e la fine mantengono la durata della stagione relativamente stabile. Nelle specie montane, al contrario, un inizio ritardato si traduce più direttamente in una stagione più breve.

È interessante notare che anche la temperatura primaverile contribuisce a spiegare la senescenza, come ipotizzato da Zani et al. [3] e Zohner et al. [4]. Una primavera più calda potrebbe esaurire prima le riserve idriche del suolo, oppure saturare prematuramente la capacità di sink del carbonio. La selezione della radiazione per nove specie su dieci è coerente soprattutto con questo secondo meccanismo, più che con un decadimento passivo guidato unicamente dalla temperatura.

Il risultato principale riguarda il legame tra durata della stagione e produttività. L'assunto, diffuso negli studi sul cambiamento climatico, secondo cui una stagione più lunga porti a una maggiore produttività [1, 2] non trova riscontro nei dati. Valori di R^2 inferiori a 0,2 per tutte le specie, e prossimi a zero per le querce, indicano un forte disaccoppiamento. La produttività sembra essere regolata soprattutto dalla disponibilità di energia e di acqua, con effetti a soglia e un ruolo dell'esposizione nel modulare il microclima. In ambiente mediterraneo, quindi, un allungamento della stagione può segnalare un periodo di siccità più lungo piuttosto che un guadagno di carbonio.

Alcuni limiti vanno considerati nell'interpretare questi risultati. Gli indici spettrali osservano le variazioni ottiche della chioma e non direttamente gli eventi fenologici, e la selezione di aree pure riduce ma non elimina la miscelazione spettrale con il sottobosco. L'aggregazione sul periodo 2017–2023 attenua inoltre l'effetto degli eventi estremi, sempre più rilevanti per il funzionamento delle foreste. L'allungamento progressivo della serie HR-VPP permetterà di passare dalla sostituzione spazio-tempo all'analisi diretta delle tendenze temporali.

5 Conclusioni

Questo lavoro mostra che le fenometriche Copernicus HR-VPP, combinate con i dati INFC, il ML e l'analisi SHAP, consentono di studiare la fenologia di singole specie forestali a livello nazionale. L'approccio riproduce i pattern noti all'inizio della stagione e, al contempo, evidenzia risposte specie- e sito-specifiche alla fine della stagione e sulla produttività, soprattutto negli ambienti limitati dall'acqua. Il

riscaldamento futuro probabilmente continuerà ad anticipare l'inizio della stagione, ma i suoi effetti sulla produttività non potranno essere dedotti dalla sola durata della stagione. Questo ha implicazioni dirette sulla parametrizzazione dei modelli di vegetazione e sulle stime del bilancio del carbonio forestale. Le nove fenometriche HR-VPP non analizzate in questo studio offrono ulteriori opportunità per il monitoraggio operativo degli ecosistemi forestali.

Ringraziamenti. E.V. ringrazia il progetto NextGenCarbon (Horizon Europe, n. 101184989) e il progetto Space It Up!, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana e dal Ministero dell'Università e della Ricerca (contratto n. 2024-5-E.0, CUP I53D24000060005). A.C. ringrazia il progetto FORESTNAVIGATOR (Horizon Europe, n. 101056875).

Riferimenti bibliografici

1. Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I.A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., Zhu, X.: Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. Global Change Biology 25, 1922–1940 (2019).
2. Keenan, T.F., Gray, J., Friedl, M.A., Toomey, M., Bohrer, G., Hollinger, D.Y., et al.: Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. Nature Climate Change 4(7), 598–604 (2014).
3. Zani, D., Crowther, T.W., Mo, L., Renner, S.S., Zohner, C.M.: Increased growing-season productivity drives earlier autumn leaf senescence in temperate trees. Science 370(6520), 1066–1071 (2020).
4. Zohner, C.M., Mirzagholi, L., Renner, S.S., Mo, L., Rebindaine, D., Bucher, R., et al.: Effect of climate warming on the timing of autumn leaf senescence reverses after the summer solstice. Science 381, eadf5098 (2023).
5. Dalmonech, D., Vangi, E., Chacón, D.Q., Collalti, A.: Decadal climate-driven decoupling between gross primary productivity and tree growth in Mediterranean forests. Forest Ecology and Management 615, 123843 (2026).
6. Jin, H., Eklundh, L.: A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. Remote Sensing of Environment 152, 512–525 (2014).
7. Jönsson, P., Eklundh, L.: TIMESAT, a program for analyzing time-series of satellite sensor data. Computers & Geosciences 30(8), 833–845 (2004).
8. 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).
9. Vangi, E., D'Amico, G., Saponaro, V., Niccoli, M., Tiberi, G., Francini, S., Borghi, C., Collalti, A., Parisi, F., Chirici, G.: Investigating climate-phenology relationships among the most common Italian forest species using Sentinel-2-derived vegetation phenology and productivity products. Agricultural and Forest Meteorology 390, 111496 (2026).
10. INFC: Italian forests. Selected results of the third National Forest Inventory (INFC2015). Arma dei Carabinieri, CREA Centro di ricerca Foreste e Legno. Tipografia Supernova, Trento (2021).
11. Raffa, M., Reder, A., Marras, G.F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M., Mercogliano, P.: VHR-REA_IT dataset: very high resolution dynamical downscaling of ERA5 reanalysis over Italy by COSMO-CLM. Data 6(8), 88 (2021).

12. Tarquini, S., Isola, I., Favalli, M., Mazzarini, F., Bisson, M., Pareschi, M.T., Boschi, E.: TINITALY/01: a new triangular irregular network of Italy. Annals of Geophysics 50, 407–425 (2007).
13. Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C.: VSURF: an R package for variable selection using random forests. The R Journal 7(2), 19–33 (2015).
14. Hothorn, T., Hornik, K., Zeileis, A.: Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework. Journal of Computational and Graphical Statistics 15(3), 651–674 (2006).
15. Redelmeier, A., Jullum, M., Aas, K.: Explaining predictive models with mixed features using Shapley values and conditional inference trees. In: Holzinger, A., Kieseberg, P., Tjoa, A.M., Weippl, E. (a cura di) CD-MAKE 2020, LNCS, vol. 12279, pp. 117–137. Springer, Cham (2020).
16. Hänninen, H.: Boreal and temperate trees in a changing climate. Biometeorology, vol. 3. Springer, Dordrecht (2016).
17. McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., et al.: Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? New Phytologist 178, 719–739 (2008).

Approcci integrati di Osservazione della Terra per il monitoraggio della qualità dell'aria e del comfort termico in ambiente urbano

Alberto Vavassori[1], Vasil Yordanov[1], Sadra Zahed Kachaee[1], Claudia Isabela Saud Mino[1], Matej Žgela[1], Afshin Moazzam[1], Maria Antonia Brovelli[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano,
(alberto.vavassori, vasil.yordanov, matej.zgela, afshin.moazzam, maria.brovelli)@polimi.it,
(sadra.zahed, claudiaisabela.saud)@mail.polimi.it

Abstract. Gli ambienti urbani sono sempre più esposti all'inquinamento atmosferico e agli effetti dell'isola di calore urbana, il che rende necessari approcci di monitoraggio integrati. Il presente lavoro illustra alcune attività svolte nell'ambito del progetto Space It Up! per lo studio della qualità dell'aria e del comfort termico, che combinano dati di Osservazione della Terra e metodi di machine learning.

Parole chiave: Osservazione della Terra, Qualità dell'aria, Isola di calore urbana, Machine learning.

1 Introduzione

Gli ambienti urbani sono sempre più esposti a molteplici fattori di pressione ambientale, tra loro interagenti, che richiedono approcci di monitoraggio integrati in grado di combinare informazioni atmosferiche e climatiche georeferenziate. Nell'ambito del progetto "Space It Up!", finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), sono state sviluppate specifiche attività di ricerca per affrontare tali sfide mediante tecnologie avanzate di Osservazione della Terra (OT) e metodi basati sui dati (*data-driven*).

Questo lavoro presenta le attività svolte nell'ambito dei Task 7.4.1 e 7.4.2, dedicati rispettivamente al monitoraggio della qualità dell'aria e dell'isola di calore urbana e del comfort termico. Tali ambiti sono analizzati attraverso linee di ricerca complementari che comprendono l'analisi di dati satellitari di OT, l'integrazione di dati geospaziali multisorgente e la modellazione dell'ambiente urbano ad alta risoluzione. Le attività relative alla qualità dell'aria affrontano due aspetti complementari: la stima delle concentrazioni di inquinanti prossime al suolo mediante l'integrazione di dati satellitari, meteorologici e misure in situ, e lo screening del metano attraverso osservazioni satellitari a diversa risoluzione spaziale e frequenza di rivisitazione. Quelle relative al comfort termico si concentrano invece sulla caratterizzazione e sulla modellazione dell'ambiente termico urbano in termini di temperatura dell'aria e delle superfici.

In particolare, nell'ambito della qualità dell'aria sono presentati due contributi complementari. Il primo propone mappe bivariate derivate da Sentinel-5P per lo screening del metano, combinando la frequenza dei superamenti di una soglia con la disponibilità di osservazioni valide e confrontando tali informazioni con gli eventi di pennacchio registrati da Carbon Mapper. Il secondo sviluppa una procedura riproducibile per integrare misure al suolo, rianalisi meteorologiche e osservazioni satellitari a scala europea, applicandola a Milano per la stima delle concentrazioni giornaliere di SO_2 con metodi di machine learning e modelli fondazionali (*foundational models*) per serie temporali.

La ricerca sul clima urbano comprende invece la modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione e la mappatura delle zone climatiche locali (*Local Climate Zones*, LCZ), finalizzate all'analisi della variabilità spaziale dell'isola di calore urbana e della sua relazione con la morfologia urbana. Un'ulteriore analisi della composizione delle superfici mediante dati iperspettrali permette di approfondire il ruolo dei materiali urbani nella distribuzione della temperatura superficiale.

Pur essendo sviluppate in modo indipendente, queste linee di ricerca contribuiscono nel loro insieme a una comprensione più completa dei processi ambientali urbani. Nelle sezioni seguenti sono illustrate le principali attività sviluppate nei due ambiti, delineandone l'approccio metodologico e il ruolo all'interno di un più ampio quadro di monitoraggio ambientale integrato.

2 Monitoraggio della qualità dell'aria

2.1 Screening del metano mediante osservazioni satellitari a scale differenti

Il monitoraggio satellitare del metano richiede di conciliare l'osservazione sistematica di vaste aree con l'identificazione di singoli pennacchi di emissione. Sentinel-5P/TROPOMI offre una rivisitazione quasi giornaliera, ma una risoluzione spaziale relativamente grossolana; Carbon Mapper fornisce invece osservazioni mirate a una maggiore risoluzione spaziale, senza una copertura altrettanto frequente e sistematica delle stesse località. Inoltre, i due sistemi descrivono grandezze diverse: Sentinel-5P misura la frazione molare del metano mediata sulla colonna atmosferica (XCH_4), mentre Carbon Mapper individua eventi di pennacchio e ne fornisce stime dei tassi di emissione. Per valorizzare tale complementarità è stato sviluppato un approccio di screening bivariato, nel quadro delle attività integrate di OT per il monitoraggio ambientale [1].

Lo studio ha interessato gli Stati Uniti continentali tra gennaio 2023 e dicembre 2025. Mediante Python e Google Earth Engine, le osservazioni di metano Sentinel-5P, corrette per il bias, sono state elaborate in 36 prodotti mensili. Per ogni cella sono stati calcolati sia il numero di osservazioni valide sia il numero di superamenti della soglia di 1.900 ppb, raggruppati negli intervalli 1-6, 7-12, 13-18 e ≥ 19. Le combinazioni sono state rappresentate mediante classi bivariate, distinguendo le celle con osservazioni valide ma senza superamenti da quelle prive di dati. I raster mensili sono stati prodotti

su una griglia di 0,01° e campionati in corrispondenza degli eventi di pennacchio Carbon Mapper osservati nello stesso mese.
Dei 5.261 eventi censiti, 4.869 (92,5%) sono stati associati a una classe bivariata mensile, mentre 392 ricadevano in celle senza dati. Tra gli eventi classificati, 4.704 corrispondevano a celle con almeno un superamento di soglia e 165 a celle senza superamenti (Fig. 1). I primi rappresentavano il 96,5% della somma dei tassi di emissione riportati per gli eventi classificati. L'associazione riscontrata conferma l'utilità delle mappe per contestualizzare le osservazioni ad alta risoluzione e orientare successive indagini, ma non costituisce una misura dell'accuratezza di rilevamento dei pennacchi, né una stima delle emissioni regionali complessive. Tra i limiti principali rientrano il campionamento mirato di Carbon Mapper, la dipendenza dei superamenti dalla disponibilità di osservazioni e la sensibilità della soglia fissa alle variazioni del fondo atmosferico e della stagionalità.

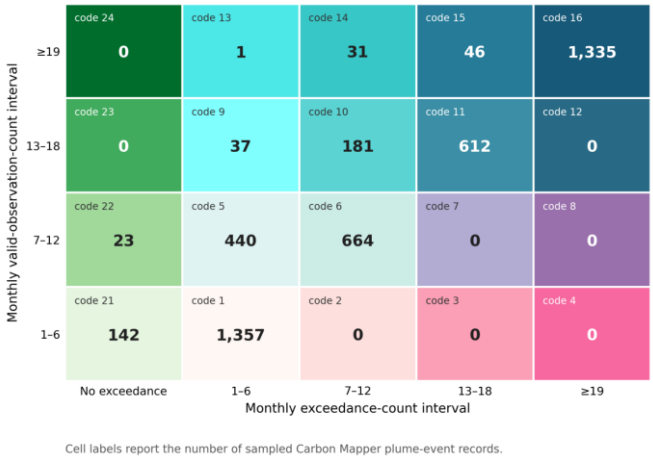


Fig. 1. Numero di eventi di pennacchio Carbon Mapper nelle classi mensili bivariate definite dal numero di osservazioni valide e dai superamenti della soglia in Sentinel-5P. I colori identificano le classi, non l'entità dei conteggi.

