Nuovi scenari di inondazione degli ambienti costieri per un nuovo Atlante delle coste italiane

Sergio Cappucci, Adriana Carillo, Roberto Iacono, Lorenzo Moretti, Massimiliano Palma, Gaia Righini, Fabrizio Antonioli, Gianmaria Sannino

ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile - Casaccia Via Anguillarese 301
Email: sergio.cappucci@enea.it

Preprint

Riassunto

Presentiamo una metodologia integrata per lo studio della vulnerabilità costiera sotto l'effetto dell'innalzamento relativo del livello del mare (RSLR) che si basa sulla combinazione di modelli digitali del terreno (DTM) derivati da rilievi LiDAR, di proiezioni del livello del mare da modello tridimensionale ad alta risoluzione (configurazione MED16 del MITgcm) di ENEA, e misure satellitari dei movimenti verticali del suolo (European Ground Motion Service, EGMS). La catena di elaborazione è in ambiente GIS. I prodotti, già pubblicati per 10 aree italiane, consentono di generare scenari per diversi intervalli di tempo (2010–2040, 2040–2070, 2070–2099) con un approccio classico di tipo *" bathtub"* (vasca da bagno).

Parole chiave: Innalzamento relativo del livello del mare (RSLR); MED 16; EGMS e LC/LU; mappe delle inondazioni costiere; cambiamenti climatici

Abstract.

We present an integrated methodology for studying coastal vulnerability under the effect of relative sea level rise (RSLR) based on a combination of digital terrain models (DTM) derived from LiDAR surveys, sea level projections from ENEA's high-resolution three-dimensional model (MITgcm MED16 configuration), and satellite measurements of vertical ground movements (European Ground Motion Service, EGMS). The processing chain is in a GIS environment. The products, already published for 10 Italian areas, allow scenarios to be generated for different time intervals (2010–2040, 2040–2070, 2070–2099) using a classic "bathtub" approach.

Keywords: Relative Sea Level Rise (RSLR); MED 16; EGMS and LC/LU; coastal flooding maps; climate change

Le aree costiere che si affacciano sul Mar Mediterraneo sono soggette a trasformazioni rapide, anche in risposta ai cambiamenti climatici e agli impatti antropici che si sono verificati sia all'interno dei bacini idrografici sia lungo la costa stessa e che si traducono in una significativa variazione relativa del livello del mare. Le ridotte variazioni di marea (tipiche di un ambiente micro-mareale e mediamente intorno ai 40cm), hanno consentito all'uomo di avvicinarsi alla linea di riva e sviluppare,

lungo le coste, la maggior parte degli insediamenti e delle attività commerciali. La posizione della linea di riva risente delle variazioni di processi che interessano l'atmosfera (variazione dei campi di pressione, regime dei venti, ecc.), l'idrosfera (aumento delle temperature, fusione dei ghiacciai, ecc.), e la geosfera (subsidenza, compattazione dei suoli, emungimento delle acque sotterranee, ecc.). Considerare tutti questi parametri, per lungo tempo, non è stato possibile, ma i risultati della ricerca, in diversi settori (climatologia, oceanografia, geologia), e lo sviluppo tecnologico (monitoraggio dei processi e grande capacità di raccolta ed elaborazione dei dati, utilizzo di sistemi geografici informativi e il telerilevamento), hanno contribuito ad aumentare il grado di conoscenza e modificare le metodologie con cui analizzare le caratteristiche del territorio costiero e la sua tendenza evolutiva.
Gli scenari di emissioni in atmosfera di gas climalteranti sono più severi rispetto al passato e prefigurano aumenti del livello marino prossimi al metro entro la fine del XXI secolo a scala globale (Garner *et al*., 2023), ma la trasposizione a scala regionale richiede modelli ad alta risoluzione, che, per il Mar Mediterraneo, si sono resi disponibili solamente negli ultimissimi anni (Sannino *et al*., 2022). Stime dei movimenti verticali del suolo, sono molto importanti (Allison *et al.*, 2016), ed oggi possono essere desunte grazie alle informazioni fornite dai satelliti con una risoluzione spaziale (sub millimetrica su griglie di 100 metri di lato) e temporale (ogni sei giorni), che fino a pochi anni fa era inimmaginabile.
Il Mediterraneo, mare semichiuso collegato all'Atlantico, presenta dinamiche su piccola scala che non sono adeguatamente rappresentate dai modelli globali a griglia più ampia, rendendo opportuno l'impiego di configurazioni regionali dedicate e dataset geodetici satellitari (Crosetto *et al*., 2020). E' da questo presupposto che gli autori del presente lavoro hanno cercato di modificare l'approccio metodologico per mappare la vulnerabilità delle aree costiere, presentando il cambio di paradigma nell'ambito della conferenza internazionale INQUA 2023, che si è tenuta a Roma, e che è stata appunto intitolata "*Time for Change*", ed in successivi articoli scientifici (Cappucci *et al.*, 2023; 2024).
Lo studio della vulnerabilità e del rischio costiero per effetto dell'innalzamento relativo del livello del mare è un tema di ricerca molto importante, che ha anche grandi ricadute sociali ed economiche e, negli ultimi decenni, è stato affrontato da diversi autori utilizzando dati e metodologie diverse tra loro (Hallegatte *et al.*, 2013; Heberger *et al.*, 2011 ; Jiménez *et al.*, 2018 ; Nicholls *et al.,* 2021), in quanto contribuiscono significativamente anche sul processo di erosione costiera che interessa quasi il 50% della coste sabbiose Italiane (Pranzini *et al.*, 2018). La linea di ricerca che viene descritta nel presente lavoro, colma, a nostro avviso, una delle principali lacune dell'Atlante delle spiagge italiane. L'Atlante è una pubblicazione del CNR (inserita tra i progetti strategici dell'Ente) di fondamentale importanza. Una opera prima nel suo genere, che ha impegnato, per circa 15 anni, la comunità scientifica italiana, consegnando al paese uno strumento omogeneo di analisi delle nostre coste. Tecnici, ricercatori, amministratori ne hanno fatto un ampio uso. Pur con dei limiti, l'Atlante raccoglie tantissime informazioni, mai unite prima tra loro. Da allora è cambiato tutto. Satelliti, nuovi sensori e strumenti ci permettono di acquisire informazioni nell'ambiente emerso e sommerso con risoluzione e frequenza tali da modificare anche le modalità con cui studiamo i processi che influenzano l'evoluzione e la gestione della fascia costiera. Le nuove tecnologie ci permettono di monitorare gli impatti antropici, permettendoci di distinguere il loro contributo rispetto a quello dei processi naturali e di queste conoscenze, una nuova versione dell'Atlante potrebbe ora beneficiarne. In Figura 1, sono riportate le aree di studio esaminate con il nuovo metodo (dieci) e le curve di risalita del livello del mare (per cinque di queste).

