MONITORAGGIO DEI BACINI IDRICI TRAMITE GOOGLE EARTH ENGINE: APPLICAZIONE AD IMMAGINI SENTINEL E LANDSAT

F. Bocchino^{1,*}, R. Ravanelli¹, V. Belloni¹

¹ Divisione di Geomatica e Geodesia, DICEA, Sapienza Universita` di Roma, Roma, Italia <filippo.bocchino, roberta.ravanelli, valeria.belloni>@uniroma1.it

Parole chiave: Monitoraggio dei bacini idrici, Obiettivi di sviluppo sostenibile, Google Earth Engine, Sentinel, Landsat.

Key words: Water reservoir monitoring, Sustainable Development Goals, Google Earth Engine, Sentinel, Landsat.

Abstract

I bacini idrici sono sempre piu` sottoposti a stress idrologici, pertanto e` essenziale eseguire un continuo ed accurato monitoraggio di tali risorse, in modo tale da garantirne una gestione sostenibile. Questo lavoro propone una metodologia per il monitoraggio da remoto dell'estensione superficiale dei bacini idrici attraverso l'analisi di immagini satellitari multispettrali e di immagini acquisite con il Synthetic Aperture Radar (SAR). In particolare, e` stata implementata una strategia di segmentazione tramite Google Earth Engine (GEE) per distinguere i corpi d'acqua dalla superficie terrestre circostante e misurarne la loro estensione. Il primo approccio si basa sull'uso dell'Automatic Water Extraction Index (AWEI) e sul metodo Otsu per la selezione della soglia, il secondo approccio si basa sulla conversione dell'immagine da RGB (Rosso-Verde-Blu) a TSV (Tonalita`, Saturazione, Valore) e sull'uso di una soglia parametrica, il terzo approccio si basa sull'uso delle immagini SAR e su una soglia selezionata empiricamente. Poi e` stata interamente sviluppata una strategia di validazione "statica" e sono state calcolate delle metriche standard per valutare l'accuratezza dei tre approcci durante la procedura di segmentazione. Il migliore, ovvero il metodo basato su AWEI, e` stato quindi applicato a tre corpi d'acqua in cui gli effetti della siccita` del 2022 sono stati particolarmente significativi: il lago Sawa (Iraq), il lago Poyang (Cina) e il fiume Po (Italia). I risultati hanno evidenziato, anche visivamente, l'ottima performance dell'approccio nella segmentazione dei corpi d'acqua dalle aree circostanti.

Water reservoirs are subjected to increasing hydrological stresses, therefore continuous and accurate monitoring of these resources is essential to ensure their sustainable management. This work proposes a methodology to remotely monitor the surface extent of water reservoirs through the analysis of satellite multispectral and Synthetic Aperture Radar (SAR) images. In particular, a segmentation strategy was implemented within Google Earth Engine (GEE) to distinguish water bodies from the surrounding land surface and measure their extension, by applying three different approaches to Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8 imagery. The first approach is based on the use of the Automatic Water Extraction Index (AWEI) and the self-adaptive Otsu's thresholding method, the second approach is based on the image conversion from RGB (Red-Green-Blue) to TSV (Hue, Saturation, Value) and the use of a parametric threshold, the third approach is based on the use of SAR imagery and an empirically selected threshold. A "static" validation strategy was developed from scratch and standard segmentation metrics were computed to evaluate the accuracy of the three approaches. The average values of the F1 scores on the Sentinel imagery were equal to 0.95, 0.90, and 0.84 for the three approaches, respectively. The best approach, i.e. the AWEI-based method, was then applied to three water bodies in which the effects of the 2022 drought were particularly significant: Sawa lake (Iraq), Poyang lake (China), and Po river (Italy). The results visually highlighted the good performance of the approach in segmenting the water bodies from the surrounding areas.

1. Introduzione

Le risorse idriche naturali e artificiali rappresentano fonti essenziali di acqua dolce per il consumo umano e animale, per l'irrigazione agricola e per numerose applicazioni industriali. Attualmente, le misurazioni dei livelli d'acqua vengono generalmente effettuate mediante strumenti tradizionali a terra, come le stazioni di monitoraggio. I dati raccolti da questi strumenti vengono utilizzati per stimare l'area ed il volume dei bacini (e le loro variazioni nel tempo) utilizzando curve di volume-areaelevazione derivate da informazioni batimetriche e topografiche del bacino stesso (Tong et al., 2016, Hamoudzadeh et al., 2023). Tuttavia, e' possibile effettuare il monitoraggio in situ quasi esclusivamente nei Paesi sviluppati. Se si considerano invece delle aree remote, subentra la difficolta` nell'installazione e nella manutenzione delle stazioni di misura. Inoltre, anche nei Paesi sviluppati, le stazioni di misura non sono installate presso

i bacini idrici di piccole e medie dimensioni. Al contrario, l'uso delle tecnologie di Osservazione della Terra (EO) puo' notevolmente ridurre i costi di monitoraggio (indipendentemente dall'estensione effettiva del bacino) e fornire dati frequenti e regolari che facilitano il monitoraggio continuo dei bacini d'acqua, in accordo a procedure omogenee a livello mondiale (Valada^o et al., 2021). Lo scopo di questo lavoro e' precisamente inserito in questo contesto: l'obiettivo generale e` quello di gettare le basi per lo sviluppo di una procedura basata su dati EO gratuiti per monitorare in modo continuo l'estensione di gualsiasi bacino idrico. In particolare, in questa analisi preliminare focalizzata su immagini satellitari multispettrali e SAR, sono stati esaminati tre diversi approcci di segmentazione in grado di distinguere i corpi d'acqua dalla superficie terrestre circostante e misurarne l'estensione utilizzando immagini di Sentinel-1, Sentinel-2 e Landsat-8. Infatti, il calcolo continuo di metriche bidimensionali, come il perimetro e l'area, e' un primo passo verso il monitoraggio delle variazioni stagionali ed annuali dei bacini

^{*} Corresponding author

idrici: questi parametri consentirebbero di ricostruire le dinamiche a lungo termine delle acque superficiali. Questo obiettivo e` strettamente correlato agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite (SDGs) riguardanti la disponibilita` d'acqua (SDG 6 - Acqua pulita e servizi igienico-sanitari) ed il monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici (SDG 13 - Azione per il clima), nonche´ al Piano di Ripresa Next Generation EU.

2. Metodologia

Sono state esaminate ed implementate tramite Google Earth Engine (GEE) tre diverse strategie di segmentazione dell'acqua. GEE e' una piattaforma di cloud computing che integra un vasto archivio di dati di telerilevamento liberamente accessibili, tra cui collezioni di immagini Landsat e Sentinel. Attraverso efficienti Interfacce di Programmazione delle Applicazioni (API), GEE consente di effettuare analisi geospaziali su larga scala, secondo il noto paradigma "data-informationknowledge-wisdom" (Kavvada et al., 2020). In particolare, proseguendo il lavoro iniziato in (Ravanelli et al., 2023), sono stati investigati i tre seguenti approcci di segmentazione dell'acqua:

- il primo (Sengupta et al., 2020, Donchyts et al., 2016) si basa sull'applicazione dell'Automatic Water Extraction Index (AWEI) (Feyisa et al., 2014) a immagini multispettrali e sul metodo Otsu per la selezione della soglia (Otsu, 1979);
- il secondo (Valada[°]o et al., 2021) si basa sull'uso di immagini multispettrali e sulla conversione dal modello di colore RGB (Rosso-Verde-Blu) al modello di colore TSV (Tonalita[°], Saturazione, Valore) a cui viene applicata una soglia parametrica;
- il terzo (Geohackweek, 2016) si basa sull'uso di immagini SAR (Synthetic Aperture Radar) e su una soglia selezionata empiricamente.

I primi due approcci sono stati applicati alle immagini multispettrali di Sentinel-2 (Google Earth Engine Data Catalog, 2023a) e Landsat-8 (Google Earth Engine Data Catalog, 2023c), mentre il terzo e' stato applicato alle immagini SAR di Sentinel-1 (Google Earth Engine Data Catalog, 2023b). Per gli approcci basati su immagini multispettrali, sono state selezionate solo le immagini con una percentuale di pixel nuvolosi inferiore al 30%, e poi e' stata applicata una maschera per le nuvole, utilizzando il band bitmask QA60 di Sentinel-2 (Google Earth Engine Data Catalog, 2022) e i band QA PIXEL e QA RADSAT di Landsat-8 (ESA, 2022). In tutti gli approcci e' stata utilizzata l'operazione della mediana per aggregare i dati delle immagini nel tempo (Google Earth Engine Documentation, 2023). La mediana permette di aggregare tutte le immagini disponibili in un determinato periodo temporale, ottenendo cos'i un'immagine complessiva calcolata prendendo il valore mediano di ogni pixel, per ogni banda, attraverso lo stack temporale delle immagini. Le immagini mediane sono state l'input per i tre approcci di segmentazione. Nell'analisi e` stato considerato un periodo di un anno (il 2019) e le immagini raccolte sono state analizzate in sottoperiodi trimestrali. In questo modo, tutte le immagini disponibili nel 2019 per i tre satelliti considerati sono state suddivise in quattro sotto-collezioni per investigare separatamente le quattro stagioni. La Figura 1 e la Figura 2 mostrano le immagini mediane ottenute per Sentinel-2 (dopo l'applicazione dei filtri delle nuvole) e per Sentinel-1. Entrambe le immagini sono relative al periodo gennaio-marzo 2019 e alla

zona del porto di Marghera (Venezia, Italia), cioe` l'area che e` stata successivamente utilizzata anche per la fase di validazione, come descritto nella Sezione 3.



Figura 1. Immagine mediana multispettrale di Sentinel-2 (porto di Marghera, gennaio-marzo 2019).



Figura 2. Immagine mediana di Sentinel-1 (porto di Marghera, gennaio-marzo 2019).

Ogni approccio ha restituito come output una maschera di segmentazione dell'acqua, dalla quale e' stata calcolata l'area del bacino idrico. Questa e' stata quantificata grazie ad una funzione che permette di contare i pixel classificati come acqua e poi di moltiplicare questo numero per la risoluzione dell'immagine. La Tabella 1 mostra la risoluzione (dimensione del pixel) delle bande utilizzate nelle analisi. Le sezioni successive descriveranno in dettaglio ciascun approccio.

Risoluzione delle bande (dimensione del pixel) [m]					
Satellite	RGB	NIR	SWIR1/SWIR2	GRD (IW)	
Sentinel-2	10	10	20	-	
Landsat-8	30	30	30	-	
Sentinel-1	-	-	-	10	

Tabella 1. Risoluzione delle bande di Sentinel-2, Landsat-8, and Sentinel-1: RGB, Near-infrared (NIR), Short-wave infrared (SWIR), and Ground Range Detected (GRD) Interferometric Wide (IW).

2.1 Approccio AWEI

Nell'approccio basato sull'AWEI, i pixel d'acqua presenti nell'immagine mediana di input sono stati identificati attraverso l'implementazione dell'indice spettrale AWEI e l'applicazione del metodo di thresholding basato sugli algoritmi di Otsu e di Canny (rilevatore di bordi) (Donchyts et al., 2022). L'indice AWEI e` definito nell'Equazione 1 (Feyisa et al., 2014):

$$AWEI = 4 \cdot (\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}) - 0.25 \cdot \rho_{NIR} - 2.75 \cdot \rho_{SWIR2}$$
(1)

dove ρ rappresenta la riflettanza per le bande GREEN, SWIR1, SWIR2 e NIR, mentre i coefficienti e le combinazioni aritmetiche delle bande spettrali scelte sono state determinate attraverso un esame critico delle proprieta` di riflettanza delle varie tipologie di copertura del terreno (Feyisa et al., 2014).

L'indice AWEI consente di massimizzare la separabilita' tra i pixel d'acqua e quelli non d'acqua, permettendo quindi di estrarre la superficie d'acqua con elevata precisione (Feyisa et al., 2014). A differenza del Normalized Difference Water Index (NDWI) o del Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), l'uso dell'indice AWEI evita errori di segmentazione dovuti a vari fattori come nuvole, neve e ghiaccio. Inoltre, l'AWEI non commette l'errore di classificare erroneamente come acqua le aree in ombra, dovute ad esempio alla presenza di rilievi topografici o alla presenza di nubi (Donchyts et al., 2016). L'aumento del contrasto tra l'acqua ed altre superfici scure fornito da questo indice (rispetto all'indice NDWI) e' mostrato nella Figura 3.



Figura 3. Confronto tra le immagini NDWI (sopra) and AWEI (sotto) ottenute sulla stessa area (laguna di Venezia).

Dopo il calcolo dell'indice AWEI, e' stato prima applicato l'algoritmo di Canny per rilevare i bordi e poi e' stato applicato il metodo di thresholding di Otsu. La rilevazione dei bordi e' stata fondamentale per poter fornire in input ad Otsu solo i pixel situati sul bordo acqua-terra (Donchyts et al., 2016). Questo ha permesso di ridurre di molto il numero di pixel analizzati, migliorando cos'ı le prestazioni del metodo. La rilevazione dei pixel d'acqua e' stata poi affinata applicando una dilatazione morfologica. La Figura 4 mostra la maschera d'acqua generata applicando questo primo approccio alle immagini di Sentinel-2.

2.2 Approccio TSV

Nell'approccio basato su TSV (Valada^o et al., 2021), l'immagine mediana di input RGB (vedi Figura 1) e` stata prima trasformata in TSV. Estata poi selezionata solo la banda relativa alla tonalita` per facilitare la successiva identificazione dei



Figura 4. Immagine di segmentazione dell'acqua ottenuta con l'approccio AWEI ed utilizzando le immagini di Sentinel-2.

pixel d'acqua (Valada^o et al., 2021). In questo caso, la segmentazione dell'acqua si basava su una soglia parametrica: piu[`] specificamente, solo i pixel che ricadevano nell'intervallo di tonalita[`] 0.25-0.95 sono stati classificati come pixel d'acqua. La maschera risultante e[`] mostrata nella Figura 5.



Figura 5. Immagine di segmentazione dell'acqua ottenuta con l'approccio basato su TSV ed utilizzando immagini di Sentinel-2.

2.3 Approccio SAR

Le immagini di Sentinel-1 sono state filtrate selezionando solo la polarizzazione VV. È importante sottolineare due criticita` che influenzano le immagini SAR. In primo luogo, alcune superfici alterano la polarizzazione del segnale SAR, ma questo non accade frequentemente per superfici d'acqua. In secondo luogo, le immagini SAR sono spesso affette dal rumore "speckle" che deteriora la qualita' dell'immagine (Geohackweek, 2016). Per ridurre lo speckle e' stato applicato un filtro mediano focale. Successivamente, e' stato implementato un semplice metodo di thresholding per identificare i pixel d'acqua nelle immagini SAR. In particolare, e' stato scelto un valore di soglia per la retrodiffusione (backscattering) e tutti i pixel al di sotto di quella soglia sono stati classificati come acqua. Il valore di soglia selezionato e' stato -16 dB ed e' stato scelto empiricamente tramite ispezione visiva dell'istogramma che rappresenta il numero di pixel e l'intensita' del segnale retrodiffuso (Figura 6).



Figura 6. Istogramma per la selezione della soglia SAR.



Figura 7. Immagine di segmentazione dell'acqua ottenuta con l'approccio SAR ed utilizzando immagini di Sentinel-1.

3. Validazione

I tre approcci sono stati validati utilizzando una strategia di "validazione statica", ossia considerando come area di validazione una zona in cui le variazioni del livello dell'acqua non influenzassero l'estensione della superficie d'acqua nel tempo: in questo modo la geometria che descrive il confine acqua/terra ha costituito un riferimento totalmente indipendente dalla stagionalita'. In particolare, i diversi approcci sono stati applicati all'area del porto di Marghera e si e' considerato il 2019 come anno di riferimento. I risultati dei tre approcci applicati su quest'area sono stati poi confrontati con uno shapefile di riferimento. Lo shapefile utilizzato e' relativo al Sito di Interesse Nazionale (SIN) di Marghera ed e' disponibile sul sito web del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica del Governo Italiano. Nell'area selezionata, i confini dell'acqua sono artificiali e quindi, in teoria, indipendenti dalla variazione del livello dell'acqua: questo ha consentito di confrontare le prestazioni dei tre approcci utilizzando immagini acquisite in epoche diverse. La maschera di riferimento e le maschere d'acqua generate con i tre approcci sono mostrate nella Figura 8.

Le Figure 8-b ed 8-e mostrano qualitativamente come l'approccio AWEI funzioni meglio rispetto agli altri. La Figura 8-c mostra invece che l'approccio basato su TSV genera un numero maggiore di falsi positivi rispetto all'approccio AWEI. Inoltre, l'approccio TSV non riesce a segmentare correttamente i pixel di terra situati sul confine terra-acqua, ma neanche quelli situati



Figura 8. Maschera di riferimento (a) e maschere d'acqua ottenute con il primo approccio applicato sulle immagini Sentinel (b) e sulle immagini Landsat (e), con il secondo approccio su Sentinel (c) e Landsat (f), e con il terzo approccio (d) (Porto di Marghera, gennaio-marzo 2019). Veri positivi in blu, veri negativi in verde, falsi positivi in rosso e falsi negativi in giallo.

molto all'interno. Il motivo di questi errori e' legato alla presenza di alcuni tetti nell'area di validazione: il loro colore rientra nell'intervallo di tonalita' di 0.25-0.95, ovvero nello stesso intervallo che e' stato impostato per classificare l'acqua in questo approccio. Per migliorare ulteriormente le prestazioni di questo metodo, una soluzione potrebbe essere quella di restringere l'intervallo di tonalita' o di selezionare un'area di validazione non urbana. La Figura 8-d evidenzia come l'approccio SAR presenti molti problemi di segmentazione e come quindi fornisca i risultati peggiori. In questo caso, il numero di pixel classificati come falsi negativi e' maggiore, cioe' molti pixel d'acqua vengono classificati come pixel di terra. Infine, continuando ad analizzare la Figura 8-d, e' possibile notare come alcuni pixel situati nell'entroterra siano stati classificati come falsi positivi: in realta' pero' in questa porzione l'algoritmo funziona correttamente, bens'i e' il riferimento a non essere corretto. Quella zona e' infatti una piccola area umida che nella maschera di riferimento e' stata erroneamente considerata come terra. Questo influisce anche sulle prestazioni del secondo metodo.

Per ciascun approccio, e' stata calcolata la matrice di confusione,

utilizzando sia le collezioni di Sentinel che quelle di Landsat, per indagare le prestazioni degli approcci esaminati. Sono state calcolate le seguenti metriche standard: Accuratezza (A), Intersection over Union (IoU), Precisione (P), Sensibilita` (R) e F1 score (F1). I risultati sono presentati nelle Tabelle 2, 3, 4, 5 e 6.

Temporal range	Images	A	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	12	0.98	0.92	0.97	0.94	0.96
Q2 2019	7	0.98	0.90	0.99	0.91	0.95
Q3 2019	9	0.98	0.91	0.99	0.92	0.95
O4 2019	8	0.98	0.89	0.95	0.94	0.94

Tabella 2. Metriche relative all'approccio AWEI ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Sentinel-2).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	15	0.98	0.92	0.98	0.94	0.96
Q2 2019	13	0.98	0.90	0.97	0.93	0.95
Q3 2019	17	0.98	0.91	0.98	0.93	0.95
Q4 2019	10	0.98	0.89	0.95	0.94	0.94

Tabella 3. Metriche relative all'approccio AWEI ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Landsat-8).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	12	0.97	0.86	0.86	0.97	0.92
Q2 2019	7	0.97	0.84	0.86	0.96	0.91
Q3 2019	9	0.96	0.82	0.85	0.97	0.90
Q4 2019	8	0.95	0.78	0.79	0.97	0.87

Tabella 4. Metriche relative all'approccio TSV ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Sentinel-2).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	15	0.97	0.87	0.91	0.96	0.93
Q2 2019	13	0.98	0.88	0.95	0.93	0.94
Q3 2019	17	0.98	0.89	0.95	0.93	0.94
Q4 2019	10	0.97	0.84	0.87	0.95	0.91

Tabella 5. Metriche relative all'approccio TSV ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Landsat-8).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	44	0.95	0.73	0.98	0.74	0.84
Q2 2019	46	0.95	0.71	0.98	0.72	0.83
Q3 2019	47	0.95	0.72	0.98	0.73	0.84
Q4 2019	44	0.95	0.73	0.98	0.73	0.84

Tabella 6. Metriche relative all'approccio SAR ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Sentinel-1).

Le Tabelle 2, 4 e 6 dimostrano di nuovo che il primo approccio offre prestazioni migliori rispetto agli altri: tutte le metriche, tranne la sensibilita', sono superiori rispetto alle corrispondenti metriche degli altri approcci. In particolare, gli F1-score medi dei tre approcci applicati alle immagini di Sentinel-2 (primo e secondo approccio) e Sentinel-1 (terzo approccio) sono pari rispettivamente a 0.95, 0.90 e 0.84. Gli stessi valori di questa metrica per le immagini di Landsat sono 0.95 per il primo approccio e 0.93 per il secondo.

Inoltre, confrontando le variazioni degli F1-score relative ai sottoperiodi e per ciascun approccio (Tabelle 2, 4 e 6) e' possibile notare che i metodi AWEI e SAR sono meno influenzati dalla stagionalita' rispetto al metodo TSV. Questo comportamento puo' essere correlato alle diverse condizioni di illuminazione che caratterizzano le immagini mediane durante l'inverno e l'estate. Infatti, il metodo basato su TSV segmenta i pixel dell'acqua in base a un intervallo di tonalita': le variazioni nelle condizioni di luminosita' causano un cambiamento nei valori di tonalita', influenzando quindi le prestazioni di questo approccio. Le differenze tra le stagioni possono essere apprezzate visivamente

nella Figura 9, in cui le aree cerchiate in nero evidenziano i pixel che vengono erroneamente classificati come falsi positivi nel periodo estivo (a destra) mentre vengono correttamente classificati nel periodo invernale (a sinistra).



Figura 9. Risultati del confronto tra gennaio-marzo 2019 (sinistra) e luglio-settembre 2019 (destra) per il secondo approccio.

Infine, la Tabella 6 mette in evidenza come il numero di immagini SAR disponibili per ciascun periodo sia superiore al numero di immagini multispettrali. Cio' e' dovuto a due motivi: in primo luogo, l'area di Marghera si trova in una zona di intersezione di diverse orbite del satellite Sentinel-1, sia ascendenti che discendenti; in secondo luogo, le immagini SAR non sono influenzate dalle nuvole, quindi non e' stato applicato alcun filtro per rimuovere le immagini.

4. Casi studio

Il miglior metodo (cioe` l'approccio AWEI) e` stato applicato a tre casi di studio in cui gli effetti della siccita` del 2022 sono stati particolarmente significativi. Per ragioni di sintesi, di seguito vengono mostrati solo i risultati ottenuti utilizzando le immagini Sentinel-2.

4.1 Lago Sawa

Il lago Sawa e' un lago endoreico (lungo 4,5 km e largo 1,8 km) situato nel sud dell'Iraq nella provincia di Muthanna, vicino al fiume Eufrate. Il livello dell'acqua nel lago solitamente subiva oscillazioni tra la stagione secca e quella umida ma, nonostante fosse situato in una regione arida, non si era mai prosciugato del tutto grazie all'equilibrio tra evaporazione e apporto d'acqua tramite precipitazioni e falde sotterranee (Service, 2015). Tuttavia, negli ultimi dieci anni, il lago ha iniziato a degradarsi a causa della mancanza di manutenzione delle infrastrutture idriche e della costruzione di dighe nei paesi a monte, le quali hanno ridotto il flusso dei fiumi Tigri ed Eufrate (Radeef and Abdulameer, 2023). Nel 2022 il lago Sawa e' stato inoltre gravemente colpito dalla crisi idrica causata dal cambiamento climatico, che ha portato a precipitazioni scarse e siccita': questo evento siccitoso ha portato alla completa scomparsa del lago stesso (Copernicus, 2022). Questo effetto puo' essere apprezzato nella Figura 10, dove si confronta l'immagine mediana ottenuta per il periodo gennaio-marzo 2020 con quella corrispondente del 2022.

L'applicazione del metodo AWEI a questo lago ha restituito le maschere d'acqua mostrate in Figura 11.

Da queste maschere e' stata estratta la superficie classificata come acqua in modo da riuscire a quantificarne la variazione: l'area e' diminunita passando da 3.90 km² nel 2020 a 0.39 km² nel 2022.



Figura 10. Immagine mediana (Sentinel-2) del lago Sawa ottenuta per il periodo gennaio-marzo 2020 (sinistra) e gennaio-marzo 2022 (destra).



Figura 11. Maschera d'acqua del lago Sawa ottenuta per il periodo gennaio-marzo 2020 (sinistra) e gennaio-marzo 2022 (destra).

4.2 Lago Poyang

Il lago Poyang si trova a Jiujiang, nella provincia di Jiangxi, in Cina, ed e' il piu' grande lago d'acqua dolce della Cina. Il lago e' alimentato dai fiumi Gan, Xin e Xiu, che si collegano al fiume Yangtze attraverso uno stretto canale. Il lago Poyang subisce variazioni periodiche delle proprie dimensioni tra la stagione invernale e quella estiva: in inverno, i livelli d'acqua nel lago sono tipicamente bassi, mentre in estate aumentano significativamente grazie alle piogge estive. Tuttavia, negli ultimi anni, le dimensioni del lago si sono ridotte complessivamente. Durante l'estate del 2022, il bacino del fiume Yangtze e' stato colpito dalla siccita', e quindi il lago Poyang si e' prosciugato rapidamente raggiungendo livelli d'acqua che non si vedevano da decenni. In particolare, il 23 giugno, la stazione di Xingzi ha registrato i livelli d'acqua piu` alti dell'anno sul lago Poyang; in seguito pero', il Centro di Monitoraggio Idrologico di Jiangxi ha iniziato a registrare temperature elevate e mancanza di piogge (NASA, 2022). Il 6 agosto, i livelli dell'acqua erano scesi a 11.99 metri ed il Centro ha identificato questa data come l'inizio della stagione di prosciugamento del lago: i livelli dell'acqua sono continuati a diminuire, registrando 8.96 metri il 30 agosto.

In questo caso, il confronto e' stato effettuato tra la primavera 2022 (ovvero l'immagine mediana ottenuta per il periodo aprile-giugno 2022) e l'estate 2022 (ovvero l'immagine mediana ottenuta per il periodo luglio-settembre 2022). Le immagini mediane illustrate nella Figura 12 mostrano la tendenza descritta in precedenza, che viene confermata dalle misure dell'area: dalle maschere rappresentate nella Figura 13 e' stata ottenuta un'area pari a 2281.48 km² per la primavera 2022 ed un'area pari a 1054.61 km² per l'estate 2022.

4.3 Fiume Po

Il fiume Po e` il fiume piu` lungo d'Italia (652 km), si trova nel Nord del Paese e scorre da est a ovest attraversando citta` italiane molte importanti. La vasta pianura attorno al Po e` chiamata Pianura Padana: circa 20 milioni di persone vivono l`1 (un terzo



Figura 12. Immagine mediana (Sentinel-2) del lago Poyang ottenuta per il periodo aprile-giugno 2022 (sinistra) e luglio-settembre 2022 (destra).



Figura 13. Maschera d'acqua del lago Poyang ottenuta per il periodo aprile-giugno 2022 (sinistra) e luglio-settembre 2022 (destra).

della popolazione italiana) e rappresenta la principale area industriale nonche' la piu` grande area agricola del Paese, tanto da essere responsabile del 35% della produzione agricola italiana (Borz`ı et al., 2021). Inoltre, l'acqua del fiume Po e` essenziale per la produzione di energia: il suo flusso e` controllato da numerose dighe che funzionano come centrali idroelettriche e diverse centrali termoelettriche utilizzano l'acqua del bacino del Po come refrigerante.

Durante il 2022, a causa dell'intensa siccita`, il livello dell'acqua del fiume ha raggiunto il minimo storico nelle sezioni principali ed il flusso di portata ha toccato il suo minimo storico (Po River Basin District Authority, 2022). L'analisi e` stata effettuata confrontando la primavera 2020 e la primavera 2022 in una porzione di 50 km del fiume Po situata vicino a Piacenza. I risultati sono mostrati nelle Figure 14 e 15, dove e` possibile osservare una riduzione della superficie da 14.72 km² a 11.22 km², ovvero la superficie e` diminuita di circa il 25% in soli due anni.



Figura 14. Immagine mediana (Sentinel-2) del fiume Po ottenuta per il periodo aprile-giugno 2020 (sopra) e aprile giugno 2022 (sotto).

5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questo lavoro consisteva nel gettare le basi per lo sviluppo di una metodologia per il monitoraggio continuo dei bacini idrici attraverso l'analisi di immagini satellitari multispettrali e SAR. Il principale obiettivo era quello di implementare una strategia di segmentazione in grado di distinguere



Figura 15. Maschera d'acqua del fiume Po ottenuta per il periodo aprile-giugno 2020 (sopra) e aprile-giugno 2022 (sotto).

l'acqua dalla superficie terrestre circostante e, quindi, misurare l'estensione planimetrica dei bacini idrici partendo dall'area occupata dai pixel d'acqua identificati nelle maschere. In particolare, sono stati implementati tre diverse approcci tramite Google Earth Engine ed applicati alle immagini di Sentinel-1 Sentinel-2 e Landsat-8.

Il primo approccio si basa sull'utilizzo dell'indice AWEI (Automatic Water Extraction Index) e sul metodo di thresholding di Otsu; il secondo approccio si basa sulla conversione dell'immagine da RGB (Rosso-Verde-Blu) a TSV (Tonalita', Saturazione, Valore) e sull'uso di una soglia parametrica; il terzo approccio si basa sull'uso di immagini SAR e su una soglia selezionata empiricamente.

È stata interamente sviluppata una strategia di "validazione statica" e sono state calcolate metriche standard per valutare l'accuratezza dei tre approcci di segmentazione. I valori medi degli F1-score ottenuti per i tre approcci sulle immagini Sentinel erano rispettivamente pari a 0.95, 0.90 e 0.84. La stessa metrica sulle immagini Landsat era 0.95 per il primo approccio e 0.93 per il secondo. Il miglior approccio (quello basato sull'AWEI) e stato poi applicato a tre corpi idrici in cui gli effetti della siccita` del 2022 sono stati particolarmente significativi: il lago Sawa (Iraq), il lago Poyang (Cina) ed il fiume Po (Italia). I risultati hanno evidenziato buone prestazioni dell'approccio nel segmentare i corpi idrici dalle aree terrestri circostanti. Tuttavia, un adeguato monitoraggio dei bacini idrici non include solo la stima dell'estensione della loro superficie, ma anche la quantificazione del loro volume. In questo articolo e' stata esplorata solo la stima dell'estensione in quanto il calcolo continuo di metriche 2D rappresenta un primo passo verso il monitoraggio delle variazioni stagionali e annuali dei bacini idrici: questo consente infatti di ricostruire le dinamiche delle acque superficiali a lungo termine.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, la validazione verra' estesa ad altre aree. In questo lavoro, la validazione e' stata effettuata nel Sito di Interesse Nazionale del porto di Marghera, e questa scelta ha introdotto errori aggiuntivi nella fase di validazione stessa a causa della presenza nell'area di edifici e vegetazione. Inoltre, e' stata selezionata l'area del porto perche' in questa zona la superficie d'acqua rimane costante nel tempo. La generazione di un dataset a partire da immagini satellitari ad alta risoluzione consentira' di validare la metodologia anche su riferimenti dinamici, aumentando la generalizzazione della metodologia. Inoltre, la generazione del dataset potrebbe aprire la strada all'utilizzo di approcci data-driven, come algoritmi di deep learning. Per quanto riguarda i risultati SAR, sviluppi futuri indagheranno un metodo di selezione delle soglie basato su approcci automatici (ad esempio, il metodo di thresholding di Otsu) al posto delle soglie parametriche utilizzate finora. Infine, verra' esaminato come poter combinare i tre approcci testati per poter migliorare i risultati.

Riconoscimenti

Questo progetto ha ricevuto finanziamenti dalla European High-Performance Computing Joint Undertaking (JU) nell'am- bito dell'accordo di sovvenzione n. 951745. La JU riceve supporto dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione Europea Horizon 2020 e dai paesi Germania, Italia, Slovenia, Francia e Spagna.

Bibliografia

Borz'ı, I., Monteleone, B., Bonaccorso, B., Martina, M., 2021. Estimating the economic impacts of drought on agriculture th- rough models and surveys in the Po river basin (Northern Italy). EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU21–12066.

Copernicus, 2022. Al Sawa Lake has completely dried up — Copernicus — copernicus.eu. www.copernicus.eu/ en/media/imageday-gallery/al-sawa-lake-has- completely-dried. [Accessed 08 February 2023].

Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E., Van de Giesen, N., 2016. A 30 m resolution surface water ma- sk including estimation of positional and thematic differences using landsat 8, srtm and openstreetmap: a case study in the Murray-Darling Basin, Australia. Remote Sensing, 8(5), 386.

Donchyts, G., Winsemius, H., Baart, F., Dahm, R., Schel- lekens, J., Gorelick, N., Iceland, C., Schmeier, S., 2022. High-resolution surface water dynamics in Earth's small and medium-sized reservoirs. Scientific reports, 12(1), 1–13.

ESA, 2022. Cloud Masks. https://sentinel.esa. int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2- msi/level-1c/cloud-masks.

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., Proud, S. R., 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for sur- face water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, 23–35. Geohackweek, 2016. SAR water body classification. https://mbonnema.github.io/GoogleEarthEngine/07- SAR-Water-Classification/.

Google Earth Engine Data Catalog, 2022. Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. https: //developers.google.com/earth-engine/datasets/ catalog/COPERNICUS_S2_SR. [Accessed 28 February 2023].

Google Earth Engine Data Catalog, 2023a. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A — de- velopers.google.com. https://developers.google.com/ earth-

engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED. [Accessed 28 February 2023].

Google Earth Engine Data Catalog, 2023b. Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling developers.google.com. https://developers.google.com/earth-engine/ datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD. [Accessed 28 February 2023]. Google Earth Engine Data Catalog, 2023c. USGS Landsat 8 Le-vel 2, Collection 2, Tier 1 — developers.google.com. https: //developers.google.com/earth-engine/datasets/ catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2#description. [Accessed 28 Febbraio 2023]. Google Earth Engine Documentation, 2023. Reducer Overview.https://developers.google.com/earthengine/guides/reducers_intro. [Accessed 28 February 2023].

Hamoudzadeh, A., Ravanelli R., Crespi M., 2023. GEDI da- ta within Google Earth Engine: preliminary analysis of a re- source for inland surface water monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* In press.

Kavvada, A., Metternicht, G., Kerblat, F., Mudau, N., Hal- dorson, M., Laldaparsad, S., Friedl, L., Held, A., Chuvie- co, E., 2020. Towards delivering on the Sustainable Deve- lopment Goals using Earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 247.

NASA, 2022. Parched Poyang Lake — earthobservatory.nasa.gov. https://earthobservatory.nasa.gov/ images/150285/parched-poyang-lake. [Accessed 28 February 2023]..

Otsu, N., 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62-66.

Po River Basin District Authority, 2022. Report of 22 July 2022 -Po River. *Permanent observatory on water uses in the hydrographic district of the river Po.*

Radeef, H. A., Abdulameer, I. M.-A., 2023. The Wa-ter

Area of Sawa Lake as Derived from Land Surface Temperature and Remote Sensing Data. *Ibn AL-Haitham Journal For Pure and Applied Sciences*, 36(1), 100–112. https://doi.org/10.30526/36.1.2873.

Ravanelli, R., Mazzucchelli, P., Belloni, V., Bocchino, F., Mor-selli, L., Fiorino, A., Gerace, F., Crespi, M., 2023. Earth Ob- servation Big Data exploitation for water reservoirs continuous monitoring: the potential of Sentinel-2 data and HPC. C. Iera- citano, N. Mammone, M. Di Clemente, M. Mahmud, R. Fur- faro, F. C. Morabito (eds), *The Use of Artificial Intelligence for Space Applications: Workshop at the 2022 International Conference on Applied Intelligence and Informatics*, Studies in Computational Intelligence. In press.

Sengupta, D., Chen, R., Meadows, M. E., Banerjee, A., 2020. Gaining or losing ground? Tracking Asia's hunger for 'new' coastal land in the era of sea level rise. *Science of The Total Environment*, 732, 139290.

Service, R. S. I., 2015. Sawa Lake — Ramsar Sites Information Service — rsis.ramsar.org. https://rsis.ramsar.org/ris/ 2240. [Accessed 28 Febbraio 2023].

Tong, X., Pan, H., Xie, H., Xu, X., Li, F., Chen, L., Luo, X., Liu, S., Chen, P., Jin, Y., 2016. Estimating water volume variations in Lake Victoria over the past 22years using multi- mission altimetry and remotely sensed images. *Remote Sensing of Environment*, 187, 400-413.

Valada^o, L. V., Cicerelli, R. E., de Almeida, T., Ma, J. B. C., Garnier, J., 2021. Reservoir metrics estimated by remote sen- sors based on the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24(100652).

QUANTIFICAZIONE DELL'UMIDITA' SUPERFICIALE DEL SUOLO IN AREE AGRICOLE SOGGETTE AD ELEVATA VULNERABILITA' CLIMATICA MEDIANTE DATI SENTINEL-1: IL CASO STUDIO DELLA REGIONE MARCHE (ITALIA)

B. Brunelli ^{a,b}

^a Università la Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, via Eudossiana, 18, 00184 Roma RO, Italia, <u>benedetta.brunelli@uniroma1.it</u> ^b Università di Modena e Reggio Emilia (UNIMORE), Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", via P. Vivarelli, 10, 41125 Modena MO, Italia, <u>benedetta.brunelli@unimore.it</u>

Parole chiave: Umidità superficiale del suolo, Sentinel-1, Sentinel-2, Google Earth Engine, Modello mutlitemporale Tu Wien

Keywords: Superficial soil moisture, Sentinel-1, Sentinel-2, Google Earth Engine, Tu Wien change detection model

Abstract

La diminuzione dell'umidità del suolo nella regione Mediterranea, registrata a partire dagli anni '50 e prevista per i prossimi decenni, minaccia il rendimento delle colture e la salute degli ecosistemi. Le tecniche di telerilevamento radar, sfruttando la correlazione tra l'acqua liquida e le proprietà dielettriche del suolo, sono divenute uno strumento chiave per la salvaguardia delle risorse idriche e lo sviluppo di un'agricoltura sostenibile. In questo studio, è stato sviluppato un flusso di lavoro in Google Earth Engine per quantificare l'umidità superficiale del suolo nelle aree agricole della regione Marche (Italia) attraverso dati radar ad apertura sintetica (SAR). In primo luogo, tali aree sono state identificate tramite dati ottici Sentinel-2 e dati radar Sentinel-1, studiando l'uso delle bande di decomposizione (entropia e α) per migliorare l'accuratezza della classificazione. I risultati mostrano che quest'ultime migliorano l'indice kappa ottenuto tramite dati radar del 4% (K=0,818), superando la precisione ottica nelle aree urbane e di acqua. Tuttavia, non consentono di raggiungere un'accuratezza pari a quella delle bande ottiche (K=0,927). I migliori risultati sono stati ottenuti con l'integrazione di bande ottiche, radar e della decomposizione (K=0,949). Successivamente, due modelli per l'inversione dell'umidità del suolo (Water Cloud Model e Tu Wien) sono stati implementati sulle aree coltivate, utilizzando parametri di calibrazione derivati da letteratura, e validati tramite misurazioni *in situ* dell'Internationa Soil Moisture Network (ISMN). Il Water Cloud Model ha ottenuto un RMSD=12,3, mentre il modello multitemporale Tu Wien un RMSD=9,4.

Surface soil moisture is a key hydrologic state variable that greatly influences the global environment and human society. Its significant decrease in the Mediterranean region, registered since the 1950s, and expected to continue in the next century, threatens soil health and crops. Microwave remote sensing techniques are becoming a key tool for the implementation of climate-smart agriculture, as a means for surface soil moisture retrieval that exploits the correlation between liquid water and the dielectric properties of soil. In this study, a workflow in Google Earth Engine was developed to estimate surface soil moisture in the agricultural fields of the Marche region (Italy) through Synthetic Aperture Radar data. Firstly, agricultural areas were extracted with both Sentinel-2 optical and Sentinel-1 radar satellites, investigating the use of Dual-Polarimetric Entropy-Alpha decomposition's bands to improve the accuracy of radar data classification. The results show that Entropy and Alpha bands improve the kappa index obtained from the radar data only by 4% (K=0.818), exceeding optical accuracy in urban and water areas. However, they still did not allow to reach the overall optical accuracy (K=0.927). The best classification results are reached with the total dataset (K=0.949). Subsequently, Water Cloud and Tu Wien models were implemented on the crop areas using calibration parameters derived from literature, to test if an acceptable accuracy is reached without in situ observation. While the first model's accuracy was inadequate (RMSD=12.3), the extraction of surface soil moisture using Tu Wien change detection method was found to have acceptable accuracy (RMSD=9.4).

Introduzione

L'umidità superficiale del suolo, Surface Soil Moisture (SSM), influenza in maniera determinante gli scambi di calore e acqua tra la superficie terrestre e l'atmosfera, la frequenza e l'intensità di fenomeni siccitosi (Long et al., 2019), la previsione delle ondate di calore (Fischer et al., 2003) e la perdita di suolo dovuta all'erosione idrica (Todisco et al., 2015). Nei terreni agricoli condiziona il rendimento dei raccolti, controlla il deflusso idrico e la diversità negli ecosistemi (Robinson et al., 2008). Il cambiamento climatico sta modificando la variabilità dell'umidità del suolo e i suoi feedback con precipitazioni e temperatura; in particolare, è stata registrata una diminuzione significativa a partire dagli anni '50 nella regione del Mediterraneo (Kurnik et al., 2015; EEA, 2017). Entro la fine di questo secolo, si prevede un ulteriore calo del 20% (Mariotti et al., 2008), a causa della tendenza all'aumento delle temperature. con conseguenti tassi di evapotraspirazione più elevati, e dei cambiamenti nella distribuzione e nell'intensità delle precipitazioni (EEA, 2017). Il monitoraggio ad alta risoluzione temporale e spaziale di questo parametro risulta quindi essenziale per salvaguardare il suolo e le risorse idriche, sviluppando sistemi colturali sostenibili, e determinando positivamente l'adattabilità ai nuovi scenari climatici (Lewis, 2019). Questo tipo di monitoraggio trova applicazione nella programmazione dell'irrigazione, allo scopo di ridurre lo stress delle piante e migliorare la resa delle colture (Pradhan et al., 2018), e può incoraggiare, nelle aree in cui è ambientalmente sostenibile, la diversificazione degli orientamenti produttivi (Zucaro et al., 2009).

Le misurazioni di umidità *in situ* forniscono dati puntuali che non sono sufficienti a caratterizzarne l'ampia variabilità spaziale e temporale (Panciera & Monerris, 2013). D'altra parte, le tecniche di telerilevamento nelle bande delle microonde ne consentono la stima su ampia scala ed in maniera continuativa, sia con radiometri passivi (Mohanty et al., 2017) che con sensori attivi, ossia radar (Hornacek et al., 2012, Bauer-Marshallinger et al., 2019). Queste misurazioni sfruttano la correlazione tra l'acqua liquida e le proprietà dielettriche del suolo, che influenzano l'interazione tra la radiazione elettromagnetica e il target (Woodhouse, 2017).

Molti satelliti passivi, come l'AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) e SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Fang et al., 2019), forniscono da decenni dati radiometrici che non risultano tuttavia adatti per il monitoraggio agricolo a causa della loro bassa risoluzione. D'altra parte, la strumentazione radar ad apertura sintetica (SAR) fornisce dati a risoluzione più elevata, misurando il coefficiente di retrodiffusione, σ^0 , definito come il rapporto tra l'intensità del segnale incidente e quello ricevuto (Pulvirenti et al., 2018; Mayer, 2019), il quale è sensibile alle variazioni della costante dielettrica e, quindi, al contenuto di acqua del suolo. Tuttavia, l'effetto della rugosità superficiale e della vegetazione, sovrapposti al contributo delle proprietà dielettriche, rendono il processo di inversione complesso da parametrizzare (Bindlish et al., 2002). I numerosi modelli implementati a tale scopo possono essere suddivisi in due approcci principali: algoritmi snapshot e algoritmi multi-temporali. I modelli snapshot sono solitamente raggruppati in teorici (Fung & Chen, 1992; Hajnsek et al., 2003); empirici (Oh et al.,1992; Zribi & Dechambre, 2003), che comprendono anche l'addestramento di reti neurali artificiali (Ge et al., 2018); e semi-empirici (Panciera & Monerris, 2013). Tra quest'ultimi, il Water Cloud Model (WCM) utilizza parametri di calibrazione per discriminare il contributo della vegetazione da quello del suolo, dal quale stima l'umidità ipotizzandone una correlazione lineare con la costante dielettrica (Baghdadi et al., 2006). D'altra parte, gli approcci multi-temporali si avvalgono di molteplici acquisizioni per ridurre al minimo l'effetto della vegetazione e della rugosità, e sono generalmente utilizzati per la produzione di mappe di umidità del suolo a vasta scala (Bhogapurapu et al., 2022; Bauer-Marshallinger et al., 2018). Tra questi, il modello multi-temporale Tu Wien, originariamente sviluppato per i dati ASCAT, è stato modificato in base alle caratteristiche dei dati SAR di Sentinel-1 da Bauer-Marshallinger et al. (2018), impiegando l'alta risoluzione temporale delle serie temporali acquisite dalla costellazione europea. Tramite il Tu Wien vengono ottenute giornalmente delle Copernicus Global Land Service delle mappe di umidità con griglia regolare ad 1km. Ad eccezione di questo dato, ancora poco risoluto per essere impiegato a scopi agricoli, non sono ad oggi disponibili mappe di umidità ad ampia scala, uniformi dal punto di vista dell'accuratezza e del tempo di ritorno.

Per quanto riguarda la penisola italiana, alcuni lavori hanno studiato l'applicazione di modelli e le variazioni di umidità in aree particolarmente vulnerabili a siccità e desertificazione. Ad esempio, in Sardegna Filion et al., 2016 ha stimato l'umidità in suoli nudi tramite dati Envisat ASAR, RADARSAT-2 e LANDSAT; più recentemente, Montaldo et al. (2021) ha testato il modello semi-empirico di Dubois e il modello fisico di Fung su dati Sentinel-1 in aree coperte da vegetazione.

Lo sviluppo di una procedura di quantificazione dell'umidità in aree agricole a scala nazionale, ad alta risoluzione e ad intervalli temporali regolari, risulta quindi un tema aperto, d'interesse applicativo oltre che scientifico.

A tale scopo, in questo studio si propone un flusso di lavoro standardizzato nella piattaforma di cloud computing Google Earth Engine (GEE) per individuare le aree agricole e quantificarne le variazioni di umidità a 20m di risoluzione. La metodologia è stata testata nella regione Marche, valutata come altamente vulnerabile alle variazioni climatiche, soprattutto per quanto riguarda la produttività agricola (Shukla et al., 2019), e inclusa nell'Atlante Nazionale delle aree a rischio desertificazione dal 2007 (Costantini et al., 2007). In primo luogo, le aree agricole sono individuate tramite classificazione supervisionata Random Forest, utilizzando dati ottici (Sentinel-2), radar (Sentinel-1) e i parametri di entropia e α , derivanti dalla decomposizione polarimetrica delle immagini S-1. Successivamente, la stima dell'SSM è stata realizzata tramite il modello semi-empirico WCM e il modello multi-temporale Tu Wien, entrambi calibrati utilizzando parametri derivanti da letteratura. La validazione dei modelli è stata realizzata tramite dati in situ acquisiti nell'ambito dell'International Soil Moisture Network (ISMN) dalla rete di sensori "HYDROL-NET_PERUGIA".

- Gli obbiettivi del lavoro sono:
- indagare l'utilizzo delle bande della decomposizione polarimetrica, entropia e α , per migliorare la performance della classificazione radar della copertura del suolo (Banque et al., 2015), considerando che questa raggiunge solitamente un'accuratezza inferiore rispetto a quella ottenibile con i dati ottici (Steinhausen et al., 2018, Carrasco et al., 2019);
- implementare in GEE i modelli Tu Wien e Water Cloud Model (WCM) e confrontarne le stime e l'accuratezza in relazione alle misurazioni *in situ*.

1. Materiali e metodi

1.1 Area di studio

L'area di studio comprende la regione delle Marche, estesa per 9,694,51 km^2 nell'Italia centro-settentrionale e affacciata sul Mar Adriatico (Fig.1a). Il fiume Foglia e il fiume Tronto delimitano indicativamente i confini settentrionali e meridionali della regione, mentre l'Appennino e il Mare Adriatico ne segnano i limiti occidentali e orientali (Fig.1b). Il territorio regionale è caratterizzato da una morfologia collinare che degrada verso il mare, in cui la costa rappresenta l'unica zona pianeggiante. I fiumi marchigiani attraversano la regione da ovest a est, producendo solchi vallivi che gradualmente si allargano in prossimità della foce, formando una caratteristica struttura a pettine. Nonostante la rapida espansione delle aree urbanizzate o occupate da infrastrutture, soprattutto nella zona costiera (Appiotti et al., 2014), la regione Marche rimane in gran parte rurale (Istat, 2013), poiché la Superficie Totale Agricola (TFA) e la Superficie Agricola Utilizzata (SAU) coprono il 76,5% del territorio e le superfici agricole sono ampiamente distribuite su tutto il territorio regionale (Istat, 2013). Quasi l'80% della SAU è coltivata a seminativi, poco meno di 375mila ettari (Istat, 2013), e il cereale più coltivato è il grano duro.

1.2 Dataset

Il dataset comprende serie temporale di immagini Sentinel-1(S1) e Sentinel-2 (S2) dal 2016 al 2020. Tutti i dati sono georeferenziati nel sistema di riferimento cartografico predefinito di GEE, ossia WGS84/Pseudo-Mercator (EPSG: 3857). La missione Sentinel-1 comprende una costellazione di due satelliti in orbita polare, entrambi dotati di uno strumento SAR a banda C e doppia polarizzazione, con un periodo di rivisitazione di 12 giorni (Torres et al., 2012). Sono stati utilizzati i dati S1A e S1B, acquisiti in modalità Interferometric Wide Swath (IW), quindi con uno swath di 250 km, risoluzione spaziale di 5 x 20 m e un angolo di incidenza, θ_i , che varia tra 29,1° e 46,0°.



Figura 1. Area di studio. a) la regione Marche e le sue provincie b) DTM e principali corsi d'acqua (Reference system: WGS84/Pseudo-Mercator, EPSG: 3857)

Sono stati combinati due livelli di processamento distinti: le immagini Ground Range Detected (GRD), già implementate in GEE, sono state utilizzate per identificare il coefficiente di retrodiffusione; quelle Single Look Complex (SLC), scaricate dall'Alaska Satellite Facility (<u>https://asf.alaska.edu/</u>), sono state utilizzate per calcolare i parametri di entropia e α attraverso la decomposizione polarimetrica, in quanto mantengono la necessaria informazione di fase interferometrica. Orbite ascendenti (path 44 e 177) e discendenti (path 22 e 95) sono state processate separatamente.

Sentinel-2 è una missione ottica composta da due satelliti gemelli in posti in un'orbita quasi-polare, che trasportano uno strumento multispettrale (MSI), i quali acquisiscono passivamente in 13 bande con una risoluzione spaziale di 60m (banda dell'aerosol), 10m (bande nel visibile) e 20m (bande nell'infrarosso).

1.3 Procedura

La Figura 2 mostra l'intera procedura applicata. Ciascuna scena S1 e S2 è stata pre-processata (applicando il Refined Lee Filter per lo speckle e un modello di correzione radiometrica e geometrica) e utilizzata per estrarre le aree agricole della regione Marche attraverso una classificazione supervisionata della Random Forest. Successivamente, Tu Wien e il Water Cloud Model sono stati implementati nella piattaforma di cloud computing GEE e validati utilizzando misurazioni *in situ* effettuate da due stazioni ISMN (International Soil Moisture Network) in Umbria, nell'agosto 2015. Infine, le stime sono state applicate ad un'area agricola di 125 ettari, dove è stata analizzata la relazione tra le diverse coperture del suolo agricolo, l'umidità del suolo e le precipitazioni.

1.3.1 Decomposizione polarimetrica

La tecnica matematica della decomposizione polarimetrica si avvale della matrice di covarianza, indicata come $\langle C \rangle$, che esprime la polarizzazione di target naturali confrontando la intensità e fase dell'onda incidente con quella dell'onda retrodiffusa, in ciascun canale polarimetrico. Tale matrice viene calcolata in una "finestra" di pixel in dati SAR pienamente polarimetrici. $\langle C \rangle$ viene quindi decomposta tramite il metodo degli autovettori e autovalori, allo scopo di individuare matrici più semplici che esprimono la polarizzazione di elementi canonici (sfere, diedri, volumi), consentendo una più semplice interpretazione fisica del target (Haldar et al., 2019; Harfenmeister et al., 2021). Per una descrizione dettagliata del processo di decomposizione si rimanda a Ouarzeddine et al. (2009). In questo lavoro, è stata impiegata la tecnica della decomposizione ad autovettori e autovalori adattata, da Cloud and Pottier (1996), a dati acquisiti in doppia polarizzazione. L'analisi delle informazioni fisiche fornite dalla decomposizione può essere effettuata tramite tre parametri principali:

- l'entropia, H, che esprime il grado di disordine o casualità del meccanismo di retrodiffusione. H=1 indica la presenza di tre meccanismi di retrodiffusione (superficiale, volumetrico e diedrale) nella "finestra" considerata; d'altra parte, H=0 indica la presenza di un solo meccanismo, quindi di un target omogeneo;
- l'anisotropia, A, ossia la differenza normalizzata tra il secondo e il terzo autovettore, che esprime l'importanza del secondo meccanismo di retrodiffusione rispetto al terzo. Il suo comportamento è complementare a quello dell'entropia;
- l'angolo α , che esprime il meccanismo di retrodiffusione medio. Per dati a piena polarizzazione $\alpha \to 0$ indicata retrodiffusione di superficie; $\alpha \to \frac{\pi}{4}$ è associato a retrodiffusione volumetrica e $\alpha \to \frac{\pi}{2}$ indica retrodiffusione superficiale.

H, A e α sono stati calcolati in ciascuna scena SLC e iI risultati sono stati caricati in GEE in formato geoTIFF.

1.3.2 Estrazione delle aree agricole

Le classificazioni di uso /copertura del suolo sono state effettuate attraverso l'algoritmo supervisionato Random Forest (Criminisi et al., 2012) in GEE con 500 "alberi", testando diversi set di dati. Sono stati considerati anche il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e il Normalized Difference Build-up Index (NDBI). Le classi di uso del suolo considerate sono: foresta, suolo nudo, acqua, campi agricoli, aree urbane, vegetazione spontanea e neve. I dati di training sono stati aggiunte manualmente come poligoni sulla base della mappa ufficiale della copertura del suolo creata dalla regione Marche (2007). Tali dati rappresentano il 6,48% dei pixel totali, mentre quelli di validazione, estratti casualmente dai poligoni selezionati, sono l'1,62%.



Figura 2. Flusso di lavoro

1.3.4. Quantificazione dell'umidità superficiale del suolo

I modelli Tu Wien e Water Cloud sono stati implementati in GEE e applicati sulle aree agricole estratte tramite la classificazione della copertura del suolo.

Il modello multi-temporale Tu Wien si basa su due presupposti: i) la relazione tra il coefficiente di retrodiffusione, σ^0 , e il contenuto di umidità superficiale del suolo è lineare; ii) dato che la rugosità del suolo e la vegetazione cambiano gradualmente e lentamente nel tempo, si presume che qualsiasi variazione brusca di σ^0 , se considerata entro un intervallo di tempo appropriato, abbia origine da un cambiamento nell'umidità del suolo (Panciera & Monerris, 2013).