2.2 Integrazione multisorgente e modelli temporali per la stima del SO_2 al suolo

Le stazioni di monitoraggio forniscono misure dirette degli inquinanti al suolo, ma presentano una distribuzione territoriale disomogenea; le osservazioni satellitari garantiscono una copertura più estesa, pur descrivendo principalmente la colonna atmosferica e non le concentrazioni prossime alla superficie. Queste ultime dipendono anche dallo spessore dello strato limite planetario, dal trasporto e dal rimescolamento atmosferico. Il contributo è rilevante perché estende, attraverso un flusso di lavoro riproducibile e modelli avanzati per serie temporali, precedenti studi sulla stima delle concentrazioni al suolo di NO_2, SO_2 e CO mediante integrazione di dati satellitari, meteorologici e misure in situ [2-4].

È stata sviluppata una procedura di preparazione dei dati a scala europea che armonizza le misure al suolo dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA), le rianalisi meteorologiche ERA5, i dati di composizione atmosferica CAMS e le osservazioni Sentinel-5P estratte mediante Google Earth Engine. La procedura include la ricostruzione dei metadati delle stazioni, il filtraggio per inquinante e qualità del dato, l'associazione spaziale delle sorgenti e la sincronizzazione su una base temporale giornaliera comune in UTC, con finestre di estrazione coerenti con il passaggio satellitare.

La pipeline è stata applicata a Milano per la stima delle concentrazioni giornaliere di SO_2 su 992 osservazioni tra febbraio 2019 e ottobre 2023. Sono state confrontate, attraverso sei versioni progressive, tecniche tradizionali di machine learning e modelli ensemble (tra cui Random Forest e metodi di *boosting*), modelli previsionali basati sulla sola serie storica di SO_2 e modelli fondazionali per serie temporali con covariate ambientali, tra cui Chronos-2, adattato anche mediante fine-tuning LoRA. Le variabili comprendevano valori ritardati, statistiche mobili, indicatori ciclici di calendario e informazioni meteorologiche e satellitari. Per contenere la dispersione delle informazioni tra periodi di addestramento e verifica è stata adottata una suddivisione strettamente cronologica dei dati (64% addestramento, 16% validazione e 20% test).

I modelli che utilizzano soltanto la serie temporale di SO_2 hanno ottenuto valori negativi di R^2 (da -0,49 a -0,05); i metodi tradizionali, arricchiti con variabili temporali, hanno raggiunto $R^2 \approx 0{,}43$-$0{,}46$. L'integrazione completa delle covariate con Chronos-2 ha consentito di ottenere $R^2 = 0{,}92$ senza adattamento e $R^2 = 0{,}98$ dopo fine-tuning LoRA (RMSE = 0,134 µg/m³; NRMSE = 0,081) sul set di test (Fig. 2). Le informazioni più influenti sono risultate i valori precedenti di SO_2 e le medie mobili a sette giorni, seguite dalle variabili meteorologiche, dal SO_2 satellitare e dalla stagionalità. I risultati suggeriscono che, in questo caso di studio, i maggiori benefici derivano dall'inclusione del contesto atmosferico e dall'adattamento del modello, non dalla sola maggiore complessità degli algoritmi. La pipeline di integrazione costituisce inoltre una base riutilizzabile per ulteriori inquinanti e aree geografiche, per i quali resta necessaria una validazione specifica.

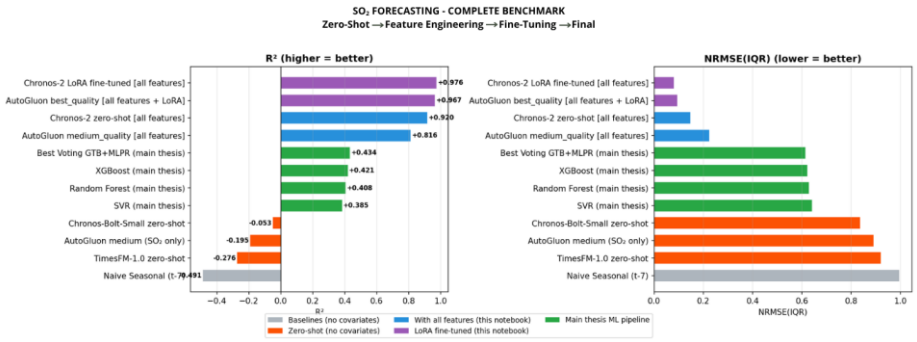


Fig. 2. Confronto delle configurazioni di previsione delle concentrazioni di SO_2 sul set di test, mediante R^2 e NRMSE.

3 Comfort termico urbano

Le attività di ricerca sul comfort termico urbano si articolano in quattro linee principali: (i) l'analisi delle tendenze climatiche recenti e delle condizioni di stress termico in Italia; (ii) la mappatura delle LCZ mediante dati iperspettrali, multispettrali e parametri di morfologia urbana; (iii) la modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione; e (iv) l'analisi della composizione e della risposta termica delle superfici urbane mediante dati iperspettrali e termici. Nel presente contributo l'attenzione è rivolta alla modellazione della temperatura dell'aria e all'analisi della risposta termica delle superfici urbane, per le quali sono disponibili i più recenti sviluppi applicativi. Per un approfondimento sulle altre linee di ricerca si rimanda a [5] e [6].

3.1 Modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione

La modellazione della temperatura dell'aria prossima alla superficie integra misure provenienti da reti meteorologiche ufficiali e partecipative (*crowdsourced*) con predittori geospaziali e dati di OT. L'approccio impiega tecniche di machine learning per produrre mappe ad alta risoluzione della temperatura urbana e analizzarne la variabilità durante le ondate di calore [7].

Per la città di Milano sono state generate mappe con risoluzione di 20 m per l'anno 2022, considerando periodi di ondata di calore individuati mediante dati di rianalisi climatica e differenti ore della giornata. Il modello, basato su Random Forest, utilizza osservazioni di 97 stazioni meteorologiche e integra indici spettrali derivati da Sentinel-2 con metriche descrittive della morfologia urbana.

Le prestazioni variano nel corso della giornata e risultano migliori nel tardo pomeriggio e nelle ore notturne: il coefficiente di determinazione è compreso tra 0,33 e 0,37, mentre l'errore quadratico medio varia tra 0,7 e 1,4 °C. Nonostante le difficoltà intrinseche della modellazione della temperatura dell'aria a scala molto fine, soprattutto nelle ore diurne, le mappe restituiscono efficacemente l'eterogeneità termica urbana.

Durante le fasi di massima intensità dell'isola di calore, le aree centrali risultano fino a 3-5 °C più calde rispetto alle zone circostanti, mentre i parchi urbani mostrano un effetto di raffrescamento dell'ordine di 1-2 °C, come mostrato in Fig. 3. Confrontando le mappe di temperatura ottenute con la mappa di LCZ, si nota che le classi più compatte e densamente edificate, quali LCZ 2, LCZ 3 e LCZ 8, sono associate a temperature più elevate, mentre le classi meno dense e le superfici naturali presentano valori inferiori. Questi risultati mostrano il potenziale delle mappe ad alta risoluzione per individuare le aree maggiormente esposte al rischio termico.

È inoltre in corso un approfondimento a scala di dettaglio, finalizzato alla predizione della temperatura dell'aria a livello stradale. L'attività integra misure acquisite mediante rilievi mobili con strumenti MeteoTracker e dati aerei ad alta risoluzione, utilizzati anche nelle attività di validazione descritte nella sezione successiva. Questa integrazione consente di descrivere i pattern spaziali della temperatura con un ulteriore livello di dettaglio e di analizzare le microvariazioni associate alla geometria urbana, ai materiali delle superfici e alla presenza di vegetazione.

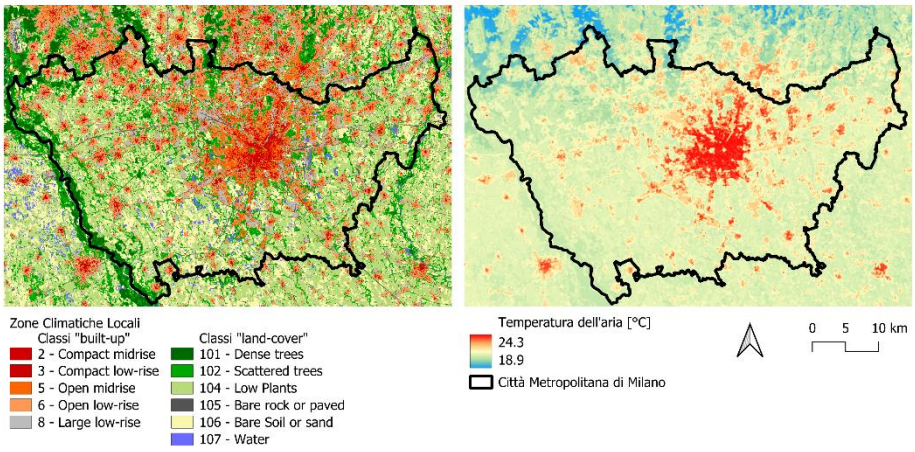


Fig. 3. Mappa delle zone climatiche locali di Milano per giugno 2022 (sinistra) e mappa della temperatura dell'aria durante la fase di massima intensità dell'isola di calore urbana, corrispondente a due ore prima dell'alba durante l'ondata di calore di giugno 2022 (destra).

3.2 Analisi della risposta termica delle superfici urbane

È stata inoltre analizzata la relazione tra la composizione delle superfici urbane e il comportamento termico mediante tecniche di *unmixing* spettrale. Le immagini iperspettrali delle missioni PRISMA e DESIS sono utilizzate per stimare la frazione di materiali artificiali e naturali che costituiscono ciascun pixel; tali informazioni vengono quindi messe in relazione con la temperatura superficiale (*Land Surface Temperature*, LST) derivata dai dati termici Landsat 8 e Landsat 9.

L'*unmixing* spettrale è vincolato affinché le frazioni dei materiali siano non negative e la loro somma sia pari a uno per ogni pixel. Sono considerate superfici artificiali, quali asfalto, tegole e metallo, nonché componenti naturali quali suolo nudo, vegetazione arborea ed erbacea e acqua.

I risultati mostrano che l'aumento delle frazioni di asfalto e tegole è associato a temperature superficiali più elevate, con un effetto più marcato per l'asfalto. Al contrario, la vegetazione riduce la temperatura superficiale; la vegetazione arborea evidenzia un contributo di raffrescamento leggermente maggiore rispetto a quella erbacea, verosimilmente per l'azione combinata di ombreggiamento ed evapotraspirazione (Fig. 4).

L'analisi consente quindi di approfondire il contributo dei materiali ai processi di riscaldamento e raffrescamento delle superfici e di interpretarne la relazione con la temperatura dell'aria prossima al suolo. Sono in corso attività di validazione mediante dati iperspettrali e termici ad alta risoluzione acquisiti durante un rilievo aereo su Milano il 15 e 16 agosto 2025, integrati con dati multispettrali quasi simultanei e dataset geospaziali di riferimento.

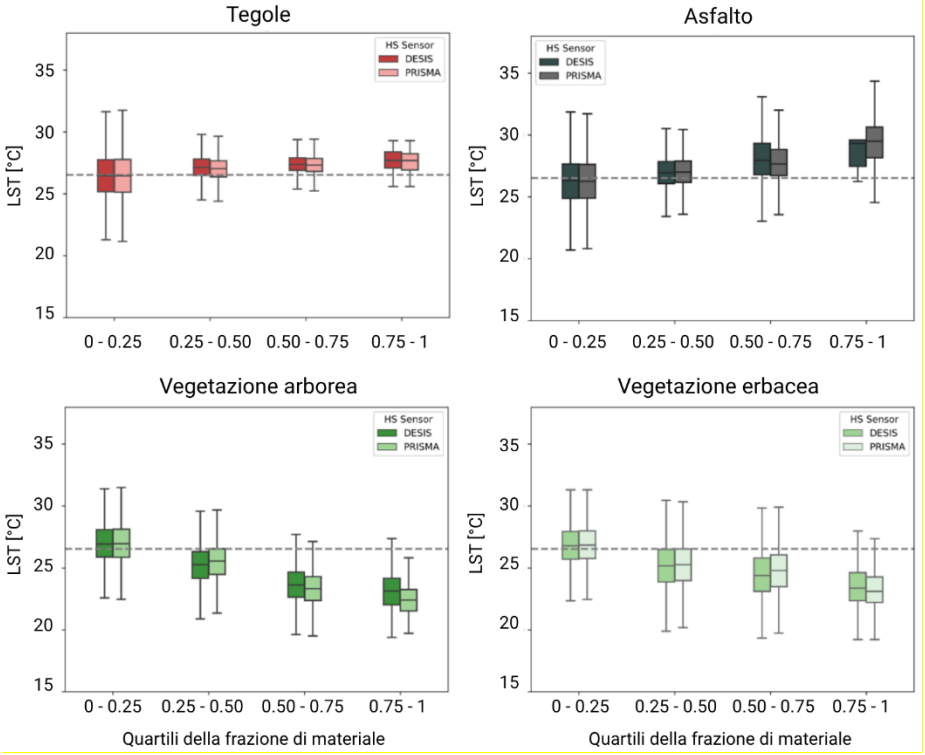


Fig. 4. Distribuzione della temperatura superficiale per classi di abbondanza dei materiali, derivate da immagini PRISMA e DESIS; le distribuzioni sono organizzate per quartili di abbondanza; la linea orizzontale grigia indica il valore medio della temperatura superficiale.

4 Conclusioni

Questo lavoro presenta alcune linee di ricerca sul monitoraggio integrato della qualità dell'aria e del comfort termico in ambiente urbano, sviluppate all'interno di un comune quadro progettuale ma basate su approcci metodologici distinti. La procedura di integrazione di dati al suolo, meteorologici e satellitari costituisce una base riproducibile per la modellazione degli inquinanti; nel caso di Milano, l'inclusione delle covariate ambientali e l'adattamento di Chronos-2 hanno migliorato la stima giornaliera di SO_2 rispetto alle configurazioni basate soltanto sulla serie storica. Per il metano, l'analisi congiunta della frequenza di superamento e della disponibilità di osservazioni Sentinel-5P, confrontata con gli eventi Carbon Mapper, ha mostrato il potenziale delle mappe bivariate come supporto allo screening territoriale, senza attribuire loro capacità di rilevamento diretto dei singoli pennacchi.

