© Autore/i 2025-Articolo sottoposto a revisione
© Author(s) 2025-Peer reviewed contribution

NUMERO SPECIALE DEL BOLLETTINO SIFET DEDICATO AL PREMIO "GIOVANI AUTORI"

A cura della Commissione del Premio "Giovani Autori", composta da:

Valeria Belloni (Sapienza Università di Roma)
Filiberto Chiabrando (Politecnico di Torino)
Manuel Garramone (Politecnico di Milano)
Valentina Girelli (Università di Bologna)
Lorenzo Teppati Losè (Politecnico di Torino)
Enrica Vecchi (Università di Cagliari)

Numero Speciale Premio "Giovani Autori"

Questo numero speciale del Bollettino SIFET raccoglie i contributi presentati nella VIII e nella IX Edizione del Premio Giovani Autori SIFET, svoltesi rispettivamente in occasione del 65° Convegno Nazionale SIFET (Arezzo, 27–29 settembre 2023) e della Conferenza Nazionale di Geomatica e Informazione Geografica ASITA 2024 (Padova, 9–13 dicembre 2024).

Il Premio Giovani Autori SIFET, giunto alla sua decima edizione in occasione del 66° Convegno Nazionale (Brindisi, 18-20 giugno 2025), si propone di valorizzare e dare visibilità alle ricerche sviluppate da studenti, assegnisti di ricerca, dottorandi, giovani ricercatori e professionisti emergenti nel campo della Geomatica, promuovendo la partecipazione attiva delle nuove generazioni alla comunità scientifica e favorendo la diffusione di approcci innovativi e interdisciplinari. Il presente numero speciale del Bollettino SIFET rappresenta una concreta testimonianza del ruolo della SIFET nel sostenere e incentivare la crescita scientifica, tecnica e professionale dei giovani studiosi e operatori del settore, contribuendo così in modo attivo al progresso della Geomatica in Italia.

La prima sezione di questo volume contiene i 17 contributi in formato *long paper* che hanno partecipato alla VIII edizione, mentre la seconda sezione è composta dai 15 *abstract estesi* che hanno partecipato alla IX edizione. I lavori presentati in questo numero speciale del Bollettino SIFET vedono l'impiego di svariate tecniche, dal rilievo topografico e fotogrammetrico al telerilevamento, con applicazioni che spaziano dalla conservazione e valorizzazione dei beni culturali al monitoraggio ambientale e infrastrutturale. Pur nella varietà dei temi trattati, i lavori condividono una comune attenzione alla robustezza metodologica, alla validazione dei dati e all'impatto applicativo delle soluzioni sviluppate, testimoniando l'elevato livello qualitativo della ricerca giovanile nel settore e la dinamicità e la continua evoluzione della disciplina della Geomatica.

Contributi vincitori – VIII Edizione, anno 2023

Per il settore "Formazione":

1° classificato

Glaciers change monitoring using optical satellite imagery: the case of Forni glacier, **Lorenza Ranaldi** e Valeria Belloni (Dipartimento Ingegneria civile, edile e ambientale, Sapienza Università di Roma), Mattia Crespi (Dipartimento Ingegneria civile, edile e ambientale, Sapienza Università di Roma; Scuola Superiore di Studi Avanzati, Sapienza Università di Roma)

2° classificati ex-aequo

Architetture complesse: un rilievo integrato e multifunzionale per la mappatura completa del Palazzo dell'Emiro, Kogon (Uzbekistan), **Lucrezia Gorgoglione**, Roberto Pierdicca, Eva Savina Malinverni (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche)

Analisi di stima sulla producibilità energetica e fotovoltaica di edifici civili situati in contesto urbano in QGIS, **Pietro Tagliariol**, Settore tecnico, scientifico, tecnologico, informatico e dei servizi generali, Università degli Studi di Udine

Per il settore "Ricerca":

1° classificato

Monitoraggio 4D ad alta frequenza di ghiacciai alpini tramite camere time-lapse a basso costo e Deep Learning Structure-from-Motion, **Francesco Ioli** e Livio Pinto, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Milano

2° Classificati ex-aequo

A review and test of shoreline extraction techniques, **Riccardo Angelini** (Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Firenze), Euard Angelats e Guido Luzi (Department of Signal Theory and Comunication (TSC), Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya)

Monitoraggio dei bacini idrici tramite Google Earth Engine: applicazione ad immagini Sentinel e Landsat, **Filippo Bocchino**, Roberta Ravanelli e Valeria Belloni (Dipartimento Ingegneria civile, edile e ambientale, Sapienza Università di Roma)

Quantificazione dell'umidità superficiale del suolo in aree agricole soggette ad elevata vulnerabilità climatica mediante dati Sentinel-1: il caso studio della regione Marche (Italia), **Benedetta Brunelli** (Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università di Modena e Reggio Emilia)

© Autore/i 2025-Articolo sottoposto a revisione
© Author(s) 2025-Peer reviewed contribution

Contributi vincitori – IX Edizione, anno 2024

Unico settore "Ricerca":

1° classificato

Machine Learning techniques applied to UAV imagery for macro-plastic detection in the fluvial environment, **Irene Cortesi** (Dipartimento di Storia, Colture, Civiltà, Università di Bologna), Andrea Masiero (Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova), Norbert Pfeifer (Department of Geodesy and Geoinformation, TU Wien

2° classificato

Mappatura della vegetazione ripariale attraverso DeepForest: Costi e Benefici di una nuova procedura operativa end-to-end, **Nicholas Fiorentini** (Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, Scuola di Ingegneria dell'Università di Pisa)

3° classificato

L'alluvione di maggio 2023 in Emilia-Romagna: monitoraggio delle colture con immagini satellitari, **Gabriele Esposito** e Roberta Ravanelli (Dipartimento Ingegneria civile, edile e ambientale, Sapienza Università di Roma)

L'area marina protetta di Porto Cesareo: un esempio per l'integrazione delle pratiche di rilievo fotogrammetrico nella pianificazione dello spazio marittimo per la tutela dell'Underwater Cultural Heritage (UCH)

Federica Gerla [1], Alberto Bonora [2]

[1] Sapienza Università di Roma || Università Iuav di Venezia – fgerla@iuav.it
[2] Sapienza Università di Roma || Università Iuav di Venezia – abonora@iuav.it

Keywords: Underwater cultural heritage, patrimonio sommerso, pianificazione dello spazio marittimo (MSP), fotogrammetria subacquea

L'Underwater Cultural Heritage (UCH) rappresenta una componente fondamentale delle risorse culturali e paesaggistiche degli spazi costieri e marittimi, includendo siti archeologici sommersi, antiche infrastrutture costiere e paesaggi storici legati a cambiamenti del livello del mare e delle dinamiche costiere (Depellegrin et al., 2019). Questo patrimonio non rinnovabile è essenziale per preservare il valore storico, culturale e scientifico ma la sua gestione è spesso ostacolata da lacune nei dati disponibili e dalla necessità di strumenti specifici per la documentazione e la protezione (Ramieri et al., 2024). La valorizzazione di queste risorse contribuisce non solo alla comprensione della storia, ma anche alla promozione del turismo sostenibile e alla Blue Economy, evidenziando la necessità di approcci innovativi per garantirne la tutela (Barianaki et al., 2024).

La Pianificazione dello spazio marittimo (MSP) è uno strumento strategico di gestione, il quale mira a bilanciare obiettivi economici, ecologici e socio-culturali (Fiorini et al, 2016). Nel contesto italiano, il patrimonio sommerso è integrato come elemento centrale nelle unità di pianificazione, definendo vocazioni d'uso del mare compatibili con la tutela culturale.
L'integrazione dell'UCH nella pianificazione dei contesti marittimi rappresenta una priorità per garantire una gestione bilanciata tra tutela culturale e altre attività marittime. Grazie all'uso di tecnologie avanzate e processi partecipativi, è possibile favorire un approccio integrato che combina conservazione e sviluppo sostenibile, trasformando il patrimonio culturale sommerso in un pilastro della pianificazione marittima (Koutsi et al., 2022).
In tale contesto, la mappatura diventa uno strumento essenziale per identificare l'UCH da proteggere e integrare nei processi pianificatori, diventando uno strumento fondamentale per supportare la conservazione a lungo termine e la gestione sostenibile di questi beni culturali (Papageorgiou, 2018; Lees et al., 2023).

Nonostante i progressi, l'integrazione dell'UCH nel MSP è limitata da importanti lacune. La mancanza di dati completi e armonizzati, insieme alla difficoltà di mappare e quantificare tali valori culturali, ostacola una piena integrazione nei processi decisionali. Gli approcci mediante strumenti digitali migliorano la raccolta e l'organizzazione dei dati, ma rimangono sfide significative. Il Maritime Cultural Heritage (MCH) è spesso sottorappresentato nel MSP a causa di difficoltà nella definizione, mappatura e assegnazione di valori culturali ai processi di pianificazione (Lehtimäki, 2020).

Superare queste difficoltà richiede investimenti in tecniche consolidate ma non sempre integrate alla disciplina della pianificazione, come la fotogrammetria subacquea, per la documentazione e la mappatura. Questo approccio non solo favorirebbe una maggiore protezione e valorizzazione del patrimonio sommerso, ma potrebbe anche promuovere modelli replicabili per la gestione sostenibile delle risorse marine.

Mediante l'esperienza della Sunrise Summer School *"Seashore and UNderwater documentation of aRchaeological herItage palimpSests and Environment"* di SIFET, è stato possibile accedere all'Area Marina Protetta (AMP) di Porto Cesareo [Fig. 1], situata lungo la costa ionica della Puglia, e che rappresenta un contesto dinamico per lo studio della conservazione del patrimonio subacqueo. A circa 30 km da Lecce, l'area è nota per il suo ricco patrimonio archeologico, con testimonianze che vanno dall'Età del Bronzo a epoche romane e medievali.

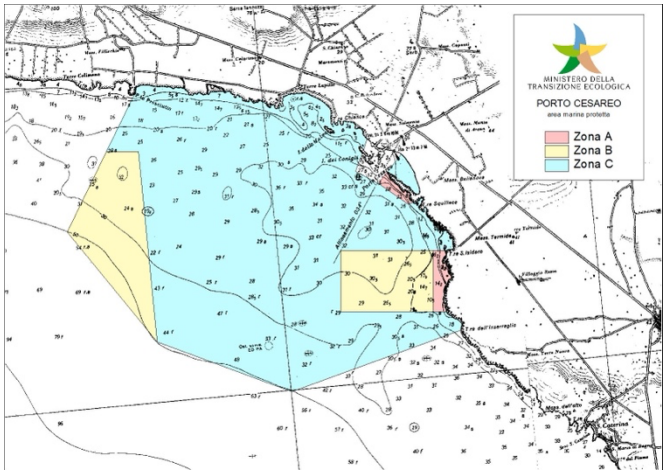


Figura 1 - AMP di Portocesareo, zonizzazione (Zona A: riserva integrale, Zona B: riserva generale, Zona C: riserva parziale) fonte: MASE

Tra i reperti più significativi si trovano i resti di colonne monolitiche in marmo, lunghe 8,5-8,8 metri e con un peso totale di 78 tonnellate, giacenti a 4,5 metri di profondità nelle acque antistanti *Torre Chianca,* avamposto militare del sedicesimo secolo [Fig 2]. Questi reperti, derivanti dal naufragio di una nave romana lapidaria, costituiscono marker fondamentali per lo studio dell'evoluzione del paesaggio costiero (Alfonso et al., 2012; Picciolo et al., 2022).

L'esperienza della Summer School ha quindi offerto l'opportunità di applicare tecniche fotogrammetriche nell'area, configurandosi come un test pilota per l'integrazione di tali metodologie nella documentazione e gestione del patrimonio sommerso.
La fotogrammetria subacquea è una tecnica avanzata e non invasiva utilizzata per documentare e modellare in 3D siti archeologici sommersi (Drap, 2012; Balletti, 2015).
Data la profondità del sito archeologico (4.5 metri) è stato possibile posizionare i GCP e acquisire la loro posizione mediante sistema GNSS (*Rover RTK GNSS Leica GS18 T*). In seguito sono state acquisite le immagini secondo le modalità tradizionali della fotogrammetria. Le strisciate fotogrammetriche del sito subacqueo sono state registrate mediante fotocamere *GoPro 10* e *Olympus EM1 mark II*, montate su custodie subacquee con configurazioni specifi-

-che per compensare le distorsioni ottiche e gestire le variazioni di illuminazione.

Figura 2- Vista dall'alto dell'area studio e di Torre Chianca (acquisizione tramite DJI Mavick 3M)

Le immagini vengono catturate con sovrapposizioni del 60% tra fotogrammi e del 20% tra strisciate, garantendo la costruzione del blocco fotogrammetrico e una base ottimale per la ricostruzione tridimensionale. L'orientamento dei fotogrammi per la costruzione del modello e la restituzione fotogrammetrica è avvenuta in *Agisoft Metashape* ottenendo una nuvola di punti densa [Fig 3]. Successivamente sono state ricavate ortofoto utili per le successive analisi [Fig 4].

Figura 3 – Point cloud - elaborazione in Agisoft Metashape

Tali modelli digitali possono infatti risultare di fondamentale importanza per una documentazione sufficientemente accurata e la conservazione e gestione del MCH, che si sposa con la gestione delle aree marine protette.
Tali elementi puntuali possono inoltre rappresentare un'informazione cardine all'interno di un sistema informativo territoriale dettagliato per il supporto al MSP, il quale tenta di regolare aree di per sé molto omogenee come quelle marine, implementando il patrimonio conoscitivo in merito agli usi dello stesso, come, in questo caso, quello turistico. L'approssimazione di tali siti come elementi puntuali all'interno di un quadro conoscitivo che riguarda l'ampia scala marittima merita infatti, mediante sistemi informativi a piramide, un opportuno livello di accuratezza

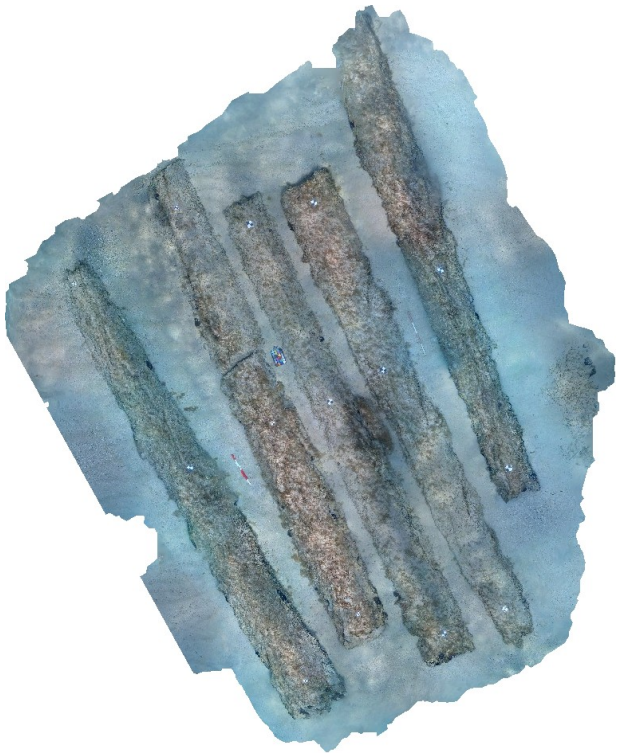


Figura 4 - Ortofoto delle colonne (5 mm/pix) elaborazione in Agisoft Metashape

per testimoniare l'importanza di taluni e garantire un catalogo dettagliato in grado di orientare strategie ed azioni della pianificazione marittima. (Balletti et al., 2015; Calantropio et al., 2024)
Il rilievo nel contesto dell'AMP di Porto Cesareo, effettuato con strumenti di acquisizione e posizionamento relativamente accessibili nel mercato, può rappresentare una buona prassi per un livello di accuratezza minima da cui partire per garantire opportuni dati conoscitivi relativamente ai siti subacquei, contesti in cui i dati spesso non sono sistematici o completi e dove qualità ed accuratezza sono caratteristiche spesso molto trascurate (Lehtimäki et al., 2020).
L'approccio testato permette di contestualizzare siti sommersi specifici in un quadro più ampio, fornendo un livello di dettaglio necessario per orientare strategie e azioni di pianificazione marittima. La tecnica adoperata si conferma una buona pratica per la documentazione scientifica, la conservazione e la valorizzazione del MCH.
Il test nell'AMP di Porto Cesareo rappresenta quindi un modello replicabile per l'applicazione pratica di approcci innovativi. I prossimi possibili sviluppi includono l'estensione di queste metodologie ad altri siti subacquei. Un elemento chiave per il futuro sarà pertanto la standardizzazione di metodologie e protocolli per garantire l'interoperabilità dei risultati su scala globale.

References

Alfonso, C., Auriemma, R., Scarano, T., Mastronuzzi, G., Calcagnile, L., Quarta, G., & Di Bartolo, M. (2012). Ancient coastal landscape of the marine protected area of Porto Cesareo (Lecce, Italy): Recent research. *Underwater Technology, 30*(4), 207-215. https://doi.org/10.3723/ut.30.207

Balletti, C., Beltrame, C., Costa, E., Guerra, F., & Vernier, P. (2015, June). Photogrammetry in maritime and underwater archaeology: Two marble wrecks from Sicily. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology V* (Vol. 9527, pp. 127-138). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2185244

Barianaki, E., Kyvelou, S. S., & Ierapetritis, D. G. (2024). How to incorporate cultural values and heritage in maritime spatial planning: A systematic review. *Heritage, 7*(1), 380-411. https://doi.org/10.3390/heritage7010026

Calantropio, A., Menna, F., Skarlatos, D., Balletti, C., Mandlburger, G., Agrafiotis, P., ... & Nocerino, E. (2024). Under and through water datasets for geospatial studies: The 2023 ISPRS scientific initiative “NAUTILUS”. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 10*, 33-40. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-33-2024

Depellegrin, D., Venier, C., Kyriazi, Z., Vassilopoulou, V., Castellani, C., Ramieri, E., ... & Barbanti, A. (2019). Exploring Measurement Techniques (pp. 70-82). Firenze University Press. https://doi.org/10.36253/978-88-5518-113-4

Drap, P. (2012). Underwater photogrammetry for archaeology. In *Special Applications of Photogrammetry* (pp. 114-136). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/22847

Fiorini, M., Capata, A., & Bloisi, D. D. (2016). AIS data visualization for maritime spatial planning (MSP). *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, 5*, 45-60. https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.12.004

Koutsi, D., & Stratigea, A. (2022, July). Locus of underwater cultural heritage (UCH) in maritime spatial planning (MSP): A data-driven, place-based and participatory planning perspective. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 686-702). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10524-0_52

Lees, L., Karro, K., Barboza, F. R., Ideon, A., Kotta, J., Lepland, T., ... & Aps, R. (2023). Integrating maritime cultural heritage into maritime spatial planning in Estonia. *Marine Policy, 147*, 105337. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105337

Lehtimäki, M., Tikkanen, S., & Tevali, R. (Eds.). (2020). *Integrating cultural heritage into maritime spatial planning in the Baltic Sea Region*. BalticRIM Project. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44440-5

Papageorgiou, M. (2018). Underwater cultural heritage facing maritime spatial planning: Legislative and technical issues. *Ocean & Coastal Management, 165*, 195-202. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.08.017

Picciolo, A., Auriemma, R., Fai, S., Coluccia, L., Antonazzo, A., & Buccolieri, C. (2022, December). Use of mixed study techniques in the evaluation of coastline dynamics—the “Porto Cesareo” MPA case of study. In *Ninth International Symposium "Monitoring of Mediterranean Coastal Areas: Problems and Measurement Techniques* (pp. 70-82). Firenze University Press. https://doi.org/10.36253/978-88-5518-113-4

Ramieri, E., Bocci, M., Brigolin, D., Campostrini, P., Carella, F., Fadini, A., ... & Barbanti, A. (2024). Designing and implementing a multi-scalar approach to maritime spatial planning: The case study of Italy. *Marine Policy, 159*, 105911. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105911

© Autore/i 2023-Articolo sottoposto a revisione
© Author(s) 2023-Peer reviewed contribution

AltCA3D: UN SISTEMA INTEGRATO GIS-BIM PER I DATI ARCHEOLOGICI. IL CASO STUDIO DI ALTINO (VE)

Eleonora Delpozzo [1]

[1] Università Ca' Foscari di Venezia, Venice, Italy – eleonora.delpozzo@unive.it

KEY WORDS: GIS, BIM, Digital Archaeology, Cultural Heritage, Roman Archaeology.

1. INTRODUZIONE

L'integrazione di strumenti GIS in ambito archeologico è ormai una pratica consolidata, dimostratasi estremamente efficace per la gestione dei vari tipi di dati che vengono acquisiti ed elaborati nelle diverse fasi della ricerca. Al contempo, la maggior diffusione delle tecniche di rilievo 3D consente ormai la registrazione di dati metrici sempre più accurati e precisi in tempi notevolmente ridotti. Proprio perché si osserva una tendenza verso una documentazione fortemente connotata dalla sua componente tridimensionale, alcuni progetti sperimentali stanno testando le potenzialità dell'uso del BIM (Building Information Modeling) in archeologia.
Il progetto qui presentato mira a congiungere questi due strumenti, sviluppando un sistema integrato per gestire e studiare dati archeologici in grado di sfruttarne pienamente il potenziale informativo e integrando pienamente la terza dimensione nei vari step del processo grazie alla connessione tra GIS e BIM.
Il sito selezionato come caso studio è quello della città romana di Altino (Quarto d'Altino, Venezia), che riveste un particolare interesse per l'archeologia romana in quanto uno dei pochissimi contesti nell'Italia Settentrionale che non conosce continuità di vita dopo l'età tardoantica. L'obiettivo, dunque, era quello di creare un sistema informativo completo e aperto che costituisse innanzitutto una carta archeologica digitale aggiornabile nel tempo, e uno strumento di ricerca tramite cui formulare ipotesi e testare ricostruzioni del paesaggio antico.

2. METODOLOGIA

La metodologia BIM, com'è noto, è stata sviluppata per rispondere alle esigenze del settore delle costruzioni, tramite modelli tridimensionali arricchiti semanticamente che permettono di raccogliere e gestire informazioni lungo tutto il ciclo di vita dell'opera. Tale approccio, in seguito, è stato applicato anche al costruito storico, per il quale si utilizza l'acronimo HBIM (Historic Building Modeling). Negli ultimi anni, si è cercato di verificarne le potenzialità in ambito archeologico, nonostante le evidenti difficoltà nell'adattarlo a contesti incompleti e spesso unici nel loro genere (Diara e Rinaudo, 2021; Saricaoglu e Saygi, 2022 con bibliografia precedente).
Riprendendo una distinzione proposta da Saygi e Remondino (Saygi e Remondino, 2013), si possono distinguere i modelli BIM in *as-design BIM*, relativi a strutture di nuova costruzione, e *as-built BIM*, che identifica invece edifici e contesti già esistenti e rappresentati nel loro attuale stato di conservazione (HBIM). Tuttavia, alla luce di una revisione della letteratura, si ritiene necessario introdurre una terza distinzione, specifica per i casi di edifici ricostruiti sulla base di ipotesi fondate su dati storici e/o archeologici (*as-reconstructed BIM*).
Di pari passo con la crescente popolarità del BIM, è aumentata anche la richiesta di un'efficace integrazione con gli strumenti GIS. Sono stati fatti alcuni tentativi di creare una connessione tra progetti GIS su scala paesaggistica e modelli HBIM di singoli edifici (Matrone et al., 2019; Rechichi, 2020), ma solo negli ultimi anni tale integrazione sta venendo testata in ambito archeologico.
Alla luce di quanto emerso, dunque, è stato elaborato un framework in ambiente open source combinando queste due tecnologie (Figura 1).

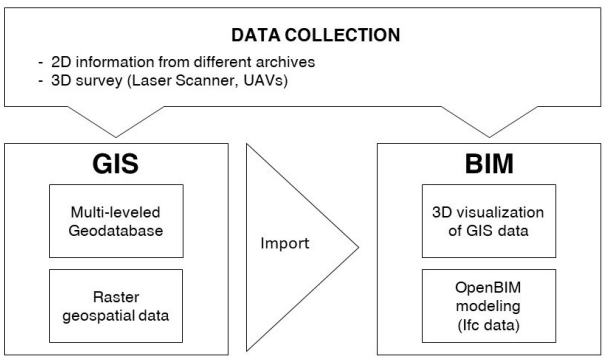


Figura 1. Schema concettuale del progetto.

La componente GIS del progetto, sviluppata in QGIS, gestisce tramite un geodatabase la mappa archeologica della città, inclusi i dati di scavo e le informazioni di telerilevamento. Questi possono essere poi importati nel software di modellazione 3D Blender, senza perdita di dati e mantenendone la georeferenziazione (tramite BlenderGIS). In questo ambiente, l'uso di un add-on (Bonsai) consente la ricostruzione virtuale dei siti in formato OpenBIM nativo. Nella fase attuale dello sviluppo del sistema, ci si è concentrati unicamente sulla creazione di modelli *as-reconstructed BIM* di alcuni dei principali contesti indagati, ma non si esclude in futuro di inserire anche modelli *as-built BIM* utili alla gestione e manutenzione delle evidenze ancora conservate *in situ*.
Tale piattaforma è stata pensata prevedendo diverse tipologie di utenti finali (ricercatori, funzionari, professionisti, studenti), pertanto è stata implementata una struttura modulare per garantire l'usabilità in base al livello di competenza tecnica.

3. CASO STUDIO: LA CITTÀ ROMANA DI ALTINO

Il sistema così costituito è stato dunque testato sul sito di Altino, circoscrivendo il periodo di interesse all'età romana che ne rappresenta il momento di massima espansione urbana. Benché già oggetto di indagine dalla fine dell'Ottocento, ad oggi la maggior parte dei dati archeologici noti provengono dagli scavi svolti presso le necropoli periurbane (Tirelli, 2011) e dal

telerilevamento (Ninfo et al., 2009). Negli ultimi decenni del secolo scorso, inoltre, due importanti campagne di scavo hanno portato alla luce la monumentale porta-approdo presso il limite urbano settentrionale e il quartiere residenziale di impianto augusteo, entrambi oggi aree archeologiche visitabili.
La prima fase dell'implementazione della Carta Archeologica di Altino 3D (AltCA3D) ha previsto la raccolta dati, svolta prevalentemente presso l'archivio del Museo Archeologico di Altino, i cui documenti relativi a scavi e ricerche nel territorio sono stati digitalizzati.
Le due aree archeologiche già menzionate, invece, sono state oggetto di una campagna di rilievo 3D realizzata dal Laboratorio di Geomatica CIRCE dell'Università Iuav di Venezia integrando fotogrammetria aerea da SAPR, rilievo laser scanning e appoggio topografico (Balletti e Delpozzo, 2021).
Una volta raccolti e elaborati questi dati, sono stati inseriti nella piattaforma GIS, mappando dettagliatamente i rinvenimenti archeologici e le tracce da fotointerpretazione (Figura 2).

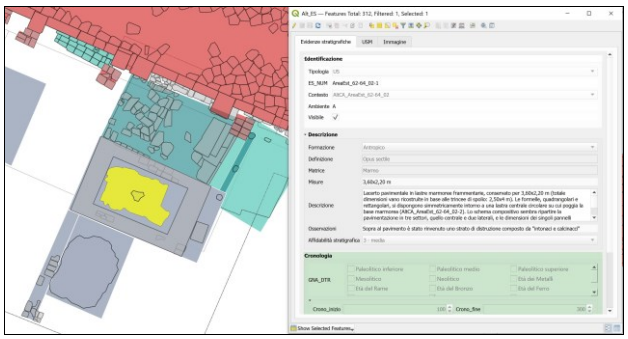


Figura 2. Screenshot del geodatabase in QGIS.

La successiva fase di importazione dei dati nel software di modellazione 3D ha previsto una selezione degli stessi per questioni di fruibilità e testing dell'applicativo. In particolare, sono stati importati in Blender i file vettoriali e i modelli 3D relativi alle due aree archeologiche, oltre che alcuni dati sull'area urbana in generale.
In questo ambiente sono stati costruiti due modelli *as-reconstructed BIM*, elaborati a partire dai dati metrici estratti dai rilievi sul campo. Le ipotesi sono state arricchite da un set specifico di attributi, associabile a ogni singolo elemento dell'edificio, in grado di fornire indicazioni dettagliate riguardo il processo e l'affidabilità della ricostruzione virtuale. Tra le informazioni presenti, figura anche un archivio di documenti relativi ai confronti utilizzati per sviluppare le ipotesi (Figura 3).

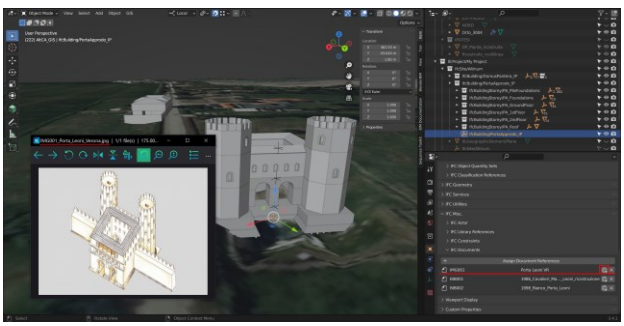


Figura 3. L'ambiente 3D con le ipotesi ricostruttive dei monumenti e i documenti ad esse associati.

4. CONCLUSIONI

I modelli *as-reconstructed BIM* si sono dimostrati strumenti efficaci per realizzare ricostruzioni virtuali "intelligenti", in cui ogni elemento è semanticamente collegato agli altri e associato a una serie di informazioni, comprese quelle relative allo stesso processo di ricostruzione. Utilizzato in integrazione con uno strumento consolidato come il GIS, l'ambiente virtuale non si limita ad essere utilizzato per la visualizzazione, ma diventa un "laboratorio di ricerca digitale" utile anche ad analizzare dati, eseguire simulazioni e analisi strutturali, testare ipotesi, ecc. Una delle linee di ricerca in corso di indagine, ad esempio, riguarda la possibilità di utilizzare i modelli ricostruttivi di alcuni edifici per calcolare costi e tempi impiegati nella loro costruzione. Entrambi gli strumenti, infine, possono essere variamente sfruttati per la valorizzazione dei siti.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la direzione e il personale del Parco Archeologico di Altino per la collaborazione.

BIBLIOGRAFIA

Balletti, C., Delpozzo, E., 2021. Digitizing to Re-discover: the case study of the Roman City-Gate in *Altinum*, Italy. In: J.L. Lerma, M. Cabrelles (eds.), *Proceedings of the ARQUEOLÓGICA 2.0 - 9th International Congress & 3rd GEORES - GEOmatics and pREServation, Editorial Universitat Politècnica de València,* 550-554. doi.org/10.4995/arqueologica9.2021.13259

Diara, F., Rinaudo, F., 2021. ARK-BIM: Open-Source Cloud-Based HBIM Platform for Archaeology. *Appl. Sci.*, 11, 8770. doi.org/10.3390/app11188770

Matrone, F., Colucci, E., De Ruvo, V., Lingua, A., Spanò, A. 2019. HBIM in a semantic 3D GIS database. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 857-865. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-857-2019

Ninfo, A., Fontana, A., Mozzi, P., Ferrarese, F., 2009. The map of Altinum, ancestor of Venice. *Science*, 325, 577. doi.org/10.1126/science.1174206

Rechichi, F., 2020. Chimera: a BIM+GIS system for Cultural Heritage. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B4-2020, 493-500. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-493-2020

Saricaoglu, T., Saygi, G. 2022. Data-driven conservation actions of heritage places curated with HBIM. *Virtual Archaeol. Rev.*, 13.27, 17-32. doi.org/10.4995/var.2022.17370

Saygi, G., Remondino, F., 2013. Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-art and Future Perspectives. *Int. J. Herit Digit. Era*, 2.4, 695-713. doi.org/10.1260/2047-4970.2.4.695

Tirelli, M., 2011. *Altino Antica: dai Veneti a Venezia*. Marsilio, Venezia.

Analisi di stima sulla producibilità energetica fotovoltaica di edifici civili situati in un contesto urbano in QGIS

Pietro Tagliariol

Laureato in Tecniche dell'Edilizia e del Territorio presso l'Università degli Studi di Udine, tagliariolpietro@hotmail.it

Parole chiave: QGIS, Analisi del Terriotrio, Fotovoltaico, Stima Producibilità Energetica

Key words: QGIS, Territory Analysis, Photovoltaics, Energy Productivity Estimation

Abstract

QGIS è un software geospaziale open source che offre innumerevoli funzioni per eseguire analisi sul territorio, ed è per questa ragione che attraverso di esso si è scelto di svolgere un'indagine nel campo delle fonti rinnovabili per la produzione di energia pulita, utilizzando gli open data del database cartografico della Regione Friuli Venezia Giulia. Il presente lavoro ha lo scopo di illustrare come avviene l'elaborazione dell'analisi mirata a determinare la stima della produzione di energia elettrica annua che potrebbe offrire un determinato impianto fotovoltaico se installato sulle coperture di edifici civili situati in un contesto urbano. Per ottenere questa stima ci si è focalizzati sulle proprietà geometriche che caratterizzano gli elementi edilizio-architettonici degli immobili, quali la pendenza e l'orientamento delle superfici che compongono la copertura e dalla quale dipende la loro esposizione solare nell'arco temporale di un intero anno. In seguito, sono stati applicati i dati ricavati dal simulatore *Photovoltaic Geographical Information System* impostando i parametri di uno specifico impianto solare a pannelli fotovoltaici. Si è così riuscito a determinare, per ogni superficie di copertura degli edifici del territorio in esame, una stima della quantità di energia annua che l'impianto selezionato avrebbe potuto generare.

QGIS is an open source geospatial software that offers countless functions to perform analysis on the territory, and it is for this reason that through it we have chosen to carry out an investigation in the field of renewable sources for clean energy production, using the open data of the cartographic database of the Friuli Venezia Giulia Region. The purpose of this paper is to illustrate how the elaboration of the analysis aimed at determining the estimated annual electricity production that a given photovoltaic system could offer if installed on the roofs of civil buildings located in an urban context takes place. To obtain this estimate, we focused on the geometric properties that characterize the architectural elements of the buildings, such as the slope and orientation of the surfaces that make up the roof and on which their solar exposure over the time span of an entire year depends. Then, data obtained from the Photovoltaic Geographical Information System simulator were applied by setting the parameters of a specific solar panel system. Thus, it was possible to determine, for each area of building coverage in the area under consideration, an estimate of the amount of annual energy that the selected system would be able to generate.

1. Introduzione

Di fronte all'obiettivo di conseguire una transizione energetica il più rapida possibile, le istituzioni stanno proponendo incentivi finalizzati a coinvolgere la collettività nella produzione di energia pulita derivante da fonti rinnovabili sostenibili, come l'energia solare. Ciò, unito al desiderio morale di impegnarsi nel contribuire al raggiungimento di un sufficiente grado di sostenibilità energetica in futuro, porta sempre più persone a valutare concretamente l'opportunità economica che può offrire l'installazione di impianti alimentati ad energia solare. La realizzazione di tali impianti, però, prevede che siano soddisfatte in fase di progettazione alcune condizioni di carattere tecnico per determinare il raggiungimento di un livello di produttività adeguato. Si propone, quindi, un'analisi svolta sul territorio che possa fornire, per ogni edificio civile presente nell'area esaminata, una stima della producibilità energetica annua che uno specifico impianto può offrire. La presente indagine si svolge all'interno del software geospaziale open source QGIS e le informazioni spaziali impiegate sono liberamente consultabili e usufruibili dalla banca dati cartografica della Regione Friuli Venezia Giulia. La seguente elaborazione è stata eseguita considerando l'installazione di uno specifico impianto fotovoltaico, i cui dati relativi alla producibilità sono stati attinti dal simulatore *Photovoltaic Geographical information System* (PVGIS). Premesso, quindi, che il processo che verrà illustrato di seguito può essere emulato da chiunque, a patto che si disponga delle conoscenze tecniche ed informatiche necessarie; si desidera spostare l'attenzione sui criteri di natura immutabile su cui si basa l'analisi: la pendenza e l'orientamento delle superfici che compongono le coperture. Essa, infatti, prevede che la stima sia determinabile solamente dopo aver definito le proprietà geometriche che caratterizzano gli elementi edilizi e architettonici degli immobili, individuando i relativi angoli zenitali e azimutali, l'ampiezza delle superfici e la presenza di elementi che possono rappresentare un ostacolo all'installazione di un impianto.

Per svolgere l'indagine, si sono resi necessari i dati vettoriali della Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) e i dati raster dei modelli digitali di elevazione delle superfici, o *digital surface model* (DSM), e delle ortofoto. La CTRN ha lo scopo di definire i contorni delle aree entro le quali considerare i dati altimetrici del modello digitale di elevazione, i quali rappresentano la risorsa necessaria e indispensabile per lo sviluppo dell'elaborazione di seguito descritta. L'uso delle ortofoto, invece, consente di osservare il reale contesto dei dati spaziali del territorio permettendo di decifrarne più agevolmente il loro significato.

Una volta spiegato il processo messo in atto, si descriveranno i risultati raggiunti più rilevanti e selezionati in base alla numerosità di casi simili riscontrati, alla loro peculiare rappresentazione o all'entità della produzione energetica stimata.

2. Elaborazione dei dati

2.1 Considerazioni iniziali

Viste le possibili applicazioni di uno strumento come QGIS, si è scelto di realizzare con esso un'analisi effettuabile con l'impiego dei dati contenuti nel database cartografico della Regione Friuli Venezia Giulia usufruibili al pubblico in modo totalmente gratuito. Il territorio su cui è stata eseguita l'indagine consiste in una zona del centro di Udine che si estende per circa 1,4 km^2, all'interno di un quadrante i cui lati misurano rispettivamente 840 m e 1620 m.
Si è scelto di svolgere la seguente indagine perché tratta un argomento di grande interesse pubblico, come la sostenibilità ambientale attraverso lo sfruttamento di energia pulita da fonti rinnovabili, e perché può rappresentare un mezzo utile ad effettuare analisi più approfondite da parte di aziende che si occupano della commercializzazione di impianti fotovoltaici o di pannelli solari, modificando i parametri impiegati o integrando nuovi dati più specifici.
L'analisi che si andrà ad illustrare di seguito ha come obiettivo l'individuazione della predisposizione delle coperture, situate in un contesto urbano, ad ospitare un impianto fotovoltaico e la stima della quantità di energia che esso può offrire attraverso l'analisi delle caratteristiche geometriche della superficie sulla quale potrà essere posato. Per fare ciò, si sono posti in relazione tra loro la pendenza e l'orientamento delle superfici di copertura in quanto costituiscono il fattore principale ed immutabile nei progetti di installazione di impianti alimentati ad energia solare. Dunque, la stima ricercata considererà solamente la variabilità dell'energia elettrica cumulabile in un anno da un determinato impianto in base alle caratteristiche architettoniche degli immobili e non ulteriori parametri di natura variabile come le condizioni meteorologiche, il reale bisogno dell'utenza o la capacità strutturale di un edificio civile.
Lo scopo ultimo di questo elaborato è quello di realizzare una mappa digitale in grado di evidenziare a colpo d'occhio le coperture più adatte ad assorbire le radiazioni solari e, quindi, a fornire la maggior produzione annua di elettricità di un impianto alimentato ad energia pulita. Per svolgere questa attività verranno impiegati algoritmi della libreria digitale GDAL e funzioni di GRASS GIS, presenti nel software QGIS in quanto appartenenti alla Open Source Geospatial Foundation e distribuiti con licenza libera.
I parametri che influenzano la soddisfazione, o meno, di questi bisogni si differenziano in base al contributo energetico che generano, sottoforma di acqua calda sanitaria o di elettricità. A fronte di ciò, si è optato per sviluppare l'elaborazione considerando una sola tipologia d'impianto, quello fotovoltaico, e da esso si sono definite le rispettive condizioni che influiscono sul suo livello di produttività. Dunque, si sono considerate ottimali quelle condizioni che con più frequenza si ricercano nel momento in cui si progetta la realizzazione di impianti fotovoltaici in copertura. Prime fra tutte l'orientamento a sud della falda, in quanto permette alla superficie di essere esposta ai raggi del sole per un maggior lasso di tempo durante la giornata. Per quanto riguarda la pendenza, invece, si sono distinti i tetti piani da quelli inclinati considerando i primi migliori in quanto più facilmente predisposti all'installazione dell'inseguitore solare automatico, un dispositivo meccanico in grado di ruotare il piano dei pannelli in base alla direzione dei raggi del sole variandone la pendenza al susseguirsi delle stagioni e l'orientamento durante il giorno. Ne consegue che la capacità di assorbimento delle radiazioni solari, lungo l'intero arco di tempo compreso in un anno, risulti maggiore rispetto a quella di un impianto installato in modo complanare ad una falda inclinata e orientata in una determinata direzione.
Un dato geografico da tenere da conto in un'analisi di questo tipo è quello della latitudine del territorio di competenza, che influenza il grado ottimale di inclinazione di un impianto ad energia solare. Indicativamente, maggiore è la latitudine della zona indagata maggiore dovrà essere la pendenza del pannello. Per determinare il grado di inclinazione ottimale, per tutte quelle superfici non piane, si è fatto uso dell'applicazione web PVGIS, che ha individuato l'angolo di 38° come il migliore per la zona di Udine. PVGIS, è un simulatore interattivo in grado di restituire una stima della producibilità media di un impianto fotovoltaico in base alle sue specifiche tecniche, alla sua geometria e alla posizione geografica in qui questo è collocato.
Con l'ausilio di questi strumenti e tenendo conto delle considerazioni descritte, si illustra nel dettaglio la fase operativa che ha permesso di raggiungere lo scopo prefissato.

2.2 Raccolta dei dati

I dati di partenza per l'esecuzione dell'elaborato sono stati ricavati dalla piattaforma web EAGLE.FVG. In primis, si è ricercato il dato vettoriale della CTRN che contiene l'insieme delle aree che formano il contesto urbano della città di Udine, rappresentando sia gli elementi di carattere morfologico che antropico. Dunque, al suo interno non sono riportati unicamente le aree del conglomerato edilizio, ma vi sono anche quelle attinenti alla vegetazione, all'orografia e all'idrografia.
Di seguito, dal medesimo WebGIS, si sono ottenuti i dati raster provenienti dai rilievi LiDAR e di fotogrammetria aerea più recenti, quelli effettuati tra il 2017 e il 2020. Tra questi si sono selezionati le ortofoto con dimensione del pixel a terra di 10 cm e i modelli digitali di elevazione delle superfici di passo pari a 0,50 m, precisione ottenuta a seguito del rilievo effettuato eseguendo una scansione del territorio in grado di restituire una nuvola di punti con una densità di 16 punti per m^2. Per quanto riguarda i modelli altimetrici scaricati, si è scelto di svolgere l'intero processo sui modelli di elevazione delle superfici, e non sul *Digital Building Model*, per evidenziare quegli elementi che possono costituire un fattore di impedimento alla realizzazione dell'impianto, come per esempio lucernari e comignoli, o di ombreggiamento, ad esempio alberi aventi un'altezza maggiore di quella della copertura del fabbricato. Si è scelto di comprendere nell'elaborato anche le ortofoto per rendere più chiaro il reale contesto in cui si avrebbe operato e per poter disporre di uno strumento per una prima valutazione dell'attendibilità dei dati che si andranno a realizzare.
All'interno del software si è operato con il sistema di riferimento cartografico RDN2008/TM33, codificato come EPSG6708, e in esso è stata eseguita automaticamente la georeferenziazione dei dati importati.

2.3 Filtraggio dei dati e ritaglio dei raster

Come prima cosa, è necessario filtrare alcuni dati contenuti nel layer vettoriale dedicato alle aree del demanio che non sono adeguati al fine dell'elaborazione. Siccome l'analisi riguarda le coperture del costruito in contesto urbano, si deve andare ad eliminare tutti quegli elementi che non ricadono all'interno dell'estensione del raster e che, già in un primo momento, non sono idonei all'installazione degli impianti considerati. Nel presente caso sono state rimosse le aree pertinenti la vegetazione, l'orografia, l'idrografia, gli impianti, gradinate o altre opere di carattere meramente urbano, conservando in questo modo solamente le aree destinate agli edifici civili. La rimozione di tali elementi non è stata complessa in quanto il vettore conteneva già al suo interno una doppia classificazione delle aree rappresentate

che descriveva la funzione primaria e secondaria che ognuna di esse svolgeva.
Si sarebbe potuto sfoltire ulteriormente il numero di campioni considerati andando ad escludere dall'analisi anche quelle strutture classificate come edifici civili, ma ricadenti nella sottocategoria degli edifici di culto che contribuiscono a valorizzare il patrimonio artistico, storico e culturale della città di Udine. Nonostante ciò, si è deciso di conservarli per avere modo di osservare come queste superfici avrebbero risposto ai programmi di QGIS, quindi per poter disporre del maggior quantitativo di informazioni possibili.
Successivamente, si effettua il ritaglio dei *Digital Elevation Model* (DEM) per ottenere dei nuovi raster che contengano solamente i pixel che rientrano all'interno delle aree del vettore. Per eseguire quest'azione si è fatto uso della funzione *ritaglia raster con maschera*, disponibile tra gli strumenti di processing di GDAL disponibili in QGIS, in cui viene richiesto di selezionare il raster da ritagliare e il vettore i cui elementi ne faranno da contorno. Si genera così un nuovo raster con solo i pixel le cui coordinate planimetriche del loro centro ricadono all'interno dei poligoni precedentemente identificati come edifici.
Durante questa fase si sono verificati degli errori nell'esecuzione dell'algoritmico che non hanno permesso di ritagliare alcune immagini in modo immediato, ma è stato necessario rieseguire l'operazione di ritaglio in tre step andando a selezionare come poligoni di maschera solo alcuni degli elementi contenuti nell'estensione del raster. Si ipotizza che l'errore sia dovuto ad un'incerta definizione geometrica dei perimetri di edifici adiacenti causandone la probabile intersecazione o sovrapposizione, le quali non permettevano all'algoritmo di ricollocare il pixel all'interno di un'area rispetto ad un'altra.