Materiali e metodi

Il più recente contributo di ENEA nell'analisi della vulnerabilità costiera è riconducibile agli scenari di inondazione delle pianure sotto l'effetto di innalzamento relativo del livello del mare (RSLR). Lo studio si basa su una metodologia innovativa e la catena di processamento dei dati integra quattro componenti: (i) DTM LiDAR ad alta risoluzione; (ii) proiezioni regionali di SLR dal modello MED16; (iii) tassi di deformazione verticale del suolo derivati dalla *European Ground Motion Ser-*

Preprint

vice (EGMS); e (iv), per l'analisi dei beni esposti, la classificazione della copertura del terreno ed uso del suolo (primo livello delle classi CORINE *Land Cover/Land Use* - LC/LU dell'anno 2018; Crosetto et al., 2020; Figura 2).

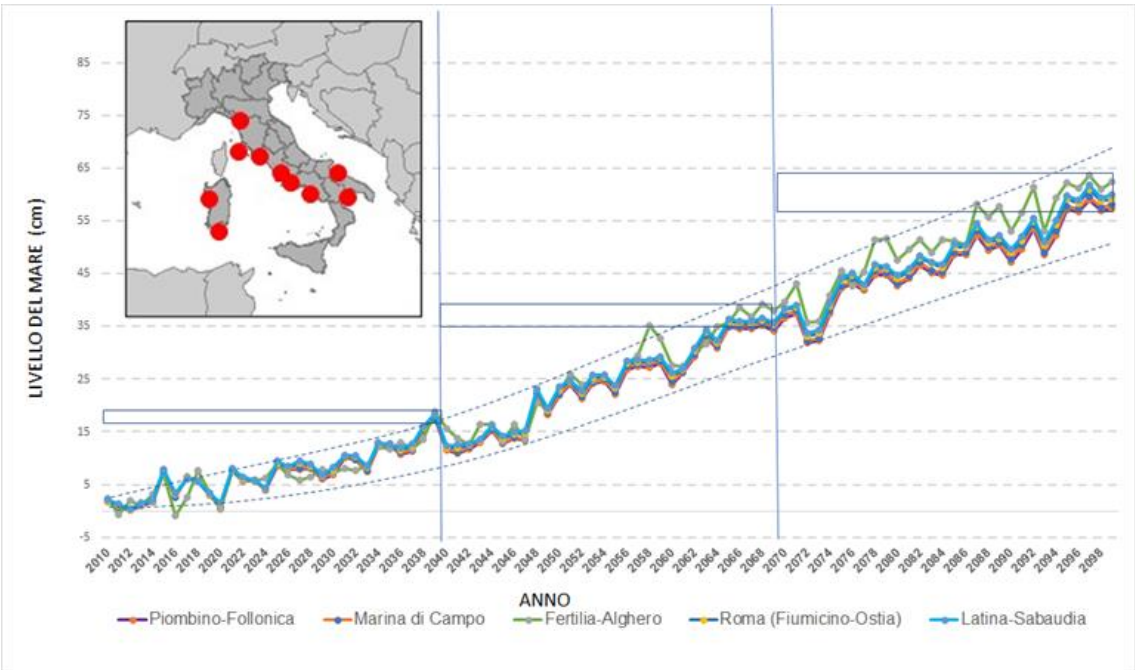

Figura 1. Distribuzione delle aree di Studio esaminate con il nuovo metodo da ENEA (riquadro) e risalita del livello del mare in cinque aree (modificato da Cappucci *et al.*, 2024).