Per tenere conto della rugosità e della vegetazione, il valore di retrodiffusione minimo registrato nell'intervallo temporale per ciascun pixel, $\sigma_{dry}^0(\theta_{ref})$, che rappresenta la retrodiffusione in condizioni di terreno asciutto, viene sottratto dal valore di retrodiffusione effettivamente registrato $\sigma^0(\theta_{ref})$. θ_{ref} indica la normalizzazione ad un angolo d'incidenza medio. Pertanto, le variazioni relative dell'umidità del suolo $m_{r,t}$ vengono calcolate dividendo il risultato per la sensibilità, che è la differenza tra il valore massimo di retrodiffusione per ciascun pixel, $\sigma_{wet}^0(\theta_{ref})$, e $\sigma_{dry}^0(\theta_{ref})$ (eq. 1):

$$m_{r,t} = \frac{\sigma^0(\theta_{ref,t}) - \sigma^0_{dry}(\theta_{ref})}{\sigma^0_{wet}(\theta_{ref}) - \sigma^0_{dry}(\theta_{ref})} [\%]$$
(1)

Per rilevare la quantità di umidità volumetrica del suolo vengono quindi introdotti due parametri:

- il punto di avvizzimento (WP), impostato al valore del 9% di umidità volumetrica, assumendo che corrisponda al minimo valore del coefficiente di retrodiffusione rilevato durante l'intervallo di tempo, ossia σ⁰_{dry} (θ_{ref});
- il punto di saturazione (*SAT*), assumendo che corrisponda al valore massimo di retrodiffusione registrato nell'intervallo di tempo, $\sigma_{wet}^0(\theta_{ref})$. Il SAT è fissato al 30% di umidità, poiché σ^0 risulta insensibile ad aumenti oltre il 30-35% (Gao et al., 2017).

Quindi, l'umidità volumetrica del suolo viene calcolata con l'equazione 2:

$$m_{v,t} = m_{r,t} \cdot (SAT - WP) + WP[m^3m^3] \tag{2}$$

Per quanto riguarda il modello semi-empirico Water Cloud, sviluppato da Attema e Ulaby (1978), il coefficiente di retrodiffusione totale è definito come la combinazione di tre contributi (eq. 3):

$$\sigma^0 = \tau^2 \cdot \sigma^0_{soil} \cdot \sigma^0_{veg} [dB] \tag{3}$$

dove σ_{veg} (eq. 4) è il contributo della vegetazione, σ_{soil} (eq. 5) quello del suolo nudo, e τ^2 esprime l'attenuazione da parte dalla canopy (eq. 6) (Baghdadi et al., 2017).

$$\sigma_{veg} = A \cdot V \cdot \cos \cdot \theta \cdot (1 - \tau^2)[dB]$$
⁽⁴⁾

$$\sigma_{soil} = C + D \cdot m_{\nu}[dB] \tag{5}$$

$$\tau^{2} = \exp(-2B \cdot V \cdot \sec\theta)[dB] \tag{6}$$

V è un descrittore della vegetazione, $A \in B$ sono parametri del modello dipendenti dalla vegetazione e dalla configurazione del sensore radar, C è principalmente legato alla rugosità superficiale e D esprime la sensibilità della configurazione del radar all'umidità del suolo (Shamambo et al., 2019). In questo studio, l'NDVI (eq. 17) è utilizzato come descrittore della vegetazione.

$$V = NDVI = \frac{Nir - Red}{Nir + Red}$$
(7)

Altri parametri di calibrazione sono derivati da letteratura (Tabella 1).

A_{VV}	B_{VV}	C _{VV}	D_{VV}	V
0.0950	0.5513	37.237	2.39	NDVI
Baghdadi	et al., 2017	Esch,	2018	S2

Tabella 1. Parametri di calibrazione del Water Cloud Model

2. Risultati

2.1. Accuratezza della classificazione

Al fine di valutare il contributo delle bande di entropia e α , è stata effettuata un'analisi statistica preliminare (medie e deviazioni standard) per ciascuna classe di copertura del suolo (Fig.3).



Figura 3. A destra, i valori medi di entropia e α per ciascuna classe di uso del suolo. A sinistra, i valori medi di entropia e anisotropia. Le linee orizzontali e verticali rappresentano le rispettive deviazioni standard.

Successivamente, l'accuratezza della classificazione per ciascun set di bande è stata valutata utilizzando indici kappa e matrici di confusione. Le bande ottiche consentono di ottenere un indice kappa medio di 0,927 mentre quelle radar di 0,783. Entropia e α portano l'indice kappa a 0,948 per i dati ottici e a 0,818 per i dati radar. La combinazione di bande ottiche e radar risulta in un valore kappa medio di 0,942, che aumenta leggermente aggiungendo le bande polarimetriche, ottenendo quindi un indice kappa di 0,949 per l'intero set di dati.

La valutazione dell'importanza di ciascuno banda è stata realizzata in GEE: le bande ottiche contribuiscono in media per il 24,8%, NDVI e NDBI per il 26,5%, e VV e VH per il 24,8%; infine entropia e α contribuiscono per il 23,7% alla classificazione finale. Da quest'analisi è risultato che l'anisotropia non apporta un contributo significativo, per cui non è stata inclusa nel dataset.

Sebbene le bande derivanti dalla decomposizione contribuiscano in modo significativamente inferiore rispetto a qualsiasi altro set di dati, la Figura 5 mostra che possono migliorare notevolmente la classificazione radar, soprattutto nelle classi urbane, neve e acqua. L'accuratezza riportata è quella media calcolata su tutte le classificazioni (Carrasco et al., 2019).



Figura 5. Precisione ottenuta dai tre set di dati in ciascuna classe di copertura del suolo

La Figura 6 mostra un confronto tra le mappe ottenute dai diversi set di dati, mentre la Figura 7 mostra un dettaglio della classificazione ottenuta con l'insieme delle bande disponibili.



Figura 6. Confronto tra a) immagine Sentinel-2; b) classificazione del set di dati ottici; c) classificazione dei dati radar; d) classificazione totale del set totale di dati.



Forest Soil Water Agricoltural Urban Vegetation Snow

Figura 7. Confronto tra a) immagine di Google Earth: b) classificazione finale della copertura del suolo ottenuta dal set di bande totale, che ha mostrato l'accuratezza migliore. Città di Pesaro e Fano (PU), settembre 2020. Orbita ascendente

2.2. Validazione dei modelli

I valori di umidità superficiale del suolo sono stati stimati con una risoluzione spaziale di 20 metri. La validazione dei due modelli applicati è stata effettuata utilizzando misurazioni in situ acquisite dall'International Soil Moisture Network (ISMN) nella regione Umbria (Italia), in due stazioni, WEEF 1 e WEEF 2, nell'agosto 2015. Sono stati utilizzati tre parametri (RMSD, Bias e ubRMSD). Entrambe le stazioni, appartenenti alla rete HYDROL-NET-PERUGIA, si trovavano in terreni agricoli aridi e hanno misurato l'umidità del suolo a tre livelli di profondità utilizzando un sensore TRASE-BE della TDR-Soil Moisture Equipment Corp. Considerando che il radar in banda C non può penetrare nel terreno più in profondità, sono stati utilizzati i dati acquisiti a 5 cm. La tabella 2 mostra i risultati della convalida.

	RMDS [%]	BIAS [%]	ubRMDS [%]
Tu Wien	9,409	0,193	9,407
Water Cloud	12,321	-0,583	12,307

Tabella 2 Risultati della validazione dei modelli di inversione dell'umidità del suolo

La principale limitazione relativa all'applicazione dei modelli è la complessità nel discriminare l'effetto della costante dielettrica da quello della rugosità del terreno che, specialmente a risoluzioni spaziali elevate, limita l'accuratezza dei modelli. La bassa accuratezza del WCM è inoltre dovuta alla mancanza di dati di calibrazione specifici per il tipo di coltura e sensore presi in considerazione.

4. Conclusioni

In questo lavoro è stato dimostrato che l'utilizzo combinato di dati radar e ottici, data la loro complementarità, può migliorare in maniera significativa i risultati della classificazione. L'uso delle bande di entropia e α può essere utile per integrare le bande radar, superando l'accuratezza dell'ottico nelle aree urbane e negli specchi d'acqua, pur rimanendo inferiore alla classificazione ottica complessiva.

L'individuazione delle diverse tipologie di copertura di suolo è un aspetto preliminare per l'estrazione di informazioni geofisiche e biofisiche da dati SAR. In questo studio, i risultati della classificazione sono stati impiegati per isolare le aree agricole, sulle quali è stata quindi effettuata la stima dell'umidità del suolo. Allo scopo, due algoritmi sono stati implementati in GEE e validati tramite misurazioni in situ. Il modello Tu Wien ha dimostrato un'accuratezza più elevata rispetto al WCM, con un RMDS pari al 9,4%.

Utilizzando l'approccio multi-temporale, la procedura proposta in questo lavoro potrà essere ulteriormente sviluppata e testata in altre aree, data la necessità di monitorare il parametro dell'umidità del suolo in maniera omogenea, ad alta risoluzione spaziale e ad intervalli temporali regolari. Tale monitoraggio risulta prezioso per lo sviluppo di pratiche agricole intelligenti, come la pianificazione dell'irrigazione, e il monitoraggio della siccità.

Conflitti di interessi: L'autore dichiara di non avere conflitti di interesse da riportare

Nota: Il lavoro presentato è la traduzione in italiano dell'articolo: Brunelli, B., De Giglio, M., Magnani, E., Dubbini, M., 2023. Surface soil moisture estimate from Sentinel-1 and Sentinel-2 data in agricultural fields in areas of high vulnerability to climate variations: the marche region (Italy) case study. Environment, Development and Sustainability, 1-23.

Bibliografia

Appiotti, F., Krželj, M., Russo, A., Ferretti, M., Bastianini, M., & Marincioni, F. (2014). A multidisciplinary study on the effects of climate change in the northern adriatic sea and the marche region (central italy). *Regional environmental change*, 14(5), 2007– 2024. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0451-5 https://doi.org/10.1007/s10113-013-0451-5

Arzeni, A. (2003). Il territorio rurale e le politiche agricole nelle marche. Osservazioni Analisi. Osservatorio Agroalimentare delle Marche.

Attema, E., & Ulaby, F. T. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio science*, 13(2), 357–364. <u>https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357</u>

Baghdadi, N., Holah, N., & Zribi, M., (2006). Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1907–1920. https://doi.org/10.1080/01431160500239032

Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., & Bousbih, S. (2017). Calibration of the water cloud model at c-band for winter crop fields and grasslands. Remote Sensing, 9(9), 969. https://doi.org/10.3390/rs9090969

Balenzano, A., Mattia, F., Satalino, G., & Davidson, M. W. (2010). Dense temporal series of C-and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2), 439-450. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2052916.

Banque, X., Lopez-Sanchez, J. M., Monells, D., Ballester, D., Duro, J., & Koudogbo, F. (2015). Polarimetry-based land cover classification with sentinel-1 data. Proc. of *POLINSAR*, 729, 1–5.

Bauer-Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schaufler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Brocca, L., & Wagner, W. (2019). Toward global soil moisture monitoring with Sentinel-1: Harnessing assets and overcoming obstacles. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *57*(1), 520–539. <u>https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2858004</u> 434

Bhogapurapu, N., Dey, S., Homayouni, S., Bhattacharya, A. & Rao, Y. (2022). Field-scale soil moisture estimation using sentinel-1 GRD SAR data. *Advances in Space Research*.

https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.019

Bindlish, R., & Barros, A. P. (2002). Subpixel variability of remotely sensed soil moisture: An inter-comparison study of SAR and ESTAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(2), 326-337. DOI: 10.1109/36.992792

Borrelli, P., Paustian, K., Panagos, P., Jones, A., Schütt, B., & Lugato, E. (2016). Effect of good agricultural and environmental conditions on erosion and soil organic carbon balance: a national case study. *Land use policy*, 50, 408-421. http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.033

Carrasco, L., O'Neil, A. W., Morton, R. D. & Rowland, C. S. (2019). Evaluating combinations of temporally aggregated Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 for land cover mapping with Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11 (3), 288. https://doi.org/10.3390/rs11030288 Cloude, S. R. & Pottier, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 34(2), 498-518. DOI: 10.1109/36.485127

Costantini, E. A., Urbano, F., Bonati, G., & Nino, P. (2007). *Atlante nazionale delle aree a rischio di desertificazione*. DOI: 10.13140/2.1.5124.0645

Criminisi, A., Shotton, J., & Konukoglu, E. (2012). Decision forests: A unified framework for classification, regression, density estimation, manifold learning and semi-supervised learning. *Foundations and trends*® *in computer graphics and vision*, 7(2–3), 81-227. http://dx.doi.org/10.1561/0600000035

EEA. (2017). European Environmental Agency. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report.

Esch, S. (2018). Determination of soil moisture and vegetation parameters from spaceborne c-band sar on agricultural areas. Universität zu Köln.

Fang, B., Lakshmi, V., Jackson, T. J., Bindlish, R., & Colliander, A. (2019). Passive/active microwave soil moisture change disaggregation using SMAPVEX12 data. *Journal of hydrology*, 574, 1085-1098. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.082

FAO. Climate-Smart Agriculture. Available online: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/on-the-ground/en/ (accessed on 21 March 2022).

Filion, R., Bernier, M., Paniconi, C., Chokmani, K., Melis, M., Soddu, A., ... & Lafortune, F. X. (2016). Remote sensing for mapping soil moisture and drainage potential in semi-arid regions: Applications to the Campidano plain of Sardinia, Italy. *Science of the Total environment*, 543, 862-876. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.068

Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., & Schär, C. (2007). Soil moisture–atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. Journal of Climate, 20(20), 5081-5099. DOI: <u>https://doi.org/10.1175/JCLI4288.1</u>

Fung, A. K., Li, Z., & Chen, K. S. (1992). Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 30(2), 356-369. DOI: 10.1109/36.134085

Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M. J., & Baghdadi, N. (2017). Synergetic use of sentinel-1 and sentinel-2 data for soil moisture mapping at 100 m resolution. *Sensors*, 17(9), 1966. <u>https://doi.org/10.3390/s17091966</u>

Hajnsek, I., Pottier, E. & Cloude, S. R. (2003). Inversion of surface parameters from polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (4), 727–744. DOI: 10.1109/TGRS.2003.810702 Hornacek, M., Wagner, W., Sabel, D., Truong, H. L., Snoeij, P., Hahmann, T., ... & Doubková, M. (2012). Potential for high resolution systematic global surface soil moisture retrieval via change detection using Sentinel-1. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1303-1311. DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2190136.

Istat. (2013). VI censimento generale dell'agricoltura. Istat

Kurnik, B., Kajfež-Bogataj, L., & Horion, S. (2015). An assessment of actual evapotranspiration and soil water deficit in agricultural regions in Europe. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2451-2471. https://doi.org/10.1002/joc.4154

Lewis, P. (2019). Climate-Smart Agriculture in action: from concepts to investments. Dedicated Training for Staff of the Islamic Development Bank. Cairo, Egypt. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

Long, D., Bai, L., Yan, L., Zhang, C., Yang, W., Lei, H., ... & Shi, C. (2019). Generation of spatially complete and daily continuous surface soil moisture of high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111364. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111364

Mariotti, A., Zeng, N., Yoon, J. H., Artale, V., Navarra, A., Alpert, P., & Li, L. Z. (2008). Mediterranean water cycle changes: transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations. *Environmental Research Letters*, 3(4), 044001. https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0204

Mohanty, B. P., Cosh, M. H., Lakshmi, V., & Montzka, C. (2017). Soil moisture remote sensing: State-of-thescience. *Vadose Zone Journal*, 16(1), 1-9. https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105

Montaldo, N., Fois, L., & Corona, R. (2021). Soil Moisture Estimates in a Grass Field Using Sentinel-1 Radar Data and an Assimilation Approach. *Remote Sensing*, 13(16), 3293. https://doi.org/10.3390/rs13163293

Oh, Y., Sarabandi, & K., Ulaby, F. T., et al., 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 370–381. DOI: 10.1109/36.134086

Ouarzeddine, M., Souissi, B., & Belhadj-Aissa, A. (2006). Target detection and characterization using h/alpha decomposition and polarimetric signatures. In 2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies (Vol. 1, pp. 395-400). IEEE Xplore. DOI: 10.1109/ICTTA.2006.1684402

Panciera, R., & Monerris, A. (2013). Basis of an australian radar soil moisture algorithm theoretical baseline document (ATDB) Monash University Pradhan, S. N., Anjum, M., & Jena, P. (2018). Estimation of soil moisture content by remote sensing methods: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7, 1786-1792.

Pulvirenti, L., Squicciarino, G., Cenci, L., Boni, G., Pierdicca, N., Chini, M., ... & Campanella, P. (2018). A surface soil moisture mapping service at national (Italian) scale based on Sentinel-1 data. *Environmental Modelling* & *Software*, 102, 13-28. <u>https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.12.022</u>

Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. & Wendroth, O. (2008), Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*, 7: 358-389. https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143

Sehler, R., Li, J., Reager, J., & Ye, H. (2019). Investigating relationship between soil moisture and precipitation globally using remote sensing observations. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 168(1), 106–118. https://doi.org/https: //doi.org/10.1111/j.1936-704X.2019.03324.x 454

Shamambo, D. C., Bonan, B., Calvet, J.- C., Albergel, C., & Hahn, S. (2019). Interpretation of ASCAT radar scatterometer observations over land: A case study over Southwestern France. *Remote Sensing*, 11(23), 2842. 458. <u>https://doi.org/10.3390/rs11232842</u>

Shukla, P., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H., Roberts, D., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., ... & Van Diemen, R. (2019). IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems Steinhausen, M. J., Wagner, P. D., Narasimhan, B. & Waske, B. (2018). Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improved land use and land cover mapping of monsoon regions. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73, 595–604. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.011

Todisco, F., Brocca, L., Termite, L. F., & Wagner, W. (2015). Use of satellite and modeled soil moisture data for predicting event soil loss at plot scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9), 3845-3856. https://doi.org/10.5194/hess-19-3845-2015

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. Remote sensing of environment, 120, 9-24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028

Wagner, W., Sabel, D., Doubkova, M., Bartsch, A., & Pathe, C. (2009). The potential of sentinel-1 for monitoring soil moisture with a high spatial resolution at global scale. *Symposium of Earth Observation and Water Cycle Science*, 3, 60.

Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press

Zribi, M., & Dechambre, M. (2003). A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 84(1), 42-52. <u>https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00069-X</u>

Zucaro, R., Arzeni, A., Capone, S., Tiberi, M., Boaro, I., Massaccesi, G., Pontrandolfi, A., Tascone, F. L., ...& Serino, G. (2009). Rapporto sullo stato dell'irrigazione nelle Marche. Rapporto irrigazione.

CO-REGISTRAZIONE DI IMMAGINI MULTISPETTRALI E TERMICHE ASINCRONEON THE CO-REGISTRATION OF ASYNCHRONOUS MULTI-SPECTRAL AND THERMAL IMAGES

I. Cortesi^{1, 2},*A. Masiero¹, G. Tucci¹

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Florence 50139, Italy - (irene.cortesi, andrea.masiero, grazia.tucci)@unifi.it
² Department of Geodesy and Geoinformation, TU Wien, 1040 Vienna, Austria

Key words: Co-registration, Multi-spectral camera, Thermal camera, Plastic detection, UAV

Parole chiave: Co-registrazione, Camera multispettrale, Camera Termica, Individuazione di plastica, VAPR

Abstract

Plastic pollution has a severe impact on the ecosystem, altering its natural equilibrium and causing serious health issues to both flora and fauna. Several actions have already been undertaken in order to reduce the plastic litter dispersion in the environment, both in terms of changing the human behavior, reducing the use of plastics and avoiding their dispersion, and of implementing methods for detecting and collecting the already dispersed ones. This paper focuses on the latter, and, in particular, on plastic litter detection on the fluvial environment. To this aim, an Unmanned Aerial Vehicle, provided with a multi-spectral and a thermal camera, have been used, in order to: (i) allow affordable periodic monitoring of relatively long river reaches, (ii) detect even quite small macro-plastics, based on their spectral signature. More specifically, since the cameras deployed in our data collection campaigns are not synchron-ized, this work aims at presenting the developed strategy for the co-registration of the acquired imagery, which results to be quite challenging given the few amount of visual features recognizable on the images acquired flying at a limited altitude over a river. The proposed methodology, which is based on the correlation maximization between multi-spectral and thermal images, provided reas-onable results on the considered case study. The obtained values of normalized intersection over union of plastic areas are over 90%.

L'inquinamento da parte dei rifiuti di plastica ha un grave impatto sull'ecosistema, alterando il suo equilibrio naturale e causando seri problemi alla flora e alla fauna. Negli ultimi anni sono già state intraprese diverse azioni per ridurre la dispersione di rifiuti di plastica nell'ambiente sia in termini di cambiamento del comportamento umano (riducendone l'uso ed evitandone la dispersione) sia nell'implementazione di metodi capaci di rilevare e raccogliere i materiali abbandonati. Questo articolo si concentra su quest'ultimo aspetto e, in particolare, sul rilevamento di rifiuti di plastica nell'ambiente fluviale. In questo contesto è stato utilizzato un Veicolo Aereo a Pilotaggio Remoto (VAPR) dotato di una camera multispettrale e una termica, al fine di: (i) consentire un monitoraggio periodico di tratti di fiume relativamente lunghi, (ii) rilevare anche macroplastiche di dimensioni ridotte, basandosi sulla loro firma spettrale.Poichè le camere impiegate nelle campagne di raccolta dati non sono sincronizzate, questo lavoro si propone di presentare la strategia sviluppata per la co-registrazione delle immagini acquisite, che si rivela piuttosto complessa a causa della scarsa quantità di visual features riconoscibili sulle immagini acquisite volando a bassa quota su un fiume. La metodologia proposta, basata sulla massimizzazione della correlazione tra immagini multispettrali e termiche, ha fornito risultati ragionevoli nel caso di studio considerato. I valori ottenuti del Normalized Intersection over Union delle aree di plastica superano 90%.

1. Introduzione

L'inquinamento dovuto alla plastica è una delle minacce più discusse e tristemente note del nostro tempo. Ogni ecosistema sulla Terra è colpito da questo grave problema causato dall'uomo. L'uso costante di materiale plastico e il suo errato smaltimento mettono seriamente a rischio la salute di vari ecosistemi, compresi gli animali che vi abitano (Plastics Europe, 2022, United Nations Environment Program, 2018). Oltre alle consolidate cattive abitudini umane, la diffusione della pandemia di COVID-19 ha aumentato questo fenomeno incoraggiando l'utilizzo di dispositivi monouso confezionati singolarmente (Peng et al., 2021).

Date l'entità e la gravità di questa minaccia, diversi approcci sono stati proposti dalla comunità del telerilevamento durante l'ultimo decennio al fine di rilevare dei rifiuti di plastica diffusi nell'ambiente. In particolare, nel corso degli anni sono stati utilizzati diversi strumenti e metodi per rilevare e monitorare oggetti di plastica galleggianti in acqua dolce e salata. Alcuni ricercatori hanno utilizzato censimenti visivi in situ per il loro lavoro (Galgani et al., 2013, Geraeds et al., 2019), ma la maggior parte ha utilizzato immagini o ortofoto ottenute da satelliti (Tasseron et al., 2021, Themistocleous et al., 2020, Topouzelis et al., 2020) o immagini acquisite con Veicoli Aerei a Pilotaggio Remoto (VAPR) (Cortesi et al., 2022, Jakovljevic et al., 2020,

^{*} Corresponding author

Iordache et al., 2022, Cortesi et al., 2023).

L'utilizzo dei droni consente non solo una grande flessibilità nella scelta dell'area di studio e nella pianificazione delle tempempistiche, ma offre anche una vasta gamma di sensori disponibili, che possono migliorare le prestazioni complessive dell'individuazione della plastica. In particolare, (Cortesi et al., 2022) suggerisce che la combinazione di dati multispettrali (nella gamma di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico da 433 a 875 nm) e dati termici potrebbe essere utilizzata al fine di ridurre i falsi positivi.

In accordo con quanto appena detto, il lavoro presentato in questo articolo, che fa parte di un progetto che affronta il problema dell'individuazione dei rifiuti di plastica in ambienti fluviali, mira a generare un'immagine multibanda che includa bande dello spettro elettromagnetico nel visibile, nel vicino infrarosso e nel termico. L'immagine multispettrale prodotta mapperà la scena come se fosse acquisita per ogni banda con lo stesso orientamento della camera e al medesimo istante. Successivamente, il set di immagini risultanti dalla procedura sviluppata sarà utilizzato in un lavoro futuro al fine di testare e migliorare l'approccio di rilevamento dei rifiuti di plastica precedentemente proposto in (Cortesi et al., 2022, Cortesi et al., 2021).

2. Materiali

La strumentazione utilizzata in questa ricerca include la camera multispettrale MAIA-S2 (prodotta da SAL Engineering and EOPTIS, Italia) e la camera termica DJI H20T equipaggiate sul drone DJI Matrice 300, come è mostato in Figura 1. La raccolta dati è avvenuta attraverso un volo sopra l'area di studio, una porzione del fiume Ombrone (vicino Grosseto, Italia, Figura 2). L'area mappata da una singola immagine solitamente include pochi elementi: l'acqua del fiume, i campioni di plastica (sei in totale, differenti per dimensione, colore, texture e polimero), e in alcuni casi la riva del fiume e la vegetazione ripariale.



Figura 1. Camera multispettrale MAIA-S2, camera termica H20T DJI, antenna GNSS MAIA, Sensore ILS e antenna GNSS aggiuntiva montati sul Matrice 300 DJI.

MAIA-S2, che è stata montata sul Matrice 300 attraverso un giunto rigido, acquisisce immagini multibanda ad alta risoluzione (velocità di acquisizione massima 1 Hz) in diverse lunghezze d'onda nelle regioni del visibile (VIS) e del vicino infrarosso (NIR) attraverso un array di 9 camere (SAL Engineering and EOPTIS, 2018). Le caratteristiche della camera sono mostrate nella Tabella 1.



Figura 2. Drone in volo sopra l'area di studio (Istia d'Ombrone, Grosseto, Italia).

La camera MAIA-S2 può comunicare con un ricevitore GNSS (RTK) esterno montato sul drone, con correzioni provenienti da una stazione base GNSS posizionata vicino (≈ 100 m) all'area di volo.

Gli output raw prodotti dalla camera multispettrale richiedono delle correzioni radiometriche e geometriche e una coregistrazione tra le nove bande. La correzione radiometrica avviene attraverso un software propretario di image-processing (dato in dotazione da SAL Engineering), sfruttando le misure del Sensore di Irraggiamento Luminoso (ILS), posizionato sulla parte superiore del DJI Matrice 300 (Figura 1).

La DJI H20T è una camera multisenore, che acquisisce sia immagini RGB che termiche (Tabella 1). Le immagini RGB e termiche sono acquisite a diversi istanti (siano t_{RGB} e t_{th} i tempi di acquisizione di una coppia di immagini RGB e termiche, quindi $t_{RGB} \not = t_{th}$; in entrambi i casi 2 Hz è la massima velocità di acquisizione), e sfortunatamente asincroni rispetto alle acquisizioni di MAIA-S2 (ad esempio, setms è il tempo di acquisizione dell'immagine multispettrale temporalmente più vicina alle immagini RGB e termiche precedentemente menzionate, allora $t_{ms} \not i t_{RGB}$ e $t_{ms} \not i t_{th}$). Inoltre, DJI H20T essendo un sensore ufficiale DJI, possiede gimbal in grado di compensare (parzialmente) le vibrazioni e che consente di effettuare acquisizioni (prossime) al nadir. L'accuratezza della sincronizzazione temporale tra le acquisizioni H20T e il ricevitore GNSS (RTK) Matrice 300 non è garantita e pertanto le posizioni delle esposizioni basate sul GNSS sono solitamente determinate con un errore di livello inferiore al metro.

Il data-set iniziale includeva 654 immagini multispettrali e 414 immagini termiche acquisite a diverse quote tra i 10 e gli 80 metri sopra il livello del fiume. Le coppie di immagini selezionate sono formate dall'immagine termica e da quella multispettrale acquisite nell'istante temporale più simile, in base ai timestamp forniti da MAIA-S2 e DJI H20T. Poiché MAIA-S2 acquisisce le immagini a 1 Hz, l'intervallo di tempo più lungo

MAIA-S2				
Lunghezza focale	7.5 mm			
Diagonale FoV	43°			
Risoluzione immagine	1208 × 960 pix			
Banda spettrale	433 - 875 nm			
Camera termica	infrarosso			
Lunghezza focale	13.5 mm			
Diagonale FoV	40.6°			
Risoluzione immagine	640 × 512 pix			
Banda spettrale	8000 - 14000 nm			
Wide RGB	Camera			
Lunghezza focale	4.5 mm			
Diagonale FoV	82.9°			
Risoluzione immagine	4056 × 3040 pix			
Banda spettrale	400 - 700 nm			

Tabella 1. Caratteristiche delle camere MAIA-S2 e DJI H20T.

possibile tra le due acquisizioni di una coppia di immagini è di 0,5 s.

Si assume, inoltre, che gli oggetti di plastica siano (abbastanza) statici. Vale la pena notare infatti che quest'ultima è un'ipotesi piuttosto inaffidabile in condizioni di lavoro generali, tuttavia è abbastanza realistica in questo caso di studio. Le plastiche sono state legate con lenze da pesca trasparenti per consentire il recupero di tali campioni introdotti artificialmente nel fiume solo per questo test. Pertanto, nonostante le plastiche si siano sicuramente mosse durante la raccolta dei dati, il loro movimento durante l'intervallo di tempo tra le acquisizioni delle immagini multispettrali e termiche corrispondenti è stato di solito piuttosto ridotto.

3. Metodo

Questo lavoro si occupa del processo di co-registrazione di coppie di immagini multispettrali e termiche, nelle condizioni di lavoro menzionate nella sezione precedente.

Si presume che i parametri di orientamento interno di entrambe le camere (multispettrale e termica) siano pre-calibrati. Data l'acquisizione simultanea delle bande multispettrali, si assume, inoltre, che la loro relazione geometrica sia rigida e, di conseguenza, il sistema complessivo delle camere multispettrali possa essere pre-calibrato.

La co-registrazione tra immagini multispettrali e termiche risulta essere complicata a causa dalla loro relazione geometrica variabile, dovuta da (i) l'acquisizione asincrona, (ii) le diverse connessioni al drone (rigide/non rigide), (iii) il movimento del drone.

Considerando quanto appena descritto due opzioni alternative possono essere considerate per la co-registrazione delle immagini multispettrali e termiche:

1. Inserire tutte le immagini termiche e multispettrali in un unico sistema di riferimento utilizzando un automatic bundle block adjustment. In questa maniera potrebbe essere possibile generare delle ortofoto multispettrali;

2. Lavorare con signole immagini.

La prima opzione è stata testata ma ha mostrato principalmente due problematiche. In primo luogo, questa applicazione può essere utilizzata solo con immagini acquisite ad altezze di volo elevate, in cui è visibile abbastanza texture (ad esempio, l'argine del fiume). Di conseguenza, la plastica nel fiume viene mappata solo su alcuni pixel. Inoltre, l'accuratezza nella registrazione tra il bundle block termico e multispettrale risulta di pochi pixel. Nonostante l'alto grado di automazione, questo approccio non poteva quindi essere utilizzato.

L'opzione 2, invece, è percorribile se vengono soddisfatte alcune ipotesi. Se è visibile solo l'acqua mappata o una piccola sezione dell'argine, la scena è essenzialmente piatta. Pertanto, le immagini di questa scena possono essere trasformate l'una nell'altra utilizzando un'omografia. In alternativa, come approssimazione, può essere utilizzata anche una trasformazione affine. In questo caso, l'accuratezza si è dimostrata essere più elevata. Una buona conoscenza dei parametri esterni della camera (ad esempio, nel caso della georeferenziazione diretta) o la disponibilità di alcune corrispondenze tra le due immagini possono essere sfruttate per stimare correttamente la trasformazione. La procedura adottata sarà descritta nel dettaglio nel seguito.

Il drone ha volato a bassa velocità e a diverse altezze, con la maggior parte delle immagini acquisite a quote piuttosto basse. È stato precedentemente osservato che un intervallo di altezza di volo compreso tra 20 m e 40 m è ragionevole per rilevare efficacemente i rifiuti di plastica (Cortesi et al., 2022). A tali quote, nella maggior parte delle immagini è visibile solo l'acqua (e i rifiuti di plastica, quando presenti) (Figura 3 e 4).

Poiché le immagini multispettrali e termiche sono state acquisite in modo asincrono, anche i movimenti dei rifiuti di plastica possono avere un impatto negativo sull'efficacia della co-registrazione. Tuttavia, date le condizioni di lavoro descritte nella sezione precedente, si presuppone che gli oggetti di plastica siano (quasi) statici durante l'intervallo di tempo (< 0, 5 s) tra l'acquisizione dell'immagine multispettrale e quella termica.

Date le caratteristiche del caso studio, le immagini rappresentano spesso una scena quasi piana. Pertanto, considerando un'immagine termica e quella multispettrale corrispondente (acquisita a meno di 0, 5 s prima o dopo l'immagine termica, come già menzionato) e assumendo una scena quasi statica, si presume che la distorsione sia già stata corretta su entrambe le immagini e che tutte le bande nell'immagine multispettrale siano già co-registrate, in modo tale da coniderare solo una di queste. Sarà presente una matrice di omografia, ovvero una matrice non singolare 3×3 , tale che

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cong H \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix}$$
(1)

dove $\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^{\top}$ sono coordinate omogenee di punti nell'immagine termica e $\begin{bmatrix} u' & v' & 1 \end{bmatrix}^{\top}$ i corrispondenti nella multispettrale. L'uguaglianza approssimativa in (1) è chiaramente valida per un fattore di scala.

Gli oggetti di plastica sono in genere facilmente distinguibili nelle immagini multispettrali e termiche (escludendo sunglint,





Figura 3. Esempio di immagini multispettrale (rappresentata nelle bande Rosso, Verde e Blu, RGB) (a) termica (b). Si noti come la maggior parte delle immagini sia costituita da acqua.



Figura 4. Zoom della Figura 3 su campioni di plastica. (a) e (c) mostrano l'immagine multispettrale in una combinazione di bande RGB e (b) e (d) motrano l'immagine termica.

schiuma del fiume e rocce), come mostrato in Figura 3 e 4. Per tale motivo, solitamente è possibile utilizzare i metodi standard di segmentazione delle immagini per estrarre i pixel contenenti plastica dall'immagine, ad esempio con metodo di Otsu (Otsu, 1975).

Quando sono visibili almeno quattro oggetti di plastica nelle due immagini, è possibile ottenere facilmente una stima dell'omografia in (1) mediante il metodo della Trasformazione Lineare Diretta (DLT) (Hartley and Zisserman, 2003) utilizzando i centroidi delle plastiche come punti corrispondenti. Infatti, dal momento che le visual features non correlate agli oggetti di plastica sono raramente rilevabili e che il matching delle features tra le immagini multispettrali e termiche ha dato risultati non molto affidabili. l'utilizzo dei centroidi delle plastiche sembra attualmente il modo più affidabile per abbinare i punti nelle due immagini. Anche senza l'utilizzo di descrittori visivi, che in questo caso hanno purtroppo dato risultati non affidabili, le corrispondenze tra i centroidi delle plastiche nelle due immagini possono essere determinate automaticamente in alcune condizioni operative, ad esempio: (i) se sono disponibili buone stime dei parametri esterni della camera forniti dai sensori sulla piattaforma (caso di georeferenziazione diretta), (ii) sfruttando accurate posizioni di esposizione basate su GNSS e una procedura simile al Random Sample Consensus (RANSAC, (Fischler and Bolles, 1981)) per determinare le corrispondenze più affidabili, (iii) se le due viste delle camere sono molto simili, può essere utilizzato un approccio del nearest neighbor. Se i metodi automatici non funzionano, è necessario stabilire manualmente le corrispondenze.

In realtà, (i) non può essere utilizzato nel caso considerato, poiché non sono disponibili misurazioni affidabili dell'orientamento della camera. Inoltre, possono sorgere alcuni problemi anche nel caso (ii), in presenza di riflessi solari sull'acqua (sunglint), che possono introdurre molti punti non corrispondenti nelle regioni rilevate con una segmentazione automatica, poiché la firma spettrale del sunglint è simile a quella della plastica (Cortesi et al., 2022). RANSAC, o una delle sue varianti, può essere utilizzato per determinare gli outliers, le corrispondenze tra gli oggetti segmentati nelle due immagini e una stima della matrice di omografia H. Tuttavia, qualsiasi procedura simile a RANSAC probabilmente fallirà quando il numero di punti non corrispondenti sarà molto maggiore del numero di oggetti di plastica, come accade in alcune delle immagini acquisite (Cortesi et al., 2022). (iii) non può essere utilizzato perchè, dato che l'orientamento della camera MAIA-S2 non è compensato da un gimbal, le due viste delle camere possono essere diverse. Motivata da queste osservazioni, la procedura di segmentazione-associazione delle plastiche è attualmente assistita da un operatore umano nella nostra implementazione attuale.

Nella maggior parte delle immagini acquisite, il numero di oggetti di plastica visibili raramente è ≥ 4 . Inoltre, anche quando il numero di oggetti è sufficiente per determinare una matrice di omografia \hat{H} con DLT, sfruttando i centroidi delle plastiche come menzionato in precedenza, è evidente che \hat{H} è una stima dell'omografia tra le due immagini e quindi solo ragionevolmente vicina a quella ottimale. Per questa ragione, è stato implementato un approccio diverso sia per migliorare la stima ottenuta come descritto sopra, sia per risolvere il problema generale quando il numero di oggetti di plastica è insufficiente per applicare la procedura descritta in precedenza.

La logica dell'approccio implementato consiste nel determinare l'omografia tra le immagini multispettrali e termiche non distorte che massimizza la loro correlazione. Presumendo che la scena sia quasi piana l'omografia può essere scritta nel seguente modo (Ma et al., 2004):

$$H = K_{th} \left(R + \frac{\mathbf{t} \ \mathbf{n}^{\mathsf{T}}}{d} \right) K_{ms}^{-1}$$
(2)

dove $K_{th} \in K_{ms}$ sono le due matrici di proiezione delle camere, che si presume siano note K_{ms}^{-1} e l'inversa della matrice K_{ms} , (R, t) e la trasformazione rigida (rotazione, traslazione) tra i due sistemi di riferimento delle camere, n è la normale del piano della scena e d è la distanza tra la camera e il piano della scena. Date le caratteristiche del volo, d è solitamente molto più grande della lunghezza del vettore di traslazionet, quindi il contributo di t \mathbf{n}_{d}^{\top} è relativamente piccolo per altezze di volo abbastanza elevate. Di conseguenza,

$$H \approx H_{\infty} = K_{th} R K_{ms}^{-1} \tag{3}$$

dove *R* dipende solo dai tre angoli relativi tra le due immagini, che devono essere ottimizzati (essendo di valore assoluto relativamente piccolo). Oltre a H_{∞} , la trasformazione considerata tra le due immagini viene ottenuta anche ottimizzando una piccola traslazione nel piano dell'immagine, portando a 5 parametri da stimare.

La banda multispettrale che risulta essere più simile a quella termica è l'ultima banda NIR della MAIA-S2, S9 (855-875 nm), ed è quindi quella selezionata nella procedura di ottimizzazione. Tuttavia, nonostante siano abbastanza simili, purtroppo sono ancora visibili alcune differenze notevoli. La Figura 5 confronta la rappresentazione multispettrale (a) e termica (b) di un campione di plastica. L'immagine multispettrale nella Figura 5(a) è stata ottenuta mostrando le tre bande NIR della MAIA-S2, ovvero S7 (773-793 nm), S8 (784,5-899,5 nm) e S9 (vedi (Cortesi et al., 2022) per un elenco completo delle bande spettrali). Le tre bande MAIA-S2 mostrate nella figura sono quelle con l'aspetto tipicamente più simile a quello termico. Si noti anche il diverso comportamento della temperatura della plastica nella Figura 5(b) rispetto a quella nella Figura 4(b).



Figura 5. Zoom di un campione di plastica: (a) mostrano nelle tre bande del vicino infrarosso (NIR) nell'immagine multispettrale, (b) immagine termica.

Motivata dall'ultima osservazione, la correlazione è massimizzata tra le maschere delle immagini termiche e multispettrali, in cui sono stati estratti solo gli oggetti di plastica.

Per riassumere, il workflow implementato è il seguente:

 segmentazione delle plastiche sulle immagini termiche e multispettrali;

- individuazione manuale tra le corrispondenze degli oggetti di plastica;
- utilizzo delle maschere degli oggetti di plastica e le cor-

rispondenze stabilite al passaggio precedente per stimare in modo ottimale l'omografia, sfruttando il modello ridotto (3).

4. Risultati

Il metodo implementato è stato attualmente validato su 303 coppie immagini contenenti un totale di 494 istanze di oggetti di plastica.

Un esempio dei risultati ottenuti dalla procedura è mostrato nelle Figure 6 e 7, le quali riportano la co-registrazione delle immagini della Figura 3.



Figura 6. Risultato della co-registrazione delle immagini nella



Figura 7. Zoom della Figura 6 sui campioni di plastica.

Invece, la Tabella 2 e le Figure 8 e 9 mostrano i risultati ottenuti sull'intero dataset di validazione. Poiché' in alcuni casi l'aspetto delle plastiche nelle immagini multispettrali e termiche è piuttosto diverso, anche le corrispondenti regioni segmentate risultano talvolta abbastanza differenti. Per questa ragione la tabella e le figure mostrano i risultati ottenuti per quanto riguarda l'Intersection over Union (IoU) tra le regioni delle plastiche segmentate e coregistrate, ma tali valori sono stati normalizzati rispetto al loro massimo possibile nei casi considerati.

La Figura 8 mostra la distribuzione dei valori normalizzati di IoU sulle 494 istanze plastiche nel dataset. I risultati numerici corrispondenti (mediana, valore medio e Median Absolute

	Mediana	Media	MAD
Normalized IoU	93.92%	87.48%	6.08%
Mean normalized IoU	91.25%	89.71%	8.75%

Tabella 2. Risultati numerici della co-registrazione.

Deviation (MAD)) sono riportati nella prima riga della Tabella 2. Invece, la Figura 9 mostra la distribuzione della me- dia dei valori normalizzati di IoU calcolati su ciascuna delle 303 immagini prese in considerazione (risultati numerici sulla seconda riga della Tabella 2).

Inoltre, occorre evidenziare che, come mostrano le Figure 10 e 11, i risultati ottenuti sono paragonabili anche su porzioni differenti del dataset, acquisite ad altezze molto diverse (15 e 80 metri nel caso delle figure in questione).

In generale i risultati ottenuti mostrano una performance ragionevole del metodo utilizzato (median normalized IoU > 90%), con poche istanze di plastica che presentano valori bassi di normalized IoU.



Figura 8. Distribuzione dei mean Normalized Intersection of Union values per tutte le plastiche presenti nel data-set considerato.



Figura 9. Distribuzione dei mean Normalized Intersection of Union values per tutte le immagini nel data-set considerato.



Figura 10. Distribuzione dei mean Normalized Intersection of Union values per tutte le immagini acquisite ad un altezza di volo di 15 metri.



Figura 11. Distribuzione dei mean Normalized Intersection of Union values per tutte le immagini acquisite ad un altezza di volo di 80 metri.

5. Conclusioni

Il lavoro presentato in questo articolo fa parte di un progetto volto a investigare la rilevazione di rifiuti di plastica in ambienti fluviali basata sulla loro firma spettrale, considerando bande nel visibile, nell'infrarosso vicino e termico. A tale scopo, è stata condotta un'acquisizione di dati utilizzando due camere, nello specifico la camera multispettrale MAIA-S2 e la camera termica DJI H20T, montate su un drone in grado di sorvolare l'area di studio. Sfortunatamente, le due camere hanno acquisito le immagini in modo asincrono e la loro relazione geometrica non è stata costante.

La presenza di poche visual features (principalmente legate agli stessi oggetti di plastica) nelle immagini acquisite e nelle condizioni di lavoro prese in considerazione ha spinto gli autori a implementare un processo di co-registrazione immagineimmagine, basato sulla massimizzazione della correlazione tra immagini multispettrali e termiche.

I risultati, ottenuti su un set di dati di convalida composto da 303 coppie di immagini, dimostrano una performance ragionevole del metodo, come indicato dal median normalized Intersection over Union superiore all'90%. Sviluppi futuri saranno dedicati alla convalida del metodo su un set di dati molto più ampio, attualmente composto circa 800 coppie di immagini multispettrali e termiche acquisiti in aree di studio diverse. Inoltre, saranno testate anche tecniche basate sul Deep Learning al fine di individuare corrispondenze affidabili tra immagini multispettrali e termiche (Sarlin et al., 2020). Sarà anche investigata la possibilità di tracciare gli spostamenti delle plastiche nel tempo.

Bibliografia

Cortesi, I., Masiero, A., De Giglio, M., Tucci, G., Dubbini, M., 2021. Random Forest-Based River Plastic Detection with a Handheld Multispectral Camera. *The International Archives* of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 9–14.

Cortesi, I., Masiero, A., Tucci, G., Topouzelis, K., 2022. UAVbased river plastic detection with a multispectral camera. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2022, 855–861.

Cortesi, I., Mugnai, F., Angelini, R., Masiero, A., 2023. Mini Uav-Based Litter Detection on River Banks. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 117–122.

Fischler, M., Bolles, R., 1981. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395.

Galgani, F., Hanke, G., Werner, S., De Vrees, L., 2013. Marine litter within the European marine strategy framework directive. *ICES Journal of marine Science*, 70(6), 1055–1064.

Geraeds, M., van Emmerik, T., de Vries, R., bin Ab Razak, M. S., 2019. Riverine plastic litter monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Remote Sensing*, 11(17), 2045.

Hartley, R., Zisserman, A., 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.

Iordache, M.-D., De Keukelaere, L., Moelans, R., Landuyt, L., Moshtaghi, M., Corradi, P., Knaeps, E., 2022. Targeting Plastics: Machine Learning Applied to Litter Detection in Aerial Multispectral Images. *Remote Sensing*, 14(22), 5820.

Jakovljevic, G., Govedarica, M., Alvarez-Taboada, F., 2020. A deep learning model for automatic plastic mapping using

unmanned aerial vehicle (UAV) data. Remote Sensing, 12(9), 1515.

Ma, Y., Soatto, S., Kosecka, J., Sastry, S., 2004. An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models, Interdisciplinary Applied Mathematics: Imaging, Vision, and Graphics, Vol. 26. Springer.

Otsu, N., 1975. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296), 23–27.

Peng, Y., Wu, P., Schartup, A. T., Zhang, Y., 2021. Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(47), e2111530118.

Plastics Europe, 2022. Marine litter https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/wastemanagement-prevention/marine-litter/. (Accessed 12 january 2022).

SAL Engineering and EOPTIS, 2018. Maia, the multispectral camera. https://www.spectralcam.com/maia-tech/. (Accessed 12 January 2022).

Sarlin, P.-E., DeTone, D., Malisiewicz, T., Rabinovich, A., 2020. Superglue: Learning feature matching with graph neural networks. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 4938–4947.

Tasseron, P., Van Emmerik, T., Peller, J., Schreyers, L., Biermann, L., 2021. Advancing Floating Macroplastic Detection from Space Using Experimental Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 13(12), 2335.

Themistocleous, K., Papoutsa, C., Michaelides, S., Hadjimitsis, D., 2020. Investigating detection of floating plastic litter from space using Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12(16), 2648.

Topouzelis, K., Papageorgiou, D., Karagaitanakis, A., Papakonstantinou, A., Ballesteros, M. A., 2020. Plastic litter project 2019: Exploring the detection of floating plastic litter using drones and sentinel 2 satellite images. *IGARSS 2020-*2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 6329–6332.

United Nations Environment Program, 2018. The state of plastics. world environment day outlook.

PERCORSI ACCESSIBILI PER AREE URBANE STORICHE: CALCOLO DI CARATTERISTICHE E VETTORIALIZZAZIONE DA NUVOLE DI PUNTI

D. Treccani^{a,b}, L. Díaz-Vilariño^a, A. Adami^b

^a Universidade de Vigo, CINTECX, GeoTECH group, 36310 Vigo, Spain - (daniele.treccani, lucia)@uvigo.es ^b Politecnico di Milano, DABC c/o Unesco Research Lab, Polo territoriale di Mantova, piazza Carlo d'Arco, 3, 46100 Mantova -(daniele.treccani, andrea.adami)@polimi.it

Parole chiave: segmentazione semantica, accessibilità, censimento dei marciapiedi, processamento di nuvole di punti, beni culturali, vettorializzazione, QGIS, analisi di percorsi.

Key words: semantic segmentation, accessibility, sidewalk inventory, point cloud processing, cultural heritage, vectorization, qgis, network analysis.

Abstract

Il tema del censimento dei marciapiedi è un tema la cui importanza sta crescendo di pari passo con la maggiore adozione del concetto di *smart* city per la gestione delle città. Al fine di gestire correttamente la città e prendere decisioni consapevoli, è necessario conoscere le condizioni reali della città stessa. Inoltre, quando si pianificano e calcolano i percorsi culturali all'interno della città, questi devono tenere conto delle esigenze specifiche di tutti gli utenti. Pertanto, è importante conoscere le condizioni del network di marciapiedi della città e le loro caratteristiche fisiche e geometriche. In genere, le mappe del reticolo di marciapiedi sono generate sulla base di dati cartografici esistenti e gli attributi dei marciapiedi sono raccolti attraverso il crowdsourcing. In questo lavoro, la mappa del network di marciapiedi di una città storica è stata prodotta a partire dai dati della nuvola di punti. La nuvola di punti è stata segmentata in "strade" e "marciapiedi', quindi i cluster di punti appartenenti alle superfici dei marciapiedi sono stati utilizzati per calcolare gli attributi dei marciapiedi stessi e per generare un layer vettoriale composto da nodi (*nodes*) e bordi (*edges*). Il dato vettoriale è stato poi utilizzato per calcolare i percorsi accessibili tra i punti di interesse, utilizzando QGIS. I test effettuati su un caso di studio reale, Sabbioneta, città storica e sito UNESCO, mostrano un'accuratezza di vettorizzazione del 98,7%. In futuro si prevede che i dati vettoriali e i percorsi calcolati potranno essere utilizzati per generare mappe utili ai tecnici che dovranno intervenire sulla pianificazione urbana, e per sviluppare applicazioni di navigazione urbana per il web o per i telefoni cellulari.

Sidewalk inventory is a topic whose importance is increasing together with the widespread use of smart city management. In order to manage the city properly and to make informed decisions, it is necessary to know the real conditions of the city. Furthermore, when planning and calculating cultural routes within the city, these routes must take into account the specific needs of all users. Therefore, it is important to know the conditions of the city's sidewalk network and also their physical and geometrical characteristics. Typically, sidewalk network are generated basing on existing cartographic data, and sidewalk attributes are gathered through crowdsourcing. In this paper, the sidewalk network of an historic city was produced starting from point cloud data. The point cloud was semantically segmented in "roads" and "sidewalks", and then the cluster of points of sidewalks surfaces were used to compute sidewalk attributes and to generate a vector layer composed of nodes and edges. The vector layer was then used to compute accessible paths between Points of Interest, using QGIS. The tests made on a real case study, the historic city and UNESCO site of Sabbioneta (Italy), shows a vectorization accuracy of 98.7%. In future, the vector layers and the computed paths could be used to generate maps for city planners, and to develop web or mobile phones routing apps.

1. Introduzione

L'inventario dei marciapiedi è un processo legato a diversi aspetti dell'amministrazione di una città. Infatti, per una corretta pianificazione e per un adeguato processo decisionale relativo alla gestione dell'accessibilità, è necessaria una conoscenza preliminare delle condizioni attuali dell'ambiente urbano. Poi, quando si tratta di una città storica, la predisposizione di percorsi pedonali accessibili che collegano i Punti di Interesse (PI) all'interno della città è una procedura importante che deve tenere in considerazione le condizioni e le caratteristiche del network dei marciapiedi.

Infine, per la gestione del turismo, la predisposizione di percorsi di visita è importante, e dovrebbe essere fatta tenendo in considerazione anche la progettazione di percorsi inclusivi che possano essere facilmente accessibili e sfruttati da tutte le categorie di utenti. Considerando quindi il quadro legislativo in materia di accessibilità fisica e barriere architettoniche (ad esempio, per l'Italia, il DM 236/1989 e il DPR 503/1996) e alla luce di questioni più ampie provenienti anche dalla pratica (Marconcini et al., 2021), è possibile definire alcuni requisiti che un marciapiede dovrebbe avere per essere considerato accessibile. Ad esempio, la legge italiana prevede una larghezza minima di 90 cm, un dislivello inferiore a 2,5 cm e una pendenza trasversale inferiore all'1%.

In questo contesto, una mappa dettagliata dei marciapiedi esistenti, insieme ai loro attributi geometrici, è una base adeguata per prendere decisioni più consapevoli per la pianificazione urbana e anche per l'organizzazione e la progettazione di percorsi accessibili all'interno della città. La realizzazione di una mappa è di solito il punto di partenza più efficace per rappresentare il network di marciapiedi e per gestire l'accessibilità fisica di una città. Per produrre questo tipo di mappe si può ricorrere al crowdsourcing (Saha et al., 2019) o all'impiego di questionari compilati da tecnici esperti che hanno visitato il sito. Entrambi sono metodi comuni e diffusi, ma non sono immuni da opinioni soggettive. D'altra parte, l'utilizzo di strumenti di Information Communication Technology (ICT) che sfruttano regole e algoritmi può essere considerato più oggettivo (Marconcini e Pracchi, 2019).

Affrontando poi questo tema in un ambiente urbano storico, la gestione e il calcolo dei percorsi accessibili che collegano due PI è resa più complessa dalla struttura viaria della città storica stessa. Le condizioni tipiche sono: strade strette, un elevato numero di intersezioni, strade temporaneamente chiuse al traffico e/o completamente utilizzate dai pedoni, presenza o meno di attraversamenti pedonali, marciapiedi di diversa larghezza e pavimentazioni urbane in vari materiali. Per tutti questi motivi, il punto di partenza ottimale è una mappa che riporti correttamente gli attributi geometrici di marciapiedi e strade, in modo che il percorso calcolato possa tenere conto sia delle limitazioni effettivamente presenti nel tessuto urbano, sia delle norme e dei regolamenti di accessibilità urbana.

L'analisi del network di marciapiedi è un argomento che in letteratura scientifica è ben affrontato ed è solitamente riferito ad assetti stradali moderni e quindi molto regolari. Il dato di partenza usato nelle ricerche esistenti può provenire da varie fonti (nuvole di punti, immagini satellitari, mappe catastali), ma l'uso di file vettoriali e di Sistemi Informativi Geografici (GIS) è il più comune. L'accessibilità fisica è tipicamente verificata in modo puntuale (su uno specifico marciapiede) e non globale (lungo l'intero percorso). Il lavoro presentato in questo articolo si basa su una nuvola di punti precedentemente classificata, propone un metodo per l'estrazione automatica degli attributi geometrici dei marciapiedi e la successiva vettorializzazione basata sulla posizione spaziale degli stessi, al fine di formare un network. Successivamente, tale network di marciapiedi viene sfruttato per simulazioni di calcolo di percorsi, prendendo in considerazione alcuni scenari realistici che possono verificarsi in una città storica. Il metodo è stato testato su una città storica situata nel Nord Italia, Sabbioneta, che insieme a Mantova è un sito UNESCO dal 2008.

Il documento è organizzato come segue. Nella sezione 2, lavori correlati, viene analizzata la letteratura scientifica esistente e vengono presentati e confrontati i metodi esistenti che si occupano del calcolo dei percorsi e dell'analisi dei marciapiedi. La sezione 3, materiali e metodi, descrive il caso di studio selezionato e il metodo, dall'estrazione degli attributi geometrici dei marciapiedi alla loro vettorizzazione e alle analisi usando il network vettoriale. La sezione 4, risultati, presenta i dati risultanti sul caso di studio; l'ultima sezione delinea le conclusioni e gli ulteriori sviluppi e lavori.