2.4 Determinazione pendenza e orientamento

Sui DEM appena ricavati, si è applicato l'algoritmo *r.slope.aspect* di GRASS GIS (Liscia et al. 2014), il quale esegue un'analisi matematica sulla superficie della nuvola di punti definita dalle coordinate planimetriche di ogni cella e dalle relative quote altimetriche restituendo dei nuovi raster in cui sono riportati per ciascuno i valori di pendenza e di orientazione.
La pendenza viene sempre restituita in riferimento al piano cartografico e c'è la possibilità di scegliere se esprimerla in gradi angolo o percentuale; nel presente caso si è optato per i gradi sessadecimali. I raster generati potranno essere tematizzati in funzione dei valori ottenuti, come per Figura 1.

Figura 1. Rappresentazione delle pendenze delle coperture.

L'orientamento, invece, è stato definito considerando la direzione cardinale nord come origine dell'angolo sul piano azimutale. In un secondo momento si è modificata la tematizzazione della banda per poter ottenere una visualizzazione che rendesse facilmente leggibili i dati generati. Si è realizzata una nuova scala dei colori che restituisse dei colori caldi per i valori di pendenza considerati ottimali e dei colori freddi per quelli che rappresentano condizioni sfavorevoli o inopportune.
Si mette in luce il fatto che non sia matematicamente possibile determinare l'orientamento laddove la superficie del modello digitale di elevazione risulti piano. Il programma, però, prevede che nei casi in cui si riscontri pendenza nulla venga assegnato il valore angolare zero, riuscendo così ad attribuirgli un dato numerico che risulterà univoco in quanto differenziato dal valore dell'angolo giro. Interrogando i risultati ottenuti dal raster relativo all'orientamento e confrontandoli con quelli presenti nel raster delle pendenze si è constatato che, comunque, quando la pendenza della copertura era prossima allo zero, appariva un numeroso quantitativo di pixel con orientamenti molto diversi tra loro. Ciò avviene a causa dell'irregolarità della superficie della nuvola di punti che causa, quindi, una rappresentazione puntinata in modo disomogeneo per le superfici di copertura orizzontali, come in Figura 2.

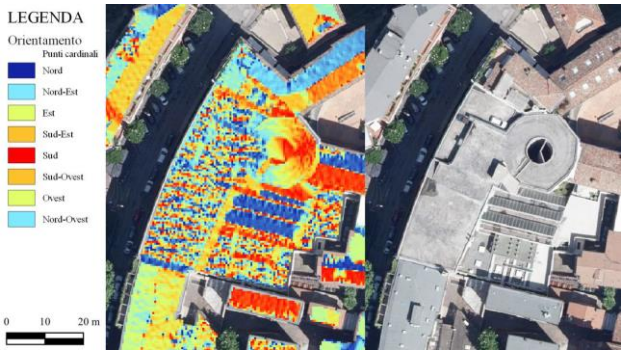


Figura 2. Restituzione grafica dell'orientamento delle superfici orizzontali comparata all'ortofoto.

Questo discorso invece, non vale per quelle aree a pendenza lievemente maggiore, che presentano una pendenza più o meno costante lungo tutta la copertura. Dunque, le superfici orizzontali saranno individuabili per via dell'elevata concentrazione di pixel colorati in modo differente.

2.5 Riclassificazione dei dati

Affinché sia possibile mettere in relazione tra loro i valori numerici delle pendenze e dell'orientamento delle falde, sarà necessario raggruppare valori simili in degli intervalli definiti arbitrariamente. Questa operazione, detta riclassificazione, permette di ottenere un raster i cui pixel restituiscono dei nuovi valori associati a dei range di angoli impostati. Graficamente, l'applicazione dell'algoritmo comporta un'omogeneizzazione dei dati con conseguente formazione di aree di ampiezza maggiore laddove risultino adiacenti le celle con entità iniziale appartenenti allo stesso intervallo. L'output manterrà le sue proprietà per quanto riguarda il sistema di riferimento e la posizione cartografica dei pixel, ma questi ultimi perderanno il loro significato geometrico.
Prima di descrivere il processo impiegato, è di fondamentale importanza parlare della metodologia adottata per riclassificare pendenza e orientamento. Ricordando quanto riportato nelle considerazioni iniziali, si sono andati a considerare le condizioni che solitamente sono valutate ottimali per il progetto di un impianto ad energia solare in copertura. Per questo motivo, si è deciso di classificare le pendenze delle coperture distinguendo i tetti piani, quelli con una pendenza capace di garantire un buon livello di esposizione durante l'intero anno, le coperture capaci di rendere maggiormente nella stagione estiva o invernale e le aree con una pendenza inadeguata.

Si è scelto di riclassificare gli angoli della pendenza in categorie numerate in maniera crescente in base alla loro capacità di soddisfare l'obiettivo prefissato; eccezion fatta per le superfici piane a cui è stato associato il valore zero, in considerazione del fatto che su di esse l'orientamento azimutale non è determinabile. Questo fatto risulterà fondamentale nel momento in cui si dovrà instaurare una relazione matematica tra i livelli di pendenza e quelli di orientamento, come si vedrà in seguito.
Identificati i criteri del nuovo classamento, la riclassificazione è stata eseguita con l'algoritmo *r.reclass* di GRASS GIS, il quale esegue sul raster in ingresso un set di istruzioni espresse sottoforma di codice. Infatti, selezionato il layer su cui si intende agire, viene richiesto di inserire il file contenente le regole di riclassificazione oppure di trascriverle direttamente nello spazio apposito. Siccome apportare una nuova classificazione dei valori angolari comporta la perdita del loro significato geometrico, essa è stata eseguita in modo da avere degli indici univoci per ogni nuovo range e crescenti man mano che il valore angolare si avvicinava a quello ottimale per l'installazione di impianti fotovoltaici, ossia l'angolo di 38° rispetto al piano orizzontale. Dunque, il codice trascritto per eseguire l'elaborazione è stato il seguente:

```
0 THRU 3 = 0
3 THRU 15 = 4
15 THRU 30 = 9
30 THRU 45 = 16
45 THRU 60 = 7
* = 1
END
```

La riclassificazione dell'orientamento è stata svolta in maniera analoga, con la sola differenza nei nuovi valori di riclassificazione. Si è associato il valore uno a tutte quelle superfici orientate prevalentemente in direzione nord, le quali non potranno godere in alcun modo di un'adeguata esposizione solare. Nello specifico, si è usata una classificazione suddividendo il piano azimutale in 6 settori e assegnando valori maggiori per quegli angoli che si avvicinano al valore di 180°, ossia al Sud. Il codice impiegato ha la stessa struttura del primo, ma la riclassificazione è avvenuta come da Figura 3.

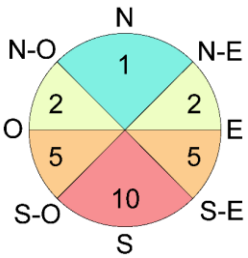


Figura 3. Riclassificazione dell'orientamento delle superfici.

I nuovi valori si differenziano man mano che dalla direzione Nord ci si sposta verso la direzione Sud, ma sono equivalenti per i lati Est o Ovest.

2.6 Calcolo raster

Ottenuti i layer con gli indici dei pixel riclassificati come imposto, si dovrà proseguire ragionando sul modo migliore per mettere in relazione fra loro entrambi i fattori in un'unica equazione a due variabili. Lo scopo è quello di ottenere un coefficiente che identifichi le coperture che potrebbero garantire il maggior assorbimento di radiazioni solari nel caso vi si installasse un impianto a pannelli fotovoltaici. Questo fondamentale passaggio consiste nel calcolo dei valori riportati nelle celle delle immagini relative a pendenza e orientamento, le quali, se sovrapposte, combaciano alla perfezione perché originarie dello stesso ritaglio del modello digitale. La funzione da impiegare, ossia il *calcolatore raster* di QGIS, svolge un calcolo tra gli indici di banda presenti nei pixel che rappresentano la stessa superficie di territorio oppure nel caso in cui una sia contenuta nella superficie dell'altra. È in questo momento che si mostra cruciale l'aver predisposto anticipatamente e coscientemente i valori numerici da impiegare per descrivere le classi di pendenza e orientamento. Di fatto, sono state definite le condizioni degli angoli zenitali e azimutali delle superfici esprimendole con numeri fittizi e ordinati in modo progressivo per poter applicare una funzione che fosse la più semplice possibile e con risultati di facile previsione.
La formula (1) usata nella lavorazione prodotta è di semplice natura e riesce a mettere in relazione in modo coerente sia i valori associati alla pendenza che quelli legati all'orientamento.
Si è scelto di adottare un'equazione che comportasse dei valori nulli per le superfici piane, valori unitari laddove vi fossero situazioni inadeguate o non auspicabili, per poi vedere i valori incrementare in maniera esponenziale all'avvicinarsi delle condizioni di inclinazione considerate ideali. Dunque, si è impiegata la seguente formula:

$$C = P^2 \times O^2 \qquad (1)$$

ove P = valore riclassificato della pendenza
O = valore riclassificato dell'orientamento
C = coefficiente fittizio

La formula dove essere digitata all'interno del calcolatore raster con un linguaggio che consente al programma di riconoscere la banda che contiene il valore da elaborare, anche nel caso corrente in cui i raster riclassificati siano monobanda. Pertanto, il codice da digitare all'interno dello spazio dedicato all'espressione del calcolatore raster sarà in genere definito nel seguente modo:

```
("Pendenza@1"^2)*("Orientamento@1"^2)
```

L'output che otterremo sarà un raster composto da una matrice contente in ogni sua cella il risultato dell'espressione indicata: il coefficiente fittizio di esposizione solare (Bonesso et al. 2013).
Con la relazione instaurata tra i dati, verrà restituita una varietà di valori sufficiente, se tematizzata come da Tabella 1, ad eseguire una prima indagine in grado di mettere in luce quelle aree di copertura capaci, o meno, di accogliere un impianto e di massimizzare la sua resa in termini di assorbimento di energia solare in funzione della pendenza e dell'orientamento. Si evidenzia come si sia riuscito a risolvere il problema dell'orientamento delle superfici piane, le quali inizialmente presentavano tutta una serie di valori non coerenti tra loro e che ora, grazie al prodotto del valore riclassificato della pendenza, restituiscono zero in ogni punto della superficie piana.

$C = P^2 \cdot O^2$			*Orientamento*						
			0°-45°	45°-90°	90°-135°	135°-225°	225°-270°	270°-315°	315°-360°
			1	2	5	10	5	2	1
Pendenza	0°-3°	0	0	0	0	0	0	0	0
	3°-15°	4	16	64	400	1600	400	64	16
	15°-30°	9	81	324	2025	8100	2025	324	81
	30°-45°	16	256	1024	6400	25600	6400	1024	256
	45°-60°	7	49	196	1225	4900	1225	196	49
	60°-90°	1	1	4	25	100	25	4	1

Tabella 1. Coefficienti fittizi generati dal calcolatore raster tematizzati in funzione dell'esposizione solare annua.

2.7 Vettorializzazione e stima dell'energia producibile

Disporre di un vettore riportante i dati ricavati risulta essenziale qualora si voglia svolgere ulteriori operazioni e indagini sulle prestazioni raggiungibili da determinati impianti ad energia solare in relazione alle caratteristiche delle aree individuate (Moraca, 2018). La vettorializzazione di un layer raster avviene con l'impiego della funzione *poligonizzazione* di GDAL, il quale estrae dall'immagine i contorni dei pixel trasformandoli in poligoni. Questo algoritmo è in grado di riconoscere le celle adiacenti che presentano lo stesso valore della banda selezionata e di unire i loro contorni in un unico elemento. Il valore della banda individuato verrà riportato sottoforma di attributo all'interno di un nuovo campo nella *tabella degli attributi*, una tabella in grado di contenere tutta una serie di informazioni espresse in forma di numero o di stringa di testo. Il layer vettoriale che si andrà a creare disporrà di un campo dedicato ai coefficienti fittizi presenti nel raster per ogni singolo poligono che si sarà venuto a creare con la poligonizzazione. Sarà, poi, possibile determinare la superficie di ogni elemento del vettore grazie ad una specifica funzione del *calcolatore dei campi* ed inseguito si potranno applicare i parametri desiderati per effettuare la stima della quantità di energia elettrica ottenibile da ogni copertura con un determinato impianto fotovoltaico. Vi è un'apposita funzione disponibile per calcolare l'area di ogni singolo poligono. È resa immediatamente disponibile tra quelle presenti nella categoria riguardante le geometrie all'interno del calcolatore dei campi e riporta il seguente codice:

```
$area
```

I parametri utilizzati nell'analisi per eseguire la stima sono quelli presenti nella piattaforma PVGIS, ossia la tecnologia dei pannelli fotovoltaici, la loro potenza, la percentuale di perdita di sistema, la pendenza, l'orientamento e la tipologia di montaggio dell'impianto. Da questi, uniti alla posizione geografica del territorio, la piattaforma è in grado di indicare la produzione annua di energia fotovoltaica, illustrando anche un istogramma delle quantità prodotte per ogni mese dell'anno. Nello specifico, l'indagine è stata svolta considerando un impianto a pannelli in silicio, collegato alla rete, con pannelli di potenza 350 W e una perdita di sistema del 14%, montato su appositi telai. All'interno della piattaforma, è stata riportata la potenza dell'impianto per m^2, in modo che ci venisse restituita la quantità di energia annua ottenibile in proporzione all'unità di superficie (Fig. 4). Dunque, il valore inerente alla potenza inserito all'interno del simulatore corrisponde al rendimento energetico specifico del pannello, pari al 20%, e quindi in grado fornire una potenza di 200 W per m^2.

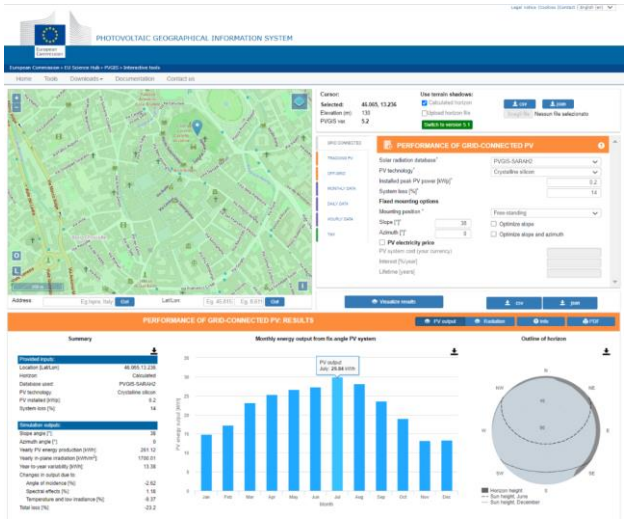


Figura 4. Schermata dimostrativa della stima prodotta dal simulatore PVG.

Effettuando le simulazioni su PVGIS per ogni valore medio degli intervalli impostati con la riclassificazione dei raster, si sono ottenuti i totali di energia annua producibile per le diverse pendenze e gli orientamenti. Siccome si è considerata la possibilità di installazione degli inseguitori solari sulle superfici piane di copertura, il valore ottenuto dalla simulazione in PVGIS è stato incrementato del 25% per la maggiore resa che questi dispositivi meccanici possono procurare.
Il passo successivo prevede che ai coefficienti fittizi di tutti gli elementi del vettore siano associati i rispettivi indici di produttività annua per realizzare un nuovo campo di attributi. Per farlo, si è ricorsi al calcolatore dei campi, in cui è stato trascritto un codice che ha permesso di individuare ciascuno delle centinaia di migliaia di elementi, l'attributo del coefficiente e, in base al suo valore, creare un nuovo attributo relativo all'energia annua ottenibile per m^2.
Il codice impiegato è stato riportato con la seguente sintassi:

```
CASE WHEN "Coefficiente" = 0 THEN 328
                WHEN "Coefficiente" = 1 THEN 51
                WHEN "Coefficiente" = 4 THEN 119
                ...
                WHEN "Coefficiente" = 25600 THEN 262
END
```

Infine, si sono moltiplicati i valori di prestazione degli impianti fotovoltaici per unità di superficie per le aree dei poligoni che compongono le innumerevoli superfici di copertura presenti nel centro urbano. Nel farlo, si è considerato che un impianto non occupa quasi mai l'intera superficie di una copertura, per via delle dimensioni dei moduli e di altri aspetti di natura architettonica o strutturale. Pertanto, è stata introdotta una riduzione alla superficie effettivamente utilizzabile, stimata intorno al 50%. Tenendo conto di ciò, sempre tramite il calcolatore dei campi è stato generato un nuovo campo i cui attributi sono il risultato del prodotto tra la superficie di copertura utilizzabile e la produzione annua al m^2 di energia dell'impianto fotovoltaico. Il prodotto è stato calcolato con la funzione seguente:

$$S = A \times 0{,}5 \times E \qquad (2)$$

ove S = stima dell'energia annua ottenibile
A = area della superficie di copertura
E = energia annua producibile per m^2

Si è quindi ottenuta, per ogni edificio civile situato nel contesto urbano, la stima di quanta energia elettrica annua che può essere mediamente ricavata da un impianto fotovoltaico in funzione delle caratteristiche geometriche delle singole coperture. Disporremo quindi di un vettore dalla quale è possibile consultare, per ogni suo elemento, i valori dei coefficienti, l'estensione della loro area, la produttività energetica al m^2 per il tipo di impianto e la stima finale. Tutte queste informazioni saranno visibili da un unico layer vettoriale e potrebbero essere modificate o integrate all'interno di altri ambienti GIS.

3. Analisi del processo e dei risultati

Il processo descritto fin qui permette di ottenere delle mappe digitali tematizzabili in funzione dell'irraggiamento solare riscontrabile dalle caratteristiche geometriche delle coperture degli edifici ed un vettore che illustra il potenziale energetico raggiungibile installando su di esse un determinato impianto fotovoltaico. Con questi dati a portata di mano, diventa necessario visionare quanto realizzato e confrontare l'influenza

delle considerazioni iniziali con l'attendibilità dei risultati conseguiti per avere una chiave di lettura critica sulla loro qualità e precisione.
Innanzitutto, è bene chiarire come ci si debba rapportare al problema più importante di tutti per un'analisi che studia lo sfruttamento di pannelli solari: l'ombreggiamento. Le superfici di copertura soggette ad ombreggiamento non sono evidenziate e, pertanto, a primo impatto potrebbero apparire idonee all'installazione di impianti fotovoltaici tanto quanto quelle che non presentano questa problematica. Esistono due cause principali di ombreggiamento, ossia la presenza di elementi architettonici, o vegetazione, posti al di sopra della superficie di copertura (Fig. 5) e quella causata dalla presenza di altre costruzioni vicine.

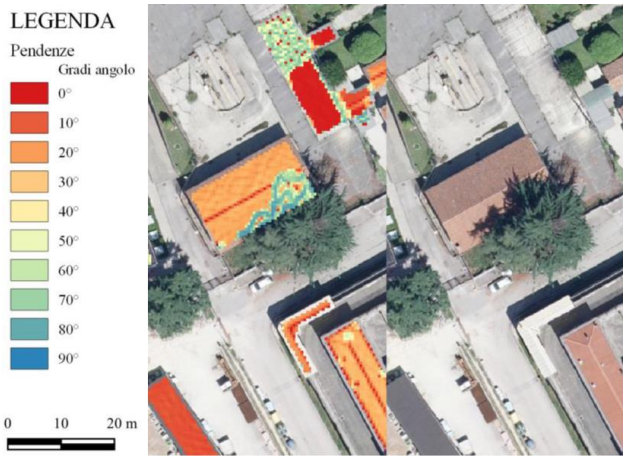


Figura 5. Esempio di un elemento di ombreggiamento sulla superficie di copertura.

Nei primi due casi, questi elementi possono essere individuati facilmente perché rappresentati da insiemi di pixel, o poligoni, aventi valori di coefficiente nettamente diversi. Questo avviene a causa del dislivello altimetrico individuato durante i rilievi LIDAR e al trattamento di queste superfici durante la riclassificazione dei valori. Inoltre, fin dal principio si sono importate in QGIS anche le ortofoto che han permesso di verificare con immediatezza la natura degli elementi di disturbo che emergono dal modello digitale delle superfici.
Invece, nel caso in cui l'ombreggiamento sia dovuto alla presenza di edifici nelle vicinanze, non risulta esservi modo di evidenziarlo dai layer ottenuti con la lavorazione descritta. Il metodo più pratico per riuscire a notare quest'eventualità è osservare nel dettaglio i modelli digitali di elevazione, nei quali è semplice accorgersi della presenza di differenze di quote importanti tra costruzioni vicine, come si può osservare nella Figura 6 sottostante.

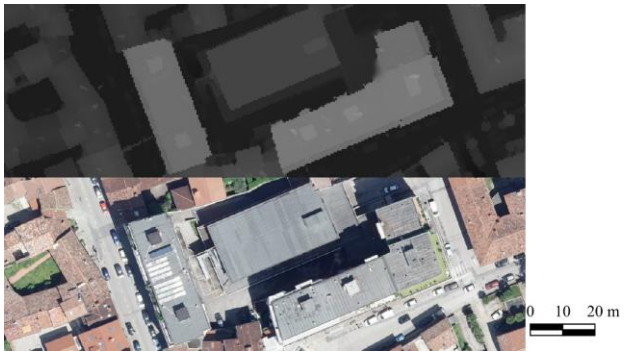


Figura 6. Ombreggiamento tra edifici individuabile dal confronto tra modello altimetrico digitale e ortofoto.

In figura è presente un confronto tra il modello digitale di elevazione e l'ortofoto dai quali si può notare, già da una prima occhiata, lo stacco di quota presente fra l'ala dell'edificio fronte strada rappresentato con tonalità chiare e quello posto a nord raffigurato con colori scuri perché di quota inferiore. Alla luce di ciò si sottolinea che per eseguire una corretta valutazione sulla predisposizione di una copertura ad ospitare pannelli solari può essere necessario confrontare il vettore finale della stima energetica ottenibile con i dati di partenza sui quali si è operato.
Illustrato l'argomento principale che mina l'affidabilità delle informazioni prodotte alla fine dell'elaborazione, è importante osservare anche gli aspetti che riguardano gli elementi che compongono il vettore spaziale ottenuto. Inoltre, si richiama l'attenzione sul fatto che le aree in esso riportate sono calcolate sul piano cartografico, e quindi risultano inferiori per tutte quelle superfici di copertura che presentano un qualsiasi grado di pendenza.
Dal punto di vista estimativo, si è cercato di impostare dei parametri che non fossero esageratamente ottimistici, e per tali ragioni si è preferito considerare un basso grado di area di copertura effettivamente utilizzabile ed un rendimento dei pannelli fotovoltaici che fosse standard per il mercato attuale. Dato lo sviluppo del mercato dei pannelli ad energia solare, recentemente si sono viste incrementare le prestazioni dei pannelli fotovoltaici, che hanno raggiunto un grado di efficienza pari al 20% anche per quei pannelli che non rientrano tra i prodotti considerabili top di gamma.
Visionando le stime di energia elettrica annuale prodotta per ogni tipologia di copertura, ci si è resi conto che i valori risultano essere attendibili per la quasi totalità degli edifici. Si è appurato che le falde dei tetti delle abitazioni singole, categoria edilizia prevalente nel territorio esaminato, presentano una stima di producibilità elettrica che risulta leggermente inferiore ai valori calcolati misurando dal software una ad una le superfici di copertura potenzialmente usufruibili di un gruppo di edifici ed applicando su di essi i medesimi parametri dell'impianto fotovoltaico. Nell'esempio in Figura 7, è riportato un edificio per il quale si è stimato che, installando un impianto fotovoltaico nella falda maggiormente esposta a sud, si riesca ad ottenere annualmente una produzione di energia elettrica pari a circa 14.000 kWh. Attraverso gli strumenti di QGIS si è trovato plausibile che vi si possa impiegare una superficie di falda maggiore a quella stimata, e su di essa si sono applicati i parametri e i risultati di PVGIS inserendo i gradi di pendenza e orientamento ricavati dall'algoritmo di GRASS. Si è tenuto conto della presenza dell'oggetto posto in prossimità della linea di colmo del tetto, valutando un'abbondante area in sua prossimità come inadeguata all'installazione di un impianto ad energia solare. Il discostamento finale tra i due valori di produzione di energia era inferiore al 10%, come si è riscontrato per innumerevoli altre costruzioni, e si è osservato che la stima ottenuta dall'analisi svolta era quasi sempre inferiore a quella proposta dalla piattaforma PVGIS.

Figura 7. Superfici di copertura tematizzate in funzione della produttività energetica annua su m^2 di impianto fotovoltaico.

Oltre ai casi appena descritti, ve ne sono diversi la cui rappresentazione della copertura risulta essere disomogenea in quanto composta da numerose aree con indici di producibilità diversi seppur simili tra loro. Questo avviene quando la superficie del modello digitale presenta valori di pendenza o orientamento che fluttuano attorno ai valori di contorno dei range impostati durante la riclassificazione. In tali casi, la stima è ottenibile considerando la somma dei valori di ogni area, visionabili dalla tabella degli attributi del vettore selezionando i corrispettivi elementi. In Figura 8 si può osservare un chiaro esempio di una copertura il cui livello di producibilità annua può essere stimato considerando l'ammontare degli indici di ogni area contenuta in essa e di come in realtà la superfice risulti piuttosto omogenea. La falda posta in direzione sud sarà quella ottimale per l'installazione di impianti fotovoltaici, poiché, a conti fatti, si stima che i suoi 200 m^2 di superficie potrebbero generare circa 20.000 kWh all'anno.

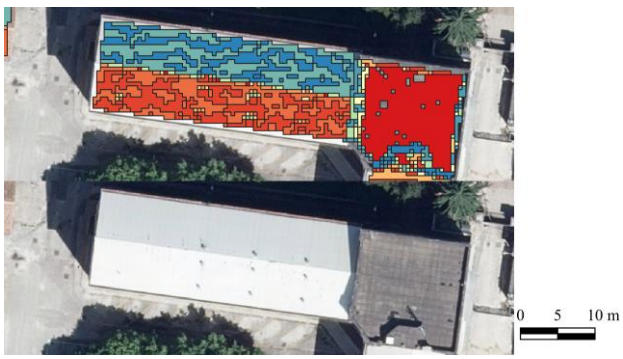


Figura 8. Confronto fra il vettore di stima della produttività energetica e l'ortofoto di una copertura con rappresentazione disomogenea della sua superficie.

Invece, I casi in cui si riscontrano valori di producibilità energetica non realistici sono esigui e riguardano principalmente le coperture piane con ampie superfici, per le quali sono spesso presenti corpi ed elementi architettonici che possono causare ombreggiamenti per la posizione in cui si trovano. Ne è un esempio la copertura rappresentata nella Figura 9, nella quale sono presenti dei vani scala e impianti che rappresentano un ostacolo per il pieno sfruttamento dell'area non solo dal punto di vista della gestione degli spazi, ma anche per le zone d'ombra che ne derivano durante l'arco della giornata. L'installazione di un impianto dotato di inseguitore solare potrebbe essere una soluzione per cercare di far fronte al problema, ma difficilmente si potranno raggiungere gli oltre 115.000 kWh annui che risultano dalla stima. Una soluzione procedurale per evitare di riscontrare stime così ottimistiche sarebbe quella di applicare una percentuale di superficie di copertura effettivamente utilizzabile variabile in base all'entità dell'area di ogni elemento del vettore. Si potrebbe generare un abbassamento dei valori dell'energia producibile dalle grandi coperture applicando percentuali inferiori.

Figura 9. Confronto fra il vettore della stima di produttività energetica e l'ortofoto di una copertura con stima inattendibile.

4. Conclusioni

Il presente lavoro ha lo scopo di dimostrare come può avvenire un'analisi sul territorio attraverso l'utilizzo di risorse totalmente accessibili. Si è voluta svolgere questa analisi perché si sono riscontrate numerose indagini sullo stesso argomento, eseguibili dall'inizio alla fine solo attraverso l'uso di software a pagamento o dati non disponibili al pubblico. Nel processo descritto, invece, si sono utilizzati strumenti e dati liberamente distribuiti dalla *Open Source Geospatial Foundation*, dalla Regione Friuli Venezia Giulia e dall'Unione Europea.
Il processo in esame vede interessata un'area di circa 1,4 km^2, che comprende il centro urbano della città di Udine e sulla quale hanno sedime circa 1200 fabbricati. È stata selezionata quest'area per la sua particolare orografia e per le differenti coperture presenti. In questo modo si è potuto verificare meglio il comportamento dei vari algoritmi di QGIS, osservando l'attendibilità dei dati da essi generati.
Si sottolinea che per eseguire un elaborato come quello illustrato è necessario disporre di modelli digitali altimetrici che abbiano una precisione minima di 1 m per passo, perché altrimenti andrebbero perse troppe informazioni che porterebbero ad un'approssimazione troppo elevata delle superfici di copertura. Dunque, si potrebbe svolgere l'elaborazione anche in contesti differenti da quelli urbani a patto che si possa disporre di modelli digitali altimetrici sufficientemente dettagliati.
Come descritto nelle considerazioni inziali, questo processo può essere svolto in maniera analoga anche per gli impianti solari termici, siccome le loro prestazioni sono anch'esse soggette al livello di irraggiamento solare a cui sono sottoposti durante l'anno. Ovviamente, bisognerebbe applicare parametri differenti in considerazione della loro funzione all'interno di un edificio. Essendo impianti che producono calore, dovranno offrire le loro massime prestazioni nelle stagioni invernali in cui vi è più bisogno di scaldare gli ambienti interni alla struttura. Ciò significa che i pannelli dovranno godere di una maggiore inclinazione rispetto a quelli fotovoltaici la cui energia elettrica prodotta è richiesta durante tutto l'anno in modo più o meno costante, sempre in considerazione di aspetti come la funzione dell'edificio e la tipologia di impianti che ospita.

Disponendo dei dati adeguati, sarebbe stato interessante integrare al vettore anche la stima della producibilità degli impianti solari termici per poi paragonarli a quella ricavata dall'analisi. Seguendo questo approccio, si sarebbe dovuto dare priorità per l'intero processo all'individuazione dei livelli di irraggiamento solare delle superfici, per proseguire in un secondo momento alla stima della produttività di entrambi gli impianti. Si è preferito operare come dimostrato perché si è reputato di maggiore interesse sviluppare e approfondire l'indagine per un determinato tipo di impianto, con l'obiettivo di riuscire a rendere maggiormente distinguibili le coperture con un maggior potenziale rispetto alle altre.
Per quanto riguarda i fotovoltaici, sarebbe interessante confrontare la stima individuata con i dati misurati sugli impianti già esistenti nell'area di studio, in modo tale da verificare ulteriormente l'attendibilità sia del processo realizzato, che dei dati tecnici rilasciati dal simulatore PVGIS. In ogni caso, l'analisi ha ampi margini di miglioramento, che possono essere dettati dall'applicazione di criteri di giudizio maggiormente mirati ad una determinata situazione architettonica oppure dall'impiego di parametri derivanti da fonti che si occupano in prima persona della realizzazione e monitoraggio degli impianti fotovoltaici. Date le molte variabili in gioco ci si è accontentati di svolgere uno studio su di un caso generico, ma disponendo di specifiche direttive si può riuscire ad individuare con maggiore precisione quelle coperture in grado di soddisfarne i requisiti. D'altra parte, se si disponesse delle informazioni riguardanti i reali consumi energetici di un edificio si potrebbe arrivare addirittura ad evidenziare in quali casi un impianto sarebbe capace di provvedere pienamente ai bisogni dell'utenza.
Purtroppo, non si è riuscito a trovare il modo di mettere in risalto anche i problemi derivanti dai possibili ombreggiamenti tra edifici adiacenti, dovendo lasciare all'utente il compito di consultare in autonomia anche i dati dai quali è cominciata l'elaborazione.
In conclusione, si reputa soddisfacente il lavoro svolto perché coinvolge un gran numero di costruzioni per le quali si è riusciti ad associare una stima del potenziale fotovoltaico ed a restituire una raffigurazione immediata delle superfici più adatte ad ospitare un impianto solare in copertura.

Riconoscimenti

Contributi dei singoli autori

Idea, concezione, metodologia e supervisione: Tagliariol Pietro

Fonti di finanziamento

Nessuna.

Conflitti di interesse

L'autore dichiara di non aver alcun conflitto di interesse.

Bibliografia

Liscia N, Minchilli M., 2014. Analisi spaziale in ambiente GIS per la valutazione paesaggistica ed energetica dei pannelli solari in ambito urbano. *Conferenza ASITA, Firenze, 14-16 Ottobre 2014*

Bonesso S., Mutani G., Hubina T., Ramassotto A., 2013. L'applicazione delle tecnologie fotovoltaiche integrate sulle coperture degli edifici con software GIS", GEOmedia, 17(2), pp. 6-11

Moraca M., 2018. Fotovoltaico e GIS: come individuare l'utilizzabilità di un tetto, massimilianomoraca.it/blog/gis/fotovoltaico-e-gis-come-individuare-lutilizzabilita-di-un-tetto/, aggiornato il 22-05-2022

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, "WebGIS EAGLE.FVG." https://eaglefvg.regione.fvg.it (Accessed 31 August 2023).

European Commission, Joint Research Centre (JRC), "Photovoltaic Geographical Information System." https://re.jrc.ec.europa.eu (Accessed 31 August 2023).

QGIS Development Team, "QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System." https://www.qgis.org (Accessed 31 August 2023).

GRASS Development Team, "GRASS GIS - Free and Open Source Geographic Information System." https://grass.osgeo.org (Accessed 31 August 2023).

APPLICAZIONI WEBGIS 3D PER LE SCIENZE UMANISTICHE DIGITALI: IL PROGETTO TURIN 1911

A. Spreafico [1]*

[1] LabG4CH, Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali, DAD, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Viale Mattioli 39, 10125 Torino, Italia
(alessandra.spreafico@polito.it)

Parole chiave: BIM, GIS, patrimonio culturale, divulgazione online, Esposizioni Mondiali, ricostruzioni digitali 3D

Key words: BIM, GIS, Cultural Heritage, online sharing, World's Fairs, geo-databases, 3D digital reconstructions

Abstract

La documentazione del Patrimonio Culturale è fondamentale per la sua conservazione e studio, specialmente quando questo è destinato ad essere smantellato come accade nelle Esposizioni Mondiali; tuttavia, scarsi sforzi sono stati intrapresi dalle istituzioni internazionali e nazionali di conservazione e ricerca. I modelli digitali 3D hanno successo nel campo del Patrimonio Culturale, mentre i webGIS risultano meno esplorati e non usati come strumento di ricerca e la loro integrazione con modelli BIM non è di semplice esecuzione. *Torino 1911* è un progetto pioniere nella documentazione, ricostruzione e studio digitale di un'intera Esposizione Mondiale, combinando tecnologie digitali (geo-DB, modelli 3D e webGIS 3D) con standard di catalogazione. Tale iniziativa supporta le scienze umanistiche tramite la divulgazione online. Questo articolo presenta applicazioni web 3D sviluppate appositamente per *Turin 1911*, affrontando varie difficoltà e presentando un'apposita procedura. I modelli BIM sono integrati nelle applicazioni web per visualizzare le architetture effimere. Tale studio discute l'uso del webGIS come piattaforma divulgativa e spazio 3D per la ricerca nel campo delle discipline umanistiche. Il presente articolo è una rivisitazione e traduzione in italiano del contributo inglese (Spreafico, Chiabrando, & Della Coletta, 2023).

Documenting of Cultural Heritage (CH) is crucial for its preservation and study, especially for dismantled structures like those in World's Fairs; however, limited efforts are undertaken by national and international conservation and research institutions. While 3D digital models thrive in CH, webGIS remains underexplored and unutilized as research tool; besides, their integration with BIM models is not straightforward. The *Turin 1911* project pioneers virtual documentation, recreation, and study of a World's Fair, combining digital technologies (geo-DB, 3D models and 3D webGIS) with cataloging standards. This initiative advances Digital Humanities by sharing information online. This paper presents 3D web apps developed for *Turin 1911*, addressing challenges, and presenting a tailored procedure. BIM models are integrated into web apps to visualize ephemeral architectures. This study discusses webGIS as a sharing platform and a 3D environment for Digital Humanities research. This paper is a reinterpretation and translation into Italian of the English paper (Spreafico, Chiabrando, & Della Coletta, 2023).

1. Introduzione

Nel caso di Patrimonio Culturale smantellato o demolito - sia deliberatamente che accidentalmente - le uniche tracce che lo documentano sono fonti storiche; i documenti sono spesso di difficile consultazione, anche se molte istituzioni si stanno impegnando in massivi progetti di digitalizzazione e nella creazione di archivi digitali online (Bitelli et al., 2019). Spesso i documenti storici rimangono custoditi in depositi o biblioteche inaccessibili. Anche i documenti digitali rischiano di rimanere depositati in hard-disk a causa di limitazioni di budget, impedendo la loro inclusione in archivi fruibili al pubblico. Inoltre, la divulgazione online viene spesso influenzata negativamente dal formato e dal peso dei file. In molti casi, gli archivi digitali sono copie digitali di archivi fisici e non traggono vantaggio dalle capacità che i computer offrono (Münster et al., 2019). Alcuni progetti e iniziative, come Europeana, CyArk 3D Heritage Archive e Open Heritage 3D, presentano modelli 3D nelle loro collezioni digitali. Spesso i modelli 3D sono modelli individuali avulsi dal loro contesto, non sono relazionati ad altri beni culturali e all'ambiente naturale che li circonda. Le tecnologie digitali come BIM e webGIS forniscono interessanti soluzioni che permettono agli studiosi di esplorare e analizzare complesse strutture effimere in tutta la loro complessità. Queste tecnologie offrono l'opportunità di integrare tale supporto nelle ricerche umanistiche. L'avvento del webGIS ha ridotto i costi, incrementando la capacità di raggiungere un pubblico più ampio, facilitando l'uso di funzioni GIS, condividendo dati spaziali e incrementandone l'uso. Tuttavia, solo alcuni studi applicano webGIS 2D e 3D alle discipline umanistiche digitali. Fiorini (Fiorini et al., 2022) usa il webGIS per proporre un tour virtuale di Venezia durante la visita di Napoleone del 1807 ma non come strumento di ricerca; inoltre, il link al webGIS non viene fornito. Wei (Wei et al., 2022) ha sviluppato un webGIS per le informazioni storiche relative alla Cina per visualizzare e studiare eventi passati. Il webGIS estrae dati da un database (DB) basato su termini strutturati e relazioni ontologiche tra eventi, persone, luoghi, letteratura e tempo. Tuttavia, questo progetto è basato solamente su un ambiente 2D e non considera le potenzialità dello spazio 3D. Il geoportale dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (Pantaloni et al., 2021) colleziona mappe storiche geologiche d'Italia in un webGIS; le mappe sono catalogate secondo lo standard *International Standard Bibliographic Description* (ISBD) e georiferite. Ciononostante, le mappe sono mostrate su

* Corresponding author

una mappa 2D attuale; la ricostruzione digitale in 3D del territorio storico non è affrontata e le mappe non sono messe in relazione con le persone o le istituzioni che le hanno realizzate. Il webGIS della ferrovia Yunnan-Vietnam (Sang et al., 2021) mostra foto storiche geotaggate e catalogate in un DB, relazionandole ai fotografi e alle località raffigurate; purtroppo, il webGIS è sviluppato solo in 2D. Il progetto MayaArch3D (von Schwerin et al., 2013) ricostruisce digitalmente in 3D le architetture del sito UNESCO di Copan utilizzando diversi *Level of Detail* (LoD). Le architetture sono connesse a dati archeologici 2D e 3D, ma non sono catalogate. Il webGIS oggi non è più disponibile, perdendo la funzione primaria del webGIS di condividere informazioni online. Nessuno di questi progetti utilizza modelli BIM all'interno del webGIS, sebbene la modellazione BIM restituisca una realtà 3D alle 'architetture di carta', migliorando l'accesso cognitivo ai disegni tecnici (Bagnolo et al., 2022). L'unione di BIM e GIS è un argomento affrontato in molti studi (Breunig et al., 2020); tuttavia le ricerche si focalizzano spesso su soluzioni tecniche piuttosto che affrontare questioni storiche e culturali che costellano il campo degli studi umanistici, specialmente quando si tratta di strutture architettoniche che non esistono più. In questo contesto, le Esposizioni Mondiali possono rappresentare una sottocategoria del Patrimonio Culturale, che è scarsamente documentata digitalmente. Le Esposizioni Mondiali storiche riflettono le società di un determinato periodo temporale e si basano sul concetto di effimero: le esposizioni sono mondi fittizi concepiti per scomparire alla loro chiusura assieme a tutti i documenti effimeri, unica testimonianza delle esposizioni. Volendo affrontare un fenomeno complesso costituito da centinaia di architetture, persone, documenti e connessioni tra essi, studi tradizionali incapsulati in pubblicazioni cartacee sono limitati nell'espressione della complessità; invece, le tecnologie digitali possono rompere le barriere fisiche degli archivi e del mezzo cartaceo (Della Coletta, 2006). World Expo Museum (http://www.expo-museum.org/) – unica istituzione ufficiale dedicata alle Esposizioni Mondiali – dispone di un centro di documentazione, un centro di ricerca letteraria e una biblioteca. Il centro di documentazione mostra una collezione online dei beni conservati nel museo ma non dispone di un catalogo online per la biblioteca e neppure di una lista delle Esposizioni Mondiali. Solo poche istituzioni, principalmente collocate in UK e USA, hanno intrapreso la digitalizzazione e pubblicazione online di materiale archivistico dedicato a singole Esposizioni Mondiali. Le istituzioni più rilevanti sono: Museum of the City of New York, Queens Museum a New York, la collezione *Louisiana Purchase Exposition: The 1904 St. Louis World's Fair* guidata da Missouri State Archives e Missouri State Library, la collezione *Century 21 World's Fair Digital Document Library* di Seattle Public Library. Tali collezioni non usano una terminologia condivisa e non sfruttano appieno le funzionalità dei DB e il potenziale offerto dalle interfacce web. Solo un progetto, *World's Columbian Exposition of 1893 reconstruction* di UC Los Angeles, sperimenta la ricostruzione virtuale 3D di un'Esposizione, ma non fornisce accesso alle fonti originarie. Recentemente, due case editoriali (Adam Matthew e GALE) hanno creato collezioni digitali dedicate alla documentazione delle Esposizioni Mondiali. Tali collezioni presentano materiali depositati in molti archivi e biblioteche pubbliche, ma richiedono una sottoscrizione a pagamento per l'accesso. Inoltre, tutte le suddette iniziative mancano di procedure condivise e di un coordinamento comune.

Il potenziale del webGIS è rilevante non solo come archivio di materiale georiferito, come nel caso del geoportale ISPRA, ma anche come studio di eventi passati e come supporto per analisi delle relazioni tra eventi storici, località, persone e spazi temporali, permettendo indagini spaziali e non, come affrontato da Fiorini et al., 2022; Wei et al., 2022; Sang et al., 2021; von Schwerin et al., 2013. Tuttavia, non esiste un archivio digitale che includa le ricostruzioni 3D di strutture architettoniche effimere e che consenta di effettuare anche analisi spaziali. Tale sistema dovrebbe includere uno spazio 3D dove le ricostruzioni digitali sono inserite nel loro contesto urbano costruito, messe in relazione ad esso e al materiale archivistico che lo descrive; inoltre, i documenti d'archivio dovrebbero essere catalogati secondo i relativi standard di catalogazione. Solo in questo modo i ricercatori potranno disporre di tutte le risorse necessarie in un solo sistema tridimensionale, completo di strumenti analitici e di indagine quali quelli offerti da un webGIS.

Il presente articolo si concentra sullo sviluppo di tale sistema basato su un webGIS 2D/3D associato ad applicazioni GIS-BIM e integrato in un sito web per la documentazione e studio dell'Esposizione Internazionale di Torino 1911. Infine, vengono riportate e discusse le potenzialità e problematiche riscontrate nella creazione e uso di tali applicazioni.

2. Il Progetto Turin 1911

Lo studio qui presentato è parte di *Turin 1911: The World's Fair in Italy,* un progetto di ricerca di University of California San Diego e Politecnico di Torino nel quale un gruppo multidisciplinare collabora per documentare e studiare l'Esposizione di Torino 1911. L'*Esposizione Internazionale delle Industrie e del Lavoro* ebbe un ruolo rilevante nel forgiare nuove alleanze e nel mostrare il ruolo dell'Italia nel piano internazionale nei campi politico, economico, tecnologico e artistico (Della Coletta, 2006). Circa 200 strutture furono specificatamente progettate e smantellate alla chiusura dell'evento. Oggi le tracce di tale evento rimangono racchiuse in materiali storici conservati in varie parti del mondo.

Il progetto *Turin 1911* aspira a identificare, collezionare, digitalizzare e catalogare il materiale archivistico e da questo estrarre informazioni sulle architetture e sulle persone che diedero loro vita. Inoltre, a partire dai documenti originali, il progetto mira a ricreare digitalmente in 3D molte delle strutture espositive. L'obiettivo archivistico risponde a molteplici esigenze. Nessun archivio unicamente dedicato alle Esposizioni Universali esisteva prima del 2010, anno in cui il World Fairs Museum fu costituito. Riguardo l'Esposizione di Torino 1911, il materiale originale che documenta l'evento è eterogeneo e custodito in molteplici luoghi fisici sparsi nel mondo, di proprietà sia pubblica che privata; perciò, tale materiale non è di facile identificazione e consultazione e spesso non è catalogato. Un catalogo che descriva tutte le architetture dell'Esposizione di Torino 1911 non esiste, alcuni elementi costruiti sono disegnati nella mappa dell'esposizione ma i loro nomi sono sconosciuti. La precisa collocazione di alcune strutture è ignota e sono scarse le descrizioni delle persone connesse a questi elementi (e.g. costruttori ed espositori). Il sito web interamente dedicato all'Esposizione di Torino 1911 - https://italyworldsfairs.org – aspira a creare uno spazio durevole e organizzato per mostrare i numerosi documenti relativi all'esposizione, facilitandone la ricerca e fornendo uno spazio innovativo per la ricerca. Il sito web mostra i dati inseriti in un DB creato *ad-hoc* nel 2009 combinando l'impegno di specialisti di scienze umanistiche e informatici. Il sito web è concepito sia per studiosi che amatori, consentendo l'accesso gratuito e semplice, richiedendo solo un browser e una connessione internet. La ricostruzione virtuale dei padiglioni di Torino 1911 è iniziata con il contributo di esperti di architettura, geomatica, ingegneria e discipline umanistiche (Einaudi et al., 2020); tecniche differenti sono state testate per il rilievo metrico 3D delle strutture ancora esistenti del Castello del Valentino e del Borgo Medievale (Chiabrando et al., 2019). Attualmente, tale sito web è in fase di *restyling* per

migliorare l'organizzazione dei contenuti e includere i modelli 3D. Tali modifiche sono in corso di sviluppo e sono parzialmente presentate in questo articolo.