Parallelamente, le attività sul clima urbano evidenziano la marcata variabilità spaziale delle condizioni termiche all'interno delle città. La modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione permette di descrivere l'isola di calore urbana e la sua relazione con le LCZ, mentre l'analisi iperspettrale della composizione delle

superfici fornisce ulteriori elementi sul ruolo dei materiali nel determinare i pattern di temperatura superficiale.

Sebbene sviluppate separatamente, queste linee di ricerca contribuiscono a una più ampia comprensione delle dinamiche ambientali urbane, nelle quali sia la composizione atmosferica sia i processi termici sono influenzati dalla struttura spaziale della città e dalle condizioni ambientali. I futuri sviluppi potranno concentrarsi sul rafforzamento della valutazione quantitativa dei metodi proposti e sull'estensione delle applicazioni a ulteriori contesti geografici.

5 Ringraziamenti

Studio 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.

Riferimenti bibliografici

1. Yordanov, V., Vavassori, A., Zahed Kachaee, S., Saud Mino, C. I., Žgela, M., Moazzam, A., Brovelli, M. A.: Integrated Earth Observation and Data-Driven Approaches for Urban Air Quality and Thermal Environment Monitoring. International Conference on Contemporary Theory and Practice in Construction 17, 25–37 (2026).
2. Cedeno Jimenez, J. R., Brovelli, M. A.: NO2 Concentration Estimation at Urban Ground Level by Integrating Sentinel 5P Data and ERA5 Using Machine Learning: The Milan (Italy) Case Study. Remote Sensing 15(22), 5400 (2023).
3. Brovelli, M. A., Cedeno Jimenez, J. R., Moazzam, A., Yordanov, V., Vavassori, A.: Remote Sensing and Machine Learning for Urban Air Quality and Heat Island Monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W14-2025, 3–10 (2025).
4. Liang, Z., Cedeno Jimenez, J. R., Yordanov, V., Brovelli, M. A.: Estimating Ground-Level Carbon Monoxide Concentrations Using Machine Learning Techniques: The Metropolitan City of Milan Case Study. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W18-2025, 241–248 (2026).
5. Vavassori A., Žgela, M., Brovelli, M.A.: Recent (1981–2024) climatic trends in Italy from high-resolution reanalysis data and station-based observations. Applied Geomatics 18, 84 (2026).
6. Vavassori, A., Oxoli, D., Venuti, G., Brovelli, M.A., Siciliani de Cumis, M., Sacco, P., Tapete, D.: A combined Remote Sensing and GIS-based method for Local Climate Zone mapping using PRISMA and Sentinel-2 imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 131, 103944 (2024).
7. Žgela, M., Vavassori, A., Brovelli, M.A.: Predicting Air Temperature Patterns in Milan Using Crowdsourced Measurements and Earth Observation Data. Remote Sensing 17, 3520 (2025).

Monitoraggio della linea di costa della spiaggia del Poetto (Sardegna) con dati satellitari pubblici: evoluzione pre e post ripascimento

Enrica Vecchi[1][0000-0002-6524-9216] e Giuseppina Vacca[2][0000-0001-8161-7667]

[1,2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DiCAAR), Università di Cagliari

Abstract. Lo studio analizza l'evoluzione della linea di costa del Poetto mediante immagini Landsat (1984–2026) e Sentinel-2 (2015–2026), elaborate con CoastSat. L'analisi delle posizioni medie annuali lungo 161 transetti evidenzia un persistente arretramento del settore sud-occidentale dopo il ripascimento del 2002, riconosciuto da entrambe le missioni. Le acquisizioni del 2002 consentono inoltre di distinguere le configurazioni medie precedenti e successive all'intervento.

Parole chiave: Linea di costa, Monitoraggio costiero, Poetto.

1 Introduzione

Le variazioni della posizione della linea di costa costituiscono un indicatore dell'evoluzione dei litorali sabbiosi e il loro monitoraggio rappresenta uno strumento fondamentale per individuare fenomeni di erosione e avanzamento, quantificarne l'entità e analizzarne la distribuzione spaziale e temporale [1,2,3].

La crescente disponibilità di immagini satellitari multispettrali gratuite ha ampliato le possibilità di monitoraggio, consentendo di ricostruire l'evoluzione della linea di costa su scale temporali pluridecennali. In particolare, gli archivi Landsat e Sentinel-2 permettono di ottenere osservazioni ad elevata frequenza temporale, mentre alcune procedure automatizzate, come il toolbox open-source CoastSat, consentono di estrarre sistematicamente la posizione della linea di costa da un elevato numero di immagini [4,5]. L'analisi di serie temporali può essere condotta mediante indicatori quali il Net Shoreline Movement (NSM) e il Linear Regression Rate (LRR) utili a quantificare le variazioni ed evidenziarne la variabilità spaziale [3,6]. Le posizioni ricavate dalle immagini satellitari possono tuttavia essere influenzate dalle caratteristiche e dalla risoluzione dei dati, dalle condizioni meteomarine al momento dell'acquisizione e dalle procedure di estrazione, rendendo necessarie opportune verifiche di qualità [7,8].

In questo contesto, la spiaggia del Poetto, nel Golfo di Cagliari, costituisce un caso di studio particolarmente significativo, sia per le trasformazioni antropiche che hanno interessato il litorale negli anni sia per l'intervento di ripascimento realizzato nel settore sud-occidentale nel 2002. Studi precedenti hanno evidenziato una marcata variabilità spaziale nell'evoluzione della linea di costa, con una tendenza all'arretramento

particolarmente evidente nel settore sud-occidentale nella fase successiva al ripascimento [9,10].

Il presente lavoro analizza l'evoluzione della linea di costa del Poetto attraverso le serie satellitari Landsat (1984–2026) e Sentinel-2 (2015–2026), elaborate mediante algoritmo CoastSat. L'obiettivo è ricostruire l'evoluzione pluridecennale del litorale e analizzarne la variabilità spaziale lungo quattro settori della spiaggia, con particolare riferimento alle fasi precedente e successiva al ripascimento del 2002. Rispetto agli studi precedenti basati su ortofoto acquisite in anni specifici, l'impiego di archivi satellitari consente di disporre di osservazioni più frequenti, che possono essere successivamente aggregate su base annuale. Questo approccio permette di verificare se le tendenze evolutive già individuate attraverso osservazioni discontinue siano riconoscibili anche in serie temporali a maggiore frequenza di acquisizione. Il confronto tra Landsat e Sentinel-2 nel periodo comune 2015–2026 consente inoltre di valutare la coerenza dei pattern spaziali e delle tendenze ottenuti dalle due serie satellitari.

2 Area di Studio

La spiaggia del Poetto, situata nel Golfo di Cagliari, lungo la costa meridionale della Sardegna, si estende per circa 8 km da Margine Rosso, nel comune di Quartu Sant'Elena, fino al porto di Marina Piccola (**Fig. 1**). La spiaggia è caratterizzata da un regime microtidale e da una dinamica costiera prevalentemente influenzata dal moto ondoso. Le principali fonti di sedimento comprendono l'erosione del promontorio di Capo Sant'Elia e l'apporto di materiale derivante dalle praterie di Posidonia oceanica presenti al largo [11]. Nel corso dell'ultimo secolo, lo sviluppo urbano e la conseguente realizzazione di strade, edifici, strutture portuali e infrastrutture ricreative hanno modificato in maniera significativa la morfologia della spiaggia, contribuendo alla frammentazione del sistema dunale. In particolare, la naturale dinamica del trasporto sedimentario è stata modificata dalla costruzione del porto di Marina Piccola, intorno al 1960, che insieme, ad altre infrastrutture turistiche, pontili e chioschi, ha contribuito alla progressiva erosione del sistema spiaggia [10]. Per contrastare tali fenomeni erosivi, nel 2002 è stato realizzato un intervento di ripascimento che ha interessato circa 2 km del settore sud-occidentale della spiaggia, tra il porticciolo di Marina Piccola e lo stabilimento balneare D'Aquila, con l'apporto di circa 370.000 m³ di sabbia (**Fig. 1**) [12]. Il materiale utilizzato per il ripascimento è stato dragato da un deposito sedimentario situato al largo e, rispetto alla sabbia originaria, presentava una colorazione più scura e una granulometria leggermente maggiore [13].

Nel presente studio, il ripascimento del 2002 è stato assunto come riferimento temporale per distinguere le fasi precedente e successiva all'intervento. Per analizzare la variabilità spaziale dell'evoluzione della linea di costa, la spiaggia è stata suddivisa in quattro settori (P1–P4), definiti approssimativamente sulla base dei settori individuati in [10] (**Fig. 1**).

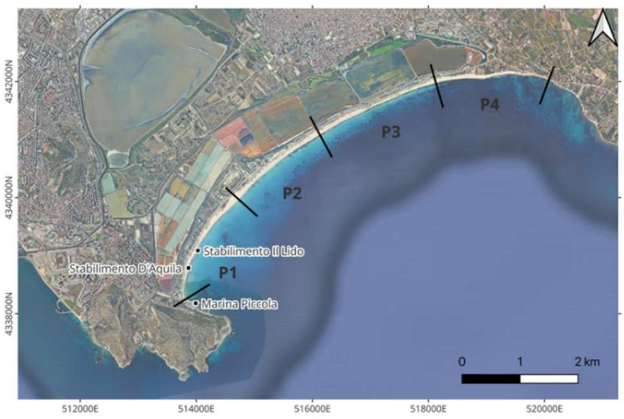


Fig. 1. Inquadramento della spiaggia del Poetto, a Cagliari, con indicazione dei principali stabilimenti balneari nel tratto interessato dal ripascimento e dei quattro settori (P1–P4) utilizzati per le analisi. Le coordinate del reticolo sono espresse nel sistema ETRF2000-UTM zona 32N (EPSG: 6707).

3 Materiali e Metodi

3.1 Dati satellitari ed estrazione delle linee di costa

Le linee di costa utilizzate per l'analisi dell'evoluzione del Poetto sono state estratte automaticamente da immagini satellitari multispettrali mediante il toolbox open-source CoastSat [4]. Il dataset Landsat comprende immagini acquisite dai satelliti Landsat 5, 7, 8 e 9 e copre il periodo 1984–2026, mentre la serie Sentinel-2 si estende dal 2015 al 2026. Per entrambe le missioni, il periodo di osservazione termina il 17 giugno 2026. Le due serie sono state elaborate separatamente e le linee di costa ottenute sono state esportate nel sistema di riferimento ETRF2000/UTM zona 32N (EPSG:6707).

Nelle immagini Landsat 8 e Landsat 9, alcune porzioni di spiaggia, strutture portuali e zone d'acqua sono state erroneamente classificate come aree nuvolose. Per ridurre tali anomalie è stato modificato l'elemento strutturante utilizzato nella procedura di mascheramento all'interno dello script, aumentandone la dimensione. Tale modifica ha consentito di ridurre sensibilmente le classificazioni errate, sebbene siano rimaste alcune anomalie in corrispondenza delle superfici d'acqua.

Il successivo controllo di qualità ha inoltre comportato l'esclusione di 79 immagini Landsat acquisite tra il 1988 e il 1990 a causa di problemi di georeferenziazione. Al termine della procedura sono state ottenute 1405 linee di costa dalla serie Landsat e 409 dalla serie Sentinel-2.

3.2 Elaborazione e analisi delle variazioni della linea di costa

L'analisi delle variazioni della linea di costa è stata condotta mediante un approccio basato su transetti ortogonali all'orientamento della spiaggia. A partire da una baseline di riferimento, sono stati generati mediante uno script Python 161 transetti, distanziati di 50 m e distribuiti lungo i quattro settori P1–P4, escludendo le aree interessate dalla

presenza di strutture. Per ciascuna linea di costa estratta con CoastSat, la posizione è stata determinata attraverso l'intersezione con i transetti e rappresentata, per ciascuno di essi, dalla relativa distanza di intersezione. È stato inoltre applicato l'algoritmo di despiking di Coastsat che rimuove outlier causati da identificazioni errate. Considerata l'elevata frequenza temporale delle osservazioni satellitari e lo scopo finale delle analisi, le linee di costa estratte sono state aggregate su base annuale. Per ciascun anno e per ogni transetto è stata calcolata la posizione media della linea di costa sulla base delle intersezioni valide, mantenendo separate le serie Landsat e Sentinel-2.

Le linee di costa annuali così ottenute sono state sottoposte a un controllo visivo in QGIS, che ha consentito di individuare ulteriori anomalie; i dati corrispondenti sono stati esclusi e le medie annuali sono state ricalcolate.

Per quantificare l'evoluzione della linea di costa, lungo ciascun transetto sono stati calcolati quattro indicatori comunemente utilizzati nelle analisi multitemporali e implementati nel software DSAS (Digital Shoreline Analysis System) [14]:

- NSM (Net Shoreline Movement): differenza, espressa in metri, tra la posizione più recente e quella più antica della linea di costa;
- EPR (End Point Rate): tasso medio annuo di variazione, calcolato come rapporto tra l'NSM e l'intervallo temporale compreso tra la prima e l'ultima osservazione, espresso in m/anno;
- SCE (Shoreline Change Envelope): distanza, espressa in metri, tra la posizione più arretrata e quella più avanzata della linea di costa, indipendentemente dal loro ordine cronologico;
- LRR (Linear Regression Rate): tasso di variazione ottenuto dal coefficiente angolare della regressione lineare ai minimi quadrati della posizione della linea di costa in funzione del tempo, espresso in m/anno.

Il calcolo è stato eseguito mediante una procedura sviluppata in Python, con successiva gestione e analisi dei risultati in ambiente QGIS. Per come sono stati definiti i transetti, valori positivi di NSM, EPR e LRR indicano uno spostamento della linea di costa verso mare, corrispondente a una tendenza all'avanzamento, mentre valori negativi indicano uno spostamento verso terra, associato a una tendenza all'erosione. L'indicatore SCE rappresenta invece l'ampiezza complessiva delle posizioni osservate e non fornisce indicazioni sulla direzione della variazione.