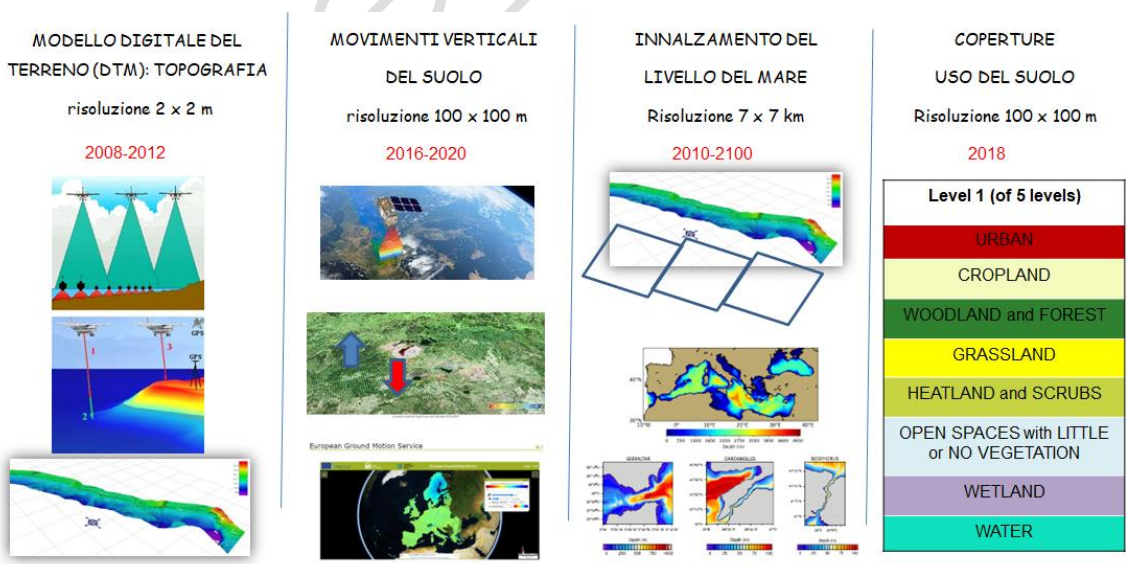

Figura 2. Dati utilizzati nel presente studio e loro risoluzione spaziale. Per maggiori informazioni fare riferimento a Cappucci *et al.*, 2024.

I dati topografici forniscono il DTM da tecnologia LiDAR, a scala nazionale, hanno una risoluzione 2x2m (con un minimo di 1x1m e un massimo di 5x5m, in Sardegna) e accuratezza verticale nominale ±15 cm. Il modello oceanografico (MED16) è un'implementazione del MITgcm a ~1/16° con 100 livelli verticali; include la marea e un ulteriore raffinamento del grigliato computazionale in corrispondenza degli stretti (Gibilterra e Bosforo). Le simulazioni (*hindcast*, storico e RCP8.5) sono forzate tramite *downscaling* atmosferici regionali (vedi Sannino *et al.*, 2022, per ulteriori dettagli). I movimenti verticali del suolo (EGMS) combinano i dati rilevati dai satelliti in orbite ascendenti/discendenti Sentinel-1 e forniscono componenti calibrate verticale ed Est-Ovest con griglia 100×100 m nel periodo 2016–2021. Si tratta di ~250 acquisizioni, che consentono di stimare non solo i valori di velocità annuale, ma di determinare i valori minimi e massimi registrati all'interno di ogni area di studio (Crosetto *et al.*, 2020; Cappucci *et al.*, 2024; Cardello *et al.*, 2025).

Gli scenari di inondazione utilizzano l'approccio '*bathtub*' (vasca da bagno), considerando l'anno in cui si registra il massimo livello di innalzamento del mare per ciascun intervallo di tempo 2010-2040, 2040-2070, 2070-2100 (Didier *et al.*, 2019). Per una più completa descrizione del metodo e dei risultati grafici dell'analisi GIS, si rimanda alla pubblicazione di Cappucci *et al.* (2024).

Risultati

Gli andamenti di SLR risultano tra loro coerenti in tutte le aree oggetto di indagine, con massimi valori di innalzamento del livello del mare a fine secolo relativamente più elevati nel centro del Mar Mediterraneo (Alghero–Fertilia, Sardegna). L'estensione delle superfici di territorio costiero che potrebbero trovarsi a una quota inferiore rispetto a quella del livello medio del mare è riportata in Tabella 1.

Tabella 1. Stima delle superfici di pianure costiere che si troveranno al di sotto del livello medio mare entro la fine del secolo (da Cappucci et al., 2023; 2024).

Aree di Studio	Intervalli di tempo Superfici Sommerse		
	2010-2040	2040-2070	2070-2099
	(km²)	(km²)	(km²)
Piombino–Follonica	1,36	2,72	4,57
Marina di Campo	0,04	0,06	0,09
Alghero–Fertilia	0,99	1,13	1,44
Roma (Fiumicino–Ostia)	1,99	3,31	5,84
Latina–Sabaudia	9,43	12,05	14,84
Brindisi	0,64	0,76	1,616
Cagliari	2,38	4,85	13,00
La Spezia	0,17	0,23	0,50
Napoli	0,34	0,43	0,70
Taranto	0,88	1,25	2,07

Nel tratto di costa compreso tra Piombino e Follonica si osserva un coinvolgimento progressivo di aree agricole e retrodunali, a bassa quota e dalla morfologia subpianeggiante. Marina di Campo, all'Isola d'Elba, mostra una vulnerabilità maggiore attorno alla pista aeroportuale e lungo i canali interni che sono collegati con il mare (Cappucci et al., 2024). Nel tratto di costa compreso tra Alghero e Fertilia, si osserva un crescente processo di allagamento delle sponde della Laguna del Calich e possibili criticità alla foce di collegamento con il mare in prossimità del Porto di Fertilia (Cappucci et al., 2024). In Figura 3, sono rappresentati le classi di beni che, secondo la classificazione di primo livello del sistema CORINE Land Cover (dati del 2018), saranno esposti in questa area costiera all'innalzamento relativo del livello medio del mare entro la fine di questo secolo.