3. Preparazione dei dati e architettura del sistema

I documenti storici costituiscono la base della documentazione e della ricostruzione virtuale 3D dell'esposizione torinese. Diversi archivi, biblioteche, collezioni e musei privati e pubblici conservano elementi che documentano l'Esposizione di Torino 1911. Le raccolte più vaste sono la collezione privata di Cristina Della Coletta (CDC) a San Diego (USA), un'unità archivistica dedicata nell'Archivio Stefano Molli della Fondazione Marazza di Borgomanero, e documenti sparsi conservati dalla Biblioteca Civica Centrale di Torino. Tali documenti sono eterogenei (e.g. guide, cartoline, fotografie, periodici, quotidiani, documenti architettonici), solo alcuni di essi sono già stati digitalizzati e catalogati, ma solo in italiano. Perciò, tutti gli elementi identificati sono stati inventariati e digitalizzati seguendo standard internazionali. I materiali archivistici sono stati catalogati e connessi alle geometrie alle quali si riferiscono utilizzando un nuovo geo-DB appositamente creato *ex-novo*. Dopo circa dieci anni dalla sua creazione, il primo DB presentava molti limiti: non conteneva la componente spaziale e non seguiva tesauri condivisi né standard di catalogazione. Un tentativo di abilitare la componente spaziale nel DB relazionale esistente (Spreafico & Della Coletta, 2021) è stato abbandonato a causa delle molteplici complicazioni in favore di un nuovo geo-DB contenente la componente spaziale. Una nuova strategia è stata delineata e testata per creare il nuovo geo-DB in modo da combinare il DB PostgreSQL con ArcGIS Pro per la visualizzazione 2D/3D e Lavarel per lo sviluppo del sito web. Il nuovo DB è stato progettato partendo dal nuovo modello concettuale dove le entità (*archival materials, architectural documents, built environment objects, components, glossary, lists, locations, and secondary sources)* e le relazioni tra di esse sono state identificate (
Figura 1).

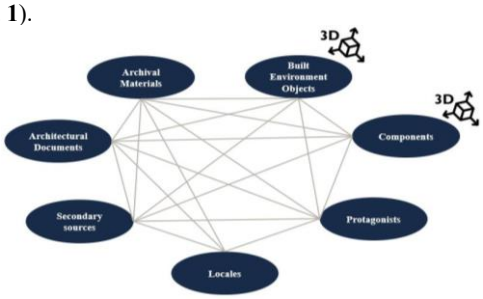


Figura 1. Modello concettuale del nuovo geo-DB, da Spreafico et al., 2023.

L'architettura per la gestione del geo-DB e la visualizzazione dei dati prevede due tipi di interazione: una più comune tramite un sito web e una meno comune attraverso un webGIS. In genere, questo tipo di interazione combinata non è applicata dalle discipline umanistiche. Non è comune neanche nella letteratura riguardo il Patrimonio Culturale, dove la pubblicazione di webGIS è tipicamente l'ultimo passaggio della ricerca, come in (Fiorini et al., 2022). Utilizzando un sito web con specifiche credenziali per l'accesso, persone non esperti GIS posso accedere al *back end* per modificare i dati, mentre qualsiasi utente può visualizzare i dati sul *front end*, senza doversi autenticare. Nel sistema webGIS, un esperto GIS può accedere al geo-DB - con apposite credenziali - utilizzando un software GIS per modificare il dato spaziale. Allo stesso tempo, qualsiasi utente - senza doversi autenticare - può visualizzare il webGIS grazie ad un browser qualsiasi. I dati sono conservati in un unico geo-DB; il software GIS e i server GIS e web sono connessi al geo-DB e hanno accesso ad esso per visualizzare i dati e modificarli. In questo modo, l'inconsistenza dei dati è scongiurata e la procedura sviluppata garantisce che lo stesso risultato sia ottenuto quando si modifica un dato e sia visibile in tempo reale ovunque, indipendentemente da dove avviene la modifica (a livello di DB, GIS, webGIS o sito web).

4. Design e creazione del webgis 2d/3d

Il webGIS progettato è uno strumento semplice che fornisce una panoramica di tutti i *Built Environment Objects* e *Components* costruiti per l'esposizione, assistendo l'utente nella localizzazione e contestualizzazione di ogni elemento nello spazio 2D/3D del Parco del Valentino. Il webGIS – inserito nel nuovo sito web - opera come punto di accesso per le architetture, fornendo solo alcune informazioni e strumenti base di ricerca per non esperti GIS; l'analisi approfondita è lasciata alle pagine del nuovo sito web. Il sito web preesistente ha un'interfaccia datata e necessita di essere ricostituito; il contenuto non è organicamente suddiviso e presentato e gli strumenti di visualizzazione delle immagini e dei libri sono obsoleti. Attualmente il nuovo sito web è in fase di sviluppo, a partire dal 27 Ottobre 2023 verrò reso pubblico e sostituirà quello già esistente https://italyworldsfairs.org/; una video-anteprima del nuovo sito web è visibile a https://youtu.be/0FNLKIhIH5s. Il webGIS è creato seguendo i tre passaggi seguenti:

1. Preparazione dell'ambiente e dei dati,
2. Connessione a ArcGIS Enterprise e condivisione online,
3. Creazione dell'applicazione webGIS 2D/3D.

4.1 Preparazione dell'ambiente e dei dati

Dopo aver confrontato molte mappe cartografiche e fonti testuali, una mappa dell'area espositiva (
Figura 2) e una della città di Torino sono state selezionate e georiferite in ambiente GIS. Successivamente, l'impronta 2D di *Built Environment Objects* è stata ridisegnata digitalmente a partire dalla mappa espositiva, mentre gli isolati della città di Torino nel 1911 sono ricostruiti sulla base della cartografia della città di Torino.

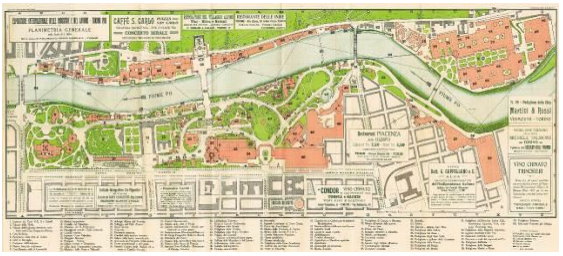


Figura 2. Mappa dell'esposizione del 1911 (CDC, CDC-TM-0001) da Spreafico et al., 2023.

Il *Digital Terrain Model* (DTM) e un'ortofoto rappresentano lo stato attuale del Parco del Valentino e integrano le entità del geo-DB dedicato a Torino 1911. Come suggerito da Abualdenien (Abualdenien & Borrmann, 2022), LoD (*Level of Detail*) è più appropriato per l'archiviazione e la visualizzazione dei modelli urbani e in questa ricerca LoD è preferito al *Level of Development* (LOD), sviluppato per le nuove costruzioni nel campo dell'industria *Architecture, Engineering, and Construction* (AEC). Tre tipi di elementi sono disponibili per creare un webGIS 3D: *polygonal feature class*, *multi-patch feature class*, or *3D object*. Le geometrie 3D possono essere generate facilmente estrudendo *polygonal feature class* 2D in

base a un campo numerico che ne definisce l'altezza. Il modello 3D è modificabile online semplicemente inserendo un valore differente per l'altezza, di modo che non siano necessarie competenze di modellazione 3D. Un modello 3D così concepito è idoneo per una rappresentazione LoD 1. Con *multi-patch feature class*, geometrie complesse possono essere create per raggiungere il LoD 2 e oltre, ma sono richieste competenze di modellazione 3D; inoltre, le geometrie non possono essere modificate online senza API per JavaScript. I *3D objects* sono simili ai *multi-patches*, ma dispongono di più campi per gestire origine, rotazione e scala di ogni elemento. Lo scopo del geo-DB e del webGIS per *Turin 1911* è quello di fornire posizione e dimensione di ogni elemento 3D nell'area espositiva. È necessaria una soluzione semplice per un LoD 1, dato che per molti elementi l'altezza è mancante e la ricerca è in corso. Perciò, *polygonal feature class* risulta essere la tipologia più idonea. Un campo numerico in *Built Environment Objects* e *Components* definisce l'altezza. Modelli 3D sono visualizzati come estrusione di geometrie 2D in ArcGIS Pro. Nel webGIS le geometrie raffiguranti il contesto sono prive degli interni e gli interni hanno LoD 1, seguendo lo schema LoD proposto da Tang (Tang et al., 2018). Una mappa 2D è generata in ArcGIS Pro e contiene gli isolati urbani di Torino, oltre a tutte le geometrie, tabelle, relazioni e la mappa storica dell'area espositiva memorizzate nel geo-DB. La base cartografica 2D è ruotata seguendo l'orientamento della mappa storica.

4.2 Connessione a ArcGIS Enterprise e condivisione online

Due soluzioni GIS commerciali della ESRI sono state testate per la condivisione dei dati, ArcGIS Online e ArcGIS Enterprise. Un webGIS che punta direttamente al geo-DB non può essere creato solo con un account ArcGIS Online. Perciò, l'account ArcGIS Enterprise è stato utilizzato per registrare la connessione al geo-DB (.sde file) con ArcGIS server sul portale ArcGIS Enterprise; successivamente, il contenuto è stato pubblicato come *Web Feature Service* (WFS) o *Web Map Service* (WMS) puntando direttamente al geo-DB. Quando si pubblicano su un server GIS dati contenuti in un geo-DB, sono disponibili due tipologie di caricamento: *registered data* e *copied data.* Nel caso di *registered data*, i dati sono e le relazioni visualizzate sono quelli memorizzati nel geo-DB e il loro aggiornamento è visibile in tempo reale. Nel caso di *copied data*, si tratta di una copia dei dati su server GIS eseguita nel momento della pubblicazione online, perciò la connessione al geo-DB viene persa. La modifica dei dati può essere abilitata sia per *registered data* che per *copied data*, ma nel caso in cui una modifica viene effettuata su *copied data*, i dati non sono modificati nel geo-DB perché non c'è connessione ad esso. Al contrario, se una modifica è applicata a *registered data*, tale modifica è visibile in tempo reale nel geo-DB. Entrambe le modalità sono state testate per creare un'applicazione webGIS. Nel caso di *registered data*, le geometrie non sono sempre caricate nel *Map Viewer* di ESRI. Spesso un messaggio riporta un errore nel caricamento dei dati, rendendo impossibile creare un webGIS basato su tali dati. Quindi, è stata preferita l'opzione *copied data*. La mappa storica dell'area espositiva è pubblicata come *copied data* e resa disponibile come *Web Map Tile Service* (WMTS); di esso è stata creata una cache con scale predefinite e corrispondenti riquadri, di modo che la sua visualizzazione sia più rapida. *Built Environment Objects* e *Components* sono condivisi come dati copiati in un solo WFS, mentre *City Blocks of Turin 1911* è pubblicato come singolo WFS. Tale soluzione è preferita perché consente la creazione di un'applicazione web affidabile e con rapida visualizzazione dei dati. Con l'opzione *copied data*, la mappa storica dell'area espositiva ha una dimensione di 4.56 GB e tutte le geometrie sono rapidamente visualizzate online, dimostrazione che immagini pesanti georiferite e dataset con numerose geometrie possono essere facilmente condivise tra esperti utilizzando un applicativo webGIS. Siccome si tratta di copie, la funzione di modifica è infruttuosa e perciò non è stata utilizzata nel webGIS realizzato. I livelli WFS possono essere sovrascritti - quando necessario – per mantenere aggiornato il contenuto del webGIS, tenendo presente che, se la struttura dei dati varia, i livelli non possono essere sovrascritti ma devono essere ripubblicati.

4.3 Creazione dell'applicazione webGIS 2D/3D

Per sviluppare un'applicazione web o un sito internet, diverse soluzioni sono disponibili online su ArcGIS Online e ArcGIS ArcGIS Enterprise. Tra le varie proposte, *Web App Builder* (WAB) e *Experience Builder* sono state utilizzate all'interno della ricerca. Si tratta di due prodotti ESRI per creare applicazioni web 2D e 3D per integrare dati spaziali senza dover scrivere codice. Una volta che i dati sono pubblicati sul portale ArcGIS Online o Enterprise, questi possono essere visualizzati online con *Map viewer* o *Map Viewer Classic*, due interfacce online fornite da ESRI. *Map Viewer* è la nuova versione di *Map Viewer Classic* ma quest'ultima non dispone degli stessi strumenti della nuova versione (e.g. la gestione della rotazione della mappa e la configurazione dei pop-up). Tuttavia, se una mappa in ArcGIS è pubblicata con una rotazione e visualizzata con *Map Viewer Classic*, appare non correttamente orientata perché la rotazione non è supportata nella versione *Classic* (
Figure 3 alto). Al contrario, la stessa mappa in *Map Viewer* è mostrata correttamente (
Figure 3 basso).

Figure 3. Mappa visualizzata con rotazione scorretta in *Map Viewer Classic* (alto) e corretta in *Map Viewer* (basso), su mappa di base *World Topographic Map* (ESRI).

La rotazione della mappa è necessaria per mostrare la cartografia storica che non è orientata in modo corretto. Siccome WAB non supporta tutte le opzioni disponibili in *Map Viewer* - come la rotazione della mappa e la configurazione dei pop-up -, *Map Viewer Classic* e WAB sono stati abbandonati in favore di *Map Viewer* e *Experience Builder*. Siccome *Map Viewer* su *ArcGIS Online* e *ArcGIS Enterprise* mostra opzioni diverse (la rotazione e la configurazione dei pop-up non sono disponibili su *Enterprise*), *ArcGIS Online* è preferita, anche perché si è deciso di lavorare con *copied data* su server e non *registered data*. Una volta che la mappa storica e le entità sono caricate su server, a partire da queste è creata una mappa 2D in *Map Viewer* su ArcGIS Online, dove la rotazione della mappa è correttamente gestita. I pop-up sono configurati per *Built Environment Objects* e *Components* con dati recuperati dai relativi campi per ciascuna geometria (Titolo, un'immagine, link alla singola pagina web con descrizione completa, Titolo alternativo, Tipologia di oggetto/lavoro, Descrizione del creatore, e Codice nella mappa del 1911). Una cartografia di

base è stata scelta, mentre gli stili dei livelli (colori e trasparenze) ed etichette sono preimpostati in ArcGIS Pro e conservati in *Map Viewer*. Una visualizzazione 3D è creata con *Scene Viewer*. Il modello 3D è gestito come *drawing style* grazie all'estrusione 3D basata sul campo *Elevation*. Dopo la preparazione dei servizi web, della mappa e della scena 3D, il webGIS è creato usando *ArcGIS Experience Builder* inserendo widget configurabili. Il webGIS (
Figura 4) è visibile al link https://arcg.is/1HfSqG.

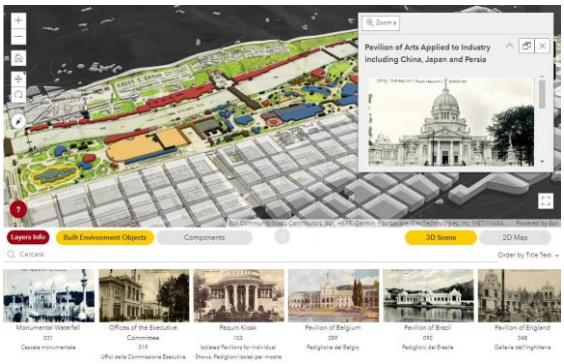


Figura 4. WebGIS 2D/3D, da Spreafico et al., 2023.

Le mappe 2D e 3D sono sincronizzate di modo che, quando un utente passa da una all'altra, la porzione inquadrata e lo zoom rimangono gli stessi. La mappa mostra la carta storica dell'esposizione e le geometrie delle entità *Components*, *Built Environment Objects* e *City Blocks of Turin 1911*. Due liste sono concepite come gallerie di immagini per mostrare tutti i *Components* e *Built Environment Objects* catalogati nel geo-DB. Le liste sono sincronizzate con le mappe 2D e 3D; nelle liste sono mostrati solo gli elementi inquadrati nella mappa 2D/3D, cosicché quando l'utente ingrandisce la mappa, solo gli elementi inquadrati in quel momento appaiono nella lista corrispondente. Viceversa, quando un filtro è applicato alla lista, solo gli elementi risultanti nella lista compaiono sulla mappa 2D/3D. Diversi strumenti (ricerca, selezione nella mappa 2D/3D, elenco dei livelli e legenda, informazioni sui livelli, bottone informativo, navigazione) completano il webGIS. La barra di ricerca consente la ricerca testuale libera e insiste sui campi *Title Text* e *Alternate Title Text* di *Built Environment Objects* e *Components*. Un filtro consente di mostrare gli elementi *Built Environment Objects* secondo il campo *Object/Work Type* (e.g. Padiglioni nazionali, Uffici, Strutture ricreative, …). Inoltre, nel webGIS è possibile attivare la geo-localizzazione; grazie a questa opzione, quando un utente cammina nel Parco del Valentino con un tablet o uno smartphone, può osservare la sua posizione reale – ottenuta con il GNNS del *device* utilizzato – e vedere dove si colloca rispetto alla mappa storica (**Figura 5**). Una volta creato il webGIS e personalizzato per la versione desktop, le configurazioni automatiche per dispositivi portatili di dimensione media (tablet) e ridotta (smartphone) sono state verificate e configurate manualmente prima della pubblicazione.

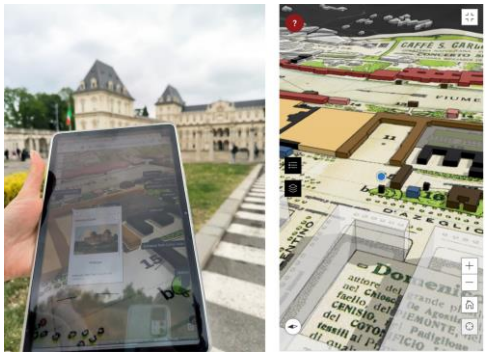


Figura 5. Utilizzando un tablet (sinistra), la posizione dell'utente è identificata sul webGIS (punto blu) nel Parco del Valentino (destra), da Spreafico et al., 2023.

5. Design e creazione delle web app bim-gis

Planimetrie, prospetti e sezioni di alcuni *Built Environment Objects* sono stati collezionati perché riportano la forma e dimensione delle strutture. Modelli 3D sono stati creati per alcuni *Built Environment Objects*. La ricostruzione basata solo su fotografie non è applicabile perché sono disponibili poche immagini per ciascuna struttura, sono a bassa risoluzione e inquadrano solo le porzioni di edificio più interessanti. I modelli 3D sono stati generati seguendo i disegni tecnici, comparati con le fotografie storiche per verificare la corrispondenza con le strutture realmente costruite, come riportato da Einaudi et al., 2020. Modelli dettagliati sono stati creati con LoD 3 per gli esterni e LoD 0 per gli interni, seguendo lo schema LoD di Tang et al., 2018. Le applicazioni web prendono i dati dal geo-DB, integrano modelli BIM e altri prodotti digitali per contestualizzare gli elementi 3D nello spazio. Come per il webGIS, le web app saranno integrate nel nuovo sito web e accompagnate da pagine dedicate per la catalogazione di ciascun *Built Environment Object*. Le applicazioni web GIS-BIM sono sviluppate seguendo i passaggi:

1. Georeferenziazione e pubblicazione del modello BIM,
2. Creazione e pubblicazione del contesto attuale: il DTM e l'ortofoto,
3. Creazione dell'applicazione web BIM-GIS.

5.1 Georeferenziazione e pubblicazione del modello BIM

5.1.1 Un primo test è stato eseguito con un file Revit (*.rvt*) del Padiglione del Siam del peso di 34.1 MB (
5.1.2 **Figura 6** sinistra) – il file più leggero – e un secondo test con il Padiglione della Città di Torino (
Figura 6 destra) che con i suoi 256.9 MB è il file *.rvt* più pesante tra i modelli BIM finora creati per *Turin 1911*.

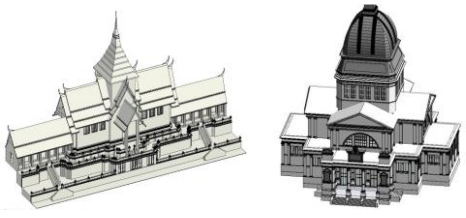


Figura 6. Padiglioni del Siam (sinistra) e della Città di Torino (destra) ricostruiti digitalmente in Revit.

I modelli hanno coordinate arbitrarie; siccome finora non sono stati identificati resti fuori suolo o nel sottosuolo, l'origine del sistema di riferimento globale e la rotazione sono calcolati per ciascun modello usando la geometria nella mappa storica georiferita in ambiente GIS. Il Sistema WGS84UTM32N - EPSG 32632 – è preferito al Web Mercator – EPSG 3857 –

perché il primo è più adatto a minimizzare le distorsioni in aree locali, come il Parco del Valentino. I valori di origine e rotazione sono impostati nel software BIM; successivamente i modelli sono salvati e caricati nel software GIS, usando il metodo di integrazione da BIM a GIS e usando la procedura di georeferenziazione in Revit e di importazione in ArcGIS proposta in Sammartano et al., 2021. I valori che definiscono origine e rotazione del progetto BIM sono impostati in Revit e il file *.rvt* viene salvato. Il file *.prj* contenente il sistema di coordinate e le informazioni di proiezione (EPSG 32632) è associato al file *.rvt*. Il file *.rvt* è caricato in ArcGIS Pro che legge il sistema di coordinate e le informazioni di proiezione dal file associato; tutte le geometrie sono correttamente visualizzate e il file viene letto come tipo di dato BIM e suddiviso nelle famiglie di Revit. Dal modello BIM caricato in ArcGIS Pro, un file *.slpk* viene generato in ArcGIS Pro. In pochi minuti un file del peso di 6 MB è generato per il Padiglione del Siam e uno di 112 MB per la Città di Torino. Infine, i file *.slpk* sono caricati su ArcGIS Online per creare lo *scene layer*. Lo *scene layer* mostra l'intero modello BIM e la struttura del BIM è mantenuta, perciò ogni famiglia di Revit può essere accesa e spenta, i piani possono essere selezionati, e ogni elemento può essere interrogato singolarmente.

5.2 Creazione e pubblicazione del contesto attuale: il DTM e l'ortofoto

Il DTM è derivato dalla Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) alla scala 1:10000 con una risoluzione di 10 metri e accuratezza di 5 metri, il sistema di riferimento è congruente a quello del modello BIM (EPSG 32632). Il DTM è impostato come *ground source* in ArcGIS Pro al posto della mappa topografica mondiale. L'elevazione della superficie usata come terreno definisce l'altitudine di base, da questa viene estrusa l'altezza di tutte le geometrie che giacciono sul terreno; se il terreno viene nascosto, gli elementi sono collocati ad altitudine 0 m, sia in ArcGIS Pro che Online. Il DTM in WGS84UTM32N è usato come *custom elevation layer* in *ArcGIS Online scene viewer* perché le mappe base di ESRI sono in Web Mercator e non possono essere usate con il sistema WGS84UTM32N, perché l'*elevation layer* deve avere lo stesso sistema di riferimento dei layer. Per creare un *custom elevation layer*, uno specifico schema di *tiles* deve essere generato. Il DTM con cache (*.tpk*) è stato pubblicato come *elevation layer* su ArcGIS Online, dove le *tiles* sono caricate per ogni scala e occupano uno spazio totale di 938.75 MB. I prodotti metrici 3D dell'attuale Parco del Valentino sono creati a partire dall'acquisizione aerea fotogrammetrica ad un'altitudine di 1'470 m. Dall'intero dataset, 23 fotogrammi nadirali (14'790x23'010 pixel e 978 MB per ciascun file *.tif*) – acquisiti con una camera UltraCam Eagle Mark 2 f100 con una focale di 100 mm e sensore di 4.6 µm pixel – sono stati selezionati e processati in Agisoft Metashape. 14 Ground Control Points (GCPs) e 7 Control Points (CPs) - misurati con sistema GNSS *Real Time Kinematic* (RTK) – sono stati impiegati nell'elaborazione. La precisione a termine del processo di elaborazione è risultata essere di circa 5 cm e l'accuratezza di 11 cm; l'area totale coperta è di circa 3 km^2 e il *Ground Sampling Distance* (GSD) è pari a 7.56 cm/pixel. Un'ortoimmagine è stata realizzata con una dimensione del pixel di 15 cm, ottenendo un file *.tif* di 14'856x20'386 pixel e 1.2 GB di peso. L'ortoimmagine è stata caricata in ArcGIS Pro come file raster e pubblicata online come WMTS con lo stesso schema di cache di *tiles* del DTM.

5.3 Creazione dell'applicazione web BIM-GIS

Come punto di partenza una *local web scene* vuota viene creata su ArcGIS Online, poi il DTM è impostato come *elevation layer*. Il DTM, l'ortoimmagine del parco del 2018 e la mappa espositiva storica – precedentemente pubblicata online come WMTS con lo stesso schema di cache di *tiles* del DTM – sono visualizzati come WMTS nella *local web scene*. *Components*, *Built Environment Objects* e *City Blocks of Turin 1911* sono visualizzati come WFS in EPSG 3857 e automaticamente proiettati in EPSG 32632. I due *scene layers* contenenti i modelli BIM sono anch'essi caricati. In modo analogo a quanto realizzato per la creazione del webGIS, l'applicazione web BIM-GIS è creata in *Experience Builder*. L'app del Padiglione del Siam è visibile all'indirizzo https://arcg.is/9u9uD0 (**Figura 7** alto), e quella del Padiglione della Città di Torino all'indirizzo https://arcg.is/jin0O (**Figura 7** basso). Il *template* selezionato è editato, la *web scene* creata inserita, i *bookmarks* impostati, gli strumenti di navigazione e strumenti 3D (e.g. misura e controllo della luce del sole) sono anch'essi inseriti. I *bookmarks* forniscono uno strumento rapido di visualizzazione per viste preconfigurate. In esse, i livelli possono essere selezionati e l'orientamento della camera impostato a piacimento per creare viste come quelle raffiguranti la facciata principale dell'edificio, una vista generica, e una vista con l'ortoimmagine del 2018. Come realizzato per il webGIS, l'opzione di geolocalizzazione è impostata per consentire all'utente di visitare il Parco del Valentino e scoprire la propria posizione nell'applicazione web BIM-GIS. Il livello *Built Environment Objects* propone una contestualizzazione generale nell'esposizione, ma l'elemento per il quale il modello BIM è disponibile è nascosto utilizzando un codice *Structured Query Language* (SQL). Come sviluppato per il webGIS, anche in questo caso sono state create le configurazioni per tablet e smartphone. Singole web app con lo stesso design sono create per ogni *Built Environment Object*. Il codice di integrazione è generato per ciascuna di esse e copiato nel campo *3D Model* nell'entità *Built Environment Object* del geo-DB, per poi integrare le web app nel sito web.

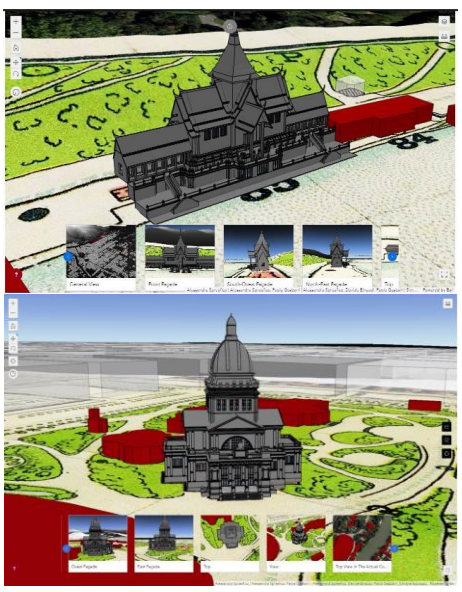


Figura 7. Applicazione WebGIS con modello BIM integrato rispettivamente del Padiglione del Siam (alto) e della Città di Torino (basso), da Spreafico et al., 2023.

6. Analisi

Il webGIS e le applicazioni web GIS-BIM sono strumenti interattivi per l'interrogazione e la navigazione digitale. Quando una geometria è interrogata nel webGIS, un pop-up con le relative informazioni compare mostrando un link che conduce alla pagina web specifica del *Built Environment Object* interrogato (
Figura 8). In alternativa, l'utente può navigare la galleria di immagini o cercare un elemento dalla lista e, una volta trovato e selezionato, la mappa 2D o 3D visualizzata in quel momento in automatico si colloca sulla geometria corrispondente che si illumina e compare il pop-up. Un webGIS progettato in questo modo, rappresenta non solo uno strumento di navigazione, ma anche di ricerca, capace di svelare connessioni nascoste e assistendo l'utente nello studio dell'Esposizione. Per esempio, un filtro può essere applicato per mostrare i *Built Environment Objects* secondo il *Object/Work Type* cosicché, ad esempio, possono essere mostrati solo i Padiglioni Nazionali, questi sono principalmente allineati sulla riva destra del fiume Po o collocati sulla riva sinistra come l'Ungheria e i piccoli padiglioni di India, Bulgaria e Russia, fanno eccezione la Gran Bretagna e la Turchia (
Figura 9). L'integrazione delle immagini storiche con una rappresentazione semplificata 2D/3D degli elementi favorisce la scoperta di nuovi edifici, come nel caso del Bar internazionale Valcauda. Una piccola geometria sconosciuta, ma disegnata nella mappa storica, è identificata grazie al webGIS come Bar Valcauda perché è raffigurata alla destra del Padiglione della Turchia in una fotografia storica (
Figura 10). I livelli possono essere nascosti o mostrati; la loro trasparenza può essere impostata per osservare mappe o ortofoto sovrapposte (come la mappa del 1911 e l'ortofoto del 2018) con il modello BIM posto sul DTM (
Figura 11).

Figura 8. Applicazione web BIM-GIS integrate nella pagina web individuale del nuovo sito web, da Spreafico et al., 2023.

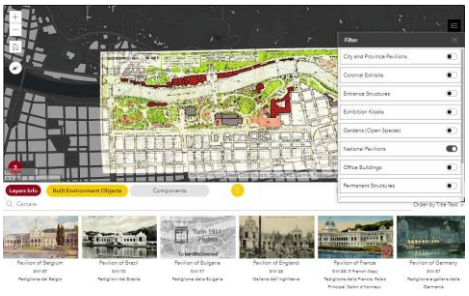


Figura 9. Filtro applicato sulla mappa 2D che mostra solo i Padiglioni nazionali, da Spreafico et al., 2023.

Figura 10. Posizione del Bar Valcauda identificata e geometria georiferita sulla mappa storica grazie a immagini storiche caricate nel webGIS, da Spreafico et al., 2023.

Figura 11. BIM del Siam con mappa dell'Esposizione di Torino 1911 in semi trasparenza e ortofoto del 2018 su DTM, da Spreafico et al., 2023.

7.

8. Discussion and conclusions

La documentazione del Patrimonio effimero, come le Esposizioni Mondiali, è cruciale per la loro conservazione virtuale. Specifiche linee guida dovrebbero essere condivise tra le varie istituzioni coinvolte in progetti di ricerca. Questo articolo dimostra come i webGIS 3D possono essere integrati facilmente in siti web per lo studio nelle scienze umanistiche e la documentazione del Patrimonio. Sfruttando le caratteristiche dei moderni software ed hardware, compiti svolti manualmente sono accelerati e gli archivi fisici vengono espansi. Prodotti metrici 3D e 2D (come ortofoto e modelli BIM) possono essere integrati in un webGIS, consentendo la visualizzazione di strutture ricostruite digitalmente e contestualizzate negli ambienti storici e attuali. Concepito in questo modo, un 'archivio digitale' non è solo la copia digitale di materiale fisico ma un efficace strumento di ricerca. Nel caso di *Turin 1911*, modelli 3D (LoD 3) – basati su documenti e controllati metricamente - dimostrano un alto potenziale perché raffigurano le geometrie di oggetti effimeri, fornendo ad altri studiosi una più ampia comprensione. Guardare ad architetture del passato con modelli 3D navigabili e interrogabili, rende il Patrimonio più interessante e percepibile. Sebbene pesanti, i BIM possono essere caricati online e navigati facilmente, come per il Padiglione della Città di Torino. In generale, gli archivi online forniscono una visualizzazione 2D dei documenti e la ricerca comincia inserendo parole chiave. Mentre, sfruttando webGIS e applicazioni web, la ricerca può iniziare navigando nello spazio 2D o 3D. Strumenti intelligenti usati comunemente - come tablet e smartphone – possono favorire nuove scoperte. La geolocalizzazione fornita da tali strumenti consente all'utente di localizzare la sua posizione nel webGIS e nelle applicazioni web, in modo da aiutare l'utente a confrontare la sua posizione fisica con la navigazione virtuale nell'ambiente ricostruito. La spazializzazione delle architetture sulla cartografia storica

georiferita favorisce la scoperta di dinamiche e scelte meno palesi, come la distribuzione dei padiglioni nazionali lungo la riva del fiume. Molte difficoltà riscontrate nel corso della ricerca sono di natura tecnica e dipendono dal software utilizzato. In generale, le soluzioni commerciali, come quelle proposte da ESRI, richiedono meno esperienza in *Information and Communication Technology* (ICT). Il compito più difficile riguarda l'individuazione della procedura e dei software da impiegare, dalla modellazione 3D alla visualizzazione online, passando dalla georeferenziazione dei modelli e dalla definizione del sistema di coordinate, evitando problemi nella conversione dei file. In questa ricerca, la combinazione di Revit e ESRI ha consentito di integrare con successo i modelli BIM nel webGIS. Tuttavia, alcuni problemi sono legati a incompatibilità tra prodotti della stessa ESRI. Attualmente, la connessione diretta del webGIS al geo-DB è troppo lenta e non consente una visualizzazione efficiente delle geometrie. Infine, mantenere il sistema aggiornato può essere impegnativo. Gli aggiornamenti software sono rilasciati annualmente e le compatibilità tra i diversi programmi devono essere verificate prima di aggiornare l'intero sistema. Spesso, se manca un piano di manutenzione, le piattaforme diventano non più disponibili e quello che è stato creato viene perso, come ad esempio nel caso del progetto Maya. Il seguente articolo dimostra come i webGIS 3D integrati con modelli BIM possono assistere i ricercatori nelle discipline umanistiche ed altri esperti a raccogliere, catalogare, condividere, analizzare e spazializzare le informazioni. Un webGIS 3D, integrato in un sito web e basato su un unico geo-DB, diventa non solo un archivio digitale, ma anche un ambiente di lavoro sempre aggiornato dove la ricerca collaborativa ha luogo e i risultati sono immediatamente visibili in una maniera semplice. L'accesso libero ai dati è concesso a ciascuno da qualsiasi parte del mondo, proteggendo e divulgando la conoscenza del Patrimonio. Inoltre, la procedura qui presentata può essere replicata e la struttura dei dati può essere adattata ad altri casi studio, come altre Esposizioni Mondiali.

9. Contributi, conflitti di interessi e ringraziamenti

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

Ringraziamenti
L'autrice ringrazia i gruppi IT di *School of Arts and Humanities* e *Data and GIS Lab* di UC San Diego per il supporto IT nello sviluppo del webGIS. Il nuovo sito web è stato sviluppato da 3Juice (https://www.3juice.com/).

Bibliografia

Abualdenien, J., & Borrmann, A., 2022: Levels of Detail, Development, Definition, and Information Need: a Critical Literature Review. *Journal of Information Technology in Construction*, *27*, 363–392. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.018

Bagnolo, V., Pirinu, A., Argiolas, R., & Cera, S., 2022: From drawing to building and back. Digital media to enhance architecture archives heritage. *DIALOGHI / DIALOGUES • visioni e visualità / visions and visuality*. FrancoAngeli srl. https://doi.org/10.3280/oa-832-c131

Bitelli, G., Gatta, G., Guccini, A.-M., & Zaffagnini, A. (2019). GIS and Geomatics for archive documentation of an architectural project: The case of the big Arc of entrance to the Vittorio Emanuele II Gallery of Milan, by Giuseppe Mengoni (1877). *Journal of Cultural Heritage*, 38, 204–212. https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.01.002

Breunig, M., Bradley, P. E., Jahn, M., Kuper, P., Mazroob, N., Rösch, N., Al-Doori, M., Stefanakis, E., & Jadidi, M., 2020: Geospatial Data Management Research: Progress and Future Directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(2), 95. https://doi.org/10.3390/ijgi9020095

Chiabrando, F., Sammartano, G., Spanò, A., & Spreafico, A., 2019: Hybrid 3D Models: When Geomatics Innovations Meet Extensive Built Heritage Complexes. *ISPRS International Journal of Geo-Information 2019, Vol. 8, Page 124*, *8*(3), 124. https://doi.org/10.3390/IJGI8030124

Della Coletta, C. (2006). *World's Fairs Italian Style: the Great Exhibitions in Turin and their Narratives, 1860-1915*. University of Toronto Press, Toronto.

Einaudi, D., Spreafico, A., Chiabrando, F., & Della Coletta, C., 2020: From Archive Documentation to Online 3D Model Visualization of No Longer Existing Structures: the Turin 1911 Project. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B2-2020*, 837–844. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-837-2020

Fiorini, G., Friso, I., & Balletti, C., 2022: A Geomatic Approach to the Preservation and 3D Communication of Urban Cultural Heritage for the History of the City: The Journey of Napoleon in Venice. *Remote Sensing*, 14(14), 3242. https://doi.org/10.3390/rs14143242

Münster, S., Apollonio, F. I., Bell, P., Kuroczynski, P., Di Lenardo, I., Rinaudo, F., & Tamborrino, R. (2019). Digital Cultural Heritage Meets Digital Humanities. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2/W15*, 813–820. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-813-2019

Pantaloni, M., Console, F., Congi, M. P., & Ventura, R., 2021: The historical geological cartography: from digital archive to WebGIS environment. *Abstracts of the ICA*, 3, 230. https://doi.org/10.5194/ica-abs-3-230-2021

Sammartano, G., Avena, M., Cappellazzo, M., & Spanò, A. (2021). Hybrid GIS-BIM Approach for the Torino Digital-Twin: the Implementation of a Floor-Level 3D City Geodatabase. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B4-2021*, 423–430. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-423-2021

Sang, K., Piovan, S., & Fontana, G. L., 2021: A WebGIS for Visualizing Historical Activities Based on Photos: the Project of Yunnan–Vietnam Railway Web Map. *Sustainability*, 13(1), 419. https://doi.org/10.3390/su13010419

Spreafico, A., & Della Coletta, C., 2021: Towards Online 3D Archive of Historical Site: the Turin 1911 World's Fair. *Proceedings of the Joint International Event 9th ARQUEOLÓGICA 2.0 & 3rd GEORES*, 487–490. http://ocs.editorial.upv.es/index.php/arqueologica20/arqueologica9/paper/view/12052 (accessed 31 Agosto 2023).

Spreafico, A., Chiabrando, F., and Della Coletta, C., 2023: 3D WEBGIS APPLICATIONS FOR DIGITAL HUMANITIES

STUDIES: THE TURIN 1911 PROJECT, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, 1501–1508, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1501-2023

Tang, L., Li, L., Ying, S., & Lei, Y., 2018: A Full Level-of-Detail Specification for 3D Building Models Combining Indoor and Outdoor Scenes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *7*(11), 419. https://doi.org/10.3390/ijgi7110419

von Schwerin, J., Richards-Rissetto, H., Remondino, F., Agugiaro, G., & Girardi, G. (2013). The MayaArch3D Project: A 3D WebGIS for Analyzing Ancient Architecture and Landscapes. *Literary and Linguistic Computing*, *28*(4), 736–753. https://doi.org/10.1093/llc/fqt059

Wei, T., Sang, Y., Chen, S., Wang, L., Wang, R., Wang, J., Huang, Q., & Wang, J., 2022: WebGIS approach of entity-oriented search to visualize historical and cultural events. *Digital Scholarship in the Humanities*, *37*(3), 868–879. https://doi.org/10.1093/llc/fqac002

MONITORAGGIO DEI CAMBIAMENTI DEI GHIACCIAI UTILIZZANDO IMMAGINI SATELLITARI OTTICHE: IL CASO DEL GHIACCIAIO DEI FORNI

L. Ranaldi[1,*] , V. Belloni[1], M. Crespi[1,3]

[1] Divisione di Geomatica e Geodesia, DICEA, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia
ranaldi.lorenza@gmail.com, <valeria.belloni, mattia.crespi>@uniroma1.it
[3] Scuola Superiore di Studi Avanzati, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia

KEY WORDS: Glaciers monitoring, Digital Surface Models, Coregistration, Optical satellite images, UAV data.

ABSTRACT

I ghiacciai sono uno tra gli indicatori piu importanti del cambiamento climatico ed` e quindi necessario un costante monitoraggio` di questi sistemi per preservare il territorio. In questo studio, sfruttando tecniche di elaborazione satellitare ottica fotogrammetrica, si sono utilizzate stereo-coppie di immagini dai satelliti Ikonos-2 e Pleiades-HR per generare Modelli Digitali del Terreno (DSM)` del ghiacciaio dei Forni (gruppo Ortles-Cevedale, Italia) e calcolare le sue variazioni morfologiche tra il 2009 e il 2016. Sono stati inoltre utilizzati DSM generati da acquisizioni con drone (UAV), raccolti durante campagne estive tra il 2014 e il 2021, per avere a disposizione modelli ad altissima risoluzione sulla porzione terminale del ghiacciaio da utilizzare per un confronto con i dati satellitari. Per eseguire analisi morfologiche accurate, e stata applicata la coregistrazione tra i DSM per rimuovere` i bias tra questi dovuti ad inconsistenze nella georeferenziazione delle diverse coppie di immagini satellitari. Si e utilizzato` l'algoritmo di Nuth e Kaab, potendo ottenere un'accuratezza finale nell'allineamento dei DSM dell'ordine del metro. I risultati di variazione altimetrica successivamente ricavati dai DSM ottici si sono dimostrati coerenti con la variazione media annua del ghiacciaio suggerita da diverse analisi condotte con DSM UAV, confermando una perdita media di 5,00 m/a sulla lingua dei Forni nel periodo 2014-2016. Inoltre, sulla base di dati sia UAV che ottici, si e constatato che i cambiamenti climatici` stiano causando un'accelerazione nel processo di scioglimento, con valori medi stimati di 3,3 m/a nel periodo 2009-2013, 3,8 m/a nel 2009-2016 e 4,7 m/a nel 2009-2021 sulla zona della lingua. In conclusione, nonostante le limitazioni legate alle condizioni meteorologiche e al tempo di rivisita, si e potuto constatare che le immagini satellitari ottiche ad alta risoluzione possono` certamente essere utilizzate per stimare le variazioni morfologiche rilevanti dei ghiacciai considerando variazioni dell'ordine di m/a.

Glaciers are one of the most important indicators of climate change. Monitoring their evolution is, therefore, crucial for safeguarding the Earth's ecosystem. In this study, exploiting photogrammetric optical satellite processing techniques, we used image pairs from Ikonos-2 and Pleiades-HR satellites to generate Digital Surface Models (DSMs) of Forni Glacier (Ortles–Cevedale group, Italy) and compute its morphological variations between 2009 and 2016. In addition, we used DSMs generated from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) acquisitions collected during summer campaigns from 2014 to 2021 for comparison with very high-resolution DSMs on the terminal portion of the glacier including its tongue. To evaluate the glacier height loss, DSMs co-registration was applied to remove DSM biases due to inconsistencies in the georeferencing of the different satellite image pairs, considering the use of Nuth and Kaab algorithm. The DSM height differences after co-registration highlighted a final accuracy of one meter. Results from optical DSMs were consistent with the average annual variation of the glacier suggested by UAV DSMs analysis, confirming an average 5.00 m/y loss on the Forni tongue during 2014-2016. Furthermore, based on both UAV and optical data, melting trends have highlighted how climate change is causing an acceleration in the melting process, with values averaging 3.3 m/y in the period 2009-2013, 3.8 m/y in 2009-2016 and 4.7 m/y in 2009-2021. Our results suggested that despite the limitations related to weather conditions (e.g. cloud coverage) and time revisit, high-resolution optical satellite imagery can certainly be used to estimate relevant morphological variations of glaciers in the order of meter/years, offering the opportunity of monitoring large-scale areas.

1. Introduzione

Lo studio e il monitoraggio dei ghiacciai risultano di fondamentale importanza per mitigare la perdita di acqua, una risorsa fondamentale per l'ecosistema terrestre ma anche indispensabile per uso potabile civile, agricolo e industriale e la cui disponibilità viene oggi minacciata a causa delle conseguenze del cambiamento climatico. Nell'ottica di tale problematica, nel corso del tempo si sono sviluppate diverse tecniche di monitoraggio dei ghiacciai. In particolare, gli approcci geodetici e di telerilevamento si sono rivelati promettenti e affidabili per queste analisi grazie alla possibilità di generare modelli tridimensionali della superficie terrestre (Digital Surface Models – DSM). Nel caso specifico dei ghiacciai, quando si considerano DSM che rappresentano superfici glaciali relative a diversi anni, è possibile eseguire analisi di differenza tra i vari modelli, associati ai diversi periodi temporali, al fine di valutare la variazione morfologica sviluppata dal ghiacciaio nel corso degli anni considerati. In generale, le immagini satellitari e da drone (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) sono particolarmente adatte per la generazione e lo studio di DSM inerenti ad aree glaciali (Rita et al., 2020), poiché, a partire da queste, si possono sviluppare´ analisi di variazioni temporale senza la necessita di recarsi sul` luogo di indagine e di camminare quindi al di sopra della superficie glaciale, che risulta spesso di difficile accessibilità. Lo` scopo di questo progetto e stato quello di indagare il potenziale` dei dati ottici satellitari per la generazione di DSM in ambiente glaciale. Infatti, i dati satellitari ottici presentano un vantaggio importante rispetto al dato UAV, legato alla possibilità di acquisire informazioni su larga scala. A tal

* Autore corrispondente

proposito, anche se generalmente meno risolute rispetto alle acquisizioni con UAV, le immagini satellitari si possono considerare come uno strumento attendibile per la stima delle variazioni dell'intero apparato glaciale nel corso del tempo.