Per valutare l'evoluzione della linea di costa nelle fasi precedente e successiva al ripascimento del 2002, la serie Landsat è stata analizzata suddivisa nei periodi 1984–2002 e 2002–2026; gli indicatori sono stati inoltre calcolati sull'intero intervallo 1984–2026. La serie Sentinel-2, disponibile esclusivamente per il periodo post-ripascimento, è stata analizzata per l'intervallo 2015–2026. Per consentire un confronto diretto tra le due missioni satellitari, anche i dati Landsat sono stati analizzati separatamente sul periodo comune 2015–2026. I valori medi, minimi e massimi degli indicatori sono stati infine sintetizzati per ciascuno dei quattro settori P1–P4. Per il 2002, dai dati Landsat sono state ricavate due medie distinte: dal 01/01 al 08/03 per la fase pre e dal 25/03 al 31/12 per la fase post, escludendo le acquisizioni intermedie relative al periodo dei lavori. Nell'analisi completa è stata invece mantenuta la media annuale del 2002.

Tutti gli indicatori descritti sono stati calcolati per ciascun transetto e per i diversi intervalli temporali considerati, utilizzando gli anni interi come riferimento temporale

delle posizioni medie. Nei risultati sono riportati i valori aggregati per settore (P1–P4) e, per ciascuna analisi, gli indicatori più rappresentativi delle tendenze osservate. Si precisa che, per entrambe le serie, la posizione media del 2026 è riferita alle sole acquisizioni disponibili fino al 17 giugno e rappresenta pertanto una media annuale parziale.

4 Risultati

L'analisi della serie Landsat evidenzia una marcata variabilità spaziale e temporale lungo la spiaggia. Nel periodo pre-ripascimento, P1 e P3 presentano arretramenti netti medi di circa 5 e 3 m, accompagnati da LRR medi di circa −0,2 m/anno, indicativi di tendenze negative di entità contenuta. P2 mostra un avanzamento netto medio di circa 2 m e una tendenza lineare positiva di 0,2 m/anno. P4 presenta l'avanzamento medio più marcato, sia nel confronto tra gli estremi temporali (NSM=+8 m), sia nella tendenza complessiva (LRR=+0,5 m/anno) (**Fig. 2a**).

Dopo il ripascimento, P1 si distingue dal resto della spiaggia per un marcato arretramento (**Fig. 2b**). La posizione finale è mediamente circa 46 m più arretrata rispetto a quella post-intervento del 2002, mentre la tendenza lineare è pari a −1,6 m/anno. P2, P3 e P4 mostrano invece avanzamenti netti medi tra i 7 e i 12 m e LRR medi rispettivamente di 0,4, 0,2 e 0,6 m/anno. P1 presenta anche la maggiore escursione media della linea di costa (SCE), pari a circa 52 m. Questo valore riguarda esclusivamente l'evoluzione successiva all'intervento e non comprende la variazione tra le condizioni pre e post ripascimento.

Il confronto sull'intero periodo 1984–2026 restituisce un quadro differente: in tutti i settori, la posizione finale risulta mediamente più avanzata di quella iniziale, con NSM medi di 7, 14, 5e 21 m in P1–P4. Gli EPR medi variano da 0,1 a 0,5 m/anno; anche gli LRR medi indicano tendenze lineari positive, ma in P3 la tendenza è prossima allo zero (0,02 m/anno), mentre in P1, P2 e P4 raggiunge valori rispettivamente pari a 0,3, 0,5 e 0,4 m/anno. L'avanzamento netto sul lungo periodo coesiste quindi, in P1, con l'arretramento successivo al ripascimento. Questo settore presenta inoltre la maggiore escursione complessiva delle posizioni, mediamente pari a circa 58 m.

Nel periodo 2015–2026, Sentinel-2 individua un arretramento netto medio di circa 17 m in P1, con EPR e LRR medi entrambi di circa −1,5 m/anno. Le tendenze lineari sono negative in tutti i transetti del settore, che presenta anche la maggiore escursione media delle posizioni (SCE=19 m). P2 e P3 mostrano arretramenti netti medi di 6 e 2 m, accompagnati da LRR medi di −0,5 e −0,3 m/anno. P4 presenta invece un avanzamento netto medio di circa 3 m, con EPR di 0,3 m/anno e una tendenza lineare debolmente positiva (LRR=0,07 m/anno).

Limitando anche Landsat al periodo 2015–2026, entrambi i dataset confermano il maggiore arretramento medio di P1 (**Fig. 2c**). Landsat restituisce un NSM medio di −9 m e un LRR di circa −1,1 m/anno, rispetto a −17 m e −1,5 m/anno di Sentinel-2. In P2 e P3, Landsat mostra avanzamenti netti medi di circa 3 e 7 m e LRR positivi di 0,1 e 0,3 m/anno, mentre Sentinel-2 indica arretramento, con LRR medi rispettivamente di −0,5 e −0,3 m/anno. In P4, entrambe le serie mostrano avanzamento, ma l'LRR medio

è maggiore per Landsat (0,6 contro 0,07 m/anno). Gli SCE medi sono invece molto simili in P2 e P3 nelle due serie: circa 8-9 m circa 9 in P3.

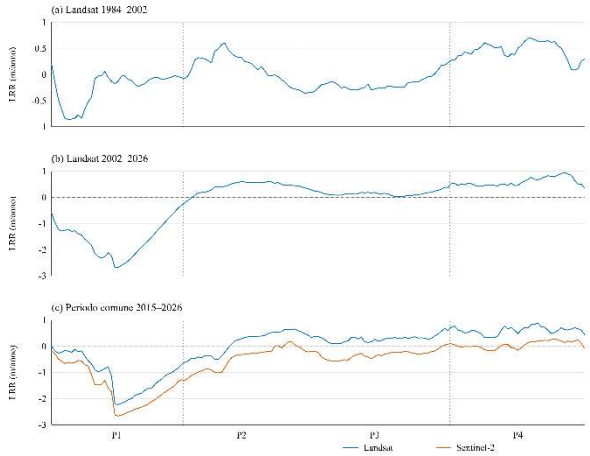


Fig. 2. Distribuzione dell'LRR nei settori P1–P4: (a) Landsat nel periodo pre-ripascimento; (b) Landsat nel periodo post-ripascimento; (c) confronto tra Landsat e Sentinel-2 nel periodo comune. Valori positivi indicano avanzamento, valori negativi arretramento.

La disponibilità di diverse acquisizioni Landsat nel corso del 2002 ha consentito di distinguere le configurazioni medie della linea di costa 2002 precedenti e successive al ripascimento. Lungo i 40 transetti del settore P1, il confronto ha evidenziato un avanzamento medio di circa 58 m, con spostamenti prevalentemente compresi tra 22 e 87 m (10°–90° percentile).

5 Discussione e Conclusioni

Il confronto nel periodo comune 2015–2026 ha evidenziato un andamento spaziale delle tendenze molto simile nelle due serie, entrambe caratterizzate dal maggiore arretramento medio in P1. Nel periodo comune 2015–2026, le LRR ottenute da Landsat sono sistematicamente superiori a quelle di Sentinel-2, con una differenza media di circa 0,6 m/anno. Questo scostamento determina tendenze medie di segno opposto nei settori P2 e P3, senza modificare sostanzialmente la distribuzione spaziale dei massimi e dei minimi. La concordanza riguarda quindi soprattutto il pattern spaziale delle variazioni, mentre l'entità e, nei settori con tendenze più deboli, il segno dei tassi dipendono dalla serie utilizzata. Le differenze tra le serie possono risentire della risoluzione spaziale e delle caratteristiche spettrali dei sensori, oltre che della diversa distribuzione temporale delle acquisizioni utilizzabili. Tuttavia, la maggiore risoluzione di Sentinel-2 non implica necessariamente una maggiore accuratezza nella determinazione della posizione della linea di costa [15]. Anche la presenza di nubi e le procedure di cloud masking possono influenzare l'estrazione della linea di costa. Inoltre, l'aggregazione annuale può attenuare le oscillazioni di breve periodo, ma non

elimina eventuali errori sistematici associati all'estrazione delle linee di costa [7,8]. Una distribuzione stagionale non uniforme delle acquisizioni può inoltre influenzare le posizioni medie annuali [2]. Il contributo di questi fattori non è stato quantificato separatamente nel presente lavoro.

L'arretramento del settore P1 nel periodo post-ripascimento è coerente con quanto osservato da Biondo et al. (2020) [10] mediante l'analisi di ortofoto nel periodo 2003-2016. La concordanza con la serie Landsat riguarda anche le tendenze medie positive di P2 e P4, mentre in P3 si osservano tendenze di segno opposto, ma di entità contenuta. Usai et al. (2025) [9], attraverso l'analisi DSAS di linee digitalizzate da ortofoto del periodo 1954–2022, documentano l'avanzamento associato al ripascimento e il successivo arretramento nella porzione sud-occidentale del Poetto. Le differenti finestre temporali, dovute principalmente alla disponibilità di ortofoto per anni specifici, limitano il confronto quantitativo diretto tra gli studi. Nel complesso, le serie satellitari aggiornate al 2026 restituiscono per P1 una tendenza all'arretramento coerente con quella descritta negli studi precedenti.

L'utilizzo dei dati satellitari ha consentito di ricostruire due distinte linee di costa medie per il 2002, offrendo un dettaglio temporale non disponibile nelle ortofoto pubbliche considerate. L'avanzamento medio di 58 m in P1 non è quantificabile attraverso la sola analisi post-intervento, che assume come riferimento una configurazione già ampliata dal ripascimento. Il successivo arretramento netto medio di circa 46 m fino al 2026 va quindi interpretato rispetto a questa condizione iniziale. Inoltre, in P1 l'LRR è positivo sull'intera serie 1984–2026 (+0,3 m/anno), ma negativo nel periodo 2002–2026 (−1,6 m/anno), evidenziando l'importanza di distinguere le fasi dell'evoluzione. La media post-ripascimento del 2002 comprende anche i mesi successivi ai lavori e non ne isola l'effetto immediato.

La copertura parziale del 2026 richiede cautela nell'interpretazione dei risultati recenti. Ricalcolando l'LRR sul periodo 2015–2025, P1 mantiene il maggiore arretramento medio in entrambe le serie: il tasso passa da −1,1 a −1,2 m/anno per Landsat e da −1,5 a −1,6 m/anno per Sentinel-2. Negli altri settori il segno delle tendenze medie rimane invariato, tranne in P4 per Sentinel-2, dove l'LRR passa da +0,07 a −0,2 m/anno. La sensibilità alla scelta dell'estremo temporale riguarda quindi anche l'interpretazione delle tendenze più deboli. Tale verifica non consente tuttavia di distinguere l'effetto del campionamento stagionale da un'effettiva variazione della spiaggia nel 2026.

La serie Landsat ha consentito di ricostruire l'evoluzione pluridecennale della linea di costa del Poetto nelle fasi precedente e successiva al ripascimento e il confronto con Sentinel-2 ha permesso di valutare la coerenza delle tendenze nel periodo recente. La frequenza delle acquisizioni satellitari integra il dettaglio spaziale delle ortofoto e permette di approfondire passaggi temporali, come la variazione pre/post ripascimento del 2002. Le tendenze di minore entità devono tuttavia essere interpretate con cautela, perché sensibili al periodo considerato e potenzialmente influenzate dalla distribuzione stagionale delle acquisizioni. Le linee di costa medie annuali e gli indicatori della loro evoluzione costituiscono dati di interesse pubblico, potenzialmente integrabili nei portali cartografici regionali a supporto del monitoraggio e della gestione costiera.

Riferimenti bibliografici

1. Virdis, S.G.P., Oggiano, G., Disperati, L.: A Geomatics Approach to Multitemporal Shoreline Analysis in Western Mediterranean: The Case of Platamona-Maritza Beach (Northwest Sardinia, Italy). Journal of Coastal Research 28(3), 624–640 (2012).
2. Meli, M., Vecchi, E., Romagnoli, C.: Shoreline evolution in a low-lying coastal region under anthropogenic influence. Marine Geology 492, 107679 (2026).
3. Anim, M., Aninakwah, I., Addison-Akotoye, E.: Coastal erosion dynamics along the central coastline of Ghana (2000–2024): a DSAS-based assessment of ecosystem service implications and coastal management. Frontiers in Marine Science 13, 1871973 (2026).
4. 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).
5. Theron, D., Theron, A.K.: Monitoring and Analysis of South African Shoreline Dynamics Using Satellite Imagery. Estuaries and Coasts 49, 30 (2026).
6. Rastgou, S., Etemadi, H., Abbasi, E., Amoonia, H.: Three decades of shoreline dynamics in the northern Persian Gulf: A multi-estuary assessment using Landsat, MNDWI, and DSAS metrics. Regional Studies in Marine Science 101, 105231 (2026).
7. Brown, S., O'Dea, A., Conery, I., Brodie, K.: Assessing shorelines extracted from satellite imagery using coincident terrestrial lidar linescans. Coastal Engineering 199, 104718 (2025).
8. Mikkelsen, A.B., Nicolow, J.C., Murray, K.D., Vitousek, S., Moskvichev, R.U., Anderson, T.R., Fletcher, C.H.: Resolving uncertainty in satellite-derived shorelines of a reef-lined beach using high spatiotemporal resolution topographic surveys. Scientific Reports 16, 24043 (2026).
9. Usai, A., Trogu, D., Porta, M., Demuro, S., Simeone, S.: 70 Years of Shoreline Changes in Southern Sardinia (Italy): Retreat and Accretion on 79 Mediterranean Microtidal Beaches. Water 17(17), 2517 (2025).
10. Biondo, M., Buosi, C., Trogu, D., Mansfield, H., Vacchi, M., Ibba, A., Porta, M., Ruju, A., De Muro, S.: Natural vs. Anthropic Influence on the Multidecadal Shoreline Changes of Mediterranean Urban Beaches: Lessons from the Gulf of Cagliari (Sardinia). Water 12(12), 3578 (2020).
11. De Muro, S., Porta, M., Pusceddu, N., Frongia, P., Passarella, M., Ruju, A., Buosi, C., Ibba, A.: Geomorphological processes of a Mediterranean urbanized beach (Sardinia, Gulf of Cagliari). Journal of Maps 14, 114–122 (2018).
12. ISPRA: *Annuario dei dati ambientali 2017*. Capitolo 9, Idrosfera, p. 158. ISPRA, Roma (2018).
13. Provincia di Cagliari: *Il Poetto: una spiaggia, una storia*. Provincia di Cagliari, Cagliari (2002).
14. Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S.: Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091, 104 pp. U.S. Geological Survey, Reston (2021).
15. Vos, K., Splinter, K.D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E.C., Luijendijk, A.P., Calkoen, F., Almeida, L.P., Pais, D., Klein, A.H.F., Mao, Y., Harris, D., Castelle, B., Buscombe, D., Vitousek, S.: Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. Communications Earth & Environment 4, 345 (2023).