2. Lavori correlati

Il tema dell'analisi dei marciapiedi e delle loro interconnessioni (i.e. il network di marciapiedi) viene solitamente trattato in letteratura partendo da un dato vettoriale esistente fornito da comuni, uffici catastali o altri enti, che viene usato per calcolare percorsi accessibili tenendo conto delle esigenze dei diversi utenti. Un esempio in questo senso è il lavoro di (Verde et al., 2021), che si basa su un database vettoriale delle strade del centro storico, messo a disposizione dal Comune. Grazie all'aiuto di due associazioni che si occupano di persone ipovedenti, le strade sono state classificate in base alla loro accessibilità, ed è stata sviluppata un'applicazione per telefoni cellulari che aiuta le persone a pianificare i percorsi all'interno della città in base alle proprie esigenze. Un altro esempio è il lavoro di (Li et al., 2018), in cui i dati vettoriali relativi alle forme degli edifici e delle linee stradali sono stati utilizzati per costruire un database vettoriale relativo ai marciapiedi. Nei loro test, gli autori hanno ricostruito i nodi e i legami del network di marciapiedi prendendo in considerazione anche gli incroci e gli attraversamenti pedonali, con l'obiettivo di generare un network completamente collegato. Gli attributi dei marciapiedi sono stati poi raccolti utilizzando specifiche applicazioni per smartphone e tablet compatibili con Android e IOS e quindi memorizzati all'interno del database. Il risultato è stato un database GIS utile per produrre mappe e calcolare i percorsi pedonali all'interno della città.

Nei lavori precedenti, il punto di partenza dei metodi era costituito da set di dati GIS preesistenti, che venivano elaborati e arricchiti con informazioni raccolte altrove, al fine di raggiungere lo scopo. Un altro approccio, invece, è quello di lavorare direttamente sulla nuvola di punti, acquisita con un sistema *Mobile Laser Scanning* (MLS). È il caso di (Hou e Ai, 2020), dove gli autori hanno utilizzato una rete neurale per segmentare semanticamente una nuvola di punti acquisita con MLS, integrando un algoritmo di individuazione dei marciapiedi basato su analisi effettuate dividendo il dato in fasce. Le informazioni ottenute sono state poi confrontate con normative in merito all'accessibilità per valutare le condizioni del network di marciapiedi.

Un'altra possibilità consiste nel combinare set di dati provenienti da fonti diverse, per calcolare i percorsi ottimali. È il caso di (Luaces et al., 2021), dove gli autori hanno utilizzato i dati di Open Street Map (OSM), hanno aggiunto informazioni elaborando le nuvole di punti ottenute con MLS, hanno individuato gli ostacoli utilizzando il crowdsourcing e hanno identificato i problemi di accessibilità analizzando i dati dei social network. Tutti questi dati sono stati poi utilizzati per produrre un'applicazione in grado di calcolare percorsi ottimali tenendo conto di diverse esigenze.

A differenza di quanto visto in letteratura scientifica, in questo lavoro il metodo prevede una elaborazione delle nuvole di punti che viene applicato in modo estensivo a una città storica, confrontandosi con tutte le peculiarità tipiche di un ambiente urbano storico, che risulta essere non standard, ma stratificato e organizzato per far fronte alle restrizioni e ai vincoli che derivano dal contesto della città storica stessa.

3. Materiali e metodi

Il metodo presentato necessita di una nuvola di punti classificata, dalla quale sia possibile individuare i marciapiedi della città. La nuvola di punti usata in questo articolo è stata segmentata implementando un metodo euristico basato sulle somiglianze dei punti e sulle informazioni topologiche (Treccani et al., 2021). Il dataset, quindi, è una nuvola di punti di un ambiente urbano storico già classificata con, tra le altre, la classe "marciapiede" che identifica i punti relativi alle superfici dei marciapiedi. La nuvola di punti è stata acquisita con un sistema MLS e le informazioni sulla traiettoria sono note.



Figura 1 Flusso di lavoro del metodo. Partendo da una nuvola di punti segmentata semanticamente, i punti appartenenti alla classe "marciapiedi" sono stati estratti e utilizzati per calcolare gli attributi di accessibilità, per poi essere convertiti in un layer vettoriale con nodes e edges da utilizzare per il calcolo dei percorsi.

Poiché i marciapiedi sono l'elemento urbano di interesse per questo lavoro, sono stati selezionati solo i punti appartenenti alla classe "marciapiedi". Poi la nuvola di punti dell'intera città è stata suddivisa in piccole porzioni seguendo la linea dell'asse stradale, analizzando una porzione di 2 metri di lunghezza alla volta. Per ogni porzione di marciapiede sono stati poi calcolati alcuni attributi geometrici ritenuti utili per una mappa di accessibilità. Ogni segmento di marciapiede è stato poi memorizzato in un layer vettoriale e il network risultante è stato utilizzato come base per il calcolo di percorsi, implementando processi già esistenti nel software QGIS (Pella e Ose, 2018). Una sintesi del flusso di lavoro è riportata nella Figura 1.

3.1 Caso di studio: il sito UNESCO di Sabbioneta

Il caso di studio selezionato per i test presentati in questo lavoro è la città storica di Sabbioneta, costruita tra il 1556 e il 1591 da Vespasiano Gonzaga, secondo i principi della "città ideale". La città presenta uno schema a scacchiera con una strada principale che collega le due porte fortificate della città, situate su due lati opposti. Il quadro viario è composto da strade di diversa larghezza, da molto strette a molto larghe; sono stati utilizzati diversi materiali per la pavimentazione, mattoni e pietra per i marciapiedi, acciottolato e sampietrini per la superficie carrabile e per le piazze. La nuvola di punti utilizzata per questo test è stata acquisita nel 2020 con un Leica Pegasus:Two, e come detto in precedenza è stata segmentata. Il risultato è quindi una nuvola di punti di tutte le superfici del terreno, con i punti classificati in funzione alla loro appartenenza alla superficie stradale o del marciapiede.

3.2 Calcolo degli attributi dei marciapiedi

La nuvola di punti è stata suddivisa in sotto-nuvole utilizzando Bounding Boxes create da segmenti di due metri di lunghezza estratti dalla linea di traiettoria dello strumento di acquisizione. In questo documento le sotto-nuvole saranno chiamate "segmenti". Per ogni segmento sono stati poi analizzati i punti dei marciapiedi di destra e di sinistra con lo scopo di calcolare alcuni attributi geometrici dei marciapiedi stessi. Gli attributi sono riassunti nella Figura 2 e qui descritti in dettaglio:

- larghezza (width): assumendo che la larghezza del marciapiede sia uniforme lungo il segmento analizzato e che il marciapiede sia parallelo alla linea dell'asse stradale, la larghezza è stata calcolata sfruttando la differenza tra il punto (sulla nuvola) più lontano e quello più vicino del marciapiede rispetto all'asse stradale (tenendo conto di eventuali punti rumorosi); il valore è stato poi arrotondato ai 5 centimetri più vicini;
- elevazione relativa marciapiede-strada (*elevation difference*): se presente, l'elevazione relativa è stata calcolata sfruttando la differenza tra il valore medio delle coordinate Z dei punti del marciapiede e quelle dei punti della strada in prossimità del marciapiede;

- pendenze trasversali e longitudinali (*slopes*): dopo aver calcolato la *Principal Component Analysis* (PCA) dei punti del marciapiede, e aver individuato gli autovettori del gruppo di punti, le pendenze degli autovettori più lunghi sono state utilizzate perché rappresentano la pendenza del marciapiede analizzato;
- materiale principale della superficie di pavimentazione (*paving material*): implementando uno strumento di machine learning è stato possibile prevedere il materiale della pavimentazione; nel caso di studio esaminato le pavimentazioni erano solo di due tipi: mattoni o pietra.



Figura 1 Spiegazione di tutti gli attributi geometrici dei marciapiedi ricavati dalla nuvola di punti e come sono stati calcolati.

3.3 Vettorializzazione del network di marciapiedi

Ogni gruppo di punti identificato come marciapiede è stato convertito in un formato vettoriale per produrre e realizzare network. A tal fine, si è deciso di rappresentare ogni gruppo come un singolo punto (i.e. nodo), per fare ciò il punto centrale (calcolato con coordinate XYZ medie) di ogni cluster di punti è stato utilizzato come rappresentante del segmento di marciapiede stesso e gli attributi del marciapiede precedentemente calcolati sono stati collegati a tale punto.

In questa fase, tutti i marciapiedi sono rappresentati da diversi punti, quasi allineati e paralleli all'asse stradale. Si è reso necessario un affinamento; tenendo conto delle informazioni relative al contesto, i punti sono stati leggermente spostati per ottenere un risultato più regolare. Per fare ciò (si veda la Fig. 3) sono stati analizzati i tre tipi di incroci stradali esistenti nel caso di studio, denominati "incrocio a X", "incrocio a T" e "zona d'angolo" (solitamente a 90°) e quindi denominato "incrocio a L". Per definire la posizione degli incroci è stato utilizzato il dataset di OSM; in particolare, sono state sfruttate le linee stradali e i loro vertici per definire la posizione dell'attraversamento e il suo tipo. Quindi, per ogni tipo di attraversamento sono stati selezionati i punti correlati sul layer vettoriale e, utilizzando un metodo ai minimi quadrati, è stata calcolata la curva di best fitting e i nodi sono stati leggermente spostati in X e Y per trovarsi infine sulla curva calcolata.

Infine, i punti consecutivi (i.e. nodi) sono stati collegati tra loro da linee (i.e. collegamenti) per formare un network. Per calcolare facilmente i percorsi, gli stessi attributi memorizzati nei nodi sono stati copiati ai collegamenti. Il network vettoriale risultante rappresenta un alto livello di informazione per i marciapiedi, in quanto dispone di informazioni sugli attributi dei marciapiedi, riferite ogni 2 metri lungo la struttura dei marciapiedi della città. È stato poi previsto un raffinamento manuale finale; ad esempio, gli attraversamenti su strisce pedonali sono stati aggiunti manualmente. Anche se in letteratura esistono molte metodologie di riconoscimento delle strisce pedonali, in questo lavoro non è stato implementato un riconoscimento automatico di tali elementi, anche perché in generale nelle città storiche tali elementi non sono identificabili dai segni sulla superficie stradale, ma piuttosto utilizzando una pavimentazione diversa rispetto alla carreggiata. Al momento sono stati aggiunti manualmente al network vettoriale.

È necessario poi fare una ulteriore considerazione: nel caso di studio selezionato ci sono solo pochi (solo 3) attraversamenti pedonali su strisce pedonali, e nella maggior parte della città i pedoni possono attraversare la strada in ogni posizione. Per ricreare questo comportamento è stato sviluppato un secondo network vettoriale, collegando non solo i nodi vicini, ma anche nodi che si trovano ai lati opposti della strada.

3.4 Calcolo dei percorsi

Il network vettoriale dei marciapiedi, memorizzato in uno shapefile, è stato importato in QGIS. Sono stati importati due tipi di network: un primo rappresentante solo i marciapiedi, che può essere utilizzato per preparare una mappa tematica che mostri i loro attributi; e un secondo che tiene conto del fatto che, nel caso di studio considerato, in tutte le strade del centro città i pedoni possono attraversare la strada ovunque (facendo ovviamente attenzione al traffico veicolare). Questo accade perché all'interno del centro storico non ci sono strisce pedonali, quindi, secondo gli articoli 190 e 191 del Codice della Strada, in queste situazioni i pedoni possono attraversare la strada solo in direzione perpendicolare, facendo attenzione a evitare situazioni che mettano in pericolo se stessi o altri. Nel secondo network i collegamenti tra nodi sono effettuati anche attraversando la strada; in realtà, considerando la posizione dei nodi, al momento non è stato possibile aggiungere l'attraversamento in direzione perpendicolare, quindi nel generare i collegamenti "attraversando la strada" sono stati aggiunti solo quelli con la lunghezza minore.



Figura 2 Fasi di regolarizzazione dei nodi vettoriali dei marciapiedi, in base a tre tipi di incroci stradali (a): a X, a T e a L. Dall'alto verso il basso: prima (b) è stato identificato il tipo di incrocio, poi (c) sono state calcolate le curve di riferimento e quindi (d) i punti sono stati leggermente spostati in modo da trovarsi su tali curve.



Figura 3 Esempio di vettorizzazione per un segmento di marciapiede. Selezione di un segmento di strada sulla nuvola di punti (a), selezione del gruppo di punti del marciapiede (b), calcolo del centro del gruppo (c) e visualizzazione del centro del gruppo (i.e. nodo) sovrapposto alla mappa della città (d).

Il calcolo dei percorsi è stato eseguita in QGIS utilizzando un algoritmo disponibile tra gli strumenti di elaborazione del software. Tra i numerosi strumenti disponibili in "Processing > network analysis", quello selezionato per i test è "Shortest path (point to point)", che è in grado di calcolare il percorso più breve o più veloce tra due punti selezionati direttamente sulla mappa.

Come detto, questo algoritmo può calcolare il percorso più breve o più veloce. Il "più breve" prende ovviamente in considerazione solo la lunghezza dei collegamenti nel network, mentre il "più veloce" utilizza il valore della "velocità" di ciascun collegamento per calcolare il percorso più rapido per raggiungere la destinazione finale. In questo lavoro, l'algoritmo del "percorso più veloce" è stato utilizzato per calcolare il percorso più accessibile. Creando una nuova colonna nel database e riempiendola con una velocità fittizia (la velocità agisce come un peso nel calcolo), basata sull'attributo geometrico del marciapiede, è stato possibile forzare l'algoritmo a calcolare un percorso che utilizza solo i bordi accessibili del marciapiede. Ad esempio, considerando accessibile un marciapiede di 0,9 m di larghezza (come previsto dalle leggi italiane), e assegnando una velocità di 1 Km/h a tutti i bordi con "larghezza" < 0,9 m e una velocità di 2 Km/h a tutti i bordi con "larghezza" > 0,9 m, è stato possibile calcolare il percorso "più veloce", che di fatto è stato forzato a percorrere il più possibile i marciapiedi con una larghezza considerata accessibile.

Come appena descritto, per raggiungere l'obiettivo di calcolare i percorsi accessibili è stato utilizzato un trucco, utilizzando l'algoritmo che calcola il percorso più veloce e inserendo un valore di velocità calcolato pesando il parametro di accessibilità (in questo caso la larghezza) rispetto al marciapiede. Allo stesso modo, il valore della velocità di ciascun collegamento può essere utilizzato per ridurre il numero di attraversamenti stradali utilizzati (semplicemente aumentando la velocità sui collegamenti che non sono di attraversamento). Considerando un percorso per persone in sedia a rotelle, gli attraversamenti dovrebbero essere utilizzati solo se la differenza di Z tra la strada e il marciapiede è inferiore a 2,5 centimetri (a tal fine, i bordi di attraversamento in cui la differenza di Z è maggiore del limite dovrebbero avere una velocità molto bassa).

4. Risultati

4.1 Estrazione degli attributi dei marciapiedi e creazione del network vettoriale

La nuvola di punti di Sabbioneta riguarda il centro storico della città e alcune aree esterne alle mura fortificate, per un totale di oltre 6 km di area stradale. La segmentazione semantica è stata eseguita per l'area all'interno del centro cittadino ed è stata descritta in un precedente lavoro (Treccani et al., 2021), mentre in questo lavoro viene descritta l'estrazione e la vettorializzazione dei dati. Gli attributi dei marciapiedi sono stati calcolati per tutta l'area del centro città, analizzando la strada per segmenti di 2 metri di lunghezza. I risultati di questo calcolo sono presentati nella Tabella 1, dove per tutti gli attributi geometrici viene presentato l'intervallo del valore calcolato e il valore più frequente. Confrontando poi tutti i valori con quello di riferimento (proveniente dalla normativa italiana), è stato possibile calcolare la percentuale di collegamenti nel network che possono essere considerati accessibili.

Successivamente, la posizione spaziale dei segmenti dei marciapiedi è stata calcolata e aggiunta a un layer vettoriale (vedere Fig. 4). Il network vettoriale di output è composta da 1780 nodi e 1720 colelgamenti ed è stata calcolata in 3,5 minuti su un computer di media qualità (16 GB di RAM, NVIDIA GeForce 950m). È stato calcolato anche un secondo tipo di collegamenti: considerando la possibilità di attraversare la strada ovunque. Questo secondo network è composto dagli stessi 1780 nodi, ma con 1357 nuovi bordi, per un totale di 3077. Una porzione dei due network è visibile nella Figura 5.

Dopo il calcolo è stato necessario un raffinamento manuale per risolvere alcuni errori minori, come l'inserimento di alcuni collegamenti mancanti o l'eliminazione di alcuni collegamenti errati. Come misura delle prestazioni dell'algoritmo, si osservi che solo 23 collegamenti hanno richiesto una modifica, e corrispondono all'1,3% del totale; ne deriva quindi un'accuratezza del 98,7%. Inoltre, considerando che la nuvola di punti rappresentava quasi tutto il centro della città, ma non tutto, alcune strade non sono state rilevate e per questo motivo i loro marciapiedi non sono stati inseriti nel network. Sono stati aggiunti manualmente.



Figura 4 Una porzione della città di Sabbioneta, i punti verdi sono i nodi (*nodes*), che rappresentano i segmenti di marciapiede, le linee blu sono i collegamenti (*edges*) tra i nodi lungo il percorso del marciapiede, e le linee viola sono i collegamenti che attraversano la strada (*cross-edges*),

Attribute	Ranges	Most frequent	Reference value	Percentage of accessible edges in the sidewalk network
Width	$0.45\ m \div 2.20\ m$	0.95 m	≥0.90 m	72.30%
Transverse slope	$0.05\% \div 9.75\%$	1.25%	≤1%	8.60%
Longitudinal slope	$0.10\% \div 9.77\%$	2.10%	≤5%	79.30%
Relative Z difference	$0 \text{ m} \div 0.12 \text{ m}$	0 m	≤0.025 m	66.50%

Tabella 1 Risultati del calcolo degli attributi dei marciapiedi. La tabella mostra gli intervalli di valori degli attributi e il valore più frequente. I risultati vengono poi confrontati con i valori di riferimento specificati dalla legge.

considerando la possibilità per i pedoni di attraversare ovunque all'interno del centro storico della città.



Figura 5 Mappa tematica dell'intera città di Sabbioneta sviluppata utilizzando i collegamenti del network e i loro attributi. In verde i segmenti di marciapiede con larghezza>0,9 m (considerati accessibili dalla legge italiana) e in rosso quelli con larghezza<0,9 m (non accessibili).

A partire dal network sviluppato e utilizzando gli strumenti di QGIS, è stato possibile produrre diverse mappe tematiche che potrebbero essere utilizzate dalla pubblica amministrazione, dai tecnici pianificatori, ma anche dagli utenti della città, per ottenere informazioni sugli attributi dei marciapiedi. A titolo di esempio, la Figura 6 mostra i segmenti di marciapiede accessibili (in verde) e inaccessibili (in rosso) in base alla loro larghezza. Per la legge italiana, infatti, i marciapiedi sono accessibili se la loro larghezza è superiore a 0,9 metri.

4.2 Calcolo dei percorsi

Il calcolo dei percorsi è stato testato su due casi diversi. Nel primo caso, il percorso più breve e quello più veloce sono stati calcolati tenendo conto della larghezza dei marciapiedi. Nel secondo caso, per il calcolo del percorso è stata considerata la presenza di rampe su marciapiedi posti ad una quota maggiore rispetto alla strada.

Il primo test è riportato nella Figura 7. In questo esempio viene calcolato un percorso da una generica zona della città (punto A, un incrocio tra due strade) verso un PI della città la Galleria degli Antichi (punto B). Nella Figura 7b viene calcolato il percorso più breve, mentre nella 7c viene calcolato il percorso più veloce considerando l'accessibilità (larghezza). Per questo secondo caso, è stata data una velocità diversa ai marciapiedi con larghezza considerata accessibile (4 Km/h) e a quelli considerati inaccessibili (0,001 Km/h). Data la grande differenza tra le due velocità, nel calcolare il percorso più veloce l'algoritmo ha evitato il più possibile i marciapiedi con larghezza non accessibile. Infatti, si può notare (confrontando il percorso previsto in 7c con la mappa tematica in 7a) che il percorso suggerito evita di utilizzare una piccola porzione di

marciapiede inaccessibile nell'angolo in alto a destra, e per questo motivo attraversa la strada anche solo per pochi metri.



0 10 20 m

Figura 6 Test 1: calcolo del percorso considerando la larghezza dei marciapiedi come un vincolo. Il percorso viene calcolato dal punto A al punto B. (a) mappa tematica della larghezza dei marciapiedi; (b) percorso più breve; (c) percorso più veloce considerando la larghezza accessibile.

Il secondo test è riportato nella Figura 8. In questo caso, è stato calcolato il percorso da Piazza Ducale (punto A) alla Galleria degli Antichi (punto B). Il percorso è stato calcolato tenendo conto della diversa quota dei marciapiedi rispetto alla strada, che rende impossibile alle persone in sedia a rotelle attraversare la strada ovunque. Come si può vedere nella Figura 8a, i marciapiedi che collegano il punto A al punto B sono tutti caratterizzati da una differenza di Z tra strada e marciapiede superiore al valore accettabile (per la legge italiana è di 2,5 cm).



0 10 20 m

Figura 7 Test 2: calcolo del percorso considerando come vincoli la differenza Z tra marciapiedi e strade. Il percorso viene calcolato dal punto A al punto B. (a) mappa tematica della differenza Z dei marciapiedi; (b) percorso più breve considerando anche la presenza di rampe sui marciapiedi.

Per consentire il calcolo del percorso in questo caso è stato necessario aggiungere al network due collegamenti supplementari, in corrispondenza delle rampe sui marciapiedi. Tali collegamenti aggiuntivi sono visibili nella Figura 8a (in blu, vicino al punto A e a destra rispetto al punto B). Come mostra la Figura 8b, il percorso calcolato utilizza le due rampe per superare il problema dell'inaccessibilità dell'altezza del marciapiede.

5. Discussione e conclusioni

Questo lavoro presenta un metodo per calcolare automaticamente i percorsi accessibili all'interno di un sito storico a partire dalla nuvola di punti. L'accessibilità è stata valutata sfruttando gli attributi geometrici del network di marciapiedi e confrontandoli con la normativa italiana. Il punto di partenza del lavoro è stata una nuvola di punti segmentata semanticamente, i cui punti sono stati classificati in strade e marciapiedi. I marciapiedi sono stati poi suddivisi in segmenti di 2 metri di lunghezza e sono stati estratti alcuni dei loro attributi geometrici (larghezza, quota rispetto alla strada, pendenze, materiale della pavimentazione). Quindi sono stati vettorializzati per creare i nodi di un network. I nodi sono stati regolarizzati considerando le informazioni contestuali (posizione e forma degli incroci tra le strade) ricavate da OSM. I nodi sono stati poi collegati seguendo due approcci: collegare i marciapiedi più vicini e collegare i marciapiedi attraversando la strada. Il secondo approccio è stato motivato dal fatto che nel caso di studio selezionato, ma anche in molti altri casi, non ci sono attraversamenti pedonali su strisce pedonali, quindi i pedoni possono attraversare la strada ovunque.

Il calcolo degli attributi dei marciapiedi è stata eseguita seguendo semplici formulazioni; i risultati forniti in Tabella 1 mostrano che i valori calcolati hanno intervalli affidabili. Per tutti gli attributi è stato implementato un raffinamento per tenere conto dei punti rumorosi nella nuvola di punti, ad esempio larghezze superiori a 10 metri sono sintomo di un problema nel calcolo. In questi casi il valore è stato modificato o rimosso manualmente. Si nota che gli attributi dei marciapiedi estratti, confrontati con i valori di riferimento, mostrano che per la maggior parte della città il limite di pendenza trasversale non è rispettato; si tratta di una questione importante che dovrebbe essere approfondita in seguito, in particolare si potrebbe implementare un metodo più raffinato per il calcolo della pendenza trasversale.

Il risultato mostra che la vettorializzazione automatica dei nodi dei marciapiedi e l'estrazione degli attributi hanno un'accuratezza del 98,7%, il che significa che è stata eseguita solo una piccola rifinitura manuale alla fine del processo. Naturalmente, un limite di questo metodo è che è stato in grado di vettorializzare solo i marciapiedi rilevati dal sistema MLS, quindi le strade che non sono state rilevate devono essere aggiunte manualmente. Nonostante alcune strade minori, quasi tutto il network di marciapiedi della città è stato realizzato correttamente e gli attributi dei marciapiedi sono stati utilizzati per produrre mappe tematiche che possono essere adatte per una futura valutazione delle condizioni dei marciapiedi, ma anche per aiutare gli amministratori e i pianificatori nel processo decisionale.

Per il calcolo dei percorsi è stato utilizzato lo strumento di calcolo preinstallato in QGIS. Esso consente di calcolare il percorso più breve, lungo il network di marciapiedi, tra due punti selezionati sulla mappa. Questo secondo algoritmo è stato implementato per calcolare il percorso accessibile agendo sul valore della velocità di ciascun collegamento e usandolo come peso. Sono stati effettuati due test, considerando un peso per la larghezza del marciapiede e un peso per l'altezza del marciapiede rispetto alla strada. In entrambi i casi l'algoritmo è stato in grado di prevedere un percorso che utilizza solo su marciapiedi considerati accessibili per gli specifici attributi selezionati per il peso. Facendo riferimento al primo test, sono state implementate due diverse velocità: 0,001 Km/h e 4 Km/h, è importante notare che con una differenza di velocità minore (ad esempio, 1 Km/h e 2 Km/h) il risultato dell'algoritmo non sarebbe stato soddisfacente. La grande differenza tra le due velocità ha fatto sì che il percorso calcolato fosse completamente accessibile.

Il calcolo del percorso è stato eseguito implementando uno strumento esistente e agendo sul valore "velocità" per ottenere il risultato. Il valore della velocità è stato ponderato in base a una caratteristica di accessibilità dei bordi dei marciapiedi. In futuro si prenderà in considerazione una possibile combinazione di più pesi provenienti da tutti gli attributi geometrici. Verrà esaminata la possibilità offerta da altri algoritmi di calcolo dei percorsi esistenti e anche da un algoritmo fatto su misura.

Alla luce dei risultati presentati, alcuni possibili miglioramenti del metodo potrebbero includere lo sfruttamento della presenza di portici: infatti il percorso potrebbe essere calcolato sulla base del comportamento delle persone in diverse condizioni atmosferiche (sole, pioggia), utilizzando per il loro movimento tra i PI soprattutto aree coperte anziché non coperte. Un utile miglioramento del metodo potrebbe essere il rilevamento automatico di rampe e attraversamenti con strisce, invece di inserirli manualmente nell'ultima fase. In letteratura esistono metodi per rilevare le strisce pedonali o le rampe, e idealmente dovrebbero essere facilmente implementati nel metodo.

Il metodo è stato testato per una nuvola di punti MLS, per la quale erano disponibili i dati della traiettoria, ma, in alternativa, si potrebbe utilizzare la linea centrale della strada da OSM o da un database catastale, rendendo il metodo applicabile anche a nuvole di punti acquisite con altri strumenti (ad esempio, droni, laser scanner terrestre).

In futuro, i percorsi estratti e il layer vettoriale potrebbero essere utilizzati per lo sviluppo di un webGIS interattivo da utilizzare da molti utenti della città (cittadini e turisti) e da amministratori e pianificatori urbani. L'algoritmo di routing, insieme alle mappe vettoriali, potrebbe anche essere implementato in un'applicazione per telefoni cellulari.

Contributi dei singoli autori

Idea e concezione, D.T., L.D.V. e A.A.; metodologia, D.T., L.D.V.; software, D.T.; validazione, D.T.; analisi, D.T.; revisione, D.T., L.D.V., e A.A.; supervisione, L.D.V., e A.A.; acquisizione fondi, L.D.V., e A.A.

Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

Conflitti di interessi: Tutti gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse da riportare (oppure riportare in modo trasparente eventuali conflitti di interessi).

Fonti di finanziamento

Il secondo autore ha ricevuto finanziamenti attraverso la borsa di studio per le risorse umane RYC2020-029193-I finanziata da MCIN/AEI/10.13039/501100011033 e *FSE El FSE invieste en tu futuro*.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Leica Geosystem Italia per il supporto fornito durante il test con lo strumento Leica Pegasus:Two.

Bibliografia

Hou, Q., Ai, C., 2020. A network-level sidewalk inventory method using mobile LiDAR and deep learning. Transportation

Research Part C: Emerging Technologies, 119, 102772. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102772.

Li, H., Cebe, J., Khoeini, S., Xu, Y. Dyess, C., Guensler, R., 2018. A Semi-Automated Method to Generate GIS-Based Sidewalk Networks for Asset Management and Pedestrian Accessibility Assessment. Transportation Research Record, 2672(44), 1-9. https://doi.org/10.1177/0361198118757981.

Luaces, M. R., Fisteus, J. A., Sánchez-Fernández, L., Munoz-Organero, M., Balado, J., Díaz-Vilariño, L., Lorenzo, H., 2021. Accessible Routes Integrating Data from Multiple Sources. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(1). https://www.mdpi.com/2220-9964/10/1/7.

Marconcini, S., Pracchi, V., 2019. Inclusive Cultural Heritage sites: ICT as a tool to support the design process and share knowledge. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W11, 793–800. https://www.int-arch-photogramm-remotesens- spatial-inf-sci.net/XLII-2-W11/793/2019/.

Marconcini, S., Treccani, D., Díaz-Vilariño, L., Adami, A., 2021. A data collection framework for managing accessibility and inclusion in urban heritage. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, VIII-M-1-2021, 101–108. https://www.isprs-ann-photogrammremote-sens-spatial-inf-sci.net/VIII-M-1-2021/101/2021/.

Pella, H., Ose, K., 2018. Network Analysis and Routing with QGIS. John Wiley Sons, Ltd, chapter 4, 105–144.

Saha, M., Saugstad, M., Maddali, H. T., Zeng, A., Holland, R., Bower, S., Dash, A., Chen, S., Li, A., Hara, K., Froehlich, J., 2019. Project Sidewalk: A Web-Based Crowdsourcing Tool for Collecting Sidewalk Accessibility Data At Scale. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14.

Treccani, D., Díaz-Vilariño, L., Adami, A., 2021. Sidewalk detection and pavement characterisation in historic urban environments from point clouds: preliminary results. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIIIB4- 2021, 243–249. https://www.int-arch-photogramm-remotesens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B4-2021/243/2021/.

Verde, D., Silva, T., Pereira, A. I., Paiva, S., 2021. Optimized routing for people with permanent or temporary mobility disability: a case study in viana do castelo. 2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), 1–6.

© 2021 by the authors. Open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

© 2021 degli autori. Pubblicazione open access come da termini e condizioni della licenza Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

A REVIEW AND TEST OF SHORELINE EXTRACTION TECHNIQUES

R. Angelini¹, E. Angelats², G. Luzi²

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Italy - (riccardo.angelini)@unifi.it
² Geomatics Research Unit. Department of Signal Theory and Comunication (TSC), Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA) – (guido.luzi, eduard.angelats)@cttc.cat

Parole chiave: estrazione linea di riva, classificazione, machine learning, multispettrale, radar.

Keywords: shoreline extraction, classifier, machine learning, multispectral, radar

Abstract

Le zone costiere rappresentano luoghi di elevato valore paesaggistico, economico e culturale. In un lembo di terra che va da qualche centinaio di metri al chilometro, si concentrano alte densità abitative, aree naturalistiche protette o luoghi di interesse commerciale e turistico. L'indicatore più immediato per monitorare la fascia costiera è rappresentato dalla linea di riva, intesa come confine tra mare e terraferma. Il monitoraggio della linea di riva è tradizionalmente effettuato con metodi topografici classici mediante l'utilizzo di ricevitori GNSS e/o laser scanner. Tuttavia, la sempre maggiore diffusione e distribuzione di dati satellitari, consente un monitoraggio più frequente e a costi contenuti, senza la necessità di una campagna terrestre di acquisizioni. L'obiettivo di questo studio è confrontare diverse metodologie di estrazione automatica della linea di riva da dati satellitari sia ottici che radar a media risoluzione e gratuiti, forniti dal programma Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea. Come caso di studio è stata scelta la spiaggia della Feniglia in provincia di Grosseto. Le tecniche utilizzate prevedono l'utilizzo di indici spettrali come Normalized Difference Water Index (NDWI) per esaltare nelle immagini il confine il confine tra mare e terraferma. A tale scopo sono stati utilizzati per confronto algoritmi di classificazione supervisionata come Random Forest (RF), Minimum Distance (MD), Maximum Likelihood (ML) e non-supervisionata come k-means. Per verificare l'accuratezza delle diverse metodologie e fonti di dati è stata considerata una linea di riva di riferimento digitalizzata manualmente a partire da un ortomosaico frutto di un rilievo aerofotogrammetrico distribuito dalla Regione Toscana. I risultati migliori hanno raggiunto un'accuratezza di 3.75m corrispondente a meno della metà della dimensione del pixel a terra dei dati Sentinel-1 e Sentinel-2 (10m).

Shoreline represents the boundary between land and sea, and its accurate extraction is of utmost importance because of the economic and ecological value of coastal areas. Nowadays, satellite remote sensing is widely used for monitoring the natural environment. Indeed, satellite remote sensing data are cost-effective and periodically available over large areas at a relatively high spatial resolution. Hence, the automatic shoreline extraction from satellite images is a fundamental task for coastal monitoring and management. Shoreline extraction methods are usually applied to satellite remote sensing data. The goal of this study is to compare the performance of different shoreline extraction methods, such as thresholding and more complex classification approaches, such as Random Forest (RF), Minimum Distance (MD), Maximum Likelihood (ML), and K-means, using both optical and radar images. The considered case study area is the shallow basin of the Orbetello Lagoon and one of its ayre called Feniglia. The data supplier is the Copernicus program, which, through the Sentinel-1 and Sentinel-2 missions, provides medium-resolution, open-access products. The accuracy of the obtained results from both methodologies is checked by validating the extracted shoreline using an aerial orthomosaic and, subsequently, a manually extracted shoreline. A preliminary accuracy assessment was performed for image classification, focusing on extracting four classes: water, soil, urban, and forest, using manual segmentation as a reference. In terms of deviation from the reference shoreline, the results obtained through the analysed methodologies achieved an accuracy of 3.75 m, less than half of the pixel size of the Sentinel-1 and Sentinel-2 used products.

1. Introduzione

Gli ambienti costieri sono fondamentali per la loro biodiversità e per le attività umane, sia ludiche che economiche. La zona costiera rappresenta un sistema altamente dinamico che subisce continue e molteplici trasformazioni. Le cause dei cambiamenti nelle zone costiere possono essere raggruppate in: geologiche e geomorfologiche, idrodinamiche, biologiche, climatiche e antropogeniche. (Łabuz, 2015).

Il monitoraggio dell'ambiente costiero viene solitamente condotto definendo diversi indicatori, tra cui il più comune e ampiamente utilizzato è la linea di costa. La definizione più semplice di "linea di costa" è il confine tra terra e mare. (Anders and Byrnes, 1991). Tuttavia, l'elevata variabilità temporale e spaziale negli ambienti costieri rende necessaria una definizione più precisa di questo indicatore. Secondo (Zollini et al, 2020) è

possibile individuare la linea di costa secondo tre modalità principali:

- caratteristiche visibili da un operatore su un'immagine aerea o di telerilevamento;
- l'intersezione tra un riferimento di marea e un modello digitale del terreno o un profilo costiero;
- caratteristiche delle immagini identificate da algoritmi automatici che non sono necessariamente visibili a un operatore senza ausili.

La metodologia adottata in questo articolo prevede un uso sistematico di dati provenienti dalla terza modalità confrontati con il "ground truth" proveniente dal primo tipo, avente una risoluzione spaziale di un ordine di grandezza superiore rispetto ai risultati da validare.

La raccolta tradizionale di dati sul campo, tipicamente eseguita manualmente da un operatore su un'ampia area costiera, risulta spesso onerosa in termini di tempo, costosa e influenzata dalla capacità e dalle scelte dell'operatore stesso. Per contro, il telerilevamento si è affermato come uno strumento prezioso per il monitoraggio costiero grazie alla sua capacità di fornire dati su larga scala, a cadenza regolare, frequenti e con un rapporto costo-opportunità vantaggioso.

Le immagini satellitari provenienti sia da sensori remoti passivi che attivi possono essere utilizzate per estrarre la linea di costa. I sensori passivi, come quelli multispettrali, si basano sulle proprietà di riflettanza naturale delle strutture naturali o antropiche presenti nelle aree costiere, per la porzione dello spettro elettromagnetico considerata, tipicamente dal visibile all'infrarosso. Le immagini ottiche offrono un metodo semplice per estrarre le linee di costa basato sulla differenza di riflettanza spettrale tra la terraferma e l'acqua. Purtroppo, i dati multispettrali satellitari sono sensibili alle condizioni meteorologiche. Invece, le tecniche di telerilevamento attive, come Synthetic Aperture Radar (SAR), permettono di raccogliere misure utilizzabili indipendentemente dalla presenza di nuvolosità. Questo comporta un vantaggio evidente rispetto ai sensori passivi. Tuttavia, le immagini SAR richiedono una fase di preelaborazione non necessaria per quelle ottiche.

I metodi automatici per l'estrazione della linea di riva possono essere raggruppati in tre categorie (Toure et al., 2019):

- metodi basati sull'utilizzo di una soglia opportuna, detti anche di "thresholding";
- metodi basati su tecniche di classificazione delle immagini;
- approcci fondati su algoritmi di "edge detection", che mirano, cioè, a determinare i bordi tra le regioni di interesse presenti all'interno dell'immagine.

L'utilizzo di un metodo di thresholding rappresenta il metodo più semplice e veloce tra le tecniche di segmentazione. Tuttavia, potrebbe non essere una tecnica sufficientemente accurata in alcuni contesti influenzati da una elevata variabilità di illuminazione. Per questo motivo, vi sono stati numerosi tentativi per migliorare i risultati ottenibili tramite questo metodo. Tra le varianti sviluppate si possono elencare per esempio: la possibilità di stabilire un valore soglia ottimale tra due classi utilizzando il metodo di Otsu (Otsu, 1979), approcci più complessi e flessibili basati sull'utilizzo di soglie adattative (Aedla et al., 2015) o tramite l'utilizzo di soglie multiple (Jishuang and Wang, 2002). I metodi di classificazione cercano di rappresentare i dati in modo più semplice raggruppandoli in sottogruppi, o classi, in modo tale che gli elementi all'interno di una classe siano il più possibile simili tra loro, secondo determinati criteri, e il più possibile dissimili dagli elementi delle altre classi. è possibile distinguere tra due differenti tipologie di classificazione: supervisionata, prevede l'allenamento di un modello mediante una serie di dati etichettati a priori, o non supervisionata, nella quale il modello cerca di dividere l'immagine in gruppi (cluster) sulla base delle loro caratteristiche, senza avere a disposizione informazioni a priori. I secondi si contraddistinguono per la loro semplicità; in particolare, il metodo k-means è il più comunemente utilizzato (García-Rubio et al., 2015). La classificazione supervisionata permette generalmente di gestire fenomeni più complessi (Tsekouras et al., 2018a). Gli algoritmi di classificazione più comunemente usati al giorno d'oggi sono il Maximum Likelihood (ML), il Random Forest o il Minimum Distance (MD) (Bamdadinejad et al., 2021). Indipendentemente dal classificatore utilizzato, per ottenere risultati affidabili è essenziale una corretta fase di training, che preveda l'utilizzo di un set di dati rappresentativo. Lo scopo dovrebbe essere quello di utilizzare dati provenienti da diverse missioni satellitari e diverse aree con una varietà di tipologie di spiagge (Abdelhady et al., 2022) al fine di includere più variabilità possibile. Includendo nel dataset di allenamento una grande varietà di tipologie di spiagge

e dati provenienti da diverse aree geografiche, si può aumentare la probabilità che il modello sia in grado di classificare correttamente nuovi dati, non visti durante la fase di allenamento. Al fine di migliorare l'individuazione delle caratteristiche ricercate nelle immagini, molti autori hanno testato con successo indici spettrali per l'individuazione della vegetazione o dell'acqua come il Normalised Difference Water Index (NDWI) or Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) (Ozturk and Sesli, 2015). Questi possono essere utilizzati sia nelle metodologie di "thresholding" che in fase preliminare in quelle di classificazione.

Gli approcci basati sul rilevamento dei bordi delle strutture dell'immagine "Edge detection" sfruttano le variazioni di colore, intensità dei livelli di grigio o texture di un'immagine per determinare i confini tra le aree di interesse, nel caso specifico, la linea di costa. Molti autori hanno proposto diversi approcci come il "Canny Edge Detection" (Tonye et al., 2000), Snakes (Klinger et al., 2011) e il Level Set Algorithm (Ouyang et al., 2010).

La maggior parte degli approcci appena menzionati sono stati implementati per dati derivanti da sensori passivi come quelli multispettrali. Pochi sono stati adattati ai sensori attivi e, verosimilmente, ancor meno tentativi sono stati compiuti nella loro integrazione. Alla luce di queste considerazioni, il presente studio si propone di analizzare e confrontare diverse tecniche di estrazione della linea di costa a partire da immagini radar e multispettrali. L'obiettivo specifico di questa ricerca è di mettere a confronto metodologie basate sulla scelta di una soglia con le tecniche di classificazione, sia supervisionate che non supervisionate.

I metodi scelti sono stati testati su immagini radar Sentinel-1 e sulle immagini multispettrali Sentinel-2, entrambe con una risoluzione spaziale di 10m. L'area pilota è la costa della Feniglia, un tombolo di 6km che chiude a Sud la Laguna di Orbetello, in Toscana (Italia). L'accuratezza dei risultati ottenuti è stata verificata confrontando la linea di costa estratta con una tracciata manualmente, derivante da un ortomosaico aereo con risoluzione spaziale di 0.2m fornito dal geoscopio WMS della Regione Toscana. L'accuratezza della classificazione è stata valutata utilizzando un "ground truth", determinato attraverso l'interpretazione visiva delle classi presenti nell'immagine.

2. Area di studio

L'area di test si trova nella parte meridionale della regione Toscana. Essa comprende la Laguna di Orbetello e uno dei tomboli che la separano dal mare chiamato Feniglia. La separazione dell'ambiente lagunare dal mare tramite la formazione dei due tomboli che la cingono è stata provocata dal combinato disposto di innalzamento del livello del mare Olocenico e dai fenomeni di diffrazione delle onde marine sulla paleo-isola del Monte Argentario (Barnes, 1980). Il tombolo della Feniglia è una striscia di terra di larghezza compresa tra i 700m e il chilometro e lunga 6km. Ad esso è associata un'area protetta istituita nel 1971. Oltre a rappresentare una riserva naturale, costituisce una zona di grande interesse economico e turistico. In passato, alcuni studi hanno già identificato le tendenze evolutive della linea di costa, la presenza di mega-cusps e l'evoluzione delle superfici vegetate (Cipriani et al., 2004). Alla luce dei cambiamenti climatici e dell'innalzamento del livello del mare, sono necessarie ulteriori ricerche.



Figura 1. Il tombolo della Feniglia con la caratteristica forma ad arco in direzione Ovest-Est. La mappa è nel sistema di riferimento WGS84-UTM32.

3. Materiali e metodologia

Questa sezione ha lo scopo di presentare i dati (sottosezione 3.1) e i metodi utilizzati in questo lavoro; ovvero tecniche di definizione delle soglie "thresholding" (sottosezione 3.2) e tecniche di classificazione delle immagini (sottosezione 3.3) Sono state utilizzate immagini open-source sia ottiche che radar, fornite dal programma Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati software open-source come il Sentinel Application Platform (SNAP) e QGIS 3.4

3.1 Dati

In questo studio sono state utilizzate un'immagine satellitare multispettrale Sentinel-2 e un'immagine satellitare SAR Sentinel-1, come mostrato nella Tabella 1. Sentinel-1 e 2 sono missioni satellitari sviluppate dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) nell'ambito del Programma Copernicus I dati satellitari sono liberamente disponibili a diversi livelli di elaborazione per entrambe le piattaforme. I dati satellitari sono stati ottenuti attraverso il portale Copernicus Open Access Hub.

Piattaforme	Data	Ora	Marea	Onda
	[gg/mm/aaaa]	[hh:mm]	[m]	[m]
S-2	23/07/2019	10:10	0.01	0.31
S-1	18/07/2019	05:19	0.07	0.43
Aereo	19/07/2019	12:15	0.08	0.41

Tabella 1. Immagini utilizzate nello studio e relative condizioni di meteomarine al momento della presa.

I satelliti Sentinel 2A e 2B sono dotati di un sensore multispettrale (MSI) che acquisisce immagini in 13 bande comprendenti il visibile, l'infrarosso vicino e l'infrarosso ad onde corte. La risoluzione spaziale varia tra 10m e 60m in funzione della banda spettrale considerata. In questo studio sono stati utilizzati i prodotti di livello 2A, orto rettificati, con correzione atmosferica e maschera sulla nuvolosità.

La missione Sentinel-1 offre diverse modalità di acquisizione per le immagini. In questo lavoro è stata usata la modalità di acquisizione Interferometric Wide Swat (IW) che fornisce immagini di dimensione 250 km * 250 km ad una iniziale risoluzione spaziale di 5 m x 20 m. Tra i diversi tipi di prodotto messi a disposizione è stato scelto il Ground Range Detected (GRD), un dato corretto geometricamente e per la curvatura terrestre. Inoltre, tale immagine è proiettata nel sistema di riferimento World Geodetic System 84 (WGS-84) con il corretto fuso Universal Transverse Mercator (UTM) per l'area geografica di riferimento e una risoluzione finale a maglia quadrata di 10 m x 10 m.

Allo stato attuale, la ricerca ha visto l'utilizzo di immagini Sentinel-1 e Sentinel-2 separatamente. Gli sviluppi futuri si rivolgeranno al miglioramento dei risultati attuali, muovendosi inoltre nella direzione della fusione delle informazioni provenienti da ambedue le piattaforme per l'estrazione della linea di riva, al fine di ottenere risultati più accurati e completi.

Al fine di valutare le performance dei metodi implementati è stato utilizzato un ortomosaico, con risoluzione spaziale 0.2 m x 0.2 m fornito gratuitamente dalla Regione Toscana.

Per offrire ulteriori informazioni sulle condizioni ambientali a contorno sono stati presi in considerazioni anche dati oceanografici come altezza d'onda e di marea. Questi sono essenziali nelle indagini riguardanti l'area costiera e in particolare quelle riguardanti la linea di riva. Infatti, la posizione della stessa cambia continuamente sotto l'influenza dei cicli di marea e del moto ondoso. L'utilizzo di dati provenienti da stazioni limitrofe alla zona di interesse è volto a migliorare l'accuratezza delle analisi permettendo di considerare gli effetti locali di questi cambiamenti, come sottolineato da (Liu et al., 2016).

Per le indagini sono stati considerati i dati sulle onde e le maree provenienti dalla boa di Giannutri, sotto la gestione della Regione Toscana, e dal mareografo di Civitavecchia, a cura dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), essendo le più vicine al sito di studio. Dopo una verifica di tali informazioni, sono state considerate non rilevanti in questa fase, poiché caratterizzate da oscillazioni centimetriche, trascurabili rispetto all'ordine di grandezza della risoluzione delle immagini e dunque degli errori attesi. È importante sottolineare che questa ricerca è incentrata sulle metodologie di estrazione della linea di costa, piuttosto che su un monitoraggio puntuale o temporale della linea di riva. Di conseguenza, si è optato per l'utilizzo di dati in intervalli temporali ristretti e vicini tra loro, al fine di rendere minima l'influenza delle naturali modifiche della linea di riva a seguito anche di deboli mareggiate.

3.2 Thresholding

Nel diagramma in Figura 2 sono mostrati i dettagli della metodologia "thresholding" seguita nella definizione delle soglie più opportune.

Le immagini Sentinel-2 sono state scaricate al livello 2A che fornisce un'immagine orto rettificata e corretta dai disturbi atmosferici. L'indice NDWI è stato calcolato utilizzando la formula seguente:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8}$$
(1)

ove B3 = Banda del verde

```
B8 = Banda dell'infrarosso vicino
```

A causa della natura del dato SAR, il procedimento per l'estrazione della linea di riva dall'immagine Sentinel-1, ha dovuto comprendere alcuni passaggi di preelaborazione, eseguiti tramite il software open-source SNAP di ESA:

- utilizzo delle orbite ricalcolate tramite i successivi passaggi del satellite dalla data di acquisizione per ottenere una migliore coregistrazione;
- rimozione del contributo di rumore termico: questo passaggio rimuove l'effetto del rumore al sensore radar;
- calibrazione: questa fase converte i valori del segnale radar in unità di backscatter misurando l'intensità del segnale riflettente riducendo dunque l'effetto degli errori nel sistema di misurazione e acquisizione;
- filtro per lo "Speckle": questa fase reduce il tipico rumore gaussiano presente nell'immagine radar generato dall'interazione del segnale con la superfice ruvida terrestre.
 È stato utilizzato un filtro di Lee per la sua efficacia nel mantenere le informazioni sui bordi e ridurre il rumore;
- correzione del terreno: questa fase corregge le distorsioni nell'immagine causate della topografia della superficie terrestre. L'immagine è stata georeferenziata nel sistema di riferimento WGS-84 UTM-32N utilizzando il modello digitale del terreno Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).





Figura 2. valori dell'indice NDWI lungo un transetto. Il punto rosso rappresenta il valore dell'indice NDWI utilizzato per la separazione di acqua e terraferma.

Sono state adottate diverse polarizzazioni e dimensioni della finestra per il filtro di Lee. Ad una maggiore dimensione della finestra corrisponde una maggiore superficie di interpolazione di dati con una possibile perdita di informazioni. Infine, sono state selezionate le seguenti configurazioni, :

• polarizzazione VH con finestra per il filtro di Lee di dimensione 7 * 7px;

- polarizzazione VV con finestra per il filtro di Lee di dimensione 7 * 7px;
- polarizzazione VV con finestra per il filtro di Lee di dimensione 5 * 5px

Per binarizzare l'immagine SAR in un contesto specifico di spiaggia sabbiosa è stata adottata una soglia di -20dB, seguendo le indicazioni di (Chen et al., 2022).

Invece, per separare le aree di terra e acqua nell'immagine raster rappresentante l'NDWI, è stato adottato un valore di soglia di 0.

Le immagini risultanti dall'analisi radar e multispettrale sono state vettorializzate, in formato linea, e in seguito smussate in QGIS per migliorare il risultato scendendo ad un livello sub pixel, come illustrato nel diagramma della Figura 3.



Figura 3. Diagramma rappresentante la metodologia di "thresholding" nell'estrazione della linea di riva.

3.3 Metodi di Classificazione

I metodi di classificazione considerati per l'estrazione della linea di costa sono stati implementati nel software SNAP. Sono state utilizzate sia immagini radar che multispettrali, testati differenti approcci e sperimentati diversi metodi per evidenziare le differenze spettrali nelle immagini. Per quanto riguarda i dati radar, è stato calcolato il valore assoluto della polarizzazione VH moltiplicato per la polarizzazione VV. In relazione ai dati ottici, sono stati testati l'indice spettrale NDWI e diverse combinazioni di bande.

La metodologia per estrarre la linea di costa dopo la classificazione dell'immagine è illustrata nella Figura 4. Le strategie di classificazione possono essere suddivise in diverse categorie in base a:

- classificazione basata sui singoli pixel (pixel-based) o per oggetti (object-oriented);
- Classificazione supervisionata (necessita di una fase di training) o non supervisionata.

In questo lavoro, la classificazione basata sui pixel è stata testata tramite il Maximum Likelihood, il Minimum Distance e il Random Forest, come metodi supervisionati. L'algoritmo Kmeans è stato scelto per la classificazione non supervisionata. Le immagini satellitari sono state ritagliate e comprendono un'area dove sono state scelte 4 classi: area urbana, area vegetata, suoli e acqua. I passaggi a valle della fase di classificazione, svolti per l'Estrazione della linea di riva, sono sovrapponibili a quelli già
descritte nella sottosezione 3.2 relativa alla metodologia di "thresholding".

3.3.1 Maximum Likelihood (ML)

Il classificatore "Maximum Likelihood" è un metodo ampiamente utilizzato per la classificazione delle immagini, in cui le classi dei pixel vengono assegnate in base al criterio di massima verosimiglianza. La separazione tra le classi nello spazio decisionale è uno dei principali fattori che influenzano l'accuratezza della classificazione basata su ML (Ahmad e Quegan, 2012).

3.3.2 Minimum Distance (MD)

Il classificatore "Minimum Distance" si basa sulla disponibilità di valori centrali delle classi (ad esempio, medie, determinate nella fase di addestramento): le classi vengono assegnate ai pixel sulla base del criterio di distanza minima per ciascun valore centrale della classe (B. R. Shivakumar e S. V. Rajashekararadhya, 2017). Questo metodo viene spesso utilizzato nelle applicazioni di telerilevamento e analisi delle immagini grazie alla sua semplicità ed efficienza.

3.3.3 Random Forest (RF)

Il "Random Forest" è un metodo di apprendimento automatico che genera un insieme di alberi decisionali, ognuno costruito a partire da un campione casuale di dati. Ciascun albero fornisce una previsione di classe per un dato input, e la classe finale assegnata a tale input è quella che compare con maggiore frequenza nelle previsioni di tutti gli alberi. Questo approccio consente di aumentare l'accuratezza del modello e di prevenire il sovradattamento, ovvero la tendenza del modello ad adattarsi eccessivamente ai dati di addestramento, perdendo la capacità di generalizzare su nuovi dati non visti. L'output della classificazione di RF corrisponde alla moda statistica di numerosi alberi decisionali, risultando in un modello più robusto rispetto a un unico albero di classificazione ottenuto da un singolo ciclo del modello (Breiman, 2001). Nel contesto della regressione, l'output di RF rappresenta la media di tutti gli alberi di regressione sviluppati in parallelo, senza alcuna potatura. RF offre diverse potenzialità, come la stima interna degli errori, la capacità di valutare la rilevanza delle variabili e la competenza nel trattare variabili di scarso impatto. Prendendo in considerazione il problema di classificazione dell'area costiera, l'approccio RF si è dimostrato efficace quando i dati di input integravano la banda NIR (Dizaji, 2018).

3.3.4 K-means

Il K-means è un algoritmo di clustering che presuppone di conoscere a priori il numero delle classi, o cluster, (k) in cui si desidera suddividere il dataset. L'algoritmo assegna ogni pixel della scena al centro del cluster più vicino, che viene determinato come il valore medio di tutti i campioni appartenenti al cluster. La sua semplicità e l'efficienza computazionale lo rendono una scelta popolare per il clustering di grandi dataset. Tuttavia, non tiene conto delle variazioni di scala dei dati e delle correlazioni. Inoltre, minimizza la varianza intra-cluster, ma non è garantito il raggiungimento di un minimo globale. Nonostante queste limitazioni, è una delle scelte più comuni per l'analisi dei cluster.



Figura 4. Diagramma rappresentante le metodologie di classificazione usate per l'estrazione della linea.

3.3.5 Valutazione dell'accuratezza della classificazione

La valutazione dell'accuratezza è stata ottenuta confrontando i risultati dei metodi considerati con una classificazione eseguita manualmente basata sui pixel. Il modo comune per riportare gli errori è attraverso la matrice di confusione, che evidenzia le classificazioni errate per ogni gruppo. La matrice degli errori è sempre presentata come una matrice quadrata, e gli elementi diagonali indicano il numero di campioni classificati correttamente. Al contrario, gli elementi fuori dalla diagonale forniscono informazioni sugli errori di omissione e commissione. Il criterio scelto per definire l'accuratezza è stata l'accuratezza complessiva (OA), definita sommando il numero di valori classificati correttamente e dividendo per il numero totale di campioni.

$$OA = \frac{(TP+TN)}{(TP+FP+TN+FN)}$$
(2)

La Tabella 2 mostra le performance di alcuni dei metodi di classificazione supervisionata esaminati e i rispettivi dati di partenza. La Figura 5 confronta i risultati della classificazione sui dati S1 in alcuni dei casi considerati.

Piattaforma	Dati	Metodo	OA
S1	/VVxVH/	ML	0.852
S1	/VVxVH/	MD	0.847
S1	/VVxVH/	RF	0.847
S2	NDWI	ML	0.169
S2	NDWI	MD	0.169
S2	NDWI	RF	0.169

Tabella 2. Accuratezza dei metodi di classificazione in termini del parametro Overall Accuracy (OA).



Figura 5. Risultati della classificazione (colonna sinistra) sui dati S1 e i corrispondenti pixel classificati erroneamente (colonna destra) per a) MD sulla banda /VVxVH/, b) ML sulla banda /VVxVH/, c) RF sulla banda /VVxVH/. Classi considerate: vegetazione (verde), aree urbane (viola), acqua (blu) e suolo (giallo).