2. Caso studio

Le analisi condotte nel presente lavoro afferiscono ad un particolare sito di interesse, il Ghiaccio dei Forni, ubicato in Nord Italia, Lombardia, nel Parco Nazionale dello Stelvio. Tale ghiacciaio di tipo vallivo e considerato come uno tra i più importanti nel suo genere sul territorio italiano, con un'estensione pari a 10,83 km^2 (2012) ed una quota altimetrica che varia tra i 2600 e i 3670 metri (Azzoni et al., 2017). L'interesse nel suo monitoraggio non risiede soltanto in una prevenzione di tipo glaciologico, ma anche a causa della frequenza con cui sia d'estate che d'inverno viene visitato da turisti. In tal senso risulta necessario un costante monitoraggio per valutarne lo scioglimento e i fenomeni di caduta e instabilità dei massi` che potrebbero costituire un rischio per i turisti ma anche per l'equilibrio dell'intero apparato glaciale (Fugazza et al., 2018).

Figura 1. Ortofoto del Ghiacciaio dei Forni, Lombardia, Italia (2022).

Figura 2. Fotografia della parte terminale del Ghiacciaio dei Forni, Lombardia, Italia (2022).

3. Dati utilizzati

Al fine di condurre analisi di monitoraggio del Ghiacciaio dei Forni, sono state utilizzate immagini ottiche satellitari. Tra le varie piattaforme satellitari ad alta risoluzione, e stato selezionato un set di dati composto da una stereo-coppia acquisita dal satellite Pleiades e da due stereo-coppie del satellite Ikonos-2. Le immagini che compongono le stereo-coppie Pleiades sono state acquisite il 3 novembre 2016 e hanno un valore di risoluzione a terra, ovvero Ground Sample Distance (GSD), pari a 50 cm. Per quanto riguarda i dati acquisiti dal satellite Ikonos-2, sono state utilizzate due diverse coppie di immagini. Nel primo caso, sono state acquisite il 30 agosto 2009 e consistono in una stereo-coppia con un GSD di 80 cm. La seconda coppia e definita nuovamente da un GSD di 80 cm, ma` in questo caso la coppia e stata generata dalla combinazione di` immagini acquisite rispettivamente il 30 luglio (immagine 1) e il 2 agosto (immagine 2) 2013. Inoltre, grazie ad una collaborazione tra l'area di Geodesia e Geomatica di Sapienza Università di Roma e il Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali dell'Università Statale di Milano, si sono utilizzati direttamente; quindi, senza necessita di processamento fotogrammetrico dei dati nativi, DSM generati dall'acquisizione di dati UAV durante campagne estive, tra il 2014 e il 2021, al fine di eseguire un confronto con i DSM derivati dai dati satellitari ottici.

4. Metodologia

Per generare i modelli digitali a partire dalle immagini ottiche satellitari, si è implementato il metodo fotogrammetrico,` che consente di trasformare il dato bidimensionale, relativo all'immagine acquisita dal sensore del satellite, in un dato tridimensionale georeferenziato che risulta rappresentativo del territorio di interesse (Brown et al., 2005). Nel presente lavoro sono stati utilizzati due diversi software commerciali, Agisoft Metashape e Catalyst, al fine di valutare quale tra i due garantisse un grado di affidabilità del modello finale migliore. Confrontando il DSM accurato ottenuto dal drone nel 2016 e i rispettivi DSM ricavati con Metashape e Catalyst sulla base dei dati ottici del 2016, si e constatato che il modello digitale pi` u accurato e stato ottenuto tramite l'utilizzo di Agisoft Metashape, così come evidenziato in Tabella 1, che si e quindi scelto come` software di riferimento per il processamento dei dati (Fig. 3).

Software	media (m)	mediana (m)	RMSE (m)	std (m)	NMAD (m)
Metashape	5.73	5.69	5.83	1.06	0.89
Catalyst	7.89	7.91	8.03	1.52	1.17

Tabella 1. Risultati statistici della differenza tra il DSM UAV 2016 e i DSM Metashape 2016/DSM Catalyst 2016

A seguito dell'elaborazione dei modelli digitali, e stato necessario applicare una procedura di coregistrazione tra questi. Infatti, i DSM vengono generati a partire da immagini acquisiste con sensori diversi, tale per cui i dati nativi che devono esser elaborati possono presentarsi con diversi valori di accuratezza . In tal senso, le ricostruzione del modello digitale potrà essere affetta da errori, che conseguentemente producono una condizione di disallineamento nello spazio dell'ordine anche di alcuni metri tra i modelli considerati. Esistono ad oggi diverse procedure che consentono di eliminare questi bias, tramite trasformazioni di rototraslazione o traslazione che eliminano lo shift tra i modelli e permettono di ottenere quindi dei sistemi digitali che sono coerenti e sovrapposti nello stesso sistema di riferimento.

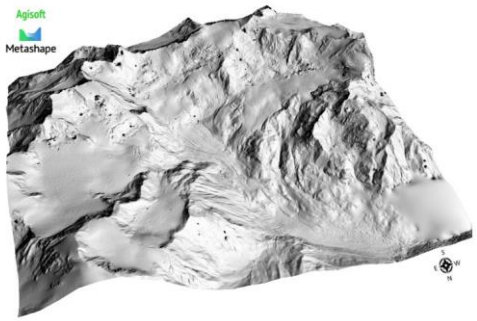


Figura 3. DSM della fronte del Ghiacciaio dei Forni (Agisoft Metashape).

Per eseguire questa operazione, generalmente si considera un DSM come riferimento e un secondo DSM da coregistrare sul riferimento scelto. In particolare, la fase di coregistrazione si esegue solo su aree stabili comuni ai due DSM, considerate invarianti nel tempo, come quelle rocciose ad esempio, escludendo invece quelle soggette a variazioni morfologiche come, ad esempio, le aree glaciali. Un esempio indicativo e riportato in Figura 4, dove si evidenziano in rosso i bordi dell'area del ghiacciaio che viene mascherata, e al di fuori di essa le aree rocciose stabili, considerando l'area interna al rettangolo verde come quella presa in esame rispetto all'intera disponibile.

Figura 4. Area di indagine (rettangolo verde) della lingua del Ghiacciaio dei Forni e maschera sul ghiacciaio (area rossa).

Nel caso in esame, si è fatto uso dell'algoritmo di coregistrazione sviluppato dai ricercatori Nuth e Kaab dell'Università di Oslo (Nuth and Kaab, 2011). Avendo a disposizione i DSM¨ accurati generati dal dato UAV, si è deciso dapprima di allineare` il DSM ottico satellitare del 2016, considerato come il riferimento per i dati satellitari, sul DSM dello stesso anno ottenuto tramite dati UAV. In seguito, il DSM ottico satellitare del 2016, allineato con i dati UAV più accurati, sì è utilizzato come riferimento per allineare i DSM ottici satellitari del 2009 e del 2013. L'implementazione del codice di coregistrazione si è sviluppata con linguaggio Python. A seguito di questo processo, è stato possibile eseguire diverse valutazioni sulle condizioni di scioglimento e variazione dello spessore del ghiacciaio, dapprima eseguendo analisi di differenza tra i modelli digitali e successivamente calcolando i trend di scioglimento di porzioni meno estese del ghiacciaio.

5. Risultati

5.1 Procedura di coregistrazione

Il primo importante risultato si è ottenuto a seguito del processo di coregistrazione, potendo ottenere un corretto allineamento tra i modelli. Infatti, già durante la prima fase si sono evidenziati shift di circa 5 metri tra il dato satellitare e quello da drone relativi all'anno 2016 sulle aree stabili, come rappresentato in Figura 5, nonostante i due modelli siano realizzati utilizzando immagini acquisite a soli due mesi di distanza. In tal senso, si sarebbero potute generare delle successive valutazioni errate sulle condizioni di variazione morfologica del ghiacciaio, influenzate appunto da tali errori dell'ordine di svariati metri. Grazie all'algoritmo di coregistrazione, tali bias sono stati eliminati, e applicando la stessa procedura anche per tutti i modelli satellitari ottici considerati, e stato possibile coregistrare tutti i DSM nello stesso sistema di riferimento con accuratezza media dell'ordine del metro.

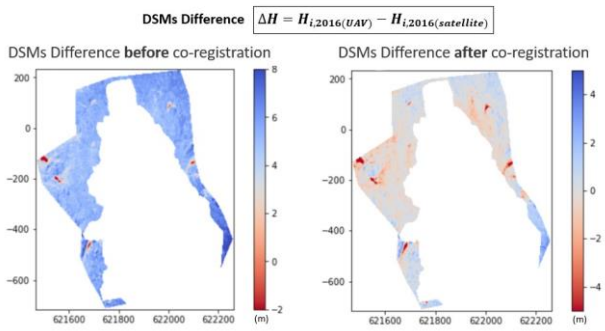


Figura 5. Differenze tra i DSM ottico e da drone (2016) prima e dopo la coregistrazione su aree stabili.

Coregistratione	media (m)	mediana (m)	RMSE (m)	std (m)	NMAD (m)
Prima	5.31	5.34	1.19	5.44	0.74
Dopo	0.01	0.00	1.11	0.72	0.72

Tabella 2. Risultati delle statistiche tra le differenze dei DSM ottico e da drone (2016) prima e dopo la coregistrazione su aree stabili

5.2 Variazione altimetrica del ghiacciaio

Successivamente ci si è incentrati sulle analisi di variazione morfologica. In primo luogo, una volta che i DSM sono risultati correttamente allineati tra loro, e stato possibile procedere con le operazioni di confronto tra questi per ottenere il dato di variazione altimetrica. Ad esempio, nel periodo 2009-2016 si sono registrati, sulla zona critica della lingua del Ghiacciaio dei Forni, dei valori di perdita di spessore dell'ordine di 40 metri (Figura 6). Questo risultato e in linea con il dato identificato da studi pregressi con drone, in cui è stato stimato un valore di perdita media annuale di 5 m sulla zona della lingua (Fugazza et al., 2018). Per zone che si trovano a quote più elevate, al di sopra della lingua del ghiacciaio, si sono registrati valori di perdita di 20-25 metri tra i 2600 e 2800 m.s.l.m., e circa 10 metri oltre i 3000 metri di quota sempre nei sette anni di riferimento. Tali valutazioni sono state poi ripetute anche per un periodo temporale più breve, tra il 2013 e il 2016, considerando le aree di analisi prima citate ed è stata nuovamente attestata una perdita di 5 m/anno nella lingua dei Forni e perdite invece meno consistenti

per quote più elevate. Inoltre, per evidenziare ancor meglio le perdite del ghiacciaio, si sono estratte alcune sezioni

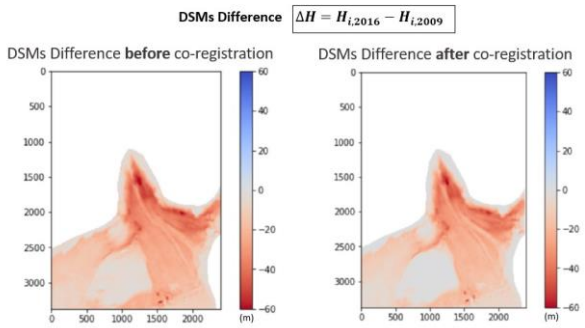


Figura 6. Differenze tra i DSMs ottici 2009-2016 prima e dopo la coregistrazione sulle aree del ghiacciaio.

longitudinali e trasversali (Figura 7) dai diversi DSM satellitari ottici disponibili. Queste hanno messo in risalto in maniera chiara da una parte, il fenomeno di riduzione di spessore delle aree ghiacciate, lì dove le sezioni presentano variazione, mentre dall'altra, la condizione di allineamento delle zone rocciose dovuto al processo di coregistrazione, evidente dove le sezioni risultano sovrapposte.

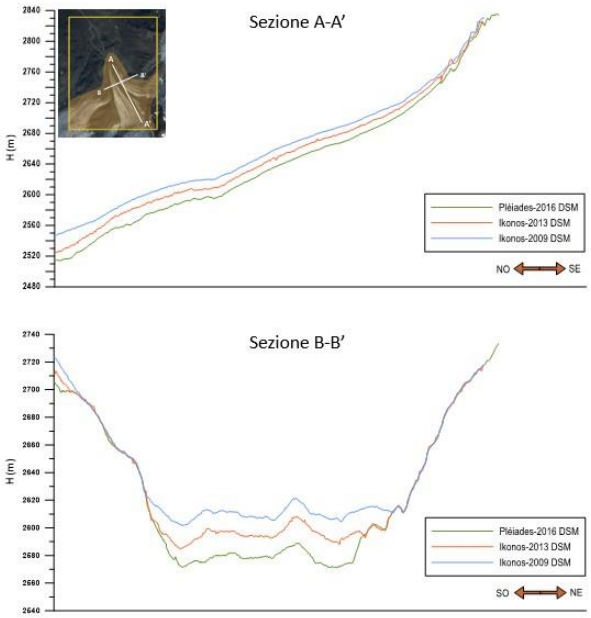


Figura 7. Profilo longitudinale (A-A') e trasversale (B-B') di sezioni sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni.

5.3 Trend di scioglimento del ghiacciaio

In seguito, si sono stimati i trend di scioglimento caratteristici di alcuni punti dell'apparato glaciale, al fine di valutare, seppur localmente, la modalità di evoluzione di questo fenomeno. Per le zone della lingua dei Forni si sono utilizzati sia dati da drone che satellitari, eseguendo una stima per il periodo 20092021, mentre nelle aree più elevate si sono considerati i soli dati satellitari, unico dato a disposizione per le aree più estese del ghiacciaio, considerando il solo periodo 2009-2013. In ogni caso si sono prese come riferimento delle zone con estensione di 10x10 pixel, estrapolando un valore medio di quota e ripetendo il procedimento per i diversi anni considerati. In questo modo e stato possibile costruire un dataset contenente le informazioni di elevazione media di diverse aree e per diversi anni. Rappresentando graficamente i dati ottenuti, e stato possibile individuare delle tendenze chiaramente decrescenti per i valori di elevazione, che evidenziano una forte coerenza tra le due fonti di dati. In particolar modo, e possibile notare come nelle Figure 8 e 9, in tutti i casi, ci sia una modifica di pendenza delle rette che uniscono i primi punti, riferiti al periodo 2009-2016, rispetto alla pendenza delle rette che uniscono i punti del periodo successivo, fino al 2021. Tale risultato evidenzia un fenomeno di accelerazione dello scioglimento del ghiacciaio. A dimostrazione di questo, per il caso della zona critica della lingua, si sono calcolate le variazioni nel trend annuale di scioglimento dal 2009 fino al 2021, come riportato in Tabella 3, ottenendo un risultato che chiaramente identifica la crescita di questo valore nel corso del tempo considerato.

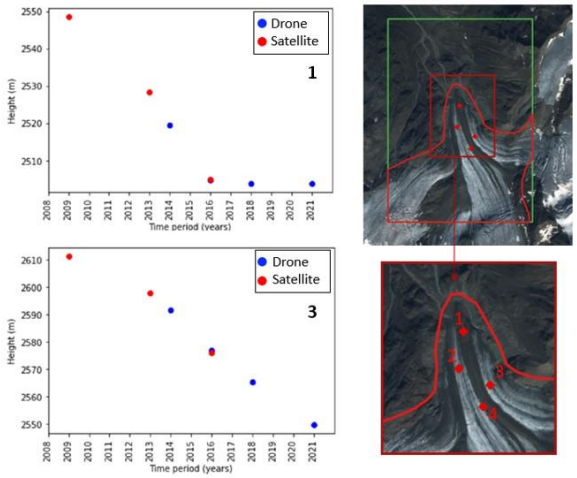


Figura 8. Trend di scioglimento dei punti 1 e 3 durante il periodo 2009-2021.

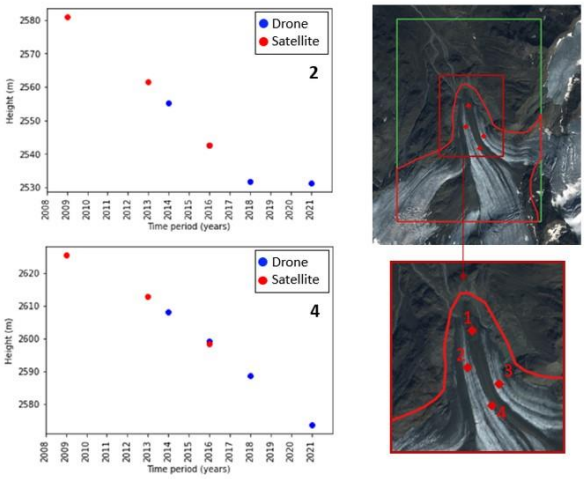


Figura 9. Trend di scioglimento dei punti 2 e 4 durante il periodo 2009-2021.

2009-2013	2009-2014	2009-2016 UAV	2009-2016 SAT	2009-2018	2009-2021
3.20 m	3.50 m	3.80 m	3.90 m	4.10 m	4.70 m

Tabella 3. Valore medio annuo di perdita dell'area 4 del ghiacciaio in intervalli temporali compresi tra il 2009 e il 2021.

6. Conclusioni

A seguito delle analisi condotte sul Ghiacciaio dei Forni, si è evidenziato come il fenomeno di scioglimento risulti particolarmente intensivo nel corso degli ultimi anni. Tale risultato e stato raggiunto utilizzando immagini ottiche satellitari, acquisite dai satelliti Ikonos-2 e Pleiades, e DSM ottenuti da indagini con drone. L'applicazione dell'algoritmo di coregistrazione di Nuth e Kaab sui modelli si è dimostrato affidabile per eliminare i problemi di georeferenziazione presenti tra questi e condurre successive analisi morfologiche accurate. Sia le valutazioni inerenti ad una variazione media di spessore sull'intero apparato glaciale, sia le analisi puntuali per stimare i trend di scioglimento in micro-aree, hanno messo in mostra il fenomeno di scioglimento accelerato a cui e soggetto questo ghiacciaio, con perdite medie annue di circa 5 m sulla lingua, così come precedentemente stimato con soli dati UAV. Si può quindi affermare che, sebbene le immagini satellitari ottiche presentino alcune limitazioni legate alle condizioni metereologiche, come ad esempio la copertura nuvolosa o al tempo di rivisita, e comunque possibile riconoscerne il potenziale in riferimento allo studio dei ghiacciai e alla possibilità di derivare diverse informazioni sullo stato di variazione di questi sistemi nel corso del tempo, soprattutto considerando le informazioni acquisite su larga scala. In futuro l'obiettivo sarà quello di acquisire ulteriori immagini ottiche per estendere l'indagine sul Ghiacciaio dei Forni. Inoltre, sarà possibile indagare ulteriori tecniche a supporto del dato ottico satellitare, come ad esempio i sistemi satellitari SAR, i quali sono in grado di fornire dati anche in condizioni metereologiche limitanti per il dato ottico satellitare.

Bibliografia

Azzoni, R. S., Fugazza, D., Zennaro, M., Zucali, M., D'Agata, C., Maragno, D., Cernuschi, M., Smiraglia, C., Diolaiuti, G. A., 2017. Recent structural evolution of Forni Glacier tongue (Ortles-Cevedale Group, Central Italian Alps). *Journal of Maps*, 13(2), 870-878. https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1394227.

Brown, C. W., Lillibridge, J., Nalli, N. R., 2005. An introduction to satellite sensors, observations and techniques.

Fugazza, D., Scaioni, M., Corti, M., D'Agata, C., Azzoni, R. S., Cernuschi, M., Smiraglia, C., Diolaiuti, G. A., 2018. Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to assess rapid glacier evolution and map glacier hazards.

Nuth, C., Kaab, A., 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5(1), 271–290. https://tc.copernicus.org/articles/5/271/2011/ (Accessed 31 August 2023)

Rita, D., M., Fugazza, D., Belloni, V., Diolaiuti, G., Scaioni, M., Crespi, M., 2020. GLACIER VOLUME CHANGE MONITORING FROM UAV OBSERVATIONS: ISSUES AND POTENTIALS OF STATE-OF-THE-ART TECHNIQUES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 1041–1048.

IMMAGINI MULTISPETTRALI A SUPPORTO DELLA PIANIFICAZIONE URBANISTICA E DEL CIM (CITY INFORMATION MODELING).

N. Pascucci[1]

[1] DICEAA, Department of Civil, Environmental Engineering and Architecture, University of L'Aquila, Via G Gronchi 18, 67100, L'Aquila, Italy– nicole.pascucci@graduate.univaq.it

Parole chiave: Immagini multispettrali, Worldview 2, Landsat 8, Isole di calore urbane, CIM, UHI, 3D, Smart City

Keywords: Multispectral Images, Worldview 2, Landsat 8, Urban Heat Islands, CIM, UHI, 3D, Smart City

Abstract

Lo studio presenta un'analisi relativa all'elaborazione di dati attraverso l'impiego di immagini satellitari multispettrali ad alta e media risoluzione. Le nuove informazioni verranno estratte sia da indici spettrali specifici che da algoritmi di clustering. L'obiettivo primario è ottenere nuove elaborazioni per l'aggiornamento delle informazioni preesistenti, attualmente raccolte dalle fonti ufficiali a livello regionale. Successivamente, i dati ottenuti confluiranno in un database unificato e aggiornato, costituendo così un'estesa rappresentazione in 3D dell'ambiente urbano, nota come CIM (City Information Modeling). Questo modello si rivelerà di grande utilità per la pianificazione e la gestione urbana, creando una struttura parametrica dettagliata del territorio di studio, al quale sarà possibile associare una vasta gamma di informazioni, contribuendo al monitoraggio e alla gestione efficace dell'area urbana.

This work presents a study on processing additional information using high and medium-resolution multispectral satellite images. The new information will be derived from specific spectral indices as well as clustering algorithms. The primary objective is to gain novel insights for updating existing information, sourced from official regional authorities. Subsequently, the acquired data will be amalgamated into an updated and unified database, thus constituting an extended 3D urban model known as CIM (City Information Modeling). This model will serve as a valuable asset for urban planning and management, creating a comprehensive parametric representation of the subject city. A wide array of information types can be associated with this model, contributing to the monitoring and effective administration of the urban area.

1. Introduzione

La "Smart City" è la nuova frontiera per la gestione delle città ed è un concetto multidisciplinare che coinvolge molti attori e scienze. Uno dei temi legati alla Smart City comprende lo sviluppo di nuovi strumenti per la gestione della città, in particolare per la pianificazione urbanistica. In questo processo sono coinvolti due nuovi temi, la conoscenza del territorio e le nuove tecnologie con le relative pratiche. (Di Ludovico D. et al., 2019; Dominici D. et al. 2022; Pascucci N. 2023).

Nell'ambito della conoscenza territoriale, le tecniche geomatiche hanno assunto un ruolo di primaria rilevanza per la comprensione e per la gestione del patrimonio e delle aree urbane. La geomatica, pertanto, può essere delineata come una disciplina dedicata alla conoscenza, alla misurazione, al monitoraggio e alla gestione "intelligente" del territorio e di conseguenza delle sue strutture e infrastrutture. Nel corso degli ultimi decenni, si sono sviluppati nuovi strumenti, tra cui la scansione laser, le immagini acquisite tramite UAV, i sistemi di mappatura mobile e il telerilevamento, che contribuiscono a creare modelli metrici 3D georeferenziati e certificati, i quali forniscono informazioni qualitative dettagliate sul territorio. I risultati della geomatica, per tali motivi, sono molto utili per creare database digitali in cui convergono diverse informazioni necessarie per sviluppare un sistema integrato di gestione della città digitale. Inoltre, grazie allo sviluppo dei Sistemi Informativi Geografici (GIS), il concetto di città digitale è stato ampiamente implementato.

Oggi, per la pianificazione urbana, viene proposto un nuovo concetto di City Information Modelling (CIM), che apporta grandi benefici alla costruzione e alla gestione delle città (Xun Xu et al., 2014). In letteratura, il CIM è definito come un'analogia del Building Information Modeling (BIM) nell'urbanistica ed è stato concepito come un'espansione 3D del GIS (3DIS o sistema informativo 3D) arricchito da viste multilivello (layers) e multiscala e da un inventario di elementi 3D con le loro relazioni. (Stojanovski 2013).

Questo lavoro si propone di sperimentare metodologie innovative al fine di ampliare e arricchire il panorama teorico e applicativo della ricerca contemporanea nel campo della pianificazione urbana, in particolare nella costruzione di Modelli Informatici di Città (CIM), considerando fondamentale l'utilizzo della geomatica come conoscenza primaria del territorio. Nello specifico, l'utilizzo dell'elaborazione di immagini multispettrali a supporto di un determinato territorio contribuisce al monitoraggio e alla rappresentazione di nuovi livelli di informazione e conoscenza, integrabili con quelli preesistenti, consentendo la realizzazione di un sistema CIM integrato per la pianificazione urbana. Come mostra la Figura 1, l'area di studio comprende una vasta parte della città de L'Aquila e alcune aree limitrofe. Queste zone sono state influenzate dall'evento sismico del 2009 e sono soggette a un processo continuo di trasformazione, rendendolo un caso unico.

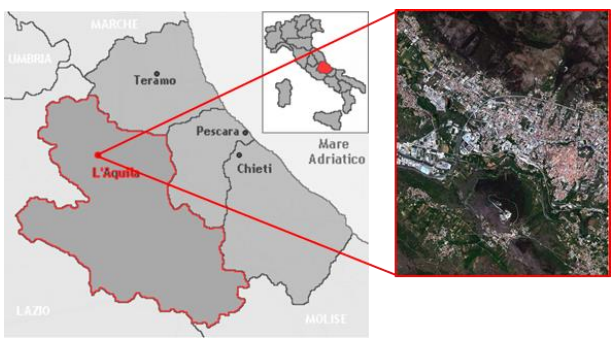


Figura 1. Posizione della città dell'Aquila all'interno della regione Abruzzo e zoom dell'area oggetto d'esame (in rosso).

2. Metodologia

Come precedentemente introdotto, lo studio riguarda l'utilizzo di immagini satellitari multispettrali per estrarre informazioni da integrare con i livelli provenienti dai Geoportali ufficiali, al fine di costruire un modello CIM per la gestione delle Smart City. Inizieremo dunque dall'utilizzo delle immagini multispettrali ottenute tramite il telerilevamento, sfruttando l'effettiva conoscenza dell'estrazione automatica (o semi-automatica) dei dati legati alla copertura del suolo e all'estrazione di informazioni dettagliate sulle aree studiate.
La Figura 2 illustra il flusso operativo seguito per la realizzazione del CIM, nel quale, partendo dall'elaborazione e dall'analisi delle immagini multispettrali, sono estratte e aggiunte nuove informazioni a quelle già esistenti in un modello parametrico 3D.

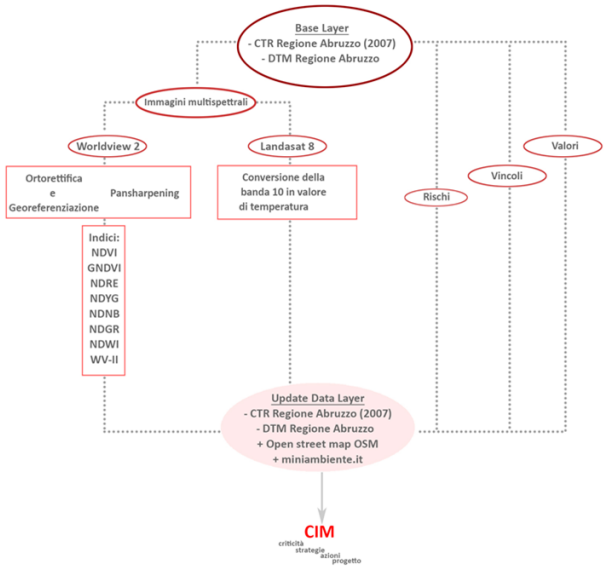


Figura 2. Workflow proposto dall'analisi delle informazioni dalle immagini multispettrali alla creazione del CIM.

I livelli di dati provenienti da fonti ufficiali utilizzati includono ad esempio: DBTR (Database Territoriale Regionale) in formato open-data, alla scala di 1:5.000 e datato prima dell'evento sismico del 2009 e quindi da aggiornare (disponibile gratuitamente dal sito http://opendata.regione.abruzzo.it/). Per questa ragione, il recupero di nuove informazioni, specialmente attraverso l'acquisizione di dati spaziali tramite tecniche di remote sensing, non solo ha permesso il continuo e attuale aggiornamento dei data layers in corso, ma fluirà anche insieme ad altre informazioni all'interno del CIM.

3. Materiali e metodi

Questa sezione inizia con la presentazione delle due diverse tipologie di immagini multispettrali utilizzate: una ad altissima risoluzione da satellite WorldView2 (WV2) e, una a media risoluzione da satellite Landsat 8, al fine di estrarre nuovi layers informativi.
Il satellite WV2 acquisisce immagini multispettrali ad 8 bande con risoluzione di 0,50 m nel pancromatico e 2 m nel multispettrale (https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-2).
Landsat 8 fornisce immagini pancromatiche con una risoluzione di 15 m e immagini multispettrali con una risoluzione di 30-100 m. Rispetto ai satelliti precedenti il Landsat 8 è dotato di sensori OLI (Operational Land Imager), in grado di acquisire una ulteriore banda prima del blu (per lo studio degli ambienti lacustri e costieri) ed una banda 9 per lo studio della nuvolosità, e due bande TIR (Thermal Infrared Sensor) nell'infrarosso termico. (https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8). Prima dell'estrazione delle informazioni, vengono effettuate operazioni di pre-elaborazione, come la georeferenziazione, l'ortorettifica e il pansharpening per l'immagine WV2, e alcune conversioni per estrarre informazioni sulla temperatura per le immagini Landsat 8.

3.1 Elaborazione di dati dall'immagine WorldView2

Tra i vari approcci utilizzati per estrarre informazioni utili dalle immagini WV2, vi è l'utilizzo degli indici spettrali. Quest'ultimi sono costruiti combinando differenze, somme e rapporti, come riporta la formula (1) (Dermais & Biagi, 2002).

$$x_i = \frac{x_i^k - x_i^m}{x_i^k + x_i^m} \quad (1)$$

Gli indici vengono altresì impiegati per identificare tipi specifici di copertura del suolo e risultano particolarmente utili per la mappatura delle aree urbanizzate. A tale scopo, sono stati selezionati alcuni indici per estrarre informazioni utili alla costruzione di un CIM.
I primi risultati riguardano la mappa tematica relativa alla vegetazione, come mostra la Figura 3, i quali sono stati ottenuti attraverso le seguenti formule (2), (3) e (4):

NDVI, Normalized Difference Vegetation Index
Questo indice permette la discriminazione della vegetazione e descrive il livello di vigoria della coltura in esame (Wolf A., 2010).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

GNDVI, Green Normalized Difference Vegetation Index
Indice utile per stimare il quantitativo di biomassa verde. Rispetto all'NDVI è più adatto per colture in fase di sviluppo avanzato (Gitelson et al.,1996).

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (3)$$

NDRE, Normalized Difference Red Edge
Un ulteriore indice è NDRE, col quale è possibile ricavare principalmente: la quantità di clorofilla fogliare (quanto appare verde una foglia), il vigore vegetativo, il rilevamento dello stress, la necessità di fertilizzazione e l'assorbimento d'azoto.(Fitzgerald et al., 2010).

$$NDRE = \frac{NIR - REDEDGE}{NIR + REDEDGE} \quad (4)$$

Figura 3. A destra l'indice NDVI per Identificare le aree con presenza di vegetazione e il livello di vigore; al centro GNDVI per la stima del quantitativo di biomassa verde; a sinistra NDRE per individuare il diverso contenuto di clorofilla nelle foglie.

Tramite gli indici riportati di seguito (5) e (6), si è identificato e distinto i diversi tipi di manti di copertura presenti dell'edificato esistente nell'area di interesse ed è stato possibile indentificare la presenza di amianto, come da Figura 4.

NDYG (Normalized Difference Yellow Green)
Utilizzando la banda Yellow e Green permette di isolare le coperture con tegole da materiali differenti (Stamou et al., 2012).

$$NDYG = \frac{YELLOW - GREEN}{YELLOW + GREEN} \quad (5)$$

NDNB (Normalized Difference NIR1 and Blue)
Tramite la combinazione delle bande NIR1 e Blue è possibile evidenziare la presenza di amianto nell'area oggetto di studio (Hamedianfar A. et al. 2015).

$$NDNB = \frac{NIR1 - BLUE}{NIR1 + BLUE} \quad (6)$$

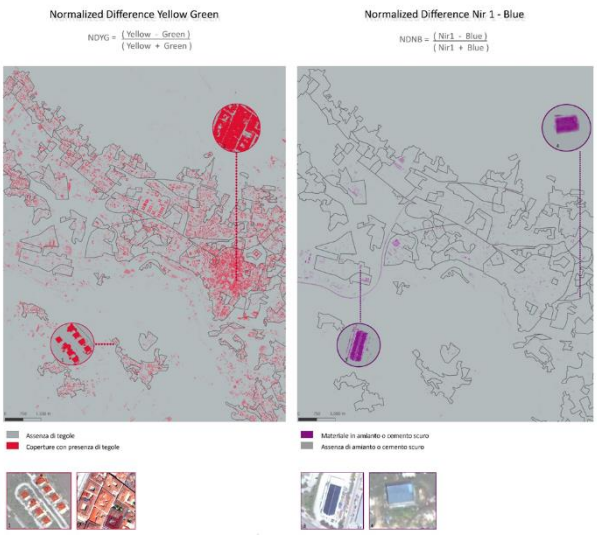


Figura 4. A destra l'indice NDYG per Identificare le coperture con presenza ti tegole; a sinistra NDNB per individuare il materiale contenente l'amianto.

Gli ultimi indici utilizzati come riportano la (7) e la (8) sono il NDWI e il WV-II:

NDWI (Normalized Difference Water Index)
Utilizza le bande Coastal e NIR2 ed è, utile per lo studio di aree caratterizzate dall'acqua (Wolf A., 2010). Come mostrato nella figura 5, la mappa tematica relativa a questo indice ha classificato la presenza e l'assenza di acqua in relazione a stagni, fiumi e corpi d'acqua naturali e la presenza di acqua in elementi antropogenici come piscine.

$$NDWI = \frac{COASTAL - NIR2}{COASTAL + NIR2} \quad (7)$$

WV-II (WorldView New Iron Index)
Con l'uso delle bande Green, Yellow e Blue si identificano i pixel ricchi di ossido di ferro (Baptista G. et al. 2017).

$$WV\text{-}II = \frac{GREEN * YELLOW}{BLUE * 1000} \quad (8)$$

In aggiunta, al fine di ottenere una stima preliminare della classificazione della qualità del manto stradale è stata eseguita una classificazione non supervisionata utilizzando il metodo K-means, riportata in Figura 5, confrontando un campione di strade, grazie ai dati concessi dal Comune dell'Aquila.

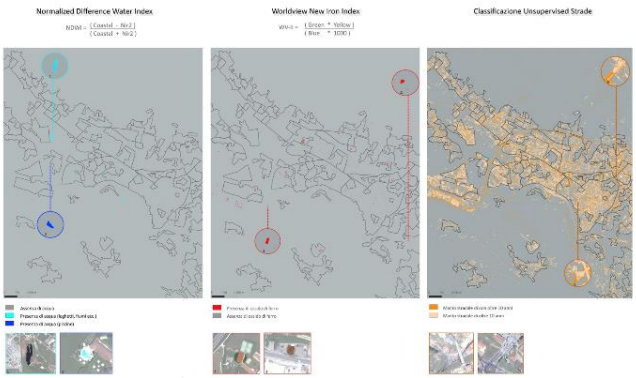


Figura 5. A destra l'indice NDWI per Identificare le aree con presenza d'acqua; al centro WV-II per individuare la presenza di ossido di ferro; a sinistra una classificazione non supervisionata per una prima stima della qualità del manto stradale.

3.2 Estrazione di dati dalla banda termica

Oggi, lo stato termico dell'ambiente urbano è di grande interesse per i ricercatori, gli enti istituzionali e per i cittadini stessi. La conoscenza degli scambi energetici della superficie urbana è di primaria importanza per lo studio della climatologia urbana.
Le informazioni termiche sintetiche possono essere acquisite utilizzando tecniche di telerilevamento, attraverso sensori che operano nella banda dell'infrarosso termico (TIR).
Per ottenere una prima valutazione e confronto della temperatura qualitativa dell'area, sono state prese in considerazione tre immagini Landsat 8 (https://ers.cr.usgs.gov), considerando l'acquisizione avvenuta durante vari anni nello stesso periodo estivo. Le immagini analizzate sono:
• Un'immagine del 5 agosto 2013, acquisita alle 09:49:12
• Una seconda immagine del 18 luglio 2018, acquisita alle 09:46:23
• Un'ultima immagine del 21 luglio 2019, acquisita alle 09:47:10.
I dati provenienti da Landsat Collections Level-1 possono essere adeguati alle grandezze di riflettanza e/o radianza caratteristiche dello strato superiore dell'atmosfera, noto come Top of Atmosphere (TOA). Questa correzione richiede l'utilizzo dei coefficienti di riscalatura radiometrica inclusi nel file di metadati

fornito insieme al prodotto. Inoltre nello stesso file di metadati sono altresì contenute le costanti termiche indispensabili per la conversione dei dati riferiti alla banda termica in valori di temperatura (Anderson I., 2016).
Per ottenere la temperatura superficiale del terreno (Land Surface Temperature LST), è necessario calcolare, in un primo momento, la temperatura di luminosità (Brightness Temperature BT), utilizzando non solo la radianza spettrale delle bande TIR ma anche le costanti termiche, come riporta la formula (9) (Markham, 1986).

$$\text{BT:} \quad \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}+1\right)} \qquad (9)$$

ove L_λ = Radianza spettrale della TOA
K_1 e K_2 = sono le costanti di conversione termica specifiche della banda (disponibili nel file di metadati dell'immagine Landsat 8)

Successivamente, utilizzando l'indice NDVI, come da formula (10) è stata estratta la percentuale di vegetazione (Proportion of Vegetation Pv) (Rouse et al., 1974).

$$\text{Pv:} \quad \left[\frac{NDVI-NDVImin}{NDVImax-NDVImin}\right]^2 \qquad (10)$$

Poi è stata ottenuta l'emissività del suolo (ε) (Van de Griend e Owe, 1993), così da calcolare, infine, la temperatura superficiale del terreno (Land Surface Temperature LST) applicando la seguente formula (11), suggerita da Stathopoulou e Cartalis (2007):

$$\text{LST:} \quad \frac{BT}{\left\{1+\left|\left[\frac{W\times BT}{P}\times \ln(\varepsilon)\right]\right\}} \qquad (11)$$

ove W = indica la lunghezza d'onda della radianza emessa

Come mostra la Figura 6, tramite i risultati della LST sono state ottenute le mappe delle temperature di superficie, per il set di dati considerato.

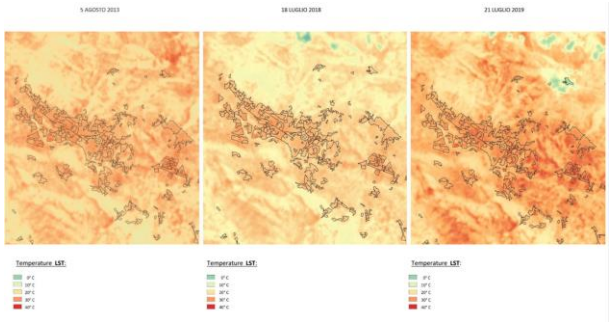


Figura 6. Temperatura LST (Land Surface Temperature LST) per le tre scene considerate: a destra il 5 agosto 2013, al centro il 18 luglio 2018 ed a sinistra il 21 luglio 2019..

Questa procedura è utile per identificare possibili isole di calore (o Urbani Heat Island UHI) nel territorio, ovvero aree urbane significativamente più calde rispetto alle zone rurali circostanti a causa delle attività antropiche. I nuovi dati ottenuti dalle immagini multispettrali sono stati quindi aggiunti al DBTR attraverso procedure di analisi spaziale in GIS, per aggiornare le informazioni raccolte nelle fonti regionali ufficiali.

3.3 Realizzazione ed utilizzo del CIM

Tutte le informazioni estratte dalle immagini multispettrali vengono aggiunte agli open data geografici, al fine di ottenere una mappa di base aggiornata per costruire il CIM. Inoltre, il Digital Elevation Model DEM, (realizzato tramite interpolazione tra i dati di altimetrici ricavati dal DBTR (D'Uva et al.2020); con dimensione delle celle di 10 m per lato e sistema di riferimento UTM-WGS84) è stato utilizzato per creare il sistema di riferimento delle superfici e ottenere il modello 3D dell'area di studio.
Tuttavia, come ribadito in precedenza il DBTR è un file datato prima del terremoto del 2009, quindi è stato aggiornato con i nuovi edifici e con le recenti trasformazioni avvenute nell'area, utilizzando i seguenti file:
- Per gli edifici preesistenti, uno shapefile scaricato dal sito http://wms.pcn.minambiente.it, poiché è più aggiornato rispetto al DBTR;
- Infine, uno shapefile nuovo creato appositamente per gli edifici mancanti con l'aiuto di OpenStreetMap (OSM).
Infine, sono stati studiati e inseriti altri dati provenienti da fonti ufficiali riguardanti il rischio idraulico, idrogeologico, pirologico e la microzonazione sismica del territorio e l'analisi dei vincoli e dei valori presenti nell'area di studio
Successivamente, tutte le informazioni istituzionali consultate e ottenute sono state "collegate" ai livelli appropriati, con un plugin specifico Grasshopper, nonché un linguaggio di programmazione visuale e di modellazione parametrica che viene eseguito all'interno dell'applicazione CAD (Computer Aided Design) di Rhinoceros 3D, che esporta i dati dallo strumento GIS e li importa in un modellatore tridimensionale, creando così un vero e proprio modello 3D della città e del territorio limitrofo aggiornato formato dall'integrazione di dati diversi. Il risultato sarà quindi un modello di progettazione urbana esteso (CIM), a cui possono essere associati diversi tipi di informazioni. Le figure 7 e 8 mostrano rispettivamente una panoramica del modello parametrico 3D con le caratteristiche geometriche e gli attributi qualitativi memorizzati nel database ed il CIM con una tabella riepilogativa con tutte le informazioni aggiunte.

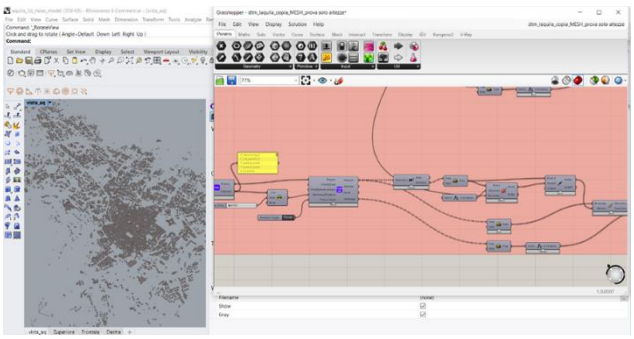


Figura 7. Panoramica del CIM, nel rettangolo giallo sono contenute le informazioni estratte dalle immagini multispettrali.

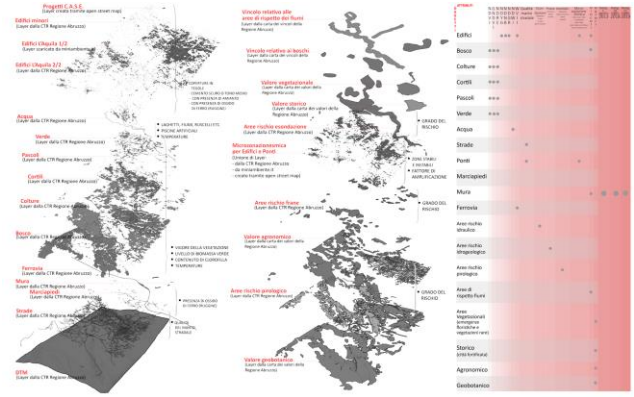


Figura 8. Il CIM e la tabella di riepilogo con le informazioni aggiunte a sinistra.

4. Risultati e conclusion

Questo articolo presenta una metodologia innovativa in grado di creare modelli avanzati per lo sviluppo futuro. Risulta evidente che le immagini satellitari hanno svolto un ruolo importante nell'individuare ulteriori informazioni da includere, insieme alle fonti aggiuntive. Infatti, è emerso che il potenziale del telerilevamento tramite immagini satellitari multispettrali è essenziale sia per approfondire e conoscere meglio l'area di studio sia per ottenere informazioni aggiornate in un breve periodo di tempo. È emerso come tutte le informazioni reperite sono confluite nel CIM, il quale permette il monitoraggio e la gestione di più aspetti contemporaneamente nell'area di studio. Ad esempio, l'indice NDNB relativo all'amianto rende possibile identificare e successivamente bonificare le aree che ne hanno necessità. Mentre l'uso delle informazioni relative alla LST può essere utile per migliorare e conseguentemente ridurre il cosiddetto effetto isola di calore, sempre più presente all'interno degli insediamenti urbani. Inoltre, l'NDVI può essere molto utile per una stima qualitativa preliminare di possibili nuove costruzioni e superfici impermeabili (ad esempio strade, marciapiedi, piazze, parcheggi) presenti nel territorio in tempo reale, contribuendo così all'aggiornamento della base di dati del DBTR. In aggiunta, Integrando diversi indici di vegetazione come il GNDVI e l'NDRE, è possibile ottenere informazioni più dettagliate sullo stato della vegetazione e ottenere ulteriori dati utili per gli sviluppi futuri. Ancora, l'NDWI è adatto per un possibile aggiornamento del DBTR con nuovi corpi idrici, come le piscine, elementi che possono essere utili in caso di incendi, come riportato in diversi studi. Un esempio di come funziona il sistema CIM è stato applicato nel caso di incendio in un dormitorio di Huazhong presso University of Science and Technology a Wuhan (Xun Xu et al., 2014). Il sistema CIM contiene informazioni sulla posizione geografica del campus, sugli edifici e sulla presenza di acqua nelle aree circostanti, importanti in caso di emergenza incendio, riducendo i tempi di intervento e apportando benefici. Infatti, nel caso di studio è stato dimostrato come il CIM sia utile per ridurre i tempi di intervento, percorrenza e l'approvvigionamento idrico in caso di incendio, perdite di gas, cortocircuiti e altri eventi.
In conclusione, l'insieme di informazioni estratte dalle immagini multispettrali consentirà il futuro monitoraggio di diversi aspetti delle aree in esame utilizzando nuove tecnologie digitali, come ad esempio il CIM. Quest'ultimo nonostante sia ancora agli inizi e richiede ulteriori studi, è chiaro che contribuirà a concepire nuovi modelli digitali all'avanguardia, i quali tengono conto del dinamicità e della specificità del territorio in grado di proporre soluzioni diversificate sulla base dei dati di partenza, mirando alle richieste precise e tempestive della città e del territorio ed offrendo la possibilità di seguirne l'evoluzione nel tempo.

