

Downscaling dell'idrodinamica del Mediterraneo simulata dai modelli Copernicus: applicazione al caso di studio della Laguna di Orbetello

Andrea Dottarelli¹ & Lorenzo Cappietti^{1,2}

¹Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze
Via di Santa Marta 3 – 50139 Firenze.

²GNRAC – Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero
Corso Europa 26 - 16132 Genova – Italy
E-mail: lorenzo.cappietti@unifi.it

Riassunto

In questo articolo viene presentata una metodologia per il *downscaling*, in una specifica area costiera, dell'idrodinamica del Mediterraneo ricostruita, a grande scala ma con risoluzione spaziale relativamente bassa, tramite simulazione numerica dai modelli del Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). La metodologia proposta è stata applicata al caso di studio della Laguna di Orbetello (GR, Italia). Partendo dalle condizioni idrodinamiche determinate da fenomeni che avvengono a grandi scale spaziali, che sono estratte dalle simulazioni dei modelli CMEMS sul contorno di un dominio spaziale con al centro l'area costiera di interesse, il *downscaling* è ottenuto per mezzo di un secondo modello di simulazione numerica, basato su una griglia di calcolo non strutturata; Questa simulazione permette di ricostruire le dinamiche marine raggiungendo un livello di dettaglio spaziale dell'ordine del metro e quindi di tener conto dell'interazione idrodinamica con morfologie naturali o manufatti di dimensioni relativamente piccole, non rappresentabili nei modelli CMEMS. In questo articolo, viene fornita una sintetica descrizione del servizio CMEMS per il Mediterraneo, una descrizione del modello di simulazione utilizzato e della metodologia di *downscaling*. Infine, viene descritta l'applicazione al caso della Laguna di Orbetello e una prima validazione del modello per confronto tra i risultati delle simulazioni e le misure di campo.

Parole chiave: Copernicus, CMEMS, Downscaling, Modellazione Numerica, TELEMAC

Abstract

This article presents a proposed methodology for downscaling, in a specific coastal area, of the hydrodynamics of Mediterranean Sea obtained via numerical simulations from the models of the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). The methodology is applied to the case study of Orbetello Lagoon (GR, Italy). Starting from the hydrodynamic conditions determined by phenomena occurring at large spatial scales, as extracted from the simulations of CMEMS models on the boundary of a spatial domain with the coastal area of interest at its centre, the downscaling is obtained by means of a second numerical simulation model, based on an unstructured grid, which allows to reconstruct marine dynamics reaching a level of spatial detail of the order of one meter. A brief description of CMEMS service for the Mediterranean Sea is provided, along with a description of the simulation model used and of the methodology to implement the downscaling. Finally, the application to the case study of Orbetello Lagoon is described and a first validation of the model base on comparison between simulation results and field measurements is presented.

Keywords: Copernicus, CMEMS, Downscaling, Numerical modelling, TELEMAC-2D

Introduzione

La simulazione numerica delle dinamiche marine è ormai uno strumento essenziale per la gestione dell'ambiente costiero. Permette di trattare complessi fenomeni naturali con impareggiabile livello di approfondi-

mento rispetto ad altri approcci teorici meno generali, empirici o a volte solo qualitativi. La realizzazione di un modello per la simulazione numerica necessita di rilevanti conoscenze tecnico scientifiche, poiché deve rappresentare matematicamente complessi fenomeni che interagiscono ed evolvono a diverse scale spaziali e temporali. In particolare, per gli studi costieri è spesso necessario scendere al dettaglio spaziale del metro nella simulazione numerica dei processi fisici di rilevante importanza. Si pensi al processo di formazione delle correnti litoranee indotte dai moti ondosi frangenti, alla morfodinamica dei fondali marini nell'intorno di opere costiere fino ai processi di avvezione e diffusione da sorgenti di vario tipo, tra i quali quelli provenienti dagli allevamenti ittici o le plastiche marine.

D'altra parte, la dinamica di questi processi, pur essendo caratterizzata dalle piccole scale spaziali, risente anche delle dinamiche che si formano a scale spaziali e temporali molto maggiori. Si pensi, per esempio, come il flusso e reflusso mareale che si forma su spazi marini enormi determini anche la circolazione dentro i ridotti confini delle lagune costiere e dei suoi stretti canali. Nella simulazione di alcune dinamiche alla scala costiera di interesse può quindi essere necessario introdurre anche quelle dinamiche che si formano per processi che si svolgono a scala spaziale molto maggiore.

In estrema sintesi, con la simulazione numerica le dinamiche a grande scala possono essere introdotte imponendo le condizioni che le rappresentano sul contorno del dominio numerico del modello costiero, il quale a sua volta ricostruisce le dinamiche alla scala costiera portando anche queste dentro ai processi simulati.