4. Risultati e discussione

Le diverse linee di costa ottenute tramite le varie metodologie sono state confrontate con quella digitalizzata manualmente a partire dall'ortomosaico ad alta risoluzione menzionato nella sezione 3.1. Il metodo descritto da (Demir et al., 2017) è stato implementato in ambiente GIS per valutare l'accuratezza nell'estrazione automatica della linea di riva. Ciascuna linea di costa è stata campionata ogni 10m per un totale di circa 600 punti lungo tutta la lunghezza del tombolo della Feniglia. Successivamente, sono stati generati dei transetti per ciascun punto e su essi è stata misurata la distanza euclidea con la linea digitalizzata manualmente, come illustrato in Figura 6.



Figura 6. Valutazione dell'accuratezza nella generazione delle line di riva, in termini di distanza euclidea da quella di riferimento.

Sono stati calcolati parametri statistici, tra cui distanza minima, massima, media e deviazione standard, al fine di valutare i risultati delle due metodologie, riportati nella Tabella 3.

Thresholding					
		Min dis	Max	Avg dis	Std
	-	[m]	dis [m]	[m]	[m]
	VH	0.08	73.76	24.66	11.14
	LF 7x7				
S1	VV	0.00	44.47	7.82	6.49
	LF 7x7		24.00		6.01
		0.02	34.00	7.77	6.21
52	LF 3X3	0.02	20.50	(07	2.05
52	NDWI	0.02	20.39	0.97	3.95
-	(Classificat	tion		
		Min dis	Max	Avg dis	Std
		[m]	dis [m]	[m]	[m]
	K-means	0.04	24.66	7.55	5.16
S1	RF	0.01	25.86	9.00	5.51
/VVxVH/	ML	0.02	29.04	11.67	5.80
	MD	0.01	25.23	8.81	5.45
S2 B4B3B2	K-means	0.05	17.94	6.24	3.34
S2 B4B8B11		0.08	15.46	3.75	2.65
52	RF	0.02	20.32	4.95	3.13
52 NDWI	ML	0.02	20.32	4.95	3.13
	MD	0.02	20.32	4.95	3.13

Tabella 3. I risultati statistici sono stati derivati dalle misurazioni delle distanze tra la linea di costa stimata automaticamente e quella di riferimento estratta manualmente.

I risultati mostrano che l'algoritmo di classificazione non supervisionato k-means, applicato ai dati ottici con la combinazione di bande B4-B8-B11, ha ottenuto le migliori prestazioni. Inoltre, il trattamento preliminare dei dati tramite il calcolo dell'indice NDWI si è rivelata un'ottima strategia. Per quanto riguarda i dati Sentinel-1, l'algoritmo k-means applicato alla combinazione di polarizzazioni derivante dal valore assoluto del prodotto tra VV e VH, ha fornito le migliori prestazioni. Le combinazioni di bande, sensori e metodologie menzionate hanno raggiunto una notevole accuratezza dell'ordine del sub-pixel.

Inoltre, è stato effettuato un confronto in tre settori della spiaggia, ciascuno lungo circa 2 km, basato sulla distanza media dalla linea di costa di riferimento, al fine di valutare la presenza di eventuali differenze nella distribuzione spaziale delle distanze (come mostrato nella Figura 5).



Figura 7. Distribuzione per settore delle distanze dalla linea di riva di riferimento di alcune metodologie selezionate.

Un'analisi accurata dei risultati evidenzia un miglioramento dell'accuratezza muovendosi da ovest a est, dal settore 1 al settore 3. Questo andamento è stato rilevato in tutte le analisi condotte utilizzando dati ottici, mentre le prestazioni del radar mostrano una maggiore variabilità, senza una tendenza rilevabile. Una possibile spiegazione del trend riscontrato per i dati ottici potrebbe essere correlata al lieve aumento della pendenza della spiaggia e delle dimensioni granulometrica muovendosi dal settore 1 al settore 3. Tali considerazioni necessitano di ulteriori conferme.

L'area di studio selezionata si è rivelata particolarmente impegnativa a causa della ridotta profondità della spiaggia, variabile tra i 10 e i 50 metri e paragonabile alla dimensione del pixel dell'immagine satellitare. Un altro aspetto da considerare è la bassa pendenza della spiaggia. La rilevazione della linea di costa con il metodo proposto può essere impegnativa nelle aree di intermareali, dove il mezzo poroso presenta un grado di saturazione maggiore, portando a incertezze nella rilevazione della linea di costa (Spinosa et al., 2021b).

Un significativo fattore di incertezza è la riflettanza, che in ambienti con un alto contenuto di umidità risulta simile a quella dell'acqua. Infatti, alla saturazione, la lunghezza del percorso ottico nell'acqua è al suo massimo e alcune lunghezze d'onda specifiche possono essere completamente assorbite (Nolet et al., 2014). Un altro aspetto da considerare per migliorare le analisi in tale contesto è considerare pienamente le differenze di risalita causate da onde e maree. Per estendere la metodologia ad altre aree, è necessario anche considerare le diverse granulometrie presenti in diverse spiagge sabbiose.

Per quanto riguarda la metodologia di "thresholding", al fine di migliorare i risultati, varrebbe la pena esplorare metodi che prevedano soglie adattive a livello locale, in modo da ovviare alle differenze di luminosità e contrasto presenti in diverse porzioni dell'immagine analizzata (Liu e Jezek, 2004). In riferimento ai metodi di classificazione, nel caso non supervisionato, l'Analisi

delle Componenti Principali (PCA) può essere utilizzata per una determinazione ad hoc del numero di classi (Hannv et al., 2013). Nel caso si utilizzino algoritmi di classificazione supervisionata, grazie alla loro forte capacità di gestire fenomeni complessi, le reti neurali potrebbero migliorare l'accuratezza del rilevo della linea di costa (Tsekouras et al., 2018b).

5. Conclusioni

L'acquisizione accurata della linea di costa riveste un ruolo importante in ambito scientifico, data la sua rilevanza rispetto a tematiche ambientali e socio-economiche. Fenomeni come l'erosione costiera, l'innalzamento del livello del mare e in generale la gestione del territorio costiero sono esempi emblematici di contesti in cui l'identificazione accurata della linea di costa assume un'importanza cruciale.

Nel presente studio, sono state implementate diverse metodologie per l'estrazione della linea di costa a partire da immagini satellitari, sia radar che multispettrali. Sono state testate tecniche che prevedono la scelta di una soglia ("thresholding") per la distinzione acqua/suolo e successive strategie di classificazione dell'immagine. L'accuratezza di entrambe le metodologie è stata valutata digitalizzando una linea di riva di riferimento tramite un'ortofoto ad alta risoluzione. Inoltre, l'accuratezza della classificazione dell'immagine è stata ulteriormente valutata mediante un riferimento ("Ground Truth") ottenuto attraverso una classificazione manuale. Ciò ha permesso una valutazione più completa dell'accuratezza delle metodologie e ha fornito una ulteriore validazione dei risultati. Entrambe le metodologie hanno raggiunto livelli di accuratezza inferiore al mezzo pixel (la dimensione del singolo pixel delle immagini satellitari utilizzate corrispondeva a 10x10m). Il risultato ottenuto è notevole, considerando la complessità dell'area esaminata

Le metodologie implementate in questo studio presentano il vantaggio di essere eseguibili con software e dati gratuiti oltre ad essere riproducibili in scenari diversi.

L'utilizzo di immagini satellitari per l'estrazione della linea di costa offre benefici quali la capacità di coprire vaste aree a costi ridotti rispetto ai metodi tradizionali, come la fotografia aerea e i rilievi sul campo. La metodologia proposta ha il pregio di essere adattabile sia ai dati ottici che radar, che possono essere utilizzati in modo complementare. Tra i possibili sviluppi futuri si possono annoverare: le tecniche di fusione di dati e il perfezionamento dell'utilizzo di algoritmi di Machine Learning.

Bibliografia

Abdelhady, H.U., Troy, C.D., Habib, A., Manish, R., 2022. A Simple, Fully Automated Shoreline Detection Algorithm for High-Resolution Multi-Spectral Imagery. Remote Sens. 14, 557. https://doi.org/10.3390/rs14030557

Aedla, R., Dwarakish, G.S., Reddy, D.V., 2015. Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-GurpurRivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques. Aquat. Procedia, INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWRCOE'15) 4, 563–570. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.073 Ahmad, A., Quegan, S., 2012. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. Appl. Math. Sci. 6, 64256436.

Anders, F.J., Byrnes, M., 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. Shore Beach 59, 17–26.

B R, Shivakumar., S V, Rajashekararadhya., 2017. Spectral Similarity for Evaluating Classification Performance of Traditional Classifiers. https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2017.8300111

Bamdadinejad, M., Ketabdari, M.J., Chavooshi, S.M.H., 2021. Shoreline Extraction Using Image Processing of Satellite Imageries. J. Indian Soc. Remote Sens. 49, 2365–2375. https://doi.org/10.1007/s12524-021-01398-3

Breiman, L., 2001. Random Forests. Mach. Learn. 45, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Barnes, R.S.K., 1980. Coastal Lagoons. CUP Archive. Boak, E., Turner, I., 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. J. Coast. Res. J. Coast. Res. 21, 688–703. https://doi.org/10.2112/03-0071.1

Chen, C., Chen, H., Liang, J., Huang, W., Xu, W., Li, B., Wang, J., 2022. Extraction of Water Body Information from Remote Sensing Imagery While Considering Greenness and Wetness Based on Tasseled Cap Transformation. Remote Sens. 14, 3001. https://doi.org/10.3390/rs14133001

Cipriani, L.; Ferri, S.; Iannotta, P.; Mannori, S.; Pranzini, E. Beach erosion and protection in Tuscany Monitoring results: a Capitalization tool fromCOASTGAP Project Erosione Costiera 2004, 75–92.

Demir, N., Oy, S., Erdem, F., Şeker, D.Z., Bayram, B., 2017. INTEGRATED SHORELINE EXTRACTION APPROACH WITH USE OF RASAT MS AND SENTINEL-1A SAR IMAGES. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. IV-2-W4, 445–449. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV2-W4-445-2017

Dizaji, R., 2018. Coastline Extraction By Using Random Forest Method; A Case Study Of Istanbul, Geomatik. https://doi.org/10.29128/geomatik.362179

García-Rubio, G., Huntley, D., Russell, P., 2015. Evaluating shoreline identification using optical satellite images. Mar. Geol. 359, 96–105. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.11.002

Hannv, Z., Qigang, J., Jiang, X., 2013. Coastline Extraction Using Support Vector Machine from Remote Sensing Image. J. Multimed. 8, 175–182. https://doi.org/10.4304/jmm.8.2.175-182 Jishuang, Q., Wang, C., 2002. A MULTI-THRESHOLD BASED MORPHOLOGICAL APPROACH FOR EXTRACTING COASTAL LINE FEATURE IN REMOTE SENSED IMAGES.

Jishuang, Q., Wang, C., 2002. A MULTI-THRESHOLD BASED MORPHOLOGICAL APPROACH FOR EXTRACTING COASTAL LINE FEATURE IN REMOTE SENSED IMAGES.

Klinger, T., Ziems, M., Heipke, C., Schenke, H.W., Ott, N., 2011. Antarctic Coastline Detection using Snakes. Photogramm. -Fernerkund. - Geoinformation 421–434. https://doi.org/10.1127/1432-8364/2011/0095 Łabuz, T.A., 2015. Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes, in: The BACC II Author Team (Ed.), Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin, Regional Climate Studies. Springer International Publishing, Cham, pp. 381–396. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_20

Liu, H., Jezek, K.C., 2004. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. Int. J. Remote Sens. 25, 937–958. https://doi.org/10.1080/0143116031000139890

Liu, Z., Li, F., Li, N., Zhang, H., 2016. A Novel Region-Merging Approach for Coastline Extraction From Sentinel-1A IW Mode SAR Imagery. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2510745

Nolet, C., Poortinga, A., Roosjen, P., Bartholomeus, H., Ruessink, G., 2014. Measuring and Modeling the Effect of Surface Moisture on the Spectral Reflectance of Coastal Beach Sand. PLOS ONE 9, e112151. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112151

Otsu, N., 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 9, 62–66. https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076

Ouyang, Y., Chong, J., Wu, Y., 2010. Two coastline detection methods in Synthetic Aperture Radar imagery based on Level Set Algorithm. Int. J. Remote Sens. 31, 4957–4968. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.485142

Ozturk, D., Sesli, F.A., 2015. Shoreline change analysis of the Kizilirmak Lagoon Series. Ocean Coast. Manag., Special Issue: Third International Symposium on Integrated Coastal Zone Management (ICZM): Towards Sustainable Coasts - "Recent developments and advancements" 118, 290–308. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.009

Spinosa, A., Ziemba, A., Saponieri, A., Damiani, L., El Serafy, G., 2021a. Remote Sensing-Based Automatic Detection of Shoreline Position: A Case Study in Apulia Region. J. Mar. Sci. Eng. 9, 575. https://doi.org/10.3390/jmse9060575

Tonye, E., Akono, A., Nyoungui, A., Nlend, C., Rudant, J.-P., 2000. Cartographie des traits de côte par analyse texturale d'images radar à synthèse d'ouverture ERS-1 et E-SAR. Teledetection 3, 183–204.

Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., Maiga, A.S., 2019. Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 8, 75. https://doi.org/10.3390/ijgi8020075

Tsekouras, G.E., Trygonis, V., Maniatopoulos, A., Rigos, A., Chatzipavlis, A., Tsimikas, J., Mitianoudis, N., Velegrakis, A.F., 2018. A Hermite neural network incorporating artificial bee colony optimization to model shoreline realignment at a reeffronted beach. Neurocomputing, Applications of Neural Modeling in the new era for data and IT 280, 32–45. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.07.070

Zollini, S., Alicandro, M., Cuevas-González, M., Baiocchi, V., Dominici, D., Buscema, P.M., 2020. Shoreline Extraction Based on an Active Connection Matrix (ACM) Image Enhancement Strategy. J. Mar. Sci. https://doi.org/10.3390/jmse8010009 Eng. 8, 9.

MONITORAGGIO INNOVATIVO DEGLI OLIVI TRAMITE PROXIMAL SENSING: STIMA DEL VOLUME DELLE CHIOME

S. Chiappini, E. S. Malinverni, R. Pierdicca

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia – (s.chiappini, e.s.malinverni, r.pierdicca@staff.univpm)

Parole chiave: Ulivo, Volume della chioma, Mobile Laser Scanner, Meshing, Agricoltura di Precisione

Key words: Olive tree, Canopy Volume, Mobile Laser Scanning, Meshing, Precision Agriculture.

Abstract

Lo sviluppo di metodi e tecniche per ricostruire il volume della chioma degli ulivi attraverso le nuvole di punti è un argomento di ricerca da tempo al centro dell'interesse di molti studiosi. Utilizzando un mobile laser scanner, abbiamo misurato i parametri di singoli alberi in un impianto olivicolo posto nel comune di Cartoceto nella Regione Marche. L'area ha ottenuto la Indicazione Geografica (IG) riconosciuta dalla legge italiana con la Denominazione di Origine Protetta (DOP). Secondo le pratiche agronomiche, abbiamo prima stimato il volume della chioma utilizzando forme geometriche semplici (paraboloide e toroide) come modelli di riferimento; poi abbiamo confrontato i valori della chioma con i volumi ottenuti da algoritmi che ricostruiscono le forme tridimensionali: forma convessa e alpha shape, per confrontare statisticamente la correlazione tra le diverse stime (Paraboloide - forma convessa R²=0,92 e Toroide – alpha shape R²=0,91). Questa analisi iniziale fornisce un punto di partenza teorico per applicazioni future, come la possibilità di usare il LIDAR nel processo di potatura meccanizzata degli olivi.

The development of methods and techniques for reconstructing olive tree canopies by point clouds is a long-established topic challenging many researchers. Using Mobile Laser Scanner, we measured single tree parameters in an olive grove in Cartoceto, Marche Region. The area is a well-known geographical indication agreed by Italian law by Protected Designation of Origin (PDO). According to the agronomic practice, we first estimated the canopy volume using geometrical primitives (paraboloid and toroidal) as ground truth. We have finally compared the canopy values with the volumes obtained by mesh algorithms: Convex hull and Alpha shape, to statistically compare pairwise correlation (Paraboloid - Convex hull R 2 = 0,92 and Toroid - Alpha shape R 2 =0,91). This preliminary analysis provides a theoretical benchmark for future implementations, such as the possibility of including LiDAR (Light Detection and Ranging) in the mechanized pruning process.

1. Introduzione

Gli ulivi sono elementi tipici del paesaggio mediterraneo e rappresentano una caratteristica significativa per più di 16 paesi nel bacino del Mediterraneo. Per la maggior parte di essi, la ricchezza economica dipende anche dal valore intrinseco ed estrinseco degli oliveti (Volpi et al., 2023). I paesaggi olivicoli sono il risultato di relazioni a lungo termine tra le comunità locali, le proprietà terriere, la gestione degli impianti e lo sfruttamento che ne deriva(Palazzo & Aristone, 2017). Queste caratteristiche sono profondamente radicate nella percezione popolare delle tradizioni locali. Inoltre, i prodotti derivati dagli ulivi sono diventati una componente chiave della Dieta Mediterranea (Riolo et al., 2022).

Il paesaggio olivicolo in Italia ha subito un significativo cambiamento dopo la Seconda Guerra Mondiale. Il processo di specializzazione e meccanizzazione delle aziende agricole, insieme ai requisiti di produttività, hanno influenzato sia il rendimento che la redditività. La filiera della produzione olivicola ha spinto gli agricoltori ad adottare elevati standard qualitativi (Lo Bianco et al., 2021). Allo stesso tempo, la migrazione di massa dalle aree rurali verso le città e l'aumento di addetti nelle attività industriali ha portato all'abbandono delle coltivazioni tradizionali e alla mancanza di manodopera qualificata (Palazzo & Aristone, 2017) (.

Oggi, lo sviluppo dell'Agricoltura di Precisione (PA) sta emergendo portando innovazione e cambiamento. Nuove strategie di gestione basate sul rilevamento delle colture sia da "remote sensing" che da "proximal sensing", combinate con la "Information and Communication Technologies" (ICT) stanno aiutando gli agricoltori e i pianificatori del territorio a resistere, preservare e sfruttare nei migliori dei modi i delicati equilibri ecologici paesaggistici (Belcore et al., 2021a)(.

L'uso di tecnologie e tecniche proposte dalla PA negli oliveti è ancora limitato attualmente. Secondo la letteratura scientifica, sono stati pubblicati pochi studi di geomatica e di analisi spaziale su questo tema (Anastasiou et al., 2023). Tuttavia, riteniamo che i sensori laser per estrarre le metriche tridimensionali degli alberi rappresentino una sfida interessante. A tal fine, il rilevamento laser terrestre (TLS) e i sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (APR) possono risultare utili. Infatti, il TLS fornisce nuvole di punti ad alta densità degli alberi rilevati (Brede et al., 2019; Malhi et al., 2018), così come l'APR che invece esegue rilievi più rapidi, anche se parte della chioma rimane nascosta dalla fronda impedendo il rilevamento sottostante (Estornell et al., 2015; Panagiotidis et al., 2022)).

Tra i diversi sistemi di rilevamento da laser, il LIDAR rappresenta un'opportunità per sviluppare metodi non distruttivi per il calcolo della biomassa in modo più preciso e a costi contenuti rispetto alle attuali misurazioni manuali sul campo (Belcore et al., 2021b).

In questo contesto, la nostra ricerca mira a stimare il volume delle chiome degli ulivi (CV) mediante Mobile Laser Scanning (MLS), una tecnica finora utilizzata prevalentemente in ambito civile. La tecnologia MLS produce una nuvola di punti formata da coordinate locali nello spazio tridimensionale per ricostruire la struttura degli alberi. Mediante la triangolazione dei soli punti posti sulla superficie esterna del modello 3D, costruisce una maglia che rappresenta la superficie dell'albero (Liu et al., 2021). In questa ricerca abbiamo testato due differenti algoritmi di mesh, la prima Convex Hull (CH), mentre la seconda Alpha Shape (AS) (Yan et al., 2019).

2. Caso studio

L'area di studio si trova nel centro Italia, nel comune di Cartoceto, nella provincia di Pesaro/Urbino, nella Regione Marche (Fig. 2, 3, 4). Questa zona ha ottenuto un'Indicazione Geografica (IG) riconosciuta dalla legge italiana come Denominazione di Origine Protetta (DOP) (Commission, 2023). L'uliveto oggetto dello studio presenta un impianto di 6x6 metri con una densità di 200-250 alberi di ulivo per ettaro, definita dagli agronomi come "specializzata". Inoltre, gli ulivi indagati hanno un'origine che risale a circa 50 anni fa, il che rende la loro struttura complessa, caratterizzata da una forma a vaso policonico, con abbondante fogliame e una grande varietà tra loro. La ricerca è stata finanziata grazie al sostegno dei fondi regionali per lo sviluppo rurale "PSR Marche 2014/2020" e dell'associazione locale degli agricoltori "Cartoceto DOP" (Consorzio Olio d.o.p. Cartoceto, 2023). L'obiettivo complessivo del progetto di ricerca è valorizzare la qualità e l'efficienza delle attività agricole dell'associazione agricola di Cartoceto, evidenziando i benefici del paesaggio olivicolo per la comunità locale e l'ambiente circostante.



Figura 1. Localizzazione dell'area di studio nella Regione Marche, Italia



Figura 2. Confini amministrativi del Comune di Cartoceto (PU)



Figura 3. Panoramica dell'uliveto analizzato

3. Metodologia

La ricerca è stata condotta per mezzo di un MLS, nello specifico Kaarta Stencil 2 (Fig. 4), che ha permesso di ottenere le nuvole dei punti dell'intero impianto olivicolo.



Figura 4. Strumento MLS: Kaarta Stencil 2

Durante l'attività sul campo, della durata di 12 minuti, è stata eseguita una camminata tracciando un percorso chiuso all'interno delle file di ulivi, coprendo un'area approssimativa di 3665 mq. La raccolta dei dati ha prodotto un totale di 102 milioni di punti (Fig. 5 e Fig. 6).



Figura 5. Vista dall'alto della nuvola di punti ottenuta con MLS



Figura 6. Vista laterale di una fila di alberi dalla nuvola di punti

A seguire, sono state acquisite le coordinate di cinque target riflettenti, posizionati a differenti quote nell'area di studio e poste in modo da ottenere una triangolazione accurata, mediante un ricevitore GNSS HIPER HR della TOPCON (Topcon, 2023).

Terminato il lavoro in campo, si è eseguito il processamento della nuvola di punti sfruttando i tools messi a disposizione da Cloud Compare (CC) (Girardeau-Montaut, 2016). Per prima cosa è stata georeferenziata la nuvola di punti sui target riflettenti individuati al suo interno, secondo il sistema di riferimento WGS84/UTM33N, utilizzando gli strumenti point picking e allineamento di CC. Per ridurre le ridondanze nel considerevole volume di dati da calcolare, per mezzo del plugin Cloth Simulation Filter (CSF) (Zhang et al., 2016), l'area viene classificata in due classi, punti a terra e punti fuori terra. Infine, si esegue il filtraggio del rumore mediante lo strumento Statistical Outlier Removal (SOR)(Girardeau-Montaut, 2016), applicato solamente alla classe fuori terra, il quale individua i punti isolati e aggregati a bassa densità. Dopo queste iterazioni, sono stati identificati 21 alberi, ridotti ai fini della ricerca solo a 12, i quali erano stati recuperati e gestiti negli ultimi anni con le tecniche agronomiche dell'AP.

Per calcolare l'accuratezza del rilievo da MLS, abbiamo bisogno di una Ground Truth (GT) (Fernández-Sarría et al., 2019a; Lin et al., 2017; Liu et al., 2021)). Diversi studi sull'uso del MLS si concentrano sul confronto tra i volumi delle chiome degli alberi misurati manualmente e quelli stimati con applicazioni di modellazione 3D, assumendo che la forma della chioma sia simile a una primitiva geometrica. Le due primitive geometriche più utilizzate sono a forma di paraboloide e toroide.

I volumi delle chiome dei singoli ulivi da utilizzare come GT sono stati calcolati utilizzando come primitive geometriche la forma parabolica (Eq. 1) (Fig. 7) e quella toroidale (Eq. 2) (Fig. 8).

$$V \text{ parabolico} = \frac{\pi D^2 H}{6} \tag{1}$$

ove

ove

D = diametro H = altezza massima della chioma



Figura 7. Approssimazione della forma paraboloide applicata alla chioma dell'ulivo

$$V toroidale = 2 \pi^2 r^2 R \tag{2}$$

r = raggio interno del toroide R = raggio massimo del toroide



Figura 8. Approssimazione della forma toroidale applicata alla chioma dell'ulivo

4. Risultati

I valori di GT calcolati, che rappresentano i volumi calcolati mediante la lettura manuale delle dimensioni delle primitive geometriche, sono stati correlati rispetto ai volumi calcolati mediante algoritmi di mesh. In questo lavoro, sono stati quindi utilizzate due diverse modellazioni tridimensionali, CH e AS, per creare delle superfici chiuse dalle nuvole di punti delle singole chiome di ulivo utilizzando il software MATLAB versione R2020b (MathWorks, Inc.).

L'algoritmo CH ricostruisce le chiome degli alberi come poliedri convessi tridimensionali con una superficie triangolare, rimuovendo tutti i punti esterni. D'altra parte, l'algoritmo AS esegue la ricostruzione geometrica da un insieme di punti non ordinati. Valori alpha più piccoli ricostruiscono accuratamente il contorno esterno della nuvola di punti. La Fig. 9 mostra la ricostruzione della chioma utilizzando l'algoritmo CH, mentre la Fig. 10 mostra la copertura ricostruita attraverso l'algoritmo AS (valore alpha: 0,5).



Figura 9. Risultato dell'algoritmo Convex Hull



Figure 10. Risultato dell'algoritmo Alpha Shape (valore 0.5)

Grazie al confronto tra i volumi delle GT e algoritmi di mesh, CH e AS, è stato possibile valutare l'accuratezza degli approcci adottati. Nel dettaglio, è ben visibile che in Fig. 11 i risultati denotano una significativa associazione positiva data dalla coppia forma paraboloide e CH ($R^2 = 0.92$), mentre in Fig. 12 una chiara correlazione è dato dalla forma toroidale e il dato ottenuto da AS ($R^2 = 0.91$).



Figura 11. Coefficiente di correlazione tra il Convex Hull rispetto alla forma paraboloide (grafico in blue) e la forma toroidale (grafico in arancione)



Figura 12. Coefficiente di correlazione tra Alpha Shape rispetto alla forma paraboloide (grafico in blue) e la forma toroidale (grafico in arancione)

D'altra parte, la correlazione è minore per le altre combinazioni di coppie, dove i valori statistici diminuiscono drasticamente, registrando $R^2 = 0,55$ e $R^2 = 0,78$. Questi risultati sono in linea con quanto riportato nella ricerca condotta in letteratura (Fernández-Sarría et al., 2019).

5. Conclusione

In questo studio, abbiamo dimostrato il potenziale del MLS nello stimare il volume delle chiome degli uliveti. I valori ottenuti dall'analisi statistica tra i volumi delle chiome di ulivo hanno mostrato che la maggiore correlazione è stata raggiunta tra i risultati della forma parabolica (GT) rispetto al volume calcolato CH. Vale la pena sottolineare che dal punto di vista grafico l'algoritmo AS riesce a modellare meglio la chioma dell'ulivo, con un risultato geometrico che si adatta meglio alla forma toroidale. È importante sottolineare che il fattore umano ha un'influenza significativa sui risultati finale poiché i valori di GT sono direttamente derivati dal modello 3D. Questa fase è soggettiva e dipende dall'interpretazione dell'utente.

Le tecniche messe in campo dall'AP dovrebbero spingere gli imprenditori agricoli verso l'uso di dispositivi per il rilevamento prossimale integrati con algoritmi di ricostruzione 3D, che fornisca le dimensioni della chioma specifiche per ogni tipo di ulivo preso in considerazione. Questi dati saranno forniti all'agricoltore per applicare le migliori pratiche agronomiche, al fine di ottimizzare l'uso delle risorse, come acqua, fertilizzanti, pesticidi e ridurre gli sprechi.

Ci auguriamo che i futuri modelli predittivi basati sulla visualizzazione 3D possano aiutare gli agricoltori a ottenere le migliori prestazioni di potatura(Lin et al., 2017), selezionando i volumi delle singole piante, da prendere in considerazione, in modo semiautomatico.

Il risparmio di tempo e l'efficienza economica del metodo proposto favoriranno l'aumento della frequenza delle rilevazioni, rendendo le pratiche di monitoraggio degli uliveti più efficaci, grazie anche a un censimento periodico da caricare su un GIS.

Gli sviluppi futuri della ricerca qui presentata, si concentreranno sul miglioramento dei risultati attraverso il confronto tra le tecniche di potatura e gli algoritmi di meshing (ad esempio usando differenti valori sia di Alpha shape che di Voxel-based). Diversi autori suggeriscono di sezionare le nuvole di punti che rappresentano le chiome lungo l'asse z e affettarle con uno spessore definito variabile tra 5-15 cm, il quale fornirà un valore del volume della chioma, più attendibile rispetto a quanto studiato in questa ricerca (Colaço et al., 2017; Fernández-Sarría et al., 2019b; Yan et al., 2019).

6. Contributi, conflitti di interessi e ringraziamenti

Contributi dei singoli autori

Idea e concezione, S.C.; metodologia, S.C.; software, S.C.; validazione, S.C.; analisi, S.C.; revisione, R.P.; supervisione, E.S.M.

Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

Conflitti di interessi: Tutti gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse da riportare.

Fonti di finanziamento

Gli autori riconoscono il finanziamento del progetto Olive-GET da parte del PSR Marche 2014-2020 (16.1), l'ospitalità e la gestione delle prove sul campo da parte dell'Az. Agr. Luvia e il contributo di Tommaso Maggioli (Cartoceto DOP).

Bibliografia

Anastasiou, E., Balafoutis, A. T., & Fountas, S. (2023). Trends in Remote Sensing Technologies in Olive Cultivation. *Smart Agricultural Technology*, *3*, 100103. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100103

Belcore, E., Angeli, S., Colucci, E., Musci, M. A., & Aicardi, I. (2021a). Precision agriculture workflow, from data collection to data management using FOSS tools: An application in Northern Italy vineyard. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/ijgi10040236

Belcore, E., Angeli, S., Colucci, E., Musci, M. A., & Aicardi, I. (2021b). Precision Agriculture Workflow, from Data Collection to Data Management Using FOSS Tools: An Application in Northern Italy Vineyard. In *ISPRS International Journal of Geo-Information* (Vol. 10, Issue 4). https://doi.org/10.3390/ijgi10040236

Brede, B., Calders, K., Lau, A., Raumonen, P., Bartholomeus, H. M., Herold, M., & Kooistra, L. (2019). Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 233(July), 111355. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111355

Colaço, A. F., Trevisan, R. G., Molin, J. P., Rosell-Polo, J. R., & Escolà, A. (2017). A method to obtain orange crop geometry information using a mobile terrestrial laser scanner and 3D modeling. *Remote Sensing*, *9*(8), 10–13. https://doi.org/10.3390/rs9080763

Commission, E. (2023). *Common agricultural policy*. https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-glance_en

Estornell, J., Ruiz, L. A., Velázquez-Martí, B., López-Cortés, I., Salazar, D., & Fernández-Sarría, A. (2015). Estimation of pruning biomass of olive trees using airborne discrete-return LiDAR data. *Biomass and Bioenergy*, *81*, 315–321. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.015

Fernández-Sarría, A., López-Cortés, I., Estornell, J., Velázquez-Martí, B., & Salazar, D. (2019a). Estimating residual biomass of olive tree crops using terrestrial laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75(August 2018), 163–170. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.019

Fernández-Sarría, A., López-Cortés, I., Estornell, J., Velázquez-Martí, B., & Salazar, D. (2019b). Estimating residual biomass of olive tree crops using terrestrial laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75(August 2018), 163–170. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.019

Girardeau-Montaut, D. (2016). CloudCompare. France: EDF R&D Telecom ParisTech, 11.

https://www.oliocartocetodop.it/. (n.d.). CONSORZIO OLIO DOP CARTOCETO. https://doi.org/https://www.oliocartocetodop.it/

Lin, W., Meng, Y., Qiu, Z., Zhang, S., & Wu, J. (2017). Measurement and calculation of crown projection area and crown volume of individual trees based on 3D laser-scanned point-cloud data. *International Journal of Remote Sensing*, *38*(4), 1083– 1100. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1265690

Liu, X., Wang, Y., Kang, F., Yue, Y., & Zheng, Y. (2021). Canopy parameter estimation of citrus grandis var. Longanyou based on lidar 3d point clouds. *Remote Sensing*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/rs13091859

Lo Bianco, R., Proietti, P., Regni, L., & Caruso, T. (2021). Planting systems for modern olive growing: Strengths and weaknesses. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(6), 1–18. https://doi.org/10.3390/agriculture11060494

Malhi, Y., Jackson, T., Bentley, L. P., Lau, A., Shenkin, A., Herold, M., Calders, K., Bartholomeus, H., & Disney, M. I. (2018). New perspectives on the ecology of tree structure and tree communities through terrestrial laser scanning. *Interface Focus*, 8(2). https://doi.org/10.1098/rsfs.2017.0052

Palazzo, A. L., & Aristone, O. (2017). Peri-urban matters. changing olive growing patterns in central Italy. *Sustainability* (*Switzerland*), 9(4). https://doi.org/10.3390/su9040638

Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., & Slavík, M. (2022). 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *112*(July), 102917. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102917

Riolo, R., De Rosa, R., Simonetta, I., & Tuttolomondo, A. (2022). Olive Oil in the Mediterranean Diet and Its Biochemical and Molecular Effects on Cardiovascular Health through an Analysis of Genetics and Epigenetics. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 16002.

Volpi, I., Marchi, S., Petacchi, R., Hoxha, K., & Guidotti, D. (2023). Detecting olive grove abandonment with Sentinel-2 and machine learning: The development of a web-based tool for land management. *Smart Agricultural Technology*, *3*, 100068. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100068

Yan, Z., Liu, R., Cheng, L., Zhou, X., Ruan, X., & Xiao, Y. (2019). A Concave Hull Methodology for Calculating the Crown Volume of Individual Trees Based on Vehicle-Borne LiDAR Data. *Remote Sensing*, *11*(6), 623. https://doi.org/10.3390/rs11060623

Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, $\delta(6)$, 1–22. https://doi.org/10.3390/rs8060501© 2021 by the authors. Open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

© 2021 degli autori. Pubblicazione open access come da termini e condizioni della licenza Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

ARCHITETTURE COMPLESSE: un rilievo integrato e multifunzionale per la mappatura completa del Palazzo dell'Emiro, Kogon (UZBEKISTAN)

L. Gorgoglione^a, R. Pierdicca^a, E. S. Malinverni^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 12, 60131 Ancona, Italy - (l.gorgoglione, r.pierdicca, e.s.malinverni)@staff.univpm.it

Parole chiave: Patrimonio Culturale, Rilievo Integrato, Scansione Laser, Ortoimmagine, Fotogrammetria.

Key words: Cultural Heritage, Integrated Survey, Laser Scanning, Orthoimage, Photogrammetry.

Abstract

La documentazione dei Beni Culturali, specialmente nel contesto delle Architetture Complesse, costituisce una sfida attuale, considerando le nuove metodologie di acquisizione dati e l'ampia mole di informazioni potenzialmente ottenibile. Diviene quindi cruciale adottare un approccio multidisciplinare e sfruttare congiuntamente varie tecniche geomatiche. Il presente studio ne rappresenta un'esemplificazione, dimostrando la necessità di integrazione tra pratiche tradizionali e moderne. Il presente articolo delinea l'iter intrapreso per la ricostruzione 3D completa di una struttura architettonica complessa: il Palazzo dell'Emiro a Kogon, in Uzbekistan. Data la dimensione e gli elementi decorativi, il principale ostacolo consisteva nel mantenere una definizione accurata senza compromettere la precisione metrologica. L'approccio adottato ha coniugato la tecnologia TLS con quella UAV per realizzare la ricostruzione tridimensionale. In parallelo, si è fatto largo uso di una rete topografica estremamente precisa, che ha agevolato l'integrazione delle nuvole di punti prodotte. Un ulteriore contributo di rilievo emerso dallo studio è rappresentato dall'impiego delle immagini panoramiche derivanti dalla tecnica TLS, unitamente alle mappe di profondità. Questa combinazione ha consentito la creazione di ortofoto altamente dettagliate, funzionali alla realizzazione di disegni in scala 1:20.

Va altresì sottolineata la natura collaborativa di tale ricerca, realizzata in partnership tra il mondo accademico e le PMI. Questo lavoro si configura come un eccellente esempio, da condividere all'interno della comunità di ricerca operante nel campo della rappresentazione e ottimizzazione tridimensionale. Le metodologie innovative sviluppate si rivelano strumenti fondamentali per la produzione di rappresentazioni 3D e disegni affidabili destinati a molteplici scopi, costituendo il punto di partenza imprescindibile per ciascun tipo di progetto.

The documentation of Cultural Heritage, especially in the context of Complex Architecture, is a current challenge, considering the new data acquisition methodologies and the vast amount of information that can potentially be obtained. It therefore becomes crucial to adopt a multidisciplinary approach and to jointly exploit various geomatic techniques. This study exemplifies this, demonstrating the need for integration between traditional and modern practices. This article outlines the process undertaken for the complete reconstruction in 3D format of a complex architectural structure: the Emir's Palace in Kogon, Uzbekistan. Given its size and decorative elements, the main obstacle was to maintain accurate definition without compromising metrological accuracy. The approach adopted combined TLS technology with UAV to achieve three-dimensional reconstruction. In parallel, extensive use was made of an extremely precise topographic network, which facilitated the integration of the point clouds produced. A further major contribution that emerged from the study was the use of panoramic images from the TLS technique, in conjunction with depth maps. This combination enabled the creation of highly detailed orthophotos, which were functional to produce 1:20 scale drawings. The collaborative nature of this research, carried out in partnership between academia and SMEs, should also be emphasised. This work stands as an example of excellence, to be shared within the research community working in the field of three-dimensional representation and optimisation. The innovative methodologies developed prove to be fundamental tools to produce reliable 3D representations and drawings for multiple purposes, constituting the essential starting point for each kind of project.

1. Introduzione

Il Governo della Repubblica dell'Uzbekistan (GoU) riconosce l'urgente necessità di un approccio globale alle città di medie dimensioni nel Paese. A tal fine, è stata richiesta l'assistenza della Banca Mondiale per lo sviluppo di un programma nazionale che andrà ad affrontare le sfide principali per migliorare la qualità della vita, la gestione urbana e la fornitura di servizi, utilizzando le migliori pratiche riconosciute a livello internazionale. Il "Progetto di Sviluppo Urbano Integrato delle Città di Medie Dimensioni" (MSCIUDP) mira a sostenere il Governo uzbeko nel migliorare la qualità della vita di alcune città di medie dimensioni in Uzbekistan. Il progetto prevede investimenti dimostrativi selezionati per migliorare le infrastrutture urbane, gli spazi pubblici e l'accesso ai servizi. A tal fine, sono stati identificati diversi siti del patrimonio culturale da restaurare e riutilizzare, e sono stati forniti servizi di supervisione della costruzione per diversi beni del patrimonio culturale selezionati nella città di Kogon. Questo articolo descriverà l'intero progetto, con un'attenzione particolare al ruolo specifico del mondo accademico nella preparazione, valutazione e validazione dei complessi dati geomatici derivati dal rilievo integrato.

In particolare, l'articolo illustrerà il lavoro condotto sul Palazzo dell'Emiro di Bukhara, che rappresenta un caso di studio interessante per le sue dimensioni, la complessità e l'articolato apparato decorativo. Questa ricerca contribuirà in modo significativo al crescente corpus di conoscenze sul restauro e il riuso adattivo dei siti del patrimonio culturale, fornendo spunti preziosi sia per gli operatori che per i responsabili delle politiche. Nel dettaglio, questa ricerca aggiunge nuove esperienze sulla piena integrazione delle tecniche geomatiche, incentrando gli sforzi sulla definizione di accuratezza data da una rete topografica molto precisa. Si dimostrerà che, sebbene le nuove tecniche di acquisizione siano in grado di automatizzare sia l'acquisizione che l'elaborazione, la realizzazione di una base metrologica molto solida fornisce una solida struttura portante alle successive fasi di intervento. Un altro importante contributo consiste nell'integrazione di pipeline sia fotogrammetriche che laser scanner, per ottenere la massima risoluzione anche in ambienti riccamente decorati.

2. Stato dell'arte

L'Architettura Uzbeka rappresenta le pagine di storia del suo popolo, ma i cambiamenti climatici e i disastri naturali, così come le attività umane, rappresentano un'enorme minaccia per la sopravvivenza di questo Patrimonio Culturale. Lo studio di architetture storiche complesse parte necessariamente da una rappresentazione grafica dettagliata e geometricamente accurata, che consente un'analisi e una comprensione completa del loro sviluppo planimetrico e volumetrico, delle loro caratteristiche strutturali, materiche e costruttive e del loro stato di conservazione (Carraro et al., 2019; Monego et al., 2019; Tucci et al., 2019).

L'integrazione di diverse tecniche geomatiche è sempre necessaria per condurre rilievi metrici di questo tipo di strutture architettoniche. Questi rilievi non sono condotti per il solo scopo di misurare, ma piuttosto per supportare analisi precise e la pianificazione di interventi di conservazione e restauro, nonché di interventi di gestione. Ognuna di queste azioni richiede un tipo di rilievo metrico distinto, con contenuti descrittivi e metrici diversi. La scelta di cosa, dove e quando utilizzare le diverse tecnologie dipende fortemente dai requisiti finali del modello 3D (Rinaudo & Scolamiero, 2021). In alcuni casi, parti diverse dello stesso edificio possono richiedere tipi di rilievi distinti. Pertanto, l'impiego di più tecniche di rilievo metrico rappresenta un approccio pratico ed efficace in termini di costi (Fassi, 2007; Owda et al., 2018; Previato et al., 2022). L'attuale tendenza a integrare diverse tecniche di misurazione è ulteriormente supportata dal fatto che ogni tecnica (come la fotogrammetria aerea e terrestre, la scansione laser, lo SLAM, ecc.) ha i propri limiti in termini di accuratezza raggiungibile e grado di dettaglio. Quindi, un approccio integrato tra l'uso di TLS - Terrestrial Laser Scanner e la fotogrammetria aerea o UAV - Unmanned Aerial Vehicle permette di sfruttare il potenziale di entrambe le tecniche ed ottenere la migliore completezza e qualità delle rappresentazioni risultanti (Barba et al., 2019; Hassan et al., 2019).

In generale, un TLS fornisce solitamente informazioni sulle facciate degli edifici, mentre la fotogrammetria aerea può fornire la prospettiva dei tetti degli stessi. In questo studio, un sistema UAV e un TLS sono stati utilizzati in un progetto integrato per acquisire nuvole di punti 3D e facilitare l'acquisizione di informazioni complete su un oggetto di interesse culturale (Xu et al., 2014). Quindi, gli UAV con la tecnologia di elaborazione delle immagini sono stati utilizzati per ottenere dati di nuvole di punti per superare e compensare i limiti del laser scanner, anche se il suo utilizzo è stato limitato dalla sua mancanza di precisione (Moon et al., 2019). Questo tipo di documentazione sarà molto importante non solo per il progetto in corso, ma anche come documentazione della situazione prima e dopo i lavori di restauro. L'approccio integrato apre nuove opportunità di rappresentazione e visualizzazione accurata e dettagliata di nuvole di punti e ortofoto ad alta risoluzione.

3. Metodologia

3.1 Caso Studio

Il Palazzo dell'Emiro si trova a 12 km dal lato est del quartiere storico della città di Bukhara, Patrimonio dell'Umanità. All'inizio, il nome del quartiere era "Nuova Bukhara", ma ora quest'area è conosciuta come Kogon. Lo scopo della costruzione del Palazzo dell'Emiro di Bukhara fu l'espansione dell'Impero russo in Asia centrale nella seconda metà del XIX secolo. Il palazzo fu costruito nel 1895 dall'Emiro Seid Abdulahad Khan, appartenente all'ultima dinastia regnante dell'Emirato di Bukhara, appartenente all'Impero russo. Infatti, l'architettura del Palazzo è stata realizzata dal famoso architetto russo Leonty Nikolaevich Benoaga e progettata secondo gli stili architettonici mauritano, arabo e barocco, con il supporto di maestri di Bukhara e russi. La funzione principale del Palazzo era l'accoglienza degli ospiti; pertanto, l'edificio fu progettato con tutti i servizi necessari: camere per gli ospiti, ristoranti, salotti, camere da letto, bagni e lussuose sale d'attesa. Alcune immagini del Palazzo sono riportate nella Figura 1.



Figura 1. Foto degli esterni e degli interni dell'Emir Palace.

L'edificio ha una struttura e una composizione complesse, basate sul principio dell'uguale percezione visiva da tutti i lati. La configurazione architettonica si basa su una sapiente combinazione di volumi di varie dimensioni, che presentano forme e conformazioni notevolmente eterogenee nella loro pianta (vedi Figura 2). Questa disposizione è articolata attraverso l'organizzazione di ampi spazi cerimoniali lungo l'asse longitudinale, con una sala di eccezionale rilevanza che spicca tra di esse.



Figura 2. Pianta del sito: Emir Palace e dintorni.

Nel complesso, l'edificio si caratterizza per la presenza di tre porte d'ingresso, distribuite su tre lati distinti della struttura.

L'ingresso principale conduce attraverso un arco aperto a un solo piano, dietro il quale si trova il volume del secondo piano e un padiglione leggermente voltato, che corona l'intera composizione con una caratteristica cupola decorativa. All'interno, numerose decorazioni intagliate ricoprono i pilastri e le travi. Innumerevoli colonne, grandi cupole e minareti fanno apparire il palazzo più grandioso.

La struttura edilizia presenta condizioni generali che possono essere considerate critiche. Emerge una leggera deformazione dell'edificio, attribuibile agli eventi sismici risalenti a circa 130 anni fa. Tale deformazione è associata alla presenza di fessurazioni verticali rilevate sulle pareti. Pertanto, si rende indispensabile l'adozione di interventi di rinnovamento per rimpiazzare i materiali obsoleti e garantire la stabilità e l'integrità dell'intero sistema tetto.

Oggi l'edificio è un monumento storico statale, di proprietà del governo dell'Uzbekistan, ed è noto come Palazzo della Cultura dei Ferrovieri (Pochekaev, 2018).

3.1 Rilievo geomatico

Considerando i requisiti specifici del progetto, la metodologia di rilievo adottata è volta a promuovere l'uso integrato di diversi sensori al fine di ottenere un modello 3D competitivo dell'edificio. Il perseguimento di una metodologia "best practice" è stato un punto focale sia nella fase iniziale che in quella operativa delle attività svolte.

È stato effettuato un accurato rilievo topografico e architettonico utilizzando le più moderne attrezzature quali laser scanner con fotocamera digitale integrata, UAV, ricevitore GNSS e stazione totale. In particolare, il rilievo richiesto sarà utilizzato come base per una chiara mappatura delle diverse tecniche costruttive e per l'identificazione dei diversi tipi di degrado, senza considerare che la documentazione prodotta sarà molto importante per tenere traccia della situazione prima e dopo i lavori di restauro.

La definizione della scala di rappresentazione comporta la progettazione della campagna di acquisizione, considerando sia i parametri che i tempi di acquisizione. I sistemi geomatici scelti per questa indagine sono i seguenti:

- drone (Fotogrammetria): DJI Phantom 4 RTK
- Laser Scanner: Faro Focus^M70 CAM2



Figura 3. Strumenti utilizzati per il rilievo 3D: a. DJI Phantom 4 RTK per la fotogrammetria aerea Close-range; b. Faro Focus^M70 CAM2.

Ogni tecnica di rilievo richiede procedure di raccolta dati diverse e ogni tecnica è caratterizzata da una diversa accuratezza e risoluzione. Pertanto, come spiegato di seguito, è stato effettuato un rilievo TLS in tutti gli spazi esterni e interni accessibili in cui era richiesta un'accuratezza in scala 1:20. Nel frattempo, la fotogrammetria digitale automatica con immagini UAV è stata presa in considerazione per il rilievo di alcune aree inaccessibili del complesso, dove si poteva accettare un'accuratezza inferiore e una scala 1:50/1:100, come i tetti e alcune parti alte delle facciate dell'edificio principale. I dati raccolti sono riportati nella Tabella 1 e descritti in dettaglio qui di seguito.

SISTEMA	SENSORE	DATASET
UAV	DJI Phantom 4 RTK	1468 immagini
TLS	Faro Focus ^M 70	146 singole
	CAM2	scansioni

Tabella 1. Panoramica generale del sensore impiegato e dei dati acquisiti.

3.1.1 Acquisizione dei dati

Le operazioni di rilievo sono state effettuate utilizzando il laser scanner Faro Focus^M70 (Tabella 2). Si tratta di uno scanner laser ad alta precisione con una telecamera HDR integrata che acquisisce immagini a colori ad alta risoluzione durante il processo di scansione. La fotocamera può anche catturare immagini panoramiche, che in questo caso erano essenziali per l'ulteriore elaborazione. Sono stati posizionati numerosi marker ad alto contrasto sulla maggior parte delle superfici verticali (pareti delle stanze, cortili, ove possibile, e facciate), con l'obiettivo di avere almeno due marker visibili da ogni posizione di scansione. Parallelamente, tutti i marcatori sono stati rilevati con una stazione totale (Leica TS-02), in modo da creare una rete poligonale all'interno di un sistema di riferimento locale (Figura 5).

Faro Focus^M70 CAM2 - Scheda tecnica

Laser scanner			
Classe del Laser	Classe 1		
Range	fino a 70 m		
Accuratezza della misurazione	±1mm		
Velocità di misurazione	fino a 976,000 punti al secondo		
Campo visivo	360° x 305°		
Camera			
Risoluzione della fotocamera HDR integrata 165 megapixels			
Range della fotocamera HDR integrata fino a 135 m			

Tabella 2. Faro Focus^M70 CAM2 Scheda tecnica: caratteristiche principali.

Il laser Faro Focus ^M70 è stato utilizzato per creare la nuvola di punti 3D del Palazzo. Tutte le stanze del primo e del secondo piano, come anche le facciate esterne, sono state scansionate posizionando diversi target. In totale il palazzo è stato scansionato da 146 posizioni (Figura 4). Il numero di stazioni TLS e la loro posizione concreta dipendono dalla topografia, dal rapporto tra altezza dell'edificio e larghezza della strada, dalla presenza di veicoli e persone, ecc. Pertanto, per registrare tutte le nuvole di punti è stato utilizzato un metodo di registrazione basato sui target. Per misurare le coordinate di ciascun target, sono stati stabiliti dei punti di controllo all'esterno e all'interno del palazzo, al primo e al secondo piano. In totale, sono stati contati 34 punti di controllo all'interno della rete topografica. La rete è stata unita anche al secondo piano dell'edificio, mentre in questo documento sono riportate solo le registrazioni del primo. Il metodo dei minimi quadrati è stato utilizzato per regolare questi punti di controllo utilizzando il software STARNET. La deviazione standard della propagazione dell'errore è stata stimata al massimo in 1 sm (Tabella 3). Quindi, a partire da questi punti di controllo, sono state stimate le coordinate di ciascun punto bersaglio utilizzando la stazione totale Leica TS-02.



Figura 4. Vista dall'alto delle posizioni delle scansioni TLS.



Figura 5. Poligonale chiusa con stazione totale e rete di punti di controllo. Esempio del primo piano.

Stazione	Х	Y	Ζ
E1	0.000000	0.000000	0.000000
E2	0.000555	0.002114	0.002222
E10	0.001734	0.002796	0.002428
E15	0.002568	0.001851	0.002596
E3	0.002853	0.003180	0.002617
E16	0.002292	0.002129	0.002410
E25	0.001481	0.002588	0.002435
E4	0.003994	0.003207	0.002652
E9	0.003604	0.003113	0.002714
E5	0.003411	0.003335	0.002709
E6	0.003833	0.004024	0.002730
E7	0.004224	0.004132	0.002924
E8	0.003684	0.003360	0.002732
E14	0.004371	0.003684	0.002948
E27	0.004652	0.003110	0.002781
E11	0.004432	0.004616	0.002938
E12	0.004204	0.004318	0.002935

E13	0.004517	0.004012	0.002958
E18	0.003844	0.004747	0.003177
E21	0.005493	0.004588	0.003437
E17	0.003453	0.004112	0.003185
E22	0.003810	0.004321	0.003455
E26	0.002745	0.002575	0.002486
E20	0.004934	0.005216	0.003609
E19	0.004441	0.005013	0.003444
E23	0.005003	0.006830	0.003679
		Deviazione	
		standard	<1sm

Tabella 3. Deviazioni standard delle coordinate della stazione (metri).

Phantom 4 RTK – Scheda tecnica			
Drone			
Peso al decollo		1391 g	
Altitudine massima sul livello del mare Autonomia di volo		6000 m circa 30 minuti	
Camera			
Sensore	1" CMOS; Pixel effettivi: 2	20M	
Ottica	Campo visivo (FOV) 84° ; (35mm equivalente al form autofocus 1m - ∞	8.8mm/24mm nato) f/2.8 - f/11	
ISO range	100 - 3200 (automatico) 100- 12800 (manuale)		
Dimensione massi dell'immagine	ima 4864×3648 (4:3) 5472×3648 (3:2)		

Tabella 4. DJI Phantom 4 RTK Scheda tecnica: caratteristiche principali.

L'acquisizione delle immagini tramite UAV è stata effettuata con un drone DJI Phantom 4 RTK. Per ottenere un'acquisizione più appropriata, sono stati effettuati tre voli per raccogliere dati dall'area esterna in modalità manuale e per evitare la mancanza di connessione GNSS dovuta alla complessità urbana intorno al complesso. I set di dati sono stati acquisiti con una configurazione di camera nadir e obliqua e poi integrati in un unico progetto fotogrammetrico per ottenere un modello aereo completo dell'area (Figura 6).



Figura 6. Nuvola di punti fotogrammetrica UAV.

3.1.2 Elaborazione dei dati



Figura 7. Metodologia - Workflow.

Per generare il modello 3D, le nuvole di punti ottenute dal laser e dall'immagine panoramica sono state elaborate con il software Metashape Agisoft®, che ha registrato tutti i set di dati utilizzando un sistema di riferimento comune (coordinate locali), con origine nel punto in cui si trovava ogni stazione. Ma prima è stato necessario eseguire i seguenti passaggi (illustrati anche nella Figura 7):

- elaborazione delle immagini per convertire le immagini bidimensionali acquisite dall'UAV in dati di nuvole di punti 3D;
- esportazione delle immagini panoramiche e delle mappe di profondità acquisite dal laser scanner (Figura 8);
- trasformazione in scala e coordinate dei dati fotogrammetrici per la fusione con i dati di scansione laser;
- ottimizzazione dei dati per facilitare l'interoperabilità e la gestione dei dati.

Per ottenere una chiara mappatura delle diverse tecniche costruttive e per identificare i diversi tipi di degrado presenti, non è stato fatto un lavoro diretto sulle nuvole di punti, sebbene fossero molto dense. Ma il flusso di lavoro SfM - Structure from Motion si è basato sulle foto panoramiche acquisite da TLS per generare un modello di superficie.

ACQUISIZIONE DATI		ELABORAZIO	NE DATI
SENSORI	IMMAGINI	PRODOTTI E FUNZIONAMENTO	SOFTWARE
Fotogrammetria terrestre Close – range	Sferiche	Nuvola di punti	Agisoft ®
Fotogrammetria aerea Close – range	Frame	Approceio SfM	Metashape

Tabella 5. Acquisizione ed elaborazione dati

Dopo aver caricato tutte le immagini e i dati della scansione laser nel progetto Metashape, non è stato eseguito il tradizionale flusso di lavoro di costruzione del modello, ma è stato utilizzato uno speciale script per poter allineare le panoramiche sferiche. L'allineamento viene quindi eseguito utilizzando i punti corrispondenti tra le scansioni, che vengono utilizzati per triangolare le posizioni delle telecamere nello stesso spazio durante il rilievo. Al termine dell'allineamento, la mesh viene generata sulla base di mappe di profondità, che utilizzano correttamente i dati di profondità della scansione laser e incorporano queste informazioni nel processo di ricostruzione delle mappe di profondità dell'immagine digitale.