Bibliografia

Anderson I. (2016), Converting Landsat 8 Thermal Band 10 to Temperature values, Hexagon Geospatial Community https://supportsi.hexagon.com/s/article/Converting-Landsat-8-Thermal-Band-10-to-Temperature-values?language=en_US (Accessed 02 December 2022).

Baptista G. M. de M., Teobaldo D. (December 2017), WorldView-2 sensor for the detection of hematite and goethite in tropical soils. DOI:10.1590/S0100-204X2017001200008

D'Uva D., Eugeni F. (2020) DTM to NURBS - A parametric approach to landscape modelling. Sustainability 2021, 13(4), 2379; https://doi.org/10.3390/su13042379

Dermais A. & Biagi L. (2002). Telerilevamento. Informazione territoriale mediante immagini da satellite. Milano: Casa editrice Ambrosiana.

Di Ludovico D., Properzi P. (2020). Una urbanistica sperimentale per una società post-urbana. In: (a cura di): Talia M., La città contemporanea. Un gigante dai piedi di argilla. p. 189-195, Roma-Milano:Planum Publisher, ISBN: 9788899237226, Torino, 15 novembre 2019

Di Ludovico, D., and D. Dominici. "How to combine the Smart City and the historic centre: suggestions from a case study." A set of good practices and recommendations for Smart City resilience engineering and evaluation. AIIC Publisher, Rome (2019): 36-45.

Dominici, D., Alicandro, M., Di Ludovico, D., Pascucci , . N., & Zollini, S. (2022). Multispectral satellite images to support the CIM (City Information Modeling) implementation. GEOmedia, 26(4).https://ojs.mediageo.it/index.php/GEOmedia/article/view/1888 (Accessed 31 August 2023).

European Space Agency (ESA), "WorldView-2 Mission." https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-2 (Accessed 31 August 2023).

Fitzgerald, G., Rodriguez, D., O'Leary, G., 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index – the canopy chlorophyll content index (CCCI). Field Crops Res., 116, pp. 318-324.

GIS Crack, "How to Calculate Land Surface Temperature with Landsat 8 Images." https://giscrack.com/how-to-calculate-land-surface-temperature-with-landsat-8-images/ (Accessed 31 August 2025).

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Merzlyak, M.N. (1996). Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS–MODIS. Remote Sensing of Environment. Remote Sensing of Environment, Volume 58, Issue 3, 1996, Pages 289-298, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7.

Hamedianfar A., Shafri H. (July 2015), Detailed intra-urban mapping through transferable OBIA rule sets using WorldView-2 very-high-resolution satellite images.
DOI:10.13140/RG.2.1.1910.8963

Hashim N., Naharudin N., Saraf N.M., Halim M.A. (August 2019), Spectral Information Extraction from Worldview-2 Image for Urban Features Identification. Conference: 2019 IEEE 10th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). DOI:10.1109/ICSGRC.2019.8837079

Kaplan, Gordana, Ugur Avdan, and Zehra Yigit Avdan. 2018. "Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia" Proceedings 2, no. 7: 358. https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05171

Markham, B. L. (1986). Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. Landsat Technical Notes, 1, 3-8.

Pascucci N. (2023). Metodologia CIM (City Information Modeling) per il progetto di rigenerazione della città dell'Aquila. InGENIO. https://www.ingenio-web.it/articoli/metodologia-cim-city-information-modeling-per-il-progetto-di-rigenerazione-della-citta-dell-aquila/

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancements and retrogradation. Texas A & M University: College Station, TX, USA.

Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. International journal of remote sensing, 21(2), 353-366. https://doi.org/10.1080/014311600210876

Stamou A., Theodoridou I., Papadopoulos A. (April 2012), Study and Analysis of WorldView- 2 satellite Imagery for evaluating the energy efficiency of the urban area of Kalamaria, Greece. European Journal

Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2007). Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. Solar Energy, 81(3), 358-368. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.014

Stojanovski T. (2013), City information modeling (CIM) and urbanism: Blocks, connections, territories, people and situations. Simulation series. 45. 86-93

U.S. Geological Survey (USGS), "Using USGS Landsat Level-1 Data Product." https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product (Accessed 31 August 2025).

Van de Griend, A. A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. International Journal of remote sensing, 14(6), 1119-1131. https://doi.org/10.1080/01431169308904400

Wolf, A. (2010). Using WorldView 2 Vis-NIR MSI Imagery to Support Land Mapping and Feature Extraction Using Normalized Difference Index Ratios. Digital Globe.

Xun Xu, Lieyun Ding, Hanbin Luo, Ling Ma (2014), From building information modeling to city information modeling. http://www.itcon.org/2014/17 (Accessed 31 August 2023)

MONITORAGGIO 4D AD ALTA FREQUENZA DI GHIACCIAI ALPINI TRAMITE CAMERE TIME-LAPSE A BASSO COSTO E DEEP LEARNING STRUCTURE-FROM-MOTION

F. Ioli [1] *, L. Pinto [1]

[1] Dept. of Civil and Environmental Engineering (DICA), Politecnico di Milano, Milan, Italy – (francesco.ioli, livio.pinto)@polimi.it

Parole chiave: Camere time-lapse, low-cost, ricostruzione stereoscopica sfm, monitoraggio 4D

Key words: Time-lapse cameras, low-cost, stereo reconstruction, sfm, 4D monitoring

Abstract

Il monitoraggio ad alta frequenza temporale di ghiacciai alpini è essenziale per comprendere la loro risposta ai cambiamenti climatici. Questo articolo presenta un sistema di camere time-lapse a basso costo progettato per il monitoraggio continuo in 4D dei ghiacciai. Il sistema integra una ricostruzione 3D giornaliera da camere stereoscopiche e la stima della velocità superficiale da camera monoscopica utilizzando la Correlazione di Immagini Digitali (DIC). Per superare le difficoltà nell'identificazione di punti omologhi posta dalla base di presa lunga, che rende impossibile l'uso di algoritmi tradizionali, vengono usati recenti algoritmi di feature matching basati su Deep Learning. Uno studio pilota condotto sul Ghiacciaio del Belvedere (Alpi italiane) dimostra l'efficacia dell'approccio proposto nel stimare accuratamente le dinamiche giornaliere del ghiacciaio, comprese la cinematica superficiale, la perdita di volume del ghiaccio e il ritiro del ghiacciaio. La combinazione della ricostruzione stereo in 3D e del DIC rivela una significativa correlazione a breve termine tra la temperatura dell'aria, la velocità superficiale del ghiacciaio e l'ablazione, fornendo indicazioni sulla risposta del ghiacciaio a fattori esterni. Il sistema proposto è facilmente replicabile e può essere esteso ad altri siti di studio.

Monitoring glaciers in alpine regions over short-term intervals is essential for understanding their response to climate change. This paper presents a low-cost time-lapse camera system designed for continuous 4D glacier monitoring. The system integrates daily 3D reconstruction from stereo cameras and surface velocity estimation from monoscopic camera using Digital Image Correlation (DIC). To overcome challenges posed by wide camera baselines and achieve accurate 3D reconstruction under suboptimal viewing conditions, state-of-the-art deep learning feature matching algorithms are employed in stereo reconstruction, which is not achievable with traditional methods. A pilot study conducted at the debris-covered Belvedere Glacier (Italian Alps) demonstrates the effectiveness of the proposed approach in accurately estimating daily glacier dynamics, including surface kinematics, ice volume loss, and glacier retreat. The combination of stereo 3D reconstruction and DIC reveals a significant short-term correlation between air temperature, glacier surface velocity, and ablation, providing insights into the glacier's response to external factors. The proposed system offers ease of replication and can be readily applied to other study sites.

1. Introduzione

Il monitoraggio ad alta frequenza dei ghiacciai è fondamentale per comprendere e modellare le dinamiche infra-stagionali dei ghiacciai, specialmente negli ultimi anni in cui gli effetti del cambiamento climatico sono sempre più forti ed evidenti. Monitoraggi con campagne in-situ però sono però solitamente difficoltosi in quanto richiedono notevoli dispendi di tempo e personale, specialmente in aree montane difficilmente accessibili. Camere time-lapse vengono spesso utilizzate per ottenere informazioni qualitative e quantitative ad alta frequenza (ad esempio, giornaliera) sull'evoluzione di ghiacciai alpini, in quanto possono funzionare per lunghi periodi di tempo e richiedono una manutenzione minima. Tuttavia, di solito viene utilizzata una sola camera per stimare la velocità di superficie del ghiacciaio tramite tecniche di correlazione di immagini digitali (DIC) ed è richiesto un DTM per georeferenziare i vettori spostamento ottenuti in coordinate immagini (Messerli et al., 2015, Giordan et al., 2016). L'utilizzo di due o più camere consente ottenere una ricostruzione tridimensionale della scena mediante fotogrammetria e Structure-from-Motion (SfM), stimare la velocità di flusso di superficie del ghiacciaio in un mondo tridimensionale, la variazione del volume, l'ablazione e il ritiro del fronte del ghiacciaio.

Recentemente, alcuni studi hanno usato sistemi multi-camera per il monitoraggio di ghiacciai (o, in modo simile, per corpi franosi). Schwalbe e Maas (2017) e Marsy et al. (2020) hanno usato DIC da singola camera per calcolare il campo di velocità cinematico di ghiacciai, e hanno utilizzato due camere in stereoscopia per calcolare il modello digitale di elevazione (DEM) su cui ortorettificare i risultati. Roncella et al. (2014), per primi, hanno implementato un sistema stereoscopico puro per il monitoraggio di un corpo franoso ma hanno ottenuto ricostruzioni tridimensionali sparse. Kneib et al. (2022) e Taylor et al. (2023) hanno utilizzato configurazioni multi-camera per osservazioni di ghiacciai con risultati promettenti, mentre Blanch et al. (2023) hanno proposto un sistema multi-camera a basso costo per il monitoraggio una parete rocciosa soggetta a crolli.

Tutti gli studi menzionati in precedenza hanno tipicamente utilizzato basi di presa corte fra le camere, permettendo di ricostruire la scena mediante fotogrammetria tradizionale. Questa si basa sull'identificazione di punti omologhi su diverse immagini mediante l'estrazione di punti caratteristici (keypoints) e dei loro descrittori (e.g., con algoritmi quali SIFT, KAZE, ORB). I punti omologhi vengono identificati da algoritmi di feature matching, che minimizzano la distanza dei

descrittori nello spazio delle caratteristiche. I punti omologhi identificati vengono usati per stimare l'orientamento delle camere tramite Bundle Adjustment. Tuttavia, in terreni montuosi, trovare posizioni adatte con basi normali può essere complesso a causa di terreni spesso impervi. Questo porta facilmente ad avere a basi ampie e distorsioni complesse che ostacolano le tecniche di feature matching tradizionali (Yao et al., 2021). Il Deep Learning (DL) è emerso come una potente soluzione per l'identificazione di punti omologhi, anche in scenari con basi lunghe fra le camere, forti distorsioni geometriche e significative differenze radiometriche. Il matching basato su DL è stato applicato con successo a vari scenari complessi, fra cui basi ampie, immagini fortemente oblique, abbinamenti di immagini storiche e camera di bassa qualità (Yao et al., 2021, Remondino et al., 2022).

A livello software, le soluzioni esistenti si concentrano sul processamento monoscopico mediante DIC. Alcuni esempi di software open-source sono ImGraft (Messerli and Grinsted, 2015), Pointcatcher (James et al., 2016) and PyTrx (How et al., 2020) che consentono di calcolare il campo di velocità superficiale del ghiacciaio da sequenze di immagini time-lapse. Alternativamente, i pacchetti software fotogrammetrici/SfM, come Agisoft Metashape o Colmap (Schönberger e Frahm, 2016), implementano tradizionali tecniche di feature matching tradizionali e non sono adatte a processamenti multi-temporali. A quanto risulta agli autori, non esistono soluzioni disponibili per eseguire la ricostruzione multi-temporale e monitoraggio fotogrammetrico (stereo o multi-camera) con basi di presa lunghe. Di conseguenza, è stato sivluppato ICEpy4D, un toolkit basato su Python per la ricostruzione 3D multitemporale che integra algoritmi di feature matching basati su DL per basi lunghe. Inoltre, ICEPy4D integra funzionalità per il processamento di serie temporali di nuvole di punti e l'estrazione di informazioni rilevanti da serie temporali di nuvole di punti. ICEpy4D è attualmente in fase di sviluppo su https://github.com/labmgf-polimi/icepy4d/.

Questo articolo presenta uno studio pilota sulla monitoraggio continuo in 4D di un ghiacciaio alpino utilizzando un sistema stereoscopico a basso costo. Lo studio si concentra sull'indagine della dinamica giornaliera del ghiacciaio, calcolando lo spostamento superficiale, la perdita di volume del ghiaccio e il ritiro del ghiacciaio di una lingua glaciale alpina coperta da detriti, basandosi su immagini giornaliere acquisite da una coppia di camere time-lapse installate permanentemente sulle morene in corrispondenza della lingua glaciale, con base di presa molto lunghe. La metodologia proposta si basa sul toolkit ICEpy4D ed integra la ricostruzione tridimensionale mediante stereoscopia della fronte glaciale per stimare le variazioni giornaliere di volumi di ghiaccio. Al tempo sesso, DIC viene utilizzata su sequenze di immagini da acquisite da singola camera (monoscopia) per calcolare il campo di velocità superficiale. Utilizzando tecniche di feature matching basate su DL, questo approccio supera le limitazioni delle tecniche di fotogrammetria tradizionale nell'identificazione di punti omologhi con basi lunghe e/o geometrie di presa molto convergenti.

2. Il sistema stereoscopico low-cost

Il sistema stereoscopico a basso costo è composto da due unità di monitoraggio autonome e indipendenti. Ciascuna unità è progettata e costruita utilizzando componenti economici e facilmente reperibili al fine di fornire alimentazione, connettività internet, pianificazione dell'acquisizione delle immagini e protezione da ambienti difficili. Ciascuna unità include una fotocamera DSLR (Canon Eos 1200D con sensore APS-C), un microcontrollore Arduino per l'attivazione della fotocamera e un Raspberry Pi Zero con una scheda SIM per l'invio delle immagini a un server remoto tramite una rete GSM. L'alimentazione è fornita da un pannello solare combinato con una batteria al piombo (Ioli et al., 2023).

Le due camere sono state installate nell'estate del 2021 alla lingua nord-ovest del ghiacciaio Belvedere, un ghiacciaio nero, coperto di detrito, locato ai piedi del Monte Rosa (Macugnaga, VB). Le due camere sono state installate su grossi massi lungo ciascuna morena del ghiacciaio, in modo da avere una buona geometria di presa (Figura 1). La base tra le due camere è di circa 260 m, mentre la distanza camera-oggetto è rispettivamente di circa 230 m e 350 m per le due camere, risultando quindi una situazione di base molto lunga. Per ovviare alla diversa distanza camera-oggetto, sono state usate lenti con focali differenti, rispettivamente un 24 mm e un 35 mm, in modo da avere una GSD media sulla parete terminale di circa 4 cm. Le camere sono operative da luglio 2021 e hanno acquisito due immagini al giorno fino a dicembre 2022.

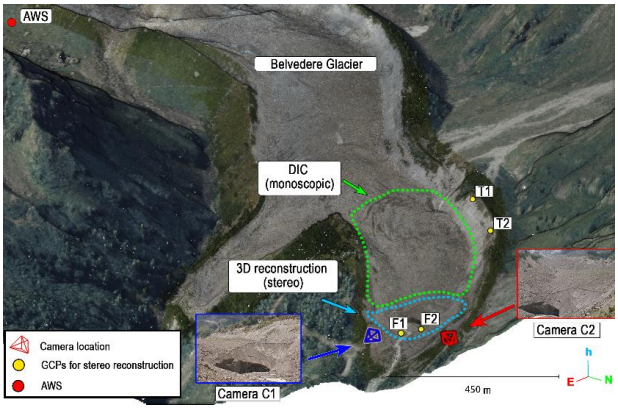


Figura 1. L'area di studio: la ricostruzione stereoscopica è concentrata sulla parete terminale del ghiacciaio (linea tratteggiata in azzurro chiaro), mentre l'elaborazione DIC monoscopica dalla sequenza di immagini acquisite dalla telecamera C2 è focalizzata sulla parte superiore del lobo settentrionale (linea tratteggiata in verde).

(a) (b) (c)

Figura 2. (a) Immagine di un'unità di monitoraggio installata sul sito del Ghiacciaio Belvedere; (b-c) Stereocoppia acquisita dalla telecamera sinistra (b) e dalla telecamera destra (c) il 28.07.2022.

3. Metodologia

ICEpy4D è organizzato in moduli per risolvere diverse fasi del problema di ricostruzione 3D della scena e analisi delle nuvole di punti. Il flusso di lavoro principale (Figura 3) è composto da diverse fasi: (i) ricerca di punti omologhi; (ii) tracciamento delle features nelle serie temporali di immagini di singola camera con algoritmi di *template matching,* ad esempio finalizzati ad individuare automaticamente punti di appoggio (GCPs) su

immagini consecutive; (iii) risoluzione dell'orientamento relativo e assoluto di camere stereo o multi-camera; (iv) risoluzione di un Bundle Adjustment (BA) utilizzando librerie esterne (ad esempio, Agisoft Metashape Python API o COLMAP), includendo il supporto dell'uso di GCPs e della *self-calibration*; (v) creazione di una ricostruzione densa e mesh triangolata con librerie esterne; (vii) elaborazione di una serie temporale di nuvole di punti per stimare le differenze di volume, il ritiro del ghiacciaio e, eventualmente, effettuare la rilevazione dei cambiamenti.

3.1 Identificazione di punti omologhi con basi lunghe

ICEpy4D integra gli algoritmi DL di feature-matching SuperPoint and SuperGlue per trovare punti omologhi. SuperPoint è una rete neurale convoluzionale (CNN) che identifica i punti caratteristici e ne estrai i descrittori. È stata addestrata in modo auto-supervisionato per rilevare caratteristiche simili agli angoli. SuperGlue, invece, è una CNN a grafo che implementa *attention layers* per matchare i punti caratteristici estratti da SuperPoint. I pesi di entrambe le reti neurali sono stati usati senza *fine-tuning*, per garantire la replicabilità del metodo in diversi scenari, senza la necessità di acquisire un dataset di training dedicato, che è spesso difficile da ottenere in ambiente montano.

Il processo di matching con SuperPoint e SuperGlue fa largamente uso di GPU, che hanno memoria limitata. Perciò le immagini a piena risoluzione sono state decomposte in *tiles* più piccole, I punti omologhi identificati (Figura 4) in ogni coppia di tiles sono stati infine riassemblati per la verifica del vincolo epipolare. Per la verifica epipolare è stato usato Pydegensac (Mishkin et al., 2015), rigettando tutti i punti omologhi che risultavano avere un errore di riproiezione dalle linee epipolari maggiore di 1.5 px.

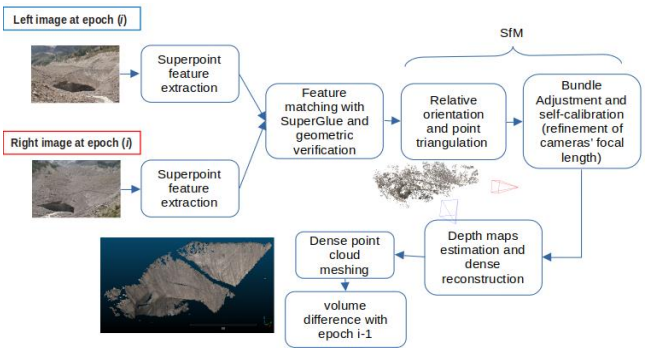


Figura 3. Schema del flusso di lavoro seguito con ICEpy4D.

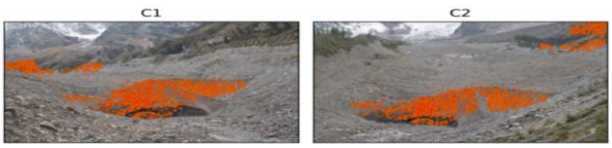


Figura 4. Esempio di features matchate con successo sulla coppia stereo acquisita il 27/09/2022 dalle due camere.

3.2 Ricostruzione 3D della scena

La ricostruzione della parete terminale del ghiacciaio è stata effettuata ad ogni epoca in due fasi: (i) orientamento relativo-assoluto e (ii) Bundle Adjustment (BA). Nella prima fase, I punti omologhi tra ogni stereo coppia sono stati usati per stimare la posa relativa delle due camera e le coordinate oggetto dei punti omologhi sono state calcolate per triangolazione. Successivamente, l'orientamento assoluto è stato determinato calcolando una trasformazione di Helmert, considerando note le posizioni delle camera e dei GCP visibile sulle immagini..

Nella seconda fase, è stato eseguito un Bundle Adjustment (BA) completo per raffinare la prima soluzione, integrando I GCPs direttamente nel BA ed applicando un'autocalibrazione della distanza principale. A questo scopo, è stato utilizzato il pacchetto software Agisoft Metashape tramite l'interfaccia Python al software (Python API). La scelta di Agisoft Metashape è stata determinata dal suo supporto per i GCP, la possibilità di assegnare diversi pesi a priori alle osservazioni e la disponibilità delle API Python, che consente di eseguire il software da una routine Python in modalità *headless*. Il BA di Metashape è stato integrato in ICEpy4D, consentendo l'esecuzione automatica dell'intera catena di lavoro senza alcuna interazione con l'interfaccia grafica.

Sebbene Agisoft Metashape non fosse in gradi di identificare punti omologhi a causa delle basi di presa lunghe e dell'utilizzo di algoritmi di matching tradizionali, il matching per la ricostruzione densa è risultato efficacie nei casi in cui la posa delle camere fosse nota accuratamente per la rettifica delle immagini. Le mappe di profondità sono state generate da immagini a piena risoluzione (ossia il parametro di qualità più elevato in Agisoft Metashape). Le mappe di profondità stimate sono state utilizzate per ricostruire una nuvola di punti densa e una mesh triangolata.

3.3 Calcolo variazione di volume e arretramento

La variazione giornaliera del volume del ghiaccio è stata determinata calcolando delle DEM delle Differenze (DOD) lungo la direzione di flusso. È stato stabilito un sistema di riferimento locale definendo la direzione X come la direzione di flusso, la direzione Z come la verticale geodetica e la direzione Y per completare la terna destrorsa. Le nuvole di punti sono state rasterizzate su un piano di riferimento YZ, corrispondente alla vista frontale della parete terminale del ghiacciaio, utilizzando un passo della griglia di 0,3 metri, mantenendo lo stesso origine e estensione del raster (ossia, le due nuvole di punti sono state innanzitutto ritagliate con lo stesso poligono convesso). La variazione di volume tra due epoche è stata quindi calcolata differenziando i due raster cella per cella (Figura 5).

L'arretramento del ghiacciaio è stato calcolato estraendo automaticamente il bordo superiore dela parete verticale di ghiaccio, selezionando i punti della nuvola in corrispondenza del cambio di direzione della normale locale.

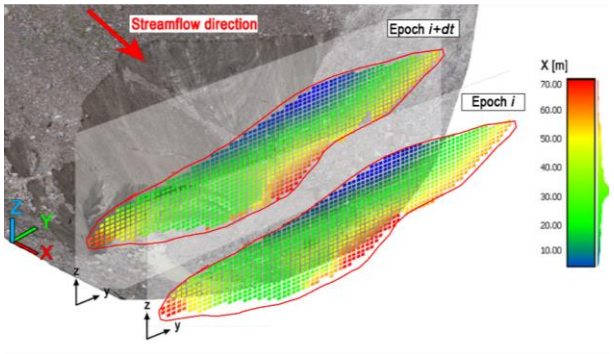


Figura 5. Schema della procedura usata per calcolare le variazioni di volume mediante DoD.

3.4 DIC con camera monoscopica

DIC (Digital Image Correlation) consente di determinare lo spostamento di una patch di immagine tra due immagini (master e slave) della stessa scena e acquisite in epoche diverse dalla stessa camera.

Nel nostro studio, abbiamo adottato l'algoritmo open-source Local Adaptive Multiscale image Matching Algorithm (LAMMA) scritto in Matlab (Dematteis et al., 2022). LAMMA adotta una struttura a gerarchia di griglie di patch con risoluzione spaziale crescente e utilizza dimensioni di area di ricerca localmente adattive, in base agli spostamenti già ottenuti nella regione circostante. LAMMA consente un calcolo più veloce e riduce la presenza di valori anomali rispetto al tradizionale processo DIC (Dematteis et al., 2022). Come funzione di correlazione, abbiamo utilizzato la *cosine similarity* applicata alle *orientation images* (Dematteis and Giordan, 2021), che è meno sensibile ai cambiamenti del pattern delle ombre ed è noto per funzionare bene in ambienti glaciali (Heid and Kääb, 2012).

Per geocodificare le mappe degli spostamenti, abbiamo utilizzato il toolbox Matlab open-source ImGRAFT (Messerli and Grinsted, 2015). ImGRAFT consente la proiezione delle coordinate del mondo 3D nelle coordinate dell'immagine 2D e la retroproiezione delle coordinate dell'immagine su un DSM.

4. Risultati

Processando la serie di coppie stereoscopiche giornaliere acquisite sul ghiacciaio del Belvedere dal 01/05/2022 al 13/11/2022, sono stati estratte le variazione di volume di ghiaccio della fronte e l'arretramento del ghiacciaio (mediante processamento stereo) e il campo di velocità superficiale (processamento monoscopico).

La Figura 6 presenta la curva delle variazioni di volume cumulato (i.e., il volume di ghiaccio fuso), evidenziando il tasso variabile di ablazione durante tutto il periodo dello studio. Il tasso di fusione di ghiaccio aumenta durante l'estate e diminuisce significativamente in autunno, specialmente dopo la metà di settembre. Dal 01/05/2022 al 13/11/2022 è stata osservata una perdita totale stimata di ghiaccio di 63.000 metri cubi.

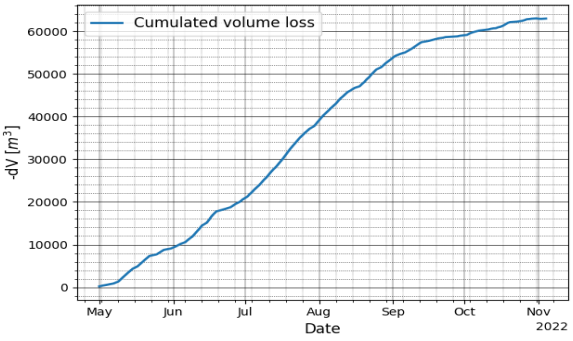


Figura 6. CVolume cumulative del ghiaccio perso al fronte del Ghiacciaio Belvedere da maggio a novembre 2022.

Tracciando giornalmente la posizione di bordo superiore della parete frontale verticale di ghiaccio è stato possibile calcolare l'estensione giornaliera del ritiro del ghiacciaio. Dal 01/05/2022 al 13/11/2022, è stato stimato un ritiro di 17,8 metri (Figura 7). Similmente alle variazioni di volume, la curva del ritiro del ghiacciaio mostra un tasso di ritiro più elevato durante i mesi estivi, mentre la velocità di ritiro è diminuita tra settembre e novembre.

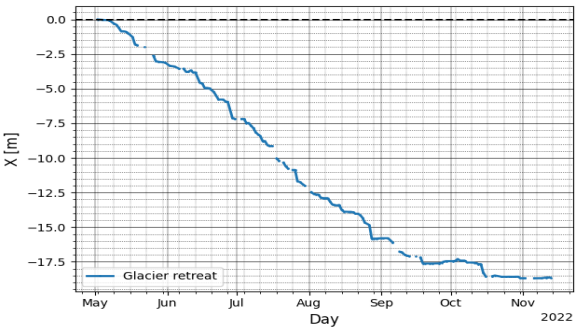
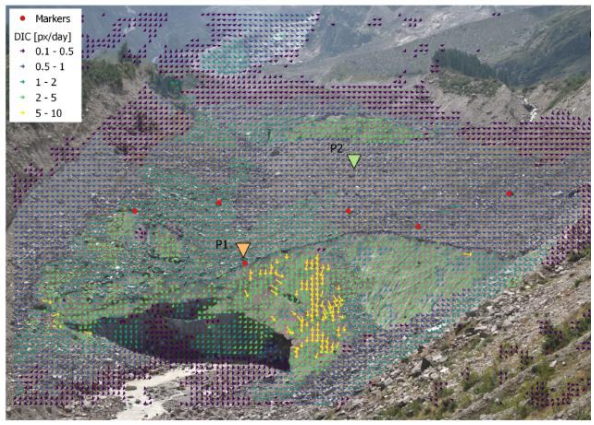


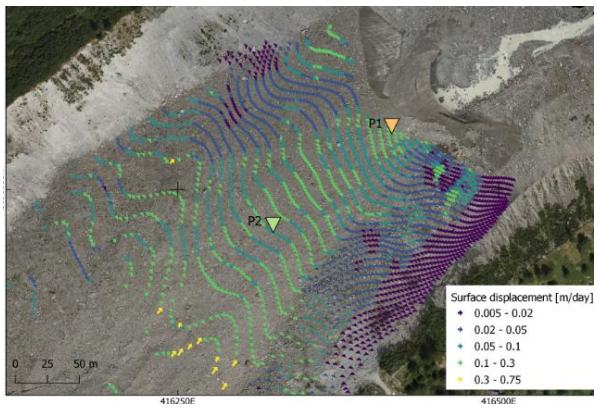
Figura 7. Ritiro del Ghiacciaio Belvedere tra maggio e novembre 2022, stimato tramite il tracciamento del bordo superiore della parete verticale in prossimità del lobo terminale del ghiaccaio, lungo una sezione trasversale parallela alla direzione di flusso (etichettata come X).

A partire dai campi di velocità giornalieri ottenuti tramite DIC (Figura 8), abbiamo preso in considerazione le serie temporali di spostamento di due punti sulla superficie del ghiacciaio, uno a 10 metri dal fronte del ghiaccio alla fine del periodo considerato (P1) e uno nella parte centrale a circa 120 metri dal fronte (P2), la cui posizione è indicata in Figura 8. Le serie temporali delle velocità estratte in corrispondenza dei punti P1 e P2 sono presentate in Figura 9. Le serie temporali hanno un comportamento simile, con un coefficiente di correlazione di Spearman di 0,88, e mostrano valori di velocità comparabili tra maggio e la prima metà di giugno e dalla seconda metà di settembre fino alla fine del periodo. Tuttavia, P1 ha una velocità circa il 30% più alta durante la stagione calda, con valori che vanno da 0,15 m/d, verificatisi in pochi giorni durante la seconda settimana di agosto e all'inizio di settembre, a 0,23 m/d a metà luglio. La componente di velocità Nord-Sud è la più alta, variando durante la stagione calda tra 0,10 e 0,18 metri al giorno (P1) e tra 0,06 e 0,15 m/d (P2). La componente Est-Ovest è approssimativamente 0,05 metri al giorno più bassa,

mentre la componente verticale assume valori più piccoli, circa 0,03 m/d.



(a)



(b)

Figura 8. Campo di velocità superficiale del ghiacciaio ottenuto mediante DIC da singola camera. (a) Campo di velocità non georettificato (valori in px); (b) Campo di velocità georettificato mediante DSM (valori metrici).

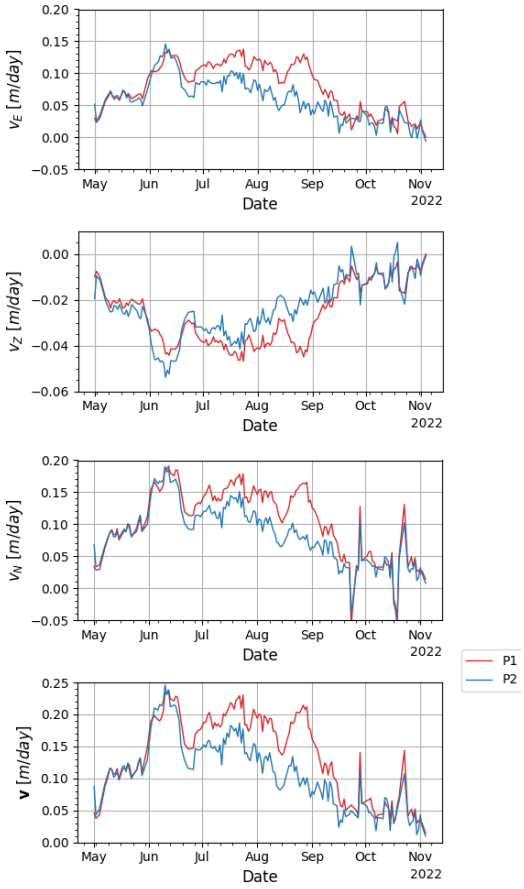


Figura 9. Serie temporali degli spostamenti estratti nella parte terminale del lobo del ghiacciaio. Le curve rosse corrispondono al punto P1, situato a 10 metri dal fronte del ghiaccio (considerando la posizione del fronte del ghiaccio il 28/07/2022) e contrassegnato con un triangolo arancione in Figura 15a. Le curve blu corrispondono al punto P2 situato a 120 metri dal fronte del ghiaccio e contrassegnato con un triangolo verde in Figura 8.

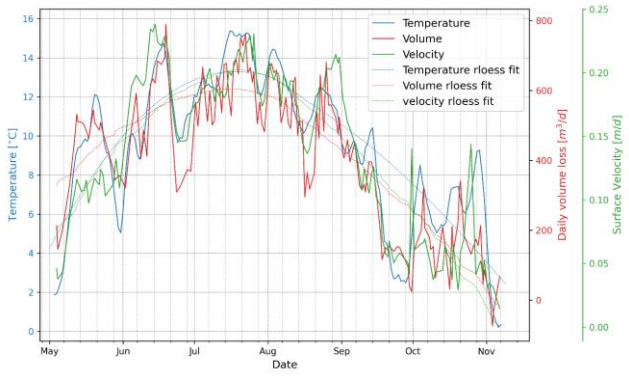


Figura 10. Serie temporale della perdita giornaliera di volume dovuta al ritiro del fronte del ghiacciaio, confrontata con la serie temporale della velocità superficiale del ghiacciaio estratta dalla DIC monoscopica nella posizione del punto P1 (posizionato vicino al fronte del ghiacciaio e contrassegnato con un triangolo arancione in Figura 8) e la serie temporale della temperatura dell'aria, misurata da una stazione meteo localizzata a 2 km di distanza.

5. Conclusioni e prospettive future

Abbiamo presentato uno studio pilota che ha introdotto un sistema di stereo-camere a basso costo per il monitoraggio ad alta frequenza dei ghiacciai. Utilizzando due camere installate vicino alla lingua del Ghiacciaio del Belvedere, abbiamo integrato con successo la ricostruzione 3D da camere stereoscopiche con la stima della velocità di superficie su singola camera tramite DIC. Questo approccio ha permesso una stima accurata della dinamica del ghiacciaio, compreso lo spostamento superficiale, la perdita di volume del ghiaccio terminale e il ritiro.

L'applicazione delle tecniche di corrispondenza DL ha permesso di superare i limiti delle tecniche tradizionali per l'identificazione di punti omologhi con basi di presa lunghe. Inoltre, il basso costo delle camere (meno di 2000 euro per camera) e la facilità di installazione rendono il sistema altamente replicabile, offrendo il potenziale per una diffusa implementazione nel monitoraggio di più ghiacciai o oggetti dinamici in ambienti montani.

Uno dei principali risultati di questo studio è stata la significativa correlazione osservata tra la temperatura dell'aria e la velocità di superficie del ghiacciaio e l'ablazione. La relazione tra ablazione e temperatura è consolidata, ma raramente valutata quantitativamente nel breve termine. D'altra parte, la correlazione diretta tra lo spostamento superficiale e la temperatura non è sempre chiara.

Gli sviluppi futuri di questo sistema includono l'espansione dell'area di studio aggiungendo più camere, il che consentirebbe una copertura più ampia della dinamica del ghiacciaio. Inoltre, ciò consentirebbe di creare DSM giornalieri del ghiacciaio per il georeferenziamento dei campi di velocità ottenuti tramite DIC. L'integrazione di ICEpy4D con altre librerie, come py4dgeo (Anders et al., 2021), consentirebbe l'analisi della variazione 4D su nuvole di punti. Inoltre, l'adozione di una BA completa con Ceres solver (Agarwal et al., 2020) mira a eliminare la dipendenza da software commerciali come Agisoft Metashape e migliorare la flessibilità del sistema.

Bibliografia

Agarwal, S., Mierle, K., Others, 2020. Ceres Solver. http://ceres-solver.org [WWW Document]. URL http://ceres-solver.org (Accessed 29 Giugno.23).

Anders, K., Winiwarter, L., Mara, H., Lindenbergh, R., Vos, S.E. & Höfle, B. 2021: Fully automatic spatiotemporal segmentation of 3D LiDAR time series for the extraction of natural surface changes. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 173, pp. 297-308.

Blanch, X., Guinau, M., Eltner, A., Abellan, A., 2023. Fixed photogrammetric systems for natural hazard monitoring with high spatio-temporal resolution. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*

Dematteis, N., Giordan, D., 2021. Comparison of Digital Image Correlation Methods and the Impact of Noise in Geoscience Applications. *Remote Sens.* 2021, Vol. 13, Page 327 13, 327.

Dematteis, N., Giordan, D., Crippa, B., Monserrat, O., 2022. Fast local adaptive multiscale image matching algorithm for remote sensing image correlation. *Comput. Geosci.* 159, 104988

Detone, D., Malisiewicz, T., Rabinovich, A., 2018. SuperPoint: Self-supervised interest point detection and description. *IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit*. 2018-June, 337–349.

Giordan, D., Allasia, P., Dematteis, N., Dell'Anese, F., Vagliasindi, M., Motta, E., 2016. A low-cost optical remote sensing application for glacier deformation monitoring in an alpine environment. *Sensors*, 16(10), 1750.

Heid, T., Kääb, A., 2012. Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery. *Remote Sens. Environ.* 118, 339–355.

How, P., Hulton, N. R. J., Buie, L., Benn, D. I., 2020. PyTrx: A Python-Based Monoscopic Terrestrial Photogrammetry Toolset for Glaciology. *Frontiers Earth Scie.*, 8.

Ioli, F., Bianchi, A., Cina, A., De Michele, C., Maschio, P., Passoni, D., Pinto, L., 2021. Mid-Term Monitoring of Glacier's Variations with UAVs: The Example of the Belvedere Glacier. *Remote Sens.*, 14(1), 28.

Kneib, M., Miles, E.S., Buri, P., Fugger, S., McCarthy, M., Shaw, T.E., Chuanxi, Z., Truffer, M., Westoby, M.J., Yang, W., Pellicciotti, F., 2022. Sub-seasonal variability of supraglacial ice cliff melt rates and associated processes from time-lapse photogrammetry. *Cryosphere* 16, 4701–4725.

Marsy, G., Vernier, F., Bodin, X., Cusicanqui, D., Castaings, W., Trouvé, E., 2020. Monitoring Mountain Cryosphere Dynamics by Time Lapse Stereo Photogrammetry. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 5, 459–466.

Mishkin, D., Matas, J., Perdoch, M., 2015. MODS: Fast and robust method for two-view matching. *Comput. Vis. Image Underst*. 141, 81–93.

Messerli, A., Grinsted, A., 2015. Image georectification and

feature tracking toolbox: ImGRAFT. *Geosci. Intrum. Meth.,* 4(1), 23–34.

James, M. R., How, P., Wynn, P. M., 2016. Pointcatcher software: analysis of glacial time-lapse photography and integration with multitemporal digital elevation models. *J. Glaciol.,* 62(231), 159–169.

Remondino, F., Morelli, L., Stathopoulou, E., Elhashash, M., Qin, R., 2022. Aerial Triangulation With Learning-Based Tie Points. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 43, 77–84.

Roncella, R., Forlani, G., Fornari, M., Diotri, F., 2014. Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereophotogrammetry. I*SPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*. 2, 297–304.

Sarlin, P.-E., DeTone, D., Malisiewicz, T., Rabinovich, A., 2020. SuperGlue: Learning feature matching with graph neural networks. *Proc. CVPR IEEE*

Schonberger, J. L., Frahm, J, 2016. Structure-From-Motion Revisited. *Proc. CVPR IEEE*

Schwalbe, E., Maas, H.G., 2017. The determination of high-resolution spatio-temporal glacier motion fields from time-lapse sequences. *Earth Surf. Dyn.* 5, 861–879. h

Yao, G., Yilmaz, A., Meng, F., & Zhang, L., 2021. Review of Wide-Baseline Stereo Image Matching Based on Deep Learning. *Remote Sens.*, 13(16), 3247.

CONFRONTO TRA DUE TECNOLOGIE PER IL RILIEVO 3D DEL PATRIMONIO COSTRUITO E DEI BENI CULTURALI

G. Fiorini [a,b], M.A. Tini [a], G. Bitelli [a]

[a] DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italia, giulia.fiorini12@unibo.it, mariaalessandra.tini@unibo.it, gabriele.bitelli@unibo.it
[b] Dipartimento di Scienze dell'Antichità, Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Italia, giulia.fiorini@uniroma1.it

Parole chiave: Rilievo 3D, Patrimonio Edilizio, Beni Culturali, Rilievo Laser Scanning, Camera 3D, Nuvole di Punti

Keywords: 3D Survey, Building Heritage, Cultural Heritage, Laser Scanning Survey, 3D Camera, Point Clouds

Abstract

L'acquisizione di dati tridimensionali accurati degli spazi interni riveste un ruolo di significativa importanza in diversi campi campi, tra cui la gestione immobiliare, l'archeologia industriale e i Beni Culturali. Il complesso di Villa Maraffa, situato nei pressi di Ravenna (Italia), è stato utilizzato come caso di studio per l'utilizzo e il confronto di tecnologie e sensori moderni per la documentazione e il rilievo. L'acquisizione dei dati è avvenuta mediante l'impiego della camera 3D Matterport Pro2 e del laser scanner Leica RTC360. Il primo, sviluppato principalmente per la documentazione in ambito immobiliare, è stato scelto per l'economicità e la rapidità nell'acquisizione dei dati; l'altro sensore impiegato in questo studio è invece stato scelto proprio per l'elevata precisione che lo caratterizza, generando una nuvola di riferimento per il confronto. Il lavoro si focalizza sulla valutazione, che comprende valutazioni globali e specifiche, della qualità della nuvola di punti ottenuta dalla Matterport Pro2. La valutazione dei problemi, come la mancanza di dato e il disallineamento, è stata compiuta confrontando le due nuvole di punti acquisite. I risultati ottenuti sono quindi stati esaminati al fine di trovare una soluzione ottimale per un rilievo rapido e preciso, che consenta una ricostruzione digitale completa dell'oggetto.

Accurate three-dimensional (3D) data from indoor spaces holds significant importance in various fields like real estate management, industrial archaeology and Cultural Heritage. Villa Maraffa complex, located near Ravenna (Italy), served as a case study for employing and comparing advanced technology and sensors in surveying these contexts. To acquire data, the sensors used were Matterport Pro 2 and Leica RTC360. The first one, mainly developed for real estate surveys, has been chosen because of the efficiency and cost-effectiveness in generating point clouds, albeit with lower precision compared to the Leica RTC360 Laser Scanner, the other sensor employed in this study. The focus of the paper is on assessing the point cloud's quality, with an analysis of the Matterport data, including global and specific evaluations. Potential issues like incomplete data and misalignment are identified by comparing coordinates from the Leica scanner. The results are examined to find an optimal solution for a prompt, precise, and well-timed survey, enabling a complete digital reconstruction of the object.

1. Introduzione

La progettazione e il restauro architettonici, la conservazione del Patrimonio Culturale e la creazione di esperienze di realtà virtuale sono solo alcune delle applicazioni per cui l'acquisizione di dati tridimensionali è di fondamentale importanza. I manufatti storici, come ad esempio gli edifici, i ritrovamenti negli scavi archeologici e le sculture, sono caratterizzati da geometrie complesse che racchiudono al loro interno informazioni significative sull'evoluzione umana, oggetti che devono essere conservati e tramandati. Al fine di preservare questi beni, le rappresentazioni digitali di essi sono fondamentali, in quanto consentono che ne venga documentata l'esistenza, ma anche che vengano restaurati, riprodotti o ricostruiti digitalmente. I dati tridimensionali forniti dalle nuvole di punti, in questo ambito, stanno avendo sempre maggior successo, essendo uno strumento affidabile per raggiungere questi obiettivi (Bitelli et al., 2019). Questi sono fondamentali per la ricostruzione virtuale tridimensionale dei Beni Culturali, perché forniscono moltissime informazioni sia sulla geometria che sui colori e i materiali (Arapakopoulos et al., 2022).
Dall'inizio degli anni 2000 si è assistito a un notevole incremento dell'interesse verso l'utilizzo dei dati delle nuvole di punti nel settore dei beni immobiliari e del Patrimonio Culturale; sia il mondo accademico che aziendale ne hanno studiato attivamente le potenzialità e possibilità (Bitelli et al., 2017).
I laser scanner terrestri (TLS) forniscono informazioni geometriche complete e precise, sono però degli strumenti molto costosi, che richiedono esperienza da parte dell'operatore per poter essere utilizzati al meglio, inoltre, alle volte, il tempo di acquisizione può risultare molto lungo (Selvaggi et al., 2018). Al contrario, i sistemi panoramici multicamera, veloci e meno precisi, sono stati pensati per essere utilizzati, anche da utenti non esperti, come strumenti di documentazione speditiva dello stato di fatto di un immobile (Campos et al., 2018).
Con l'avvento di fotocamere panoramiche di basso costo (Barazzetti et al., 2018), gli utenti possono acquisire un'immagine panoramica completa in un unico scatto, riducendo il numero di fotogrammi necessari per restituire un'ambiente (Ingman et al., 2020). Un sistema basato su questo principio di funzionamento è stato sviluppato da Matterport Inc. con l'obiettivo di operare soprattutto nel settore immobiliare. In precedenti ricerche sono state analizzate le potenzialità della camera Matterport Pro2, compreso il suo utilizzo per lo sviluppo di mondi virtuali interattivi e la determinazione dell'accuratezza dei dati (Shults et al., 2019), (Matterport,

2023a). Questo lavoro analizza le prestazioni della Matterport Pro2, in relazione al laser scanner Leica RTC360, utilizzando come caso studio Villa Maraffa a Piangipane di Russi (RA). L'obiettivo è andare oltre l'usuale utilizzo della Matterport Pro2 (nota: attualmente è disponibile il modello Pro3) e acquisire dati sia qualitativi che quantitativi, avendo come riferimento i dati ottenuti dallo strumento prodotto da Leica Geosystems. Quest'ultimo è infatti caratterizzato da prestazioni e valori dichiarati di precisione e accuratezza significativamente migliori rispetto alla camera Matterport Pro2.
Un focus iniziale è stato puntato sulle caratteristiche dei due strumenti, considerando anche le differenze nelle fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati. Il tema che è stato poib analizzato principalmente è il confronto tra le nuvole di punti ottenute, valutando la qualità metrica e geometrica di quella generata dalla Matterport Pro2 utilizzata come se fosse uno strumento di rilievo e analizzando la qualità del processo di autoallineamento. L'obiettivo è quello di stimare l'efficacia di questa tecnologia in contesti specifici, come la conservazione e il restauro dei Beni Culturali, e di condurre un'analisi comparativa tra questi due strumenti, considerandone vantaggi, svantaggi e limiti.
Villa Maraffa è stata scelta come caso studio in quanto la forma semplice e l'articolata distribuzione interna degli ambienti del complesso edilizio la rendono perfetta per testare le capacità di raccolta dati e l'allineamento delle nuvole di punti. Inoltre, trattandosi di una casa di campagna del XIX secolo, può essere considerata un caso esemplare sia nell'ambito dei Beni Culturali che di Archeologia Industriale.