Valutare itinerari lenti con la carta del valore di fruizione Naturalistico-Culturale-Paesaggistica: evidenze da un'applicazione in Friuli Venezia Giulia verso una revisione metodologica

Gian Pietro Zaccomer[1][0000-0002-1244-7024]

[1] DILL, Università degli Studi di Udine, gianpietro.zaccomer@uniud.it

Abstract. Il contributo propone una riflessione metodologica a partire dal riuso della carta del valore di fruizione Naturalistico-Culturale-Paesaggistica del Piano Paesaggistico Regionale del Friuli Venezia Giulia per la valutazione di itinerari di mobilità lenta, come quelli orientati al turismo fotografico. Attraverso una rilettura critica di una precedente applicazione empirica, relativa a una batteria di itinerari, sono emersi alcuni limiti di diversa natura. L'obiettivo del contributo è quindi quello di segnalare le cautele interpretative e i limiti d'uso della carta utili sia per il suo impiego, sia per orientarne un'eventuale revisione metodologica.

Parole chiave: Piano Paesaggistico Regionale, fruizione del paesaggio, mobilità lenta, analisi spaziale, Friuli Venezia Giulia.

1 Introduzione

La pianificazione paesaggistica produce, accanto alle norme, un consistente patrimonio conoscitivo: banche dati (spaziali e non), statistiche e, soprattutto, cartografie. Una volta pubblicate e rese accessibili, queste fonti vengono utilizzate anche al di fuori delle finalità per cui erano state costruite, spesso a scale diverse da quelle originarie. Questo pone una questione di fondo: fino a che punto uno strumento mantiene la propria capacità informativa quando viene applicato in condizioni differenti?

1.1 Il quadro di riferimento

In questo ambito, il *Piano Paesaggistico Regionale del Friuli Venezia Giulia* (PPR-FVG) è stato concepito in una prospettiva dinamica di aggiornamento e dotato di una banca dati consultabile in rete tramite webGIS [1]. Questo rende i suoi elaborati non solo accessibili, ma anche concretamente riutilizzabili.

Il PPR-FVG è stato elaborato in copianificazione tra l'Amministrazione regionale e l'allora Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo, con il supporto scientifico dell'Università degli Studi di Udine [2], e successivamente approvato nel 2018 (D.P.Reg. n. 0111/Pres.). Al suo interno si distinguono una parte statutaria e una

parte strategica [3]; in quest'ultima viene individuata sul territorio regionale quella che si può definire una *rete di reti*, composta da quella *ecologica* e da quella *dei beni culturali*, nonché dalla *Rete della Mobilità Lenta* (ReMoL), che ha il preciso compito di connettere le altre due reti e in cui si inserisce la tematica geografica della *fruizione del paesaggio*.

È proprio nella scheda della ReMoL [4] che viene elaborata la *carta del valore di fruizione Naturalistico-Culturale-Paesaggistica* (di seguito *carta NCP*), costruita integrando le tre componenti implicite nel suo nome e riclassificando il valore di sintesi in cinque classi – termine che il PPR-FVG utilizza per indicare valori ordinali, detti *valori NCP*, e non intervalli di una variabile quantitativa –, e restituita su un *raster* con risoluzione 500 × 500 metri. La carta risponde a una finalità dichiarata, ossia quella di fornire un quadro regionale di sintesi a supporto della costruzione delle linee strategico-progettuali della ReMoL. Già in questa scheda viene proposto un primo riuso in cui la carta NCP viene utilizzata per valutare i tratti dei singoli percorsi ciclopedonali, passando così da una lettura regionale d'insieme a una più localizzata.

Un più recente riuso riguarda una batteria di itinerari orientati al turismo fotografico, che il presente contributo intende riesaminare criticamente. Per *Turismo Fotografico* (TuFo) si intende una forma di turismo di nicchia in cui il motivo principale del viaggio è la fotografia [5], passione che ben si sposa con quella per la mobilità lenta [6].

Nel lavoro [7], la carta NCP è stata utilizzata per valutare ventiquattro itinerari di mobilità lenta orientati al TuFo, spostando l'analisi locale dal tratto lineare alle tappe puntuali, queste ultime valutate mediante *buffer* circolari a raggio variabile. Il riesame critico di tale applicazione ha confermato l'utilità della carta come prima base di lettura territoriale, ma ha anche reso visibili alcuni limiti nel suo riuso a scala di itinerario.

1.2 Gli obiettivi del contributo

Gli obiettivi principali di questo contributo sono sostanzialmente due: illustrare brevemente i passaggi della costruzione della carta NCP più rilevanti ai fini del suo riuso (§2) e, come anticipato, rileggere criticamente l'applicazione a scala di itinerario (§3) per far emergere i limiti d'uso che ne derivano (§4).

Va subito sottolineato che non si intende proporre una nuova carta né soluzioni operative, ma piuttosto segnalare alcune cautele interpretative e gettare le basi per una possibile revisione metodologica della carta NCP (§5).

2 La costruzione della carta NCP

La carta NCP deriva da un'analisi mediante GIS che integra elementi ecologici e quelli culturali con l'uso del suolo e i beni paesaggistici in un'ottica di fruizione del paesaggio [4], così come mostrato nel diagramma di flusso riportato nella Figura 1. La descrizione che segue si limita alle informazioni documentate nella scheda della ReMoL del PPR-FVG, soffermandosi su alcune scelte compiute durante la costruzione della carta, e non esplicitate dal diagramma, rilevanti ai fini del suo riuso.

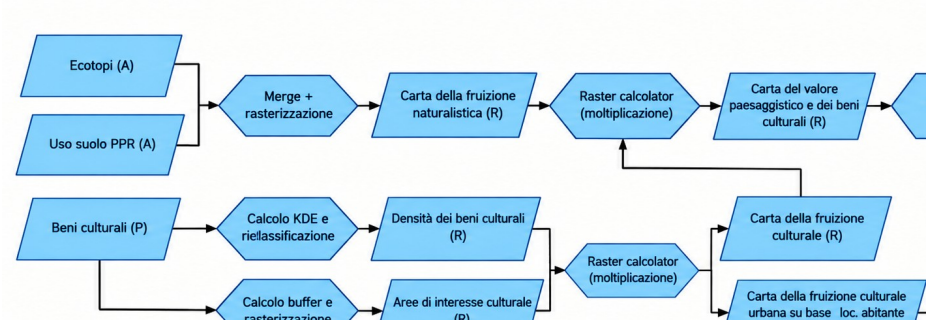


Figura 1. Diagramma di flusso della costruzione della carta NCP (A = *shape* areale; P = *shape* puntuale; R = *raster*). Fonte: [4], p. 19.

Tutti gli input sono stati ricondotti a scale di valore ordinali. Gli *ecotopi*, derivati dalla Rete ecologica regionale frutto di precedenti elaborazioni, sono pesati rispetto al valore ecologico su cinque classi, dal valore minimo attribuito alle aree urbane a quello massimo assegnato alle aree protette, quali parchi regionali e siti Natura 2000. Per l'uso del suolo, alcune tipologie, come i vigneti, sono state riclassificate in base alla loro potenzialità di fruizione paesaggistica, aumentandone il valore. L'integrazione degli ecotopi con l'uso del suolo così riclassificato permette anche di riconoscere un valore differenziato alla parte montana, che risulterebbe altrimenti omogenea. I beni culturali invece sono pesati su cinque classi in ragione del valore determinato dalla Rete dei beni culturali, mentre i beni paesaggistici su due sole classi, media e alta, in ragione dell'origine del vincolo.

Come emerge dalla Figura 1, la componente culturale C è quella che comporta il maggior numero di elaborazioni. Dal *layer* puntuale dei beni culturali è stata costruita una mappa di densità mediante *Kernel Density Estimation* (KDE) non pesata, con raggio di ricerca di 1.000 metri, e successivamente riclassificata per quartili. Parallelamente, dagli stessi beni sono stati ricavati *buffer* di ampiezza crescente al crescere del valore del bene, ampiezza che va da 1.000 a 5.000 metri, per determinare le aree di interesse culturale. Densità e *buffer* sono stati infine combinati per moltiplicazione nel calcolatore *raster*.

La moltiplicazione è l'operatore impiegato anche nei passaggi successivi, che portano alla carta finale: la componente culturale C è moltiplicata per quella naturalistica N e il prodotto è a sua volta moltiplicato per la componente dei beni paesaggistici P. Tra i due passaggi si colloca la sovrascrittura del *raster* delle sole aree urbane, motivata dal fatto che in tali ambiti prevalgono i valori culturali, mentre il basso valore ecologico avrebbe pregiudicato la valutazione complessiva. Il risultato, riclassificato in cinque classi ordinali, da 1 (basso) a 5 (alto), su un *raster* a risoluzione di 500 × 500 metri, permette di ottenere la carta NCP. Per come è stata costruita, tale carta si configura dunque come uno strumento di sintesi a scala regionale, coerente con la finalità della parte strategica del Piano e funzionale alla costruzione delle linee strategico-progettuali della ReMoL.

3 L’applicazione a scala di itinerario

Come anticipato, la stessa scheda della ReMoL compie un primo riuso della carta NCP. Una volta ottenuta la carta finale e sovrapposta alla ReMoL (Figura 2), i suoi valori sono stati estrapolati per valutare i tratti dei singoli percorsi ciclopedonali, passaggio che sposta la lettura da un’entità areale, la cella del *raster*, a una lineare, e da una restituzione d’insieme a una più localizzata. La scheda non esplicita le modalità con cui l’estrapolazione è condotta, ma la direzione è chiara: apre a un utilizzo della carta come strumento di valutazione di singoli itinerari di mobilità lenta.

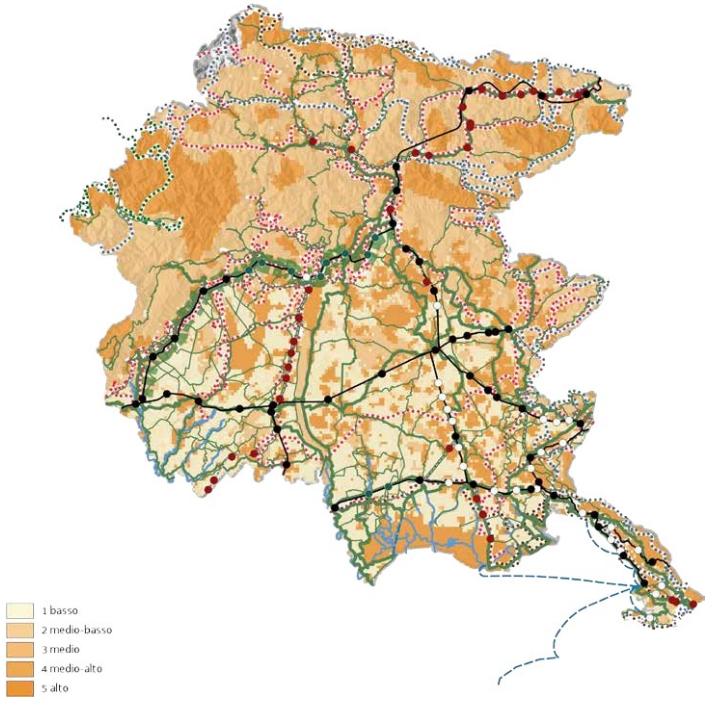


Figura 2. Mobilità lenta e valori di fruizione NCP. Fonte: [4], Tav. 11, p. 24. Lo stato di fatto della rete è aggiornato al 2023.

A questo tipo di riuso appartiene anche l’applicazione richiamata in precedenza [7], anche se condotta a livello di singola tappa. È stato preso in esame un pacchetto di ventiquattro itinerari di mobilità lenta orientati al TuFo, sviluppati tra il 2019 e il 2023 a partire da un progetto pilota e da una successiva batteria di tesi di laurea [8]. Quasi tutti gli itinerari proposti sono interni a un singolo Ambito di paesaggio del PPR e si svolgono prevalentemente a piedi o in bicicletta, con l’ausilio di mezzi elettrici (pulmino o treno).

L’analisi spaziale, condotta in ambiente QGIS, ha previsto il calcolo di misure di posizione sui valori NCP delle celle intercettate da *buffer* circolari costruiti attorno alla coordinata di ogni singola tappa, con raggio variabile fino a 1.000 metri con passo di

250 metri. Il ricorso al *buffer*, anziché al valore della sola cella di appartenenza, è giustificato da un comportamento tipico dei fotografi amatoriali: durante le tappe i partecipanti non restano in genere nello stesso punto, ma si sparpagliano nell'intorno alla ricerca di soggetti e prospettive differenti per rendere unici i propri scatti [5]. Come misure di sintesi per ciascun itinerario sono state impiegate tanto la media quanto la mediana dei valori ottenuti per le singole tappe: la prima sottintende un'ipotesi di equidistanza dei valori NCP che la seconda non richiede, se non implicitamente nel caso della mediana convenzionale.

I valori così ottenuti sono stati confrontati con i corrispondenti riferimenti regionali (media pari a 3,51, mediana pari a 4 punti NCP). Considerando i *buffer* intermedi, di 500 e 750 metri di raggio, la quasi totalità delle proposte presenta misure di posizione non inferiori a tali riferimenti, mentre i pochi scostamenti negativi sono contenuti o riconducibili a particolari collocazioni delle tappe [7]. Il risultato conferma la coerenza degli itinerari proposti con aree caratterizzate da valori di fruizione medio-alti e alti, e mostra l'utilità del riuso della carta NCP come prima base di lettura territoriale a supporto della progettazione di itinerari lenti orientati al TuFo.

La rilettura critica di questa applicazione ha però reso evidenti alcune caratteristiche della carta NCP che, pur restando in ombra alla scala regionale, si rivelano significative nel passaggio alla scala di itinerario.