Questa procedura è stata eseguita sia per l'elaborazione degli interni che degli esterni del Palazzo dell'Emiro, ma separatamente, poiché erano richieste scale di dettaglio differenti.





b.



Figura 8. Esempio di immagini panoramiche da scanner laser: a. diffusa; b. mappe di profondità; c. normale.

Per ottenere una mesh completa dell'esterno dell'edificio, è stato necessario integrare alla mesh ottenuta attraverso l'elaborazione delle scansioni da TLS la mesh prodotta dalla nuvola di punti ricostruita con immagini UAV. Se le scansioni TLS sono essenziali per migliorare i dettagli della superficie, le scansioni UAV forniscono informazioni generali sulla geometria della scena. L'accuratezza limitata di queste ultime a livello di immagine è considerata sufficiente per rivelare la forma e la struttura della superficie.



Figura 9. Unione delle Mesh.



Figura 11. Ortofoto ad alta risoluzione in scala 1:50. Esempio della facciata principale.



Figura 10. Ortofoto ad alta risoluzione in scala 1:20. Esempio della Sala D: mesh e ortofoto

L'integrazione delle due superfici migliora la completezza della copertura, consentendo la modellazione di dettagli e oggetti complessi del patrimonio. La mesh globale del Palazzo risulta avere un livello di dettaglio leggermente inferiore a causa della differenza di risoluzione tra le immagini sferiche e quelle fotogrammetriche, pur mantenendo un livello di dettaglio in scala 1:50.

Mentre, per ogni spazio interno rilevato, circa 30 stanze, è stato realizzato un progetto individuale per raggiungere il livello di dettaglio richiesto in scala 1:20.

Le informazioni sul colore ottenute dalla fotocamera dello scanner sono state poi utilizzate per generare le varie ortofoto necessarie per il progetto di restauro. Infatti, le ortofoto generate da mesh si ottengono elaborando un modello 3D basato su una mesh, ottenendo una proiezione ortogonale dell'oggetto fotografato (Xu et al., 2014). L'uso di ortofoto generate in tal modo è importante poiché fornisce un'immagine precisa e dettagliata dell'architettura in questione, consentendo l'identificazione precisa dei dettagli della struttura e la pianificazione di interventi di restauro mirati. In particolare, questo tipo di immagini può essere utilizzato per individuare lesioni, crepe e altri problemi strutturali che potrebbero essere difficili da rilevare con altre tecniche (Cera et al., 2017; Okada et al., 2016). Con la stessa procedura sono state ottenute le ortofoto dei prospetti esterni, delle sezioni longitudinali e delle piante del Palazzo e delle sue stanze, compresi i pavimenti e le ipografie (Figure 10 - 12).



Figura 12. Ortofoto ad alta risoluzione per la rappresentazione in scala 1:20. Dettaglio: ipografia.

4. Risultati

Utilizzando un approccio basato sull'indagine in loco, sono stati generati modelli tridimensionali dell'edificio oggetto di studio e di quelle parti destinate all'analisi e al restauro. Sono state ottenute ortofoto rappresentanti le piante, le sezioni e i prospetti, accompagnate da disegni metrici di rilievo corrispondenti. Questa tipologia di documentazione si rivelerà cruciale non solo per il contesto del progetto in corso, ma altresì per la documentazione pre e post restauro.

Parallelamente, è stata effettuata un'ampia raccolta di dati e una ricerca storica al fine di approfondire la comprensione dell'evoluzione degli edifici e del loro contesto circostante, oltre ad acquisire altre informazioni rilevanti per il progetto, quali simili tipologie edilizie, legislazioni e norme applicabili, nonché localizzazione e proprietà dei servizi pubblici. Attraverso l'impiego delle metodologie precedentemente delineate, diversi stakeholder ed esperti hanno potuto condurre una varietà di analisi. Un risultato primario dell'attività svolta è stato la creazione di un'esaustiva documentazione, flessibile e adattabile a diverse finalità. In particolare, il modello tridimensionale sviluppato si è dimostrato interattivo e interrogabile, consentendo la decomposizione dell'intero edificio secondo esigenze specifiche. Particolare attenzione è stata dedicata alla produzione di varie mappe di degrado e materiali, poiché tali rappresentazioni si rivelano strumenti essenziali all'interno di un progetto di restauro relativo a un edificio storico. Nel contesto del restauro di edifici storici, si è proceduto alla realizzazione di una mappa del degrado che illustra visivamente le attuali condizioni dell'edificio. Tale mappa ha lo scopo di evidenziare le aree soggette a degrado o deterioramento, rilevando tali problematiche sia nelle strutture portanti che nelle superfici e elementi Questa negli ornamentali. rappresentazione cartografica è rivelata elemento cruciale si un nell'individuazione delle priorità di intervento e nella definizione delle misure necessarie per il recupero dell'edificio nelle sue condizioni originarie. Inoltre, la mappa del degrado ha consentito di identificare i fattori esterni responsabili del deterioramento dell'edificio, quali inquinamento atmosferico, piogge acide e umidità. Un esempio di questo output è riportato nella Figura 13b. In modo analogo, è stata elaborata una mappa dei materiali, che graficamente illustra le diverse tipologie di materiali impiegate nella costruzione dell'edificio storico, quali pietra, mattoni, legno, ferro, vetro e altri ancora. Questa mappa ha dimostrato la sua utilità nell'identificare i materiali originali utilizzati nella costruzione dell'edificio, orientando così la scelta degli interventi di restauro più idonei per ciascun tipo di materiale coinvolto. Ad esempio, la mappa dei materiali può

mettere in evidenza l'utilizzo di pietre particolari, potenzialmente difficili da reperire, le quali richiedono un'attenzione e una cura speciali durante il processo di restauro (Figura 13a).

Sia la mappa del degrado che quella dei materiali risultano elementi fondamentali per la buona riuscita di un progetto di restauro. Questi strumenti agevolano l'individuazione degli interventi più appropriati per la salvaguardia e la conservazione dell'edificio storico, garantendo al contempo che il processo di restauro sia condotto secondo criteri scientificamente validi. Diversi articoli scientifici hanno discusso l'importanza di questi strumenti nei progetti di restauro dei Beni Culturali. Ad esempio, uno studio di Franco et al. (2017) ha evidenziato l'importanza della mappatura del degrado nel restauro di edifici storici, dimostrando come questo strumento possa aiutare a identificare le cause del degrado e a guidare la selezione di interventi di restauro appropriati. Analogamente, uno studio di Ferreira et al. (2020) ha sottolineato l'importanza della mappatura dei materiali nel restauro dei beni culturali, discutendo l'importanza di identificare e caratterizzare i materiali originali utilizzati negli edifici storici per garantirne la corretta conservazione e preservazione.

Il contributo del lavoro proposto va in questa direzione, sviluppando una strategia che consente a diversi esperti di cooperare all'interno dello stesso modello accurato, con un elevato grado di precisione. Infatti, una volta registrata la nuvola di punti 3D in Recap, il vantaggio di importarla in un software fotogrammetrico e di gestirla completamente al suo interno risiede nella possibilità di estrarre dati con il livello di dettaglio richiesto, scomponendo l'edificio in sotto elementi ed elaborando i diversi dati "on-demand".

5. Conclusioni

In questo lavoro è stata proposta una combinazione di tecniche geomatiche per documentare un edificio complesso. Il lavoro, oltre ad adottare procedure consolidate, conferma l'importanza di sfruttare la rete topografica per la registrazione delle nuvole di punti TLS, con una precisione millimetrica per l'intero edificio. La rete poligonale è stata essenziale anche per la fusione dei dati fotogrammetrici e per la validazione dei successivi "sottoprodotti" dell'elaborazione. In conclusione, l'uso delle tecnologie della fotogrammetria e del laser scanner fornisce approcci diversi al rilievo di un Bene Culturale, ciascuno con i propri punti di forza e di debolezza. L'approccio fotogrammetrico è economicamente vantaggioso, ma il suo software per applicazioni a distanza ravvicinata è ancora limitato nella generazione automatica di modelli di superficie densi. L'approccio laser scanner, invece, è costoso ma è



Figura 13. Disegni di progetto: a. Mappatura dei materiali; b. Mappatura del degrado.

indispensabile per ottenere modelli accurati in casi complessi. Entrambe le metodologie richiedono un rilievo topografico per i test di qualità e procedure di georeferenziazione precise, e l'aspetto della modellazione diventa sempre più importante. Tuttavia, l'integrazione di questi due sistemi ha dimostrato di garantire un rilievo 3D rapido ed efficiente per architetture storiche complesse. Vale la pena sottolineare che, in casi come questo in cui non sono disponibili software commerciali per l'elaborazione dei dati TLS, l'integrazione della mappa di profondità dalle immagini panoramiche TLS può essere una valida alternativa per ottenere il massimo risultato possibile sia in termini di accuratezza che di qualità delle immagini; infatti, si potrebbero stampare ortofoto con una scala di rappresentazione inferiore a 1:20. La ricerca condotta mostra come la procedura di integrazione tra i due sistemi garantisca un rilievo 3D rapido ed efficiente per architetture storiche complesse, come il Palazzo dell'Emiro. Il lavoro, svolto in grazie ad una solida collaborazione tra mondo accademico e PMI, è un ottimo esempio (utile da condividere all'interno della comunità di ricerca che si occupa di rappresentazione e ottimizzazione 3D) di metodologie innovative sviluppate per produrre disegni e rappresentazioni 3D affidabili per diversi scopi, essendo il punto di partenza per ogni tipo di progetto.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato in parte realizzato nell'ambito del progetto "Servizi di consulenza per la preparazione del progetto dettagliato, dei documenti di gara e della supervisione della costruzione per il restauro e il riutilizzo adattivo del palazzo dell'emiro e di alcuni beni culturali selezionati a Kogon" dal Ministero degli investimenti e del commercio estero della Repubblica dell'Uzbekistan. Gli autori desiderano ringraziare pertanto lo Studio Planarch s.r.l. di Roma e il Prof. Fulvio Rinaudo, Vicerettore dell'Università di Taschkent per l'opportunità di partecipare al progetto.

Bibliografia

Barba, S., di Filippo, A., Limongiello, M., & Messina, B. (2019). Integration of active sensors for geometric analysis of the chapel of the Holy Shroud. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *42*, 149-156.

Carraro, F., Monego, M., Callegaro, C., Mazzariol, A., Perticarini, M., Menin, A., ... & Giordano, A. (2019). The 3d survey of the roman bridge of San Lorenzo in Padova (Italy): a comparison between sfm and tls methodologies applied to the arch structure. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences.*

Cera, M., Fiorini, L., & Chiabrando, F. (2017). UAV-based photogrammetric techniques for monitoring the structural health of large-scale heritage architecture. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 42(2), 129-136.

Fassi, F. (2007). 3D modeling of complex architecture integrating different techniques–a critical overview. 3D-ARCH 2007 Proceedings: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, ETH Zurich, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 5.

Ferreira, V., Fernandes, I., Dias, A., & Pinto, A. (2020). Cultural heritage materials mapping: An overview of methodologies and techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 43, 149-163.

Franco, R., Martín, J. F., & García-Gutiérrez, J. (2017). Mapping of decay in historic buildings: methodology and application to a case study. *Heritage Science*, 5(1), 1-16.

Hassan, A. T., & Fritsch, D. (2019). Integration of Laser Scanning and Photogrammetry in 3D/4D Cultural Heritage Preservation–A Review. *International Journal of Applied*, 9(4).

Monego, M., Previato, C., Bernardi, L., Menin, A., & Achilli, V. (2019). Investigating Pompeii: Application of 3D geomatic techniques for the study of the Sarno Baths. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24, 445-462.

Moon, D., Chung, S., Kwon, S., Seo, J., & Shin, J. (2019). Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. Automation in Construction, *98*, *322-331*.

Okada, Y., Ben-Dor, E., Shimizu, K., & Kushibiki, T. (2016). Photogrammetric and spatial 3D modeling for documentation and preservation of cultural heritage sites: Case study of the Tower of David, Jerusalem. Journal of Cultural Heritage, 17, 44-53.

Owda, A., Balsa-Barreiro, J., & Fritsch, D. (2018). Methodology for digital preservation of the cultural and patrimonial heritage: Generation of a 3D model of the Church St. Peter and Paul (Calw, Germany) by using laser scanning and digital photogrammetry. *Sensor Review*.

Pochekaev, R. (2018). New Bukhara: An'Island'of Russia in Central Asia. *Higher School of Economics Research Paper No.* WP BRP, 86.

Previato, C., Monego, M., Menin, A., & Achilli, V. (2022). A multi-scalar approach for the study of ancient architecture: Structure for Motion, laser scanning and direct survey of the Roman theatre of Nora (Cagliari, Sardinia). *Journal of Archaeological Science: Reports*, *43*, 103440.

Rinaudo, F., & Scolamiero, V. (2021). Comparison of multisource data, integrated survey for complex architecture documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 625-631.

Tucci, G., Rihal, S., Betti, M., Conti, A., Fiorini, L., Kovacevic, V. C., & Bartoli, G. (2019). Ground based 3d modelling (photogrammetry and tls)-survey, documentation and structural assessment of xx century cultural heritage in india–a case study of the masonry vaults in dehradun. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences.*

Xu, Z., Wu, L., Shen, Y., Li, F., Wang, Q., & Wang, R. (2014). Tridimensional reconstruction applied to cultural heritage with the use of camera-equipped UAV and terrestrial laser scanner. *Remote* sensing, 6(11), 10413-10434.

RILIEVO DI GIARDINI STORICI: FOTOGRAMMETRIA MULTI-CAMERA E LASER SCANNER PORTATILE A CONFRONTO

L. Perfetti a, F. Fassi b, G. P. M. Vassena a

 ^a DICATAM, Dip. di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e Matematica, Università degli Studi di Brescia, (luca.perfetti, giorgio.vassena)@unibs.it
 ^b ABC, Dip. Di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, francesco.fassi@polimi.it

Parole chiave: Fotogrammetria, Multi-camera, Laser scanner portatile, Nuvola di punti, Giardini storici

Keywords: Photogrammetry, Multi-camera, Handheld Laser Scanner, Point Cloud, Historical Gardens

Abstract

Il presente lavoro presenta un'indagine sulla caratterizzazione dei giardini storici confrontando due metodologie di rilievo 3D. In questo contesto, gli approcci che impiegano laser scanner statici sono considerati i più accurati, mentre i laser scanner portatili sono considerati promettenti grazie alla loro estrema produttività. Meno comune è l'uso della fotogrammetria. Questo articolo confronta due approcci basati sull'uso di un Mobile Mapping System (MMS) indossabile e sull'uso di uno strumento fotogrammetrico multi-camera. Il confronto mira a valutare l'applicabilità delle due tecniche in questo campo, valutandone vantaggi e svantaggi nel rilievo di un giardino storico e nell'estrazione di informazioni riguardo le alberature, come il DBH (Diameter at Breast Height) e l'impronta della chioma. Abbiamo confrontato la praticità delle operazioni di rilievo e di elaborazione, nonché la qualità e le caratteristiche delle nuvole di punti ottenute. Entrambi i sistemi hanno prodotto una rappresentazione densa del terreno. Il rilievo multi-camera è risultato più definito grazie al minor rumore della nuvola di punti, ma incompleto nella definizione delle chiome degli alberi. Il DBH dei tronchi degli alberi può essere estratto con entrambi i sistemi, ad eccezione dei tronchi più sottili e di diametro più fine rilevati dall'approccio MMS, ma non sempre dalla multi-camera. L'approccio MMS si è rivelato più efficace grazie al minor tempo di rilievo necessario per coprire un'area uguale e al fatto che il solo rilievo MMS è sufficiente per la descrizione geometrica degli alberi. Al contrario, l'approccio multi-camera non può evitare l'integrazione con un rilievo aereo per la ricostruzione della chioma.

This paper presents an investigation into the characterization of historic gardens by comparing two 3D survey methodologies. In this context, approaches employing static laser scanners are considered the most accurate, while portable laser scanners are considered promising due to their extreme productivity. Less common is the use of photogrammetry. This paper compares two approaches based on the use of a wearable Mobile Mapping System (MMS) and the use of a multi-camera photogrammetric prototype. The comparison aims to assess the applicability of the two techniques in this field, evaluating their advantages and disadvantages in surveying a historic garden and extracting information regarding trees, such as DBH (Diameter at Breast Height) and canopy footprint. We compared the practicality of surveying and processing operations and the quality and characteristics of the point clouds obtained. Both systems produced a dense representation of the terrain. The multi-camera survey was more defined due to less point cloud noise, but incomplete in the definition of tree crowns. DBH of tree trunks could be extracted with both systems, except for thinner and finer diameter trunks detected by the MMS approach, but not always by the multi-camera. The MMS approach proved to be more effective due to the shorter survey time required to cover an equal area and the fact that the MMS survey alone is sufficient for the geometric description of trees. In contrast, the multi-camera approach avoid integration with an aerial survey for canopy reconstruction.

1. Introduzione

I giardini storici fanno parte del patrimonio culturale e sono presenti nel centro storico di molte città. Oggi, dopo essere stati chiusi al pubblico come proprietà privata per gran parte della loro storia, svolgono anche una funzione sociale come parchi pubblici e spazi di aggregazione nei centri storici. I giardini storici richiedono una manutenzione continua, spesso interventi urgenti di conservazione e valorizzazione. Tutti questi interventi necessitano prima di un processo conoscitivo preliminare a cui contribuisce il rilievo geometrico, ovvero la descrizione geometrica e la successiva restituzione grafica del sito in questione. Da questo processo deriva la definizione dei dislivelli, dei percorsi pedonali, degli arredi del parco, delle piante, della vegetazione e delle loro relazioni. Questo processo confluisce tipicamente nella redazione di disegni tecnici come la restituzione 2D: piante, sezioni, prospetti, ortofoto, o anche in database informativi GIS (Geographic Information System) e prodotti 3D (Cazzani et al., 2019; Malinverni et al., 2019) che possono essere utilizzati per la manutenzione periodica a lungo termine del giardino. A tal fine, assumono un ruolo centrale la raccolta di misure, il rilievo strumentale e le indagini finalizzate alla corretta annotazione degli elementi di interesse, come le essenze presenti nel giardino. La stazione totale è lo strumento tipicamente utilizzato in questa applicazione per redigere la planimetria e creare il modello digitale del terreno. Più recentemente, viene impiegata anche strumentazione in grado di acquisire nuvole di punti 3D. Trovano quindi grande impiego i laser scanner terrestri (TLS), la fotogrammetria e i Mobile Mapping System (MMS). Questi metodi consentono di descrivere in modo completo anche le geometrie più complesse del terreno e di estrarre specifiche metriche per descrivere le alberature, quali: il DBH (Diameter at Breast Height), l'altezza del tronco e l'ampiezza della chioma, necessarie per catalogare

ed analizzare gli alberi anche nel contesto forestale. Gli approcci che impiegano i TLS sono considerati i più accurati dalla letteratura per la stima di tali metriche e sono, quindi, i più utilizzati per acquisire dati di riferimento affidabili con cui confrontare altri approcci. D'altra parte, gli MMS sono oggi gli strumenti più promettenti per questa applicazione, grazie alla loro estrema produttività e alla completezza della nuvola di punti 3D che sono in grado di produrre. Inoltre, l'accuratezza richiesta per questa applicazione può essere soddisfatta anche da MMS specificatamente progettati per l'utilizzo in ambienti interni, i quali hanno il pregio di essere più maneggevoli ma il difetto di impiegare sensori LiDAR (Light Detection And Ranging) caratterizzati da alti livelli di rumore (2-3 cm). In effetti, la letteratura recente è ricca di analisi sull'uso degli MMS per il rilievo 3D di giardini e parchi storici e per applicazioni di inventario forestale. In ambito forestale, Hyyppä et al. (2020) hanno presentato un confronto tra MMS multipiattaforma: uno zaino auto progettato, ZEB Horizon prodotto da Geoslam e due piattaforme UAV (Unmanned Aerial Vehicle); mentre Gollob et al. (2020) hanno testato l'estrazione di DBH di diversi diametri dai dati di ZEB Horizon. Nel contesto dei giardini storici, Pérez-Martín et al. (2021) hanno testato l'MMS portatile ZEB Revo per l'estrazione di DBH; Hess & Ferreyra (2021) hanno presentato un'applicazione di caratterizzazione dei giardini utilizzando lo ZEB Horizon; Del Duca & Machado (2023) hanno confrontato le prestazioni del Leica BLK2GO rispetto a un TLS. Altri autori hanno studiato l'uso di un approccio fotogrammetrico basato su immagini terrestri per l'estrazione di modelli del fusto e DBH: Liang et al. (2014) hanno testato la fotogrammetria per il rilievo di parcelle forestali, riportando una capacità limitata nella mappatura di alberi di piccole dimensioni; Forsman et al. (2016) hanno proposto l'uso di un sistema multi-camera riportando tempi di acquisizione più rapidi ma risultati inferiori rispetto al TLS; Mokros et al. (2021), in un test di confronto tra strumenti a basso costo per l'inventario forestale, hanno testato un approccio multi-camera riportando tempi di acquisizione più brevi ma non la migliore accuratezza; infine, Murtiyoso et al. (2022) hanno testato la fotogrammetria sferica per la ricostruzione dei fusti. Tutti i rilievi basati su immagini terrestri mostrano una ricostruzione densa dei fusti degli alberi vicino al suolo. Al contrario, la parte superiore degli alberi, le foglie e i rami non vengono ricostruiti.

1.1 Obiettivo dell'articolo

In questo contesto, il presente lavoro presenta un'indagine sulla caratterizzazione dei giardini storici confrontando due metodologie di rilievo tridimensionale: l'uso di un sistema MMS indoor indossabile e di uno strumento fotogrammetrico multi-camera. Il confronto mira a valutare l'applicabilità delle due tecniche in questo campo, valutandone vantaggi e svantaggi. Si concentra su due diversi aspetti: (i) l'ottenimento dei dati, ossia le caratteristiche della fase di rilievo geometrico in situ e della fase di elaborazione dei dati; e (ii) la qualità dei dati, ossia le caratteristiche delle nuvole di punti e delle informazioni estratte. Per quanto riguarda il primo aspetto, vengono evidenziate la praticità e la velocità delle operazioni e i problemi incontrati. In relazione al secondo aspetto, invece, viene approfondito il confronto qualitativo delle nuvole di punti ottenute, indagando sulla completezza delle diverse geometrie acquisite, siano esse strutture architettoniche o alberi. L'indagine qualitativa è stata condotta attraverso il confronto visivo di porzioni estratte delle nuvole di punti e di sezioni orizzontali e trasversali degli alberi e del terreno.

2. Caso studio e strumentazione utilizzata

Il caso studio in cui è stato condotto il test è il giardino storico di Villa Burba, una villa nobiliare situata nel comune di Rho (provincia di Milano). Il giardino ha una pianta rettangolare e misura circa 160 m per 100 m; al suo interno sono presenti arbusti e alberi di varie dimensioni, tra cui pregevoli alberi secolari, un piccolo bacino d'acqua e alcune strutture architettoniche sia storiche sia moderne (Figura 1). L'ambiente del giardino risponde alle esigenze del test consentendo di confrontare le metodologie di rilievo fotogrammetrico MMS e multi-camera in termini di tempo necessario per ottenere il rilievo geometrico dell'intero parco e in termini di descrizione tridimensionale delle strutture architettoniche e degli alberi. Gli strumenti utilizzati sono: il laser scanner portatile Heron MS Twin Color (di seguito chiamato Heron Backpack - Figura 2), prodotto da Gexcel srl, e un prototipo del sistema multi-camera fotogrammetrico portatile Ant3D (Figura 3), sviluppato nell'ambito di un'attività di ricerca di dottorato da 3DSurveyGroup (Perfetti, 2022; Perfetti et al. 2022a; Perfetti et al. 2022b). Entrambi gli strumenti consentono di effettuare rilievi in movimento e vengono qui utilizzati al di fuori del loro campo di applicazione principale. Heron Backpack è uno strumento sviluppato per l'uso in interni o in ambienti caratterizzati da una forte geometria, mentre Ant3D è uno strumento progettato per il rilievo di spazi stretti simili a tunnel. Al termine delle fasi di acquisizione ed elaborazione, entrambi gli strumenti producono nuvole di punti colorate. Un precedente test tra questi due strumenti è stato eseguito da Marotta et al. (2022b), dove gli oggetti di confronto erano la deriva strumentale in lunghe acquisizioni non vincolate e la qualità dei dati acquisiti in termini di completezza, intervallo di misura e rumore della nuvola di punti. La presente indagine mira ad ampliare il confronto qualitativo.



Figura 1. Fotografie del giardino storico di Villa Burba.



Figura 2. Immagini delle attività di rilievo svolte con Heron Backpack nel Giardino di Villa Burba.



Figura 3. Attività di rilievo con il sistema multi-camera Ant3D e un'immagine di dettaglio dello strumento.

2.1 Heron MS Twin – Mobile Mapping System

Heron Backpack consiste in uno zaino che ospita i sensori dello strumento e un dispositivo di interfaccia utente: tablet o PDA (Personal Digital Assistant). Lo zaino ospita il dispositivo di misura, l'unità di controllo, l'unità inerziale e una telecamera panoramica per la colorazione delle nuvole di punti. Il dispositivo di misura è costituito da due sensori Velodyne Puck LITE da 16 linee ciascuno, il primo posizionato orizzontalmente e il secondo con un angolo di 45° (Figura 2). L'acquisizione avviene mentre si cammina nell'ambiente da rilevare. Durante l'elaborazione dei dati, la traiettoria dello strumento viene ricostruita in base alle informazioni acquisite dal sensore inerziale e in base all'elaborazione SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) svolta nel software proprietario Heron Desktop. La precisione locale nominale è di 3 cm a causa del rumore dei sensori Velodyne. L'accuratezza globale, invece, è funzione della presenza o meno di vincoli come i punti di controllo a terra (GCP - Ground Control Point), della lunghezza dell'acquisizione e della geometria dell'ambiente circostante (Marotta et al. 2022a).

2.2 Ant3D – Sistema multi-camera

Ant3D (Figura 3) è un prototipo funzionante di uno strumento di misura sviluppato per il rilievo efficace e robusto di spazi stretti e tortuosi. Lo strumento è composto da un dispositivo portatile e da uno zaino. Il dispositivo portatile ospita cinque telecamere Flir BFS 50S5 con un sensore a colori da 5 megapixel da 2/3 pollici (2448 x 2048 pixel, passo tra pixel di 3,45 μ m). Ogni telecamera monta un'ottica fisheye di tipo equidistante con un campo visivo di 190°. Le telecamere sono disposte lungo i lati di un rettangolo rivolte verso l'esterno e distanziate da una base di presa che varia da 10 cm a circa 30 cm. Il sistema offre una visione emisferica completa, ad esclusione del lato occupato dall'operatore. Sul dispositivo portatile sono alloggiati tre illuminatori a LED e un monitor. Lo zaino ospita la batteria e l'unità di controllo del dispositivo. Il rilievo avviene tramite l'acquisizione sincronizzata e temporizzata delle immagini; l'operatore imposta la frequenza dei fotogrammi prima di avviare l'acquisizione. Il sistema è privo di sensori inerziali e di posizionamento. Pertanto, la ricostruzione tridimensionale si basa sull'elaborazione delle immagini acquisite mediante pipeline Structure from Motion (SfM) e multi-view stereo. In questo modo si ottiene una nuvola di punti dell'ambiente attraversato durante il rilievo. In Perfetti et al. (2022a, 2022b), vengono illustrati due test di accuratezza del sistema multi-camera nel rilievo di spazi angusti senza vincoli GCP, mentre Marotta et al. (2022b) confrontano il sistema multi-camera e Heron Backpack lungo un sentiero di montagna.

3. Acquisizione ed elaborazione dei dati

I due strumenti a confronto sono stati utilizzati insieme ad altra strumentazione per implementare una procedura di rilievo completa e realmente utilizzabile, che include un appoggio topografico per l'acquisizione dei GCP. In questo modo sono stati confrontati due approcci al rilievo completo e non solo le capacità dei singoli sensori. Ciò ha permesso anche di mitigare gli svantaggi principali già noti dei due strumenti: ad esempio, l'elevato errore di deriva delle acquisizioni non vincolate di Heron Backpack e lo scarso campo di misura della multicamera Ant3D (Marotta et al. 2022b). In particolare, sono stati condotti un appoggio topografico, un rilievo fotogrammetrico UAV e un rilievo fotogrammetrico terrestre con fotocamera DSLR (Digital Single Lens Reflex). L'appoggio topografico integra entrambi gli approcci, mentre i rilievi UAV e DSLR compensano per il ridotto raggio di acquisizione della multicamera. Pertanto, i due approcci qui confrontati per la caratterizzazione del giardino storico prevedono l'uso dei seguenti strumenti:

- Heron Backpack, Stazione totale
- Multicamera Ant3D, Stazione totale, UAV, DSLR

3.1 Appoggio topografico

È stata materializzata una rete topografica provvisoria composta da 5 vertici, che si estendeva per tutto il giardino della villa. Da questa rete sono state misurate le coordinate di 53 GCP materializzati sul terreno. I GCP sono stati misurati con un'accuratezza di circa 1-2 cm. La misurazione dei GCP ha permesso di vincolare la verticalità delle ricostruzioni e di contenere le derive strumentali.

3.2 Rilievo fotogrammetrico UAV

Il sistema multi-camera Ant3D è caratterizzata da un raggio di acquisizione ridotto, pari a 4-5 m, a causa del GSD (Ground Sampling Distance) risultante dalla configurazione multicamera utilizzata. Ciò ha portato a una scarsa ricostruzione della parte superiore degli alberi. Un comportamento simile è stato mostrato da Mokros et al. (2021). Ne consegue che è necessario integrare i dati mancanti con ulteriori rilievi per completare il rilievo degli alberi e, quindi, la caratterizzazione del giardino. Pertanto, è stato eseguito un rilievo UAV dell'intera area del giardino della villa e dei suoi dintorni. Utilizzando l'UAV DJI Phantom 4 Pro v2, sono state acquisite 606 fotografie seguendo un piano di volo automatico a griglia eseguito a 50 m dal suolo. Il rilievo UAV è stato vincolato agli stessi GCP materializzati per il rilievo terrestre.

3.3 Rilievo fotogrammetrico terrestre – DSLR

Un rilievo fotogrammetrico terrestre dei muri perimetrali in mattoni del giardino storico, che ha alcuni portali d'ingresso che superano i 4 m di altezza e presenta numerose opere scultoree, è stato condotto per ovviare al limitato campo di misura della tecnica multi-camera. L'indagine è stata condotta con una reflex Nikon D750 dotata di un obiettivo da 16 mm, con cui sono state acquisite 1960 immagini. Queste sono state elaborate secondo la pipeline SfM insieme alle immagini multi-camera.

3.4 Heron MS Twin - rilievo ed elaborazione dei dati

Per il rilievo con Heron Backpack sono state effettuate 3 acquisizioni. Ognuna di esse aveva un punto di partenza baricentrico rispetto all'intero parco e un punto di arrivo prossimo a quello di partenza, garantendo la chiusura di un anello di acquisizione. Le acquisizioni MMS sono state effettuate principalmente lungo i sentieri esistenti nel parco e solo eccezionalmente percorrendo alcuni tratti di prato per raggiungere aree altrimenti troppo lontane dai sentieri. La Figura 4 (a) mostra i percorsi calcolati delle 3 traiettorie acquisite con Heron Backpack, mentre la Tabella 1 riassume i dettagli del rilievo Heron Backpack, che ha richiesto circa 30 minuti per essere completato.

I dati acquisiti sono stati elaborati con il software proprietario Heron Desktop commercializzato da Gexcel srl.

	Durata	Lunghezza	N° di punti
Acquisizione 1	00:10:03	590 m	262 Mln
Acquisizione 2	00:10:28	596 m	261 Mln
Acquisizione 3	00:07:14	444 m	193 Mln

Tabella 1. Riassunto dei dati delle 3 acquisizioni effettuate con Heron Backpack.



Figura 4. Vista in pianta delle due nuvole di punti ottenute. Sono evidenziate le rispettive traiettorie seguite durante l'acquisizione. Rilievo Heron Backpack (a), rilievo Ant3D (b) e rispettivi zoom delle nuvole di punti: Heron Backpack (c), Ant3D (d).

L'elaborazione dei dati prevede, in una prima fase, la stima del percorso delle singole traiettorie sulla base dei dati acquisiti dall'unità inerziale e dai sensori LiDAR e, in una seconda fase, la realizzazione della cosiddetta "chiusura del loop", ovvero un'ottimizzazione congiunta delle traiettorie delle diverse acquisizioni in cui vengono creati automaticamente o manualmente dei vincoli tra dati acquisiti in tempi diversi ma relativi alla stessa posizione. In questa seconda fase, è anche possibile realizzare vincoli tra punti identificati manualmente sulla nuvola di punti e le coordinate dei GCP. I punti sono stati identificati con un'accuratezza stimata di circa 2 cm. L'errore medio sui GCP alla fine dell'ottimizzazione era di circa 5 cm. Marotta et al. (2022a) descrivono più dettagliatamente la fase di elaborazione dei dati di Heron Backpack. La Figura 4(a, c) mostra i dati ottenuti al termine dell'elaborazione.

3.5 Ant3D - rilievo ed elaborazione dei dati

Per il rilievo eseguito con Ant3D, sono state effettuate in totale 5 acquisizioni. A differenza del rilievo di Heron Backpack, a causa del ridotto campo di misura della multi-camera, non è stato possibile percorrere solo i sentieri del parco. Piuttosto, si è cercato di mantenere uno schema di camminata di fitte passate parallele con cui è stata coperta l'intera area del giardino. In corrispondenza di alberi o cespugli più grandi, è stata eseguita un'acquisizione circolare camminando intorno all'ostacolo e fotografandolo così da tutti i lati. Al termine dell'ultima acquisizione, sono stati infine percorsi i sentieri principali del parco con lo scopo di collegare tra loro le diverse acquisizioni. La Figura 4(b) mostra il percorso delle 5 diverse acquisizioni, dove è evidente la differenza di densità rispetto al rilievo Heron Backpack.

	Durata	N° di img.	N° di punti
Acquisizione 1	00:18:00	5400	
Acquisizione 2	01:05:00	19570	90 Mln
Acquisizione 3	00:26:00	7860	nuvola di
Acquisizione 4	00:37:00	11240	punti filtrata
Acquisizione 5	01:32:00	27730	

Tabella 1. Sintesi dei dati delle 5 acquisizioni effettuate con il sistema multi-camera Ant3D.

Durante le acquisizioni, le immagini sono state scattate a 1 fps per un totale di 71800 immagini. Tuttavia, solo una immagine su quattro è stata successivamente elaborata, per un totale di 17950. Il tempo richiesto per il rilievo multi-camera è stato di circa 4 ore. Tuttavia, considerando le operazioni di rilievo con UAV e DSLR che si sono rese necessarie, il tempo totale di rilievo è stato di circa 6 ore, un tempo molto superiore a quello richiesto per il rilievo con lo zaino Heron. Le immagini acquisite sono state elaborate con Agisoft Metashape fino a ottenere nuvole di punti dense dell'intero parco. È stato eseguito un unico allineamento SfM complessivo di tutte le immagini Ant3D e DSLR e sono state vincolate le distanze tra le fotocamere in tutte le pose multi-camera. L'imposizione dei vincoli sulle basi di presa è stata eseguita come descritto in Perfetti & Fassi (2022a). Sulle fotografie sono stati imposti anche vincoli GCP identificati manualmente: l'errore medio su questi punti è stato di circa 5 cm. La nuvola di punti finale è stata realizzata dividendo la porzione di parco in 10 blocchi che sono stati elaborati separatamente e poi uniti.

Il rilievo UAV, invece, è stato elaborato separatamente e registrato nello stesso sistema di coordinate locali basato sui GCP. Le Figure 4(b,d) mostrano una vista in pianta della nuvola di punti Ant3D; si può notare che rispetto ai dati ottenuti con

Heron Backpack, le chiome degli alberi non sono state rilevate. La Figura 5 (al centro) mostra la nuvola di punti Ant3D in vista 3D.



Figura 5. Nuvole di punti ottenute per i vari rilievi effettuati: Heron Backpack (in alto), Ant3D (al centro), UAV (in basso).

4. Risultati e confronti

Al termine dell'elaborazione, sono state ottenute 3 nuvole di punti colorate (Figura 5): (i) il rilievo Heron Backpack, (ii) il rilievo Ant3D e (iii) il rilievo UAV. I dati acquisiti con entrambi gli approcci consentono di estrarre il DBH e l'impronta planimetrica delle chiome, caratterizzando così gli alberi rilevati. Tuttavia, le nuvole ottenute presentano differenze essenziali nella descrizione delle geometrie naturali e artificiali a causa dei diversi campi di acquisizione e della precisione dei due strumenti. Di seguito vengono presentati i confronti visivi tra i dati.

4.1 Dettagli e rumore della nuvola di punti

Il confronto è stato eseguito su porzioni delle nuvole di punti Heron Backpack e Ant3D, concentrandosi sulle geometrie architettoniche presenti nel parco. La Figura 6 riporta il confronto in queste aree: 1a e 1b mostrano uno dei portali in muratura presenti nel parco. La nuvola di punti Heron Backpack (1a) presenta un livello di rumore molto più elevato rispetto alla nuvola fotogrammetrica (1b - in quest'area è stata realizzata anche l'acquisizione DSLR); 2a e 2b mostrano la struttura di un gazebo coperto da vegetazione rampicante. In questo caso la nuvola fotogrammetrica (2b, ottenuta solo dal rilievo multicamera) mostra la completa assenza della vegetazione mentre tutte le strutture architettoniche sono ricostruite correttamente; 3a e 3b mostrano uno zoom della stessa area. La nuvola di punti del rilievo multi-camera presenta maggiori dettagli rispetto a quella del MMS.



Figura 6. Confronto tra le due nuvole di punti ottenute di alcune strutture artificiali. Una struttura a portale (1a, 1b), una struttura a gazebo (2a, 2b) e lo zoom di una parte della struttura a gazebo (3a, 3b). I dati ricavati dal rilievo Heron Backpack sono bordati in blu, mentre in rosso quelli relativi ad Ant3D.



Figura 7. Sezioni trasversali estratte da Heron Backpack (alto) e da Ant3D + UAV (basso). Ant3D in rosso, UAV in rosa.

4.2 Completezza delle sezioni trasversali

È stata estratta una sezione verticale con uno spessore di 6 m delle nuvole di punti acquisite. La Figura 7 mostra la sezione ricavata dal dato Heron Backpack (in alto) completa in tutte le sue parti. Si distinguono chiaramente il profilo del terreno, gli arredi del parco, gli alberi, i rami e il fogliame. Anche la presenza di persone nel giardino al momento dell'acquisizione è particolarmente visibile. Al contrario, la sezione ricavata dai dati Ant3D (in basso, in rosso) è completa solo in prossimità del suolo, fino a pochi metri di altezza. Tuttavia, i dettagli dei rami sotto la superficie superiore del fogliame rimangono non rilevati. Il rilievo UAV, quindi, ci permette di integrare il rilievo terrestre con le chiome degli alberi (in basso, rosa).

4.3 Qualità delle alberature – DBH e chioma

Per questo confronto sono stati isolati alcuni alberi di dimensioni diverse. La Figura 8 mostra la vista planimetrica e altimetrica di questi alberi. I dati acquisiti da Heron Backpack (1a, 2a, 3a) risultano completi in tutte le loro parti, analogamente a quanto mostrato nella Figura 7 (in alto); mentre i dati fotogrammetrici, ottenuti dall'unione del rilievo Ant3D e UAV (1b, 2b, 3b) risultano parzialmente incompleti. Tuttavia, come visibile nelle immagini planimetriche, è ancora possibile stimare l'impronta della chioma per una rappresentazione 2D. La Figura 9, invece, mostra le sezioni orizzontali estratte alla quota di 1,3 m dal suolo utili per la stima del DBH. Si può notare la maggiore presenza di rumore nei dati di Heron Backpack (1a, 2a, 3a, 4a, 5a). Tuttavia, i dati Ant3D non sono esenti da problemi; sebbene mostrino una definizione del tronco più precisa in generale (1b, 2b, 3b, 4b), i tronchi di piccolo diametro non vengono restituiti correttamente se non acquisiti da una breve distanza (5b).

5. Conclusioni e lavori futuri

I risultati ottenuti dai due approcci di rilievo sono paragonabili; entrambi i metodi hanno prodotto nuvole di punti colorate da cui si possono ricavare varie analisi per la caratterizzazione dei giardini. Il rilievo Heron Backpack ha prodotto una nuvola di punti completa in tutte le sue parti, in grado di descrivere gli alberi sia alla base del tronco sia alla chioma senza richiedere l'integrazione di ulteriori rilievi. Tuttavia, la nuvola di punti MMS presenta un rumore maggiore rispetto a quella fotogrammetrica. I tempi di rilievo sono stati significativamente favorevoli all'approccio MMS, con un tempo di acquisizione di circa 30 minuti, che ha richiesto un percorso più breve per coprire l'intero giardino grazie al campo di acquisizione più esteso. Il rilievo multi-camera ha prodotto una nuvola di punti ad alta risoluzione, con un rumore minore e una maggiore definizione dei dettagli. Tuttavia, il rilievo ha richiesto più tempo: infatti, a causa del campo di misura più ristretto, è stato necessario effettuare più passaggi paralleli a una distanza di circa 5 m, richiedendo fino a circa 4 ore per coprire l'intero giardino con il solo rilievo multi-camera. Tuttavia, considerando che solo un quarto delle immagini è stato elaborato, il tempo di indagine avrebbe potuto essere ridotto a circa 1 ora aumentando la velocità di camminata. Entrambi i sistemi hanno prodotto una rappresentazione densa del terreno; le sezioni del terreno che possono essere estratte dal rilievo multi-camera sono più definite grazie al minore rumore della nuvola di punti, ma incomplete nella definizione delle chiome degli alberi. Inoltre, con entrambi i sistemi è possibile estrarre il DBH dei tronchi d'albero, tranne che per i tronchi più sottili e di diametro più fine. In questo caso, il MMS permette di

identificare la presenza dei tronchi. Tuttavia, la stima del DBH potrebbe essere meno accurata, mentre il sistema multi-camera a volte non fornisce dati. Questo è stato anche il caso dei pali della luce (non mostrati qui), che sono risultati scarsamente identificabili o completamente assenti nella nuvola di punti fotogrammetrica. Impiegando i dati fotogrammetrici durante il processo di restituzione 2D, l'identificazione di steli sottili e altre caratteristiche fini non è sempre possibile osservando una fetta della nuvola di punti in tagli orizzontali sottili (circa 5 cm).

In conclusione, l'approccio di rilievo MMS è più efficace dell'approccio multi-camera nella caratterizzazione dei giardini

storici. Il principale vantaggio dell'approccio MMS risiede nella produttività dovuta al minor tempo di rilievo richiesto per coprire un'area uguale e al fatto che il solo rilievo MMS è sufficiente per la descrizione geometrica degli alberi. D'altra parte, l'approccio multi-camera non può evitare l'integrazione con un rilievo aereo per la ricostruzione della chioma, e il maggior dettaglio della nuvola di punti (anche in assenza del rilievo DSLR, Figura 4 - 3b) non è richiesto per le rappresentazioni in scala 1:200 o 1:100. Tuttavia, il principale vantaggio dell'approccio multi-camera risiede nel minor costo della strumentazione utilizzata e può quindi essere preso in considerazione per applicazioni a basso budget.



Figura 8. Planimetrie e viste altimetriche degli alberi estratte dalla nuvola di punti Heron Backpack (riga superiore, bordi blu) e dalla nuvola di punti Ant3D + UAV (riga inferiore, bordi rossi).



Figura 9. Sezione planimetrica degli alberi ad altezza uomo estratta dalla nuvola di punti Heron Backpack (blu) e dalla nuvola di punti Ant3D (rosso).

Per lavori futuri, si potrebbero tentare due modifiche del dispositivo multi-camera per renderlo più adatto al rilievo di giardini o al contesto forestale: (i) la prima modifica potrebbe essere quella di aumentare la risoluzione delle telecamere equipaggiate sul sistema, con l'obiettivo di ridurre il GSD, aumentare il campo di misura e di conseguenza semplificare e velocizzare la fase di acquisizione; (ii) la seconda modifica potrebbe essere quella di aggiungere una telecamera rivolta verso l'alto per tentare di ricostruire la geometria dei rami e della chioma degli alberi dal basso. Tuttavia, l'opinione degli autori rimane quella che il vantaggio principale dell'approccio multi-camera sia il costo più basso, mentre un laser scanner portatile è da preferire per una descrizione completa degli alberi.

Bibliografia

Cazzani, A., Zerbi, C. M. & Brumana, R., 2019. Management plans and web-GIS software applications as active and dynamic tools to conserve and valorize historic public gardens, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLII-2/W15, 291– 298.

Del Duca, G. & Machado, C., 2023. Assessing the quality of the Leica BLK2GO mobile laser scanner versus the Focus 3D S120 static terrestrial laser scanner for a preliminary study of garden digital surveying. Heritage, 6(2), 1007–1027.

Forsman, M., Börlin, N. & Holmgren, J., 2016. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig. Forests, 7(3):61.

Gollob, C., Ritter, T. & Nothdurft, A., 2020. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) technology. Remote Sensing, 12(9), 1509.

Hess, M. & Ferreyra, C., 2021. Recording and comparing historic garden architecture. Value of SLAM-based recording for research on cultural landscapes in connection with heritage conservation, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-M-1-2021, 301–308.

Hyyppä, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hakala, T., Kukko, A., Vastaranta, M. & Hyyppä, J., 2020. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. *Remote Sensing*, 12(20), 3327.

Liang, X., Jaakkola, A., Wang, Y., Hyyppä, J., Honkavaara, E., Liu, J. & Kaartinen, H., 2014. The use of a handheld camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. *Remote Sensing*, 6(7), 6587–6603.

Malinverni, E. S., Chiappini, S. & Pierdicca, R., 2019. A geodatabase for multisource data management applied to cultural heritage: the case study of Villa Buonaccorsi's historical garden, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 771–776.

Marotta, F., Achille, C., Vassena, G., & Fassi, F., 2022a. Accuracy improvement of a IMMS in an urban scenario, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-2/W1-2022, 351–358.

Marotta, F., Perfetti, L., Fassi, F., Achille, C. & Vassena, G. P. M., 2022. Lidar IMMS vs handheld multi-camera system: a stress-test in a mountain trailpath. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2022, 249-256.

Mokroš, M., Mikita, T., Singh, A. K., Tomaštík, J., Chudá, J., ... Liang, X., 2021. Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102512.

Murtiyoso, A., Hristova, H., Rehush, N. & Griess, V. C., 2022. Low-cost mapping of forest under-storey vegetation using spherical photogrammetry, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-2/W1-2022, 185–190.

Pérez-Martín, E., Medina, S. L., Tejedor, T. R. H., Pérez-Souza, M. A., De Mata, J. A. & Ezquerra-Canalejo, A., 2021. Assessment of tree diameter estimation methods from mobile laser scanning in a historic garden. *Forests*, 12(8), 1013.

Perfetti, L., 2022. Image-based multi-camera mobile mapping system to survey narrow spaces (*Doctoral dissertation*). Politecnico di Milano, Milan.

Perfetti, L. & Fassi, F., 2022a. Handheld fisheye multi-camera system: surveying meandering architectonic spaces in open-loop mode - accuracy assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, 435-442.

Perfetti, L., Elalailyi, A. & Fassi, F., 2022b. Portable multicamera system: from fast tunnel mapping to semi-automatic space decomposition and cross-section extraction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2022, 259–266.

FOTOGRAMMETRIA ED ELABORAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI PER L'ANALISI DEL DEGRADO DELLE INFRASTRUTTURE

S. Zollini^a

^a DICEAA – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile – Architettura e Ambientale, Università degli Studi dell'Aquila, Via G. Gronchi, 18, 67100, L'Aquila – sara.zollini@univaq.it

Parole chiave: Fotogrammetria da UAV, Sistemi ACM, Object – Based Image Analysis (OBIA), infrastrutture, degrado, fessurazioni, calcestruzzo

Key words: UAV photogrammetry, ACM Systems, Object - Based Image Analysis (OBIA), infrastructures, decay, cracks, concrete

Abstract

L'esigenza di valutare il livello di affidabilità delle infrastrutture attraverso una fase di conoscenza approfondita risulta quanto mai essenziale per garantire funzionalità e prestazioni. Una parte cospicua del patrimonio infrastrutturale, specialmente del mondo occidentale, è stata realizzata intorno agli anni '50, per cui ha bisogno di una corretta e tempestiva analisi in previsione di un efficiente programma di manutenzione. Il presente lavoro sfrutta la tecnica fotogrammetrica e la DIP (Digital Image Processing) per l'analisi dei fenomeni di degrado che interessano il pilone di un viadotto. Algoritmi sperimentali inglobati nei Sistemi ACM sono stati testati e confrontati con le tradizionali tecniche di elaborazione di immagini. A seguito di un rilievo fotogrammetrico terrestre e da UAV, è stata analizzata prima con l'OBIA (Object – Based Image Analysis) e successivamente è stata migliorata con i Sistemi ACM. La validazione è stata eseguita utilizzando, come verità a terra, una mappa tematica delle forme di degrado individuate da un esperto di calcestruzzi. Infine, sono stati effettuati dei confronti con algoritmi comunemente utilizzati in letteratura. Dai risultati è emerso che gli ACM forniscono, rispetto agli algoritmi comuni, un'accuratezza globale maggiore, con un incremento fino al 5%. La flessibilità e l'oggettività sono tra i principali vantaggi del metodo e pongono le basi per lo sviluppo di una procedura semi-automatica utile alle istituzioni preposte alla manutenzione delle infrastrutture.

The need to evaluate the level of infrastructure reliability through an in-depth knowledge phase is more essential than ever to guarantee functionality and performance. A large part of the infrastructural heritage, especially in the western world, was built around the 1950s, so it needs a correct and timely analysis for an efficient maintenance programme. This work exploits the photogrammetric technique and the DIP (Digital Image Processing) for the analysis of the decay forms affecting the pylon of a viaduct. Experimental algorithms embedded in the ACM Systems have been tested and compared with traditional image processing techniques. Following a terrestrial and UAV photogrammetric survey, a region of interest of reinforced concrete pillar with decay forms was identified. This region was, at first, analyzed with OBIA (Object - Based Image Analysis) and was subsequently enhanced with ACM Systems. The validation was performed using, as ground truth, a thematic map of the decay forms identified by a concrete expert. Finally, comparisons with commonly used algorithms were made. The results showed that ACMs provide up to 5% higher overall accuracy than common algorithms. Flexibility and objectivity are among the main advantages of the method and pave the ground for the development of a semi-automatic procedure useful for institutions responsible for infrastructure maintenance.

1. Introduzione

Invecchiamento dei materiali ed eventi meteorologici estremi sono tra le principali cause di deterioramento delle infrastrutture. L'Italia, a causa della propria conformazione orografica, possiede un patrimonio infrastrutturale in termini di ponti e viadotti tra i maggiori d'Europa. Si tratta di infrastrutture che hanno un'età media di oltre cinquanta anni e che, sebbene abbiano finora espletato regolarmente la loro funzione, hanno tuttavia subito un continuo e costante degrado legato all'ambiente e all'esercizio, degrado spesso non contrastato da una adeguata manutenzione. Basti pensare che dal 2013 ci sono stati più di 15 crolli (D'Amato 2019), i quali hanno provocato morti e feriti nella metà dei casi (uno dei casi più eclatanti è stato quello del viadotto Polcevera di Genova nell'agosto del 2018). Partendo quindi dalla consapevolezza delle numerose problematiche legate al normale invecchiamento delle opere, si ha la costante esigenza di garantire il mantenimento di un loro adeguato livello prestazionale nel tempo, tenendo conto delle specifiche necessità e classi d'uso. Ciò può essere reso possibile attraverso un processo conoscitivo

che si sviluppa durante l'esercizio, con l'applicazione di metodi per il monitoraggio e il controllo periodico delle strutture. Il metodo più comunemente utilizzato è l'ispezione visiva, eseguita da operatori esperti. Spesso, però, questo procedimento richiede un tempo di rilievo elevato e può portare a intralci al traffico o, in alcuni casi, anche alla chiusura temporanea dell'infrastruttura, generando non pochi disagi. La geomatica concilia le varie esigenze non solo tramite l'utilizzo di tecniche tradizionali ma anche, e soprattutto, tramite la sinergia con le tecnologie più recenti. Numerosi lavori si sono incentrati sull'utilizzo del laser scanner (Soilán et al. 2019; Tang et al. 2007) e della fotogrammetria da UAV (Capacci et al. 2022; Skov et al. 2021) per l'ispezione e l'indagine di infrastrutture. Come risposta alle esigenze appena esposte, in questo lavoro si è sviluppata una metodologia di rilievo non distruttiva per lo studio del degrado superficiale dei ponti e viadotti in calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso. La metodologia prevede l'utilizzo integrato della fotogrammetria digitale terrestre e da UAV, della stazione totale e dell'applicazione di algoritmi di analisi di immagine per evidenziare ed estrarre le principali forme di degrado presenti su

una pila del viadotto preso in esame. I dati ottenuti sono stati 2.2 Fase 2: Digital Image Processing - DIP immagazzinati in formato digitale e potranno essere utilizzati successivamente per una futura change detection, al fine di valutare l'evoluzione dei fenomeni di degrado nel tempo.

2. Materiali e metodi

Nel presente lavoro si è effettuato lo studio del degrado del cavalcavia situato in Via Campo di Pile, nucleo industriale di L'Aquila (AQ), [13°20'58.7" E; 42°21'17.4" N) (

Figura 1).



Figura 1. Viadotto caso di studio

L'opera è stata realizzata tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90 con andamento rettilineo, lunghezza complessiva di 225 m e 9 campate di luce pari a 25 m. Nel caso di studio è stato considerato il degrado presente su uno dei piloni di tale viadotto. I piloni sono elementi monolitici realizzati in calcestruzzo armato composti da una parte verticale ed una orizzontale su cui poggia l'impalcato. Nello specifico, l'elemento verticale, un pilastro a sezione cava di forma rettangolare in pianta, è sormontato da un traverso simmetrico su cui poggiano le travi dell'impalcato. La metodologia proposta può essere suddivisa in due macro-fasi. La prima consiste nel processo fotogrammetrico, partendo dal rilievo terrestre e da UAV di uno dei piloni e dall'acquisizione di punti di controllo tramite stazione totale. La seconda fase, invece, consiste nella DIP (Digital Image Processing). In questa fase, l'output fotogrammetrico (ortofoto) di una porzione della pila viene trattato sia con l'OBIA (Object-Based Image Analysis) che con algoritmi sperimentali (ACM - Active Connection Matrix). Questi ultimi sono stati anche confrontati con altri algoritmi comuni. Tutti i risultati sono stati validati considerando un'immagine rilevata tramite ispezione visiva da un esperto di calcestruzzi. Per una migliore comprensione della metodologia, in Figura 2 viene riportato un dettagliato workflow del lavoro.

2.1 Fase 1: Rilievo tramite tecnica fotogrammetrica

Il rilievo dell'opera è stato effettuato mediante la tecnica di fotogrammetria digitale terrestre e da UAV. Sono stati inoltre rilevati specifici punti di controllo, ad elevata precisione, con la stazione totale. La presa delle immagini da terra è stata effettuata con una camera digitale Sony Alpha 6000 con una risoluzione di 24 Megapixel. Per le foto aeree si è utilizzato il multirotore FlyNovex della FlyTop con a bordo la stessa camera impiegata per la presa da terra. Della pila indagata sono state eseguite 125 foto, di cui 98 da terra e 27 aeree. Sono stati, inoltre, acquisiti tramite stazione totale TS30 13 Ground Control Points (GCPs), di cui 4 CPs (Check Points), con un RMSE (Root Mean Square Error) di 1,5 cm. I risultati del processo sono stati il modello 3D dell'elemento e l'ortomosaico, dal quale è stata estratta una regione di interesse (ROI) per il successivo studio del degrado. L'ortomosaico ottenuto presenta una risoluzione geometrica di 1.95mm/pix.