2. Caso studio: Villa maraffa

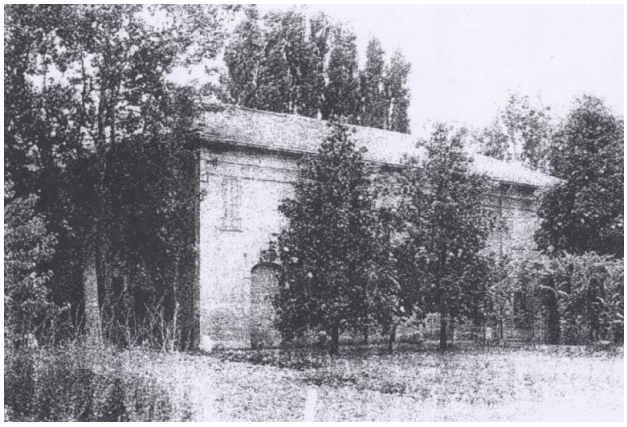


Figura 1. Immagine storica di Villa Maraffa, in Cortina di Russi e la sua storia, in "In Rumàgna", 1981/82, p.106.

Il complesso di Villa Maraffa (Fig. 1), situato nei pressi di Ravenna (Italia), è costituito da una villa storica, un lavatoio e una casa colonica, il cui nome deriva dal cognome dei proprietari ottocenteschi, i "Maraffi" (Ediltecnica, 2023). Per risalire agli sviluppi e ai cambiamenti storici che hanno interessato la villa e le strutture circostanti, è necessario esaminare i nomi dei proprietari e le modifiche da loro apportate a questo edificio, che si ritiene abbia origine nel XVIII secolo (Fabbi, 2007). Questa ricerca può essere condotta attraverso i documenti di censimento e altre fonti di informazione. Purtroppo, gli archivi di Ravenna non contengono mappe o registri relativi ai possedimenti e ai proprietari fino al 1835, anno a cui risalgono le prime informazioni certe, quando la Villa fu citata in una dichiarazione censuaria sotto la proprietà dello stesso Pasquale Maraffi (Fabbi, 2007). Nell'arco di quasi un secolo la villa passò nelle mani di numerosi proprietari e variò destinazione d'uso, con conseguenti modifiche sia nella forma che nella struttura interna dell'edificio. Dopo essere stata di proprietà dell'orfanotrofio femminile Galletti-Abbiosi fino al 1974, la villa fu abbandonata (Fabbi, 2007).
La villa è attualmente in fase di restauro, a seguito del quale subirà un'ulteriore variazione di destinazione d'uso. La ricostruzione, basata sul progetto di restauro degli Operai dell'Arte, mira a rinnovare e sostituire la struttura esistente, pur mantenendo gli aspetti storici del XVIII secolo. Ciò comporta l'adattamento dell'edificio all'ambiente rurale circostante e la riprogettazione degli spazi interni per soddisfare le esigenze dell'istituzione.

3. Aquisizione dei dati

3.1 Matterport Pro2

La ccamera 3D Matterport Pro 2 è un dispositivo completamente automatico che registra il mondo in tre dimensioni, utilizzando i chip PrimeSense (Khoshelham e Elberink, 2012). Come già detto da Pulcrano et al. nel 2019, il sistema si basa su un'implementazione della tecnologia SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) basata sulle immagini. Per raccogliere le informazioni necessarie a produrre una rappresentazione 3D dei luoghi interni, la Matterport Pro2 è costituito da un sistema di tre fotocamere, un sensore a infrarossi e un motore che lo fa ruotare di 360 gradi. Il sensore a infrarossi acquisisce dati relativamente alla profondità e consente di riprodurre un luogo nello spazio 3D, mentre le tre fotocamere vengono utilizzate per scattare le fotografie, acquisendo così il dato colorimetrico della geometria acquisita.
Il range di acquisizione varia tra un minimo di 1 m e un massimo compreso tra i 4 e i 5 m, in base all'illuminazione ambientale e alla geometria dell'oggetto da rilevare. Questo ridotto range di acquisizione può essere un problema in quelle situazioni in cui, ad esempio, non è possibile avvicinarsi all'oggetto o quando l'oggetto da acquisire è caratterizzato dalla presenza di spazi ampi. A causa di questa limitazione, i dati devono essere raccolti da numerosi punti di scansione e ciò non è sempre sufficiente, come nel caso ci si trovi in ambienti molto ampi (Gärdin e Jimenez, 2018).
Il campo visivo di questo strumento è di 360 gradi in orizzontale e 300 gradi in verticale; ciò è evidenziato dalla presenza di due coni d'ombra, uno sopra e uno sotto il punto di acquisizione, nella nuvola di punti. Il primo di questi coni d'ombra può essere fonte problematiche quando si acquisiscono soffitti caratterizzati dalla presenza, ad esempio, di travi a vista che creano ulteriori zone d'ombra e rendono più difficile ottenere un dato completo nonostante l'acquisizione da diversi punti di stazione. L'acquisizione di una scansione richiede tra i 25 e i 30 secondi per essere completata, compresi i tempi di acquisizione della camera, il trasferimento dei dati al dispositivo mobile (smartphone o tablet) e un primo allineamento automatico grezzo dei dati acquisiti (Matterport, 2023b). La complessità della geometria e la quantità di scansioni hanno un impatto sul tempo di elaborazione. Dopo che le scansioni sono state trasferite al dispositivo portatile, il programma 3D Capture le unisce automaticamente tra loro. Come già detto, si tratta di un primo allineamento grezzo che verrà migliorato nella fase di post-elaborazione. Cortex, il motore di ricostruzione brevettato da Matterport, esegue quindi le operazioni di allineamento automatizzato delle nuvole e ricostruzione tridimensionale della geometria entro poche ore dal caricamento del progetto sul server cloud. Grazie alla natura online dell'elaborazione dei dati di Matterport, l'intero processo è automatizzato e non richiede l'intervento dell'utente. Il modello 3D che viene restituito dagli algoritmi automatici di calcolo di Matterport combina al suo interno immagini ad alta gamma dinamica (HDR) con il

modello geometrico (Lehtola et al., 2017). Per l'utente è quindi possibile, a poche ore di distanza dall'acquisizione, effettuare tour virtuali degli edifici rilevati utilizzando il plug-in multimediale Unity. Questo insieme di funzionalità rapide e automatiche rende la Matterport Pro2 particolarmente utile e adatta al settore immobiliare. Oltre alle nuvole di punti, è possibile scaricare dal cloud il modello 3D (in formato OBJ) degli ambienti rilevati, così da poterli utilizzare in applicazioni di realtà virtuale (Lehtola et al., 2017).
L'accuratezza dichiarata dall'azienda per le misure effettuate è pari all'1% della distanza tra lo strumento e il punto acquisito in condizioni ottimali; ciò si traduce in un'approssimazione di 0,05 m per un punto acquisito alla distanza massima di 5 m (Matterport, 2023c). Tuttavia, fattori come la luminosità, la geometria e altre variabili possono influire sull'accuratezza delle misure.

Figura 2. Rilievo con Matterport Pro2.

Sebbene la camera Matterport Pro2 sia stata utilizzata con successo in ambienti esterni (Gärdin e Jimenez, 2018), (Popescu et al., 2019), l'interferenza della luce solare con le lunghezze d'onda utilizzate dalla camera a infrarossi può influire sulla raccolta dei dati 3D e sull'allineamento tra le varie scansioni (Matterport, 2023b). Inoltre, ricerche precedenti hanno dimostrato che, rispetto ai scanner laser, la camera 3D Matterport Pro2 ha una precisione limitata nella modellazione degli spazi interni e produce una nuvola di punti irregolare che dipende dalla tecnica specifica utilizzata per generarla (Pulcrano et al., 2019), (Lehtola et al., 2017). Inoltre, la sua applicabilità è limitata dal raggio d'azione limitato, anche se l'acquisizione rapida dei dati e l'elaborazione automatizzata aiutano a superare queste carenze, soprattutto per gli utenti non esperti (Ingman et al., 2020).
Il rilievo di Villa Maraffa utilizzando la camera Matterport Pro2 è stato eseguito a partire dal centro dell'edificio, in corrispondenza dell'accesso principale (Fig. 2) e proseguendo poi verso le altre stanze, fino a completare l'acquisizione dell'intero edificio. Per completare quest'operazione e ottenere un dato che fosse il più completo possibile è stato necessario eseguire 94 scansioni in posizioni diverse. Considerando il tempo di acquisizione di ogni scansione, il tempo necessario per spostare e posizionare la strumentazione e la prima fase di elaborazione dei dati richiesta, come l'identificazione di porte e finestre, la durata totale del rilievo è stata di circa 5 ore. Al termine di queste, i dati sono stati caricati sulla piattaforma online per la post-elaborazione automatica.

3.2 Leica RTC360

In questo studio, la nuvola di punti di riferimento è stata ottenuta utilizzando il laser scanner terrestre a tempo di volo Leica RTC360 (Ingman et al., 2020), (Ogawa e Hori, 2019). Si tratta di uno strumento adatto a produrre una nuvola di punti di riferimento, viene infatti dichiarata dal produttore una precisione di 2,9 mm a 20 m, con una velocità di raccolta dati di due milioni di punti al secondo e una portata di 130 m (Leica Geosystems, 2023). Per l'elaborare dei dati acquisiti è stato utilizzato il software Leica Cyclone Register360 che ha consentito di unire le nuvole sfruttando gli algoritmi di computo automatico della corrispondenza tra nuvole, in quanto non sono stati utilizzati target durante l'acquisizione.

Figura 3. Rilievo con Leica RTC360.

Il rilievo con RTC360 è iniziato dallo stesso punto del rilievo con la camera Matterport Pro2 (Fig. 3). Prima di iniziare il rilievo, abbiamo impostato i parametri di scansione al valore minimo in termini di densità di punti, in modo che fossero realisticamente comparabili con i risultati forniti da Matterport. Durante tutto il processo di acquisizione, l'allineamento grezzo delle scansioni è stato controllato e migliorato manualmente sull'iPad utilizzando l'applicazione Leica Cyclone Field360. La nuvola di punti complessiva è stata ottenuta acquisendo dati da 24 punti di scansione; il processo di rilievo ha richiesto circa 2 ore di tempo. Dopo aver terminato il rilievo con RTC360, è iniziata la fase ottimizzazione dell'allineamento e di verifica dei risultati. Abbiamo iniziato migliorando l'allineamento e i collegamenti tra le scansioni, verificando la sovrapposizione tra esse sia in pianta che in sezione con il programma Leica Cyclone Register360. Durante questo processo si sono verificati la correttezza e la rigidezza dei collegamenti e il grado di sovrapposizione tra le scansioni, in modo da poter implementare i collegamenti così da ottenere dati conformi ai requisiti in termini di precisione e accuratezza. A differenza dei dati ottenuti dalla camera Matterport Pro2, dove non sono disponibili informazioni sull'allineamento delle varie scansioni, abbiamo potuto esaminare la qualità complessiva della nuvola di punti globale ottenuta dopo aver concluso l'elaborazione in post-processing con il laser scanner RTC360. Questa è risultata caratterizzata da 30 connessioni caratterizzate da una rigidezza e sovrapposizione medie totali rispettivamente dell'82% e del 53%. L'errore medio finale sulle connessioni tra le nuvole di punti che si è ottenuto è pari a 0,002 m. Si tratta di un risultato appropriato perché sia la qualità dei dati metrici acquisiti sia la qualità del processo di allineamento hanno raggiunto un grado di precisione molto elevato, superiore a quello richiesto per le scale di rappresentazione comunemente utilizzate in architettura.

4. Analisi dei dati

4.1 Confronto tra le nuvole di punti complete considerando l'autoallineamento dei dati Matterport

Per confrontare le due nuvole di punti globali acquisite dagli scanner laser Matterport e RTC360 è stato utilizzato il software open source CloudCompare. Il primo passo è stato l'allineamento della nuvola di punti ottenuta tramite la Matterport nel sistema di riferimento della nuvola di punti ottenuta da RTC360. Si è successivamente utilizzato l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP) per migliorare l'allineamento fatto manualmente. Si sono quindi analizzate le distanze tra le nuvole utilizzando l'algoritmo di calcolo della distanza chiamato "*nearest neighbour distance*". In questa prima analisi, è stato utilizzato un intervallo di distanza compreso tra 0 m e 0,65 m, che era stato precedentemente identificato come il valore reale della distanza massima tra la rappresentazione di pareti e soffitti nelle due nuvole di punti.

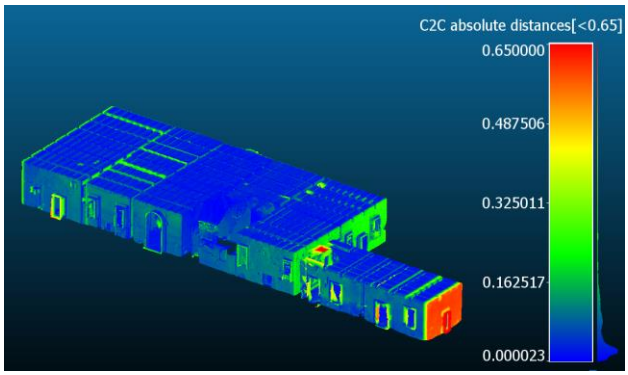


Figura 4. Analisi della distanza tra le due nuvole di punti iniziando il confronto dall'ingresso principale.

Nella Figura 4 sono rappresentate le distanze tra le due nuvole di punti: in rosso sono indicate le distanze maggiori e in blu quelle minori. Grazie a questa prima analisi, abbiamo potuto osservare che le pareti verticali che corrono trasversalmente allo sviluppo principale dell'edificio, sono caratterizzate dai valori di distanza maggiori. Quest'analisi ha rivelato come la distanza tra le due nuvole, in particolare nelle pareti, aumenti man mano che ci si allontana dal punto in cui le due nuvole sono state reciprocamente orientate. Questo ci ha spinto a considerare la possibilità che vi siano problemi dovuti all'allineamento automatico delle singole nuvole da parte di Matterport.

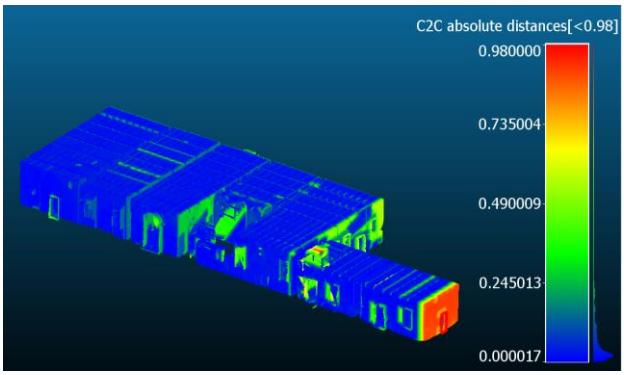


Figura 5. Analisi della distanza tra le due nuvole di punti iniziando il confronto dall'angolo in basso a sinistra.

Per questo motivo, e per tenere conto della potenziale propagazione dell'errore dovuta all'allineamento delle nuvole di punti dei dati Matterport, abbiamo deciso di effettuare le stesse analisi partendo dall'allineamento delle due nuvole da un bordo. In questo caso, la distanza massima tra nuvole è di 0,98 metri. La Figura 5 mostra che le distanze tra le pareti in prossimità della parte più stretta dell'edificio sono maggiori. In particolare, la distanza tra le pareti in questa sezione dell'edificio è compresa tra 0,70 m e 0,98 m.
Questo risultato suggerisce che la tendenza delle differenze aumenta in relazione alla distanza dal punto di allineamento.

4.2 Confronto tra nuvole di punti singoli

Dopo aver confrontato le nuvole di punti riferite all'intera struttura e aver osservato la distribuzione delle distanze, si è deciso di esaminare le singole nuvole di punti. Questo tipo di analisi ci avrebbe permesso di determinare se le sostanziali discrepanze nelle nuvole complessive fossero causate da problemi nell'acquisizione dati della camera Matterport Pro2 o dalla procedura di allineamento automatico, sulla quale non è possibile avere alcun tipo di informazione.
Per questa analisi, è stato necessario identificare una stanza che potesse essere acquisita in una singola scansione, tenendo presente la distanza massima di acquisizione della camera Matterport. Dopo aver considerato i dati forniti dal produttore, le condizioni di acquisizione e l'analisi della nuvola di punti, si è stabilito che 4,5 m sarebbe stato il raggio di acquisizione massimo per questo caso di studio, in quanto le condizioni di illuminazione non sono ottimali e la geometria delle pareti non è uniforme. Dopo aver identificato la stanza e aver acquisito i dati, per prima cosa le due nuvole di punti sono state orientate nello stesso sistema di riferimento, sono quindi stati rimossi i punti che non facevano parte della stanza per evitare di includerli nel computo della distanza.
Da una prima analisi l'intervallo di distanza assoluta nuvola-nuvola è risultato compreso tra 0 m e 1,947 m. Lo studio di questi dati e l'ottimizzazione dei risultati ottenuti da questo confronto ha rivelato che la distanza tra le nuvole della stanza acquisite con i due strumenti raggiunge un valore massimo di 0,080 m, mentre i valori di distanza maggiori si riferiscono alle diverse zone d'ombra sotto i due strumenti o agli oggetti che si sono spostati tra le due scansioni.

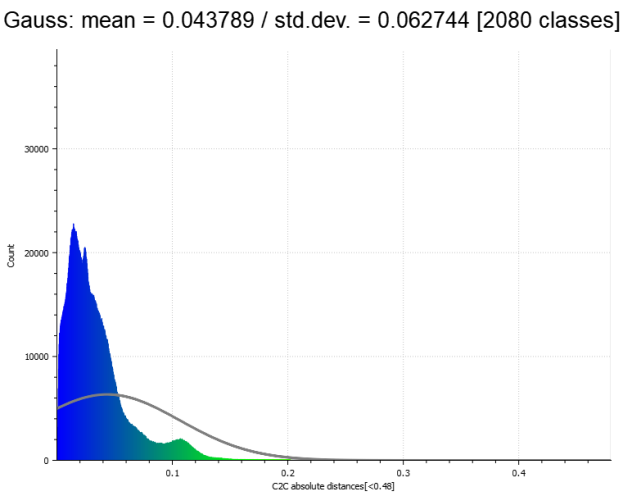


Figura 6. Istogramma che mostra la distribuzione delle distanze nel confronto delle singole nuvole.

Per evidenziare e determinare al meglio il valore medio della distanza tra le due nuvole, questa è stata ricalcolata limitando la distanza massima agli errori eliminabili. Di conseguenza, la distanza media tra le due nuvole è stata calcolata pari a 0,044 m

(Fig. 6). Considerando che i lati della stanza sono lunghi rispettivamente 5 m e 7 m, il risultato ottenuto è coerente con quanto riportato dal produttore.
Analizzando una sola scansione per strumento, è stato inoltre possibile effettuare una rapida analisi del numero di punti acquisiti.

	RTC360	Matterport Pro2
Nuvola di punti intera	10.058.840	4.533.554
Nuvola di punti segmentata	9.552.633	4.404.387
Punti eliminati	506.207	129.167

Tabella 1. Numero di punti nelle due nuvole di punti.

Come si evince dalla Tabella 1, e come era possibile immaginare considerando le caratteristiche tecniche dei due strumenti, la quantità di punti acquisiti da RTC360 è più del doppio di quella acquisita da Matterport Pro2. Inoltre, valutando i punti eliminati perché non appartenenti alla stanza, si nota una differenza ancora maggiore dovuta alla diversità dei campi di acquisizione dei due strumenti.

4.3 Confronto tra nuvole di punti intere allineando manualmente tutte le singole nuvole acquisite da Matterport

Dopo aver analizzato i risultati del confronto tra le singole nuvole di punti, si è deciso di proseguire la ricerca eseguendo un nuovo confronto tra le due nuvole di punti intere, allineando però manualmente le singole nuvole acquisite dalla camera Matterport Pro2 tra loro. In primo luogo, tutte le nuvole di punti sono state segmentate eliminando tutti i punti acquisiti a una distanza superiore a 4,5 metri dal punto di stazione. Di conseguenza, sono stati eliminati tutti i punti con un grado di imprecisione intrinseca considerato troppo elevato.
Dopo il completamento della fase di segmentazione, si è passati all'allineamento, iniziando dalla prima nuvola di punti acquisita e procedendo nell'ordine di acquisizione. Già durante questa fase si sono potute notare differenze significative tra la posizione delle singole nuvole di punti determinata automaticamente dall'algoritmo di allineamento di Matterport e quella assegnata da noi. Inoltre, nonostante alcuni punti di stazione fossero stati realizzati proprio in corrispondenza delle aperture tra le varie stanze, la differenza nella posizione delle nuvole è risultata particolarmente significativa proprio in corrispondenza di questi punti. Una volta allineate manualmente tutte le 94 scansioni acquisite con la camera Matterport Pro2, la nuvola complessiva così ottenuta è stata confrontata con quella ottenuta dalla fusione delle scansioni effettuate con il laser scanner Leica RTC360. Prima di confrontare le due nuvole è stato utilizzato l'algoritmo ICP per migliorare l'allineamento.

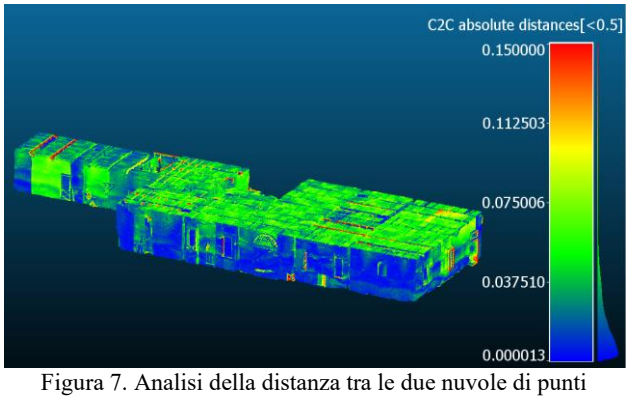


Figura 7. Analisi della distanza tra le due nuvole di punti l'allineamento manuale delle scansioni Matterport.

Dopo aver esaminato i risultati preliminari dello studio sulle distanze che il software calcola automaticamente in base alle informazioni disponibili, si è deciso di confrontare le distanze restringendo l'intervallo in modo da eliminare dal calcolo tutti i valori che non rappresentavano la distanza tra le due nuvole di punti rappresentati la geometria dell'edificio. Analizzando quindi i risultati nell'intervallo che è stato determinato come ottimale, compreso tra 0 m e 0,15 m, è stato possibile studiare più chiaramente le differenze tra le due nuvole (Fig. 7). Quest'analisi ha rivelato una distanza media di 0,022 m. Osservando i dati in falsi colori, è evidente che le parti verdi, che rappresentano distanze comprese tra 0,03 m e 0,07 m, si concentrano nella parte raffigurante il soffitto. Questo perché, nonostante siano state eseguite numerose scansioni all'interno di ogni stanza, avvicinandosi sempre a pareti diverse durante l'acquisizione, la distanza tra lo strumento e il soffitto è rimasta invariata e probabilmente maggiore rispetto alle parti dell'edificio. Ci sono anche alcune aree sul soffitto che evidenziano una distanza ancora maggiore tra le due nuvole; osservando questi dati si può notare che si tratta di regioni che sono state acquisite durante il rilievo con l'RTC360, ma non con il sistema Matterport perché erano coperte dal cono d'ombra proiettato dalle travi.

5. Risultati

Sulla base dei confronti effettuati in questo studio, è possibile concludere che la camera Matterport Pro2 è adatta per compiere rilievi di stanze o piccoli edifici dalla geometria semplice. Inoltre, risulta essere uno strumento molto utile per la documentazione rapida delle fasi di cantiere o per attestare le modifiche durante il lavoro, quando raggiungere un livello di accuratezza elevato non è fondamentale. Si tratta di uno strumento economicamente molto vantaggioso, di facile utilizzo e rapido nell'acquisizione. Tuttavia, la velocità di Matterport Pro2 dipende dalle dimensioni e dalla geometria degli oggetti perché, a differenza di RTC360, che ha un intervallo di distanza compreso tra 0,5 e 130 metri, Matterport esegue il rilievo in un intervallo di distanza compreso tra 1 e 5 metri in condizioni ottimali; quindi, per una stanza di grandi dimensioni sono necessari più punti di stazione, ciò aumenta notevolmente il tempo di acquisizione. Di conseguenza, non è possibile dire quale sia dei due strumenti sia in assoluto più veloce, poiché questo aspetto è strettamente dipende da altri parametri quali ad esempio le dimensioni e le condizioni di illuminazione dell'oggetto da acquisire. Matterport Pro2 presenta inoltre alcune limitazioni che possono influenzare la scelta dell'utente. In primo luogo, Matterport può eseguire rilievi solamente al chiuso in quanto si basa su un sistema a proiezione di luce infrarossa che è fortemente influenzato dall'interazione con altre sorgenti luminose, mentre RTC360 è adatto a eseguire rilievi sia all'interno che all'esterno. In secondo luogo, essendo stato concepito come strumento per la documentazione immobiliare, quindi più orientato alla creazione di tour virtuali basati su immagini panoramiche, non è uno strumento progettato per generare una nuvola di punti densa; questo è particolarmente evidente nei soffitti, poiché non è possibile avvicinarsi facilmente ad essi per acquisire dati da punti di stazione ad altezze diverse da quella del pavimento. Questa difficoltà nell'acquisizione di dati completi non lo rende uno strumento appropriato per rilievi dettagliati di edifici storici dove molto spesso i soffitti hanno geometrie complesse, come cassettoni, archi e volte. Un'altra limitazione di questo strumento è l'impossibilità per gli utenti di elaborare i dati grezzi originali acquisiti o avere informazioni in merito, in quanto il risultato dell'allineamento, dopo aver caricato le scansioni sul servizio cloud di Matterport, viene reso disponibile dopo circa 24 ore dal

caricamento Matterport 3D Showcase, mentre RTC360 consente agli utenti di allineare le nuvole di punti e di valutare le sovrapposizioni, la rigidezza dei legami e le distanze da nuvola a nuvola usando il software Leica Cyclone Register360. L'ultima limitazione è che la camera Matterport Pro2 non consente di rimuovere automaticamente gli oggetti mobili, mentre tra i settaggi proposti da Leica vi è questa possibilità. Come già accennato, il software che accompagna l'RTC360 consente l'esplorazione immediata del modello tridimensionale acquisito e la possibilità di allineare le varie nuvole in tempo reale. Queste caratteristiche, che consentono di verificare i dati acquisiti già in fase di campagna, unite alla possibilità di controllare con estrema precisione le successive fasi di post-processing e alle caratteristiche di acquisizione proprie dello strumento in termini di precisione e accuratezza, ne fanno uno strumento ideale per il rilievo nel campo dei Beni Culturali. D'altra parte, la differenza di costo dei due strumenti è molto elevata e giustifica anche i diversi target in termini di utenti e applicazioni.

6. Conclusioni

L'acquisizione di nuvole di punti complete delle aree interne degli edifici, in particolare di quelli storici, è una questione molto complessa, che richiede un'attenta fase di studio e pianificazione preliminare del rilievo e tempi di acquisizione molto lunghi poiché è necessario acquisire dati da molti punti di scansione. In questo processo, la possibilità di vedere sul campo un'anteprima di quanto acquisito, come offerto dal software che accompagna i due strumenti utilizzati per questa ricerca, permette di ottimizzare i tempi di acquisizione adattando la posizione delle scansioni successive alle aree in cui le informazioni non sono ancora state acquisite. Sulla base di quanto mostrato da questa ricerca, Matterport Pro2 e RTC360 forniscono un diverso livello di precisione e accuratezza delle nuvole di punti acquisite; quindi, la scelta dello strumento deve essere dettata dallo scopo del rilievo, valutando la qualità metrica della nuvola di punti e il numero di scansioni da effettuare, quindi il tempo di acquisizione. Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda la possibilità per l'utente di avere un controllo diretto e oggettivo sulla post-elaborazione e sulla qualità dei dati. Questo è un elemento che per alcuni utenti è di fondamentale importanza, mentre per altri utenti un processo chiuso, eseguito automaticamente senza la necessità di lavoro e controllo da parte di un operatore esperto, è una soluzione ottimale, soprattutto se la qualità di questo processo è garantita. L'insieme di queste considerazioni porta a evidenziare come Matterport Pro2 (è ora disponibile il nuovo modello Pro3) si riveli uno strumento prezioso nel settore immobiliare e nella documentazione speditiva delle diverse fasi di lavoro in un cantiere, mentre per eseguire rilievi precisi e accurati è meglio affidarsi a laser scanner da rilievo professionali, come RTC360.

7. Contributi, conflitti di interessi e ringraziamenti

Contributi dei singoli autori
Idea e concezione, G.B. e M.A.T.; metodologia, G.F., M.A.T e G.B..; software, G.F.; validazione, G.B. e M.A.T.; analisi, G.F.; revisione, G.B. e M.A.T.; supervisione, G.B.
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
Ringraziamo Anita Yousefi, che ha collaborato con noi durante le fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati nell'ambito della sua tesi di laurea magistrale. Ringraziamo inoltre l'associazione Operai dell'Arte APS per aver collaborato con noi durante l'acquisizione dati con la camera Matterport Pro2 e aver supportato la ricerca storica sul caso studio.

Bibliografia

Arapakopoulos, A., Liaskos, O., Mitsigkola, S., Papatzanakis, G., Peppa, S., Remoundos, G., Ginnis, A., Papadopoulos, C., Mazis, D., Tsilikidis, O. & Yighourtakis, Y., 2022, 3D Reconstruction & Modeling of the Traditional Greek Trechadiri: "Aghia Varvara", *Heritage*, 5(2), pp. 1295–1309.
Barazzetti, L., Previtali, M. & Roncoroni, F., 2018, Can we use low-cost 360 degree cameras to create accurate 3d models?, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII–2, pp. 69–75.

Bitelli, G., Dellapasqua, M., Girelli, V. A., Sanchini, E., and Tini, M. A., 2017, 3D geomatics techniques for an integrated approach to Cultural Heritage knowledge: the case of San Michele in Acerboli's church in Santarcangelo di Romagna, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII-5/W1, pp. 291–296.

Bitelli, G., Balletti, C., Brumana, R., Barazzetti, L., D'Urso, M. G., Rinaudo, F., and Tucci, G., 2019, The GAMHer research project for metric documentation of Cultural Heritage: current developments, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.,* XLII-2/W11, pp. 239–246.

Campos, M.B., Tommaselli, A.M.G., Honkavaara, E., Prol, F.D.S., Kaartinen, H., Issaoui, A. El & Hakala, T., 2018, A Backpack-Mounted Omnidirectional Camera with Off-the-Shelf Navigation Sensors for Mobile Terrestrial Mapping: Development and Forest Application, *Sensors*, 18(3).
Fabbi, F., 2007, *Villa 'La Maraffa' Vicende storico-architettoniche*, 5.

Gärdin, D. & Jimenez, A., 2018, *Optical methods for 3D-reconstruction of railway bridges Infrared scanning, Close range photogrammetry and Terrestrial laser scanning* – PhD thesis, University of Technology, Luleå.
Leica Geosystems, 2023, https://leica-geosystems.com/ products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360, (Accessed 16 June 2023).

Matterport, 2023a, https://matterport.com/blog/ introducing-pro2-3d-camera-my-all-one-marketing-solution, (Accessed 16 June 2023).

Matterport, 2023b, https://support.matterport.com/s/ article/How-Sunlight-Affects-MatterportScans?language =en_US&ardId=kA05d000001DX1g, (16 Giugno 2023).
Matterport, 2023c, https://support.matterport.com/s/ article/Scanning-a-Job-Site-for-Construction-Documentation?language=en_US&ardId=kA05d000001DWyY, (Accessed 16 June 2023).

Ediltecnica, 2023, https://www.ediltecnica.com/project/ villa-maraffa/, (Accessed 16 June 2023).

Ingman, M., Virtanen, J.-P., Vaaja, M.T. & Hyyppä, H., 2020, A Comparison of Low-Cost Sensor Systems in Automatic Cloud-Based Indoor 3D Modeling, *Remote Sensing*, 12(16).

Khoshelham, K. & Elberink, S.O., 2012, Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications, Sensors, 12(2), pp. 1437–1454.

Lehtola, V. V, Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M.T., Virtanen, J.-P., Kurkela, M., Issaoui, A. El, Zhu, L., Jaakkola, A. & Hyyppä, J., 2017, Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods, Remote Sensing, 9(8).

Ogawa, T. & Hori, Y., 2019, Comparison with accuracy of terrestrial laser scanner by using point cloud aligned with shape matching and best fitting methods, Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci., XLII-2/W9, pp. 535–541.

Popescu, C., Täljsten, B., Blanksvärd, T. & Elfgren, L., 2019, 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods, Structure and Infrastructure Engineering, 15(7), pp. 912–924.

Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G. & Luggo, A. di, 2019, 3d cameras acquisitions for the documentation of Cultural Heritage, Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci., XLII-2/W9, pp. 639–646.

Selvaggi, I., Dellapasqua, M., Franci, F., Spangher, A., Visintini, D., and Bitelli, G., 2018, 3D comparison towards a comprehensive analysis of a building in Cultural Heritage, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, pp. 1061–1066.

Shults, R., Levin, E., Habibi, R., Shenoy, S., Honcheruk, O., Hart, T. & An, Z., 2019, CAPABILITY OF MATTERPORT 3D CAMERA FOR INDUSTRIAL ARCHAEOLOGY SITES INVENTORY, Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci., XLII-2/W11, pp. 1059–1064.

© 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)

VALUTAZIONI DI QUALITA' TRA SISTEMI DI ACQUISIZIONE MOBILE E LASER SCANNER STATICI PER LO STUDIO PRELIMINARE DI UN BENE ARCHITETTONICO

A. Ferro, M. Lo Brutto

Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, Italy, (alessandra.ferro01, mauro.lobrutto)@unipa.it

Parole chiave: rilievo 3D, Laser scanning, HMLS, SLAM, nuvola di punti, Valutazione accuratezza.

Key words: 3D survey, Laser scanning, HMLS, SLAM, Point Cloud, Accuracy Assessment.

Abstract

Nell'ambito delle procedure di rilievo e modellazione 3D, si sta sempre più evidenziando la necessità di acquisire dati con modalità sempre più rapide e operativamente semplici, che consentano di ottimizzare al massimo i tempi di rilievo. I nuovi flussi di lavoro tendono pertanto a limitare l'utilizzo di tradizionali sistemi di scansione statica, evolvendosi verso approcci di mappatura in movimento che consentono notevoli risparmi di tempo. Tra i vari sistemi ad oggi presenti sul mercato, i sistemi laser scanner mobili portatili (*Handheld Mobile Laser Scanner - HMLS*) basati sulla tecnologia *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*), stanno assumendo crescente attenzione per il rilievo architettonico e edilizio, anche per la loro adattabilità a situazioni in cui sarebbe difficile l'utilizzo di altri sistemi di acquisizione tridimensionale. Seppure questi sistemi siano già ampiamente diffusi, l'accuratezza e l'affidabilità dei dati acquisiti non è ancora stata adeguatamente verificata in relazione alle differenti situazioni di rilievo. Pertanto, allo stato attuale le nuvole di punti acquisite con dispositivi statici rappresentano la soluzione teoricamente più precisa. Il lavoro affronta tale problema proponendo una valutazione preliminare tra dati acquisiti con un laser scanner mobile portatile e un sistema laser scanner statico. Le valutazioni sono state eseguite nell'ambito dell'attività di ricerca condotta per il rilievo e la documentazione del complesso di Santa Maria della Grotta a Marsala (Italia).

In 3D surveying and modelling, the need to acquire data in an ever faster and easier-to-use manner is becoming increasingly apparent, so survey times can be optimised as much as possible. New workflows therefore tend to limit the use of traditional static scanning systems and move towards approaches that offer significant time savings. Among the several available systems, Handheld Mobile Laser Scanner (HMLS) systems based on SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) technology are gaining increasing attention for architectural and building surveying, also due to their adaptability for situations where it would be difficult to use other three-dimensional acquisition systems. Although these systems are already widely used, the accuracy and reliability of the acquired data have not yet been properly verified in relation to different survey situations. Therefore, at present, point clouds acquired with static devices represent the theoretically most accurate solution. The paper addresses this problem by proposing a preliminary evaluation between data acquired with a portable mobile laser scanner and a static laser scanner system. The evaluations were carried out within the framework of the research activity conducted for the survey and documentation of the "Santa Maria della Grotta" complex in Marsala (Italy).

1. Introduzione

Nell'ultimo decennio, grande attenzione è stata posta al tema della definizione di flussi di lavoro Scan-to-BIM per integrare i dati provenienti da scansioni laser scanner e da rilievi fotogrammetrici all'interno dell'ambiente BIM, al fine di ottenere modelli parametrici degli edifici esistenti sempre più accurati e dettagliati (Rocha et al 2020). I requisiti tecnici e le potenzialità degli strumenti e dei metodi per il rilievo di oggetti come edifici, beni architettonici, infrastrutture civili, ambienti industriali, ecc., sono ben noti e ben documentati. Però, anche se queste tecniche hanno raggiunto un notevole livello di maturità, diversi aspetti nell'ambito del processo Scan-to-BIM richiedono ulteriori ricerche e approfondimenti come, per esempio, lo studio sul corretto approccio per la loro eventuale integrazione, il loro utilizzo in relazione al livello di dettaglio da perseguire per il modello BIM, ecc. (Pocobelli et al., 2020).

Come è noto, il rilievo laser scanner terrestre consiste prevalentemente in un metodo di acquisizione statica in cui lo strumento viene posizionato in un punto sul terreno da dove acquisisce tutti i punti 3D visibili sull'oggetto del rilievo. Reiterando la procedura su tutto il sito, all'interno dell'area interessata, si ottengono le nuvole di punti che descrivono l'oggetto. Sebbene questa risulti essere una procedura ampiamente utilizzata che fornisce un elevata precisione per la ricostruzione digitale tridimensionale degli oggetti rilevati, alcuni evidenti inconvenienti relativi alle procedure di acquisizione dati sono ancora presenti. Questi riguardano la necessità del posizionamento manuale del laser scanner su più punti di acquisizione, il controllo delle adeguate sovrapposizioni tra le scansioni, la necessità dell'integrazione con rilievi di tipo topografico soprattutto per la misura delle coordinate dei target necessari alla fase di registrazione (Tucci et al., 2018). Tutto questo comporta una fase di acquisizione dati che, in relazione all'estensione e alla complessità del sito, può diventare anche molto lunga e onerosa.

Per tale motivo, negli ultimi anni, la disponibilità di sistemi laser scanner mobili basati sulla tecnologia SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*) si è rivelata una valida alternativa alle acquisizioni con laser scanner statico per un ampio campo di applicazioni, soprattutto per siti e aree molto estese e complesse (Sammartino e Spanò, 2018). Questi sistemi consentono di acquisire i dati spostandosi nell'area da misurare e possono essere tenuti in mano direttamente dall'operatore (i cosiddetti *handheld system*), posizionati all'interno di zaini cha vengono indossati da un operatore (*backpack system*) oppure fissati su

carrelli o supporti mobili spinti dall'operatore (*trolley system*) (Otero et al., 2020).
Nei sistemi laser scanner mobili basati sulla tecnologia SLAM la "localizzazione" implica la stima della posizione e dell'assetto di un sensore (di misura) rispetto ad un determinato sistema di coordinate, mentre la "mappatura", è intesa come l'output finale del sensore, sotto forma di nuvola di punti dell'ambiente rilevato (Tucci et al., 2018). In sintesi, con un algoritmo SLAM è possibile costruire contemporaneamente una mappa e localizzare il sensore all'interno della mappa stessa.
Negli ultimi anni, molti sensori commerciali che supportano la tecnologia SLAM per la generazione di nuvole di punti, sono stati introdotti sul mercato e gli algoritmi sono stati costantemente migliorati, con un panorama di soluzioni abbastanza diversificato per le diverse situazioni (Hyyppä et al., 2020).
Per questo motivo ad oggi i sistemi laser scanner mobili portatili (*Handheld Mobile Laser Scanner* - HMLS) sono molto utilizzati, soprattutto perché in grado di digitalizzare scenari complessi sia in ambienti interni che in spazi esterni senza ricorrere al posizionamento satellitare (Del Duca e Machado, 2022). I dispositivi HMLS possono essere molto vantaggiosi soprattutto in spazi ristretti con occlusioni (Corrao et al., 2021) o in aree estese con presenza di fitta vegetazione e terreni irregolari (Aricò et al. 2023).
Sebbene questi nuovi dispositivi siano tecnologie in rapida evoluzione e mostrino un grande potenziale, ad oggi, non si ha ancora una standardizzata valutazione sulle lore effettive potenzialità, in relazione anche ai diversi contesti di utilizzo e alle finalità del lavoro di rilievo. Infatti, spesso l'inferiore densità dei punti acquisiti rispetto alle tecniche di misura statiche e il "rumore" più elevato che potrebbe presentarsi nei dati ottenuti da tali dispositivi, potrebbero ridurre la loro capacità di ricostruire dettagli architettonici, soprattutto in quelle applicazioni rivolte principalmente al rilievo dei Beni Culturali. In particolare, nella modellazione parametrica in ambiente BIM la generazione di elementi architettonici complessi e non presenti all'interno dei database BIM, potrebbe risultare difficoltosa o non garantire una adeguata corrispondenza con l'oggetto reale (Sammartino et. al, 2021).
Risulta pertanto utile fare delle valutazioni, che consentano di definire potenzialità e limiti di questi sistemi. Il lavoro è stato pertanto finalizzato ad eseguire un primo confronto tra dati acquisiti con un HMLS basato su tecnologia SLAM e dati acquisiti con un tipico laser scanner statico. Il confronto è stato eseguito nell'ambito delle attività di rilievo del complesso di Santa Maria della Grotta, a Marsala. Tale attività è finalizzata a realizzare un modello parametrico in ambiente HBIM della chiesa e rientra in un più ampio progetto di ricerca per la digitalizzazione e gestione in ambiente GIS di tutte le aree archeologiche di Marsala di pertinenza del Parco Archeologico di Lilibeo-Marsala.
La scelta di effettuare il rilievo con un sistema HMLS è dovuta alla complessità e alla particolarità dell'intero sito che integra sia componenti architettoniche (la chiesa), ma anche aree ed emergenze archeologiche molto più complesse da rilevare. La ricerca tende a definire quali potrebbero essere i vantaggi e, contestualmente, i limiti nell'utilizzare strumenti HMLS piuttosto che laser scanner statici per il rilievo di siti abbastanza particolari come quello in oggetto.
Il lavoro è stato svolto utilizzando il sistema HMLS Geoslam Zeb Horizon RT, che è stato impiegato per il rilievo dell'intero sito. Le operazioni di confronto sono state fatte limitando l'area di interesse esclusivamente agli ambienti interni della Chiesa di S. Maria della Grotta utilizzando dati acquisiti con un laser scanner statico Faro Focus 3D S120.

2. Il caso studio

Il caso studio riguarda il complesso di Santa Maria della Grotta a Marsala (Italia). Il complesso è costituito da una chiesa di epoca tardo-barocca ricavata all'interno di un antico complesso ipogeico (Figura 1). La chiesa è parzialmente scavata nella roccia ed è stata costruita in un'area caratterizzata dalla presenza di ipogei preesistenti. Tali ipogei hanno avuto nel tempo varie funzioni, in età punica erano stati in parte usati come necropoli, successivamente sono stati trasformati in latomie e poi sfruttate per diversi utilizzi come, per esempio, per luoghi di culto. La chiesa si colloca in posizione centrale rispetto gli ipogei preesistenti e rappresenta l'unico punto di accesso all'intero complesso. L'accesso alla chiesa avviene tramite una scalinata che colma il dislivello del piano di campagna dell'area circostante e il piano di calpestio della chiesa.
La vasta area in cui sorge il complesso vanta una storia millenaria e molto complessa dovuta alle diverse funzioni che, nel corso dei secoli, ha dovuto assolvere.
Le prime testimonianze sull'area risalgono alla nascita della città punica di Lilibeo (V sec. a.C. e inizi del IV sec. a.C.); in questa prima fase l'area fu destinata a necropoli, come documentano le numerose tombe ipogeiche a pozzo verticale (in un caso con camera funeraria) e a fossa rettangolare o quadrangolare, utilizzate per inumazioni ed incinerazioni entro anfore.
Nella seconda fase, tra la fine del II sec. e il III sec. d.C., l'area fu utilizzata per la cavatura della pietra necessaria all'espansione edilizia della città.
Successivamente, in epoca paleocristiana, le latomie cessarono la loro attività e vennero destinate ad area cimiteriale.
Nella quarta fase intorno al XV secolo, nell'area delle latomie fu costruita una abbazia denominata "Santa Maria della Grotta", in quanto parzialmente sotterranea, affidata all'ordine dei Gesuiti, che la detennero fino allo scioglimento definitivo dell'Ordine, avvenuto nel 1860 (Giglio, 1997).