Preprint

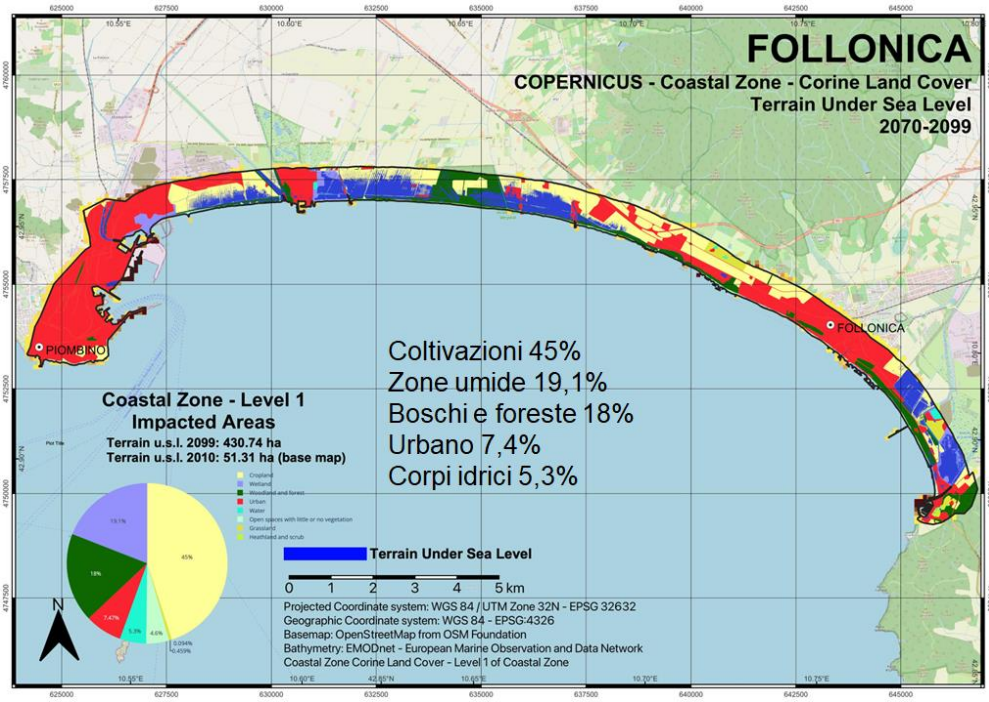

Figura 3. Percentuale della tipologia di beni esposti alla vulnerabilità indotta dalle variazioni relative del livello del mare al 2100 nell'area compresa tra Piombino e Follonica. In particolare, quest'area registra le coltivazioni (45%), le zone umide (19,1%), boschi e foreste (18%), aree urbanizzate (7,4%) ed i corpi idrici (5,3%) come le classi di copertura più vulnerabili.

La fascia costiera prospiciente il Mar Piccolo di Taranto e lo Stagno di Santa Gilla (Cagliari), evidenzia alcuni tratti dei margini lagunari maggiormente esposti all'innalzamento relativo del Livello medio del Mare entro la fine di questo secolo (Figura 4 e Figura 5). A Roma (settori Fiumicino - Ostia), lo scenario di inondazione mostra la massima vulnerabilità alla foce del Tevere e nelle fasce retrodunali urbanizzate. In ultimo, a Latina–Sabaudia si nota una progressiva tendenza all'ampliamento di laghi costieri e connessioni idrauliche a bassofondo (Cappucci et al., 2024).

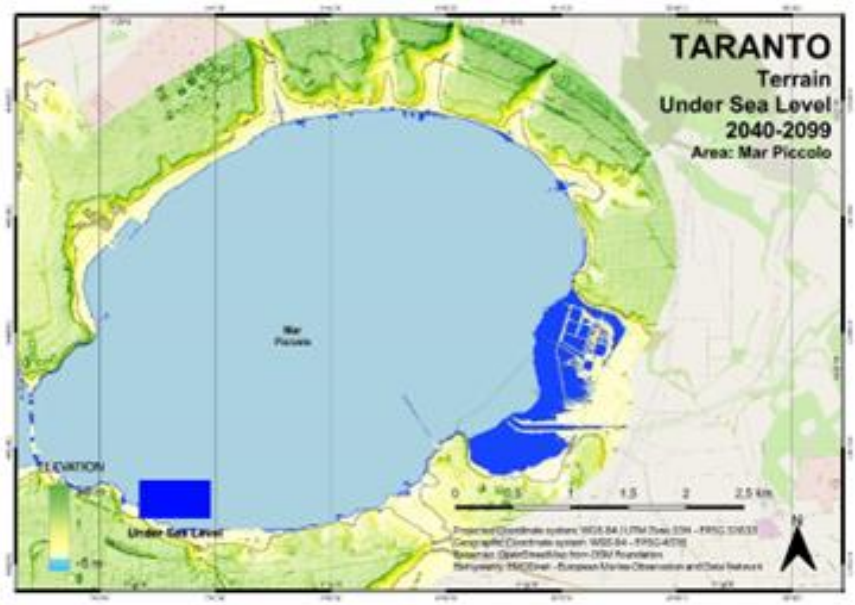

Figura 4. Superficie di terreno che si troverà ad una quota inferiore rispetto al livello medio mare entro la fine del presente secolo nell'area del Mar Piccolo di Taranto.

