

Progetto Ecosistema dell'innovazione ECS00000043
“Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem (iNEST)”
CUP F43C22000190006
BANDO PER IL FINANZIAMENTO DI PROGETTI DI RICERCA
destinato a giovani ricercatori

RELAZIONE FINALE

Nome e Cognome PI	Davide Lombardo
Titolo del progetto	NEREIDES (North adriatic Environmental Risks connEcted with Isonzo plumes Discharge and possiblE Solutions)

Relazione interna Ogs 2026/46

Descrizione delle attività di progetto

Background e obiettivi

Il progetto NEREIDES, finanziato nell'ambito del programma iNEST – Young Researchers, nasce dall'esigenza di comprendere i crescenti rischi fisici e biogeochimici che interessano il Golfo di Trieste (GoT), area costiera particolarmente vulnerabile agli eventi meteo-marini estremi.

Negli ultimi anni, l'aumento della frequenza e dell'intensità di mareggiate, forti piene fluviali (in particolare associate al fiume Isonzo/Soča) e regimi di vento intensi (Bora e venti da sud) ha reso evidente la necessità di disporre di strumenti avanzati per:

- migliorare la comprensione della dinamica superficiale del GoT;
- valutare l'interazione tra forzanti atmosferiche, apporti fluviali e circolazione marina;
- supportare la previsione e la mitigazione di rischi ambientali (es. dispersione di inquinanti);
- integrare dinamica fisica e processi biogeochimici costieri.

Gli obiettivi principali del progetto sono stati:

1. Validare le correnti superficiali misurate dai radar HF (sistema WERA) tramite drifter;
2. Analizzare l'effetto combinato di vento e portata fluviale sulla dinamica superficiale;
3. Sviluppare e testare una metodologia di assimilazione dei dati radar HF nel modello idrodinamico MITgcm;
4. Valutare il contributo dei radar HF nella stima del moto ondoso;
5. Integrare osservazioni fisiche e biogeochimiche in un'ottica interdisciplinare;
6. Rafforzare collaborazioni scientifiche e diffondere i risultati.

Metodologie applicate

- a. Validazione delle correnti superficiali misurate dai radar HF mediante drifter

Sono stati effettuati tredici deployment di drifter nel GoT: cinque con drifter di tipo CODE; otto in collaborazione con ARPA FVG, utilizzando drifter CODE e Stokes.

I dati raccolti sono stati:

- confrontati con i campi di corrente superficiale misurati dai radar HF WERA installati lungo il GoT;
- confrontati con le simulazioni del modello numerico MITgcm;
- confrontati con il modello SHYFEM utilizzato da ARPA FVG;
- analizzati congiuntamente a misure di salinità superficiale per valutare l'evoluzione della plume del fiume Isonzo.

Per ciascun deployment sono state prodotte mappe con passo temporale di 30 minuti, mostrando traiettorie dei drifter e correnti radar HF. Sono state inoltre effettuate analisi statistiche (correlazioni tra componenti di velocità), evidenziando:

- buon accordo tra radar HF e drifter;
- performance inferiore con il modello MITgcm non assimilato;
- risultati discreti con il modello SHYFEM.

L'analisi congiunta salinità–traiettorie ha mostrato che i drifter seguono coerentemente le acque a bassa salinità della plume dell'Isonzo, confermando il ruolo della forzante fluviale nel trasporto superficiale.

Le campagne congiunte svolte nel 2025 in collaborazione con ARPA FVG hanno confrontato il comportamento dei drifter CODE e Stokes, evidenziando risposte differenti. In particolare, la profondità gioca un ruolo importante: i

drifter CODE seguono le correnti a circa 1 m di profondità, essendo dotati di vele che si estendono fino a circa 1 m, mentre i drifter Stokes sono maggiormente influenzati da vento e onde, avendo una forma simile a dischi. Saranno condotte ulteriori analisi sul diverso comportamento delle due tipologie di drifter.

b. Assimilazione delle correnti radar HF nel modello numerico MITgcm

Il progetto ha sviluppato una metodologia innovativa di assimilazione delle correnti superficiali radar nel modello MITgcm.

Invece di applicare schemi di assimilazione completi e computazionalmente onerosi, è stata proposta una relazione lineare semplificata tra vento e correnti superficiali. L'assimilazione è stata implementata stimando lo stress del vento superficiale coerente con le osservazioni radar, successivamente utilizzato come forcing del modello.

I primi test hanno mostrato:

- performance puntuali simili o talvolta inferiori rispetto al modello libero;
- maggiore variabilità dinamica simulata, più coerente con le osservazioni.