Tali condizioni al contorno possono provenire da due fonti:

- da stazioni di misura, poste in situ o remote, di quelle stesse dinamiche da imporre al contorno dell'area costiera di interesse;
- da altri modelli di simulazione numerica che a loro volta ricostruiscono le dinamiche su domini spaziali a più grande scala ma con risoluzione spaziale e temporale relativamente bassa, i.e. inadeguata per gli studi costieri; da questi modelli a grande scala si possono estrarre le condizioni da imporre sul contorno dell'area costiera dentro la quale vogliamo ricostruire sia le stesse dinamiche ma con maggior dettaglio spaziale sia introdurre nuove dinamiche non simulabili con modello a grande scala (procedura detta appunto di *downscaling* delle dinamiche ricostruite da un modello di simulazione a grande scala per mezzo di un secondo modello di simulazione a piccola scala);

Le stazioni di misura di campo sono relativamente poco diffuse e, anche quando sono presenti nelle vicinanze dell'area di interesse, a volte la serie temporale delle misure manca di dati a causa di periodi di fuori servizio. Inoltre, per utilizzare queste misure saremmo vincolati a implementare il modello costiero facendo passare il contorno del dominio di interesse per la stazione di misura e comunque, nel caso di stazioni in situ, avremmo il dato noto solo su un punto rimanendo indeterminate le condizioni su tutto il resto dell'estensione del contorno. Nel caso di misure da stazioni remote, come misure satellitari, la risoluzione spaziale è maggiore di quella puntuale che caratterizza le stazioni in situ, ma la frequenza della misura deve sottostare al tempo di passaggio di uno o più satelliti rendendo relativamente problematico l'uso per forzare modelli numerici. L'utilizzo di modelli di circolazione a grande scala, dai quali estrarre le condizioni al contorno per il modello costiero, ha il vantaggio di poter disporre dei dati su tutto il contorno dell'area costiera di interesse permettendo quindi di tener conto della eventuale variabilità spaziale dei fenomeni. Inoltre, i modelli operativi gestiti da enti preposti, nazionali o sovranazionali (e.g. EU), garantiscono ormai da anni la continuità dei dati prodotti, senza lacune temporali e operando continue rianalisi dei dati che di volta in volta ne migliorano la qualità. D'altra parte, è necessario conoscere con estremo dettaglio il modello a grande scala che viene utilizzato per la procedura di *downscaling*. Per esempio, è fondamentale conoscere le specifiche forzanti simulate e le ipotesi di base che influiscono sui risultati del modello a grande scala. Potrebbero infatti mancare delle forzanti importanti, omesse in attesa di future implementazioni (e.g. la marea astronomica nei primi modelli di circolazione CMEMS per il Mediterraneo, e.g. quello qui utilizzato) o che non giocano un ruolo rilevante nelle grandezze simulate alla grande scala e con bassa risoluzione spaziale. Infatti, nel passare dalla grande scala alla piccola scala può essere necessario aggiungere nuove forzanti che pur non essendo determinanti nella simulazione dei processi fisici descritti con basso dettaglio spaziale su grandi aree, diventano determinanti nei processi locali descritti con elevato dettaglio spaziale (e.g. l'interazione della circolazione con morfologie o manufatti costieri della dimensione spaziale dell'ordine del metro o meno).

In questo lavoro si propone una metodologia basata su modelli numerici open-source per il *downscaling* in aree costiere, fino a scale spaziali del metro, della circolazione marina ricostruita alle grandi scale dai modelli

del Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Dopo una descrizione del prodotto CMEMS e della metodologia operativa, si riporta la descrizione del caso di studio della Laguna di Orbetello. Si discute la validazione della procedura di *downscaling* mettendo a confronto la circolazione ricostruita con il modello e alcune misure di campo. Infine, vengono riportate osservazioni conclusive sui punti di forza e di debolezza del modello e indicazioni per futuri sviluppi migliorativi.

Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)

Copernicus è il programma europeo di osservazione della terra che mette a disposizione servizi di informazione su dati ambientali utili per studi tecnico-scientifici e per promuovere lo sviluppo di iniziative imprenditoriali dedite alla creazione di prodotti o servizi destinati agli utenti finali. I dati forniti dai vari servizi di Copernicus derivano da misure condotte da sensori in situ, da sensori remoti (e.g. a bordo di satelliti) o da modelli di simulazione numerica (<https://www.copernicus.eu>). In particolare, il servizio CMEMS si occupa dell'ambiente marino ed ha lo scopo di fornire i dati che riguardano lo stato fisico e la dinamica dell'ecosistema oceanico e marino (<https://marine.copernicus.eu/>). Tra i dati forniti dal CMEMS, quelli inerenti alla circolazione idrodinamica dell'intero Mar Mediterraneo derivano dalla simulazione numerica e vengono distribuiti tramite il servizio denominato:

- *MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_006_013*.