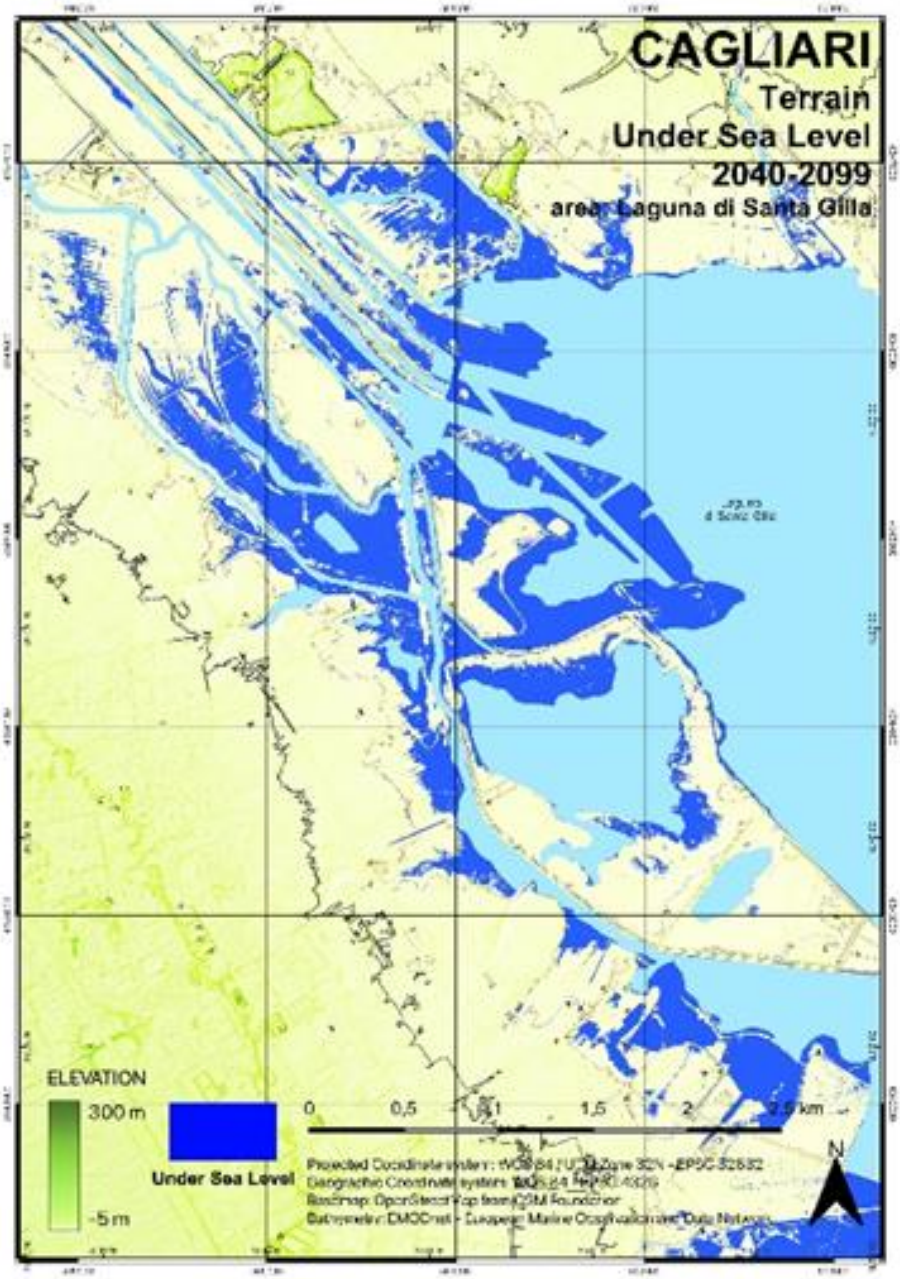

Figura 5. Superficie di terreno che si troverà ad una quota inferiore rispetto al livello medio mare entro la fine del presente secolo nell'area dello Stagno di Santa Gilla (Cagliari).

Discussione

I processi di allagamento costiero coinvolgono maggiormente le aree classificate come agricole e gli spazi aperti con vegetazione rada o assente, e, nei contesti lagunari, zone umide o già allagate (laghi costieri e stagni). L'accuratezza dei rilievi topografici utilizzati nel presente lavoro, varia con la copertura dei rilievi al suolo, ma generalmente questo tipo di rilievi restituisce griglie di risoluzione idonea per l'obiettivo delle indagini (Garner *et al.*, 2023). I nuovi dati in fase di acquisizione nell'ambito del progetto PNRR MER (Next Generation EU; https://www.mer.isprambiente.it/home), forniranno un quadro di conoscenze con maggiore risoluzione ed accuratezza sia in ambiente emerso che sommerso. Si raccomanda il ricorso a ensemble

ad alta risoluzione e a un aggiornamento regolare dei dati osservativi per ridurre le incertezze legate alla componente oceanografica.
L'utilizzo di dati SAR (Copernicus-EGMS) permette di individuare processi sul territorio emerso, ad una risoluzione mai avuta prima, che, in alcune delle aree di studio, sono chiaramente riconducibili alle proprietà intrinseche del territorio (lenti sedimentarie soggette a processi di subsidenza più accentuati), come nel caso della Pianura Pontina (Figura 6) e del Mari Piccolo a Taranto (Figura 4). Nel tratto di costa illustrato della Pianura Pontina, nel 1985, si è verificato il crollo della strada litoranea che corre sulla cresta della Duna del Parco Nazionale del Circeo e, per molti anni, si è creduto che la causa di questo processo fosse legata esclusivamente alla esposizione di quel tratto di costa al moto ondoso incidente (Maestrale e Libeccio), mentre, ora, grazie ai risultati del presente lavoro, scopriamo che si tratta di un'area con i tassi di subsidenza più elevati rispetto a quelle circostanti e che, tale fenomeno, potrebbe avere un ruolo significativo nell'influenzare le tendenze evolutive della fascia costiera.