Con il fine di studiare il degrado del calcestruzzo viene impiegata, inizialmente, l'OBIA. L'OBIA è un metodo di analisi delle immagini basata su oggetti (Blaschke 2010), pertanto, l'obiettivo è quello di ottenere una mappa vettoriale costituita dall'insieme degli oggetti (fessure, aree di spalling, macchie dovute al dilavamento...), per ognuno dei quali, sono associati, oltre alle coordinate spaziali e alle caratteristiche spettrali, informazioni di tipo semantico. L'analisi OBIA si compone di due passaggi, segmentazione e classificazione (Teodoro and Araujo 2016). Con la segmentazione si va a suddividere l'immagine di partenza in oggetti vettoriali, i quali sono costituiti da raggruppamenti di pixels vicini che presentano analoghe caratteristiche come lucentezza, colore, tessitura e corrispondono idealmente ad oggetti appartenenti al mondo reale. La classificazione è quella supervisionata, nella quale si associano delle classi, definite a monte dall'operatore, ad ogni oggetto precedentemente ottenuto, in funzione delle proprie caratteristiche. Questo passaggio si articola in più fasi: creazione delle classi, scelta delle aree di training, training del classificatore, classificazione. Nel caso specifico, per la segmentazione è stato utilizzato l'algoritmo Mean Shift, ampiamente utilizzato in letteratura (Teodoro and Araujo 2016) e presente, inoltre, nella libreria di OTB (Orfeo Toolbox), utilizzabile all'interno del QGIS gratuitamente. Per la classificazione, invece, si è utilizzato il Support Vector Machine (SVM), un classificatore supervisionato non parametrico basato sulla teoria dell'apprendimento statistico di Vapnik (Vapnik 1999). Esso non nasce per la classificazione automatica di immagini ma, nell'ultimo decennio, ha dimostrato grande efficacia in diverse applicazioni nell'ambito dell'analisi delle immagini ad alta risoluzione (Bruzzone and Carlin 2006; Gualtieri 2009; Inglada 2007). Anch'esso è implementato all'interno dell'OTB. In

Tabella 1 si riportano le classi definite per l'applicazione dell'OBIA.

CODICE	OGGETTO
1	Calcestruzzo sano
2	Armature esposte
3	Spalling
4	Fessure
5	Casseforme
6	Tubo pluviale

Tabella 1: Classi scelte per l'OBIA

questo punto, un ulteriore studio è consistito А nell'applicazione di algoritmi sperimentali, chiamati Sistemi ACM (Active Connection Matrix), brevettati dal centro ricerche Semeion di Roma. Essi, nati per scopi medici, sono stati attualmente sperimentati anche in ambito territoriale per l'estrazione della linea di riva (Zollini et al. 2023) e nei beni culturali (Alicandro et al. 2018). Sfruttano le posizioni reciproche di pixels vicini e i pesi che si attribuiscono ad ogni connessione tra essi. I sistemi sono classificati in tre ordini di complessità, secondo il tipo di evoluzione nel tempo. Nel primo ordine di complessità, vengono inizializzati i valori delle connessioni una volta, all'inizio, e poi rimangono fisse mentre i valori dei pixel evolvono nel tempo fino alla convergenza. La situazione è speculare il caso del secondo ordine, dove i valori dei pixel sono fissi mentre i valori delle connessioni vengono aggiornate ad ogni iterazione. Infine, il terzo ordine di complessità include modelli in cui cambiano sia i pixel che le connessioni nel tempo. Per una presentazione completa degli

algoritmi ACM, si rimanda alla letteratura (M. Buscema and voluti testare tali sistemi anche in ambito infrastrutturale, attraverso il confronto con algoritmi utilizzati in letteratura per scopi simili. Il primo obiettivo era quello di enfatizzare il contrasto dell'oggetto in esame, mentre il secondo aveva il compito di estrarre le geometrie dell'immagine. Quindi, tra i vari testati, gli algoritmi che meglio hanno raggiunto gli scopi prefissati sono stati il CM (Contractive Maps) per quanto riguarda il miglioramento del contrasto ed il New CS (New Constraints Satisfaction Network) per quanto riguarda l'estrazione dei bordi geometrici. I rispettivi algoritmi di letteratura adibiti agli stessi scopi sono l'algoritmo di equalizzazione dell'istogramma (Pizer et al. 1987) e il Sobel (Vincent and Folorunso 2009), rispettivamente. L'idea che sta alla base dell'Histogram Equalization (HE) è operare una trasformazione che, nell'immagine elaborata, distribuisca uniformemente i livelli di grigio, cioè, aumenti il contrasto "spalmando" l'istogramma di partenza e aumentando il range dinamico. Il Sobel, invece, fa parte degli algoritmi di edge detection ed è un operatore differenziale, che calcola un valore approssimato del gradiente di una funzione che rappresenta la luminosità dell'immagine, trovando la direzione lungo la quale si ha il massimo incremento possibile dal chiaro allo scuro, e la velocità con cui avviene il cambiamento lungo questa direzione. Il risultato ottenuto fornisce una misura di quanto "bruscamente" oppure "gradualmente" l'immagine cambia in quel punto, e quindi della probabilità che quella parte di immagine rappresenti un contorno, e fornisce anche un'indicazione del probabile orientamento di quel contorno. Nel presente lavoro, sono stati utilizzati tre dati di input per ciascun gruppo di algoritmi (sperimentali e non), portando avanti la sperimentazione in modo parallelo: verrà, di seguito, illustrata la metodologia prendendo in esame solamente gli ACM, ma le operazioni si sono susseguite in maniera analoga anche per l'altro gruppo di algoritmi. La prima immagine di input è quella contenente le bande RGB (Red, Green, Blue); nella seconda, viene effettuato lo stack tra la RGB e l'algoritmo che enfatizza il contrasto (CM in questo caso); per ultima, l'immagine sarà RGB + CM più l'algoritmo che estrae le geometrie (in questo caso il New CS). Successivamente, per ciascuno degli input viene effettuata un'analisi OBIA. Sia nella fase 1 che nella fase 2 appena descritta, oltre al confronto con gli algoritmi di letteratura, è prevista una fase di validazione, sviluppata attraverso il confronto dei risultati ottenuti con l'immagine della stessa regione di interesse, in cui un esperto di calcestruzzi ha individuato, tramite ispezione visiva, le forme di degrado ivi presenti. Infine, le matrici di confusione, l'accuratezza globale ed il coefficiente kappa danno un'indicazione sull'accuratezza dei risultati ottenuti (Fig. 2).

3. Risultati

Dalla prima analisi con l'OBIA effettuata tramite software gratuito QGIS con Orfeo Toolbox, si osserva (Tabella 2) che il numero maggiore di segmenti interessa le aree non degradate, con circa il 66% degli oggetti sul totale, seguito dalle aree fessurate con il 17% circa, per poi scendere al 12% dei segmenti equamente suddivisi tra le aree di spalling e casseforme. Occupa infine un'aliquota piccola il numero di segmenti associati alle armature esposte e al tubo pluviale (5% nel totale). Inoltre, si è potuto osservare che circa l'88% dell'area totale della superficie rilevata è costituito da calcestruzzo non ammalorato; l'area associata di spalling è complessivamente del 3% circa; l'impronta lasciata dalle casseforme costituisce una piccolissima porzione che ammonta allo 0,5%; infine, l'area delle fessure risulta occupare circa il 4% della superficie, tuttavia questo valore va ulteriormente

Grossi 2010; P. M. Buscema 2005). In questo lavoro si sono approfondito, poiché parte di essa è stata associata alla porzione di superficie che individua un probabile nido di ghiaia (parte bassa dell'immagine) per il quale non è stata definita una specifica etichetta, essendo di fatto composta da uno sgretolamento di calcestruzzo che provoca, comunque, una fessura.

CODICE	CLASSE	% OGGETTI ASSOCIATI	% AREA/ CLASSE
1	Calcestruzzo sano	65,63	88,08
2	Armature esposte	1,56	0,41
3	Spalling	6,25	2,65
4	Fessure/nido di ghiaia	17,19	3,86
5	Casseforme	6,25	0,42
6	Tubo pluviale	3,13	4,57

Tabella 2: Risultati della prima analisi OBIA su immagine RGB

Poiché ad ogni segmento sono associate le proprie caratteristiche geometriche, come è noto, è possibile misurare le dimensioni di interesse, quali, ad esempio le fessure più rilevanti. In Figura 3, viene mostrata la mappa tematica ottenuta tramite l'OBIA.



Figura 3: Mappa tematica ottenuta tramite OBIA

Per la validazione, è stata creata una mappa tematica tramite ispezione visiva da un esperto di calcestruzzi, il quale ha definito le classi riportate in Figura 4. Naturalmente, il tubo pluviale e le linee delle casseforme non sono forme di degrado, ma sono state comunque considerate per avere consistenza con i risultati ottenuti dall'OBIA.



Figura 4: Mappa tematica delle forme di degrado ottenuta tramite ispezione visiva. In aggiunta alle classi presenti in Tabella 2, ci sono il dilavamento in viola, il map cracking in verde, il distacco di calcestruzzo in magenta e il nido di ghiaia in rosso scuro.

Le percentuali di aree per ogni classe di validazione sono riportate in

CODICE	CLASSE	% AREA/ CLASSE
1	Calcestruzzo sano	71,56
2	Armature esposte	0,58
3	Spalling	2,68
4	Fessure/nido di ghiaia	3,42
5	Casseformi	0,75
6	Tubo pluviale	5,05
7	Distacco di calcestruzzo	1,37
8	Map cracking	2,26
9	Dilavamento	12,32

Tabella 3: Percentuali aree per ogni classe definita nella mappa tematica di validazione creata tramite ispezione visiva

Nonostante, inizialmente, fossero state considerate anche nell'OBIA le stesse classi presenti in

Tabella 3, di alcune di esse non è stato possibile determinarne l'entità, in quanto la classificazione finale associava il distacco di calcestruzzo, il map cracking e il dilavamento al calcestruzzo sano. Per quanto riguarda i primi due, avendo una risposta geometrica e spettrale simile al calcestruzzo sano, risulta possibile che l'analisi semi-automatica possa "confondere" tali elementi con il background, ma, per quanto riguarda il dilavamento, si è pensato di approfondire l'analisi attraverso il miglioramento dell'immagine di input. Quindi, si è proceduto effettuando lo stack dell'immagine RGB dapprima con gli algoritmi sperimentali ACM e successivamente con gli algoritmi comuni, considerando, stavolta, come classe di training anche il dilavamento (Fig. 5) ed applicando successivamente l'OBIA.



Figura 5: Classi per applicazione OBIA su immagine RGB+ACM prima e RGB+algoritmi comuni poi. Grigio scuro: calcestruzzo sano; nero: fessure; grigio chiaro: spalling; arancione: Armature esposte; viola: dilavamento; giallo: casseforme; celeste: tubo pluviale.

Anche tali risultati sono stati validati utilizzando la mappa tematica individuata tramite ispezione visiva. Per non appesantire la trattazione, i risultati delle matrici di confusioni vengono opportunamente discussi nel paragrafo 4 mentre l'accuratezza globale e il coefficiente kappa sono riportati in Tabella 4. Come viene illustrato, l'accuratezza globale è risultata essere 64%, 67% e 69% mentre il coefficiente kappa 0,32, 0,36 e 0,37 testando rispettivamente l'RGB, l'RGB + CM e le immagini RGB + CM + NewCS. Considerando, invece, RGB + Histogram matching e RGB + Histogram matching + Sobel, l'accuratezza globale è stata del 64% e 62% mentre il coefficiente kappa 0,28 e 0,25 rispettivamente (Tabella 4). Tabella 3.

Immagine di input	Accuratezza globale	Coefficiente kappa
RGB	64%	0,32
RGB+CM	67%	0,36
RGB+CM+NewCS	69%	0,37
RGB+Histogram	64%	0,28
RGB+Histogram+Sobel	62%	0,25

Tabella 4: Accuratezza globale e coefficiente kappa ottenuti applicando l'OBIA all'immagine RGB con gli ACM e gli algoritmi comuni

4. Discussione

Confrontando le aree percentuali ottenute dall'OBIA (Tabella 2) con quelle di validazione (

Tabella 3) si può notare che il calcestruzzo sano ha un valore pari a circa l'88%, mentre nella ground truth è pari a circa il 72%. La differenza è dovuta al fatto che l'ispezione visiva ha apprezzato altre forme di degrado (dilavamento, map cracking e distacco di calcestruzzo) mentre l'OBIA non ha raggiunto risultati statisticamente significativi per poter rilevare queste forme di degrado, a causa della risposta spettrale molto simile. Le armature esposte e lo spalling invece hanno valori percentuali molto vicini a quelli di riferimento. L'area percentuale di riferimento per lo spalling è del 2,68%, mentre quella dell'OBIA è del 2,65%. Per quanto riguarda le armature esposte il valore di riferimento è 0,58%, mentre quello OBIA è 0,41%. Fessure e nido di ghiaia hanno come valore di riferimento 3,42%, contro il 3,86% di quello OBIA. Come già anticipato, questi due elementi, hanno, di fatto, una geometria che si sviluppa lungo una sola dimensione e una risposta spettrale altrettanto simile. È noto che proprio a causa della natura intrinseca delle fessure, è ancora difficile poterle classificare correttamente, specialmente quelle più sottili. Le cause della presenza delle crepe sono molteplici, così come le loro dimensioni. Le fessurazioni plastiche, da essiccazione e termiche sono causate dalla progettazione e dalla stagionatura della miscela di calcestruzzo e si verificano nelle prime fasi di costruzione. Le fessurazioni successive sono prodotte da tipici fenomeni di corrosione delle armature (attacco di carbonio o cloruri) o di spalling del copriferro. Il map cracking potrebbe essere attribuito a meccanismi specifici come reazioni alcalinoaggregati o gelo-disgelo. Infine, altre fessurazioni potrebbero essere correlate a problemi strutturali quali cedimenti o sovraccarichi. Si capisce, quindi, che anche la dimensione, lo sviluppo e l'entità di una fessurazione possono variare di caso in caso, rendendo ancora più impegnativa la loro individuazione. Nonostante ciò, va evidenziato che tramite l'OBIA si è potuto rilevare e distinguere fessure di larghezza pari a 2 mm, valore comunque utile per diagnosi e/o monitoraggio strutturale. Vista l'attualità e le potenzialità della metodologia esposta, in questa fase ci si è confrontati con il gruppo di ricerca internazionale del Department of Geomatics della National Cheng Kung University di Tainan (Taiwan) guidato dal Prof. Jiann-Yeou Rau, che ha sviluppato un approccio simile per lo studio del degrado superficiale (Rau et al. 2017). Dal confronto tra le due metodologie sono emerse analogie circa le modalità di rilievo e di analisi delle immagini, presentando risultati simili.

Dalla seconda analisi, cioè quella in cui all'immagine RGB viene effettuato lo stack con il CM e il NewCS, quello che è emerso dalle matrici di confusione è che, in generale, tutte le forme di degrado hanno subìto un incremento in termini di accuratezza considerando l'immagine RGB + CM + NewCS. È alcune zone, questa forma di degrado non ha una risposta spettrale tanto diversa da quella del calcestruzzo, ma, nella maggior parte dei casi, anche il dilavamento è stato correttamente classificato con un incremento in accuratezza pari a circa il 6% quando si considerano altresì i due ACM. Anche le fessure sono state classificate correttamente nella maggior parte dei casi, con un aumento di accuratezza percentuale circa pari all'8% e all'1% per le immagini RGB + CM e RGB + CM + NewCS, rispettivamente. Piccole quantità sono state erroneamente classificate come armature esposte (circa il 14%) e spalling (circa il 20%). Ciò è comprensibile perché le armature esposte possono avere sia una risposta spettrale che geometrica simile ad esse mentre lo spalling è causato da una serie di fattori, come cicli di gelo e disgelo, effetti espansivi della reazione alcali-silice, esposizione al fuoco o, come in questo caso di studio, a causa della corrosione delle barre di armatura. Essendoci un'espulsione del calcestruzzo, l'area di spalling è interessata anche da fessurazioni e map cracking, per questo può essere classificata erroneamente in piccole percentuali. Un argomento interessante di discussione riguarda l'applicazione del NewCS: si è notato che, solo per questa forma di degrado e nonostante ci sia comunque un leggero miglioramento rispetto alla semplice immagine RGB (1%), tale algoritmo fa diminuire l'accuratezza rispetto all'immagine RGB + CM. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che i bordi delle crepe più sottili sono difficilmente rilevabili e potrebbero esserci più fonti di rumore proprio in quelle aree. Le armature esposte, invece, sono state classificate correttamente per la quasi totalità (circa 85%), seppur gli algoritmi sperimentali abbiano apportato un leggero miglioramento (1%). L'incremento sul dilavamento è stato di circa il 6%, anche se una piccola percentuale (circa il 15%) è stata erroneamente classificato come spalling. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che ci sono porzioni di calcestruzzo in cui entrambe le forme di degrado coesistono.

Per riassumere, complessivamente il miglior risultato è stato ottenuto dall'immagine RGB + CM + NewCS. Lo stack con il CM migliora di circa il 3% l'accuratezza globale se combinato con l'immagine RGB. Aggiungendo, inoltre, il NewCS, si ha un aumento di circa il 5% (

Tabella 4). Quindi, sebbene questi sistemi ACM siano nati per scopi diversi, si è dimostrato che possono migliorare sia la geometria che il contrasto spettrale in un output fotogrammetrico, portando ad una maggiore affidabilità dei risultati anche nel campo del rilevamento delle infrastrutture.

Per un ulteriore confronto, la stessa metodologia è stata applicata utilizzando due algoritmi comunemente utilizzati in letteratura: un algoritmo per migliorare il contrasto

(equalizzazione dell'istogramma) e un altro la geometria (Sobel) dell'immagine originale, come già illustrato nel

paragrafo 2. Sono state calcolate anche in questo caso le matrici di confusione, l'accuratezza globale e il coefficiente kappa. Per semplicità, si riportano solo i valori della precisione

complessiva e del coefficiente kappa: 64% e 62%, 0,28 e 0,25, rispettivamente (

Tabella 4). Non solo i valori sono inferiori a quelli ottenuti con gli algoritmi sperimentali, ma sono anche uguali o inferiori all'immagine RGB originale. Pertanto, non vi è stato alcun miglioramento apprezzabile. risultato che, rispetto all'immagine RGB, l'accuratezza relativa al calcestruzzo sano è stata migliorata del 2% considerando il CM, e del 4% aggiungendo anche il NewCS. Si è potuto notare che la principale fonte di errore fosse legata al dilavamento. In

5. Conclusioni

Il presente lavoro è stato realizzato con il fine di presentare una metodologia di rilievo non distruttiva per lo studio del degrado superficiale dei ponti e dei viadotti. In base a quanto osservato nell'analisi dei risultati, la metodologia proposta si è dimostrata soddisfacente ai fini dell'individuazione, del rilievo e della classificazione delle aree degradate. Le principali caratteristiche che la rendono adatta per le ispezioni e il controllo periodico dei ponti e dei viadotti sono la non distruttività del metodo, la capacità di adattarsi ai diversi scenari di rilievo e, grazie all'utilizzo degli UAV, la possibilità di presa di immagini aeree con controllo da remoto in aree difficilmente accessibili. Queste caratteristiche rendono il metodo flessibile ed assicurano la sicurezza degli operatori. Dal primo studio si è ottenuto che l'OBIA sia una tecnica utile all'individuazione delle forme di degrado su opere in calcestruzzo armato, meno dispendiosa a livello di tempo e più oggettiva rispetto ad un'ispezione visiva. Dal secondo studio si è analizzato come la DIP possa concorrere al miglioramento dei risultati. Lo scopo è stato quello di testare algoritmi sperimentali provenienti dal mondo del machine learning e adattarli all'ambito infrastrutturale. Gli ACM hanno dimostrato di essere un valido strumento, grazie alla loro abilità di definire i bordi di un'immagine ed aumentarne il contrasto. È stato dimostrato che l'accuratezza finale viene incrementata utilizzando tali ACM (e, in particolare, il CM e il NewCS) rispetto ai due algoritmi comuni, (equalizzazione dell'istogramma e Sobel). Come studio futuro si potrebbe la miglior ulteriormente indagare procedura volta all'automatizzazione del procedimento, sia testando altri algoritmi di machine learning che seguono il comportamento statistico dell'ACM, ma anche applicando la metodologia a diversi tipi campioni di calcestruzzo e diverse forme di degrado.

Contributi dei singoli autori

Idea e concezione S.Z.; metodologia, S.Z.; validazione, S.Z.; analisi, S.Z.; revisione, S.Z.; supervisione, S.Z. Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

Conflitti di interessi: Tutti gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse da riportare.

Ringraziamenti

Si ringrazia il laboratorio di Geomatica dell'Università degli Studi dell'Aquila, nelle persone di: Prof.ssa Donatella Dominici, Dott. Ing. Maria Alicandro, Ing. Nicole Pascucci e il tecnico di laboratorio Giuseppe Colagrande, nonché del Prof. Raimondo Quaresima e del centro ricerche Semeion di Roma.

Bibliografia

Alicandro, M., Dominici, D., & Buscema, P. M. 2018. A New Enhancement Filtering Approach for the Automatic Vector Conversion of the UAV Photogrammetry Output. In: M. Ioannides, E. Fink, R. Brumana, P. Patias, A. Doulamis, J. Martins, & M. Wallace (Eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and* *Protection* (pp. 312–321). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01762-0_26

Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), pp. 2–16. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004

Buscema, M., & Grossi, E. 2010. J-Net System: A New Paradigm for Artificial Neural Networks Applied to Diagnostic Imaging. In: V. Capecchi, M. Buscema, P. Contucci, & B. D'Amore (Eds.), *Applications of Mathematics in Models, Artificial Neural Networks and Arts: Mathematics and Society* (pp. 431–455). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8581-8_16

Buscema, P. M. 2005. *Sistemi ACM e Imaging Diagnostico: Le immagini mediche come Matrici Attive di Connessioni*. Springer Science & Business Media.

Capacci, L., Bianchi, S., Anghileri, M., Biondini, F., Rosati, G., Pinto, L., et al. 2022. *Structural Health Monitoring and Geometric Survey Informed by Laser Scanner and UAV Mapping of an Existing Tall RC Viaduct.* In: Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability (pp. 1831-1839). CRC Press.

D'Amato, A. 2019. Quali sono i ponti e i viadotti a rischio nell'Italia che crolla. *Nextquotidiano*. https://www.nextquotidiano.it/quali-sono-i-ponti-e-i-viadotti-arischio-nellitalia-che-crolla/. Accessed 27 July 2023 (accessed 31 Agosto 2023).

Gualtieri, J. A. 2009. The Support Vector Machine (SVM) Algorithm for Supervised Classification of Hyperspectral Remote Sensing Data. In *Kernel Methods for Remote Sensing Data Analysis* (pp. 49–83). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9780470748992.ch3

Inglada, J. 2007. Automatic recognition of man-made objects in high resolution optical remote sensing images by SVM classification of geometric image features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(3), pp. 236–248. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.05.011

Pizer, S. M., Amburn, E. P., Austin, J. D., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., et al. 1987. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 39(3), pp. 355–368. https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X

Rau, J. Y., Hsiao, K. W., Jhan, J. P., Wang, S. H., Fang, W. C., & Wang, J. L. 2017. Bridge crack detection using multi-rotary UAV and Object-Base Image Analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2-W6*, 311–318. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics Bruzzone, L., & Carlin, L. 2006. A Multilevel Context-Based System for Classification of Very High Spatial Resolution Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2587–2600. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.875360

(Volume XLII-2/W6) - 7 September 2017, Bonn, Germany. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-311-2017

Skov, T., Holst, L. B., & Fumagalli, M. 2021. 3D Navigation by UAV using a mono-camera, for precise target tracking for contact inspection of critical infrastructures. In: 2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO) (pp. 1–8). 2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO). https://doi.org/10.1109/AIRPHARO52252.2021.9571043

Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., del Río-Barral, P., Perez-Collazo, C., Arias, P., & Riveiro, B. 2019. Review of Laser Scanning Technologies and Their Applications for Road and Railway Infrastructure Monitoring. *Infrastructures*, 4(4), p. 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures4040058

Tang, P., Akinci, B., & Garrett, J. 2007. Laser Scanning for Bridge Inspection and Management. *IABSE Symposium Report*, 93, pp. 17–24. https://doi.org/10.2749/222137807796120283

Teodoro, A. C., & Araujo, R. 2016. Comparison of performance of object-based image analysis techniques available in open source software (Spring and Orfeo Toolbox/Monteverdi) considering very high spatial resolution data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10. https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016011

Vapnik, V. N. 1999. An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 10(5), 988–999. Presented at the IEEE Transactions on Neural Networks. https://doi.org/10.1109/72.788640

Vincent, O., & Folorunso, O. 2009. A Descriptive Algorithm for Sobel Image Edge Detection. InSITE 2009: Informing Science + IT Education Conference. https://doi.org/10.28945/3351

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), p. 627. https://doi.org/10.3390/jmse11030627.

© 2021 by the authors. Open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

© 2021 degli autori. Pubblicazione open access come da termini e condizioni della licenza Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)



© 2021 by the authors. Open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

© 2021 degli autori. Pubblicazione open access come da termini e condizioni della licenza Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

Confronto tra tecnologie TLS e SLAM per la documentazione patrimonio archeologico 3D

Francesco Toffaletti¹, Matteo Massolini¹, Tobia Furlan¹

¹ Università Iuav di Venezia, Santa Croce 191, Venezia - (f.toffaletti, m.massolini, t.furlan)@stud.iuav.it

Keywords: Terrestrial Laser Scanning, 3D Mapping, Simultaneous Localization and Mapping, Mobile Scannig, Geospatial Analysis

Introduzione

La crescente domanda di tecnologie avanzate per la conoscenza e documentazione 3D di ambienti complessi, quali possono essere anche i siti archeologici, ha portato all'emergere e alla diffusione di strumenti basati su tecnologie SLAM. Questo studio si propone di effettuare una comparazione critica tra i dati ottenuti da un rilievo laser scanning e quelli acquisiti da diversi strumenti SLAM, esaminando la qualità e la risoluzione delle nuvole di punti di ciascuno strumento.

Il caso di studio si è concentrato sull'Area Marina Protetta di Porto Cesareo, con particolare riferimento a Torre Chianca, in occasione della scuola estiva SUNRISE Summer School, organizzata da SIFET con il supporto di ISPRS, a cui gli autori hanno partecipato. L'obiettivo dell'esperienza era utilizzare diversi strumenti di rilievo per documentare il patrimonio costiero, impiegando i dati raccolti per lo studio, la gestione, la protezione e la divulgazione del sito. La storia di Torre Chianca risale al XVI secolo, quando fu costruita per ordine di Carlo V come difesa contro le incursioni turche e saracene. La torre, alta 18 metri con una base quadrata di 15,60 metri per lato, è tra le più grandi della zona. Costituiva un punto strategico di avvistamento, collegandosi a sud con Torre Cesarea e a nord con Torre Lapillo, ed era parte di un sistema di sette torri per la protezione del territorio costiero.

Durante la scuola estiva, grazie al supporto delle ditte del settore, sono stati utilizzati strumenti e tecnologie diverse per l'acquisizione di dati georeferenziati, ottenendo nuvole di punti dense e comparabili tra loro. Questi dati, oltre a rappresentare un'accurata documentazione digitale, contribuiscono alla salvaguardia e valorizzazione del patrimonio culturale di Torre Chianca, rendendo possibile un'analisi approfondita per la sua conservazione e promozione.

Metodi e strumenti

I dati del TLS sono stati acquisiti utilizzando il laser scanner ad alta risoluzione LEICA RTC360, impiegato come dataset di riferimento per valutare le prestazioni degli strumenti SLAM in termini di fedeltà delle mappature ottenute.

Strumentazione TLS di riferimento è il LEICA RTC360, uno scanner laser 3D ad alta velocità che permette di effettuare scansioni dettagliate e registrazioni automatiche in tempo reale, acquisendo e registrando dati tridimensionali in modo rapido e preciso. L'accuratezza relativa, dichiarata dalla casa produttrice, è di 1,9mm a 10m dall'oggetto di rilievo.

La tecnologia SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), utilizzata con sistemi di acquisizione mobile detti MMS (Mobile Mapping System), consente di rilevare ambienti 3D e contemporaneamente determinarne la posizione nello spazio. Funzionano attraverso l'elaborazione di dati in tempo reale combinando sensori come LiDAR, fotocamere, IMU e GNSS. Strumentazione SLAM utilizzata è:

- STONEX X70GO:

Strumento di ricostruzione di modelli 3D in tempo reale che integra un modulo di navigazione inerziale, un sistema di archiviazione e di calcolo. Accuratezza relativa: 6mm

- CHCNAV RS10:

Strumento avanzato per mappature in tempo reale, dotato di tecnologia GNSS RTK, laser scanner e SLAM integrati. Lo strumento è in grado di catturare dettagli tridimensionali con elevata densità. Accuratezza relativa: <1cm

NavVis VLX3:

LiDAR scanner indossabile avanzato, dotato di doppio sensore LiDAR a 360° e tecnologia SLAM che permette di acquisire nuvole di punti ad alta densità con una precisione millimetrica.

Accuratezza relativa: 5mm

Analisi dataset

I diversi dataset sono stati importati in Cloud Compare per estrarre, da ciascuna nuvola di punti, un'area di 1 m² (Figura 1). La densità è stata calcolata per ogni nuvola di punti generata dai diversi strumenti SLAM rivelando variazioni significative nei risultati ottenuti. Questa analisi ha permesso di valutare la capacità di ciascuno strumento di registrare dettagli nello spazio rilevato, fornendo una misura della qualità della scansione e dell'adeguatezza di ciascuna strumentazione SLAM per applicazioni che richiedono livelli diversi di risoluzione e dettaglio.



Figura 1. 1x1m di riferimento



Figura 2. LEICA RTC360 1x1m 350,325 Points/m²



Figura 3. STONEX X70GO 1x1m 11,211 Points/m²



Figura 4. NavNis VLX3 1x1m 34,797 Points/m²



Figura 5. CHCNAV RS10 1x1m 46,915 Points/m

Successivamente, le nuvole di punti ottenute tramite tecnologia SLAM sono state orientate rispetto alla nuvola di riferimento acquisita con TLS. Quest'operazione è stata eseguita nel software Cloud Compare, utilizzando come base i GCP (Ground Control Points) misurati con precisione tramite stazione totale.

Per l'analisi comparativa, è stata creata una sezione verticale, su cui è stata eseguita una misurazione dettagliata della discrepanza tra ciascuna nuvola di punti SLAM e la nuvola TLS di riferimento (Figura 6). Questo confronto ha permesso di quantificare le differenze di accuratezza e precisione tra le tecnologie, evidenziando eventuali deviazioni o errori nei rilievi SLAM rispetto allo standard fornito dal TLS. Tali misurazioni risultano fondamentali per valutare l'affidabilità dei diversi strumenti SLAM nelle applicazioni pratiche, soprattutto in contesti in cui la precisione del rilievo è un fattore fondamentale.



Figura 6. Sezione verticale di riferimento



Figura 7. Ingrandimento nuvole Cloud Compare. Colore verde: LEICA RTC360. Colore rosso: STONEX X70GO. Colore blu: NavVis VLX3. Colore giallo: CHCNAV RS10.


Figura 8. Comparazione TLS – STONEX X70GO. Mean = 0.094329 / std. Dev. = 0.062425



 $\label{eq:Figura 9. Comparatione TLS-NavVis VLX3} Mean = 0.027687 \, / \, std. \, Dev. = 0.027802$



Figura 10. Comparazione TLS- CHCNAV RS10 Mean = 0.049098 / std. Dev. = 0.044936

Conclusioni

I risultati del confronto indicano che i dati TLS si confermano superiori in termini di risoluzione e accuratezza, offrendo una precisione tale da permettere una restituzione in scala 1:20 - 1:50, adatta a rilievi di architettura e dei monumenti archeologici. Questa accuratezza elevata è dovuta anche alla natura statica della scansione TLS, che minimizza le possibili fonti di errore e assicura un posizionamento altamente accurato. Tuttavia, gli strumenti basati su SLAM (Figura 8-10), pur mostrando un grado di errore generalmente superiore rispetto al TLS, si sono dimostrati in grado di fornire dati accurati che consentono una restituzione in scala 1:100 - 1:200, quindi idonei per contesti urbani e per la restituzione di cartografia a grande scala (carte archeologiche).

La strumentazione SLAM risulta quindi essere una scelta adatta, sia per la rapidità che l'adattabilità rispetto ad ambienti che potrebbero essere complessi per un rilievo di tipo statico, nel caso in cui l'errore della scala nominale necessaria rientri nei parametri indicati.

Confronto tra tecnologie LiDAR per la digitalizzazione di precisione del Patrimonio Culturale. Il caso studio di Porta Pia, Ancona

Lucrezia Gorgoglione¹, Eva Savina Malinverni¹, Roberto Pierdicca¹

¹ DICEA, Università Politecnica delle Marche, Ancona (Italia), l.gorgoglione@pm.univpm.it, e.s.malinverni@staff.univpm.it, r.pierdicca@staff.univpm.it

Keywords: LiDAR, TLS, MMS, UAS, Patrimonio Culturale, Digitalizzazione.

Abstract

La conservazione e valorizzazione del Patrimonio Culturale richiede l'utilizzo di tecnologie avanzate per la documentazione dettagliata degli elementi spaziali e materiali. Tra queste, la rappresentazione 3D si è affermata come uno strumento essenziale, consentendo la creazione di modelli digitali accurati per scopi di restauro, analisi e divulgazione (Campi et al., 2022). Questo studio si concentra sulle più recenti innovazioni per l'acquisizione e la digitalizzazione del patrimonio culturale (DCH) tangibile, con l'obiettivo di contribuire alla definizione di procedure standard, definiti da protocolli internazionali, per l'acquisizione e la valutazione dei dati, sostenendo la conservazione, il restauro e la valorizzazione dei beni culturali. Come caso studio è stato scelto Porta Pia ad Ancona, costruita tra il XVI e il XIX secolo, esempio di architettura rinascimentale e barocca. Progettata per celebrare l'ingresso monumentale alla città, la digitalizzazione di Porta Pia offre l'opportunità di preservare digitalmente dettagli architettonici unici, proteggendo al contempo il monumento dai rischi di deterioramento fisico. Monumenti come Porta Pia non solo simboleggiano l'identità culturale della comunità locale, ma costituiscono anche un patrimonio condiviso a livello nazionale e internazionale. La loro conservazione è fondamentale per le generazioni future e per il mantenimento della memoria storica collettiva. Di fronte a queste sfide, diverse organizzazioni internazionali come UNESCO (2003) e ICOMOS (1994), nonché enti nazionali e regionali, hanno promosso protocolli, standard e linee guida che sottolineano l'importanza della ricerca e del trasferimento delle conoscenze da altre discipline per migliorare i metodi di intervento, conservazione e gestione del patrimonio culturale tangibile (Ioannides, 2022). Tuttavia, esistono ancora lacune nelle linee guida che definiscono quali strumenti, metodi, sensori e dati siano necessari per raggiungere gli obiettivi prefissati in diversi progetti dedicati al patrimonio architettonico tangibile (Carta di Londra, 2009; Carta di Siviglia, 2011). Questa carenza complica la scelta delle tecnologie geomatiche più appropriate da utilizzare nel rispetto degli standard, considerando che tali tecnologie variano per tipologia di sensore, livello di precisione, grado di risoluzione, tempi e costi (Di Stefano et al., 2021a). Inoltre, le condizioni ambientali possono influire sull'uso dei sensori e sulle tecniche di acquisizione, così come la disponibilità di risorse, tempi e costi possono influenzare la scelta della tecnologia da utilizzare (Di Stefano et. al, 2021b).

Metodologia. Per valutare l'uso di diverse tecnologie LiDAR con lo scopo di realizzare una digitalizzazione efficiente del patrimonio culturale, sono stati utilizzati i sensori di acquisizione dati più diffusi sul mercato. In particolare, sono stati considerati quattro sensori: il Mobile Mapping System FARO Orbis, i Laser Scanner Terrestri FARO FOCUS e REALSEE Galois M2 e il Sistema Laser Aereo DJI Matrice 350 RTK con Zenmuse L2 (Fig. 1). Questi strumenti sono stati selezionati per la loro versatilità di applicazione e modalità operative e per valutarne le prestazioni ed evidenziarne i vantaggi e gli svantaggi sugli aspetti qualitativi e quantitativi in termini di accuratezza metrica, densità della nuvola di punti, qualità del dataset, costi, tempi di acquisizione ed elaborazione dei dati.

L'indagine eseguita ha considerato i dati acquisiti con il TLS FARO FOCUS Premium come ground truth per le successive analisi qualitative e quantitative, in quanto le caratteristiche del sensore sono più accurate. Successivamente le nuvole di punti, ottenute dai quattro strumenti, sono state convertite nel formato di interscambio .e57, allineate manualmente e perfezionate con l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point), esaminate e valutate secondo le metriche tipiche e le diverse strategie utilizzate in letteratura (Tanduo et al., 2023; Maté-González et al., 2022) attraverso il software opensource Cloud Compare. L'utilizzo del DJI Matrice 350 RTK con Zenmuse L2, ha permesso inoltre di acquisire un doppio dataset: oltre ai dati LiDAR, grazie alla presenza del sensore ottico integrato, è possibile ottenere immagini ad alta risoluzione per la fotogrammetria UAV. Questa caratteristica consente di combinare l'accuratezza metrica del LiDAR con la ricchezza cromatica delle immagini fotogrammetriche, migliorando la qualità e la completezza della digitalizzazione del bene culturale. Per analizzare le caratteristiche geometriche dell'oggetto rilevato, sono state definite come aree campione le porzioni di ingresso della Porta e sono stati calcolati i valori di densità e rumore utilizzando rispettivamente gli algoritmi matematici number of neighbours e roughness implementati in CloudCompare, considerando una sfera di raggio 0,02 m. Infine, sono state estratte sezioni trasversali dalle nuvole di punti per valutare la capacità degli strumenti di ricostruire le caratteristiche geometriche significative per le rappresentazioni bidimensionali, essenziali negli interventi di restauro e nella documentazione architettonica. Questa analisi ha permesso di capire come gestire le rappresentazioni 2D generalmente richieste nel campo del patrimonio culturale.

Risultati. Dall'analisi dei risultati ottenuti dai quattro strumenti sono emerse differenze significative in termini di costi e tempi di acquisizione, accuratezza metrica e densità delle nuvole di punti. In termini di costo-efficienza, FARO Orbis e REALSEE Galois M2 si sono dimostrati più vantaggiosi per la loro capacità di acquisire dati rapidamente e con un processamento relativamente veloce. FARO Orbis, in particolare ha offerto un buon compromesso tra accuratezza e velocità, con un tempo di processamento di 30 minuti. Il REALSEE Galois M2, ha mostrato un'accuratezza inferiore con un RMSE medio di 3,9 mm, ma ha compensato con tempi di acquisizione e processamento molto rapidi, per un totale di 90 minuti circa. FARO FOCUS Premium ha confermato la sua precisione nelle misurazioni in modalità statica con un RMSE medio di 2,3 mm. Tuttavia, il tempo di acquisizione e il tempo di processamento lo rendono la soluzione più lenta rispetto agli altri metodi e più dispendiosa dal punto di vista economico. Il drone DJI Matrice 350 RTK con Zenmuse L2, ha tempi di acquisizione e



Figura 1. Caratteristiche tecniche delle strumentazioni impiegate per il rilievo. Nuvola di punti densa. Dettaglio: Porta Pia, lato nord.

processamento sono contenuti: 15 minuti per la pianificazione del volo e l'acquisizione e 15 minuti per l'elaborazione dei dati. Questo strumento si è rivelato particolarmente efficace nel colmare le lacune presenti nei dataset degli altri sensori, specialmente in aree difficili da raggiungere con metodi tradizionali.

Conclusioni. Questo studio evidenzia la necessità di stabilire procedure standard per l'acquisizione e la valutazione dei dati nella digitalizzazione del patrimonio culturale. Tale ricerca si inserisce nelle attività degli autori all'interno di ICOMOS Italia - CIPA HD (Documentazione del Patrimonio Culturale), mirate

a sviluppare linee guida attraverso il confronto e la collaborazione con altre realtà scientifiche specializzate nella digitalizzazione del patrimonio culturale tangibile.



Figura 2. Schema del percorso di acquisizione MMS. Dettaglio: Porta Pia, lato sud.

Ringraziamenti. Gli autori ringraziano il Comune di Ancona, per aver concesso l'opportunità di condurre gli studi su Porta Pia. Questo lavoro è stato finanziato nell'ambito della convenzione tra Microgeo srl e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) - UNIVPM, "Testing e controllo con metodi di validazione statistici su dati geomatici multisorgente e multisensore per il rilevamento prossimale e remoto".

Riferimenti

Campi, M., Falcone, M., & Sabbatini, S.: Towards continuous monitoring of architecture. Terrestrial laser scanning and mobile mapping system for the diagnostic phases of the cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-2/WI-2022*, 121–127. (2022)

Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021a). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, natural hazards and risk*, 12(1), 2387-2429.

Di Stefano, F., Torresani, A., Farella, E. M., Pierdicca, R., Menna, F., & Remondino, F. (2021b). 3D surveying of underground built heritage: Opportunities and challenges of mobile technologies. *Sustainability*, *13*(23), 13289.

ICOMOS. The NARA document on authenticity (1994). https://www.icomos.org/en/179-articles-en-francais/ressources/chartersand-standards/386-the-nara-document-on-authenticity-1994, ultimo accesso 2024/10/16.

Ioannides, M. (2022). Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines: final study report.

Maté-González, M. Á., Di Pietra, V., & Piras, M. (2022). Evaluation of different lidar technologies for the documentation of forgotten cultural heritage under forest environments. *Sensors*, *22*(16), 6314.

Tanduo, B., Teppati Losè, L., & Chiabrando, F. (2023). Documentation of complex environments in cultural heritage sites. A SLAM-based survey in the Castello del Valentino basement. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *48*, 489-496.

UNESCO. UNESCO Declaration Concerning the Intentional Destruction of Cultural Heritage. Paris, 17 October 2003. https://internationalreview.icrc.org/sites/default/files/irrc. 854_unesco_eng.pdf_____ultimo.

review.icrc.org/sites/default/files/irrc_854_unesco_eng.pdf, ultimo accesso 2024/10/16.

Mappatura della vegetazione ripariale attraverso DeepForest: Costi e Benefici di una nuova procedura operativa end-to-end

Nicholas Fiorentini, Ph.D.¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale (DICI), Scuola di Ingegneria dell'Università di Pisa, Largo Lucio Lazzarino 1, 56122, Pisa, nicholas.fiorentini@ing.unipi.it

Keywords: Vegetazione Ripariale, Ortofoto ad alta risoluzione, DeepForest, Intelligenza Artificiale, Analisi Costi-Benefici, Gestione e Manutenzione della Rete Idrologica

Abstract

L'importanza ecologica e sociale della vegetazione ripariale è ben riconosciuta per il mantenimento degli ecosistemi fluviali. Tuttavia, la mappatura di questa vegetazione è ad oggi un processo manuale, costoso e dispendioso in termini di tempo e denaro, soprattutto in aree difficili da raggiungere. In un recente studio collaborazione con il Consorzio di Bonifica Toscana Nord, al fine di mappare automaticamente la vegetazione ripariale, è stata sviluppata una nuova procedura operativa basata sull'Intelligenza Artificiale che utilizza l'algoritmo "DeepForest". Questo sistema automatizzato è stato impiegato per la mappatura della vegetazione ripariale lungo il fiume Serchio, utilizzando orto-immagini ad alta risoluzione della Regione Toscana. I risultati indicano che l'efficacia di DeepForest è comparabile a quella dei metodi manuali, con un risparmio significativo di costi (83%) e tempi (84%). Questa innovazione potrebbe offrire ai consorzi di bonifica uno strumento più efficiente per la gestione delle fasce ripariali, migliorando la pianificazione e riducendo i rischi idrogeologici.

1. Breve Introduzione Bibliografica

Riconosciuta per la sua importanza ecologica, idrologica e sociale, la vegetazione ripariale svolge un ruolo cruciale per il buon funzionamento degli ecosistemi fluviali [1]. Dal punto di vista degli enti gestori (Consorzi di Bonifica), l'identificazione e mappatura della vegetazione ripariale lungo i fiumi è un'attività di fondamentale importanza: permette di perseguire un'efficace azione manutentiva ordinaria e straordinaria, consentendo di allocare oculatamente le risorse disponibili prevenendo potenziali rischi idro-geologici, e garantendo una costante e buona funzionalità del corpo idrico [2]. In questo ambito, la mappatura manuale della vegetazione ripariale attraverso rilievi in-situ si rivela estremamente dispendiosa in termini di tempo e denaro, soprattutto per reti fluviali estese e poco accessibili.

Conseguentemente, in questo recente studio condotto dall'Università di Pisa e dal CNR [3], in collaborazione con il Consorzio di Bonifica Toscana Nord, è stata sviluppata una metodologia operativa per identificare e mappare la vegetazione ripariale negli ecosistemi fluviali utilizzando un algoritmo di intelligenza artificiale denominato "DeepForest" [4,5], specificatamente progettato per estrarre informazioni rilevanti da immagini aeree (utilizzando i canali RGB). L'algoritmo, open-source, lavora in ambiente PYTHON e può essere integrato semplicemente con le informazioni derivanti da software GIS.

Le potenzialità della procedura sono state quantificate per mezzo di una comprensiva analisi costi-benefici, confrontando costi, tempi, attrezzature necessarie, personale, software e hardware richiesti, associati ai tre diversi rilievi della vegetazione ripariale: rilievi in-situ, annotazione manuale sulle orto-foto, e annotazione automatica con DeepForest.

2. Metodologia e Principali Risultati

Per la calibrazione e validazione dell'algoritmo DeepForest, la ricerca ha utilizzato le più recenti orto-immagini aeree ad alta risoluzione (pixel a terra di 20x20 cm) della Regione Toscana relative all'anno 2023 [6] su un'area di oltre 35 km2 (Figura 1). Il corso d'acqua oggetto di studio - circa 10 km del fiume Serchio, a nord della città di Lucca - rientra nelle competenze manutentive del CB Toscana Nord, responsabile della gestione di oltre 8.000 km di fiumi, torrenti e canali in diverse aree urbane, suburbane e montane della zona settentrionale Toscana. I risultati dimostrano che le potenzialità del modello proposto sono paragonabili a quelle di operatori e professionisti esperti che conducono la mappatura manuale della vegetazione ripariale sulle stesse orto-immagini ad alta risoluzione. Allo stesso modo, i punti di debolezza nel riconoscimento della vegetazione sono simili a quelli dell'operatore umano e riguardano essenzialmente le difficoltà di conteggio del numero di alberi quando essi sono in gruppo o in filari. In aggiunta, l'algoritmo DeepForest restituisce anche il valore dell'affidabilità della previsione della presenza degli alberi (Figura 2).

Tramite opportune analisi quantitative delle performance dell'algoritmo (Figura 3), associate a rilievi in campo (Figura 4), è stato dimostrato che il riconoscimento della presenza di alberi risulta affidabile quando la soglia è fissata ad un valore di circa 0.25, in cui si raggiunge l'ottimo compromesso tra il numero di Corretti Positivi, Falsi Positivi e Falsi Negativi. Nella legenda della Figura 2, la vegetazione correttamente predetta corrisponde dunque ai punti dall'arancio al verde.



Figura 1. Esempio di una delle orto-foto RGB dell'anno 2023 di Regione Toscana e suoi ingrandimenti. Ciascuna orto-foto copre un'area di oltre 12 km2. In ciascuna figura, in basso a destra, è visibile la scala dell'orto-foto. Si nota l'ampia copertura della singola immagine (figura in alto) ed i dettagli nitidamente visibili anche in scala 1:250 (figura in basso).



Figura. 2. Esempio di mappatura della vegetazione ripariale con l'algoritmo DeepForest.



Figura 3. Quantificazione delle capacità previsionali di DeepForest. La validazione è stata eseguita confrontando la previsione del modello con un'annotazione manuale di 700 specie arboree ricadenti sull'area di studio (TP= corretti positivi, TN = corretti negativi, FN = falsi negativi). La miglior soglia appare essere circa 0.25, per la quale si ha il punto di inversione tra FP e FN, e per la quale il numero di alberi predetti dal modello è pari al numero di annotazioni effettuate (circa 700).



Figura 4. Mappatura manuale in-situ di vegetazione ripariale lungo il fiume Serchio. Si riconosce vegetazione ripariale composta da: (a) specie arboree distinte su sottobosco erbaceo, (b) specie arboree distinte su sottobosco arbustivo, (c) specie arboree in gruppo/filare su sottobosco arbustivo.

Le potenzialità della procedura sono state infine valutate per mezzo di un'analisi costi-benefici quantitativa, confrontando costi (in termini di euro/km di fiume analizzato), tempi (in termini di ore), attrezzature necessarie, personale, software e hardware richiesti, associati ai tre diversi rilievi della vegetazione ripariale: rilievi in-situ, annotazione manuale sulle orto-foto, e annotazione automatica con DeepForest (Tabella 1). Nella Tabella 1 si evidenzia che il costo del rilievo in-situ è di circa 102 euro/km con una capacità di copertura (8 ore lavorative al giorno) di circa 1,6 km/giorno, mentre l'annotazione manuale della vegetazione ripariale su orto-foto è di circa 29 euro/km con una capacità di copertura di circa 5 km/giorno. Sfruttando le potenzialità di DeepForest, si è calcolato un risparmio dell'83% dei costi (17 €/km) e del'84% dei tempi (10 km/giorno).

	Rilievi in-situ	Annotazione manual di ortofoto	Annotazione automatica con DeepForest
Costo stimato dell'intero processo*	$600 \notin \text{per i}$ rilievi in situ (3 giorni, 2 operatori) + $300 \notin \text{per la}$ mappatura (tecnico esperto, 2 giorni) + $100 \notin \text{per}$ redigere il report (tecnico, 1 giorno) + $24 \notin \text{per i costi}$ di licenze software	$150 \notin \text{per}$ l'annotazione (tecnico esperto, 1 giorno) + $100 \notin \text{per}$ redigere il report (tecnico, 1 giorno) + $42 \notin \text{per}$ i costi di licenze software	150 € per utilizzo algoritmo e redazione del report (tecnico esperto, 1 giorno) + 21 € per i costi di licenze software
	=	=	=
	102 €/km di fiume	29 €/km di fiume	17 €/km di fiume

Tabella 1. Analisi comparativa Costi-Benefici

In definitiva, grazie al modello di analisi proposto, i Consorzi di Bonifica potrebbero acquisire migliori informazioni e conoscenze sull'evoluzione della vegetazione arborea nelle fasce ripariali, indispensabili per la redazione dei piani annuali di manutenzione del reticolo idrografico.

Riferimenti Bibliografici

Fiorentini, N., Bacco, M., Ferrari, A., Rovai M., Brunori G. Remote Sensing and Machine Learning for Riparian Vegetation Detection and Classification, MetroAgriFor 2023 – 2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, Pisa, IT, November 6-8, 2023, pp. 369-374, https://doi/10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424205

Lepore F., Ortolani, L., Ferrari A., Fiorentini, N., Mannari, C., Bacco, M., Brunori, G. Co-Design and e-Governance Tools for Sustainable Land and Water Management in Rural Areas: The Experience Within the DESIRA H2020 Project, MetroAgriFor 2023 – 2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, Pisa, IT, November 6-8, 2023, , pp. 25-30, https://doi/10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424263

Fiorentini N., Bacco M., Ferrari A., Rovai M., Brunori G., Riparian vegetation mapping through an adapted DeepForest Algorithm: Costs and benefits of a novel end-to-end operating framework, 2024, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (in revisione)

Weinstein, B.G., Marconi, S., Aubry-Kientz, M., Vincent, G., Senyondo, H., White, E.P., 2020. DeepForest: A Python package for RGB deep learning tree crown delineation. Methods Ecol Evol 11. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13472

Weinstein, B.G., Marconi, S., Bohlman, S.A., Zare, A., Singh, A., Graves, S.J., White, E.P., 2021. A remote sensing derived data set of 100 million individual tree crowns for the national ecological observatory network. Elife 10. https://doi.org/10.7554/eLife.62922

https://www502.regione.toscana.it/geoscopio/servizi/wms/OFC _RT.htm

Geohumanities and 3D surveying technologies: new discoveries on the structure of Palazzo Pitti

Adele Meucci^{1-2*}. Lidia Fiorini¹⁻²

¹GeCO Lab, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Via di S. Marta, 3 - 50139 Firenze, Italy (adele.meucci, lidia.fiorini)@unifi.it

²La Sapienza University of Rome, P.le A. Moro, 5, 00185 Rome, Italy

Keywords: Geohumanities, Integrated survey, 3D modelling, Archival data, Spatial data, Laser scanning

1. Extended Abstract

The integration of spatial data and historical sources profoundly enriches architectural research, providing the opportunity to formulate more robust hypotheses grounded in objective evidence. In this context, geomatics goes beyond merely documenting architectural heritage; it contributes to a more dynamic and nuanced understanding of buildings and their histories, thus becoming a fundamental pillar of the Geohumanities (Bodenhamer et al., 2010).

One of the main innovations introduced by geomatics in this field is the ability to create three-dimensional models of buildings, overcoming the limitations of traditional two-dimensional representations. The 3D representation enables a more detailed and intuitive view of space, allowing researchers to explore the structure from different angles and to analyze relationships between various parts of the building in depth. Furthermore, this approach offers great flexibility for survey technicians, who can manipulate point clouds acquired through techniques such as Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Structure from Motion (SfM) photogrammetry, examining every detail during data processing. Thanks to these technologies, it is possible to acquire highly detailed point clouds that accurately replicate the building's geometry and its components, enabling more precise and in-depth analyses. However, fully leveraging these technologies in this context requires training that goes beyond technical expertise. It is essential for professionals involved to also have a humanistic background that allows them to correctly interpret the data within the historical and architectural context of the building. Only with solid interdisciplinary training is it possible to fully understand an edifice's transformations over time and to analyze its state of preservation, thereby significantly contributing to research and heritage conservation.

The paper illustrates how integrating geospatial data with archival The first useful considerations, relating the structures surveyed and secondary sources provides innovative tools for understanding complex systems such as historic buildings, exemplified in the case study of Palazzo Pitti in Florence. The survey of the palace, conducted between 2019 and 2021, combined various tools and techniques, including terrestrial and UAV photogrammetry, laser scanning, and a control network measured using GPS and a total station. This approach follows methods similar to those described by (Grussenmeyer et al., 2011), who explored the fusion of high-resolution photogrammetric data with laser scans for accurate documentation of cultural heritage. Christian Greco (Greco, 2019) emphasizes how "the digital revolution has already profoundly transformed our cognitive approach": digitalization has changed the way we conduct research and interact with artifacts. The ability to georeference the information contained in documents gives them renewed meaning; this awareness, combined with the understanding of

the physical and material nature of the building, stimulates new questions and alternative answers.

A first result of this methodological approach was presented in (Fiorini et al., 2023), focused on the digital reconstruction of the "Spiral Staircase" created by Bartolomeo Ammannati in the north wing of the courtyard of Palazzo Pitti, which was demolished in the 19th century.