Questo prodotto mette a disposizione gli output del modello denominato Med-Currents EAS5 implementato dal Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC). Il modello simula l'idrodinamica del Mediterraneo e produce in output su ogni nodo di calcolo, tra altro, le seguenti grandezze:

- i livelli del mare;
- le velocità della circolazione marina;
- la temperatura del mare;
- la salinità.

I dati sono forniti con valori medi relativi ad intervalli temporali mensili, giornalieri o orari e con risoluzione spaziale pari ad $1/24^\circ$ di arco di latitudine e longitudine (i.e circa 4 km alle latitudini di interesse per il presente lavoro) per vari livelli di profondità. Inoltre, il servizio CMEMS, fornisce anche tutte le informazioni inerenti al modello Med-Currents EAS5, tramite il prodotto *MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_006_013-statics* che contiene per esempio: coordinate dei nodi e dimensioni delle celle di calcolo. L'utilizzo del servizio CMEMS (come tutti i servizi del programma Copernicus) è gratuito e accessibile a chiunque.

Metodologia

La metodologia sviluppata in questo lavoro, per ricostruire con simulazione numerica l'idrodinamica in una zona costiera che abbia risoluzione spaziale del metro e risoluzione temporale di decine di minuti, si basa:

- 1) sull'utilizzo dei dati inerenti all'idrodinamica del mar Mediterraneo forniti dal CMEMS tramite il prodotto - *MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_006_013*;
- 2) sull'utilizzo del modello idrodinamico TELEMAC-2D, che fa parte del pacchetto di TELEMAC-MA-SCARET.

I dati idrodinamici CMEMS di velocità e livelli idrici sono imposti sul contorno del dominio numerico del modello idrodinamico TELEMAC-2D che a sua volta permette di ricostruire l'idrodinamica interna alla zona costiera di interesse tenendo conto della morfologia dei fondali, di eventuali manufatti e di forzanti locali caratterizzati da scale spaziali dell'ordine del metro e a scale temporali dell'ordine della decina di minuti. Il modello dei fondali viene ricostruito elaborando i dati batimetrici in ambiente GIS mentre i dati CMEMS vengono passati in input al modello idrodinamico TELEMAC-2D tramite una procedura operativa basata su scripting con linguaggio Python. In Figura 1 sono riassunti, in un diagramma di flusso, gli strumenti software applicati e gli step fondamentali della metodologia.

Il modello idrodinamico TELEMAC-2D risolve numericamente l'equazione di conservazione della massa e le equazioni cardinali della meccanica dei fluidi nella forma delle così dette *depth-averaged equations* (DAE) per le correnti a superficie libera (Telemac, 2020). Le DAE si ottengono dalle equazioni di Navier-Stokes con l'ipotesi che la componente verticale della velocità e le sue derivate siano trascurabili in confronto a quelle orizzontali e quindi che la distribuzione della pressione sulla verticale sia di tipo idrostatico. La risoluzione

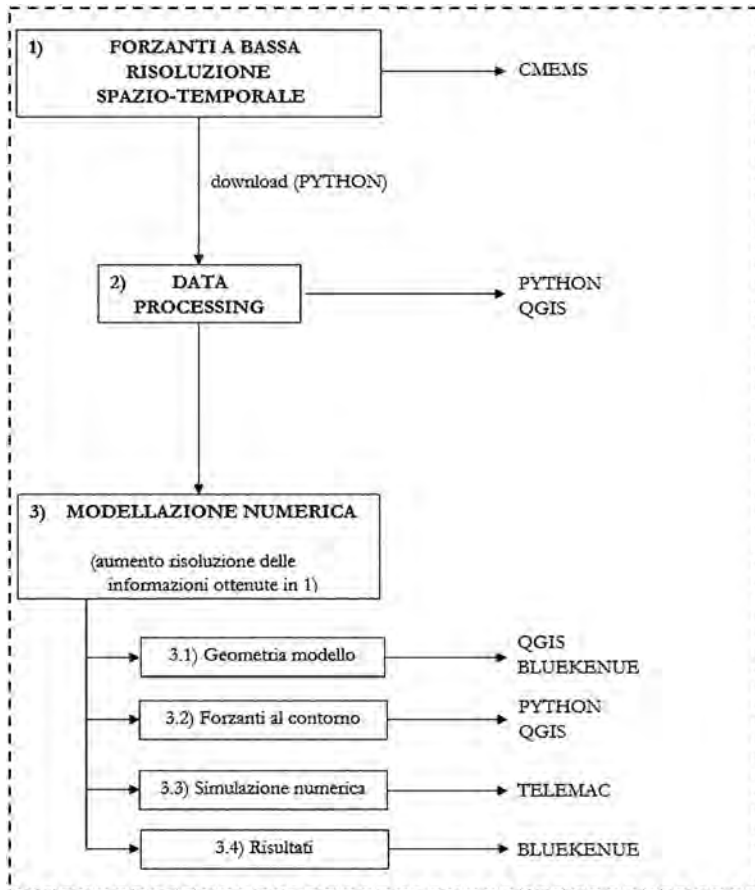


Figura 1. Schema della metodologia.