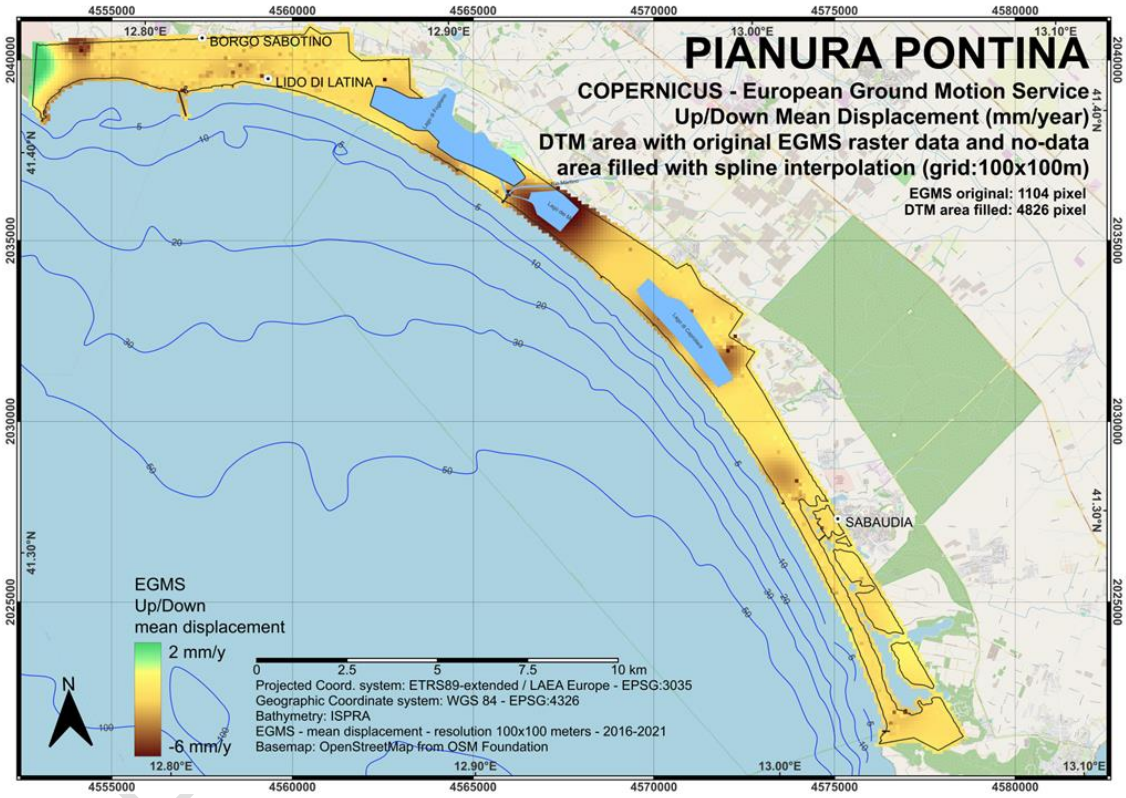

Figura 6. Dettaglio delle variazioni di elevazione del suolo misurate lungo la costa della Pianura Pontina nell'intervallo 2016-2021.

Altra evidenza importante dell'impatto antropico, che causa compattazione del suolo, ed il suo abbassamento, si osserva in prossimità dei punti di emungimento della falda sotterranea e in prossimità di opere ed infrastrutture strategiche (Fertilia ed Isola d'Elba; Figura 7). Anche in altre aree di studio, come Brindisi, La Spezia, Cagliari (Figura 5), l'abbassamento più accentuato delle opere antropiche si osserva per le infrastrutture costiere (moli, pennelli, casse di colmata, layout portuali), per cedimenti del fondo marino su cui posano (Cappucci *et al.*, 2023; Figura 8).

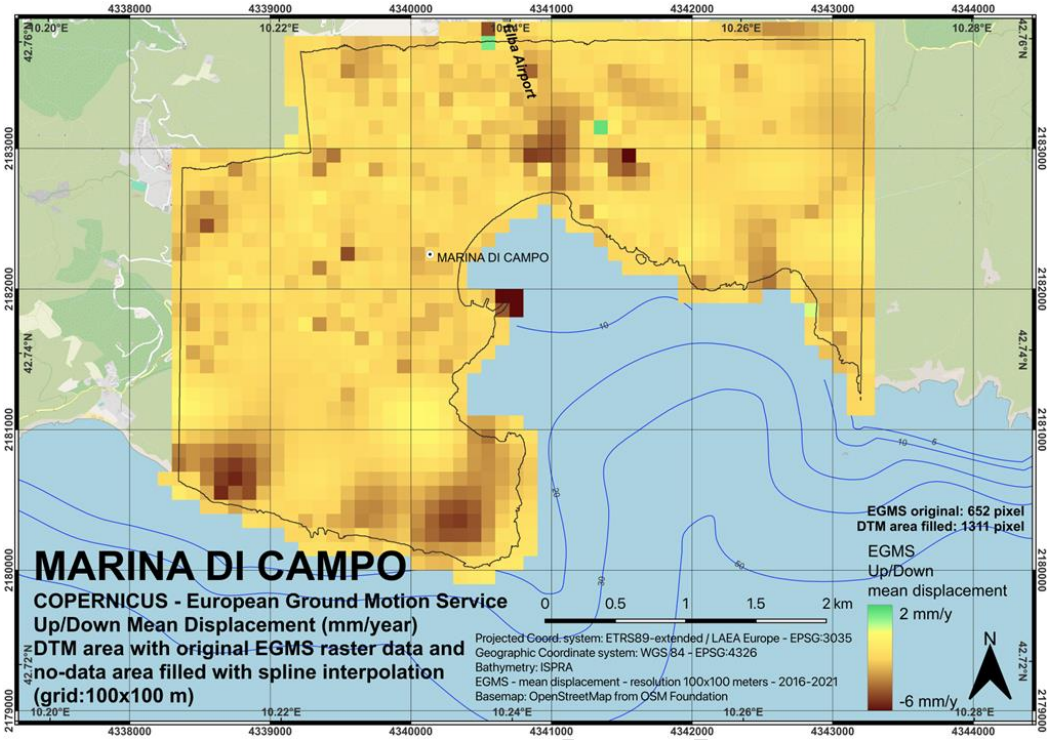

Figura 7. Superficie Dettaglio delle variazioni di elevazione del suolo misurate lungo la costa della Pianura Pontina nell'intervallo 2016-2021.