Figura 1. Chiesa di S. Maria della Grotta.

Le vicende della chiesa tra la metà del Cinquecento e il Settecento sono poco note, ma varie testimonianze pittoriche dimostrano che il complesso ipogeico continuò ad essere frequentato per l'uso liturgico anche in questo periodo.
La fase edilizia e monumentale più rilevante della chiesa risale al XVIII secolo, quando i padri gesuiti affidarono il progetto di rifacimento della più antica chiesa ipogea, rovinata per la forte umidità, all'architetto trapanese Giovan Biagio Amico.
La chiesa barocca, ricavata all'interno dell'antico complesso ipogeico, consiste in una grande aula a navata unica, interamente rivestita di stucco bianco e scandita da ingressi laterali (due per lato) che introducono nelle zone degli ipogei. I due ipogei sono

ubicati rispettivamente a Sud e a Nord della chiesa (Figura 2); il primo dalla pianta irregolare simile, grosso modo, ad una L; il secondo costituito da tre piccoli vani di forma quadrangolare disposti sullo stesso asse e da un gruppo di ambienti più al Nord, ai quali si accede per mezzo di tre rampe di scale.

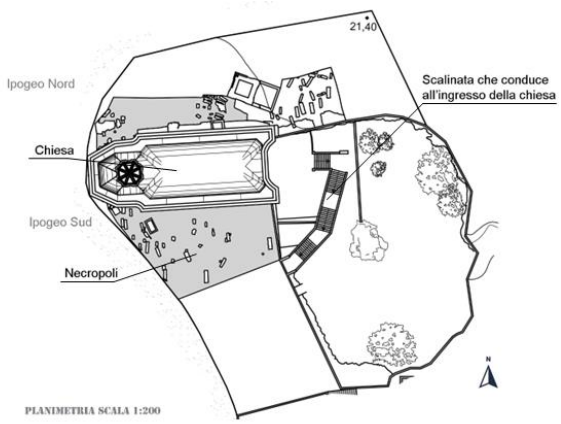


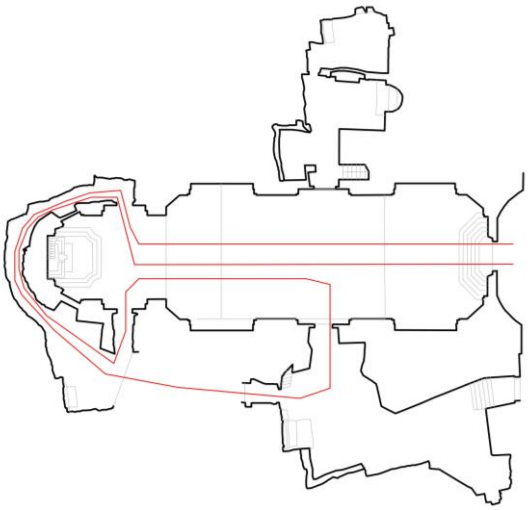
Figura 2. Planimetria dell'area del complesso di Santa Maria della Grotta.

La copertura, molto più alta rispetto a quella della chiesa precedente, fu coronata da una cupola rivestita da mattonelle verdi e scandita da costoloni in tufo. Una balaustra, posta in alto lungo il cornicione della chiesa e un accesso scenografico, costituito da un'ampia scalinata a rampe spezzate, completavano l'opera (Casano Del Puglia R., 2012).
La porta di accesso rimase nella posizione precedente e al di sopra venne ricavato un occhio come fonte di luce.
Passata al Demanio dello Stato nel 1866, la chiesa rimase aperta al culto fino al 1968, quando a causa dei crolli provocati dal terremoto e ai successivi danni provocati dalle piogge nel 1976 venne definitivamente chiusa e lasciata in uno stato di abbandono. Questa situazione provocò il trafugamento della balaustra del coronamento e il crollo nel 1978 della torre normanna (Caruso, 1998).
Da alcuni anni l'area è diventata di competenza del Parco Archeologico di Lilibeo-Marsala che provvede al suo mantenimento e alla messa in sicurezza dei luoghi anche se il complesso è ancora oggi in uno stato di parziale abbandono (Figura 3). Inoltre, nuove costruzioni vanno sorgendo attorno all'area deprivando il contesto dei suoi tratti peculiari.
Nonostante tutto, l'area rimane ancora oggi una preziosa testimonianza sia del patrimonio archeologico, artistico e culturale di Marsala, e rappresenta un sito di notevole importanza sia dal punto di vista storico sia per le sue particolarità morfologiche.

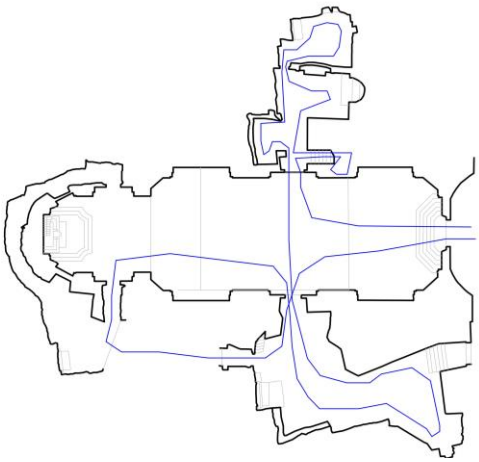
Figura 3. Vista interna della Chiesa di Santa Maria della Grotta.

3. Acquisizione e elaborazione dati

L'attività di rilievo del complesso è stata definita a seguito di un sopralluogo preliminare che ha permesso di individuare la strategia migliore per l'acquisizione dati. In particolare, la singolare morfologia del complesso con un'alternanza di zone ampie e prive di ostacoli (la navata centrale della chiesa) e zone ristrette con angusti passaggi (gli ipogei) rendeva particolarmente difficoltosa il rilievo tridimensionale dell'intero complesso con un laser scanner statico. Per questo motivo si è optato per l'utilizzo di un HMLS che consentisse il rilievo in tempi rapidi e senza particolari problemi di registrazione delle nuvole di punti dell'intero complesso.
Il rilievo dell'intera area (ambienti interni della Chiesa, ipogei e spazi esterni) è stato pertanto eseguito con uno strumento GeoSLAM Zeb Horizon RT. Tale strumento garantisce di rilevare fino ad una distanza di 100 metri acquisendo 300.000 punti al secondo e permette di raggiungere precisioni fino ai 6 mm se i dati vengono processati con il software proprietario GeoSLAM Connect V2. La nuvola di punti prodotta durante il rilievo può essere visualizzata in tempo reale tramite un tablet collegato con il sistema di acquisizione e la sua densità dipende dalla velocità dell'operatore; più lentamente viene eseguito il movimento del sensore, maggiore sarà la densità dei punti misurati.
Il rilievo del complesso ha previsto una suddivisione delle acquisizioni in tre diversi percorsi, in cui i primi sono stati condotti per rilevare la facciata esterna, l'intera navata centrale e gli ipogei laterali (Figura 4). Il terzo percorso è stato invece eseguito per acquisire le facciate esterne dell'edificio percorrendo il perimetro dell'edificio. Questo percorso ha comunque previsto anche un passaggio all'interno per ri-acquisire la navata centrale della chiesa, in modo tale che tutti i percorsi eseguiti abbiano sempre una porzione comune sufficientemente ampia.
Poiché ogni percorso risulta avere un sistema di riferimento autonomo è stato necessario posizionare un numero adeguato di punti di controllo lungo il percorso, utili per riallineare i vari percorsi. Complessivamente sono stati collocati nove punti, sia all'interno della Chiesa, sia sulla parte di collegamento esterno; le coordinate di questi punti sono state ottenute sostando con lo strumento su ogni punto per circa 10 secondi. Uno dei punti esterni è stato definito come punto di partenza di tutti i percorsi.



(a)



(b)

Figura 4. Percorsi eseguiti con ZEB HORIZON: (a) primo percorso (b) secondo percorso.

Il rilievo HMLS ha prodotto tre distinte nuvole di punti, relative ai tre diversi percorsi effettuati e si è dimostrato particolarmente utile per le zone degli ipogei, in cui è stato possibile raggiungere spazi angusti e praticamente impossibili da rilevare con qualsiasi altro tipo di tecnologia.
Per poter elaborare e processare i file, è stato necessario utilizzare inizialmente il software proprietario GeoSLAM Hub, attraverso il quale è stata effettuata una prima operazione di roto-traslazione dei percorsi per riferirli ad un unico sistema di riferimento. Questa operazione è stata condotta utilizzando le coordinate dei punti di controllo posizionati lungo il percorso. Successivamente, l'allineamento è stato ulteriormente migliorato attraverso una procedura automatica di registrazione Cloud-to-Cloud.
Il processamento ha consentito di ottenere una nuvola di punti complessiva dell'intero sito, ad esclusione delle parti non raggiungibili dall'operatore, come le coperture esterne.
Ai fini di un confronto con dati acquisiti con un laser scanner statico si è proceduto a rilevare, tramite un laser scanner Faro Focus 3D S120, tutta la navata principale della chiesa. La scelta di limitare l'area di confronto solo alla navata della chiesa è dovuta sia all'oggettiva difficoltà operativa di rilevare con un laser scanner statico tutte le altre zone, sia al fatto che la parte architettonica della chiesa, con le sue forme geometriche ben definite, si prestava meglio per la fase di confronto. Il Faro Focus 3D S120 è uno strumento molto noto e utilizzato nel campo del rilievo dei beni culturali caratterizzato da un campo visivo a 360° sull'asse orizzontale e 300° sull'asse verticale, una portata di 120 m e una precisione teorica nella misura della distanza di ±2 mm.
Il rilievo con il laser scanner Faro Focus 3D S120 è stato pianificato ed eseguito prevedendo il posizionando dello strumento in quattro punti interni lungo l'asse mediano della navata (Figura 5).

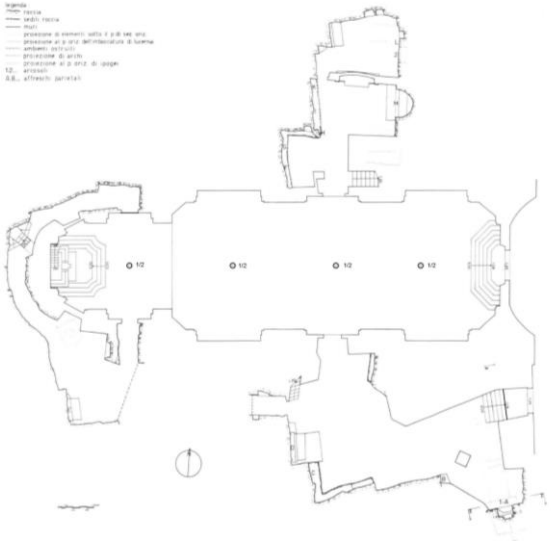


Figura 5. Schema delle prese con il laser scanner Faro Focus 3D (planimetria da Caruso, 1998)

Per elaborare le nuvole di punti misurate con il laser scanner Faro Focus è stato utilizzato il software ReCap Pro di Autodesk; il processamento ha previsto l'importazione delle scansioni e la successiva fase di registrazione automatica delle stesse.
Per poter eseguire le operazioni di confronto è stato necessario allineare i due dataset, quello ottenuto con il HMLS e quello ricavato dal laser scanner Faro, in modo tale da posizionarli nello stesso sistema di riferimento e renderli sovrapponibili. Quest'ultimo passaggio è stato effettuato applicando una registrazione Cloud-to-Cloud con il software CloudCompare; è stato eseguito un primo allineamento per punti omologhi e, successivamente, per migliorare il risultato, è stato effettuato un allineamento automatico con l'algoritmo ICP.

4. Confronto nuvole di punti

Il confronto tra i due dataset è stato eseguito inizialmente in modo qualitativo determinando la densità (*density*) e la "rugosità" (*roughness*) dei punti; successivamente è stato fatto anche un confronto di tipo quantitativo tramite il calcolo della distanza tra le nuvole di punti.
Per il confronto qualitativo relativo alla densità (*density*) e alla "rugosità" (*roughness*) è stato scelto di fare riferimento ad un singolo percorso del rilievo HMLS e ad una singola scansione del laser scanner statico; questa scelta è stata fatta in modo tale che i parametri di confronto (*density* e *roughness*) non fossero influenzati dalla sovrapposizione di dati provenienti da acquisizioni differenti.
Per quanto riguarda invece, il successivo confronto, si è fatto riferimento alla nuvola di punti complessiva ottenuta dopo i vari step di processamento. In questo caso si è ritenuto più opportuno utilizzare in entrambi i casi il dataset finale in quanto rappresenta il dato effettivo sul quale possono poi essere eseguite eventuali operazioni di modellazione. Le differenti analisi sono state tutte condotte principalmente utilizzando i *tools* presenti nel software open source CloudCompare.

4.1 Analisi della densità e rugosità delle nuvole di punti

La valutazione relativa alla densità (*density*) e alla "rugosità" (*roughness*) è stata condotta considerando solo una porzione della navata; tale area corrisponde ad una nuvola di punti di circa 10 milioni di punti per il dataset HMLS e di circa 35 milioni di punti per il dataset del rilievo statico (Figura 6).

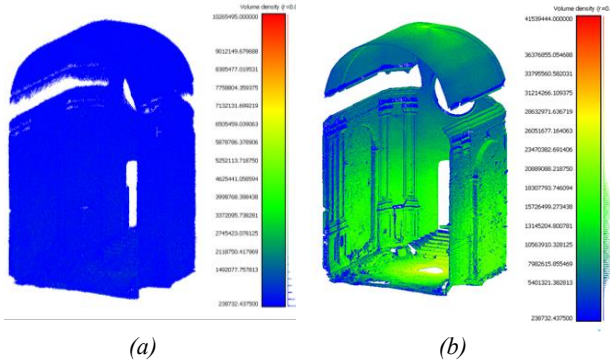
(a) *(b)*

Figura 6. Porzione della nuvola di punti HMLS (a) e del rilievo statico (b).

Il software Cloud Compare offre la possibilità di stimare la densità e la rugosità delle nuvole di punti attraverso il comando "*Compute geometric features*"; in particolare per la densità si può fare riferimento a:

- "*Number of neighburs*", nonché il numero di punti vicini;
- "*Surface density*", ovvero il numero di punti vicini diviso la superficie ($=N/\pi r^2$);
- "*Volume density*", ovvero il numero di punti vicini diviso il volume ($=N/\pi r^3$);

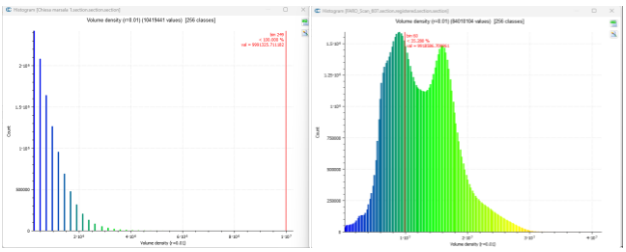
Per questo studio è stato scelto di calcolare il "*Volume density*" attraverso il quale la densità viene stimata determinando il numero di punti contenuti in un intorno locale di una sfera. Il raggio della sfera è variabile e può essere arbitrariamente scelto dall'operatore; nel nostro caso, a seguito delle diverse prove eseguite, è stato ritenuto idoneo assumere un valore pari a 0.01 m.
I risultati del processo vengono memorizzati come campi scalari e possono essere rappresentati mediante una mappatura di colori sulla nuvola di punti (Figura 7).
Nel rilievo HMLS la distribuzione dei dati presenta valori di densità nettamente inferiori per l'intera porzione; questo è abbastanza evidente nella figura 7a in cui la maggior parte dei punti fa riferimento ai valori più bassi della legenda. Si può però notare come ci sia una densità pressoché costante nell'area considerata.
La densità della nuvola di punti ottenuta da laser scanner statico è invece caratterizzata da una minore uniformità della distribuzione dei punti, soprattutto nelle zone d'ombra provocate dagli elementi architettonici come le paraste o le zona di imposta della volta, ma da una densità media nettamente superiore (Figura 7b).



(a) *(b)*

Figura 7. Confronto della densità per HMLS (a) e laser scanner statico (b)

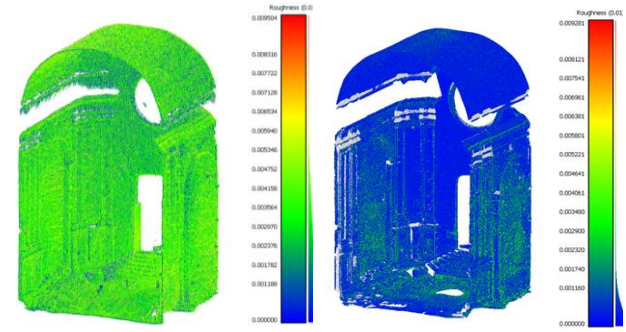
Tali considerazioni sono ulteriormente confermate dal confronto tra gli istogrammi in figura 8, in cui sull'asse delle ascisse vengono riportati i valori di densità calcolati per un raggio di 0.01 m, mentre sull'asse delle ordinate il numero di punti corrispondenti.



(a) *(b)*

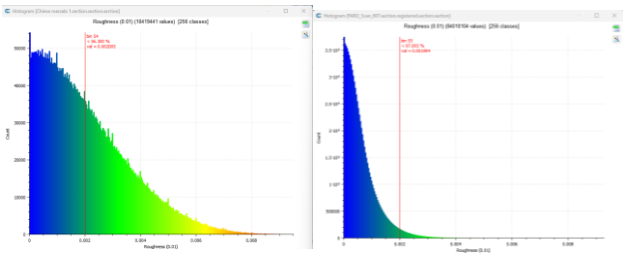
Figura 8. Istogramma per la valutazione della densità HMLS (a) e laser scanner statico (b).

Prendendo un valore di riferimento di densità, ad esempio $1x10^7$, è possibile notare che tutti i punti HMLS risultano inferiori a tale valore, mentre per il laser scanner statico soltanto il 35% dei punti. Questo fa intuire come la densità dei punti per le acquisizioni con laser scanner statico sia di gran lunga superiore rispetto l'acquisizione HMLS, con valori di densità che vanno da $1x10^7$ fino a $3x10^7$, mentre la totalità dei punti del rilievo HMLS risulta avere una densità inferiore ad un valore di $4x10^6$.
L'inferiore densità dei punti che caratterizzano i dispositivi HMLS è un fattore determinate nella valutazione del livello di dettaglio della nuvola di punti ottenuta che, se risulta non adeguato, riduce la capacità di ricostruire soprattutto i dettagli architettonici.
Il secondo parametro considerato è la "rugosità" (*roughness*). CloudCompare da una stima del *roughness* come la distanza tra un punto ed il piano medio calcolato sui punti più vicini, secondo una sfera di raggio variabile. Anche in questo caso si è optato per una sfera di raggio pari a 0.01 m.
Nella figura 9 è possibile notare una evidente differenza nella stima della "rugosità" della nuvola di punti; tale risultato era ovviamente abbastanza scontato considerando le due diverse modalità di acquisizione. Nel dettaglio, guardando l'istogramma in figura 10, la distribuzione dei punti secondo il metodo della "rugosità" evidenzia che i punti sulle superfici sono per il 97% a distanze inferiori a 0.02 m per il laser scanner statico, mentre l'HMLS genera più rumore in tutta la scena, descrivendo una curva più ampia, in cui solo il 56% dei punti si trova a distanze inferiori ai 0.02 m. Questo aspetto potrebbe contribuire ad ottenere informazioni meno accurate nella definizione delle superfici e dei confini degli oggetti scansionati.



(a) *(b)*

Figura 9. Confronto della "rugosità" per HMLS (a) e laser scanner statico (b).

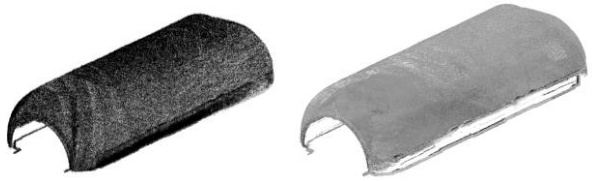


(a) *(b)*

Figura 10. Confronto della "rugosità" per HMLS (a) e per il laser scanner statico (b).

4.2 Calcolo della distanza tra le nuvole di punti

Per il confronto quantitativo tramite il calcolo della distanza tra le nuvole di punti è stato preventivamente necessario sotto-campionare i due dataset in quanto i dati finali del processamento sono risultati troppo difficili da gestire. Il ricampionamento è stato eseguito con il software CloudCompare nella modalità "*space*" imponendo valori di distanza minima tra i punti di 0.005 m; inoltre, per avere una porzione che fosse molto regolare dal punto di vista geometrico si è scelto di analizzare unicamente la parte dell'intradosso della volta. I due dataset sono risultati approssimativamente pari a circa 9 milioni di punti ciascuno (Figura 11), consentendo in questo modo di avere due porzioni approssimativamente equivalenti dal punto dal punto di vista della densità dei punti.



(a) *(b)*

Figura 11. Nuvola di punti HMLS (a) e laser scanner statico (b).

Il confronto è stato eseguito con il comando *C2C distance* (*Cloud to-cloud distance*) di CloudCompare, stimando la distanza assoluta che intercorre tra le due nuvole di punti. Per il confronto è stata impostata la nuvola di punti acquisita con Faro Focus 3D come riferimento, da cui è stata calcolata la deviazione dei dati riferiti al rilievo HMLS.

Nella procedura *C2C distance* è possibile specificare un valore soglia oltre il quale la distanza non viene ulteriormente stimata; in questo studio è stata assunta una distanza di 0.1 m.
La nuvola di punti è stata colorata sulla base del campo scalare delle differenze, in moda tale da poter vedere graficamente le porzioni più o meno distanti (Figura 12). Dall'immagine risulta evidente come non ci sia una distribuzione omogenea delle differenze e in alcune zone queste risultano significative, nell'ordine di qualche centimetro. È inoltre interessante notare che spesso le differenze sono localizzate lungo le linee di scansione del sistema mobile, come se fossero più dovute al calcolo della traiettoria del sensore piuttosto che alla misura laser scanner. Ovviamente tali preliminari risultati richiedono una più approfondita verifica per poter effettivamente valutare i risultati.
Come riportato nell'istogramma in figura 13, la maggior parte dei punti si trova a distanze inferiori ai 0.03 m, in particolare l'83% dei punti ha uno scostamento che risulta in linea con quanto già riscontrato in precedenti sperimentazioni (Tucci et al., 2018); la gran parte dei punti rimanenti risulta compresa tra i 0.03 m e 0.06 m.

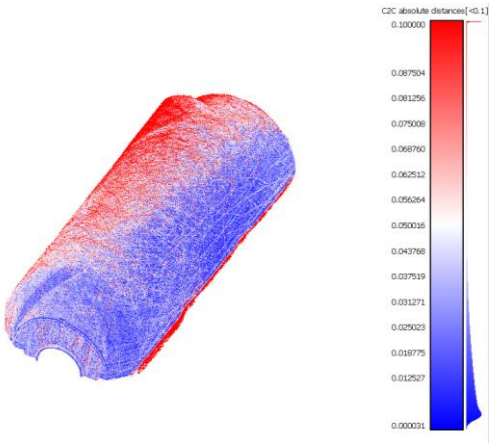


Figura 12. Analisi della deviazione superficiale *C2C distance* tra i dati del laser scanner statico e quelli basati su HMLS.

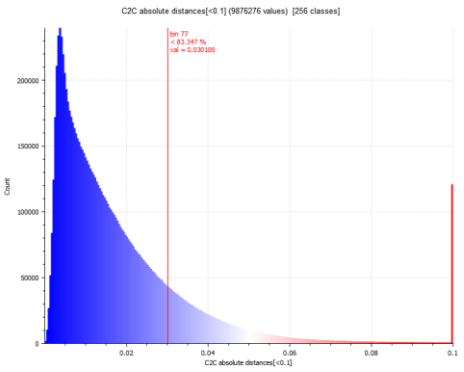


Figura 13. Istogramma della deviazione superficiale *C2C distance*.

È importante tenere presente che le scansioni effettuate da HMLS con durate molto lunghe o che attraversano percorsi molto lunghi sono soggette a errori cumulativi maggiori che possono generare distorsioni significative nel posizionamento degli elementi nello spazio (Nocerino et al., 2017).
A supporto di tali analisi, sono state estrapolate due sezioni dalle nuvole di punti della volta, una longitudinale e una trasversale, di 0.02 m di larghezza, in cui si possono analizzare in maniera puntuale le differenze riscontrate.

Dalle due sezioni è possibile notare come non risultino evidenze degne di nota di eventuali disallineamenti tra i dati. Inoltre, facendo un controllo puntuale verificando la distanza tra i punti più prossimi delle due nuvole di punti si riscontrano valori perlopiù compresi tra i 5 e i 2 cm (Figura 14).
L'assenza di grandi deviazioni indica che i dati HMLS risultano congruenti dal punto di vista geometrico con quelli del rilievo statico.

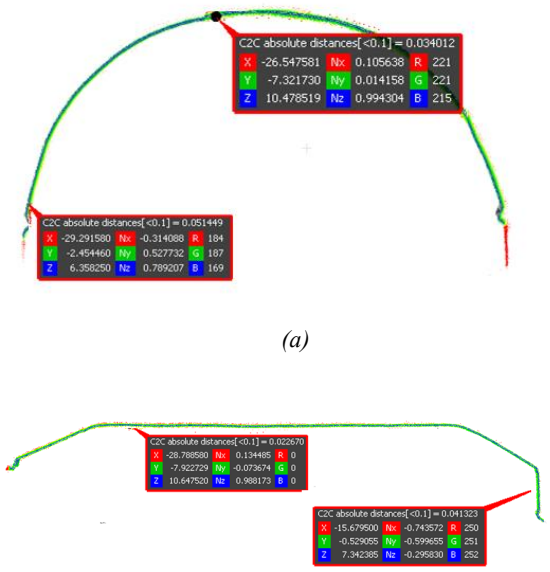


Figura 14. Distanza punto - punto: sezione longitudinale (a) e trasversale (b).

5. Conclusioni

La ricerca si è posta come obiettivo quello fare una prima valutazione di come e quando sia possibile porre alla base di un processo di modellazione architettonica, secondo un approccio Scan-to-BIM, una fonte dati proveniente da un rilievo laser scanner mobile. Tali metodi di rilievo hanno indubbi vantaggi in termini di efficienza dei tempi di acquisizione e gestione dei dati, ma potrebbero essere caratterizzati da una minore precisione rispetto ad un rilievo laser scanner statico.
Le principali differenze tra l'approccio *mobile* e statico riguardano la pianificazione dell'acquisizione, il tempo utilizzato per ottenere una nuvola di punti, le procedure di processamento.
La verifica è stata attuata all'interno del caso studio considerato limitando però il processo di confronto unicamente alla navata centrale della chiesa.
Il confronto si è basato sulla stima di alcuni parametri ritenuti significativi per una prima valutazione, in particolare ci si è basati sul calcolo dei parametri di densità (*density*) e la "rugosità" (*roughness*). La modalità di acquisizione laser scanner in movimento, pur con reali vantaggi in termini di tempo, presenta però ancora dei limiti relativamente alla densità dei punti e alla "rugosità" della nuvola di punti. Questa situazione potrebbe creare difficoltà in successive fasi di modellazione soprattutto nella definizione dei dettagli architettonici (Sammartano et al., 2021).
Il confronto qualitativo mostra risultati coerenti con quanto già attestato in sperimentazioni precedenti. Alcuni aspetti richiedono però ulteriori ricerche e più approfondite prove per poter ricavare valutazioni più rigorose.
In questa prospettiva la ricerca si muove su ulteriori miglioramenti per potenziare questi sistemi di rilievo ormai sempre più vantaggiosi, con la possibilità di unificare dati acquisiti simultaneamente con differenti strumentazioni, in relazione al livello di dettaglio e di approfondimento da voler perseguire.

6. Contributi, conflitti di interessi e ringraziamenti

Gli autori hanno contribuito in maniera paritetica alla realizzazione del lavoro e alla stesura del testo. Gli autori dichiarano di non aver nessun conflitto di interessi.
Si ringrazia inoltre la ditta MicroGeo per aver fornito lo strumento GeoSLAM Zeb Horizon, in particolare Carmen Zaami per il supporto durante le fasi di rilievo e Francesco Battinelli per il supporto durante la prima fase di elaborazione dei dati GeoSLAM.

Bibliografia

Caruso E., Santa Maria della Grotta, Murex, Marsala, 1998

Casano Del Puglia R., 2012. Marsala, la Chiesa di Santa Maria della Grotta: tra ipogei punici e catacombe paleocristiane. Brigantino, il portale del Sud. http://www.ilportaledelsud.org/santa_maria_grotta.htm. (Accessed 31 August 2023)

Corrao R., Di Paola F., Termini D., Vinci C., 2021. Investigation of the underground building heritage and the mechanism of water flowing in Qanats in Palermo through innovative surveying techniques. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, XLVI-M-1-2021, 147-154. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-m-1-2021-147-2021.

Del Duca, G., Machado C., 2022. 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, pp. 1007–1027. https://doi.org/10.3390/heritage6020057

Giglio R., 1997. Lilibeo Marsala. Nuove scoperte archeologiche nell'area di Santa Maria della Grotta e del Complesso dei Niccolini, *SicA*, XXX, 93-95, pp. 45-58.

Nocerino E., Menna F., Remondino, F. Toschi, I., Rodríguez-Gonzálvez P., 2017. Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. *In F. Remondino & M. R. Shortis (Eds.), Videometrics, Range Imaging, and Applications* XIV, edited, SPIE (p. 103320I). https://doi.org/10.1117/12.2270761

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 Sens*., 12, 3327. https://doi.org/10.3390/rs12203327

Aricò M., La Guardia M., Lo Brutto M., Rappa E.M., Vinci C., 2023. Mobile mapping for cultural heritage: the survey of the complex of St. John of the Ermits in Palermo (Italy). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1/W1-2023. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-25-2023.

Otero R., Lagüela S., Garrido I., Arias P., 2020. Mobile indoor mapping technologies: A review. *Automation in Construction*, 120, 103399. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103399.

Pocobelli, D.P., Boehm, J., Bryan, P. et al., 2018. BIM for heritage science: a review. Heritage Science, 6, 30 (2018).
Rocha, G.; Mateus, L.; Fernández, J.; Ferreira, V., 2020. *A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings*. Heritage, 3, 47-67.

Rocha G, Mateus L, Fernández J, Ferreira V., 2020. A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 3, pp. 47-67. https://doi.org/10.3390/heritage3010004.

Sammartano G., Spanò A., 2018. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied Geomatics*, 10(4), 317–339. https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7

Sammartano G., Previtali M., Banfi F., 2021. Parametric generation in HBIM workflows for slam-based data: discussing expectations on suitability and accuracy. *Proceedings of the joint international event 9th ARQUEOLÓGICA 2.0 & 3rd GEORES, Valencia (Spain), 26–28 April 2021*. https://doi.org/10.4995/Arqueologica9.2021.12155.

Tucci G., Visintini D., Bonora V., Parisi E., 2018. Examination of Indoor Mobile Mapping Systems in a Diversified Internal/External Test Field. *Applied Sciences*, 8, 401. https://doi.org/10.3390/app8030401.

IL RUOLO DELLA GEOMATICA NEL MONITORAGGIO DELL'IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI E ALTRI RISCHI SUL PATRIMONIO CULTURALE: RISULTATI PRELIMINARI DI UN'ANALISI BIBLIOMETRICA

F. Di Ciaccio [a], G. Tucci [a]

[a] Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, via di S. Marta 3, 50139 Firenze (FI), Italy
fabiana.diciaccio@unifi.it, grazia.tucci@unifi.it

Parole chiave: Analisi bibliometrica, Cambiamenti climatici, Geomatica, Monitoraggio ambientale, Patrimonio culturale

Key words: Bibliometric analysis, Climate change, Cultural heritage, Environmental monitoring, Geomatics

Abstract

In un'epoca caratterizzata da forti cambiamenti climatici ed importanti sfide a livello ambientale, la salvaguardia del nostro patrimonio culturale acquisisce un'importanza prioritaria e sempre maggiore. Questo lavoro presenta i risultati di una approfondita analisi bibliometrica con lo scopo di esplorare il ruolo della geomatica nei processi di monitoraggio ambientale e di preservazione del patrimonio culturale, tenendo ovviamente conto dei cambiamenti climatici e degli altri rischi connessi.
Tramite l'utilizzo del software VOSviewer sono state create delle mappe basate sui dati ottenuti dalla ricerca bibliografica, al fine di visualizzare le relazioni tra riviste scientifiche, ricercatori e paesi e di analizzare la co-occorrenza di diversi termini legati all'argomento di interesse. Ciò ha permesso, insieme all'analisi approfondita della letteratura pertinente, di esplorare le ricerche, i contributi ed i modelli esistenti in questo campo interdisciplinare, mettendo in evidenza la crescente importanza delle metodologie di monitoraggio ambientale e di valutazione del rischio, sostenute dagli strumenti geomatici, nel contesto della conservazione del patrimonio.
Questa analisi bibliometrica offre preziosi spunti ed approfondimenti sullo stato dell'arte nel settore ed individua aree emergenti di ricerca, rappresentando una risorsa di inestimabile valore per studiosi, policymakers e professionisti impegnati nella conservazione e tutela del patrimonio culturale.

In an era marked by unprecedented climate change and environmental challenges, safeguarding our cultural heritage has gained an overriding importance. This paper conducts a comprehensive bibliometric analysis to deepen the role of geomatics in environmental monitoring and cultural heritage preservation, considering climate change and other risks.
A systematic analysis of the relevant literature has been made, and the VOSviewer software has been used to create maps based on the bibliographic network data to display the relationships among scientific journals, researchers, and countries and to analyze the co-occurrence of different terms connected to the research. In this way, existing studies, contributions and patterns in this interdisciplinary field have been explored, underscoring the growing significance of environmental monitoring and risk assessment methodologies, underpinned by geomatics tools, in the context of heritage conservation.
This bibliometric analysis offers valuable insights into the state of the art in the field and identifies emerging areas of research, serving as a valuable resource for scholars, policymakers, and practitioners dedicated to the preservation and protection of cultural heritage.

1. Introduzione

La conservazione del patrimonio culturale riveste un ruolo di primaria importanza per le società di tutto il mondo. Il patrimonio culturale comprende risorse tangibili (monumenti, edifici storici, paesaggi culturali, siti archeologici, oggetti storici) ed intangibili (conoscenze, arti performative, pratiche sociali, tradizioni orali ed espressioni), ereditate dal passato e create nel corso del tempo dalle persone e/o dalla loro interazione con l'ambiente (Munjeri, 2004). Questo patrimonio offre oggi una vasta diversità di benefici alla società ed all'ambiente, ricoprendo un ruolo importante nello sviluppo economico e nella crescita attraverso l'industria del turismo e la riqualificazione urbana e rurale (Alexandrakis et al., 2019). Tuttavia, di fronte a cambiamenti climatici senza precedenti e ad una serie di rischi antropogenici e naturali, questi inestimabili tesori culturali sono sempre più minacciati (Sesana et al., 2018).

In questo contesto, la geomatica emerge come strumento fondamentale nel processo di indagine e monitoraggio del patrimonio culturale, oltre che della valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici ed altri rischi sullo stesso. La geomatica consente infatti la raccolta, l'analisi e la visualizzazione dei dati spaziali, offrendo preziosi approfondimenti sulle condizioni mutevoli dei siti di interesse (Tucci and Bonora, 2015).
Al fine di ottenere una panoramica sul ruolo della geomatica nella salvaguardia del patrimonio culturale di fronte ai cambiamenti climatici, questo articolo presenta i primi risultati di un'analisi bibliometrica effettuata tramite VOSviewer: si tratta di un software che crea mappe sulla base dei dati bibliografici, rivelando le relazioni tra riviste scientifiche, ricercatori e paesi e analizzando la co-occorrenza dei termini rilevanti (Di Ciaccio and Troisi, 2021). In questo modo è possibile approfondire lo stato dell'arte in merito all'utilizzo degli strumenti geomatici nel monitoraggio e valutazione del rischio del patrimonio culturale.

1.1 Stato dell'arte

Mentre il nostro pianeta affronta gli effetti profondi del cambiamento climatico, dai crescenti livelli di temperatura e del mare a eventi naturali sempre più frequenti e intensi, i siti del patrimonio culturale si trovano in prima linea di vulnerabilità. Allo stesso tempo, fattori antropogenici, tra cui l'urbanizzazione, l'industrializzazione e l'inquinamento, intensificano le minacce che incombono su di essi.

In questo complesso scenario, la geomatica permette non solo di documentare e monitorare i siti del patrimonio, ma anche di prendere decisioni informate riguardo alla loro protezione e preservazione. Alcuni esempi significativi sono presentati di seguito. Il lavoro di Tucci et al. (2019) presenta una caratterizzazione termica di un vigneto terrazzato con muretti a secco nella zona del Chianti (Toscana, Italia) con l'obiettivo di individuare alterazioni microclimatiche indotte dalla loro struttura. I rilievi sono stati effettuati con due camere, una delle quali con sensore termico, montate su un drone aereo, ed hanno prodotto dei risultati che supportano ulteriori sviluppi di questa tecnica di rilievo per lo scopo. Lo studio di Kolokoussis et al. (2021) analizza lo stato di degradazione in riferimento ai siti archeologici dell'isola di Rodi, Grecia. L'integrazione di dati multisensore, quali immagini ipespettrali e modelli 3D ottenuti da dati di camere a diverse risoluzioni combinati a laserscanning, ha permesso l'analisi di tipo di materiale e mappe di degradazione sfruttando un approccio non distruttivo. Gli autori di Mitro et al. (2022) presentano un sistema che include dispositivi IoT (Smart Tags) per l'acquisizione di misure ambientali nei pressi dei monumenti, in modo da facilitarne la trasmissione e dunque agevolare lo studio del tasso di deterioramento e le conseguenti strategie di mitigazione.
Hollesen et al. (2023) propone l'utilizzo di un drone dotato di due camere (RGB e multispettrale/termica) per mappare la zona archeologica di Kujataa, nel sud della Groenlandia. Integrando i risultati con un modello digitale del terreno e mappe NDVI, ottengono informazioni sull'impatto delle attività umane sui siti di interesse e sulla variabilità di composizione del terreno stesso. Il lavoro di Gabriele et al. (2023) analizza il caso studio della Villa Arconati (Milano, Italia) con un approccio multiscala: il primo basato su mappe storiche ed uso dell'indice NDVI per monitorare la trasformazione dell'ambiente circostante, il secondo basato sullo sviluppo di digital twins ottenuti da integrazione multisensore per la scala locale. L'obiettivo è quello di supportare la definizione di pratiche ed allo stesso tempo avere strumenti per sensibilizzare la comunità verso la preservazione del valore del sito
Con l'obiettivo di monitorare l'impatto dell'innalzamento del livello del mare su siti archeologici costieri e sul turismo marittimo nella zona del New Hampshire (USA), Howey M.C. (2020) combina databases geospaziali storici ed archeologici con modelli di previsione dell'andamento del livello del mare ottenuti con LIDAR per produrre mappe di vulnerabilità della zona. Similarmente, Westley K. et al. (2021) presenta una dettagliata analisi dell'impatto passato e futuro di eventi estremi legati al cambiamento climatico (come erosione e forti mareggiate) sull'ambiente costiero nella zona del Medio Oriente e Nord Africa, effettuata tramite integrazione di dati geospaziali e modelli costieri. Ed ancora, in un recente studio di Martino et al. (2023), l'Isola di Santo Spirito (Venezia, Italia) viene presentata come interessante caso studio in cui l'utilizzo di differenti tecniche geomatiche e l'integrazione di dati multitemporali permette di ricreare e visualizzare digitalmente il territorio d'interesse, con l'obiettivo di monitorare i fenomeni legati al cambiamento climatico che impattano sul patrimonio. L'utilizzo di dati satellitari, aerei e terrestri consente infatti di ottenere una panoramica completa di tutti i parametri necessari al monitoraggio dell'area.

2. Metodologia

2.1 Analisi bibliometrica

Il software VOSviewer (versione 1.6.16) è stato utilizzato per ottenere i dati dell'analisi bibliometrica della rete che saranno presentati in questo articolo. Questo strumento consente di creare mappe basate su cluster attraverso l'elaborazione dei dati bibliometrici relativi all'argomento di interesse scelto, scaricati da specifici database online (ad esempio, Web of Science, PubMed, Scopus, ecc.), API (ad esempio, Crossref, Semantic Scholar, ecc.) o file di gestori di riferimenti (come RIS, EndNote e RefWorks). L'analisi può essere condotta basandosi su cinque tipi di reti diversi (cioè, co-autorialità, co-occorrenza, citazioni, accoppiamento bibliografico e co-citazione), ciascuno con un insieme di elementi specifici (come autori, organizzazioni o paesi per il fattore di co-autorialità). La Tabella 1 mostra i principali termini tecnici del software. È possibile scegliere l'opzione "Full counting" o "Fractional counting" per assegnare a ciascun collegamento lo stesso peso o un peso proporzionale al numero di elementi (ad esempio, se un documento ha 10 autori, ogni collegamento dell'autore ha un peso di 1/10); è possibile ignorare i documenti con più di n autori, dove n è un numero variabile impostato dall'utente. Le mappe risultanti strutturate in cluster possono essere dimensionate in base a diversi attributi di peso ("Total Link Strength", "numero di documenti", "numero di citazioni"). Per modificare il livello di dettaglio dei risultati e il conseguente numero di cluster visualizzati, è possibile impostare il valore del "parametro di risoluzione" in base alle esigenze dell'utente: un valore elevato significa una risoluzione elevata e quindi un alto numero di cluster.

I risultati preliminari presentati in questo lavoro derivano da una analisi della co-occurrence delle keywords e della co-authorship dei paesi (Tab. 2).

Termine	Descrizione
Item	Oggetto selezionato (e.g., pubblicazioni, organizzazioni, keywords).
Link	Relazione tra due item (e.g., co-occurrence delle keywords).
Link Strength	Valore che definisce l'attributo di ogni link (e.g., nella co-occurence delle keywords, un alto valore indica alto numero di pubblicazioni che riportano la parola).
Network	Set di items connessi dai link.
Cluster	Set di items della mappa.
Number of links	Numero di links che collegano due items.
Total Link Strength	Quantità di links che collega un item a tutti gli altri.

Tabella 1. Terminologia di utilizzo in VOSViewer (Van Eck and Waltman, 2011).

Tipo di analisi	Descrizione
Co-authorship	La connessione si basa sul numero di pubblicazioni co-autorate
Co-authorship	Definito sulla base del numero di pubblicazioni in cui le due keywords appaiono insieme, anche nel titolo o nell'abstract
Citation	Due items risultano connessi se almeno uno dei due cita l'altro

Tabella 2. Analisi possibili in VOSViewer (Van Eck and Waltman, 2011).

2.2 Acquisizione dei dati bibliometrici

I dati analizzati nel contesto di questo lavoro sono stati raccolti dal database Scopus il 17 agosto 2023. La stringa di ricerca è stata concepita per consentire una revisione completa della letteratura scientifica sul tema ed è la seguente: "cultural heritage" AND "climate change" OR "climate change effect*" OR "CC" AND "geomatics" OR "survey" OR "survey techniques" OR "monitoring" OR "monitoring technique*" OR "remote sensing". Le congiunzioni OR - AND sono operatori logici ed il simbolo "*" è inteso come carattere jolly per tener conto sia della forma singolare che plurale del termine. In prima battuta erano stati inclusi anche gli acronimi "CC" e "CH" con l'obiettivo di estendere la ricerca secondo includendo anche le abbreviazioni comunemente usate per climate change e cultural heritage, ottenendo più di 400 risultati. Tuttavia, proseguendo con l'analisi, è risultato che in più della metà di questi i termini CC e CH erano utilizzati come notazioni chimiche di composti del carbonio; la stringa è stata dunque modificata.

La ricerca ha restituito un totale di 180 documenti, che sono stati esportati in un unico file CSV spuntando le opzioni "Informazioni sulla citazione", "Informazioni bibliografiche", "Abstract & parole chiave" e "Includi riferimenti". Questo file è stato successivamente importato in VOSviewer selezionando le seguenti opzioni: i. Create a map based on bibliographic data, ii. Read data from bibliographic database files, iii. Scopus and iv. file upload, per procedere infine con l'analisi di interesse.

3. Discussione dei risultati

Questa sezione fornisce una descrizione dei risultati preliminari ottenuti dall'analisi bibliometrica. All'analisi temporale del numero di pubblicazioni segue la presentazione delle mappe ottenute dai risultati delle prime due analisi condotte, relative alle reti di parole chiave e di paesi/regioni, al fine di valutare i temi di ricerca attualmente più investigati ed i paesi più attivi nel settore.

3.1 Analisi del trend temporale

Per analizzare la tendenza temporale sui temi d'interesse, è stato creato un grafico che riporta l'anno di pubblicazione di ciascun documento (Figura 1). Si nota che il primo documento relativo all'argomento risale al 2003: la ricerca di Falciai et al. (2003) mirava a valutare l'applicabilità dei sensori a fibra ottica nel campo dell'arte, in particolare per il monitoraggio di pannelli di legno dipinti ed esposti in diverse condizioni ambientali. Una applicazione più legata alla conservazione del patrimonio culturale che non fa esplicito riferimento agli impatti del cambiamento climatico. È pochi anni dopo che si ha il primo esplicito collegamento con il termine: il paper "Extracting the cultural heritage: new challenges for the underwater archaeologist" (Momber, 2006) analizza le implicazioni del cambiamento climatico nel settore dell'archeologia subacquea, ponendo l'accento su interessanti questioni relative alla possibilità di ottimizzare le modalità di raccolta dati e mappatura delle zone sommerse.
La tendenza di ricerca in questo settore vede un aumento dei contributi a partire dall'anno 2013, in concomitanza con la pubblicazione del contributo del Working Group I al Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Stocker, 2014), e si consolida a partire dal 2015, a seguito del Paris Agreement adottato nello stesso anno nel corso della United Nation Climate Change Conference (COP21) ed entrato in vigore nel 2016. È interessante sottolineare che nello stesso periodo gli Stati membri delle Nazioni Unite adottano la 2030 Agenda for Sustainable Development con i suoi 17 Sustainable Development Goals (Lee et al, 2016), fornendo un ulteriore input verso la ricerca relativa al monitoraggio ed alla conservazione del patrimonio culturale a livello mondiale.
L'anno corrente, sebbene ancora in corso, conferma la tendenza con un numero parziale di 26 pubblicazioni a circa metà del suo svolgimento.