numerica può essere ottenuta su una griglia di calcolo strutturata (detta: *regular mesh* e caratterizzata dalla costanza della distanza tra i nodi di calcolo in tutto il dominio numerico) o non strutturata (detta *flexible mesh* e caratterizzata dalla possibilità di far variare la distanza tra i nodi di calcolo del dominio numerico). L'utilizzo della *flexible mesh* è fondamentale al fine di far variare la risoluzione spaziale nel passare dalle zone poste al contorno del dominio di calcolo alle zone costiere più interne dove si vogliono simulare i processi alle piccole scale. L'utilizzo di una *regular mesh* imporrebbe di utilizzare anche per le zone poste sul contorno del dominio di calcolo la stessa risoluzione spaziale necessaria per la zona costiera e quindi un aumento del numero dei nodi di calcolo sul quale risolvere numericamente il sistema di equazioni del modello al punto tale che l'onerosità computazionale diverrebbe insostenibile.

Il modello permette di simulare una serie di fenomeni idrodinamici, tra i quali:

- propagazione di onde lunghe, includendo gli effetti non lineari;
- perdite di energia per attrito al fondo;
- effetto della forza di Coriolis;
- effetto di forzanti atmosferiche: vento, gradienti di pressione atmosferica;
- effetto di turbolenze di sotto-griglia;
- correnti super e sub critiche;
- effetto di gradienti di temperatura e salinità;
- condizioni di wet and dry;
- diffusione e propagazione di traccianti, mediante accoppiamento con altri moduli;
- trasporto di sedimenti, mediante accoppiamento con altri moduli.

Per imporre in *input*, sui nodi di calcolo posti sul contorno del dominio numerico del modello TELEMAC-2D, i valori di velocità e livelli forniti in *output* dal modello a grande scala del CMEMS, è stata applicata la seguente metodologia:

1. i nodi posti sul contorno del dominio numerico del modello TELMEAC-2D vengono georeferenziati, in ambiente GIS, secondo il sistema di riferimento WGS 84, epsg 4236 (Figura 2),
2. i dati di velocità e livelli marini forniti dal modello CMEMS sono importati nello stesso ambiente GIS come un raster (Figura 2),
3. utilizzando i dati CMEMS relativi a quelle celle che hanno il centro più vicino ai nodi sul contorno del dominio numerico del modello TELEMAC-2D si interpolano i dati CMEMS ottenendo la serie temporale da applicare come condizione su ogni nodo del contorno.

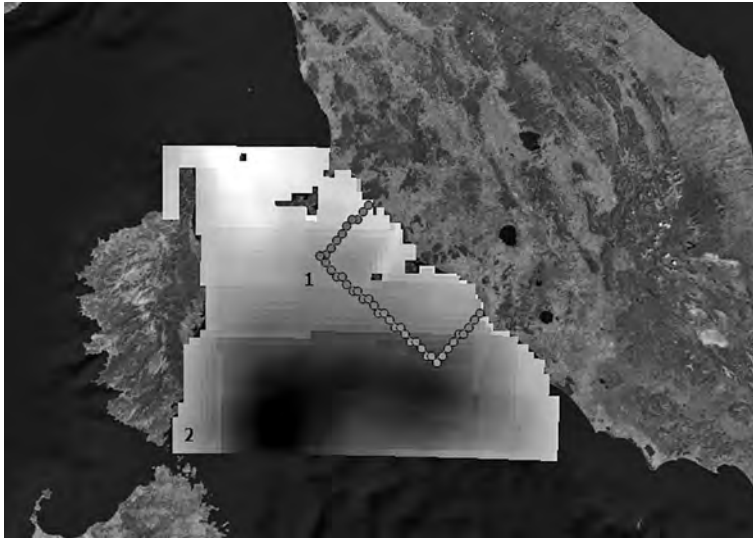


Figura 2. Nodi di calcolo posti sul contorno del dominio numerico del modello TELEMAC-2D (1), raster dei dati forniti dal modello CMEMS (2).