This study summarises the results of a specialization thesis (Meucci, 2024) and focuses on a small interstitial space on the noble floor of the palace, within the Palatin Gallery, between the Anticamera degli Staffieri and the Sala Verde. This is one of the few unfinished spaces in the complex, and it is accessed through a hatch in the ceiling of one of the passage rooms between the two halls (Figure 1). It is a narrow, hard-to-access, unlit space that only accommodates installations, which is perhaps why it was overlooked in previous surveys and studies. However, the increasing flexibility and miniaturization of laser scanning systems have allowed for 3D documentation, though not entirely exhaustive. The scans were referenced using overlap with data recorded in the rooms below. It is important to note that this procedure enabled the correct referencing of data relative to the entire building. This aspect is particularly relevant, as hypotheses and considerations regarding construction aspects require comparisons and measurements referenced to elements in other parts of the building, as described below. This made it possible to conduct analyses on the digital model of the complex structural articulation and the various traces of successive interventions over time. Its position within the palace and the architectural structures found there raise several unresolved construction-related issues regarding the entire palace, such as the original floor plan of the noble floor and the configuration of the counter-fac ade of the 15th-century palace, attributed to Brunelleschi.

in the interstitial space to their location within the broader context of the entire palace, concern the floor plan of the noble floor of the 15th-century building. In fact, the three-dimensional point cloud model provides an immediate visualization of how the jamb of the arch present in the interstitial space is perfectly aligned with the masonry that separates the large vaulted room from the adjacent barrel-vaulted space on the ground floor. The dimensions of the arch in the interstitial space and the springing height coincide with those of the barrel vault in the room below (Figure 2). This hypothesis is further confirmed by the presence in the interstitial space of a fragment of a springing frame, identical in form to the frames at the springing of the barrel vault in the room beneath. This suggests that the structures surveyed in the interstitial space confirm the similarity in the floor plan of the noble floor and the ground floor, а fact historically documented in Alessandro Pezzano's 1577 re-



Figure 1. Contextualization of the interstitial space on the noble floor - point cloud model.

port (Pezzano, 1577) and the floor plan of the first floor drawn by Furttenbach (Futtenbach, 1628), dated between 1617 and 1621, and now further supported by these architectural evidences. The original floor plan of the 15th-century palace is identified based on the ground-floor drawing made by Alfonso Parigi il Vecchio in 1566 in his notebook (Parigi et al., 1547). This plan consists of a large central hall, two symmetrical barrelvaulted rooms, and two other symmetrical rooms covered by cross vaults. This plan is confirmed by the current structures on the ground floor, but also by the supporting masonry in the basement; and, in light of these new findings in the interstitial space under study, also on the first floor.

On the east wall of the interstitial space, adjacent to the *Anticamera degli Staffieri*, beneath the arch of the barrel vault described above, there is a large opening with a double infill: one referring to a larger opening and another, inside it, referring to a smaller opening with a stone frame (Figure 3). Corresponding to this smaller stone frame, in the *Anticamera*, a window is painted, attributed to Giuseppe Maria Terreni and dated around 1790. The point cloud model revealed that the frame on this side has its own three-dimensionality, projecting with a molded profile of about 6.00 cm from the wall—details that are difficult to identify when observing the window from inside the *Anticamera degli Staffieri*.

From the three-dimensional point cloud model, it was possible to observe that the larger infilled window is positioned higher than the vault of the *Anticamera degli Staffieri*. This suggests that this opening, if and when it was opened, must have been made before the construction of the *Anticamera* vault. The vault formed the southernmost end of the large loggia on the noble floor, attached to the counter-fac, ade of the fifteenth-century build ing, constructed by Ammannati — begun around 1563 and completed after the demolition of the *'casa vecchia'* around 1568 — and now divided into the *Anticamera degli Staffieri*, the *Galleria delle Statue*, and the *Sala Castagnoli*.

Before the construction of the loggia, it is thus possible that the large window was opened in the counter-fac ade of the fifteenthcentury building. When Ammannati built the loggia's vault, the opening must have been reduced: the stone frame of the larger opening was cut, and the stone frame for the smaller opening was installed, partially demolishing the masonry on either side of the larger window to inset the smaller frame. This hypothesis is further confirmed by the relative positioning of the two openings in relation to the respective vaults, which explains the misalignment between the two windows: the larger opening is centered on the arch in the interstitial space (possibly corresponding to the pre-existing barrel vault), while the smaller opening is centered on the vault of the Anticamera degli Staffieri. The misalignment between the two is only a few centimeters (about 11.00 cm), but enough that one of the jambs of the smaller window, when viewed from the side of the interstitial space, is completely embedded in the masonry (Figure 4). It is evident that this misalignment between the two openings could only be measured thanks to the precise survey and threedimensional model of the masonry structures, obtained through the integration of various scanning and photogrammetry techniques. The high resolution of the collected spatial data enabled the identification of minimal details and structural misalignments that are not visible to the naked eye, such as the 11.00 cm discrepancy between the openings, thus opening new research perspectives on the architectural evolution of the building.

In conclusion, the significant findings of the study have provided confirmation of the floor plan of the fifteenth-century palace on the noble floor and have provided an initial indication of one of the openings on the rear fac, ade of the palace, revealing part of the original configuration of the counter-fac, ade. The use of geomatics, combined with the study of archival sources, has proven essential for deepening the understanding of the historical transformations of Palazzo Pitti and for providing a solid foundation for future conservation interventions.



Figure 2. Longitudinal section passing through the interstitial space (highlighted in yellow) and correspondences with the structures of the interstitial space and those on the ground floor.



Figure 3. Longitudinal section of the interstitial space, with the two overlapped sealed openings highlighted in red.



Figure 4. Longitudinal section of the interstitial space – correspondence between the openings and the vaults, and the 11 cm misalignment between the two structures.

References

Bodenhamer, D. J., Corrigan, J., Harris, T. M., 2010. *The Spatial Humanities: GIS and the Future of Humanities Scholarship*. Indiana University Press, Bloomington.

Fiorini, L., Conti, A., Meucci, A., Bonora, V., Tucci, G., 2023. Between spatial and archival data: digital humanities for the history of a staircase of Pitti Palace. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, 571–577. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-571-2023.

Futtenbach, J., 1628. Architectura civilis. https://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/furttenbach1628.

Greco, C., 2019. Rivoluzione digitale e umanesimo: Archeologia invisibile - summer school entrepreneurship in humanities. https://www.fondazionegolinelli.it/it/events/rivoluzionedigitale-e-umanesimo-archeologia-invisibile-68.

Grussenmeyer, P., Alby, E., Assali, P., Poitevin, V., Hullo, J.-F., Smigiel, E., 2011. Accurate documentation in cultural heritage by merging TLS and high-resolution photogrammetric data. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XI*, Proceedings of SPIE, 8085, SPIE, 808508.

Meucci, A., 2024. Modelli digitali a supporto di nuove ricerche sul palazzo di Luca Pitti. Specialization thesis, Florence, Italy. 2023/2024 academic year.

Parigi, A., Parigi, G., Parigi, A., 1547. Ricordi di cose pubbliche e private, dall'anno 1547 all'anno 1660. https://archive.org/details/palatino-853. BNCF, Palatino 853, Florence. Pezzano, A., 1577. Descrittione dell'apparato delle stanze del palazzo de' Pitti in Fiorenza, nelle quali fu alloggiato dal gran duca di Toscana, Francesco de'Medici, il clarissimo sig. Andrea Gussoni, ambasciatore, mandato dal serenissimo & illustrissimo principe, e senato di Venetia, a sua altezza: raccolta da Alessandro Pezzano bolognese. Gratioso Perchacino, Venice. Biblioteca Civica A. Mai e Archivi Storici Comunicali di Bergamo.

Sviluppo di un HBIM per l'Analisi dei Meccanismi Locali di un Bene Architettonico in Muratura

Adriana Martella¹, Francesco Mancini¹, Loris Vincenzi¹

¹ DIEF – Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Via Pietro Vivarelli 10, 41125 Modena, Italia – adriana.martella@unimore.it

Keywords: HBIM, Scan-to-BIM, BIM-to-FEM, Costruzione in muratura, Meccanismi Locali.

1. Introduzione

Oggigiorno qualsiasi intervento edilizio implica una eterogeneità di criteri, discipline e iter, interpellando differenti figure professionali. Ne deriva una fitta e articolata rete di collegamenti tra soggetto promotore, tecnici, maestranze e fornitori, che tendenzialmente sfocia in dispendi di tempo e denaro. Questa matassa edilizia può essere agevolmente sciolta mediante la digitalizzazione dei processi informativi. Costruendo un unico modello informativo del bene edilizio, si favorisce il flusso di lavoro, ottimizzando la gestione delle informazioni durante l'intero ciclo di vita della costruzione. Infatti, il BIM (Building Information Modelling) viene composto incrementando e aggiornando progressivamente tutte le informazioni, geometriche e alfanumeriche, relative al bene di riferimento, al fine di costituire una fonte affidabile per le

attività di progettazione, realizzazione e manutenzione. Dati gli innumerevoli benefici, l'adozione della modellazione BIM è relativamente diffusa nell'ambito delle nuove edificazioni, costituite da geometrie pressoché standardizzate, per le quali la parametrizzazione risulta proficua poiché evita il ripetersi di medesime meccaniche procedurali. Differenti sono le circostanze che intervengono nella modellazione informativa di una costruzione esistente. Infatti, la maggior parte del patrimonio costruito non è affiancata da un gemello digitale, realizzato durante la fase di progettazione, motivo per cui si attua un processo di reverse engineering.

Il presente elaborato espone il procedimento svolto al fine di ottenere un modello Historical BIM adatto a comprendere il comportamento strutturale e investigarne i presumibili meccanismi locali, servendosi come caso studio della Rocca Malatestiana di Verucchio, in provincia di Rimini (Figura 1). La fortezza, posta sulla sommità dello sperone roccioso di Verucchio, si presenta come una delle più ampie e meglio conservate fortificazioni malatestiane: essa è il risultato del sovrapporsi di differenti porzioni architettoniche, derivanti dai cambi di destinazioni d'uso, da strumento bellico a residenza signorile, che si susseguirono dal XII al XVI secolo.

2. Metodi di indagine

La Rocca del Sasso è classificabile come un edificio di interesse storico-monumentale e come tale è caratterizzato da geometrie irregolari e complesse, derivanti sia dall'artigianalità dell'epoca sia dal deterioramento nel tempo. Al fine di conseguire una modellazione coerente con lo stato di fatto, essa è stata eseguita a partire da una nuvola di punti risultante da un rilievo integrato, con laser a scansione terrestre e fotogrammetria, effettuato dall'équipe dell'Università degli Studi di Ferrara.

I sei file forniti sono stati rielaborati mediante l'ausilio del software ReCap Pro, appartenente alla casa produttrice Autodesk, al fine di ottenere la nuvola di punti, illustrata in Figura 2, che ritraesse la totalità del sito. La point cloud così prodotta ha restituito un contesto spaziale eccessivamente vasto

rispetto i fini della modellazione informativa, oltre a costituire un dataset di difficile gestione con strumenti informatici ordinari. Dunque, antecedentemente alla fase di modellazione nel software di BIM Authoring, è apparso necessario eseguire alcune procedure di ottimizzazione della nuvola di punti, rimuovendo tutte le porzioni rappresentanti elementi di scena futili e di disturbo, conservando esclusivamente il fabbricato. Il risultato è riportato in Figura 3.

In accordo al processo Scan-to-BIM, la modellazione informativa è stata eseguita assegnando alla nuvola di punti il ruolo di impalcatura del HBIM della Rocca del Sasso nell'ambiente di modellazione architettonica di Autodesk Revit. La procedura di modellazione adottata ha condotto la costruzione digitale della geometria dell'edificio dal generale al particolare, dando la precedenza agli elementi essenziali come muri, pavimenti e copertura rispetto agli elementi di dettaglio. La modellazione manuale dei componenti murari sulla nuvola di punti è stata convalidata mediante l'ausilio del plug-in di Revit Autodesk "Point Layout". Tale confronto metrico tra il modello digitale e la nuvola di punti ha consentito di accertare l'attendibilità del modello geometrico.

In seguito, il modello BIM (Figura 4) è stato esportato in formato ".ifc", per l'importazione all'interno del software di calcolo strutturale PRO_SAP. Questo trasferimento di dati dall'ambiente BIM verso un ambiente FEM ha comportato dei disguidi derivanti dalla differente concezione degli oggetti tra i due ambienti. Il modello ha, pertanto, necessitato di innumerevoli e dispendiose operazioni manuali. La composizione del modello FEM in ambiente PRO_SAP, riportato in Figura 5, ha consentito la verifica dei cinematismi fuori piano mediante il modulo PRO_CINEm. Il software ha computato automaticamente i possibili meccanismi di collasso di primo modo in funzione dei vincoli presenti sulla parete.

3. Conclusioni

Il flusso di lavoro proposto si è articolato dalla costruzione di un HBIM della Rocca Malatestiana di Verucchio a partire dalla nuvola di punti fino a giungere alle analisi cinematiche lineari per individuare la plausibile attivazione di meccanismi locali. I processi Scan-to-BIM e BIM-to-FEM condotti per il caso studio hanno evidenziato le carenze che tale metodologia presenta oggigiorno per le costruzioni esistenti in generale e per le costruzioni a carattere storico in particolare. Il novizio metodo BIM nell'ambito delle costruzioni esistenti

urge di protocolli standardizzati e condivisi che guidino alla realizzazione di modelli informativi accurati e affidabili anche per costruzioni non standard.



Figura 1. Inquadramento geografico.



Figura 2. Nuvola di punti.



Figura 3. Nuvola di punti ridotta Prospetto Nord-Ovest con colorazione riferita alla normale.



Figura 4. HIBM Prospetto Nord-Ovest.



Figura 5. Modello FEM Prospetto Nord-Ovest.

Riferimenti

2S.I. 2024. PRO_SAP. https://www.2si.it/it/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwyL24Bh CtARIsALo0fSBr3b4gZCb4W_P4Hp9eMj6izy4xS-68A7e0uD2HTgMw64_n9rdlXPwaAn3AEALw_wcB

Autodesk. 2023. Autodesk Recap Pro, https://www.autodesk.com/it/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription

Autodesk.2023.AutodeskRevit,https://www.autodesk.com/it/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription

Beolchini, G., Milano, L., Antonacci, E. (A cura di). Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura – Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura, Volume II – Parte 1^a. Convenzione di Ricerca con la Regione Marche; Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni – Sede di L'Aquila; Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno (DISAT) – Università degli Studi di L'Aquila. L'Aquila, 2005.

Decreto 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (2018, 20 febbraio) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (42).

Ente Italiano di Normazione. 2017. Edilizia e opere di ingegneria civile – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. (UNI 11337).

Ente Italiano di Normazione. 2019. Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) – Gestione informativa mediante il Building Information Modelling. (UNI EN ISO 19650).

Attività realizzata nell'ambito del progetto INCITE "INspiring City InformaTion modEling for urban resilience" realizzato grazie ai Fondi europei della Regione Emilia-Romagna

La geomatica per la documentazione dei borghi storici: metodologie e casi studio

Enrico Breggion^{1,2}, Andrea Martino^{1,2}, Andrea Sattin¹

¹ Laboratorio di Geomatica CIRCE, Dipartimento di Culture del Progetto, Università IUAV di Venezia, Dorsoduro 1827, 30123

Venezia – (ebreggion; amartino; asattin)@iuav.it

² Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli studi di Trieste, Via Alfonso Valerio 6/1, 34127 Trieste – (enrico.breggion; andrea.martino)@phd.units.it

Keywords: Rilievo multi-scala; SLAM; UAV; Patrimonio culturale.

1. Abstract

La conservazione della memoria storica, artistica e architettonica dei borghi storici italiani rappresenta un tema di interesse sempre più rilevante nel contesto della salvaguardia del patrimonio culturale nazionale. Questi luoghi, spesso situati in aree rurali o montane, custodiscono un'eredità unica che rischia di essere perduta a causa di fenomeni come l'abbandono, il degrado e le calamità naturali. In questo scenario, l'utilizzo delle tecniche e delle tecnologie avanzate della geomatica offre nuove e potenti opportunità per digitalizzare e preservare la forma fisica e l'identità culturale di questi borghi.

Le moderne tecnologie di acquisizione, elaborazione e visualizzazione dei dati spaziali stanno rivoluzionando il modo in cui è possibile documentare e studiare il patrimonio architettonico e urbano. Strumenti come UAV equipaggiati con sensori avanzati e dispositivi portatili dotati di tecnologia SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) permettono di raccogliere informazioni dettagliate su vasta scala in tempi relativamente brevi. Inoltre, le piattaforme software per la gestione e l'analisi dei dati geospaziali sono diventate sempre più accessibili, consentendo anche a utenti non professionisti di interagire con queste informazioni.

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di esplorare e mettere in luce le possibilità offerte dallo sviluppo tecnologico nell'ambito della geomatica negli ultimi anni, in particolare per quanto riguarda la digitalizzazione di grandi aree come i borghi storici. Questi contesti richiedono approcci multi-scala, poiché è necessario operare a diverse scale di dettaglio e restituzione: dalla scala architettonica, necessaria per documentare gli edifici storici con precisione, fino alla scala urbana, utile per analizzare le caratteristiche morfologiche e paesaggistiche del territorio. Un altro obiettivo fondamentale è affrontare le sfide connesse all'utilizzo di differenti sensori e alla gestione e all'elaborazione dei dati provenienti da diverse fonti. La combinazione di metodologie differenti richiede infatti un'attenta pianificazione e l'adozione di strategie per garantire la coerenza e l'integrazione dei dati raccolti.

Per illustrare concretamente queste possibilità, sono stati selezionati due casi studio rappresentativi:

1. Fiumefreddo Bruzio (CS): questo borgo, situato in Calabria, è stato oggetto di studio nell'ambito del progetto GENESIS ("GEstioNE del rischio SISmico per la valorizzazione turistica dei centri storici del Mezzogiorno"). Il progetto mira a coniugare la tutela sismica con la valorizzazione turistica, attraverso un'approfondita conoscenza del tessuto urbano e architettonico. Il rilievo ha coinvolto l'intero centro storico, con acquisizioni mirate sia alla scala 1:50, per dettagli architettonici degli edifici, sia alla scala 1:200, per una visione d'insieme dell'area urbana. La superficie totale rilevata è stata di circa 90 ettari;

2. **Cibiana di Cadore (BL)**: situato nelle Dolomiti bellunesi, questo borgo è noto per i suoi murales che adornano le facciate

delle case. La digitalizzazione del centro storico ha seguito un approccio simile al primo caso, con elaborati alle scale 1:50 e 1:200, coprendo una superficie di circa 190 ettari. L'obiettivo era quello di creare una base dati dettagliata per supportare sia la conservazione del patrimonio locale sia iniziative di promozione culturale e turistica.

Per entrambi i casi studio, sono state impiegate le seguenti metodologie di rilievo e acquisizione dati:

• rilievo fotogrammetrico aereo: utilizzando un drone Dji Mavic 3M dotato di ricevitore GNSS con correzione delle osservazioni tramite metodologia NRTK sono state eseguite missioni di volo per acquisire immagini ad alta risoluzione. Queste immagini sono state successivamente elaborate per generare ortofoto, DTM, DSM e curve di livello. I voli sono stati pianificati a differenti quote per aumentare il livello di dettaglio, in particolare per le coperture degli edifici, permettendo così una migliore ricostruzione delle geometrie dei tetti e delle strutture sopraelevate;



Figura 1. Ortofoto 1:200 del borgo di Fiumefreddo Bruzio.

• tecnologia SLAM: La tecnologia SLAM, implementata attraverso il dispositivo Stonex X120 Go, ha permesso di acquisire nuvole di punti muovendosi a piedi lungo le vie dei centri storici. Questo approccio ha consentito di rilevare in maniera efficace e dettagliata la totalità dei fronti degli edifici, catturando elementi architettonici, decorazioni e dettagli costruttivi spesso difficili da documentare in tempi brevi. La possibilità di muoversi liberamente negli spazi urbani ha reso

questa tecnologia particolarmente adatta per contesti complessi e articolati come i centri storici.



Figura 2. Nuvola di punti SLAM del borgo di Cibiana di Cadore.

Per assicurare la coerenza tra i diversi set di dati e l'integrazione tra le diverse modalità di acquisizione, sono stati identificati e materializzati dei caposaldi. Questi punti di controllo sono stati acquisiti mediante ricevitore GNSS in modalità NRTK, garantendo un'accuratezza centimetrica nella posizione. Questo ha permesso di georeferenziare correttamente le nuvole di punti provenienti dalle diverse fonti e di inserire i dati in un sistema di riferimento comune.

L'approccio metodologico adottato ha permesso di ottenere risultati significativi in termini di qualità dei dati e di efficienza operativa. La combinazione di rilievo fotogrammetrico aereo e tecnologia SLAM ha consentito di coprire vaste aree in tempi ridotti, senza compromettere il livello di dettaglio necessario per le diverse scale di rappresentazione.



Figura 3. Modello integrato fotogrammetrico e SLAM del comune di Cibiana di Cadore.

Un aspetto rilevante emerso dai casi studio riguarda l'accessibilità e la sostenibilità economica di queste tecnologie. Fino a pochi anni fa, la digitalizzazione di aree così estese avrebbe richiesto risorse significative, rendendo tali interventi di difficile attuazione. L'avanzamento tecnologico ha ridotto i costi e i tempi di acquisizione ed elaborazione, aprendo nuove possibilità.

L'esperienza maturata attraverso i casi studio di Fiumefreddo Bruzio e Cibiana di Cadore dimostra come l'integrazione di tecnologie avanzate nel campo della geomatica possa rivoluzionare l'approccio alla documentazione e alla conservazione dei borghi storici. L'adozione di metodologie multi-scala e l'utilizzo di differenti sistemi di acquisizione consentono di superare le limitazioni delle tecniche tradizionali, offrendo risultati di elevata qualità in tempi e costi contenuti. Queste innovazioni tecnologiche rappresentano un'opportunità preziosa per i piccoli comuni, spesso dotati di risorse limitate, permettendo loro di intraprendere iniziative di tutela e valorizzazione del proprio patrimonio culturale. Inoltre, la disponibilità di dati dettagliati e accurati costituisce una base solida per lo sviluppo di progetti integrati che coniughino la conservazione con la promozione turistica e culturale, contribuendo al rilancio economico e sociale di queste realtà. In prospettiva, l'ulteriore evoluzione delle tecnologie della geomatica, unita a una crescente sensibilità verso la salvaguardia del patrimonio storico, potrà favorire la diffusione di queste pratiche su scala più ampia.

References

Balletti, C., Breggion, E., Gerla, F., Guerra, F., Martino, A., 2024. Venice: A Test Field for Urban Historical Centers Surveying with SLAM, in: 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv). Presented at the 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv), IEEE, Chania, Greece, pp. 224–229. https://doi.org/10.1109/MetroLivEnv60384.2024.10615680

Barba, S., Ferreyra, C., Cotella, V.A., Di Filippo, A., Amalfitano, S., 2021. A SLAM Integrated Approach for Digital Heritage Documentation, in: Rauterberg, M. (Ed.), Culture and Computing. Interactive Cultural Heritage and Arts, Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 27–39. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77411-0_3

Chiabrando, F., Spanò, A., Sammartano, G., Teppati Losè, L., 2017. UAV oblique photogrammetry and lidar data acquisition for 3D documentation of the Hercules Fountain. Virtual archaeol. rev. 8, 83. https://doi.org/10.4995/var.2017.5961 Jiang, S., Jiang, W., Wang, L., 2022. Unmanned Aerial Vehicle-Based Photogrammetric 3D Mapping: A survey of techniques, applications, and challenges. IEEE Geosci. Remote Sens. Mag. 10, 135–171. https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3122248

Malinverni, E.S., Pierdicca, R., Bozzi, C.A., Bartolucci, D., 2018. Evaluating a Slam-Based Mobile Mapping System: a Methodological Comparison for 3D Heritage Scene Real-Time Reconstruction, in: 2018 Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo). Presented at the 2018 Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo), IEEE, Cassino FR, Italy, pp. 265–270. https://doi.org/10.1109/MetroArchaeo43810.2018.13684

Rabbia, A., Sammartano, G., Spanò, A., n.d. Fostering Etruscan heritage with effective integration of UAV, TLS and SLAMbased methods.

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2012. UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING – CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XXXVIII-1/C22, 25–31. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011

Sernani, P., Angeloni, R., Dragoni, A.F., Quattrini, R., Clini, P., 2019. Combining Image Targets and SLAM for AR-Based Cultural Heritage Fruition, in: De Paolis, L.T., Bourdot, P. (Eds.), Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 199–207. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25999-0 17

Tanduo, B., Teppati Losè, L., Chiabrando, F., 2023. DOCUMENTATION OF COMPLEX ENVIRONMENTS IN CULTURAL HERITAGE SITES. A SLAM-BASED SURVEY IN THE CASTELLO DEL VALENTINO BASEMENT. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLVIII-1/W1-2023, 489–496. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-489-2023

Missione di Fotogrammetria Subacquea a Trieste: Raggiungimento della Precisione al Millimetro

Shahriar Mokhtari¹, Alessandro Lambertini¹, Luca Vittuari¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna, 40136 Bologna, Italia Shahriar.mokhtari@unibo.it, Alessandro.lambertini@unibo.it, Luca.vittuari@unibo.it

Parole chiave: Fotogrammetria subacquea, Blucy UUV, ricostruzione 3D, monitoraggio degli habitat marini, geomatica, precisione al millimetro

1. Introduzione

Nell'ambito del progetto PRIN2022 Manatee coordinato dall'Università di Sassari, questo studio valuta la capacità delle tecniche fotogrammetriche subacquee di rilevare differenze dell'ordine del millimetro in modelli sintetici di Lithophyllum stictiforme (Nocerino et al., 2023). Il progetto coinvolge diverse unità di ricerca di varie istituzioni, ciascuna delle quali utilizza diverse attrezzature per rilevare variazioni morfologiche in campioni di corallo dell'ordine di pochi millimetri.

In ogni sito del progetto, sono stati creati modelli sintetici attraverso la stampa 3D di campioni di Lithophyllum stictiforme, simulando la crescita e la degradazione nel tempo. L'unità operativa dell'Università di Bologna ha sperimentato il proprio drone subacqueo, Blucy, per catturare immagini ad alta risoluzione ed eseguire rilievi dettagliati in condizioni controllate (Lambertini et al., 2022).

La fotogrammetria subacquea è emersa come uno strumento fondamentale nella ricerca ecologica marina, offrendo metodi non invasivi per acquisire dati morfologici dettagliati degli ambienti bentonici (Shortis et al., 2009; Burns et al., 2015). Raggiungere una precisione al millimetro è cruciale per monitorare la crescita dei coralli, valutare la complessità degli habitat e informare gli sforzi di conservazione. Tuttavia, sfide come l'attenuazione della luce, la torbidità e l'accessibilità limitata rendono complessa la misurazione subacquea ad alta precisione (Bryson et al., 2016).

2. Metodologia

Tra il 21 e il 25 ottobre 2024, abbiamo condotto una missione a Trieste utilizzando il Blucy Unmanned Underwater Vehicle (UUV), un veicolo ibrido ROV/AUV progettato per l'imaging subacqueo di precisione. Blucy è equipaggiato con una fotocamera Nikon Z6 full-frame ad alta risoluzione (24,5 megapixel) e quattro luci LED, permettendo la cattura di immagini di alta qualità in condizioni subacquee (Lambertini et al., 2022).

I modelli sintetici di corallo, rappresentanti diversi stadi di crescita, sono stati stampati in 3D utilizzando resina fotopolimerica e spruzzati con una vernice opaca testurizzata per migliorare il rilevamento delle caratteristiche. I modelli sono stati montati su una piattaforma di alluminio stabile posizionata sul fondale marino a una profondità di 10 metri. La piattaforma includeva target fotogrammetrici con distanze note per una scalatura e un riferimento accurati.

L'acquisizione delle immagini è stata effettuata ad altitudini di 0,5 m e 0,8 m sopra i modelli, in due condizioni di illuminazione: con illuminazione artificiale fornita dalle luci di

bordo di Blucy e senza illuminazione artificiale (solo luce ambientale).

Le immagini sono state elaborate utilizzando Agisoft Metashape Professional, impiegando tecniche di Structure-from-Motion (SfM) per generare modelli 3D ad alta risoluzione. Analisi comparative sono state condotte utilizzando CloudCompare per valutare le discrepanze tra i modelli derivati dalla fotogrammetria e i corrispettivi originali stampati in 3D. I cambiamenti temporali sono stati valutati confrontando modelli rappresentanti diversi stadi di crescita (ad esempio, B1 vs. B2).

3. Risultati

La metodologia ha dimostrato alta precisione nella modellazione subacquea, raggiungendo discrepanze medie inferiori a 1 mm in tutti gli scenari (vedi Tabella 1). A un'altitudine di 0,5 m con luci spente, il Modello C1 ha raggiunto la massima accuratezza, con il 98% dei punti che mostrano discrepanze inferiori a 1 mm. Altitudini inferiori hanno portato a una maggiore accuratezza grazie all'aumento della risoluzione delle immagini e a vincoli geometrici più forti.

Effetto dell'Altitudine:

- Altitudine 50 cm: Distanza media di 0,37 mm; deviazione standard di 0,30 mm.

- Altitudine 80 cm: Distanza media aumentata a 0,71 mm; deviazione standard di 0,55 mm.

Effetto dell'Illuminazione:

- Luci Accese a 50 cm: Distanza media di 0,37 mm; deviazione standard di 0,30 mm.

- Luci Spente a 50 cm: Distanza media aumentata a 0,49 mm; deviazione standard di 0,41 mm.

Questi risultati sottolineano l'importanza della vicinanza e di una corretta illuminazione nel migliorare l'accuratezza e la coerenza delle ricostruzioni fotogrammetriche subacquee.

4. Conclusioni

Questo studio, nell'ambito del progetto PRIN2022 Manatee, conferma l'efficacia della fotogrammetria subacquea nel raggiungere una precisione al millimetro in condizioni controllate, dimostrando il potenziale di questa metodologia per il monitoraggio ecologico dettagliato, come il tracciamento della crescita dei coralli e la valutazione dei cambiamenti negli habitat. Affinando le tecniche di imaging e i flussi di elaborazione dei dati, la nostra ricerca contribuisce ai progressi nella geomatica e supporta lo sviluppo di strumenti di monitoraggio precisi per la conservazione marina; il lavoro futuro estenderà questa metodologia agli ambienti marini naturali, affrontando ulteriori sfide come l'illuminazione variabile, le correnti marine e la biodiversità.

Figure e Tabelle

Figura 1. La Piattaforma in Alluminio con Modelli Sintetici



Figura 1. La piattaforma in alluminio con i modelli B1 (vista inferiore che mostra i connettori) e C1 (vista superiore della superficie del modello).

Figura 2. Istogrammi delle Misurazioni delle Distanze per il Modello C1



Figura 2. Istogrammi che mostrano la percentuale di distanze misurate inferiori a 1 mm per il Modello C1 in diversi scenari.

Modello	Altitudine (cm)	Illuminazione	% Punti < 1 mm	Distanza Media (mm)	Deviazione Standard (mm)
B1	50	Accesa	93	0,46	0,35
B1	50	Spenta	93	0,45	0,36
B1	80	Accesa	70	0,78	0,6
B2	50	Accesa	92	0,5	0,37
B2	50	Spenta	80	0,68	0,65
B2	80	Accesa	77	0,7	0,56
C1	50	Accesa	95	0,39	0,35
C1	50	Spenta	98	0,29	0,25
C1	80	Accesa	82	0,58	0,44
C2	50	Accesa	98	0,11	0,14
C2	50	Spenta	88	0,52	0,36

Tabella 1. Precisione della Ricostruzione Fotogrammetrica.

Riferimenti Bibliografici

- Burns, J.H.R., Delparte, D., Gates, R.D., Takabayashi, M., 2015. Integrating structure-frommotion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3, e1077. https://doi.org/10.7717/peerj.1077
- Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Pizarro, O., Williams, S.B., 2016. True color correction of autonomous underwater vehicle imagery. Journal of Field Robotics, 33(6), 853–874. https://doi.org/10.1002/rob.21638
- Lambertini, A., Menghini, M., Cimini, J., Odetti, A., Bruzzone, G., Bibuli, M., Mandanici, E., et al., 2022. Underwater Drone Architecture for Marine Digital Twin: Lessons Learned from SUSHI DROP Project. Sensors, 22(3), 744. https://doi.org/10.3390/s22030744
- Nocerino, E., Del Pizzo, S., Lambertini, A., Troisi, S., Vittuari, L., 2023. MANATEE Project: Monitoring and Mapping of Marine Habitat with Integrated Geomatics Technologies. In 2023 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), 181–186. IEEE. https://doi.org/10.1109/MetroSea58055.2023.103175 44
- Shortis, M.R., Harvey, E.S., Abdo, D.A., 2009. A review of underwater stereo-image measurement for marine biology and ecology applications. *Oceanography and Marine Biology*, 47, 257–292.

Improving Infrastructure Monitoring: UAV-Based Photogrammetry for Crack Pattern Inspection

N. Pascucci1, S.Zollini1

¹DICEAA, Department of Civil, Environmental Engineering and Architecture, University of L'Aquila, Via G. Gronchi 18, 67100, L'Aquila, Italy-nicole.pascucci@graduate.univaq.it, sara.zollini@univaq.it

Keywords: UAV Photogrammetry, image analysis, OBIA, feature extraction, infrastructure monitoring, concrete cracks analysis

Abstract

Infrastructure degradation, including cracking and occlusions, poses significant risks to structural integrity, demanding efficient monitoring and interventions. Geomatic techniques, especially UAV photogrammetry, offer promising avenues for crack pattern inspection. This study aims to develop a rapid and replicable investigation methodology for crack pattern inspection applicable across various materials and structures. Initially focusing on reinforced concrete, the research aims to optimize the investigation process, favoring automatic or semi-automatic approaches. Exploiting UAV-based photogrammetry, detailed and panoramic images facilitate crack identification and structural health assessment. The methodology involves photogrammetric reconstruction of specimens, orthophoto extraction, and filtering for edge enhancement. Object-Based Image Analysis (OBIA) classification is utilized for automatic crack extraction. The study evaluates the effectiveness of specific filters, including Enhanced Frost and Median, in refining crack detection. While promising results are obtained, further refinement and testing are warranted. The proposed methodology holds the potential for creating a rapid, effective, and easily replicable infrastructure monitoring system, contributing to safety and sustainability.

1. INTRODUCTION

Infrastructure plays a fundamental role in supporting human activities, yet it is often subjected to various degradation factors that can compromise its structural integrity and functionality over time. Among the primary risks associated with infrastructure, degradation, cracking, and possible occlusions represent significant issues that necessitate careful monitoring and timely interventions [1-2]. This study focuses on the automated extraction and analysis of cracks in concrete specimens using UAV-based photogrammetry and Object-Based Image Analysis (OBIA) [3]. The objective is to explore the application of convolution filters-Median, Enhanced Lee, and Enhanced Frost [4]-in enhancing crack detection through OBIA. The research aims to evaluate the effectiveness of these filters in improving feature delineation and classification accuracy for structural monitoring, with the goal of establishing a reliable and automated methodology for continuous infrastructure assessment.

2. MATERIALS AND METHODS

This study uses orthophotos derived from UAV-based photogrammetry to assess cracks in a concrete specimen. UAVs equipped with high-resolution cameras were used to capture images of the specimen (Fig. 1-2), and Structure-from-Motion (SfM) algorithms were applied to generate orthophotos. These were carefully processed to highlight cracks and other structural features. The region of interest (ROI) (Fig.3) in the orthophotos, where the cracks were expected to be located, underwent preprocessing using convolutional filters to enhance the crack edges and reduce noise in the images. Three types of convolution filters were selected for this study: the Median filter, the Enhanced Lee filter, and the Enhanced Frost filter. The Median filter is commonly used for noise reduction, providing a smoothing effect that reduces outlier values without blurring the image too much. The Enhanced Lee filter, which is often used for reducing speckle noise in remote sensing images, enhances contrast and sharpens edges. The Enhanced Frost filter, on the other hand, is designed to improve edge detection and emphasize features such as cracks by preserving fine details

while reducing other unwanted image noise. Once the filters were applied, OBIA was performed to classify the cracks in both the untreated and filter-treated images (Fig.4-5-6-7). OBIA is a technique that groups pixels into meaningful objects or segments based on their spectral properties and spatial relationships, making it particularly useful for distinguishing cracks from other features in the image [5-6]. For validation, the study used Ground Truth (GT) data, which was obtained through manual visual inspections of the concrete specimen. These inspections identified the cracks in the concrete, which were then used as a reference for assessing the performance of the crack detection and classification methods. To quantitatively evaluate the effectiveness of the OBIA classification, the Jaccard similarity coefficient was applied (1) [7-8].

$$Jaccard Index = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \tag{1}$$

where A = It is the GT's cracking class B = It is the cracking class to compare

This metric compares the overlap between the classified cracks and the GT data, providing a measure of the accuracy of the classification. Additionally, the classification performance, in terms of crack detection, was analyzed for each ROI, comparing the results from the untreated ROIs and those processed with the convolution filters. This analysis helped to evaluate the performance of the different filters in terms of improving the accuracy of crack detection and classification. These metrics are essential for understanding the impact of the pre-processing filters on the crack detection process, and for determining the optimal method for accurately identifying cracks in UAV-based orthophotos.

3.RESULTS AND DISCUSSION

The application of the filters demonstrated clear improvements in crack detection. The Median and Enhanced Frost filters yielded better results compared to the Enhanced Lee filter and the untreated orthophoto. The Enhanced Frost filter, in particular, consistently outperformed the other filters in terms of crack identification, despite the presence of noise and occlusions caused by transducers. The Jaccard similarity coefficient indicated a significant improvement in crack detection with the application of filters, particularly the Enhanced Frost filter (Table 1). The filters enhanced crack identification, with the Frost filter detecting cracks more effectively, even those as small as 3 mm. However, cracks smaller than 2 mm were challenging to detect and may require further refinement in the methodology. Despite the promising results, some cracks were missed or detected inaccurately due to interference and occlusions in the data, particularly from transducers and shadows. The findings underscore the potential of UAV-based photogrammetry and OBIA for non-invasive, automated crack detection, offering a significant advantage over traditional inspection methods that are time-consuming and involve greater safety risks. The methodology was shown to be effective for rapid crack analysis, and the integration of OBIA allowed for improved differentiation between cracks and noise compared to basic edge detection techniques. However, the study also highlighted areas for further improvement, particularly in optimizing algorithms and extending the methodology to different types of materials and structural conditions. Future work will focus on refining the detection algorithm, testing additional filters, and incorporating advanced Machine Learning techniques to enhance the crack detection process. These advancements will help make the methodology more adaptable and applicable to a broader range of infrastructure types, contributing to better structural monitoring and maintenance practices.

Te d	Model	JI Matrice 200 V2	
	Tipology	Quadricopter	
/ = \	Weight at takeoff	734 g	
- X - X -	Autonomy	27 min	
	Operating altitude	5000 m	
	Model	Zenmus e X5S	
-	Focal lenght	15 mm	
	Photo size - Width	5280 px	
	Photo size - Height	3956 px	
	Sensor dimensions - Wid	ith 18 mm	
	Sensor dimensions - Heig	ght 13.5 mm	
	Weight	461 g	

Figure 1. From top to botton image and technical specifications of the UAV and Zenmuse X5S used in this work.



Figure 2. Reinforced concrete specimen used for testing



Figure 3. Orthomosaic of the chosen ROI at the node of the reinforced concrete specimen used following the compression test, characterized by cracking (processed with Agisoft Metashape software).



Figure 4. OBIA classification on the unprocessed orthophoto. The red box represents a sample area where a crack can be identified.



Figure 5. OBIA classification on the orthophoto with *Median* filter. The red box represents a sample area where the improvement in crack identification can be observed. The crack is highlighted within the red box, demonstrating how the application of the *Median* filter has enhanced the ability to identify cracks in the ROI.



Figure 6. OBIA classification on the orthophoto with *Enhanced Lee* filter. The red box represents the same sample area considered where the identification of cracks can be observed with the application of the *Enhanced Lee* filter.



Figure 7. OBIA classification on the orthophoto with *Enhanced Frost* filter. The red box represents the same sample area considered where the identification of cracks can be observed with the application of the *Enhanced Frost* filter.

TABLE 1. PERCENTAGE OF CRACKS OBTAINED AS A RESULT OF THE JACCARD SIMILARITY COEFFICIENT IDENTIFIED IN EACH CLASSIFICATION

	GT	ROI	Enhanced LEE	Enhanced FROST	MEDIAN
Number of cracks	65	24	32	61	52
Match after Jaccard Index		37%	49%	94%	80%

REFERENCES

[1] Detchev, I., Habib, A., & El-Badry, M. (2012, March). Extraction of cracks from concrete beam images. In Proceedings of ASPRS 2012 annual conference, Sacramento.

[2] Mishra, M., Lourenço, P. B., & Ramana, G. V. (2022). Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. Journal of Building Engineering, 48, 103954.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103954

[3] Zollini, S., Alicandro, M., Dominici, D., Quaresima, R., & Giallonardo, M. (2020). UAV photogrammetry for concrete bridge inspection using object-based image analysis (OBIA). Remote Sensing, 12(19), 3180, https://doi.org/10.3390/rs12193180.

[4] Lopes, A., R. Touzi, and E. Nezry. "Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 28, No. 6 (1990): 992-1000 doi: 10.1109/36.62623.

[5] Fernandez Galarreta, J., Kerle, N., and Gerke, M.: UAVbased urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1087–1101, https://doi.org/10.5194/nhess-15-1087-2015, 2015.

[6] Rau, J. Y., Hsiao, K. W., Jhan, J. P., Wang, S. H., Fang, W. C., and Wang, J. L.: BRIDGE CRACK DETECTION USING MULTI-ROTARY UAV AND OBJECT-BASE IMAGE ANALYSIS, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W6, 311–318, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-311-2017, 2017.

[7] Jaccard, P. (1901). Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura. Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, 37, 547-579.

[8] Jaccard, P. (1912). The Distribution of the Flora of the Alpine Zone. New Phytologist, 11, 37-50, http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x.

Intelligenza Artificiale Generativa per Digital Twin Urbanistico partecipato

Marco Pesic¹, Giovanni Lughi¹, Matteo Roffilli¹ ¹Bioretics srl, [m.pesic, g.lughi, m.roffilli]@bioretics.com

Abstract. La ricostruzione digitale fotorealistica di monumenti, edifici e arredi urbani generici è fondamentale per rendere il patrimonio culturale e urbanistico accessibile a un pubblico ampio, oltre i confini dei soli professionisti del settore. Le tecniche tradizionali di fotogrammetria sono efficaci ma non efficienti perché comportano costi elevati dovuti alla necessità di attrezzature specifiche per l'acquisizione dei point cloud oltre a software dedicato per il processing e molte ore di calcolo. È necessario inoltre avere a disposizione l'oggetto da scansionare e non sono quindi applicabili *expost* a realtà non più disponibili. Allo scopo di superare queste limitazioni e rendere il processo di cloning volumetrico digitale alla portata di tutti i cittadini, in questo lavoro presentiamo l'utilizzo di tecniche innovative di Intelligenza Artificiale Generativa (GenAI) [1] quali NeRF [2] e 3DGS [3], che consentono la creazione di digital twin a partire unicamente da un insieme di fotografie o video, anche quando acquisiti con uno smartphone economico.

Introduzione

L'attuale fotogrammetria ad alta precisione è una pratica costosa: economicamente perché necessita di particolare hardware di acquisizione; temporalmente perché richiede lunghe e complesse preparazioni (Ground Control Point, ...) e configurazioni hw/sw, oltre che una padronanza non banale della materia.

Difatti, oltre a dispositivi tutto sommato comuni, come fotocamere reflex e droni, si utilizzano strumenti avanzati, quali scanner laser 3D e sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System). Queste attrezzature, tra l'altro molto costose, generano grandi quantità di dati, che richiedono, quasi sempre nella pratica, software proprietari per gestirne l'elaborazione, aumentando così anche i costi legati a storage e licenze software.

Come soluzioni ad oggi meno costose, troviamo alcuni particolari dispositivi mobili – smartphone - dotati di sensori di profondità e LiDAR. Tuttavia, tali dispositivi sono limitati alla ricostruzione di oggetti di piccole dimensioni. Il principale vantaggio rispetto, ad esempio, a una fotocamera reflex è dato dalla possibilità di utilizzare l'odometria visiva. Tale tecnica combina dati provenienti da vari sensori (immagini, LiDAR, accelerometro, giroscopio, ...) per determinare la posizione della fotocamera durante la scansione e ciò offre un vantaggio rispetto ai metodi che utilizzano solo immagini, come il Structure from Motion (SfM) di COLMAP, che non riescono a mantenere la scala reale dell'oggetto.

L'obiettivo principale di questi metodi è ottenere misurazioni precise degli oggetti catturati, ma presentano limitazioni nella resa visiva fotorealistica. In particolare, hanno difficoltà a riprodurre superfici riflettenti o specchi d'acqua. Per ovviare a queste problematiche, si stanno diffondendo nuovi modelli di intelligenza artificiale generativa, come "Neural Radiance Field" (NeRF) e "3D Gaussian Splatting" (3DGS), che permettono di ricostruire oggetti in modo fotorealistico utilizzando semplici immagini. Poiché l'accuratezza delle misure non è il focus di questi modelli, l'hardware richiesto può essere più economico e può includere dispositivi mobili con capacità di catturare immagini in alta definizione o fotocamere reflex.

Un altro vantaggio di questi metodi, basati su modelli statistici, è la maggiore velocità nella creazione dei modelli 3D rispetto ai metodi *tradizionali* di fotogrammetria.

Materiali e Metodi

NeRF

Neural Radiance Field rappresenta una scena come un campo di radianza, imparando una funzione $f(x, \theta) \rightarrow (c, \sigma)$. La funzione prende come input una posizione 3D **x** e la direzione di vista θ e come output restituisce il colore del punto **c** con la sua rispettiva densità σ (uno scalare che rappresenta la presenza o meno di un oggetto in quel determinato punto nello spazio **x**). Per ogni punto 3D nello spazio il suo colore può essere renderizzato attraverso un raggio che parte dall'origine della camera **o** r(t) = o + td, questo permette il campionamento di punti lungo il raggio, tra il near bound e il far bound. Il colore finale che sarà visualizzato in un determinato pixel dato un raggio che passa per esso sarà:

$$I(r) = \sum_{i=1}^{N} T_{i} (1 - e^{-\sigma_{i}\delta_{i}}) c_{i} (1)$$

dove $T_i = \exp\left(\sum_{j=1}^{i-1} \sigma_j \delta_j\right)$

Dove **T** rappresenta la trasmittanza accumulata lungo il raggio e $\delta_j = t_{j+1} - t_j$ si riferisce alla distanza tra punti campionati adiacentemente.



Figura 1: Immagine presa da [2] che mostra la pipeline di allenamento di un modello NeRF

3D Gaussian Splatting

3DGS rappresenta una scena basata su primitive volumetriche (distribuzioni Gaussiane tridimensionali) che hanno un insieme di parametri aggiustabili: posizione μ , matrice di covarianza Σ (che in pratica è decomposta in scala e rotazione), opacità (o), ed armoniche sferiche (SH) che sono dei coefficienti utilizzati per rappresentare il colore. Queste primitive 3D vengono proiettate su uno spazio 2D, (μ) e (Σ) sono la media e la matrice di covarianza 2D e rasterizzate usando α -blending. Dove i pesi α -blending vengono calcolati in questo modo

$$\alpha = oG(2)$$

G è la gaussiana proiettata nello spazio 2D dove (x,y) sono gli indici dei pixel dello schermo

$$G(x, y) = e^{\left(\left(\frac{-1}{2}\right)\left[[x, y]^{T} - \mu^{\cdot}\right]^{T}\sum\left([x, y]^{T} - \mu^{\cdot}\right)\right)} (3)$$



Figura 2: Immagine presa da [7] che mostra la pipeline di allenamento di un modello 3DGS

Metodologia

Il metodo utilizzato per ricreare una scena a partire da un video o una serie di immagini segue i seguenti passaggi: 1) acquisizione video della scena da ricostruire; 2) identificazione delle posizioni delle camere; 3) creazione di un modello

volumetrico (ad esempio con NeRF o 3DGS); 4) [opzionale] esportazione del modello 3D nel formato desiderato (Point cloud, mesh, ...). Il quarto passaggio è spesso necessario per integrare i modelli generati in motori di rendering preesistenti. Tuttavia, per visualizzare i risultati non è sempre necessario convertire il modello in un mesh, poiché è possibile utilizzare visualizzatori volumetrici che offrono una resa fotorealistica e immersiva più accurata rispetto al rendering tradizionale con mesh e texture. Questo approccio è stato applicato per la creazione di modelli 3D di statue e monumenti. Allo stato attuale, questi modelli dalla resa di altissima qualità visiva, preservano, come premesso, una minor qualità della precisione delle misure. Tale problema potrebbe essere mitigato adottando, oltre che eventuale hardware specifico, modelli di depth estimation , che permettono di estrarre mappe di profondità utilizzando le informazioni presenti nelle sole immagini. Tali mappe di profondità aiuterebbero notevolmente il processo di identificazione delle posizioni della camera, garantendo una maggiore precisione nel determinare la distanza e le posizioni relative dell'oggetto osservato.



(d)

Figura 3: (a) immagine della ex fornace di Cesena catturate da un drone. (d)(e) Immagini generate dalla GenAI in tempo reale utilizzando le immagini catturate dal drone.

Risultati

Attualmente, i due principali metodi volumetrici utilizzati sono NeRF e 3DGS. Come accennato in precedenza, ciascuno di essi presenta vantaggi e svantaggi. NeRF offre una resa fotorealistica leggermente superiore rispetto a 3DGS, ma quest'ultimo si distingue per l'efficienza computazionale, risultando più performante. Grazie a questa efficienza, i modelli generati con 3DGS consentono una visualizzazione fluida, realtime, rendendolo ideale per applicazioni che richiedono reattività immediata.

I modelli volumetrici possono essere trasformati in mesh ed inseriti nel metaverso, permettendo la visualizzazione attraverso visori AR. In particolare se si tratta di modelli georeferenziati è possibile utilizzarli tramite l'ecosistema Cesium (figura 6) per la loro visualizzazione ed interazione: CesiumJS, Cesium for Omniverse, Cesium for Unreal, Cesium for Unity.

Un diverso caso d'uso, purtroppo tristemente attuale, è l'impiego del rendering volumetrico per una visualizzazione più rapida ed immersiva di eventi naturali, come le frane(figura 4), interruzioni di strade, ecc. Questo approccio permetterebbe agli operatori di avere più informazione e più rapidamente anche da remoto, ad esempio con una ripresa aerea fatta con un drone nel primo sopralluogo dei tecnici o addirittura con il video di uno smartphone registrato da un cittadino, usati per generare automaticamente un modello volumetrico che consenta di esplorare lo spazio da e fare le prime constatazioni dalla propria sede o dalla control-room, eventualmente dotata di apparecchi per la realtà virtuale.

Un possibile sviluppo futuro su cui stiamo ragionando insieme a partner istituzionali, prevede l'uso del rendering volumetrico per la generazione di una una mappa delle città alla stregua di "Google Street View", ma più dettagliata e con maggiori possibilità di interazione.



Figura 4: Immagini ricostruite attraverso metodo NeRF, prese dal video di una frana [8]

Altre possibilità riguardano l'adozione di metodi GenAI per rendere nuovamente interagibili realtà passate o non più esistenti ed eventualmente permettere agli utenti un facile raffronto di una certa realtà a distanza di tempo: generazione di modelli a partire da video di qualcosa non più esistente, confronto della stessa realtà a distanza di tempo (ad esempio la crescita di un bosco, di un albero monumentale, di un edificio, ecc.).

Conclusioni

La tecnica proposta si pone quindi sia in alternativa ai metodi attuali sia in estensione agli stessi permettendo la ricostruzione digitale di realtà disponibili solo come foto o video storici. I metodi statistici di GenAI offrono vantaggi significativi rispetto alla fotogrammetria geometrica tradizionale, tra cui tempi di produzione decisamente più rapidi, qualità visiva molto elevata e costi irrisori, a discapito attualmente della precisione numerica e geometrica dei modelli prodotti, che potrebbe in alcuni casi non essere sufficiente per utilizzi di precisione (*e.g.* il calcolo strutturale [4]). Questa tecnologia inoltre favorisce la cittadinanza partecipata in quanto abilita il singolo cittadino ad estendere le attuali piattaforme GIS con oggetti volumetrici di alta qualità visiva (vedi Figura 5) e la creazione di timeline storiche per un confronto temporale tra istanti significativi. Un ulteriore utilizzo previsto è la collocazione in realtà aumentata o metaverso di reperti archeologi, ora nelle teche dei musei, nella loro originaria posizione geografica.



Figura 5: (a) immagine della statua del Bufalini in Cesena generata dalla GenAI in tempo reale.

(b) le uniche viste di Google Maps e Google Street View. (c) altri punti di vista generati da GenAI.

I modelli ottenuti possono poi essere esportati nei comuni formati già in uso per utilizzi tecnici e di videoproduzione.



Figura 6: statua del Bufalini in mesh generata dal metodo proposto, inserita nella copia del Geoportale della Regione Emilia-Romagna [5] con attivo il layer 3D di Google Maps.

Riferimenti bibliografici

- 1. Christopher M. Bishop, Hugh Bishop, Deep Learning Foundations and Concepts, Springer Cham, <u>https://doi.org/10.1007/978-3-031-45468-4</u> (2024).
- Ben Mildenhall, Pratul P. Srinivasan, Matthew Tancik, Jonathan T. Barron, Ravi Ramamoorthi, Ren Ng: NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. arXiv:2003.08934 (2020).
- 3. Bernhard Kerbl, Georgios Kopanas, Thomas Leimkühler, George Drettakis: 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. ArXiv 2308.04079 (2023).
- Mazzacca, G., Karami, A., Rigon, S., Farella, E. M., Trybala, P., and Remondino, F.: NERF for heritage 3D reconstruction, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. SpatialInf.Sci. (2023).
- 5. Bioretics Cloneme https://cloneme.bioretics.com, consultato il 24/05/2024.
- 6. Kerbl, Bernhard and Meuleman, Andreas and Kopanas, Georgios and Wimmer, Michael and Lanvin, Alexandre and Drettakis, George: A Hierarchical 3D Gaussian Representation for Real-Time Rendering of Very Large Datasets http://www-sop.inria.fr/reves/Basilic/2024/KMKWLD24_
- 7. Siting Zhu and Guangming Wang and Dezhi Kong and Hesheng Wang: 3D Gaussian Splatting in Robotics: A Survey <u>https://arxiv.org/abs/2410.12262</u>
- Drone video from Austin Watershed Protection Dept. shows 2018 Shoal Creek landslide damage | KVUE <u>https://youtu.be/ySIF8dQzyZM?si=47xGG-7FwfkQ6tQe</u>

Drone Infrastructures Planning on Large-Scale for Passenger Transport

Stefano Cunietti¹

¹ Dep. of Civil, Chemical and Environmental Engineering, University of Genova, Italy - stefano.cunietti@edu.unige.it

Keywords: U-space, Advanced Air Mobility, Infrastructure Planning, Vertiports, Spatial Analysis, Planning

1. Main body

In the geomatics field, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), commonly known as "drones", are typically considered data acquisition tools for advanced analysis. However, technological innovations are expanding their potential uses, such as for transporting goods and people. This evolution provides opportunities to integrate drones into mobility systems, with significant territorial implications at the local level. Unlike traditional aviation, where the impact is limited to airports and along the approach and departure paths, drone infrastructures like vertiports - takeoff and landing points for drones - and corridors - the future "sky roads" - will spread across the territory. This requires the involvement of authorities at all levels in decisionmaking processes to identify the most suitable areas (Piano Strategico Nazionale AAM (2021-2030), 2022). This approach will need to consider various relevant factors, such as safety (e.g., risk of falling to the ground), social acceptance (e.g., noise, privacy), and accessibility (e.g., rapid connectivity with existing infrastructure). Each factor should be evaluated according to current regulations; for instance, for noise, it will be necessary to verify that drone sound emissions do not exceed legally permitted limits. The development of a market involving broader and more diversified drone use will demand a complex regulatory framework (Barrado et al., 2020). Currently, regulations are primarily developed for recreational and technical use, with rules that impose restrictions on weight, size, speed, and minimum technological features of the aircraft.

Worldwide, various organizations are working on defining norms for these infrastructures, flight management phases, and drone technical specifications. In Europe, the main players are EASA (European Union Aviation Safety Agency), EUROCONTROL, and the European Commission, which, through the SESAR (Single European Sky ATM Research) program (Bolić & Ravenhill, 2021), contribute to developing the DES ("Digital European Sky," 2020). The goal is to automate all flights to realize the Single European Sky (SES), seeking to unify EU airspaces. Although in the future all vehicles will share the same airspace, the one currently reserved for drones is called U-space. SESAR funds projects aimed at developing and testing innovative solutions to be integrated into the aviation system to achieve the DES.