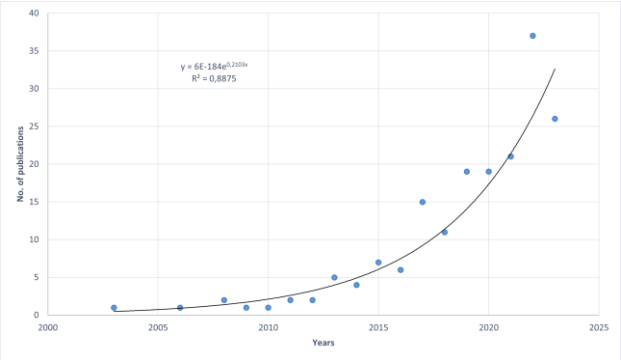


Figura 1. Temporal trend delle pubblicazioni scientifiche relative all'utilizzo della geomatica nell'ambito del monitoraggio, della salvaguardia e della preservazione del patrimonio culturale ed ambientale.

3.2 Analisi della co-occurrence delle parole chiave

L'analisi della co-occorrenza delle parole chiave ha prodotto 1734 risultati, filtrati secondo il numero minimo di occorrenze della singola keyword (posto arbitrariamente pari a 3) per un totale di 153 termini. A questo punto è stato settato un numero di iterazioni pari a 20 ed una dimensione minima del cluster di 14 items (la cui dimensione rappresenta la frequenza di occorrenza), da cui è stata ottenuta la finale suddivisione delle keywords in 6 cluster (Fig. 2).

Analizzando i cluster possono essere fatte alcune semplici considerazioni sulle tematiche più largamente trattate in cui la geomatica ricopre un ruolo attivo fondamentale. Il primo cluster (in rosso) include 39 parole chiave, tra le quali "air quality", "climate effect", "built heritage", "historic buildings", "italy" ed "environmental monitoting": ciò indica un focus sul cambiamento climatico e sui suoi impatti sul patrimonio culturale tangibile ed intangibile, con particolare attenzione all'ambiente ed agli edifici storici.

Il secondo cluster (in verde) contiene un totale di 31 parole chiave, tra cui spiccano parole quali "natural heritages", "risks assessment", "photogrammetry" e "terrestrial laser scanning" che danno una idea delle tecniche di monitoraggio maggiormente utilizzate per gli scopi d'interesse. Il terzo cluster (in blu) comprende 33 parole chiave e si focalizza principalmente sull'ambiente marino e costiero, come evidenziato dai termini "sea level", "coastal zone", "storms", "coastal erosion" e "preventing conservation".

Il quarto cluster, in giallo, è composto da 20 elementi e tratta l'aspetto ingegneristico di previsione e mitigazione dei rischi ("risk analysis", "hazards", "environmental protection", etc.); nel quinto invece termini quali "gis", "satellite images" e "archaeology" rimandano all'utilizzo di tecniche di remote sensing per il monitoraggio a larga scala di aree urbane ed estese. Il sesto cluster, infine, sposta il focus sulla biodiversità e sugli impatti futuri dei rischi legati al cambiamento climatico sulla sua conservazione ("ecology", "biodiversity", "preservation").

Le prime 15 keywords ordinate per "Total Link Strength (TLS)" sono elencate nella Tabella 3, avendo omesso quelle presenti nella stringa di ricerca originale. Le keywords che si posizionano più in alto riflettono dunque gli argomenti più correlati tra di loro nell'ambito di ricerca selezionato. L'alto valore di TLS dimostra l'esistenza di una concreta interconnessione tra i diversi settori di ricerca, evidenziando il ruolo fondamentale della geomatica a livello multidisciplinare.

Keyword	Occurrences	TLS
Historic preservation	33	257
Risk assessment	25	192
Archaeology	27	188
Floods	16	155
Decision making	13	113
Heritage conservation	13	113
Environmental monitoring	14	110
Sustainable development	14	107
Vulnerability	10	97
Conservation	12	90
Sea level change	10	84
Coastal zone	8	82
Climate effect	8	81
Adaptive management	8	75
Future prospect	5	72

Tabella 3. Elenco delle prime quindici keywords ordinate per Total Link Strength.

La Figura 3 riporta la stessa mappa cui viene sovrapposto un overlay temporale, in modo da valutare la tendenza di utilizzo delle keywords nel corso degli anni: è interessante evidenziare le più recenti, in giallo (i.e., "natural heritages", "disasters", "deep learning", "heritage buildings" e "3d modeling", da cui è possibile identificare gli argomenti su cui viene attualmente posta la maggiore attenzione, dando spazio a spunti di riflessione su possibili sviluppi futuri che possano far leva sulla sinergia tra metodi tradizionali e nuove tecnologie (Bakirman et al. 2023).

3.3 Analisi della co-authorship dei paesi

Per analizzare la rete di collaborazioni internazionali tra paesi/regioni attivi nel settore, è stata effettuata un'analisi di co-authorship. Impostando arbitrariamente un numero minimo di pubblicazioni pari a 3 ed un numero minimo di citazioni pari a 10, sono stati selezionati 21 paesi in totale. La Tabella 4 riporta i primi 5 ordinati per Total Link Strength.

Dall'analisi dei risultati l'Italia risulta essere il paese più attivo nella ricerca inerente allo studio degli effetti del cambiamento climatico sul patrimonio storico e sull'ambiente tramite tecniche geomatiche, con il più alto numero di documenti pubblicati (56), citazioni ottenute (450) e TLS (33).
Seguono, secondo tutti e tre i criteri, il Regno Unito e gli Stati Uniti d'America. Nell'elenco completo è lampante la scarsa presenza di paesi in via di sviluppo, il che denota una difficoltà molto marcata da parte loro nel dialogare con le ulteriori sfide poste dai cambiamenti climatici (Pérez-Peña et al, 2021).

Country	Documents	Citations	TLS
Italy	56	450	33
UK	33	373	31
USA	18	209	16
Germany	13	121	14
Spain	13	86	12

Tabella 4. Elenco dei primi cinque paesi ordinati per Total Link Strength.

La Figura 6 mostra i risultati dell'analisi da un punto di vista temporale, permettendo dunque di notare non solo le interconnessioni presenti tra di loro, ma anche quali sono quelli che più di recente hanno approcciato le tematiche di rischio, tutela e conservazione del patrimonio culturale ed ambientale, come l'Egitto e la Cina.

4. Conclusioni

I cambiamenti climatici rappresentano una significativa sfida globale che sta trasformando rapidamente le condizioni ambientali del nostro pianeta. Gli impatti dell'aumento delle temperature, dell'innalzamento del livello del mare, degli eventi meteorologici estremi unitamente a fattori antropogenici (urbanizzazione, inquinamento, turismo, etc) accentuano significativamente la vulnerabilità del patrimonio culturale.

La salvaguardia del patrimonio culturale è diventata una sfida sempre più intricata e urgente, che richiede quindi un approccio completo che includa documentazione, valutazione, monitoraggio e preservazione in un sinergico approccio allo sviluppo di strategie future. In questo contesto è innegabile il ruolo attivo e fondamentale della geomatica.
Attraverso un'analisi della letteratura, i primi risultati dell'analisi bibliometrica presentata in questo documento vogliono contribuire all'identificazione di tendenze emergenti, aree di ricerca e metodologie innovative e principali attori coinvolti in questa direzione, per porre l'attenzione sulle complesse sfide e sulle promettenti strategie da adottare per salvaguardare il nostro patrimonio culturale.

Contributi dei singoli autori
Idea e concezione, X.X. e Y.Y.; metodologia, X.X.; software, X.X.; validazione, X.X., Y.Y. and Z.Z.; analisi, X.X.; revisione, X.X.; supervisione, X.X.; acquisizione fondi, Y.Y.
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
Questo lavoro è supportato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), PE05 (CHANGES), CUP: B53C22004010006.

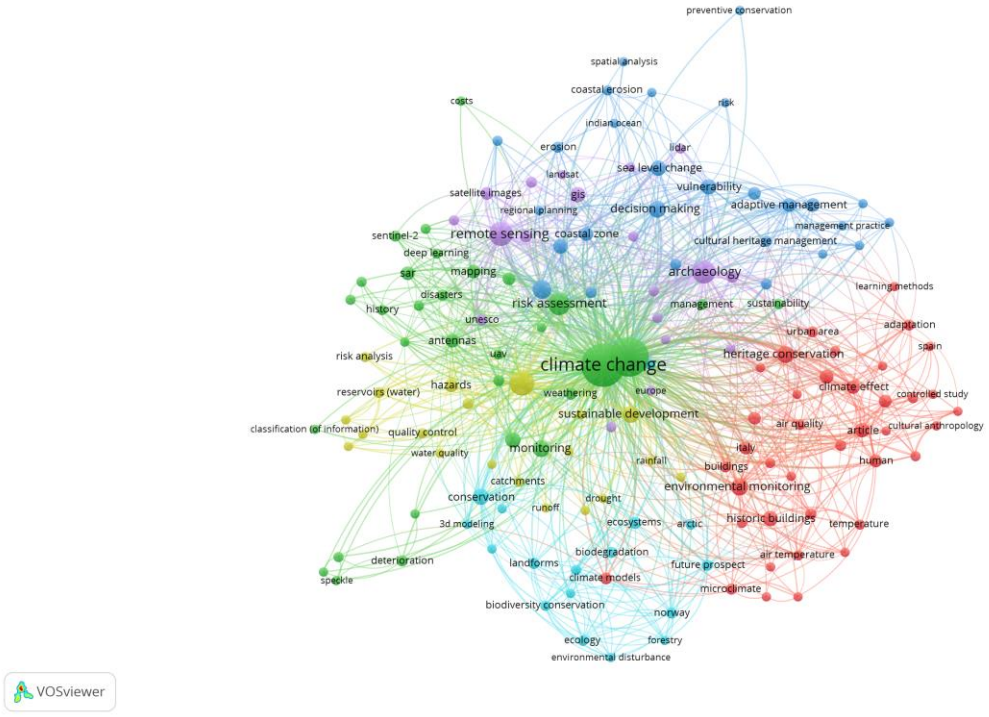


Figura 2. Mappa delle connessioni risultanti dalla analisi della co-occurence delle keywords.

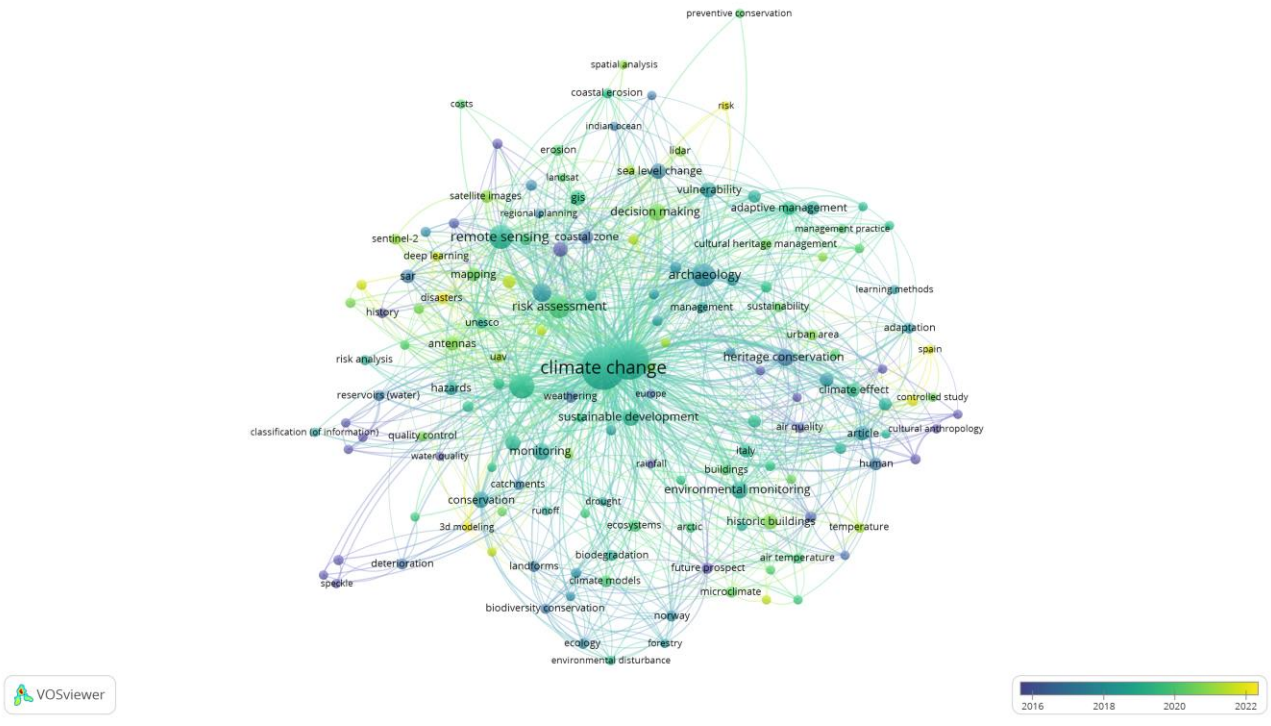


Figura 3. Overlay temporale della mappa delle connessioni delle keywords.

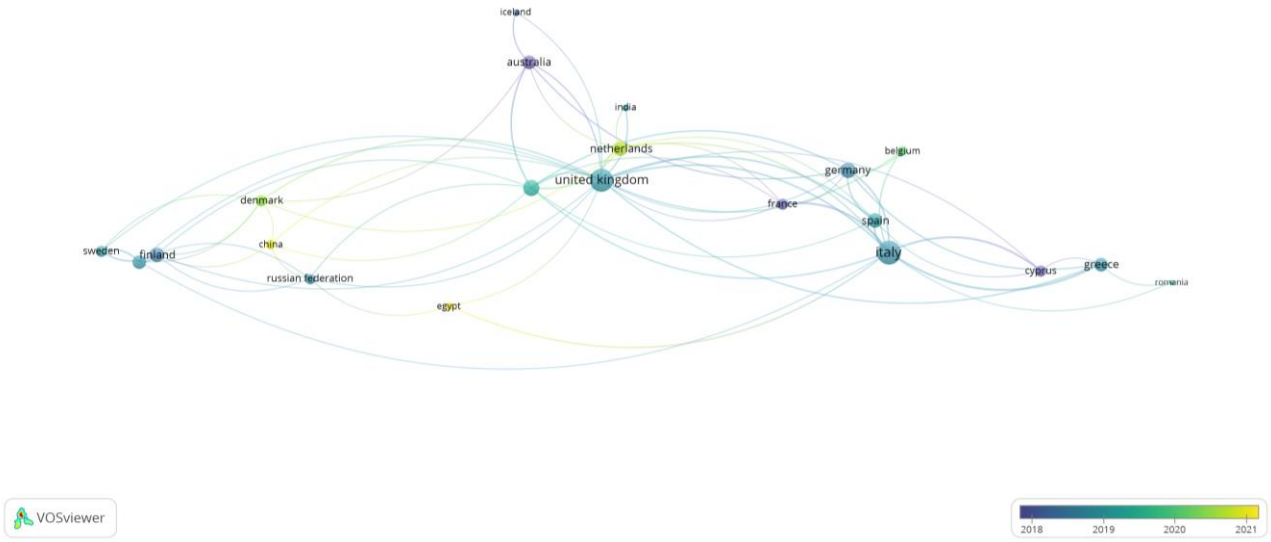


Figura 4. Overlay temporale della mappa delle connessioni ottenuta dall'analisi della co-occurrence dei Paesi.

Bibliografia

Alexandrakis, G., Manasakis, C., & Kampanis, N. A. (2019). Economic and societal impacts on cultural heritage sites, resulting from natural effects and climate change. Heritage, 2(1), 279-305.

Bakirman, T., Kulavuz, B., & Bayram, B. (2023). Use of Artificial Intelligence Toward Climate-neutral Cultural Heritage. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 89(3), 163-171.

Di Ciaccio, F., & Troisi, S. (2021). Monitoring marine environments with autonomous underwater vehicles: a bibliometric analysis. Results in Engineering, 9, 100205.

Falciai, R., Trono, C., Lanterna, G., & Castelli, C. (2003, July). FBG sensors for painted wood panel deformation monitoring. In Smart Structures and Materials 2003: Smart Sensor Technology and Measurement Systems (Vol. 5050, pp. 128-132). SPIE.

Gabriele, M., Cazzani, A., Zerbi, C. M., & Brumana, R. (2023). DIGITAL TWIN TO MONITOR, UNDERSTAND AND PRESERVE THE COMPLEXITY OF MULTI-SCALE NATURAL, AGRICULTURAL, DESIGNED LANDSCAPES AND ARCHITECTURE: BIODIVERSITY CONSERVATION, TRANSFORMATION AND DECLINE AT VILLA ARCONATI SITE AT CASTELLAZZO OF BOLLATE (MI). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 613-620.

Hollesen, J., Jepsen, M. S., & Harmsen, H. (2023). The Application of RGB, Multispectral, and Thermal Imagery to Document and Monitor Archaeological Sites in the Arctic: A Case Study from South Greenland. Drones, 7(2), 115.

Howey, M. C. (2020). Harnessing remote sensing derived sea level rise models to assess cultural heritage vulnerability: a case study from the northwest Atlantic Ocean. Sustainability, 12(22), 9429.

Kolokoussis, P., Skamantzari, M., Tapinaki, S., Karathanassi, V., & Georgopoulos, A. (2021). 3D and hyperspectral data integration for assessing material degradation in medieval masonry heritage buildings. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 583-590.

Lee, B. X., Kjaerulf, F., Turner, S., Cohen, L., Donnelly, P. D., Muggah, R., ... & Gilligan, J. (2016). Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators. Journal of public health policy, 37, 13-31.

Martino, A., Gerla, F., & Balletti, C. (2023). MULTI-SCALE AND MULTI-SENSOR APPROACHES FOR THE PROTECTION OF CULTURAL NATURAL HERITAGE: THE ISLAND OF SANTO SPIRITO IN VENICE. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 1027-1034.

Mitro, N., Krommyda, M., & Amditis, A. (2022). Smart Tags: IoT sensors for monitoring the micro-climate of cultural heritage monuments. Applied Sciences, 12(5), 2315.

Momber, G. (2006). Extracting the cultural heritage: new challenges for the underwater archaeologist. Underwater Technology, 26(4), 105-111.

Munjeri, D. (2004). Tangible and intangible heritage: From difference to convergence. Museum international, 56(1-2), 12-20.

Pérez-Peña, M. D. C., Jiménez-García, M., Ruiz-Chico, J., & Peña-Sánchez, A. R. (2021). Analysis of research on the sdgs: The relationship between climate change, poverty and inequality. Applied Sciences, 11(19), 8947.

Sesana, E., Gagnon, A. S., Bertolin, C., & Hughes, J. (2018). Adapting cultural heritage to climate change risks: Perspectives of cultural heritage experts in Europe. Geosciences, 8(8), 305.

Stocker, T. (Ed.). (2014). Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge university press.

Tucci, G., & Bonora, V. (2015). Geomatics and management of at-risk cultural heritage. Rendiconti Lincei, 26, 105-114.

Tucci, G., Parisi, E. I., Castelli, G., Errico, A., Corongiu, M., Sona, G., ... & Preti, F. (2019). Multi-sensor UAV application for thermal analysis on a dry-stone terraced vineyard in rural Tuscany landscape. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(2), 87.

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2011). VOSviewer manual. Manual for VOSviewer version, 1(0).

Westley, K., Andreou, G., El Safadi, C., Huigens, H. O., Nikolaus, J., Ortiz-Vazquez, R., ... & Breen, C. (2021). Climate change and coastal archaeology in the Middle East and North Africa: Assessing past impacts and future threats. JICA.

IL RUOLO DELLE TECNOLOGIE GEOMATICHE NELL'AMBITO DELL'EDUCAZIONE AL PATRIMONIO CULTURALE DEI GIOVANI

F. Di Stefano [a], E. Savina Malinverni [a], R. Pierdicca [a]

[a] Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 12, 60131, Ancona, Italy – {f.distefano, e.s.malinverni, r.pierdicca}@staff.univpm.it

Parole chiave: Geomatica, Patrimonio Culturale, UNESCO, Educazione, Giovani

Key words: Geomatics, Cultural Heritage, UNESCO, Education, Youth

Abstract

Questo articolo illustra il ruolo delle tecnologie geomatiche applicate al patrimonio culturale attraverso attività educative rivolte ai giovani. In particolare, il Laboratorio EDU, un'iniziativa dell'Associazione Italiana Giovani per l'UNESCO (AIGU), mira a promuovere un approccio collaborativo tra studenti ed esperti, aderendo ai valori e ai principi dell'UNESCO. Il coinvolgimento di volontari, spesso ricercatori o accademici, tra gli altri, promuove strategicamente la collaborazione con le università e crea un ponte tra i livelli educativi, incoraggiando intersezioni e sinergie significative. La tecnologia è essa stessa uno strumento per coinvolgere gli studenti nella realizzazione pratica dei progetti. Infatti, educare i giovani nel campo dei beni culturali attraverso questo approccio permette alla creatività di assumere un ruolo di primo piano nel raggiungimento di obiettivi sostenibili, sia dal punto di vista economico che sociale. Con l'obiettivo di indagare come il supporto delle tecnologie geomatiche abbia un impatto sull'educazione dei giovani al patrimonio culturale, vengono presentati casi di studio analizzando buone pratiche di progetti educativi svolti in alcune scuole nella regione Marche.

This article explores the role of geomatics technologies in promoting cultural heritage through education activities for young people. In particular, the EDU Lab, an initiative from the Italian Youth Association for UNESCO (AIGU), aims to foster a collaborative approach among students and experts, adhering to UNESCO's values and principles. The involvement of volunteers, often researchers or academics, among others, strategically promotes collaboration with universities and bridges educational levels, encouraging meaningful intersections and synergies. Technology is itself a tool to engage students in the practical realization of the projects. As a matter of fact, educating young people in the cultural heritage field through this approach enables creativity to assume a leading role in achieving sustainable goals, both economically and socially. With the aim of investigating how the support of geomatic technologies has an impact on young people's education on cultural heritage, case studies are presented analyzing good practices of educational projects carried out in some schools in the Marche Region.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, la tecnologia riveste un ruolo sempre più significativo nell'ambito delle attività educative per i giovani. Grazie alla sua presenza, l'apprendimento diventa interattivo e accessibile, offrendo opportunità uniche per esplorare e creare in un mondo digitale in continua evoluzione. La tecnologia rappresenta quindi un potente strumento per avvicinare i giovani al patrimonio culturale. Attraverso le tecnologie a disposizione, i giovani possono esplorare in modo coinvolgente e dinamico monumenti, opere d'arte e tradizioni storiche, preservando e arricchendo così la conoscenza delle proprie radici e dell'eredità culturale. La nascita del patrimonio culturale digitale segna un'epoca di trasformazione nell'accesso e nella conservazione dei beni culturali. Grazie alla digitalizzazione il nostro passato diventa fruibile globalmente, consentendo a nuove generazioni di esplorare e comprendere le caratteristiche e i valori del patrimonio culturale. Dal 2003 si è verificato un cambiamento sul nostro ambiente digitale, quando l'UNESCO ha adottato la Carta sulla conservazione del patrimonio digitale[1], e i suoi 193 stati membri hanno concordato di vigilare contro la perdita di risorse digitali uniche per proteggere il patrimonio comune dell'umanità. Con la Convenzione di Faro[2], trattato siglato il 27 ottobre nel 2005 e ratificato dall'Italia il 23 settembre 2020, poter fruire del patrimonio culturale diviene un diritto umano. I cittadini hanno responsabilità nella conservazione e nella fruizione del patrimonio che diventa quindi elemento di coinvolgimento delle comunità divenendo anche una risorsa per lo sviluppo sostenibile. Con l'Agenda 2030[3] delle Nazioni Unite vengono delineati gli obiettivi per lo sviluppo sostenibile (OSS) con la strategia "per poter ottenere un futuro migliore e più sostenibile per tutti". Rimanendo in tema dell'educazione al patrimonio culturale dei giovani attraverso strumenti tecnologici ci si rifà agli OSS 4 e 9. Il primo ha come obiettivo quello di garantire un'istruzione di qualità inclusiva e paritaria e di promuovere opportunità di apprendimento permanente per tutti. Il secondo promuove lo sviluppo della tecnologia, la costruzione di infrastrutture sostenibili, la ricerca e l'innovazione per garantire crescita economica, e l'accesso alle tecnologie dell'informazione e della comunicazione.
Un altro documento programmatico su cui fare riferimento è quello del New European Bauhaus[4] (NEB) dell'Unione Europea. Il NEB è un'iniziativa ambientale, sociale e culturale che integra il Green Deal europeo e combina esperienza

[1] https://www.patrimoniomondiale.it/?p=8
[2] https://www.coe.int/it/web/venice/faro-convention
[3] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/sustainable-development-goals/eu-and-united-nations-common-goals-sustainable-future_it
[4] https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en

estetica, sostenibilità e inclusività. Pone come obiettivi quelli di esplorare idee, identificare bisogni urgenti e coinvolgere le comunità, sulla base di tre principali approcci: multilivello, dal globale al locale, partecipativo attraverso coinvolgimento della comunità e transdisciplinare tra arte, cultura, scienza, etc. Tra i quattro assi programmatici si annovera quello di ritrovare e potenziare il senso di appartenenza. Una delle strategie a supporto di questo asse programmatico è quello di favorire uso corretto della tecnologia e garantire piena accessibilità attraverso una maggiore inclusione fisica e cognitiva, il miglioramento della componente esperienziale della fruizione culturale e ottenendo maggiori risultati in termini di educazione e divulgazione.
Tutti questi temi vengono affrontati e divulgati dall'Associazione Italiana Giovani per l'UNESCO (AIGU), un'associazione giovanile che nasce per supportare le attività della Commissione Nazionale Italiana per l'UNESCO nel campo dell'educazione, della scienza, della cultura e della comunicazione, promuovendo progetti, valori e priorità nelle comunità locali, attraverso la partecipazione attiva di giovani in iniziative ed eventi di rilevanza nazionale e internazionale. Fondata nel 2015, rappresenta tuttora la più grande organizzazione giovanile in ambito UNESCO a livello mondiale e conta di circa 300 soci sparsi in tutto il territorio nazionale, costituita da giovani tra i 18 e i 35 anni. Ogni anno AIGU promuove, attraverso i vari comitati regionali, laboratori didattici per gli Istituti di Istruzione Superiore che vengono chiamati comunemente Laboratori EDU. Tali laboratori vengono gestiti dai soci regionali AIGU che fungono da tramite tra le scuole partecipanti e le realtà del territorio che vengono coinvolte come enti esterni o partner del progetto EDU, in particolare amministrazioni locali, associazioni culturali, aziende private e università.

Il giovane autore, F. Di Stefano, che presenta il contributo in qualità di ricercatore post-doc in geomatica del laboratorio di ricerca GAP (Geomatics Applications and Processing) presso il dipartimento DICEA dell'UNIVPM coordinato dalla Prof.ssa E.S. Malinverni, è socio AIGU per la regione Marche dal 2016 rivestendo per due mandati consecutivi la carica di Rappresentante Regionale e attualmente occupa un posto nel direttivo nazionale come Coordinatore Area Centro (regioni del centro Italia).
L'intento di questo contributo è quello di raccontare e condividere le esperienze, vissute in prima persona dal giovane autore, dei vari Laboratori EDU svolti con gli Istituti di Istruzione Superiore della regione Marche dove le tecnologie geomatiche sono servite a supporto dell'educazione al patrimonio culturale dei giovani studenti partecipanti. Questi sono stati invitati a creare nuove forme di patrimonio digitale attraverso la produzione di modelli 3d virtuali o fisici come nuovi strumenti per la conoscenza, valorizzazione e divulgazione del patrimonio culturale tangibile unito a volte anche da elementi intangibili.

2. Stato dell'arte

La geomatica riveste un ruolo fondamentale per il patrimonio culturale. L'utilizzo delle tecniche più comuni come la fotogrammetria e il laser scanner consente di acquisire una grande quantità di dati e di creare modelli tridimensionali dettagliati. Questi strumenti avanzati consentono la documentazione accurata di siti storici, monumenti e manufatti, preservandone la memoria per le generazioni future. Grazie alla geomatica, è possibile analizzare, conservare e condividere in modo efficace le informazioni sul patrimonio culturale, consentendo agli studiosi di approfondire la comprensione della storia e alla società di godere e imparare dalla bellezza del passato.
I prodotti derivanti da rilievi geomatici consentono la creazione di modelli tridimensionali a diversi livelli di dettaglio. Questi modelli rappresentano la base per esperienze digitali come tour virtuali (VR), realtà aumentata (AR) o mista (MR), che permettono agli utenti di immergersi virtualmente in luoghi storici e culturali (Baena Pérez et al., 2021; Preetham et al., 2022). Inoltre, tali modelli offrono la possibilità di creare repliche fisiche attraverso la stampa 3D (Di Tore et al., 2022), permettendo così una nuova modalità di interazione tangibile con il patrimonio.
Attualmente, si nota una scarsa presenza di articoli nella letteratura riguardante il ruolo delle tecnologie geomatiche nell'ambito dell'educazione al patrimonio culturale rivolta ai giovani. Questo ambito, sebbene di vitale importanza per la promozione della consapevolezza storica e culturale nelle nuove generazioni, sembra essere meno trattato rispetto ad altre applicazioni della geomatica. L'integrazione di strumenti e metodi come la fotogrammetria, i laser scanner e la modellazione 3D potrebbe offrire opportunità uniche per coinvolgere i giovani nella scoperta e nella comprensione del patrimonio, stimolando l'interesse e la partecipazione attiva. La scarsità di attività in questo specifico settore sottolinea la necessità di esplorare ulteriormente come le tecnologie geomatiche possano essere impiegate in programmi educativi mirati a promuovere un maggiore coinvolgimento e accrescere la responsabilità verso il patrimonio culturale.
I prodotti ottenuti tramite le tecnologie e le tecniche della geomatica svolgono un ruolo di fondamentale supporto nelle attività educative. Dalla letteratura emergono discussioni riguardo ai modelli digitali che, grazie alla realtà virtuale o aumentata, offrono un approccio più completo e accessibile all'analisi e allo studio degli elementi del patrimonio culturale tangibile. Pierdicca et al. (2020) hanno dimostrato come AR e VR hanno un grande potenziale per aiutare gli studenti a migliorare le loro conoscenze e competenze. Infatti, la connessione tra AR/VR e istruzione rende l'esperienza di insegnamento e apprendimento più efficiente e accattivante (Bekele et al., 2018). Queste tecnologie rendono il patrimonio culturale accessibile digitalmente, soprattutto quando l'accesso fisico è limitato, come si è visto durante il periodo pandemico di COVID-19.
Tuttavia, in alcuni casi si tralascia come poter coinvolgere direttamente gli studenti nell'apprendimento della creazione di tali modelli digitali al fine di favorire un'interpretazione più creativa e personalizzata del patrimonio culturale dal punto di vista dei giovani. I prodotti digitali derivanti dalle tecniche geomatiche possono rivelarsi estremamente utili, ma è altrettanto importante fornire ai giovani strumenti e competenze per creare tali modelli in modo semi-autonomo. Introdurre i giovani studenti al processo di acquisizione dei dati geospaziali, all'utilizzo di software di modellazione e alla realizzazione pratica di modelli 3D può non solo rendere il processo di apprendimento più coinvolgente, ma anche prepararli per un futuro impegno attivo nella valorizzazione e nella preservazione del patrimonio culturale.
L'importanza della collaborazione tra istituti scolastici e universitari nell'ambito dei laboratori educativi è di rilevanza cruciale. Le università possono fornire strumenti e risorse di valore, anche dal punto di vista economico, che arricchiscono l'esperienza formativa degli studenti delle scuole superiori. In particolare, i ricercatori nel campo della geomatica possono svolgere un ruolo essenziale nel settore del patrimonio culturale, lavorando a stretto contatto con gli studenti per condividere conoscenze di questa disciplina scientifica. Questa collaborazione non solo permette di esplorare le potenzialità

della geomatica per la valorizzazione del patrimonio culturale, ma offre anche l'opportunità di mostrare come le competenze acquisite possano contribuire in modo concreto e innovativo al settore. La sinergia tra istituti scolastici e universitari apre la strada a un apprendimento arricchito e all'evoluzione delle competenze, promuovendo allo stesso tempo una maggiore valorizzazione e preservazione del nostro ricco patrimonio culturale.

3. Metodologia

In questa sezione vengono illustrati alcune esperienze di Laboratori EDU, promossi dai soci del comitato Marche di AIGU, a cui hanno partecipato giovani studenti di Istituti d'Istruzione Superiore marchigiani. A questi è stata offerta la possibilità e l'opportunità di sfruttare le tecnologie della geomatica per la documentazione del patrimonio culturale e creare nuove forme di patrimonio digitale o riproduzione di modelli fisici. Strumenti e metodi che hanno permesso di favorire la conoscenza del patrimonio culturale, migliorare le modalità di apprendimento didattico che diviene più stimolante e accattivante attraverso queste nuove tecnologie da parte degli studenti. Ha inoltre permesso agli studenti stessi di sperimentare nuovi sistemi di divulgazione del patrimonio stesso per e verso la comunità.

Nell'a.s. 2017/2018 il Laboratorio EDU è stato svolto da studenti dei corsi Geometri e Linguistico dell'ITET "Carducci-Galilei" di Fermo. La scelta della tipologia di patrimonio su cui approfondire dal punto di vista culturale, artistico e sociale è ricaduta nella Piazza del Popolo di Fermo per la creazione di un modello 3D fisico. Grazie ad una rapida campagna di rilievi con il supporto dei ricercatori del laboratorio GAP (UNIVPM) con fotocamere digitali e laser scanner mobile sono stati rilevati gli spazi, le superfici e le facciate degli edifici antistanti la piazza. Gli studenti sono stati divisi in diversi gruppi che dotati di treppiedi e fotocamere reflex hanno rilevato gli edifici che si affacciano sulla piazza. Hanno quindi imparato prime nozioni di fotogrammetria nella sua fase di presa: sovrapposizione dei fotogrammi, scala di rappresentazione, posizionamento di diversi punti di presa.
Raccolti i dati dei rilievi, gli studenti del corso Geometri hanno prodotto un modello 3D digitale della piazza servendosi anche della cartografia comunale per ottenere le dimensioni in pianta degli edifici ed elaborando nuvole di punti da fotogrammetria integrate a quelle del laser scanner per ottenere ulteriori misure. Il risultato è stato quello di creare un modello 3D digitale semplificato della piazza in scala 1:100 da poter essere riprodotto fisicamente con la stampante 3D (Fig 1).
L'intento non è solo quello di creare una riproduzione fisica in piccola scala ma di quello di poter far conoscere questo spazio urbano anche tenendo conto dell'accessibilità sensoriale. Il modellino 3D infatti risulta tattile, quindi accessibile per ipovedenti (Rossetti et al., 2018). Inoltre, grazie al lavoro svolto dagli studenti del corso Linguistico, su alcune superfici verticali del modello 3D sono state applicate delle superfici riconoscibili al tatto per diverso materiale rispetto al materiale polimerico del modello 3D, visibili in Fig.1 di colore nero, che al semplice tocco trasmettono brevi audio registrati in diverse lingue che raccontano la storia, la descrizione, il valore e le caratteristiche della Piazza del Popolo di Fermo.

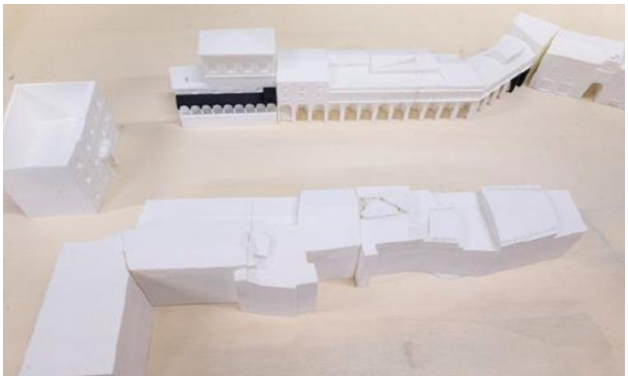


Figura 1. Modello 3D della Piazza del Popolo di Fermo realizzato dagli studenti. ©Di Stefano 2017

Nell'a.s. 2018/2019 il Laboratorio EDU ha visto impegnati gli studenti del Liceo Scientifico "V. Volterra" di Fabriano. Qua in occasione del XIII Annual Meeting of the UNESCO Creative City Network, svoltasi a Fabriano nel giugno 2019, gli studenti hanno deciso di valorizzare varie tipologie di patrimonio presenti nella città creando una mappa, chiamata "Fabriano in tasca" che mostri particolarità e curiosità al di fuori degli schemi dei classici tour turistici. Sono stati creati tre percorsi basati sui tre pilastri tematici dell'UNESCO: cultura, educazione e scienza (Fig. 2). Questi percorsi sono stati definiti da una successione concatenata di QR code che scannerizzati mostravano contenuti di vario tipo: testuali, descrittivi e storici, multimediali, sotto forma di immagini e video, sonori sotto forma di racconti popolari ed estratti musicali.

Figura 2. Mappa dei tre percorsi di "Fabriano in tasca" realizzato dagli studenti.

Visti i numerosi elementi selezionati dagli studenti per riscoprire le bellezze della città, l'apporto delle tecnologie geomatiche è stato in forma minore ma comunque sempre utile. Agli studenti sono state impartite piccole lezioni di geolocalizzazione per spiegare loro come poter attribuire coordinate geografiche ad ogni QR code per individuare il posizionamento dei vari punti di sosta. Inoltre, ad un piccolo gruppo di studenti è stato chiesto di creare un modello 3D virtuale di una piccola formella fissa su una facciata di un palazzo storico in Piazza della Cattedrale di Fabriano. Poiché la formella era posta ad una certa altezza, la fotocamera digitale è stata sostituita dall'uso di un dispositivo UAV dotato di camera. Gli studenti hanno appreso i concetti base della fotogrammetria digitale. Nella fase di presa è stata usata la tecnica multi-immagine (multi-video stereo) e le foto sono state scattate sulla base di un valore costante di GSD (Ground Sampling Distance) da poter garantire un'apprezzabile risoluzione dell'oggetto

fotografato. Il processamento delle immagini ottenute ha permesso la creazione di un modello 3D sotto forma di mesh, a partire dalla nuvola di punti elaborata grazie al supporto software dei ricercatori GAP intervenuti come esperti. Il modello 3D è stato caricato su una piattaforma di condivisione online per la sua visualizzazione in modalità virtuale (Fig. 3).

Figura 3. Modello 3D virtuale della formella

Un ultimo esempio, di grande rilevanza e significatività è quello realizzato durante l'a.s. 2022/2023 dagli studenti del Liceo Scientifico "G. Galilei" di Macerata. Come output del Laboratorio EDU hanno scelto di creare un tour virtuale del piccolo borgo Villa Ficana costituito da edifici costruiti in terra cruda sito nelle prossimità del centro di Macerata, attualmente un ecomuseo. Dopo la difficile esperienza pandemica ci si è resi conto, come hanno affermato i giovani protagonisti del progetto, che la cultura ha sofferto molto la distanza e l'interazione dalla società a causa dell'impossibilità di poter visitare ed esplorare i vari siti culturali. L'intento degli studenti nel creare il tour virtuale di questo piccolo borgo sconosciuto è non solo quello di creare una nuova forma di documentazione sotto forma di patrimonio digitale ma quello di poter creare un nuovo strumento di conoscenza ed esplorazione del sito attraverso canali di comunicazione e divulgazione online.
L'attività è iniziata con una ricca ricerca storico-bibliografica del sito e un primo sopralluogo per individuare punti strategici da mettere in risalto nella creazione del tour virtuale. Dopodiché con il supporto tecnico dei ricercatori di geomatica è stato eseguito un rilievo con una fotocamera sferica lungo i vicoletti del borgo e in prossimità di punti di particolare interesse cercando di creare un percorso continuo e chiuso che mostrasse ogni angolo del piccolo spazio urbano. È stata quindi adoperata una camera 360 (Nikon KeyMission 360) montata su treppiede per creare una serie panorami sferici scattati tramite APP SnapBridge 360. Come nei laboratori precedentemente descritti, anche in questo caso gli studenti si sono avvicinati alla conoscenza di tecnologie geomatiche di cui ignoravano loro esistenza e uso. Ciò oltre ad offrire un'opportunità di formazione sulle tecniche di rilievo geomatico, in particolare la fotogrammetria, ha permesso loro di capire come poter sfruttare al meglio la tecnologia per scopi didattici e informativi.

Figura 4. Mappa delle varie foto 360 scattate all'interno dell'area urbana di borgo Villa Ficana (MC).

La seconda fase del progetto si è tenuta presso il laboratorio informatico della scuola dove gli studenti si sono cimentati nella creazione del tour virtuale a partire dai panorami sferici ottenuti durante l'attività sul campo, attraverso la sperimentazione di alcuni software. Il principale software utilizzato è stato quello implementato dai colleghi ricercatori del dipartimento DII (UNIVPM) chiamato ScoolAR (Puggioni et al., 2020). Una piattaforma comodamente gestibile e con un'interfaccia grafica facilmente intuibile e userfriendly. Oltre alla creazione del tour virtuale grazie alla selezione e unione dei vari panorami sferici che vengono caricati, offre inoltre funzionalità di inserimento di simboli e testi che arricchiscono l'esperienza virtuale (Fig. 5). La stessa applicazione consente di esplorare virtualmente il sito culturale anche attraverso la realtà aumentata (AR) con l'ausilio di uno smartphone inserito in un cardboard (Fig, 6) creando quindi un'esperienza immersiva. Per consentire ciò le singole foto sferiche vengono salvate in modalità stereoscopica come mostrato in Fig. 7. La visualizzazione AR è stata realizzata in modalità 3DoF (Degree of Freedom – Gradi di libertà) in quanto l'utente può ruotare la testa stando seduto o in piedi sul posto.

Figura 5. Estratto del tour virtuale che mostra il punto iniziale riportando una nota informativa testuale del borgo da esplorare.

a.

b.

Figura 6. a. Cardboard per la visualizzazione AR. b. Studente che testa e verifica l'esperienza AR da loro creata.
©Di Stefano 2023

Figura 7. Vista stereoscopica di un ambiente interno creata per la visualizzazione AR 3DoF attraverso cardboard.

In alternativa all'uso dell'applicazione, gli studenti hanno testato la creazione del tour virtuale anche con software online. Questo permetterà una più facile condivisione e divulgazione dello stesso attraverso un semplice link anche integrando lo stesso al già presente sito internet dedicato all'Ecomuseo Villa Ficana. Sono stati provati come programmi di creazione di tour virtuali come Marzipano e ThingLink.

4. Conclusioni

Il presente contributo ha voluto dimostrare il ruolo fondamentale delle tecnologie geomatiche nel contesto dell'educazione al patrimonio culturale rivolta ai giovani. La documentazione e la valorizzazione del patrimonio culturale, in conformità alle convenzioni dell'UNESCO e di Faro. Attraverso le strategie promosse dagli OSS 4 e 9 dell'Agenda 2030 e dagli assi programmatici del NEB da parte delle Nazioni Unite, ci si rende conto quanto sia determinante il sopporto tecnologico per la formazione didattica per le giovani generazioni rendendo maggiormente inclusivo e stimolante l'accesso alla cultura e l'interazione con il patrimonio culturale. Gli studenti degli Istituti di Istruzione Superiore che hanno aderito ai Laboratori EDU promossi dall'Associazione Italiana Giovani per l'UNESCO, grazie al supporto esterno dei ricercatori universitari, hanno acquisito competenze di base nelle tecniche e tecnologie della geomatica, consentendo la creazione di modelli 3D, virtuali o materializzati attraverso la stampa 3D. Sono state mostrate diverse esperienze che hanno riguardato il coinvolgimento di esperti di geomatica, tra cui l'autore stesso, come figure di supporto alla realizzazione di campagne di rilievo e creazione dei prodotti finali. Questi risultati non solo favoriscono la diffusione della conoscenza e la divulgazione del patrimonio culturale, ma contribuiscono altresì a migliorare l'apprendimento didattico del patrimonio culturale stesso e migliorare l'accessibilità da parte di tutta la comunità. L'intersezione tra tecnologia e cultura rappresenta un passo significativo verso l'educazione al nostro patrimonio culturale tangibile, nonché uno strumento per ispirare le giovani menti a nutrire maggiore interesse per il patrimonio circostante, forgiando così un futuro sempre più consapevole, responsabile e sostenibile.

Contributi dei singoli autori
Idea e concezione, metodologia, validazione, analisi, revisione: F.D.S. L'autore conferma quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

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

Bibliografia

Baena Pérez, R., Villar Navarro, E., Dodero Beardo, J. M., Perales Vargas-Machuca, J. A., & Ruiz Rube, I. (2021). Virtually guided visits as an educational tool. http://hdl.handle.net/10498/26443 (Accessed 31 August 2023)

Bekele, M. K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., & Gain, J. (2018). A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, *11*(2), 1-36. https://doi.org/10.1145/3145534

Di Tore, S., Todino, M.D., Campitiello, L. (2022). Lab-H: A Laboratory to Develop 3D Printable Inclusive Open Educational Resources. In: *Higher Education Learning Methodologies and Technologies Online*. HELMeTO 2021. Communications in Computer and Information Science, vol 1542. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96060-5_17

Preetham, N., Rai, P., Sharma, P., Singh, U., & Sharma, R. (2022, October). Enhancing Education Experience using Augmented Reality. In *2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972546

Puggioni, M., Frontoni, E., Paolanti, M., & Pierdicca, R. (2021). ScoolAR: An educational platform to improve students' learning through virtual reality. *IEEE Access*, *9*, 21059-21070. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051275

Rossetti, V., Furfari, F., Leporini, B., Pelagatti, S., & Quarta, A. (2018). Enabling Access to Cultural Heritage for the visually impaired: an Interactive 3D model of a Cultural Site. *Procedia computer science*, *130*, 383-391. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.057