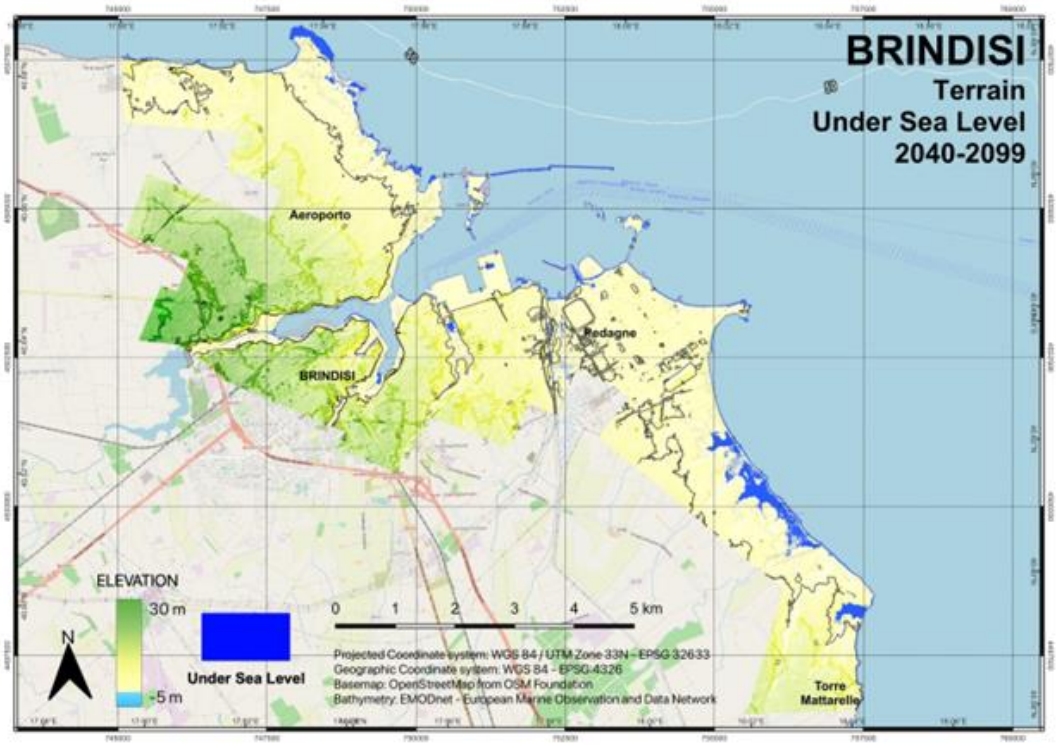

Figura 8. Dettaglio dell'area Portuale di Brindisi. Notare come i moli risultino essere le infrastrutture critiche più vulnerabili all'innalzamento del livello del mare entro il 2100.

Considerazioni conclusive

Le differenze dei risultati ottenuti nel presente lavoro, rispetto alle valutazioni di studi precedenti, sono insite sia nell'utilizzo di scenari di innalzamento del livello del mare differenti rispetto a quelli proposti da Rahmstorf (2007) o dall'IPCC (2013), che sull'utilizzo di diversi dati di deformazione della superficie terrestre (Copernicus-EGMS; Cappucci *et al.*, 2024 a cui si rimanda per approfondimenti). Nei contesti con subsidenza diffusa, l'effetto del RSLR può discostarsi sensibilmente dall'SLR eustatico, con effetti non lineari sulla connettività idraulica e sull'estensione delle aree inondate. E' bene ricordare che l'approccio metodologico descritto nel presente lavoro non considera l'effetto della morfodinamica costiera, che ha una capacità previsionale più breve, e neppure l'effetto delle mareggiate, maree o altri processi che possono innalzare il livello del mare per poche ore o giorni (Jimenez *et al.*, 2017). Il lavoro considera però una moltitudine di altri processi che prima non potevano essere misurati, e la realizzazione di queste analisi ha il vantaggio di poter essere replicata in tutte le aree costiere, tettonicamente stabili, del Mar Mediterraneo.

Mentre l'Atlante delle spiagge ha permesso di definire, in modo unitario, la tendenza evolutiva per i litorali italiani (tratti in erosione, stabili, o in avanzamento), questo contributo va ora a colmare una lacuna importante, cioè quella di mappare gli effetti più recenti del cambiamento climatico e degli impatti antropici, che, insieme, contribuiscono ad aumentare la vulnerabilità delle aree costiere.

In futuro, l'approccio a 'vasca da bagno' fornisce uno screening omogeneo su vaste aree, ma dovrebbe essere integrato, nei siti critici, con modelli accoppiati onde-correnti e con basi topo-batimetrico-morfologiche aggiornate (Didier et al., 2019). Da oggi, crediamo che questo contributo possa colmare una delle "lacune" che la prima versione dell'Atlante delle spiagge, 50 anni fa, non poteva certo considerare, costituendo uno strumento di aggiornamento, di completezza dell'analisi territoriale, che migliora, con un approccio quantitativo, sia la staticità cartografica, che la limitata utilità predittiva del quadro conoscitivo originale dell'Atlante delle spiagge (Fierro et al., 1999). In Figura 9 riportiamo una proposta infografica rappresentativa di una "road map" ideale di pianificazione territoriale del futuro Atlante che, nel processo di governance delle nostre coste, potrebbe generare dei risultati dinamici (mappe di vulnerabilità costiera legate all'innalzamento relativo del livello del mare, realizzate attingendo da Data Lake multi sorgente derivanti modelli numerici, dati acquisiti da remoto (incluso il *proximal sensing*) e rilievi in situ condivisi secondo i criteri di scienza aperta e caratteristiche FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*). Per questi motivi il nuovo progetto potrebbe, come da titolo del presente lavoro, chiamarsi Atlante delle coste italiane.