4 I limiti d'uso della carta NCP

Il riuso della carta NCP illustrato nel precedente paragrafo, pur mostrando la sua utilità come prima base di lettura territoriale, a una lettura critica ha messo in luce alcuni limiti di natura concettuale, metodologica e operativa. I principali sono discussi di seguito senza entrare nel merito delle possibili soluzioni, attualmente in corso di sviluppo e pertanto rinviate a un successivo approfondimento. Nell'esposizione si procederà da un limite prettamente concettuale ai limiti metodologici legati alla logica interna della procedura di costruzione della carta, fino a quello più operativo, connesso alla risoluzione della stessa carta.

4.1 La fruizione effettiva

Il primo limite è di natura prettamente concettuale. La procedura di costruzione prima presentata (§2) combina, per ciascuna cella del *raster*, valori relativi alle dimensioni naturalistica, culturale e paesaggistica. Quando la carta viene impiegata per valutare un itinerario, come quelli orientati al TuFo [7], valori NCP elevati segnalano il potenziale del territorio attraversato, ma non garantiscono l'effettiva fruizione dell'itinerario, che dipende anche da aspetti quali accessibilità, sicurezza, manutenzione, pendenze, continuità, punti di sosta e panoramici, qualità della segnaletica.

Questa problematica si ritrova già nella scheda del PPR-FVG poiché l'analisi SWOT [4, p. 26], proposta quale strumento di valutazione rapida della ReMoL, evidenzia punti di debolezza quali le interruzioni sulle ciclovie di interesse regionale, la marcata frammentazione delle reti ciclabili locali, la scarsa manutenzione e una cartellonistica

assente o poco omogenea, aspetti che non vengono considerati nella costruzione della carta. Per la sola componente naturalistica N si parla esplicitamente di "potenziale fruizione naturalistica" [4, p. 20] giacché un'area di elevato valore ecologico può risultare scarsamente fruibile, mentre una di valore medio può essere più facilmente fruibile e offrire comunque un elevato interesse percettivo e/o fotografico. L'uso della carta NCP può essere quindi mantenuto come primo riferimento per la lettura del territorio attraversato da un itinerario, trattando il valore restituito come un potenziale da verificare sul campo più che come una misura di fruizione effettiva.

4.2 La combinazione delle componenti

Come esplicitato in precedenza (§2), la carta NCP deriva da diverse operazioni di moltiplicazione tra componenti espresse su scala ordinale. Tali operazioni presuppongono che le classi abbiano un significato quantitativo, a partire quantomeno dall'equidistanza, che la loro natura qualitativa ordinale non garantisce. Il problema si ripresenta quindi anche nella sintesi finale della carta: nel caso applicativo (§3), la necessità di affiancare diverse misure statistiche di posizione (in particolare, media e mediana calcolate sui valori NCP delle celle coinvolte nei *buffer*) per sintetizzare i valori ottenuti nasce proprio dall'incertezza circa la validità dell'ipotesi di equidistanza dei valori NCP [7].

Nell'operazione di moltiplicazione, inoltre, un basso valore di una componente viene compensato solo in parte dalle altre. Ne sono un esempio le aree urbane, dove il basso valore ecologico avrebbe pregiudicato la valutazione complessiva, motivo per cui il loro *raster* è stato sovrascritto [4, p. 23]. Il correttivo interviene quindi solo su questi ambiti, lasciando invariata la combinazione nel resto del territorio.

La combinazione moltiplicativa rimane funzionale a una sintesi cartografica regionale, ma richiede una certa cautela qualora il valore ottenuto dall'operazione venga interpretato come indicatore composito in senso proprio [9] per la valutazione dell'intero itinerario o delle sue tappe.

4.3 La stima della componente culturale

La componente culturale C si fonda sulla combinazione di una stima di densità e di *buffer* costruiti sulla base della distanza euclidea (§2). Per come impostata [4, p. 21], la KDE non pesata stima la sola concentrazione numerica dei beni in un intorno, non la loro rilevanza qualitativa, quindi, a rigor di logica, un *cluster* di beni potrebbe far registrare un valore superiore a quello di un unico bene, seppur di grande valore. Oltre a questo limite, entrambe le procedure di costruzione sono isotrope, nel senso che trattano allo stesso modo tutte le direzioni e non considerano quindi la reale accessibilità del bene rispetto all'itinerario.

Questa componente resta comunque un indicatore di concentrazione a scala regionale, ma la sua natura isotropa è un aspetto che non va tralasciato quando il valore viene letto lungo un itinerario definito, poiché la prossimità in linea d'aria non implica l'effettiva accessibilità del bene dall'itinerario stesso.

4.4 I criteri di ponderazione

Il quarto limite riguarda non tanto la procedura di sintesi in sé, quanto la descrizione di alcuni criteri di ponderazione impiegati nella costruzione della carta NCP. Per alcune tipologie colturali, l'uso del suolo è stato riclassificato in base alla potenzialità di fruizione paesaggistica, ma la tabella di conversione tra le tipologie di uso del suolo e i relativi valori non è presente nella scheda della ReMoL, limitando quindi la piena riproducibilità della procedura a partire dalle sole informazioni pubblicate. Per quanto riguarda la componente dei beni paesaggistici P si distinguono invece solo due classi in base all'origine del vincolo, senza però specificare come siano stati ripartiti i beni decretati, le aree archeologiche e gli ulteriori contesti [4, p. 19]. Si tratta quindi di un criterio solo in parte dichiarato, e comunque di natura giuridico-amministrativa, che nulla dice sull'effettiva fruibilità del bene.

4.5 La risoluzione spaziale

L'ultimo limite evidenziato in questo lavoro riguarda la risoluzione finale del *raster* della carta NCP, pari a 500 × 500 metri. Tale risoluzione è coerente con una lettura a scala regionale, ma può risultare insufficiente rispetto a un itinerario di mobilità lenta, la cui fruizione è fortemente influenzata dalla qualità del territorio attraversato, che può mutare anche su distanze inferiori. Nel caso applicativo precedentemente descritto, un raggio di 250 metri, pari alla metà del lato della cella del *raster*, è stato ritenuto poco utile, mentre uno di 1.000 metri rischia di comprendere ambiti eterogenei [7]. In altre parole, la risoluzione è adeguata al livello regionale per cui è stata costruita, ma la sua utilità andrebbe soppesata quando il riuso della carta NCP avviene in modo localizzato, su singoli tratti o tappe.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

Per dare risposta alla questione di fondo posta in sede introduttiva, limitatamente al caso preso qui in esame, la carta NCP mantiene la sua capacità informativa quando viene impiegata a scala regionale, ma quando viene applicata alla scala di itinerario, tale capacità si riduce per effetto di alcuni limiti di diversa natura: quello concettuale, per cui il valore restituito rappresenta un potenziale territoriale, la cui effettiva fruibilità va verificata sul campo; quelli legati alla documentazione incompleta e alla risoluzione spaziale, che potrebbero essere superati senza modificare la logica dello strumento; e quelli intrinseci alla sua costruzione, in particolare alla logica moltiplicativa applicata a scale ordinali, che richiedono maggiore cautela.

Considerato che i limiti emersi derivano dalla logica di costruzione della carta NCP, e non dalla specifica applicazione considerata, è ragionevole attendersi che gli stessi possano ripresentarsi anche nella valutazione di altre tipologie di itinerari di mobilità lenta promossi dalla ReMoL, in particolare i cammini. Per questi si potrebbe sperimentare una valutazione con un *buffer* lineare, lungo l'intero tracciato, anziché per singole tappe come visto nel caso degli itinerari orientati al TuFo.

Il presente lavoro vuole costituire un punto di partenza verso una possibile revisione metodologica per il miglioramento della carta NCP. Tale revisione dovrebbe partire dalle stesse informazioni usate per la costruzione della carta originaria, così da consentire il confronto con essa per valutare gli effetti delle modifiche introdotte. Poiché alcuni passaggi della procedura non sono documentati o resi del tutto chiari nella scheda della ReMoL del PPR-FVG, tale riesame non potrà prescindere dal coinvolgimento di chi ha costruito la carta. Solo in un secondo momento si potrebbe procedere al reperimento dei dati per ottenere una nuova carta NCP aggiornata.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia Luca Cadez del Dipartimento di Scienze AgroAlimentari, Ambientali e Animali dell'Università degli Studi di Udine per i preziosi suggerimenti. Resta inteso che eventuali imprecisioni sono da attribuire unicamente a chi scrive.

Riferimenti bibliografici

1. Piano Paesaggistico Regionale del Friuli Venezia Giulia Homepage, https://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/pianificazione-gestione-territorio/FOGLIA21/, ultimo accesso 6 ottobre 2026.
2. Guaran, A., Pascolini, M. (a cura di): Pianificazione e governo del paesaggio: analisi, strategie, strumenti. L'apporto pluridisciplinare dell'Università di Udine al Piano paesaggistico regionale del Friuli Venezia Giulia. Forum, Udine (2019).
3. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia: Piano Paesaggistico Regionale del Friuli Venezia Giulia. Relazione generale, All. 2. RAFVG, Trieste (2018).
4. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia: Piano Paesaggistico Regionale del Friuli Venezia Giulia. Scheda della rete della mobilità lenta, All. 79 aggiornato alla Variante 2 al PPR. RAFVG, Trieste (2025), scaricabile online da [1].
5. Zaccomer, G.P.: Il turismo fotografico: viaggiare per scattare e postare. Esperienze sul campo reale e virtuale per una ridefinizione del framework teorico di un turismo di nicchia. Forum, Udine (2019).
6. Zaccomer, G.P.: Una modalità di fruizione lenta del paesaggio: il cicloturismo fotografico, Documenti Geografici, 2, pp. 459-464 (2021).
7. Zaccomer, G.P.: Sinergie tra turismo fotografico e mobilità lenta: alcune riflessioni nell'universo dei paesaggi del patrimonio, Bollettino della Società Geografica Italiana, serie 14, 9(1), pp. 15-28 (2026).
8. Zaccomer, G.P.: Il turismo fotografico in Friuli Venezia Giulia: un progetto pilota per l'individuazione di itinerari lenti. In Spagnoli L. (a cura di), Itinerari per la rigenerazione territoriale tra sviluppi reticolari e sostenibili, pp. 525-532. Franco Angeli, Milano (2022).
9. Zaccomer, G.P.: L'analisi territoriale socio-economica in ambito paesaggistico. Gli indicatori compositi per la zonizzazione territoriale del Friuli Venezia Giulia. Forum, Udine (2018).

Uno studio sui risultati di PPP integrando il GNSS esistente con LEO-PNT

N. Zallemi (1), L. Biagi (1)

[1] Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, ludovico.biagi@polimi.it

Parole chiave: GNSS, LEO, PPP

1 Riassunto esteso

Il Precise Point Positioning (PPP) fornisce accuratezze centimetriche con un solo ricevitore, ma richiede un periodo di convergenza di alcune decine di minuti. Nella stima, le ambiguità di fase sono fortemente correlate con le altre incognite (coordinate, offset di orologio, troposfera) e si decorrelano solo con il variare della geometria fra satelliti e ricevitore. Per i satelliti GNSS, in orbita media, con periodi di 12–14 h, la variazione è lenta e questo determina il tempo di convergenza.
I satelliti in orbita bassa (LEO), con periodi di circa 1.5–2 h, offrono una variazione molto più rapida della geometria di osservazione. Alle grandi costellazioni LEO per telecomunicazioni (Iridium NEXT, OneWeb, Starlink) si stanno affiancando progetti di costellazioni dedicate al posizionamento, navigazione e tempo (LEO-PNT), come Xona Pulsar e il dimostratore ESA Celeste.
In un lavoro precedente (Alghisi, Zallemi, Biagi, 2025) il contributo LEO è stato studiato dal solo punto di vista geometrico, in termini di diluizione della precisione. Nel presente lavoro, l'analisi è estesa al problema PPP completo: si è quindi implementato un stimatore PPP che utilizza osservazioni GNSS reali e osservazioni LEO-PNT sintetiche per quantificare (i) la riduzione del tempo di convergenza, (ii) i contributi separati di codice e fase LEO e (iii) l'effetto sull'accuratezza dopo la convergenza.
La costellazione LEO, simulata in una precedente collaborazione con ESA sulla base di concetti LEO-PNT di letteratura, conta 263 satelliti su orbite kepleriane circolari a circa 1190 km di quota: una parte in orbita quasi polare (inclinazione a 89°, 8 piani orbitali × 15 satelliti) e una parte a media inclinazione (55°, 11 piani × 13 satelliti).
Al presente il software implementato per l'elaborazione usa le combinazioni ionosphere-free (IF) di codice e fase in doppia frequenza. Le osservazioni GNSS sono fornite in file RINEX; i prodotti precisi di orbite, orologi e bias sonoo forniti nell'usuale formato IGS; le osservazioni LEO sono simulate direttamente in forma IF, con struttura analoga a quella GNSS e un offset d'orologio del ricevitore specifico per il tempo di sistema LEO-PNT. Alle misure sintetiche sono aggiunti un errore residuo d'orologio del satellite gaussiano, con deviazione standard di 12 cm, rumore di codice e fase gaussiani, rispettivamente con deviazione standard di 30 cm e 3 mm; infine viene

aggiunto un errore orbitale residuo sinusoidale, con periodo pari a quello orbitale e fase casuale per ciascun satellite.
Le osservazioni GNSS e quelle LEO sono elaborate in un unico modulo EKF ibrido, che applica anche le correzioni deterministiche (maree terrestri solide, ritardo di Shapiro, offset e variazioni dei centri di fase, phase wind-up). Il vettore di stato comprende le coordinate e un orologio del ricevitore per ciascuna costellazione GNSS, un orologio per LEO, il ritardo zenitale umido (random walk lento) e un'ambiguità float per ogni arco di satellite. Alla prima epoca lo stato è stimato ai minimi quadrati pesati: la relativa stima e covarianza inizializzano poi un filtro di Kalman esteso sequenziale, con aggiornamento della covarianza epoca per epoca. Il modello temporale del vettore di stato è random walk per le coordinate, gli offset di orologio e il ritardo zenitale umido, costante per le ambiguità. E' utile notare che l'EKF implementato al presente applica solo la stima forward.
In termini di coordinate, il software restituisce una stima di posizione per ogni epoca. Per analizzare le soluzioni in modo oggettivo si calcola la posizione media su finestre mobili di 5 min, traslate di 2.5 min. La convergenza è dichiarata quando le distanze 3D tra le medie di tre finestre consecutive sono tutte inferiori a 2 cm, cioè quando la soluzione è stabile su 10 min. Tale criterio misura appunto la stabilità della soluzione e non la sua accuratezza; in parallelo, conoscendo le coordinate di riferimento del sito, è anche possibile valutare l'errore 3D delle stime.
AL presente, è stata analizzata una giornata (19 febbraio 2026,DoY 50) di osservazioni GPS e Galileo a 30 s della stazione DLF1 (Delft). Con cutoff di 5°, sono visibili in media 19 satelliti GNSS. In base alla costellazione LEO simulata sono inoltre visibili 18 LEO.
Si confrontano tre soluzioni: solo GNSS (G), GNSS + codici LEO (G + L(P)) e GNSS + codici e fasi LEO (G + L(P+Φ)). In particolare, la giornata è divisa in 22 sessioni di 2 ore ciascuna, la prima che inizia a mezzanotte, le successive sfalsate di un'ora.
In base ai primi risultati ottenuti, l'elaborazione del solo GNSS raggiunge la convergenza in media dopo 35 minuti: dopo la convergenza, l'errore di stima 3D è dell'ordine dei 3 cm. L'aggiunta dei codici LEO non cambia significativamente lo scenario. Con l'aggiunta delle fasi LEO, si raggiunge la convergenza in circa 14 minuti e l'errore cala a poco più di un centimetro.
Al momento della stesura di questo abstract i risultati preliminari sono già molto incoraggianti. Nelle prossime settimane si concluderanno i test sui dati già disponibili, con particolare attenzione alla relazione tra l'evoluzione della geometria LEO e la convergenza del PPP. Inoltre si implementerà l'elaborazione non combinata delle fasi con la stima dei disturbi ionosferici. Nella presentazione al convegno verranno mostrati e discussi tutti i risultati ottenuti. SI prevede di maturare l'articolo completo nei primi mesi del 2027.