Va osservato che i dati CMEMS derivano dal modello Med-Currents EAS5 che, nel periodo del lavoro descritto nel presente articolo (gennaio-settembre 2019), non simulava la presenza della marea astronomica (Clementi et al, 2020). Come tale, le

condizioni al contorno con il quale si forza il modello TELEMAC-2D ne sono prive e quindi anche i risultati ottenuti dal *downscaling* all'interno dell'area costiera in esame mancheranno di questa componente. Questa circostanza ha rilevanti implicazioni nella fase di validazione del modello di *downscaling* per confronto con le misure di campo che invece registrano anche gli effetti indotti dalla marea astronomica nella grandezza fisica rilevata. In pratica, dalle misure di

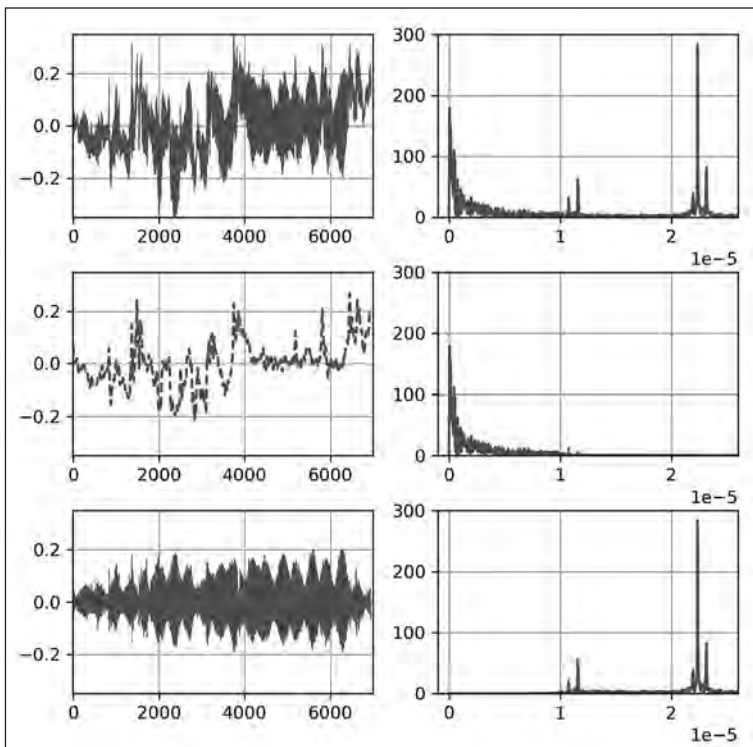


Figura 3. Serie temporale dei livelli del mare registrati da una stazione costiera (in alto a sinistra), del segnale risultante dopo aver filtrato la componente di marea astronomica (al centro a sinistra) e componente mareale (in basso a sinistra). Nelle immagini a destra sono riportati i corrispondenti spettri in frequenza delle corrispondenti serie temporali nelle immagini a sinistra.

campo andranno eliminati gli effetti mareali filtrando via quella parte di segnale che ha le frequenze tipiche della marea astronomica (Figura 3).

Inoltre, analizzando i livelli del mare forniti dal modello CMEMS, risulta che in tutta l'area di studio questi siano per tutto il periodo esaminato sempre negativi. Il motivo è dovuto al fatto che il modello **Med-Currents EAS5** è innestato nel modello dell'Oceano Atlantico (GLO-MFC) dal quale eredita uno zero di riferimento per il livello della superficie libera (Oddo et al. 2009) che è un po' più alto del livello mediamente presente nel mediterraneo nel periodo esaminato in questo studio. Per poter confrontare i dati ottenuti dal modello di *downscaling* con le misure dei livelli fatte da sensori in sito, a loro volta riferite ad uno zero scelto dal gestore dello strumento e non necessariamente uguale a quello del modello numerico, le serie di dati vengono sempre traslate rimuovendo dal segnale il valore medio nel periodo di tempo preso in osservazione (Figura 4).

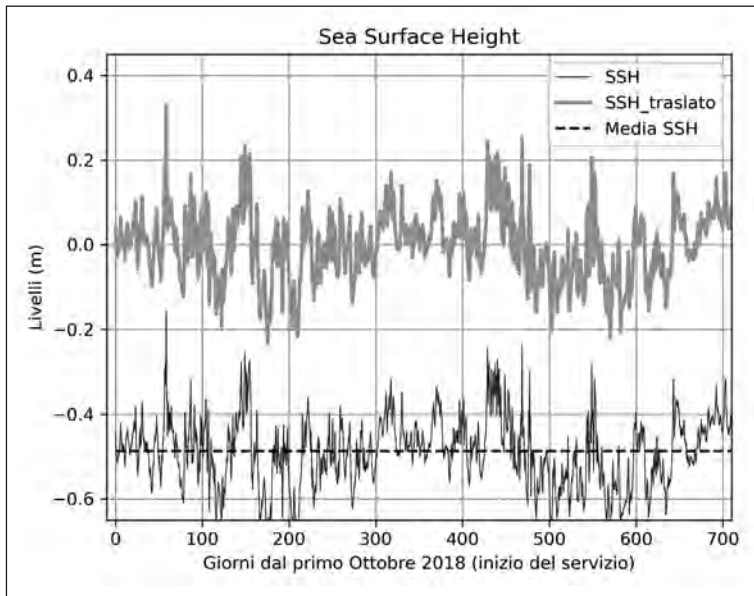


Figura 4. Esempio relativo alla traslazione della serie temporale dei dati di livello del mare, in un generico punto della costa in esame, in modo da avere un segnale con valor medio pari a zero durante un determinato periodo preso in esame.