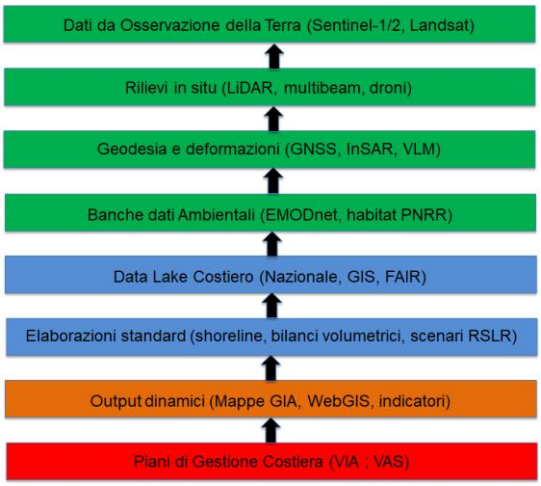

Figura 9. Schema, esemplificativo e non esaustivo, di una ipotesi di processo di *governance* territoriale costiero, basato sull'utilizzo di dati acquisiti da remoto, da modelli numerici previsionali, da dati e rilievi di campo utili per la realizzazione di un Nuovo Atlante.

Preprint

Bibliografia

Allison M., Yuill B., Törnqvist T., Amelung F., Dixon T., Erkens G., Stuurman R., Jones C., Milne G., Steckler M. et al. (2016).*Global Risks and Research Priorities for Coastal Subsidence*. Eos, 97 (19), pp. 22-27. https://doi.org/10.1029/2016EO055013.

Antonioli F., De Falco G., Lo Presti V., Moretti L., Scardino G., Anzidei M., Bonaldo D., Carniel S., Leoni G., Furlani S. et al. (2020). *Relative Sea-Level Rise and Potential Submersion Risk for 2100 on 16 Coastal Plains of the Mediterranean Sea*. Water, 12, 2173. https://doi.org/10.3390/w12082173.

AR5 Climate Change (2013). *The Physical Science Basis - IPCC*. Available online: https://www.ipcc.ch/ report/ar5/wg1/ (accessed on 1 May 2024).

Cappucci S., Carillo A., Iacono R., Moretti, L., Palma M., Peloso A., Righini G. (2023). *Security of Mediterranean coastal areas under future inundation scenarios*. In Proceedings of the Special Issue of Climate Change and Security in the Maritime Domain Conference, Lerici, Italy, 3–5 October 2023; pp. 21-28.

Cappucci S., Carillo A., Iacono R., Moretti L., Palma M., Righini G., Antonioli F., Sannino G. (2024). *Evolution of Coastal Environments under Inundation Scenarios Using an Oceanographic Model and Remote Sensing Data*. Remote Sensing, 16, 2599. https://doi.org/10.3390/rs16142599

Cardello L., Barrea G., Monaco C., de Michele M., Antonioli F. (2025) - *First comparison of subsidence/uplift rates between Copernicus European Ground Motion Service data and long-term MIS 5.5 geological record in Mediterranean regions.* Earth-Science Reviews 265, 105132.

Crosetto M., Solari L., Mróz M., Balasis-Levinsen J., Casagli N., Frei M., Oyen A., Moldestad, D.A., Bateson L., Guerrieri L., et al. (2020) *The Evolution of Wide-Area DInSAR: From Regional and National Services to the European Ground Motion Service*. Remote Sensing, 12, 2043. https://doi.org/10.3390/rs12122043.

Didier D., Baudry J., Bernatchez P., Dumont D., Sadegh M., Bismuth E., Bandet M., Dugas S., Sévigny C. (2019). *Multihazard Simulation for Coastal Flood Mapping: Bathtub versus Numerical Modelling in an Open Estuary, Eastern Canada*. J. Flood Risk Manag., 12, e12505. https://doi.org/10.1111/jfr3.12505.

Nicholls R.J., Lincke D., Hinkel J., Brown S., Vafeidis A.T., Meyssignac B., Hanson S.E., Merkens J.-L., Fang J. A. (2021). *Global Analysis of Subsidence, Relative Sea-Level Change and Coastal Flood Exposure*. Nat. Clim. Change, 11, pp.338–342. https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z.

Hallegatte S., Green C., Nicholls R.J., Corfee-Morlot J. (2013). *Future Flood Losses in Major Coastal Cities*. Nat. Clim. Change, 3, pp.802–806. https://doi.org/10.1038/nclimate1979.

Heberger M., Cooley H., Herrera P., Gleick P.H., Moore E. (2011) *Potential Impacts of Increased Coastal Flooding in California Due to Sea-Level Rise*. Clim. Change, 109, pp. 229–249. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0308-1.

Garner G., Hermans T.H.J., Kopp R., Slangen A., Edwards T., Levermann A., Nowicki S., Palmer, M.D., Smith C., Fox-Kemper B. et al. (2023). *IPCC AR6 WGI Sea Level Projections 2023*; 11701334484 Bytes. Available online: (accessed on).

Jiménez J., Armaroli C., Bosom E. (2017). *Preparing for the Impact of Coastal Storms: A Coastal Manager-oriented Approach*. In Coastal Storms; Ciavola, P., Coco, G., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, pp. 217–239, ISBN 978-1-118-93710-5.

Pranzini E., Anfuso G., Cinelli I., Piccardi M., Vitale G. (2018). *Shore Protection Structures Increase and Evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of Tourism Industry*. Water, 10, 1647. https://doi.org/10.3390/w10111647.

Rahmstorf S. (2007). *A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise*. Science, 315, pp.368–370. https://doi.org/10.1126/science.1135456.

Eprint

Sannino G., Carillo A., Iacono R., Napolitano E., Palma M., Pisacane G., Struglia M. (2022). *Modelling Present and Future Climate in the Mediterranean Sea: A Focus on Sea-Level Change*. Clim. Dyn., 59, pp. 357–391. https://doi.org/10.1007/s00382-021-06132-w.

Manoscritto ricevuto il 08/10/2025; accettato il 10/09/2025

Preprinty