Sono state identificate aree di miglioramento, tra cui:

- raffinamento della dinamica semplificata;
- migliore stima delle matrici di errore;
- estensione dell'approccio a ulteriori forzanti.

c. Analisi del moto ondoso

È stato analizzato il contributo dei radar HF nella stima spaziale dell'altezza significativa d'onda, superando il limite della misura puntuale delle boe.

Le analisi hanno mostrato che:

- anche in un bacino relativamente piccolo come il GoT, la variabilità del dato del moto ondoso non è trascurabile e le misure derivanti dai dati HFR possono contribuire a tenere traccia delle evoluzioni degli stati di mare, soprattutto durante le mareggiate maggiormente pericolose;
- la calibrazione con boe è fondamentale per migliorare l'accuratezza delle misure derivanti dal radar HF;
- i modelli a scala mediterranea (es. Copernicus Marine Service) presentano importanti limiti nella stima del moto ondoso in ambito costiero e strumenti come il radar HF possono contribuire ad incrementare l'accuratezza di modelli di larga risoluzione.

Le misure spaziali radar sono strategiche sia per implementare e migliorare la modellistica, anche ad alta risoluzione, sia per sopperire all'indisponibilità delle boe, oltre a fornire un dato spaziale e non puntuale.

d. Analisi biogeochimiche

Durante i deployment di ottobre 2024 e maggio 2025 sono stati effettuati campionamenti biogeochimici (nell'ambito iNEST Spoke 8, RT1.3.1), focalizzati su:

- parametri del sistema carbonatico (pH, alcalinità);
- sostanza organica disciolta e particellata.

È in corso l'integrazione interdisciplinare tra dinamica fisica e variabili biogeochimiche, con particolare attenzione agli effetti della plume sull'ecosistema bentonico.

Attività di collaborazione

È stata attivata una collaborazione tra OGS e ARPA FVG (<https://www.ogs.it/it/press/al-una-nuova-collaborazione-tra-arpa-fvg-e-ogs-studiare-le-correnti-marine-del-golfo-di>) per attività finalizzata allo studio delle circolazioni di correnti marine superficiali all'interno del Golfo di Trieste attraverso l'uso di due differenti tipologie di drifter: Code e Stokes. Successive elaborazioni hanno consentito di confrontare le traiettorie dei drifter con i movimenti delle correnti superficiali, osservati dai sistemi radar HF WERA installati nel GoT, e di validare così i dati rilevati dai radar HF. Sono stati inoltre confrontati i comportamenti dei drifter Stokes e CODE, evidenziandone le differenze nelle traiettorie.

È stata inoltre avviata un'altra collaborazione, con prospettiva di sviluppo anche oltre la durata del progetto, tra il progetto NEREIDES ed il progetto AIM4Waves, sviluppato dal politecnico di Bari e dall'azienda Elements works S.r.l. nell'ambito dei bandi a cascata iNEST. Questa collaborazione ha l'obiettivo di confrontare e, potenzialmente, integrare i dati di onda ricavati dai radar HF di tipo WERA presenti nel GoT, con la modellistica d'onda sviluppata da AIM4Waves.

Risultati finali e impatto del progetto

Risultati scientifici principali

Il progetto NEREIDES ha raggiunto gran parte degli obiettivi scientifici previsti, producendo risultati significativi:

1. Validazione dei radar HF WERA: le traiettorie dei drifter hanno confermato l'affidabilità dei dati radar, mostrando buon accordo tra osservazioni dirette e misure radar.
2. Differenze tra drifter CODE e Stokes: l'analisi comparativa ha evidenziato risposte diverse in relazione alla profondità e all'influenza di vento e onde.
3. Ruolo della plume del fiume Isonzo: i drifter hanno seguito coerentemente le acque a bassa salinità, confermando l'impatto sul trasporto superficiale.
4. Assimilazione dei dati nel modello MITgcm: è stata sviluppata una metodologia lineare e computazionalmente efficiente, migliorando la rappresentazione della variabilità della circolazione superficiale.
5. Analisi del moto ondoso: i radar HF hanno fornito dati spazialmente dettagliati, utili per integrare modelli numerici ad alta risoluzione.
6. Campionamenti biogeochimici: sono stati raccolti dati su pH, alcalinità e sostanza organica, in vista di un'integrazione interdisciplinare con le osservazioni fisiche.

Workshop finale

È stato organizzato un workshop dal titolo: "iNEST – Young Researchers workshop: Advancing in understanding the Gulf of Trieste coastal dynamics through interdisciplinary research" presso l'Adriatico Guesthouse (Trieste) il giorno 15 luglio 2025.