Riferimenti bibliografici

Alghisi M., Zallemi N., Biagi L., 2025. Improvements in PPP by integrating GNSS with LEO satellites: a geometric simulation. Sensors, 25, 4427

Modellazione locale del geoide in un'area soggetta a subsidenza: un approccio esplorativo nel Delta del Po veneto

Zanusso E.[1][0009-0005-0750-5866]; Amoroso A.[1]; Magnabosco L.[1]; Masetto C.[1][0009-0002-2043-567X]; Savio D.[1][0009-0003-6227-6547]; Trivelloni U.[1]; Fabris M.[2][0000-0002-4901-8522]

[1] Regione del Veneto, Direzione Pianificazione Territoriale
zanussoenrico@gmail.com; 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
[2] Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - ICEA
massimo.fabris@unipd.it

Abstract. Il Delta del Po veneto è soggetto a subsidenza attiva, che può avere un effetto non trascurabile nella stima dell'ondulazione locale del geoide. Misure di livellazione geometrica (2023) e GNSS (2024) sono state eseguite su 40 capisaldi, confrontando le differenze con il modello ITALGEO2005. I residui restano entro ±4 cm, con i valori negativi che si concentrano nella Sacca degli Scardovari, indicando un'anomalia spazialmente strutturata, legata a subsidenza differenziale o ai limiti del modello.

Parole chiave: Ondulazione del geoide, ITALGEO2005, GNSS, Livellazione geometrica, Subsidenza, Delta del Po.

1 Introduzione

Il Delta del Po è uno dei territori geodeticamente più complessi dell'Italia settentrionale. La compattazione dei sedimenti alluvionali e l'estrazione di acque sotterranee o di gas naturali hanno determinato nel Novecento tassi di subsidenza tra i più elevati d'Europa, con abbassamenti cumulati che in alcune aree superano i tre metri e con vaste superfici stabilmente sotto il livello medio del mare [1]. A inizio Novecento le quote del territorio deltizio erano comprese tra -1,0 m e +1,6 m s.l.m, mentre nel 2007 risultavano comprese tra -2,8 m e +0,3 m [2]. Le fasi più intense (fino a 250 mm/anno nel periodo 1951–1957 [3]) si sono ridotte dopo la sospensione delle estrazioni di acque sotterranee e di gas naturali negli anni Sessanta, ma il fenomeno è ancora in corso. Misure GNSS e InSAR multi-temporali documentano infatti tassi attuali fino a 16-18 mm/anno nella fascia costiera [4].

Le quote misurate con tecniche GNSS (h) sono riferite all'ellissoide, mentre le applicazioni legate al flusso dell'acqua richiedono quote ortometriche (H), riferite al geoide, superficie equipotenziale che approssima il livello medio del mare con discrepanze a livello globale di 1-2m [5]. La separazione tra le due superfici è

l'ondulazione del geoide N, legata a h e H dall'equazione approssimata della livellazione GNSS [6]:

$$N \approx h - H \tag{1}$$

In Italia il modello di riferimento è ITALGEO2005 (IGMI) che è derivato anche da dati gravimetrici e distribuito come grigliati *.gk2 [5, 7]. ITALGEO2005 dichiara un'accuratezza di ±0,04 m su scala nazionale. La sua rappresentatività in aree costiere soggette a subsidenza attiva (dove la dinamica del suolo può alterare il campo altimetrico locale) non è stata tuttavia ancora valutata sistematicamente con dati locali ad alta precisione.

Questo lavoro, di carattere esplorativo, costruisce un modello locale di N nel Delta del Po veneto (integrando livellazione geometrica e GNSS su capisaldi comuni) e lo confronta con ITALGEO2005 per quantificarne le discrepanze, indicarne la distribuzione spaziale e le possibili cause.

2 Area di studio e dati disponibili

2.1 Area di studio

L'area esaminata ricade nel settore veneto del Delta, in provincia di Rovigo, tra Lorèo, Taglio di Po e Porto Tolle. Il territorio è pianeggiante, con quote prevalentemente negative e una fitta rete di canali, argini e valli da pesca.

La subsidenza cumulata e le opere di difesa a mare hanno prodotto bordi sopraelevati verso il mare e una vasta depressione centrale, esposta al rischio di inondazione [1]. I 40 capisaldi analizzati occupano circa 360 km² (circa 30 km in direzione N–S e 20 km E–O), con coordinate in RDN2008, UTM fuso 12 (EPSG:6876). Sono più fitti lungo gli argini delle Valli del Po (nord) e attorno alla Sacca degli Scardovari (sud), che risulta essere un’area tra le più dinamiche del Delta per evoluzione costiera [1] (Fig. 1). L'involucro convesso dei punti definisce il dominio dell'analisi.

La subsidenza cresce dall'entroterra verso la costa orientale [4]: ciò motiva lo studio, ma introduce anche un elemento temporale nel confronto tra campagne distinte.

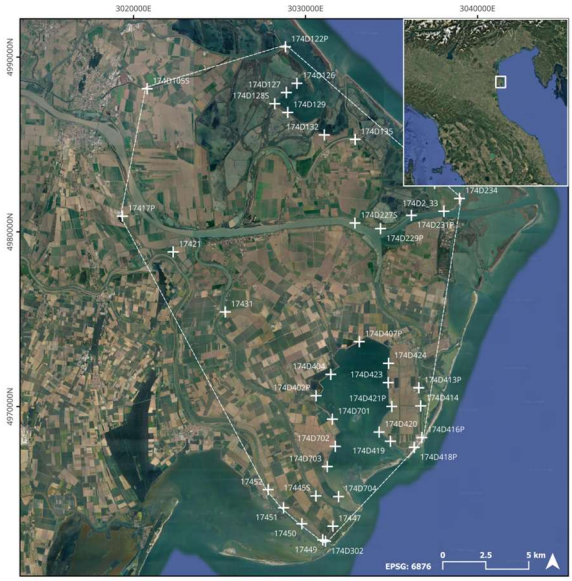


Fig. 1. Area di studio: nome e posizione dei 40 capisaldi comuni e perimetro dell'area di calcolo (EPSG:6876).

2.2 Campagne di livellazione e GNSS

Il primo dataset comprende 201 quote ortometriche da livellazione geometrica di alta precisione lungo la linea IGMI 0174 Lorèo–Porto Tolle (campagna IGMI/Regione del Veneto, 2023). Ogni dislivello è misurato in andata e ritorno; lo scarto tra le due determinazioni deve rientrare in 2,5 mm/km e il dato finale è la media, con accuratezza intrinseca dell'ordine del millimetro per chilometro di percorso. Il secondo dataset comprende 75 misure plano-altimetriche GNSS (Università di Padova, 2024): sessioni di almeno tre ore per baseline, post-processing con utilizzo di effemeridi precise, quote ellissoidiche GRS80 in RDN2008, con protocollo coerente con le campagne sulla rete PODELNET (PO DELta NETwork) (3 stazioni permanenti e 46 siti non permanenti) [4, 8]. L'antenna è stata centrata sul contrassegno a terra del caposaldo; l'errore atteso in quota è dell'ordine di 1 cm.

2.3 Selezione dei capisaldi comuni

L'incrocio dei due dataset ha individuato circa 40 capisaldi con quota ortometrica *H* (2023) ed ellissoidica *h* (2024).
Per ciascuno di essi è stata esaminata la monografia IGMI (aggiornata al 2013) o, per i casi non documentati, i file di campagna delle ditte esecutrici.
Alcuni capisaldi hanno doppio contrassegno (bullone torico per la stadia; centrino universale o chiodo per il treppiede GNSS), fisicamente distinto e a quota diversa. Nella quasi totalità dei casi la livellazione del 2023 ha quotato tutti i contrassegni, e

l'abbinamento è stato fatto sul contrassegno effettivamente occupato dall'antenna GNSS.
Quando erano stati quotati solo i bulloni torici, la quota GNSS era stata corretta con il dislivello tra contrassegni dichiarato nelle monografie. Per il caposaldo 174D233 (Pila, Porto Tolle) - dove il centrino è stato materializzato dopo l'ultimo aggiornamento della monografia - il dato proviene dai rapporti di misura della ditta esecutrice. Due coppie di misure sono state escluse per assenza di elementi che giustificassero valori anomali.

3 Metodologia

3.1 Ondulazione locale e confronto con ITALGEO2005

Per ciascun caposaldo l'ondulazione locale è stata stimata con l'equazione $N \approx h - H$, con h da GNSS (2024) e H da livellazione (2023). Il valore è una stima puntuale che incorpora sia il segnale geoidico reale sia gli eventuali effetti della subsidenza intercorsa tra le due campagne. I valori sono stati confrontati con ITALGEO2005 interrogando i grigliati *.gk2 e calcolando, punto per punto, $\Delta N = N_{\text{locale}} - N_{\text{ITALGEO2005}}$.

3.2 Interpolazione spaziale

I 40 valori sono stati interpolati su griglia 100×100 m entro l'involucro convesso dei punti (software QGIS). Sono stati testati gli algoritmi Nearest Neighbour, IDW, Thin Plate Spline (TPS) e le regressioni polinomiali (semplice, bilineare, quadratica).
Il Nearest Neighbour produce poligoni di Voronoi con transizioni brusche, incompatibili con un campo continuo e graduale. L'IDW genera artefatti “bull's-eye” in corrispondenza dei punti. Le regressioni bilineare e quadratica risultano numericamente instabili. Sono stati quindi selezionati la regressione polinomiale semplice (piano $z = A + Bx + Cy$) e il TPS, cioè la superficie elastica che minimizza la curvatura globale e passa in prossimità dei punti noti. A scala locale, dove geoide ed ellissoide sono assimilabili a piani, il TPS è un'approssimazione fisicamente coerente.

3.3 Punti di controllo

Per interrogare e verificarne la coerenza delle interpolazioni dove non esiste una misura diretta, sono stati scelti 6 punti di controllo esterni al dataset, distribuiti sull'intera area, in zone a minore densità di osservazioni e centrati sui pixel 100×100 m. Poiché in questi punti non esiste un valore misurato di N, come riferimento è stata assunta l'ondulazione ITALGEO2005 ricavata dai grigliati, confrontata con i valori dei modelli interpolati.

4 Risultati

Ondulazione locale. I 40 valori di N mostrano un chiaro gradiente latitudinale, crescente da sud a nord, coerente con l'allontanamento del geoide dall'ellissoide verso settentrione. Il minimo è 40,857 m, il massimo 42,232 m.

Confronto con ITALGEO2005. Le differenze ΔN sono comprese tra −0,034 m (174D418P) e +0,014 m (17431), interamente entro la tolleranza dichiarata (±0,04 m). La loro distribuzione non è casuale: i residui più negativi si concentrano nella Sacca degli Scardovari, nel settore meridionale (Fig. 2), suggerendo un'anomalia localizzata non catturata dal modello nazionale. La superficie TPS di ΔN (Fig. 3) varia tra −0,037 e +0,017 m; l'esagerazione verticale ha solo lo scopo di chiarezza visiva.

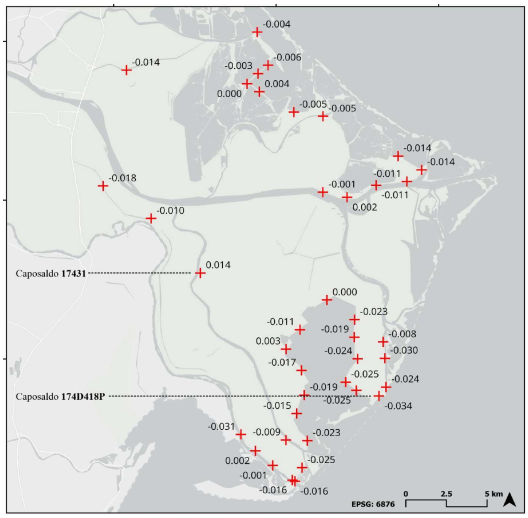


Fig. 2. Differenze di ondulazione ΔN (m) tra il modello locale (dati 2023 e 2024) e ITALGEO2005 nei 40 capisaldi.