Il caso di studio della Laguna di Orbetello (GR)

La Laguna di Orbetello (GR) si trova sulla parte meridionale della costa Toscana ed è formata dai due tomboli, quello di Feniglia e quello della Giannella, che collegano la costa con il Monte Argentario. Ha una estensione di circa 26km² ed è divisa dall'istmo di Orbetello in due sottobacini rispettivamente detti Laguna di Levante e Laguna di Ponente. La profondità media è pari a circa 1.3m, all'interno sono invasi circa 30Mm³ ed è collegata al mare tramite i canali di Nassa e Fibbia, dal lato della Laguna di Ponente, e tramite il solo canale di Ansedonia dal lato della Laguna di Levante (Figura 5). I tre canali hanno lunghezze variabili tra 1km e 2km e sono larghi circa 20m.

È accertato che almeno dal XVIII secolo questo sistema ambientale è caratterizzato da un idrodinamismo relativamente debole con scambi idrici con il mare modesti e persistenti episodi di crisi anossiche che si sono ripetuti con regolarità nei secoli e ancora oggi affliggono questo ambiente (Cappiotti et al. 2019). In generale, le principali forzanti idrodinamiche sono il vento che agisce direttamente sullo specchio acqueo della laguna e i gradienti idrici tra l'interno e l'esterno della laguna indotti dalla marea astronomica e dalle variazioni bariche che avvengono a scale spazio molto più grandi dell'area della laguna. Gli effetti di queste forzanti generate da fenomeni a grande scala si propagano dentro la laguna attraverso gli stretti canali di Nassa, Fibbia e Ansedonia. Per la modellazione numerica dell'idrodinamica del sistema lagunare è quindi necessario rappresentare nel modello sia gli effetti di forzanti a grande scala sia la presenza di elementi morfologici che vanno descritti con risoluzione spaziale dell'ordine del metro. Per quanto illustrato nel paragrafo introduttivo e in quello metodologico, la Laguna di Orbetello ha caratteristiche che ne fanno un caso di studio particolarmente indicato per l'applicazione della metodologia di *downscaling*.

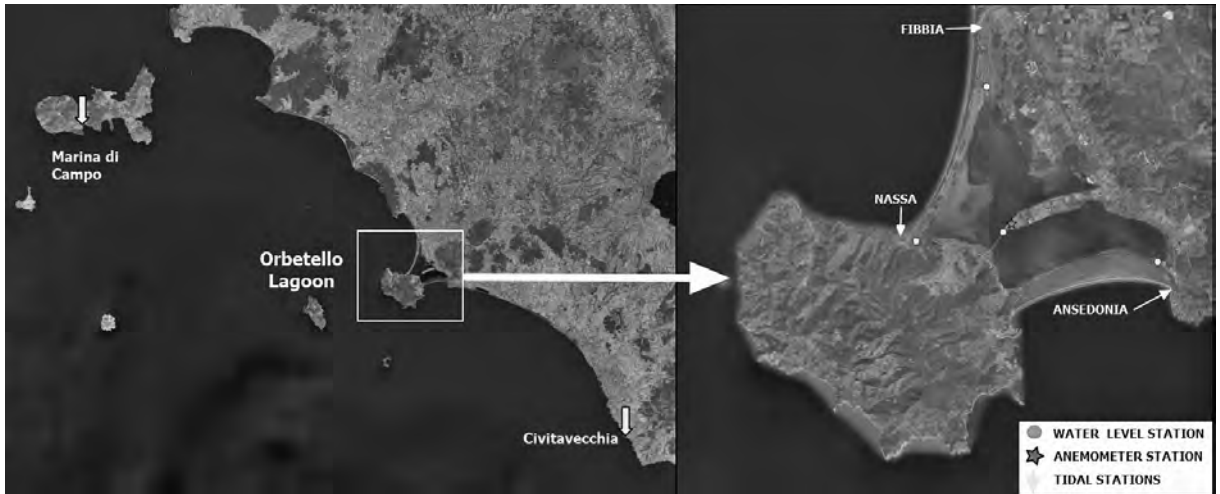


Figura 5. Localizzazione della Laguna di Orbetello, morfologia e individuazione dei canali di collegamento con il mare.

Seguendo la procedura metodologica illustrata nel paragrafo precedente, il dominio numerico entro il quale si sviluppa il *downscaling* dell'idrodinamica del modello CMEMS contiene al suo interno la laguna di Orbetello, si sviluppa lungo costa per circa 100km partendo dal contorno a Sud all'altezza di Civitavecchia (RO) arrivando al contorno a Nord all'altezza di Castiglione della Pescaia (GR) e si chiude con un contorno al largo ad una distanza di circa 45km dalla costa.