This work explores the main factors useful for identifying suitable areas for both vertiports and corridors. The idea of the author is to transform regulations and other relevant factors for infrastructure planning into representative GIS raster layers, classified on a scale from suitability to absolute unsuitability, and then synthesize them into a map through multi-criteria analysis (Figure 5) (Cunietti et al., 2023). It is important to note that not all regulations may be fully met; therefore, this map will allow for the identification of areas with the least impact. Once suitable areas are outlined, relevant authorities should, where possible, define measures to mitigate any residual issues. If addressing them is unfeasible, the area should be excluded.

This approach, part of a doctoral project, intends to provide a simple process to support local authorities, who often lack tools for advanced analysis. It facilitates an intuitive understanding of

the impacts of such infrastructures on their territories, thereby supporting the decision-making process. Several layers have been developed, but for necessity, only three are presented. A differentiation in the analysis type was also considered: the extraurban environment, analyzed in Emilia-Romagna, Italy, and the urban environment, focused on Valencia, Spain. The results presented are based on the latter and focus on a passenger transport drone.

The first layer locates areas where an additional positioning level beyond GNSS can be maintained, as required by safety regulations. This is achieved by leveraging 5G antennas from mobile networks, ensuring an acceptable margin of error. Coordinates and antenna technological characteristics were extracted from a Spanish ministerial database (Figure 1). For each pixel of a 50 m resolution raster covering the metropolitan area, the positioning error was calculated using the Cramér-Rao Lower Bound (CRLB), simulating a drone flying at 150 meters (Figures 2 and 3). Initially, a DSM (Digital Surface Model) was used to identify visible antennas, excluding those obstructed by obstacles. Subsequently, an algorithm selected optimal antenna combinations to minimize localization error using CRLB (Figure 2), employing multilateration (MLAT) techniques based on Time-Difference-of-Arrival (TDOA) measurements (Galati et al., 2012). The error acceptability will depend on the positioning requirements of the drone, according to the flight environment. The second layer establishes acoustic respect zones in urban areas, calculating the minimum distance necessary for drones to comply with noise limits near specific land uses. Integrating urban planning regulations, it defines how far drones can operate from sensitive areas, such as residential, hospitals or school zones. This is achieved through a regression equation based on the drone weight that estimates sound levels (Schäffer et al., 2021). Useful for ensuring drone integration while maintaining urban acoustic comfort and quality of life, the method was used at the regional level in Emilia-Romagna and subsequently applied to Valencia (Figure 3). The same was done with the next. The third layer estimates the potential number of people impacted within each pixel, based on its area as determined by resolution, using the Specific Operations Risk Assessment (SORA) methodology as outlined in Annex F (JARUS Guidelines on SORA Annex F Theoretical Basis for Ground Risk Classification and Mitigation, 2024). This layer calculates a fatality rate by correlating factors such as population density, terminal velocity, and impact energy with specific drone parameters, including mass (900 kg), speed (30.56 m/s), and a standard altitude (150 m). An additional layer applies mitigation based on land uses, calculated using Sentinel-2 imagery to assign exposure factors, enhancing risk accuracy (Figure 4).

Once the multi-criteria map is obtained by overlapping all layers, it is compared with known interchange nodes from existing mobility plans. Vertiports, which serve as corridor nodes and as transfer points with other modes of transport, are then selected from the map in the areas identified as most suitable. Subsequently, the same map is used to determine routes with the lowest risk for connecting the nodes. For this phase, the Least Cost Path method is applied (Figure 5).

2. Illustrations



Figure 1. Antenna distribution by technology in the metropolitan area of Valencia



Figure 2. CRLB Calculation for Orange



Figure 3. Noise emission



Figure 4. Fatalities rate with sheltering applied



Figure 5. Multi-Criteria Analysis Calculation for a Passenger Transport Drone

References

- Barrado, C., Boyero, M., Brucculeri, L., Ferrara, G., Hately, A., Hullah, P., Martin-Marrero, D., Pastor, E., Rushton, A. P., & Volkert, A. (2020). U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. *Aerospace*, 7(3). https://doi.org/10.3390/aerospace7030024
- Bolić, T., & Ravenhill, P. (2021). SESAR: The Past, Present, and Future of European Air Traffic Management Research. Engineering, 7(4). https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.023
- Cunietti, S., Sammarco, C., Ferrando, I., & Sguerso, D. (2023). Urban Perspectives on UAVs Infrastructure Development. SESAR Innovation Days. https://doi.org/10.61009/SID.2023.1.34
- Digital European Sky. (2020). SESAR Joint Undertaking. https://doi.org/10.2829/44355
- Galati, G., Leonardi, M., Mantilla-Gaviria, I. A., & Tosti, M. (2012). Lower bounds of accuracy for enhanced mode-S distributed sensor networks. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 6(3). https://doi.org/10.1049/ietrsn.2011.0197
- JARUS guidelines on SORA Annex F Theoretical Basis for Ground Risk Classification and Mitigation. (2024). http://jarus-rpas.org
- Piano Strategico Nazionale AAM (2021-2030). (2022). https://www.enac.gov.it/pubblicazioni/piano-strategiconazionale-aam-2021-2030-per-lo-sviluppo-dellamobilita-aerea-avanzata-in-italia
- Schäffer, B., Pieren, R., Heutschi, K., Wunderli, J. M., & Becker, S. (2021). Drone noise emission characteristics and noise effects on humans—a systematic review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 18, Issue 11). https://doi.org/10.3390/ijerph18115940

L'ALLUVIONE DI MAGGIO 2023 IN EMILIA-ROMAGNA: MONITORAGGIO DELLE COLTURE CON IMMAGINI SATELLITARI

Gabriele Esposito¹, Roberta Ravanelli²,

¹ Sapienza Università di Roma, DICEA, Area di Geodesia e Geomatica, Italia

< gabriele.esposito,roberta.ravanelli>@uniroma1.it

PAROLE CHIAVE: Synthetic Aperture Radar, Normalized Difference Vegetation Index, Radar Vegetation Index, Emilia Romagna

SOMMARIO:

L'aumento della frequenza delle inondazioni comporta gravi e onerosi danni territoriali, colpendo sia le aree urbane che quelle rurali. In questo contesto, il presente studio propone una metodologia per monitorare gli effetti delle inondazioni nelle aree agricole mediante l'analisi integrata delle immagini multispettrali di Sentinel-2 e di quelle SAR di Sentinel-1.

In particolare, sono stati calcolati il "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) dalle immagini multispettrali di Sentinel-2 e il "Radar Vegetation Index" (RVI) dalle immagini SAR di Sentinel-1, al fine di valutare l'impatto della prolungata presenza d'acqua sui campi agricoli colpiti dall'alluvione verificatasi in Emilia Romagna il 16 maggio 2023.

L'obiettivo principale è analizzare l'effetto delle precipitazioni intense su diverse tipologie di colture e sui dati di backscatter di Sentinel-1, evidenziando il potenziale della tecnologia SAR, che grazie alla capacità di penetrare le nuvole, può integrare efficacemente le informazioni fornite dalle immagini multispettrali. Queste ultime risultano infatti spesso limitate dalla copertura nuvolosa durante e dopo eventi meteorologici estremi, riducendone l'efficacia nel monitoraggio post-alluvionale.

1. INTRODUZIONE

Il significativo incremento degli eventi meteorologici estremi, legato al cambiamento climatico globale, costituisce una seria minaccia per tutti i settori della societ à. Tra questi eventi, le inondazioni rappresentano il disastro naturale pi ù comune, costituendo il 44% degli eventi estremi e colpendo circa 1,6 miliardi di persone nel periodo tra il 2000 e il 2019 (Aronsson-Storrier, 2022). Oltre a un numero crescente di persone esposte alle inondazioni, il settore agricolo risulta particolarmente vulnerabile, subendo danni significativi che compromettono la produzione e la sicurezza alimentare.

L'impatto delle inondazioni sulla resa agricola varia in funzione delle caratteristiche specifiche dell'evento (quali frequenza, durata, profondità e stagionalit à) e delle tipologie di coltura coinvolte (resistenza all'eccesso d'acqua e adattamento a condizioni di suolo anaerobico). Oltre alle inondazioni fluviali, le inondazioni lampo, generate prevalentemente da eventi di pioggia intensa, sono particolarmente pericolose poich é si verificano all'improvviso, ostacolando le attività di allerta e di risposta d'emergenza. Anche le inondazioni costiere possono causare danni immediati ai terreni agricoli, e l'accumulo di sale marino nei suoli può avere effetti prolungati nel tempo, ostacolando la produttività per anni.

Il telerilevamento satellitare offre un contesto spaziale e temporale accurato per rilevare l'estensione delle inondazioni, misurarne l'intensità e valutare i pericoli associati, inclusi i danni diretti e il processo di recupero post-alluvione. Molti studi si concentrano sull'estrazione delle aree allagate mediante telerilevamento, poiché questa rappresenta una base essenziale per il monitoraggio e la gestione delle inondazioni. Tuttavia, il rilevamento delle inondazioni presenta sfide specifiche rispetto ad altre applicazioni di segmentazione delle acque, come la mappatura delle zone umide o delle linee costiere, a causa delle frequenti condizioni di cielo nuvoloso e piovoso. Inoltre, poiché le inondazioni avvengono spesso all'improvviso e il ritiro delle acque varia in base alle condizioni meteorologiche e della superficie, osservazioni satellitari con frequenze di rivisitazione elevate sono essenziali per evitare una sottostima dei pericoli associati alle inondazioni di breve durata.

Di conseguenza, la risoluzione spaziale e temporale delle osservazioni satellitari è cruciale nel monitoraggio delle inondazioni. Attualmente, per mappare le aree inondate si utilizzano principalmente due tipi di dati satellitari: le immagini radar ad apertura sintetica (SAR, telerilevamento attivo) e le immagini multispettrali (telerilevamento passivo). I satelliti SAR consentono acquisizioni indipendenti dalle condizioni di illuminazione diurna o notturna, grazie alla propria fonte di illuminazione attiva, e il segnale radar è in grado di penetrare le nuvole durante gli eventi alluvionali. Le informazioni derivate dai dati SAR, come l'intensità del backscatter, i parametri polarimetrici e la coerenza interferometrica, sono comunemente impiegate per classificare le aree allagate. Le immagini multispettrali, invece, sono spesso utilizzate per l'estrazione dell'estensione delle inondazioni prima o dopo l'evento, data la loro suscettibilità alla copertura nuvolosa. L'ampiezza delle informazioni spettrali fornite consente di identificare le tipologie di copertura del suolo colpite dall'inondazione. I metodi per l'estrazione delle aree allagate possono essere classificati in approcci basati su pixel o su oggetti, e in ulteriori categorie come metodi supervisionati e non supervisionati. (Li et al., 2022).

In questo contesto, Google Earth Engine (GEE) (GEE, n.d.a) consente di eseguire analisi geospaziali su larga scala in un efficiente ambiente di cloud computing, fornendo inoltre un ampio catalogo di dati di telerilevamento accessibile gratuitamente, incluse le collezioni di immagini Sentinel-1 (SAR) (ESA, n.d.a) e Sentinel-2 (satellite multispettrale) (ESA, n.d.b).

Negli ultimi anni, la Regione Emilia Romagna ha sperimentato, tra gli effetti del cambiamento climatico, un aumento nel-



Figura 1. I vari tipo di colture fornite dal geoportale della regione Emilia Romanga: le colture estive in rosso, le colture autunnali-invernali in giallo, i prati in verde.

l'intensità dei fenomeni piovosi, con un incremento dei giorni di pioggia ad alta intensit à rispetto al totale annuo delle giornate piovose. Questa tendenza espone le aree rurali a un clima sempre più caratterizzato da estremi idrologici, con eventi di siccità severa alternati a precipitazioni intense. Queste ultime rappresentano un rischio significativo per i territori agricoli, data l'entità dei danni che possono causare; la loro frequenza e intensità, inoltre, sono previste in ulteriore crescita nei prossimi anni. Tale incremento è attribuibile all'aumento delle temperature globali, che comporta una maggiore concentrazione di umidità atmosferica(Di Giustino et al., 2022), aumentando il rischio di eventi alluvionali catastrofici.

2. DATI

Per questo studio ci siamo serviti di diverse datset disponibili sulla piattaforma Google Earth Engine e di diversi layer importati su GEE, che chiameremo "Feature Collections" di vitale importanza per la riuscita del progetto.

2.1 Collezioni Sentinel su GEE

In questo lavoro, le collezione di immagini Sentinel selezionata sono state:

- Sentinel-1 SAR GRD (GEE, n.d.b): radar ad apertura sintetica C-band rilevato a terra. Questa collezione include tutte le scene GRD con risoluzioni di 10, 25 o 40 metri, combinazioni di bande di polarizzazione, modalità strumentali e bande di polarizzazione dipendenti dalle impostazioni dello strumento. Le scene sono state preprocessate con Sentinel-1 Toolbox, applicando i seguenti passaggi: rimozione del rumore termico, calibrazione radiometrica e correzione del terreno. I valori corretti sul terreno sono stati convertiti in decibel.
- Sentinel-2 MSI armonizzata: MultiSpectral Instrument, Livello-2A. Questa collezione contiene 12 bande spettrali che rappresentano la riflettanza superficiale (scalate di

10000) e tre bande di qualit à (QA), tra cui una (QA60) è una banda maschera di bit con informazioni sulle nuvole (GEE, n.d.c).

2.2 CHIRPS

Per prendere in considerazione la grande portata di piogge dell'evento metereologico estremo abbiamo deciso di utilizzare una collezione di dati presenti su GEE che fornisce informazioni sulle precipitazioni in gran parte del mondo. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRPS, n.d.) with Station data (CHIRPS) è un archivio di dati di precipitazioni quasi globale, copre l'area tra 50°S e 50°N (tutte le longitudini) e va dal 1981 fino al presente. CHIRPS utilizza immagini satellitari ad una risoluzione di 0,05°, e dati di stazione in-situ per creare serie temporali di precipitazione utili per l'analisi delle tendenze ed il monitoraggio della siccità stagionale. Questo dataset si basa su precedenti approcci di tecniche di interpolazione "intelligente" e fornisce stime delle precipitazioni con lunga serie temporale e ad alta risoluzione, basate su osservazioni della durata delle nubi fredde a infrarossi (Cold Cloud Duration, CCD).

2.3 Feature Collections

Per condurre questa analisi, abbiamo importato tre Collezioni di Elementi (Feature Collections, equivalenti ai file shapefile in Google Earth Engine, GEE).

La prima di queste include un layer che rappresenta tutte le tipologie di coltivazioni in l'Emilia Romagna, fornita dal geoportale della regione Emilia Romagna (chiamato "Icolt2023" nel nostro script), che comprende vari tipi di colture, noi abbiamo deciso di soffermarci sulle colture autunno - vernine, estive ed i campi di erba medica poich è presenti nella maggior parte delle aree colpite dall'alluvione (1).

La seconda Collezione di Elementi è un file vettoriale contenente le aree interessate dall'alluvione, ottenute dal Copernicus Rapid Mapping (EU, n.d.) (chiamato "flood" sul nostro script) ed è composto da 8 diverse aree di interesse:



Figura 2. Il risultato dell'unione delle aree alluvionate sulla piattaforma Google Earth Engine.

- AOI1 Forlì,
- AOI2 Lugo,
- AOI3 Castel Bolognese,
- AOI4 Faenza,
- AOI5 Cesena,
- AOI6 Budrio,
- AOI7 Ravenna,
- AOI8 Montalbano.

Questi file vettoriali per le singole aree alluvionate sono stati uniti utilizzando un plugin QGIS, MMQGIS, successivamente il risultato è stato importato su GEE (2).

Infine, utilizzando immagini di febbraio 2023, abbiamo esportato l'immagine da Google Earth Engine con tre diverse bande:

- B11 (SWIR 1) con una risoluzione spaziale (GSD) di 20 m,
- B8 (NIR) con una GSD di 10 m,
- B4 (rosso) con una GSD di 10 m.

In QGIS, ciascuna banda è stata inizialmente ridimensionata dividendo i valori per 10,000 tramite il calcolatore raster, e successivamente le tre bande sono state combinate in un unico raster virtuale. Il risultato di questa operazione è un'immagine in formato .tif, successivamente importata in Orfeo Toolbox (OTB) per eseguire una segmentazione, che ha generato un layer geometrico dei campi, denominato "segmentazione" nello script di lavoro.

Poiché la segmentazione prodotta in OTB non includeva informazioni sui tipi di coltivazione, è stata effettuata un'unione spaziale in QGIS utilizzando la funzione "Unisci Attributi per Posizione" tra il livello "classi" e il livello "segmentazione." Questa operazione ha consentito di trasferire le proprietà del livello "classi" alla segmentazione in base alla loro correlazione spaziale. Per ottenere immagini aggiornate delle aree agricole, sono stati importati dati da Google Earth Engine (GEE), evitando il layer del geoportale della Regione Emilia Romagna, poiché l'obiettivo era rappresentare accuratamente le forme e dimensioni attuali delle colture. Il layer risultante è stato caricato su GEE con il nome "segmentation."

3. METODOLOGIA

In questo studio, sono stati impiegati due indici di vegetazione derivati da immagini satellitari, l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e l'RVI (Radar Vegetation Index), per valutare l'impatto dell'inondazione verificatasi in Emilia Romagna nel maggio 2023 su diverse tipologie di colture presenti nella regione.

L'obiettivo principale è stato sviluppare una metodologia per investigare i danni causati dall'inondazione su vari tipi di coltivazioni, utilizzando l'analisi delle immagini multispettrali di Sentinel-2 e monitorando l'impatto delle intense precipitazioni sui dati di retrodiffusione acquisiti da Sentinel-1. Questa analisi mira anche a evidenziare come la tecnologia SAR, capace di "osservare" attraverso la copertura nuvolosa, possa integrare efficacemente le informazioni delle immagini multispettrali, spesso limitate dall'elevata presenza di nubi durante e subito dopo le forti piogge che precedono e seguono le inondazioni, migliorando così il monitoraggio del recupero post-evento.
In particolare, è stata condotta un'analisi su una selezione di campi all'interno dell'area colpita dall'alluvione, confrontati con campi esterni ad essa, e classificati in base alla tipologia colturale. Sono stati osservati i cambiamenti nei valori degli indici tra i campi inondati e quelli non inondati, con l'intento di stabilire un metodo per valutare i danni indotti dall'inondazione su diverse colture in Emilia Romagna, attraverso l'impiego combinato delle immagini satellitari di Sentinel-1 e Sentinel-2.

3.1 Indici di Vegetazione

Nel campo delle applicazioni di telerilevamento, gli indici di vegetazione (VI) sono stati sviluppati per valutare qualitativamente e quantitativamente le coperture vegetative attraverso misurazioni spettrali. La risposta spettrale delle aree vegetate è il risultato di una complessa interazione tra la vegetazione, la luminosità del suolo, le condizioni ambientali, le ombre, il colore e l'umidità del suolo. Inoltre, i VI sono sensibili alle variazioni spazio-temporali dell'atmosfera, rendendoli misure quantitative utili per stimare il vigore della vegetazione, con una sensibilità maggiore rispetto alle singole bande spettrali nel rilevare la biomassa.

L'interesse per questi indici risiede nella loro utilit à nell'analisi e interpretazione delle immagini di telerilevamento. Essi costituiscono un metodo efficace per rilevare i cambiamenti nell'uso del suolo (in dati multitemporali), valutare la densit à della copertura vegetale, distinguere le colture e prevederne la crescita. Molti di questi indici, inoltre, contribuiscono a migliorare la classificazione tematica delle immagini, risultando particolarmente utili nella mappatura tematica.

Le diverse coperture vegetative possono essere distinte in base al loro comportamento spettrale, soprattutto nella banda visibile del rosso (630-690 nm) e nel vicino infrarosso (760-900 nm): la clorofilla assorbe la radiazione rossa, mentre le strutture cellulari delle foglie riflettono intensamente la radiazione nel vicino infrarosso. La differenza tra il rosso e il vicino infrarosso, ben visibile nella curva di riflettanza della vegetazione, è un indicatore sensibile della presenza di vegetazione verde. La risposta spettrale della vegetazione nel rosso è strettamente correlata alla concentrazione di clorofilla, mentre quella nel vicino infrarosso dipende dall'indice di superficie fogliare e dalla densità della vegetazione verde. La combinazione di queste bande spettrali consente quindi di distinguere la vegetazione dal suolo nelle immagini multispettrali e di stimare la biomassa fotosinteticamente attiva in termini di densià della copertura vegetale.

In parallelo, i dati SAR presentano un elevato potenziale per le applicazioni agricole, grazie alla capacit à dei sistemi SAR di monitorare in tutte le condizioni meteorologiche e alla sensibilità del segnale a microonde alle proprieà dielettriche e geometriche delle colture. In particolare, la disponibilità di dati SAR a doppia polarizzazione forniti dalla missione Sentinel-1 rappresenta un'opportunità unica per potenziare il monitoraggio operativo, aprendo nuove possibilità per applicazioni agricole avanzate(Mandal et al., 2020).

3.1.1 Normalized Difference Vegetation Index Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) quantifica la vegetazione misurando la differenza tra la luce del vicino infrarosso (NIR, che la vegetazione riflette fortemente) e quella rossa (RED, che la vegetazione assorbe). Il risultato della formula genera un valore compreso tra -1 e +1: se un pixel è in grado di riflettere poco nel canale rosso e molto nel canale NIR, otterr à un valore NDVI elevato (e viceversa). I sensori multispettrali satellitari come Landsat-8, Landsat-9 e Sentinel-2 dispongono delle bande necessarie per calcolare l'NDVI (Ravanelli, n.d.).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} - 1 \le NDVI \le 1$$
(1)

Valori negativi sono principalmente generati da nuvole, acqua e neve, e valori vicini a zero sono generati principalmente da rocce e suolo nudo. Valori molto bassi (0,1 e inferiori) dell'NDVI corrispondono ad aree aride come rocce, sabbia o neve. Valori moderati (0,2 - 0,3) rappresentano arbusti e praterie, mentre valori elevati (0,6 - 0,8) indicano foreste pluviali temperate e tropicali. L'NDVI viene spesso utilizzato a livello mondiale per monitorare la siccità, prevedere la produzione agricola, assistere nella previsione delle zone a rischio di incendi e mappare l'avanzamento del deserto.In questo caso, l'NDVI derivato dalle immagini multispettrali di Sentinel-2 risulta molto efficace e utile per analizzare le condizioni della vegetazione, poiché Sentinel-2 è caratterizzato da una buona risoluzione spaziale di 10 metri, permettendo di mappare la vegetazione con una risoluzione elevata. Inoltre, questi dati forniscono anche informazioni utili sullo stato dell'ambiente, come la temperatura superficiale del suolo, l'umidità dell'aria e la qualit à dell'acqua (Rakuasa and Sihasale, 2023).



Figura 3. Una immagine NDVI nell'area di Ravenna (21/05/2023 - 31/05/2023)

3.1.2 Radar Vegetation Index Il SAR ha la capacità di penetrare la copertura nuvolosa, offrendo il vantaggio di acquisire dati a terra anche in condizioni meteorologiche avverse. n questo contesto, Kim e Van Zyl (Kim and Van Zyl, 2009) hanno introdotto il Radar Vegetation Index (RVI), un indice sviluppato specificamente per i dati SAR a polarizzazione completa (Full Polarization, FP). L'RVI per i dati SAR FPè dato da:

$$RV I(q) = \frac{(8HV)}{(HH + VV + 2HV)}$$
(2)

dove HH, VV e HV sono i coefficienti di backscatter nelle polarizzazioni HH, VV e HV. Successivamente, Charbonneau

(Charbonneau et al., 2005) ha ridotto questa formulazione per i dati SAR a polarizzazione doppia (DP). Tuttavia, l'RVI per i dati DP SAR è stato formulato utilizzando i coefficienti di backscatter HH e HV.

$$RV I(h) = \frac{4HV}{HH + HV}$$
(3)

In contrasto, i dati SAR di Sentinel-1 consistono nelle polarizzazioni VV e VH. Di conseguenza, le informazioni del coefficiente di backscatter HH sono assenti in questo set di dati. In questo caso, i coefficienti di backscatter VV e VH vengono utilizzati al posto di HH e HV, come specificato. Pertanto, la formulazione dell'Indice di Vegetazione Radar (RVI) per i dati SAR di Sentinel-1 è la seguente (Dey, n.d.):

$$RVI(h) = \frac{4VH}{VV + VH}$$
(4)

L'RVIè stato proposto come metodo per monitorare il livello di crescita della vegetazione, in particolare quando sono disponibili serie temporali di dati. L'RVI varia generalmente tra 0 e 1 e misura la casualit à della dispersione, ed è sensibile alla biomassa. L'RVIè vicino a zero per una superficie liscia e aumenta con la crescita delle colture.

3.2 Image Processing

3.2.1 SAR Il primo passo della procedura ha riguardato l'identificazione di un campo specifico per le indagini, selezionato sulla base della proprietà DN (Digital Number) del file vettoriale "segmentazione". L'analisi è stata condotta nella nostra area di interesse, la regione Emilia Romagna, su due diversi periodi temporali in due script distinti: un primo periodo breve, dal 1 agosto 2022 al 31 ottobre 2023, e un secondo periodo esteso, dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023, per un'analisi a lungo termine. La funzione '*ee.Date'* è stata utilizzata per filtrare la collezione di immagini SAR di Sentinel-1 (COPERNICUS/S1 GRD) in base al range temporale selezionato, alla polarizzazione (VV e VH), alla modalità strumentale (IW) e a un numero di orbita relativa specifico.

Per esaminare l'impatto delle precipitazioni sul backscattering, le bande VV e VH sono state analizzate separatamente. Successivamente, è stata definita una funzione, '*calc RVI*', per calcolare l'indice di vegetazione radar (RVI) utilizzando le bande VV e VH di Sentinel-1, secondo la formula precedentemente descritta (4). Questa funzione è stata applicata alla collezione di immagini di Sentinel-1, generando una nuova collezione di immagini RVI che rappresenta l'evoluzione temporale dell'RVI sull'area selezionata.

La funzione *ui.Chart.image.series* di Google Earth Engine (GEE) è stata utilizzata per creare un grafico a serie temporale che mostra l'andamento delle bande VV, VH e RVI nel tempo su una coltura specifica all'interno dell'area alluvionata. Il grafico è stato configurato con un riduttore di mediana e un intervallo di campionamento di 10 m, ed è centrato sull'orbita ascendente con un numero di orbita relativa specifico.

Infine, è stata tentata l'implementazione di una formula simile all'NDVI per i dati radar, utilizzando le bande VV e VH. A tal fine, è stata definita una funzione per calcolare un indice SAR normalizzato, denominato S1, che è stato successivamente aggiunto come nuova banda a ciascuna immagine della collezione. **3.2.2 Sentinel 2** Abbiamo utilizzato la collezione di immagini Sentinel-2 in Google Earth Engine (GEE) per valutare l'impatto della presenza di acqua nei campi agricoli nelle aree alluvionate, in relazione ai tipi di colture, mediante l'analisi dell'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). A causa delle condizioni meteorologiche sfavorevoli, caratterizzate da pioggia e nuvolosit à, è stato necessario aggregare le immagini in periodi di 10 giorni al fine di ottenere dati pi ù completi e valori più consistenti. Per questo motivo, abbiamo definito la risoluzione temporale della serie temporale come 'days', specificando la durata di ogni periodo come 10 giorni e calcolando il numero di periodi sulla base delle date di inizio e fine dell'analisi.

Il codice GEE è stato suddiviso in diversi passaggi: inizialmente, abbiamo selezionato le immagini dai due dataset, Sentinel-2 Surface Reflectance e Sentinel-2 Cloud Probability. Successivamente, abbiamo scelto il valore massimo della Cloud Probability per mascherare i pixel con una probabilit à di nuvole superiore al 50

Abbiamo definito una funzione di aggregazione per riunire i dati nei periodi specificati, creando cos una serie temporale di immagini aggregate di Sentinel-2. Al termine, abbiamo generato un grafico tramite la funzione *'chart'* per osservare l'andamento temporale dell'NDVI nelle colture analizzate.

Successivamente, utilizzando l'operazione *'.merge'*, abbiamo creato una nuova variabile combinando i dati di RVI e NDVI. Questo approccio ci ha permesso di visualizzare un grafico che mostra entrambe le bande, facilitando il confronto dei rispettivi andamenti nelle colture specifiche analizzate.

Infine, i dati delle precipitazioni CHIRPS sono stati filtrati in base alle date di inizio e fine specificate, concentrandosi sul periodo di analisi di interesse. Abbiamo combinato le tre collezioni di immagini (RVI, NDVI e precipitazioni) in una singola collezione, utilizzandola per visualizzare l'andamento temporale delle variabili RVI, NDVI e precipitazioni normalizzate.

3.3 Visualizzazioni delle immagini

3.3.1 SAR Le visualizzazioni delle immagini SAR, nonostante abbiano un potenziale elevato per catturare immagini dettagliate, non ci hanno aiutato a distinguere chiaramente tra le aree alluvionate e quelle non alluvionate.

3.3.2 Sentinel 2 Per analizzare i campi e confermare visivamente le informazioni fornite dai livelli, abbiamo impostato tre visualizzazioni su Google Earth Engine (GEE) per esaminare le differenze tra campi impattati e campi non danneggiati dall'inondazione:

- Visualizzazione RGB con le bande B4 (Rosso), B3 (Verde) e B2 (Blu).
- Visualizzazione NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).
- Visualizzazione a falsi colori con bande B8 (NIR), B11 (SWIR 1) e B4 (Rosso).

Nella visualizzazione RGB i campi sani appaiono vibranti e verdi, mentre i campi alluvionati o danneggiati possono mostrare segni di decolorazione o cambiamenti di consistenza (4). La visualizzazione NDVI mette in evidenza la salute della vegetazione. I campi sani presentano tipicamente valori NDVI più alti, apparendo più luminosi rispetto ai campi danneggiati o alluvionati che mostrano valori NDVI inferiori, indicando una densità vegetativa ridotta. Nella visualizzazione a falsi colori, utilizzando le bande B8, B11 e B4, la vegetazione sana può essere evidenziata in giallo e arancione, mentre le aree alluvionate appaiono più luminose, segnalando l'impatto dell'inondazione.



Figura 4. Una immagine RGB nell'area di Ravenna (21/05/2023 - 31/05/2023))

4. RISULTATI

In questa sezione, presenteremo i risultati ottenuti dalla nostra ricerca, concentrandoci principalmente sulle differenze nelle serie temporali dell'Indice di Vegetazione Normalizzato (ND-VI) in funzione dei diversi tipi di coltivazioni, al fine di evidenziare quali colture sono state maggiormente influenzate dagli effetti dell'alluvione.

La nostra analisi ha riguardato principalmente colture estive, colture autunno-invernali, prati e coltivazioni pure di erba medica. Per ciascun tipo di coltura, abbiamo selezionato due campi: uno situato all'interno dell'area alluvionata e uno situato al di fuori dell'area alluvionata. Per ogni tipo di coltura, sono stati analizzati gli indici NDVI e RVI.

Confrontando le serie temporali dell'NDVI con quelle dell'Indice di Vegetazione Radar (RVI), abbiamo osservato che l'RVI non risulta particolarmente sensibile nel mostrare gli effetti diretti dell'alluvione, pur presentando un comportamento opposto rispetto all'NDVI in termini di fase. Tale differenza potrebbe indicare una diversa risposta dei due indici alle variazioni ambientali provocate dalle inondazioni.

Inoltre, sono state analizzate anche le serie temporali delle polarizzazioni di Sentinel-1 (VV e VH) in relazione all'NDVI. A questo scopo, abbiamo introdotto un nuovo indice, denominato S1, calcolato come la differenza normalizzata tra le due polarizzazioni di Sentinel-1, seguendo lo stesso principio utilizzato per il calcolo dell'NDVI. L'analisi di queste serie temporali ci ha permesso di esplorare in modo pi ù dettagliato l'interazione tra i dati SAR e gli indici di vegetazione, e come questi possano integrare le informazioni fornite dalle immagini multispettrali per monitorare l'impatto delle inondazioni sulle colture.

4.1 Tendenza dell'NDVI in base ai tipi di coltura

4.1.1 Colture Estive I campi all'interno dell'area alluvionata mostrano un calo significativo dell'NDVI (5), segnalando danni evidenti dovuti all'alluvione. L'NDVI non ha mostrato il normale picco stagionale, mentre i campi fuori dall'area alluvionata hanno mantenuto un andamento stagionale regolare (6).

4.1.2 Prati e coltura di erbe mediche Questi campi alluvionati mostrano un valore basso di NDVI che non si concilia con la loro tipica stagionalit à dettata da un picco elevato di NDVI osservato negli anni precedenti. I campi fuori dall'area alluvionata hanno mantenuto valori elevati di NDVI, indicando che i prati e le colture di erba medica sono stati gravemente danneggiati.

4.1.3 Colture autunno-vernine Diversamente dalle altre colture, i campi autunno-vernini all'interno dell'area alluvionata non sembrano essere stati significativamente influenzati, mostrando una tendenza stagionale normale e coerente con gli anni precedenti.



Figura 5. Il trend dell'NDVI per una coltivazione estiva nell'area dell'alluvione dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023



Figura 6. Il trend dell'NDVI per una coltivazione estiva al di fuori dell'area dell'alluvione dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023)

4.2 La tendenza degli Indici SAR in base ai tipi di coltura

L'uso dell'RVI e dell'indice S1 per valutare l'impatto delle intense piogge sui dati SAR, ci ha fornito alcune intuizioni interessanti, a differenza della considerazione delle singole polarizzazioni, Vertical Transmit-Horizontal Receive Polarisation (VH) o Vertical Transmit-Vertical Receive Polarisation (VV). In questa sezione, come nel caso della tendenza NDVI, i risultati sono stati classificati in base al tipo di coltura e poi commentati. **4.2.1 Colture Estive** Nei grafici che confrontano RVI e NDVI, si osserva uno sfasamento tra i due indici, con tendenze opposte. Tuttavia, i picchi di NDVI non corrispondono a bassi valori significativi dell'RVI. Entrambi gli indici, insieme alle bande VV e VH, subiscono una drastica riduzione durante l'alluvione, ma senza un calo prolungato come per l'NDVI nei campi alluvionati.

4.2.2 Prati e coltura di erbe mediche Per i prati e le colture di erba medica, lo sfasamento di fase dell'RVI è appena percettibile e l'indice S1 non mostra cali drastici nelle bande VV e VH durante l'alluvione, diversamente da quanto osservato nelle colture estive.

4.2.3 Colture autunno-vernine Le colture invernali mostrano una tendenza dell'RVI pi ù simile a quella delle colture estive, con uno sfasamento di fase evidente ma senza significativi cali dell'RVI nei picchi dell'NDVI (7). Anche l'indice S1 riflette questa tendenza, mostrando una somiglianza con il trend delle colture estive.



Figura 7. Confronto tra RVI (in nero), NDVI (in verde) e l'indice S1 (in rosso) per una coltura autunno-invernale nell'area alluvionale dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023.

5. CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questa tesiè stato sviluppare una metodologia per monitorare l'impatto delle alluvioni sulle aree agricole, integrando immagini multispettrali di Sentinel-2 e immagini radar SAR di Sentinel-1. In particolare, il calcolo dell'Indice di Vegetazione Normalizzato (NDVI) dalle immagini multispettrali di Sentinel-2 e dell'Indice di Vegetazione Radar (RVI) dalle immagini SAR di Sentinel-1 ha avuto l'intento di valutare gli effetti della presenza prolungata di acqua sui campi agricoli.

L'approccio adottato mirava ad analizzare come le intense precipitazioni influenzino i dati di retro-diffusione di Sentinel-1 nelle aree agricole, esplorando come la tecnologia SAR, grazie alla sua capacità di penetrare le nubi, possa integrare le immagini multispettrali. Queste ultime, infatti, spesso riscontrano difficoltà a causa della copertura nuvolosa persistente durante eventi di pioggia intensa e le conseguenti inondazioni, limitando cos ì il monitoraggio efficace del recupero post-alluvione.

I risultati ottenuti hanno mostrato che le colture estive e l'erba medica sono risultate essere le pi ù colpite dalle forti piogge, mentre le colture autunno-invernali sembravano meno influenzate, probabilmente a causa dei valori di NDVI pi ù bassi durante i mesi estivi. Confrontando l'NDVI con l'RVI, è emerso uno sfasamento di fase in tutte le tipologie di coltivazioni: sebbene in alcuni casi questo fosse sottile, era comunque percepibile, e in generale l'RVI tendeva a presentare valori meno estremi rispetto all'NDVI. Inoltre, è stata osservata una corrispondenza tra l'indice S1 e l'NDVI, con tendenze correlate e picchi negativi e positivi proporzionali. Tuttavia, non sono emersi risultati significativi nel confronto tra le bande VV e VH e l'NDVI, suggerendo che altre variabili o metodologie potrebbero essere necessarie per analizzare in modo pi ù efficace queste polarizzazioni.

Pertanto, saranno necessari ulteriori studi per esplorare meglio le relazioni tra RVI, indice S1 e NDVI per valutare l'impatto delle piogge intense sulle aree coltivate. La metodologia proposta presenta potenzialità di applicazione in altre aree soggette a inondazioni, grazie all'integrazione delle immagini di Sentinel-2 e Sentinel-1.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Aronsson-Storrier, M., 2022. UN Office for Disaster Risk Reduction (2020). *Yearbook of International Disaster Law Online*, 3(1), 417–423.

Charbonneau, F., Trudel, M., Fernandes, R., 2005. Use of dual polarization and multi-incidence sar for soil permeability mapping. *Proceedings of the 2005 advanced synthetic aperture radar (ASAR) workshop, St-Hubert, QC, Canada*, 15–17.

CHIRPS, n.d. https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps.

Dey, S., n.d. Radar vegetation index code for dual polarimetric sentinel-1 data in eo browser.

Di Giustino, G., Bonora, A., Federico, K., Reho, M., Lucertini, G., 2022. Spatial Analysis of the Vulnerability to Flooding in the Rural Context: The Case of the Emilia Romagna Region. *Atmosphere*, 13(8), 1181.

ESA, n.d.a. Sentinel-1 Overview.

ESA, n.d.b. Sentinel 2. https://sentinels.copernicus. eu/web/sentinel/missions/sentinel-2 .

EU, n.d. Copernicus Rapid Mapping. https://emergency. copernicus.eu/mapping/ems/rapid-mappingportfolio .

GEE, n.d.a. Platform. https://earthengine.google.com/ platform/.

GEE, n.d.b. Sentinel-1 sar grd: C-band synthetic aperture radar ground range detected, log scaling. https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD

GEE, n.d.c. Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. https://developers.google.com/earth-engine/ datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR

Kim, Y., Van Zyl, J. J., 2009. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8), 2519–2527.

Li, M., Zhang, T., Tu, Y., Ren, Z., Xu, B., 2022. Monitoring Post-Flood Recovery of Croplands Using the Integrated Sentinel-1/2 Imagery in the Yangtze-Huai River Basin. *Remote Sensing*, 14(3), 690. Mandal, D., Kumar, V., Ratha, D., Dey, S., Bhattacharya, A., Lopez-Sanchez, J. M., McNairn, H., Rao, Y. S., 2020. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111954.

Rakuasa, H., Sihasale, D. A., 2023. Analysis of Vegetation Index in Ambon City Using Sentinel-2 Satellite Image Data with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Method based on Google Earth Engine. *Journal of Innovation Information Technology and Application (JINITA)*, 5(1), 74–82.

Ravanelli, R., n.d. Spectral Indexes. Slide del corso di Geomatica (Gestione e Valorizzazione del Territorio), A.A. 2022/2023.

Un nuovo sistema informativo e collaborativo per i beni archeologici marini della regione Puglia: design, implementazione e scopi

Alessandra Spreafico¹, Elisabetta Colucci¹

¹ Laboratorio di Geomatica per I Beni Culturali (LabG4CH), Dipartimento di Achitettura e Design (DAD), Politenico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli, 39, Torino (TO) – (alessandra.spreafico, elisabetta.colucci)@polito.it

Keywords: database, webGIS, standard, turismo, Andar per mare, Archim3des.

I beni archeologici marini - sommersi e costieri - rappresentano una sfida crescente in termini di documentazione, monitoraggio, accesso e conservazione. I recenti progressi tecnologici e la capacità turistica hanno alimentato un crescente interesse verso questo ambito (Bulut & Yüceer, 2023; Manglis et al., 2020; Stefanile, 2016). Tuttavia, la gestione dei dati digitali che documentano questi beni resta complessa (Calantropio & Chiabrando, 2023). Nonostante diverse iniziative nazionali e internazionali, la documentazione risulta non strutturata, disomogenea e priva di database basati su standard e tesauri condivisi - come ad esempio CIDOC-CRM, Getty CCO e CDWA, UNESCO Thesaurus, e Getty AAT - che consentano la collaborazione e condivisione di dati interoperabili. Esempi come Australian National Shipwrecks Database (AUCHD) e Bermuda 100 Challenge dimostrano il potenziale di una documentazione sistematica per la protezione e promozione dei beni, anche a scopi turistici. L'uso di GIS, webGIS e database spaziali è fondamentale per la gestione dei beni marini, ma pochi progetti li hanno applicati specificamente a questi beni (Vandenbulcke et al., 2016). Iniziative internazionali come Wreck Site - il più ricco database online di relitti su scala mondiale - e Managing Cultural Heritage Underwater (MACHU) GIS - un progetto finanziato dall'Unione Europea per lo sviluppo di un webGIS dei beni marini di sette paesi mostrano l'efficacia dei sistemi GIS, sebbene l'accesso sia limitato per la presenza di dati sensibili. In Italia i sistemi di catalogazione relativi ai beni culturali sono normati dall' ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione), ma alcune banche dati regionali non seguono gli standard e gli strumenti dell'ICCD, generando discrepanze e minando l'interoperabilità tra banche dati diverse. Inoltre, nel panorama di catalogazione italiano i beni archeologici marini devono rientrare forzatamente entro schede di catalogo non concepite specificatamente per essi, lasciando al singolo operatore la scelta di quale scheda di catalogo usare, come ad esempio Scheda A (Architettura), Scheda OA (Opere/Oggetti d'Arte) e Scheda SI (Siti Archeologici). A livello italiano manca una banca dati nazionale unificata specifica per i beni marini e basata su standard condivisi. In questo contesto si inserisce la ricerca del presente abstract il cui obiettivo è quello di delineare un sistema informativo per i beni archeologici marini della regione Puglia. La presente ricerca è parte di due progetti gemelli, "Andar per mare" finanziato da Regione puglia per scopi turistici - e "Archim3des" - PRIN 2022 - per scopi di ricerca. Entrambi i progetti si basano su un unico database spaziale strutturato, relazionale e multilingue (italiano e inglese), progettato nel corso degli ultimi due anni (Spreafico et al., 2024). Il database sviluppato, basato sulle voci di catalogo delle schede SI e

bibliografia dell'ICCD, include sei entità: siti stratificati, relitti, reperti decontestualizzati, rotte, documentazione e bibliografia (Figura 1). I dati di partenza provengono da fonti diverse: Carta Archeologica Subacquea (formato shapefile), estrazioni della carta dei beni culturali pugliesi - CartApulia – (formato .csv) e da un database dell'Università del Salento in File Maker Pro (formato .fmp) frutto del lavoro di decide di anni di ricerche e scavi. I tre dataset sono stati armonizzati perché contenevano dati ridondanti o discordanti ed erano organizzati in strutture di dati differenti. Il nuovo database - creato con ArcGIS Pro su PostgreSQL - risiede su un server esterno in modo da essere accessibile da più utenti e piattaforme in contemporanea. Diverse piattaforme rendono disponibili online i dati del database, adattandone la presentazione grafica in base alle diverse esigenze. Due webGIS - che puntano direttamente al database - sono sviluppati per il progetto Andar per Mare in versione desktop e mobile con due interfacce differenti e sono integrati in un sito web (https://andarpermarepuglia.it/). Il sito web è interamente dedicato alla promozione turistica di 39 siti sommersi e costieri della Puglia ed è attualmente in fase di pubblicazione. Un webGIS di inquadramento dei beni sommersi è integrato nella homepage (Figura 2). Un secondo webGIS è sviluppato a livello del singolo sito archeologico (Figura 4), tale webGIS mostra il singolo sito in relazione ai servizi culturali connessi (come musei, aree protette, info point, etc.). Il webGIS a livello di singolo sito è basato su un percorso web dinamico che consente la creazione di un solo webGIS dal quale generare tanti URL quanti sono i siti archeologici. Ogni percorso contiene una query che definisce il livello di zoom e le coordinate del sito di modo da mostrare il sito centrato rispetto alla mappa ad un livello adeguato di zoom. Differenziando i contenuti mostrati, i due webGIS non sono sovraccarichi di dati e guidano gli utenti nella navigazione in maniera efficace. I punti sulla mappa sono interrogabili (Figura 5) consentendo di passare alla pagina web del singolo sito archeologico tramite un link. I dati sono modificabili solo da un gruppo di editori tramite un'interfaccia di back office online (Figura 6) concepita per non esperti in GIS. Attraverso il back office, gli editori modificano direttamente i dati nel database in modo tale che ogni modifica o nuovo inserimento è immediatamente visibile nel sito web e nelle applicazioni webGIS. Backup del database e dei contenuti del sito web sono impostati a differente cadenza temporale per consentire il recupero dei dati in caso di necessità. Tale architettura è studiata per favorire la collaborazione tra vari esperti in maniera indipendente e in remoto ma secondo un sistema unificato. In questo modo si evita di generare elementi ridondanti e discordanti tra database, sito web e applicazioni webGIS. Il sistema è basato sul principio di semplicità, difatti sia i visualizzatori che gli editori necessitano solo di una connessione internet e un browser. Questo sistema mira anche a promuovere i beni archeologici marini a livello internazionale, come indicato dalla Carta ICOMOS del 1996 e dalla Convenzione UNESCO del 2001. Scopo della divulgazione è anche portare alla conoscenza del pubblico e degli enti quei siti che sono oggetto di recente restauro e rifunzionalizzazione, come il Faro di Torre San Giovanni riqualificato col progetto CoHeN, ma anche quei beni che necessiterebbero di essere restituiti alla comunità. Data la scalabilità dell'architettura, si auspica che tale database possa un giorno diventare il database dei beni archeologici marini a scala nazionale.

Bibliografia

Bulut, N., & Yüceer H., 2023: A literature review on the management of underwater cultural heritage, (in English), Art no. 106837, Ocean Coast. Manag. vol. 245, 26, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106837

Calantropio, A., & Chiabrando, F., 2023: The Evolution of the Concept of Underwater Cultural Heritage in Europe: A Review of International Law, Policy, and Practice. Heritage, 6(12), 7660-7673. https://www.mdpi.com/2571-9408/6/12/403

Manglis, A., Fourkiotou, A., & Papadopoulou, D., 2020: The Accessible Underwater Cultural Heritage Sites (AUCHS) as a sustainable tourism development opportunity in the Mediterranean Region. Tourism: An International Interdisciplinary Journal, 68(4), 499-503. https://hrcak.srce.hr/248995

Spreafico, A., Colucci, E., Chiabrando, F., & Auriemma, R. 2024: A Review of Existing Sources for the Design of an Archaeological Underwater Cultural Heritage Database of Puglia Region (Italy). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 445-452. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-445-2024

Stefanile, M. 2016: Underwater Cultural Heritage, Tourism and Diving Centers. The case of Pozzuoli and Baiae (Italy). In IKUWA V. Actas del V Congreso Internacional de Arqueología Subacuática Un patrimonio para la humanidad Cartagena, 15-18 de octubre de 2014, 213-224.

Vandenbulcke, A., Van Ackere, S., Decock, M., Stal, C. and De Wulf, A., 2016: Preservation of the archaeological heritage of the north sea using webGIS. In: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 3: 375-382.



Figura 1. Modello concettuale del database



Figura 2. Homepage del sito web di andar per Mare con integrato webGIS di inquadramento



Figura 3. Navigazione della mappa per provincia



Figura 4. Pagina web del sito Faro di Torre San Giovanni con webGIS integrato



Figura 5. Mappa sincronizzata con le immagini e link alla pagina web del singolo sito nel pop-up

✓ 脅 Modifi	ca Sito archeologico × +		-	×
€ → C	andarpermarepuglia.it/admin/siti-archeologici/54/edit	■ ☆	Ð	:
₩ =	● Bacheca → Sitt-archeologici → 54 → Edit			•
	Modifica Sito archeologico Anteprima IT Anteprima EN			
8	Italiano Immagini inglese Altro			
8	Sratus Pubblicato			
0	Visitable			
0			*	
655	Denominazione dei sito			
E CONTRACTOR	Grotta dell'Acqua a Peschici			
	URL del sito (lascia vuoto per generare in automatico)			
4	grotta-dell-acqua-a-peschici			
	Sottotitolo It			
66	Grotta-santuario			
180 1	Sito accessibile?			
	No			
	Stre restian?			
	si			

Figura 6. Back office di modifica dei dati del database

Evaluating tidal and wave corrections on shoreline extraction from satellite imagery in Mediterranean micro-tidal beaches

Fabiana Di Ciaccio¹, Riccardo Angelini¹

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Florence 50139, Italy - (fabiana.diciaccio, riccardo.angelini)@unifi.it

Keywords: PlanetScope, Remote sensing, Sentinel-2, Shoreline extraction, Tidal corrections, Wave corrections.

1. Introduction

Coastal areas are essential for biodiversity, economic activity, and cultural heritage, supporting diverse habitats and protecting inland regions from storm surges and erosion. However. they face increasing threats from erosion intensified by climate change, sea-level rise, and human activities like construction and land reclamation. Accurate monitoring of coastal changes is crucial for effective management to prevent further degradation. The 'instantaneous' shoreline position, defined as the water-land boundary line visible in the image (Boak and Turner, 2005), is the most commonly used indicator for coastal monitoring. Satellite imagery offers wide spatial coverage and frequent revisit times. Sentinel-2 (S2), with a medium spatial resolution (10 m) and a five-day revisit cycle, has been widely used in coastal studies for detecting shoreline changes and mapping coastal features (Cabezas-Rabad án et al., 2019). PlanetScope (PS) provides even higher temporal resolution with daily imagery, beneficial for monitoring dynamic coastal environments where rapid changes occur (Abdelhady et al., 2022). Natural phenomena like tides and wave action affect the accuracy of shoreline extraction, causing temporal variations in shoreline positions. Incorporating these effects is fundamental to ensure that extracted shorelines reflect the true position. This work aims to (i) evaluate the impact of tidal and wave corrections on the accuracy of shoreline extraction using the automated tool presented in (Angelini et al., 2024), and (ii) provide additional evidence of the methodology's effectiveness by extending validation to a larger temporal dataset of the same tideless Mediterranean beaches.

2. Material and method

Coastal monitoring was conducted on three sandy, microtidal Mediterranean beach: Castelldefels (CDF) in Spain, and Feniglia (FNG) and Marina di Grosseto (MRN) in Italy (Fig. 1). The dataset comprises three S2 and three PS images, one for each site. S2 level-2A products and PS images, both orthorectified and georeferenced, were selected as close as possible to the dates of the reference orthomosaics (maximum 4 days). Auxiliary data such as Digital Surface Models (DSMs) with 1 m of spatial resolution and sea-level data were used. As validation data, three high-resolution orthomosaics (25 cm) were used to manually digitize the reference shorelines. Local authority WMS services for each site were consulted to download both auxiliary and validation data. The methodology extends the shoreline extraction technique from (Angelini et al., 2024) by including planimetric corrections for tidal and wave run-up contributions using Stockdon's formula (Stockdon et al., 2006). The process involves preprocessing satellite imagery to calculate spectral indices and applying unsupervised classifications (Gaussian Mixture Model and K-means) to binarize rasters into water and land. To extract the contours the Marching square algorithm coupled with a Laplacian smoothing algorithm was applied. Finally, accuracy was assessed by comparing S2 and PS-derived shorelines with reference shorelines from high-resolution orthomosaics using the "baseline and transect" method. The same transects, spaced 10m apart, were used to provide two versions of the shorelines: corrected with displacement due to tide and waves (transl) and uncorrected (raw)2.

3. Result and discussion

The calculation of the total displacement, accounting for both tidal and run-up contributions, showed that in four out of six cases, the values exceeded one meter (Table 1). In Table 2, the Mean Absolute Deviation (MAD), Bias, and Root Mean Square (RMS) of the shoreline position error for each case study were reported. The best combination of method and index is also shown for both the uncorrected (raw) and corrected (transl) shorelines. The obtained results are consistent with previous studies (Angelini et al., 2024), showing the best performance at the CDF and FNG beaches and the worst at MRN, which requires differentiated strategies due to its complex environment. For PS data, the best performance was achieved in two out of three sites using the same index-method combination (NIR-Kmeans). For S2 data, no single index-method combination fits all beaches, indicating that a universal approach is not feasible, aligning with previous conclusions (Pucino et al., 2022). Similar considerations apply to accuracy (Vos et al., 2023). Tidal and wave corrections altered error statistics at the decimeter level, often leading to slight error reductions, consistent with other studies (Vos et al., 2023). This underscores the need to analyze other site-specific error sources related to morphological characteristics or satellite image coregistration.

4. Conclusion

This study demonstrates that incorporating tidal and wave corrections in satellite-derived shorelines increases their reliability, removing a potential source of error. Future research will explore the integration of various data sources and correction techniques to further refine shoreline extraction methods. Applying these methodologies to diverse coastal environments will help validate their generalizability and effectiveness, contributing to global efforts in coastal preservation and management. Further improvements will focus on validating the results using multitemporal high-resolution orthomosaics and extracted shorelines to verify correlations through linear regression rates, allowing for quantification of the improvements achieved through the correction methods.

References

Abdelhady, H. U., Troy, C. D., Habib, A., Manish, R., 2022. A simple, fully automated shoreline detection algorithm for high-resolution multi-spectral imagery. *Remote Sensing*, 14(3), 557.

Angelini, R., Angelats, E., Luzi, G., Ribas, F., Masiero, A., 2024. Shoreline Extraction Methods from Sentinel-2 and PlanetScope Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1-2024, 1–6.

Boak, E. H., Turner, I. L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of coastal research*, 21(4), 688–703.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-V ázquez, J., Fernández-Sarría, A., 2019. Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean). *Science of the Total Environment*, 691, 216–231.

Pucino, N., Kennedy, D. M., Young, M., Ierodiaconou, D., 2022. Assessing the accuracy of Sentinel-2 instantaneous subpixel shorelines using synchronous UAV ground truth surveys. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113293.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., Sallenger, A. H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573-588.

Vos, K., Splinter, K., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E., Luijendijk, A., Calkoen, F., Almeida, L. et al., 2023. Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 345.

 Table 1. Date of reference orthomosaics and total displacement

 between S2 and PS data and reference shoreline.

Γ	Site	Reference	Total distance (m)	Total distance (m)	
		Date	S2 - Reference	PS - Reference	
Γ	CDF	25/05/2017	0.4	1.4	
Γ	FNG	05/04/2023	1.5	1.3	
	MRN	20/07/2019	0.3	1.5	

Table 2. Statistical characterization of the shoreline position error: results are reported for the best methodologies (index and method) for each date and site, distinguishing original (raw) shorelines and those with tidal and wave corrections (transl).

Site	Туре	Index	Method	MAD Bias		RMS					
				(m)	(m)	(m)					
Sentinel-2											
CDF	raw	NDWI	GMM	1.9	-0.9	2.5					
CDI	transl	NDWI	GMM	1.8	-0.5	2.4					
FNG	raw	MNDWI	K-means	3.2	0.2	4.2					
ING	transl	MNDWI	K-means	3.5	1.7	4.5					
MRN	raw	AWEIsh	K-means	5.1	-1.9	6.1					
WINN	transl	AWEIsh	K-means	4.9	-1.4	5.9					
PlanetScope											
CDF	raw	NIR	K-means	1.3	-0.7	1.7					
CDF	transl	NIR	K-means	1.9	1.5	2.9					
FNG	raw	NIR	K-means	2.0	-1.4	2.4					
ING	transl	NIR	K-means	1.7	-0.1	2.0					
MRN	raw	NDWI	GMM	2.4	-1.0	2.8					
IVIIVIN	transl	NDWI	GMM	2.1	0.4	2.4					



Figure 1. Study areas: a section of Llobregat Delta in front of Casteldefels (CDF) (Spain) in 1), the beaches of Marina di Grosseto (MRN) (Italy) and Feniglia (FNG) (Italy) in 2).



Figure 2. Visually results of FNG beach: a) show a general view and a zoom of the best method-index combination for S2 data, b) show a general view and a zoom of the best method-index combination for PS data.