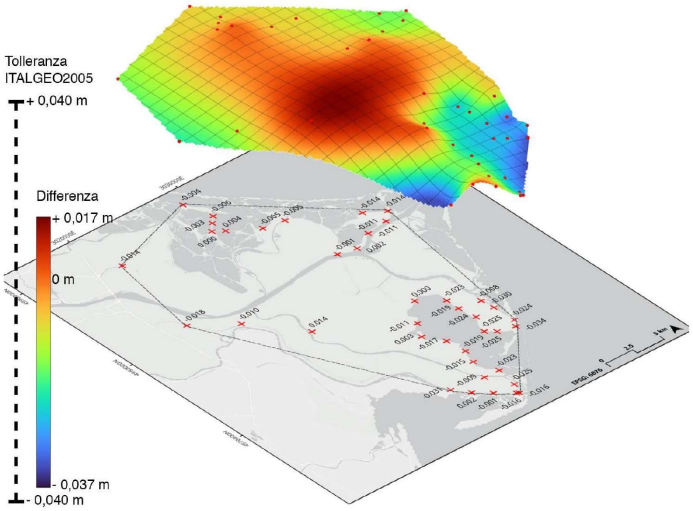


Fig. 3. Rappresentazione 3D della superficie TPS di ΔN rispetto a ITALGEO2005; asse z esagerato 50000 volte; griglia visuale 1×1 km; la tolleranza di ITALGEO2005 è ±0,040 m.

Modelli interpolati. Sui 40 punti noti lo scarto medio tra superficie interpolata e valori calcolati è di 2 mm per il TPS e di 9 mm per il piano: il TPS risulta più aderente ai dati disponibili.

Punti di controllo. Rispetto ai valori ITALGEO2005 nei 6 punti di controllo (Tab. 1) lo scarto medio è 1,2 cm per il TPS e 1,3 cm per il piano, ed è paragonabile all'errore strumentale atteso per il GNSS. Nei punti costieri prossimi alla Sacca degli Scardovari (punti 4 e 5) le differenze salgono fino a 2,5 cm (TPS) e 2,0 cm (piano), restando sotto la soglia di ±0,04 m.

Tab. 1. Punti di controllo: ondulazione ITALGEO2005 e differenza (valore assoluto, m) con i modelli interpolati.

Punto	N ITALGEO2005 [m]	|ΔN| TPS [m]	|ΔN| piano [m]
1	42,119	0,009	0,011
2	41,898	0,006	0,013
3	41,613	0,003	0,015
4	41,256	0,025	0,020
5	41,101	0,020	0,005
6	41,724	0,009	0,015
Media	–	0,012	0,013

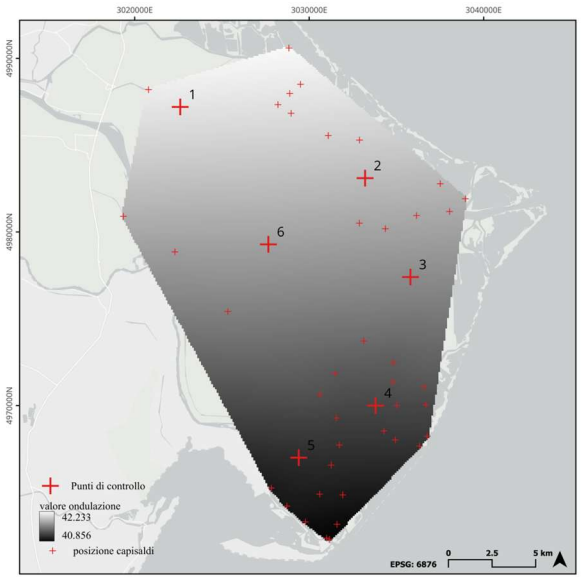


Fig. 4. Posizione dei 6 punti di controllo nell'area del modello di ondulazione locale del geoide calcolato con algoritmo TPS.

5 Discussione

I risultati confermano, in prima approssimazione, la coerenza di ITALGEO2005 con le osservazioni locali: le differenze punto per punto ricadono nella tolleranza dichiarata. La struttura spaziale dei residui, in particolare la concentrazione di anomalie negative nella Sacca degli Scardovari, suggerisce un andamento sistematico. Sono state avanzate due ipotesi, non mutuamente esclusive.

Subsidenza differenziale. I capisaldi della fascia costiera meridionale mostrano tassi di abbassamento superiori a quelli dell'entroterra [3, 4]; l'intervallo di un anno tra la livellazione (2023) e il rilievo GNSS (2024) può aver introdotto un bias sistematico in N, con quote ellissoidiche 2024 già inferiori a quelle che si sarebbero potute misurare nel 2023.

Limiti di ITALGEO2005. La griglia di dati gravimetrici e GNSS/livellazione alla base del modello potrebbe non coprire adeguatamente le zone costiere, con estrapolazione in aree prive di osservazioni dirette e incertezza crescente con la distanza dai punti di misura.

Qualità del dato GNSS. La ricognizione di campo (10–11 giugno 2026) ha evidenziato che edifici, strutture o vegetazione fitta presso l'antenna riducono i satelliti agganciati e degradano la precisione. Il caposaldo IGM 77710 (17431), adiacente a un fabbricato abbandonato con vegetazione densa, ne è un esempio: pur con qualità di misura potenzialmente inferiore, il suo errore resta entro la tolleranza di ITALGEO2005, e il monitoraggio biennale PODELNET mostra una progressiva diminuzione delle quote ellissoidiche, coerente con la subsidenza in atto [4, 8].

Sviluppi. La campagna GNSS 2026 sugli stessi siti non permanenti (rete PODELNET, avviata a giugno 2026 [9]) permetterà di discriminare tra le ipotesi: il confronto tra le quote ellissoidiche 2026 e 2024 darà la subsidenza biennale. Se questa fosse dell'ordine del doppio dell'anomalia osservata, che incorpora un solo anno di subsidenza (2023–2024), le discrepanze saranno imputabili soprattutto al bias temporale. Se la subsidenza fosse significativamente inferiore, andranno cercate altre cause, quali i limiti di copertura di ITALGEO2005 nelle zone costiere oppure delle anomalie geofisiche locali.

6 Conclusioni

È stato prodotto un modello locale dell'ondulazione del geoide nel Delta del Po veneto da 40 capisaldi comuni (livellazione 2023, GNSS 2024) su circa 360 km². L'analisi delle monografie IGMI e la correzione per i doppi contrassegni hanno eliminato una fonte di errore sistematico che avrebbe compromesso l'affidabilità dei valori di N.

Le differenze rispetto a ITALGEO2005 (da −0,034 a +0,014 m) sono contenute entro ±0,04 m e lo scarto medio sui punti di controllo (scelti in zone a minor densità di misurazioni) è di circa 1 cm: ITALGEO2005 mantiene quindi la propria accuratezza dichiarata anche in questo contesto geodinamicamente attivo. Se il bias temporale fosse confermato, le differenze effettive risulterebbero ancora minori.

La distribuzione dei residui non è però uniforme e ne deriva un'indicazione operativa: chi utilizza i grigliati *.gk2 nell'area può attendersi accuratezza centimetrica nella maggior parte del territorio, con della cautela aggiuntiva nella fascia costiera meridionale attorno alla Sacca degli Scardovari, dove ΔN raggiunge −0,034 m.

Il TPS aderisce ai dati meglio del piano (scarto medio 2 mm contro 9 mm). Poiché N non può essere considerata costante nemmeno in aree piatte [5], il piano risulta eccessivamente semplificato. Il TPS prodotto può servire da riferimento locale per rilievi futuri e, integrato con i dati 2026, potrà condurre a un modello geoidico locale aggiornato per il Delta del Po veneto.

Riferimenti bibliografici

1. Fabris, M.: Coastline evolution of the Po River Delta (Italy) by archival multi-temporal digital photogrammetry. Geomatics, Natural Hazards and Risk 10(1), 1007–1027 (2019). https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1561528
2. Corbau, C., Simeoni, U., Zoccarato, C., Mantovani, G., Teatini, P.: Coupling land use evolution and subsidence in the Po Delta, Italy: revising the past occurrence and prospecting the future management challenges. Sci. Total Environ. 654, 1196–1208 (2019)
3. Fiaschi, S., Fabris, M., Floris, M., Achilli, V.: Estimation of land subsidence in deltaic areas through differential SAR interferometry: the Po River Delta case study (Northeast Italy). Int. J. Remote Sens. 39(23), 8724–8745 (2018). https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1490977
4. Fabris, M., Battaglia, M., Chen, X., Menin, A., Monego, M., Floris, M.: An integrated InSAR and GNSS approach to monitor land subsidence in the Po River Delta (Italy). Remote Sens. 14(21), 5578 (2022). https://doi.org/10.3390/rs14215578
5. Barzaghi, R., Baiocchi, V.: Italian geodetic reference systems: definition and cartographic use. Appl. Geomat. 18, 87 (2026). https://doi.org/10.1007/s12518-026-00739-6
6. Albertella, A., Barzaghi, R., Carrion, D., Maggi, A.: The joint use of gravity data and GPS/levelling undulations in geoid estimation procedures. Boll. Geod. Sci. Aff. 67(1), 49–59 (2008)
7. Barzaghi, R., Borghi, A., Carrion, D., Sona, G.: Refining the estimate of the Italian quasi-geoid. Boll. Geod. Sci. Aff. 66(3), 145–159 (2007)
8. Cenni, N., Fiaschi, S., Fabris, M.: Monitoring of land subsidence in the Po River Delta (Northern Italy) using geodetic networks. Remote Sens. 13(8), 1488 (2021). https://doi.org/10.3390/rs13081488
9. Fabris, M., Nazari, S.: Analysis of InSAR datasets from the EGMS and Veneto region using ground-based GNSS velocities for the monitoring of land subsidence in the Po river delta (Italy). Front. Earth Sci. 14, 1781404 (2026). https://doi.org/10.3389/feart.2026.1781404

Una infrastruttura integrata GIS-based per il monitoraggio e la gestione sostenibile delle concessioni di acque minerali e termali in Campania

Francesco Caiazzo[1], Grazia Di Pietro[2], Michele Grimaldi[1][0000-0001-6906-3809], Monica Sebillo[2][0000-0003-3731-6415]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile Università degli Studi di Salerno
{fcaiazzo, migrimaldi}@unisa.it
[2] Dipartimento di Informatica Università degli Studi di Salerno
{msebillo, gdipietro}@unisa.it

Abstract (ITA)

La gestione sostenibile delle risorse idriche minerali e termali richiede strumenti informativi in grado di integrare dati amministrativi, gestionali, ambientali e territoriali, supportando il monitoraggio delle concessioni e la tutela degli acquiferi. In questo contesto si inserisce la Linea di Azione LA_H2O, sviluppata nell'ambito del progetto "Innovazione industriale per lo sviluppo sostenibile della Campania", con l'obiettivo di progettare un'infrastruttura informativa regionale per la realizzazione del catasto delle aree di concessione delle acque minerali e termali.

Il lavoro riguarda innanzitutto la definizione del modello informativo del database e la progettazione della relativa componente geografica. In una prima fase è stata condotta un'analisi dei requisiti informativi, attraverso il confronto tra i dati previsti dalla normativa regionale campana e quelli richiesti dalla rilevazione ISTAT sulle acque minerali naturali e termali. La correlazione delle due fonti ha consentito di uniformare le informazioni, aggregare campi omonimi e sinonimi e definire un dizionario condiviso dei metadati. Su questa base è stato individuato un set di indicatori minimi per il monitoraggio delle concessioni, comprendente portata e volume emunto, volume imbottigliato, conducibilità elettrica, temperatura dell'acqua e dell'aria, precipitazioni e parametri microbiologici per le acque termali. Sono stati inoltre proposti indicatori di ricerca innovativi, relativi alla dinamica piezometrica, alle condizioni meteoclimatiche, alla subsidenza, alla caratterizzazione isotopica e alla qualità delle acque, con l'obiettivo di ampliare le capacità conoscitive e preventive del sistema di monitoraggio.

La successiva fase di progettazione prevede la costruzione dello schema concettuale e la sua traduzione in un modello relazionale, predisposto per la gestione con PostgreSQL e relative estensioni spaziali. L'architettura è concepita per integrare le informazioni alfanumeriche con le componenti geografiche delle concessioni e dei punti di captazione, ponendo le basi per lo sviluppo delle funzionalità GIS nell'ambiente SINFONIA della Regione Campania.

I risultati costituiscono una base metodologica e tecnologica per la realizzazione di un sistema informativo territoriale integrato, scalabile e aggiornabile, finalizzato a

migliorare la conoscenza delle concessioni, la tracciabilità dei prelievi e il supporto alle decisioni regionali in materia di gestione sostenibile e tutela della risorsa idrica.

Abstract (ENG)

The sustainable management of mineral and thermal water resources requires information tools capable of integrating administrative, operational, environmental, and territorial data, thereby supporting the monitoring of concessions and the protection of aquifers. Within this context, the "LA_H2O" Action Line—developed as part of the project "Industrial Innovation for the Sustainable Development of Campania"—aims to design a regional information infrastructure for establishing a cadastre of mineral and thermal water concession areas.

The work primarily involves defining the database information model and designing its corresponding geographic component. In the initial phase, an analysis of information requirements was conducted by comparing data mandated by the regional regulations of Campania with data requested by the ISTAT (Italian National Institute of Statistics) survey on natural mineral and thermal waters. Correlating these two sources made it possible to standardize information, aggregate identical or synonymous fields, and establish a shared metadata dictionary. On this basis, a set of core indicators for monitoring concessions was identified, including flow rate and volume extracted, volume bottled, electrical conductivity, water and air temperature, precipitation, and—for thermal waters—microbiological parameters. Furthermore, innovative research indicators were proposed — covering piezometric dynamics, meteorological and climatic conditions, land subsidence, isotopic characterization, and water quality — with the goal of enhancing the monitoring system analytical and preventive capabilities.

The subsequent design phase involves constructing a conceptual schema and translating it into a relational model, configured for management via PostgreSQL and its associated spatial extensions. The architecture is designed to integrate alphanumeric information with the geographical components of water concessions and extraction points, laying the groundwork for the development of GIS functionalities within the Campania Region SINFONIA environment.

The results provide a methodological and technological foundation for creating an integrated, scalable, and updatable territorial information system, aimed at improving the understanding of concessions, ensuring the traceability of extraction, and supporting regional decision-making regarding sustainable management and protection of water resources.