Il workshop ha riunito giovani ricercatrici e ricercatori e gruppi della sezione di Oceanografia dell'OGS per presentare i primi risultati di progetti innovativi sviluppati nell'ambito del progetto iNEST, con particolare attenzione ai tre progetti vincitori del bando per giovani ricercatori (NEREIDES, REDEFINE, IF-MA). L'evento ha offerto una panoramica delle attività di ricerca interdisciplinare condotte nel Golfo di Trieste, con particolare

attenzione agli ambienti costieri e fluviali. Il tutto con l'obiettivo di contribuire allo sviluppo del Digital Twin del Nord Adriatico.

Al termine dell'evento è stata inoltre realizzata una raccolta di tutti gli abstract delle presentazioni, successivamente pubblicata come report interno OGS dal titolo "Report iNEST – Young Researchers workshop: Advancing in understanding the Gulf of Trieste coastal dynamics through interdisciplinary research – 15 July 2025 - Adriatico Guesthouse (Trieste)" e disponibile al seguente link: <https://hdl.handle.net/20.500.14083/45944>.

Impatto del progetto

Il progetto NEREIDES ha contribuito in modo significativo al miglioramento della conoscenza della dinamica costiera del Golfo di Trieste, rafforzando l'integrazione tra osservazioni in situ, radar HF e modellistica numerica. La validazione delle correnti superficiali tramite drifter ha consolidato l'affidabilità del sistema radar, fornendo una base solida per applicazioni scientifiche e operative. Il confronto tra drifter CODE e Stokes ha inoltre permesso di evidenziare il diverso ruolo di vento, onde e profondità nel controllo del trasporto superficiale.

L'analisi congiunta delle traiettorie e della salinità superficiale ha confermato l'influenza della plume del fiume Isonzo/Soča sulla circolazione del Golfo, migliorando la comprensione dei meccanismi di dispersione e scambio tra ambiente fluviale e marino. Parallelamente, lo sviluppo di una metodologia semplificata per l'assimilazione delle correnti radar nel modello MITgcm rappresenta un avanzamento metodologico, con potenziali ricadute nella previsione della circolazione superficiale e nella gestione di eventi critici.

Dal punto di vista applicativo, i risultati ottenuti rafforzano la capacità di monitoraggio e supporto decisionale in un'area costiera vulnerabile, con possibili benefici nella gestione di mareggiate, piene fluviali e scenari di sversamento di inquinanti. L'integrazione tra componenti fisiche e biogeochimiche costituisce inoltre un passo importante verso una visione sistemica dei processi costieri.

Nel complesso, il progetto ha posto le basi per lo sviluppo di un sistema integrato di osservazione e previsione ad alta risoluzione, contribuendo anche al percorso verso il Digital Twin del Nord Adriatico.

Il progetto ha consolidato e ampliato collaborazioni scientifiche a diversi livelli. A livello regionale, è stata rafforzata la cooperazione con ARPA FVG, in particolare per il confronto tra drifter Code e Stokes e per le analisi comparative con la modellistica numerica regionale.

A livello nazionale, è stata avviata una collaborazione con il Politecnico di Bari e con Elements Works S.r.l. nell'ambito del progetto AIM4Waves, finalizzata al confronto e alla possibile integrazione tra dati di moto ondoso derivati da radar HF e modellistica numerica dedicata.

Queste sinergie hanno favorito un approccio interdisciplinare, rafforzando il collegamento tra osservazioni, modellistica e applicazioni operative.

Pubblicazioni scientifiche

- Lombardo, D., Relitti, F., and Diociaiuti, T.: Report iNEST – Young Researchers workshop: Advancing in understanding the Gulf of Trieste coastal dynamics through interdisciplinary research – 15 July 2025 - Adriatico Guesthouse (Trieste), Relazione interna Ogs 2025/128, <https://hdl.handle.net/20.500.14083/45944>, 2025
- Lombardo, D., Flora, S., Giordano, F., Ingrassia, E., Menna, M., Querin, S., and Ursella, L.: Influence of wind stress and the Isonzo/Soča River outflow on surface currents in the Gulf of Trieste, *Ocean Sci.*, 21, 2197–2214, <https://doi.org/10.5194/os-21-2197-2025>, 2025.

Prospettive future

Ulteriori attività previste includono:

- ulteriori deployment drifter nel GoT fino a marzo 2027;
- la sintesi interdisciplinare tra fisica e biogeochimica per produrre un quadro completo degli effetti della plume sul sistema costiero;
- il completamento delle analisi statistiche tra dati drifter e dati radar HF nonché il confronto con i modelli numerici;
- il completamento delle analisi statistiche tra i dati dei drifter CODE e dei drifter Stokes insieme ad ARPA FVG;
- ulteriori analisi sui dataset drifter;
- attività congiunte con il progetto AIM4Waves per la valutazione comparativa dei campi di moto ondoso da radar HF e da modello e la stima preliminare delle relative incertezze;
- la pubblicazione dei risultati finali.

Data 17/03/2026

Firma del proponente