Questo dominio spaziale è discretizzato in nodi, disposti su una griglia non strutturata, sui quali sono ricostruite le grandezze idrodinamiche, velocità e livelli marini con il modello TELEMAC-2D. I nodi sono a distanza variabile che passa da circa 4km, nelle aree in prossimità dei contorni, a circa 2m nelle aree costiere e lagunari per un totale di 74408 nodi di calcolo (Figura 6). Il modello di *downscaling* implementato viene forzato, imponendo sui nodi dei suoi contorni, l'andamento temporale dei livelli e dei flussi idrici entranti/uscenti ricostruiti dal modello idrodinamico messo a disposizione dal CMEMS che ricostruisce l'idrodinamica in tutto il mediterraneo ma con risoluzione spaziale di 4km, i.e. una risoluzione non sufficiente per studiare l'idrodinamica della Laguna di Orbetello.

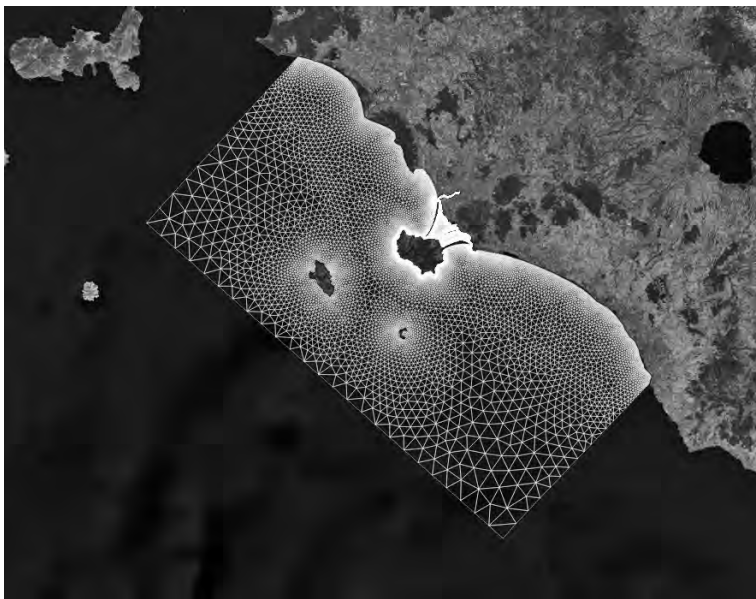


Figura 6. Griglia di calcolo non strutturata del modello numerico sviluppato.

Il periodo di tempo simulato parte dal 3 febbraio 2020 perché solo da questa data il servizio CMEMS ha messo a disposizione i dati di velocità delle correnti non solo superficiali ma anche lungo la profondità che sono indispensabili per forzare il modello con i flussi entranti o uscenti dai suoi contorni. In questo lavoro è stata ricostruita l'idrodinamica negli otto mesi dell'intervallo 3 febbraio 2020 - 1° ottobre 2020.

Per validare la ricostruzione dell'idrodinamica della laguna di Orbetello, ottenuta con il modello di *downscaling* realizzato in questo lavoro, vengono confrontate le serie temporali dei livelli in laguna simulate e misurate in campo dagli idrometri installati presso i canali di Fibbia e Ansedonia. Dalle serie temporali misurate è stata filtrata la componente di marea perché non è presente nelle condizioni poste al contorno del modello di *downscaling*. È importante sottolineare che le differenze tra i livelli simulati e quelli misurati possono essere spiegate per effetto dei venti locali che non sono stati introdotti nel modello ma che durante alcuni giorni del periodo considerato sono particolarmente intensi. Il ruolo dei venti nel determinare l'idrodinamica lagunare, quando raggiungono una certa intensità, è stato chiaramente dimostrato in altre applicazioni modellistiche descritte in Cappiotti and Scroccaro 2004 e Cappiotti et al. 2019. Inoltre, durante i mesi estivi viene attivato un sistema di pompaggio presente in ogni canale al fine di favorire una più intensa idrodinamica lagunare, ma anche questa ulteriore forzante non è stata introdotta nell'implementazione del modello presentato in questo lavoro. Nonostante la mancanza di queste due forzanti nell'implementazione del modello, i.e. il vento locale e il sistema di pompaggio, il confronto tra la serie di dati simulati e quelli misurati riportato in Figura 7 dimostra una buona capacità che ha il modello di ricostruire fedelmente i valori dei livelli idrici in laguna e quindi, per continuità, gli scambi idrici con il mare. Tale buona corrispondenza dimostra che, pur in assenza della marea astronomica e dei venti, le altre due forzanti presenti nel modello, i.e.: la variazione dei livelli del mediterraneo dovuta a gradienti barici spazio-temporali e la circolazione a grande scala, sono determinanti per l'idrodinamica interna alla Laguna di Orbetello.

