Il progetto MEDUSA - MEDiterraneo: Uso Sostenibile dell'Ambiente

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

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

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

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

1 Introduzione

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

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

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

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

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

2 Metodologia

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

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

2.1 I modelli del DT

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

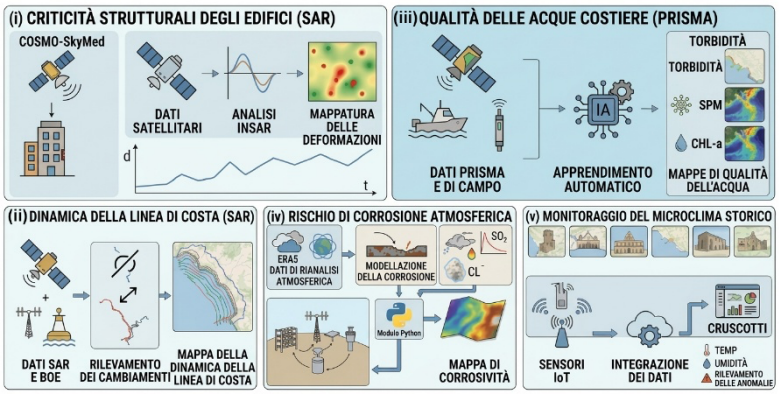

Fig. 1. Schema dei cinque modelli del DT MEDUSA.

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

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

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

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

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

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

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

3 Risultati e Discussione

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

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

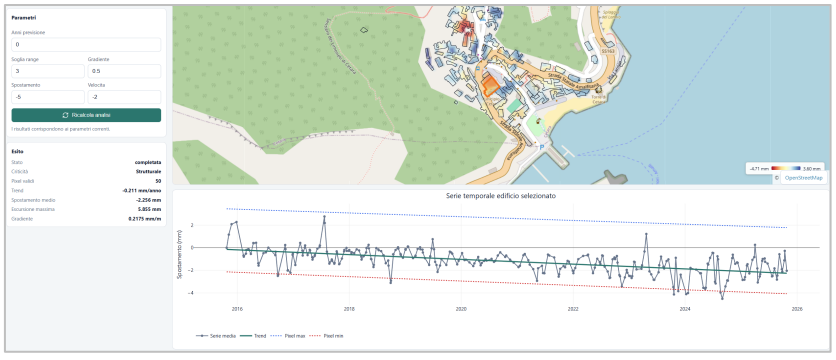

Fig. 2. Modello per la stima delle deformazioni dell'edificato: i parametri dell'analisi (a sinistra), i poligoni degli edifici (in alto) e la serie storica con i trend (in basso).

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

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

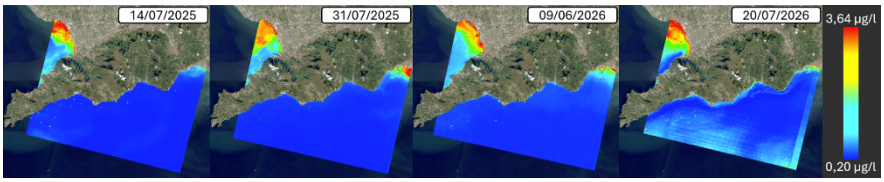

Fig. 3. Mappe di clorofilla-a stimate da PRISMA.

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

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

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

4 Conclusioni

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

Ringraziamenti

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

Bibliografia

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

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