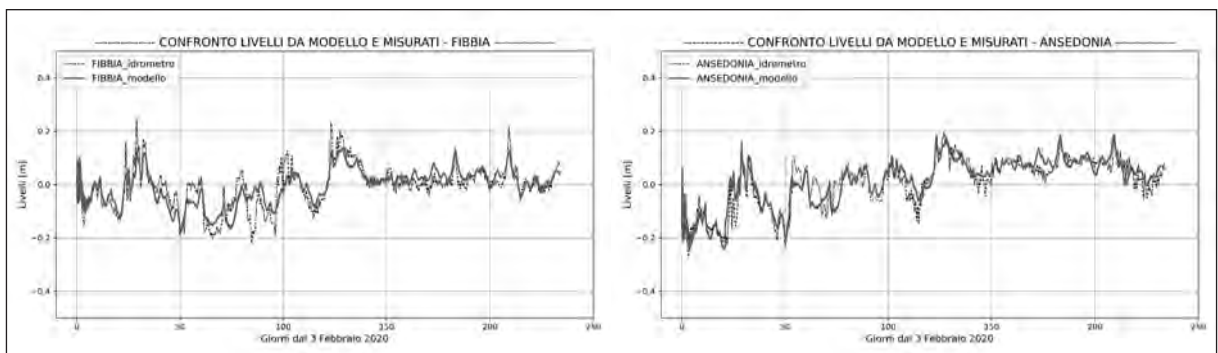


Figura 7. Confronto tra le serie temporali dei livelli idrici lagunari simulati e misurati presso le stazioni di campo di Fibbia (sinistra) e Ansedonia (destra).

Conclusioni

Nel presente lavoro è stata descritta una metodologia per implementare il *downscaling* in zone costiere dell'idrodinamica ricostruita con bassa risoluzione spaziale dai modelli CMEMS alla scala di tutto il Mediterraneo (i.e. circa 4km). La bassa risoluzione spaziale non permette di studiare l'idrodinamica di sistemi costieri perché questa è caratterizzata da morfologie e fenomenologie che si sviluppano a scale spaziali dell'ordine del metro. L'utilizzo del modello idrodinamico TELEMAC-2D, basato su una griglia di calcolo non strutturata e forzato con condizioni di livello marino e flussi idrici lungo i suoi contorni, forniti dal modello CMEMS, permette di ricostruire l'idrodinamica costiera con livello di risoluzione spaziale dell'ordine del metro.

L'applicazione al caso di studio della Laguna di Orbetello, per il quale il modello di *downscaling* è stato forzato solo con le condizioni al contorno provenienti dal servizio CMEMS di Copernicus e il buon accordo tra la ricostruzione numerica e le misure di campo, nel periodo di otto mesi preso in considerazione in questo studio, dimostra la capacità del modello di spiegare con buona accuratezza l'idrodinamica di questo sistema ambientale.

Tra le forzanti del modello di *downscaling* non sono stati considerati in questa prima implementazione: i)

la marea astronomica, ii) il vento locale che agisce sopra lo specchio acque del dominio numerico e, iii) il sistema di pompaggio forzato presente nei canali lagunari e normalmente attivato nei mesi estivi. Tuttavia, poiché tutte le componenti della catena modellistica descritta nel presente lavoro sono basate su codici *open source* è possibile aggiungere porzioni di codice appositamente sviluppato per l'inserimento di tutte le forzanti per ora mancanti e anche di altre dinamiche quali, per esempio, quelle ambientali legate ai fenomeni di crisi anossiche. Per questo, il modello ha importanti potenzialità di sviluppo e utilità futura come strumento a supporto delle decisioni di gestione dell'ambiente lagunare.

Bibliografia

- Cappiotti, L. and Scroccaro, I. (2014). The hydrodynamics of the Orbetello Lagoon. Measurements and numerical simulations. Atti del Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Trento, settembre 2014.
- Cappiotti, L., Solari, S., Simonetti, I. Crema, I. (2019). Numerical modelling of Orbetello Lagoon circulation in the XVIII century. 2019 IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea, Genoa, Italy, October 3-5, 2019.
- Clementi, E., Grandi, A., Lyubartsev, V., Escudier, R. (2020). "CMEMS-MED-QUID-006-013 – Quality Information Document".
- Oddo, P., Adani, M., Pinardi, N., Fratianni, C., Tonani, M., Pettenuzzo, D., (2009) –“A Nested Atlantic-Mediterranean Sea General Circulation Model for Operational Forecasting”.
- Telemac, 2020. Telemac2d User Manual (version v8p1, 2020).