

Implementazione di un modello ad alta risoluzione innestato per lo studio della corrente della Florida

Federica Benassi, Beatrice Biagi, Serena Negroni, Deniel Pavone, Chiara Ventrucci

17 dicembre 2022

Abstract

Lo scopo di questo elaborato è l'implementazione di un modello innestato ad alta risoluzione mediante il metodo di *downscaling* dinamico, e l'analisi dei risultati ottenuti dall'integrazione numerica alle differenze finite delle equazioni primitive, utilizzando il modello oceanico NEMO, su una regione rettangolare che comprende lo Stretto della Florida. In particolare si analizzano il campo superficiale e una sezione meridionale alla longitudine 81.5°W per la temperatura e la profondità del *mixed layer* del dominio innestato. Inoltre, si osserva come variano i campi di correnti superficiali e di vorticità all'aumentare della risoluzione del dominio.

1 Introduzione

L'oceano è caratterizzato da un regime di moto turbolento, per il quale si distinguono moti con differenti scale spaziali e temporali. Si definisce turbolenza a scala planetaria quella per la quale i moti hanno le dimensioni dell'intero bacino oceanico e scale temporali dell'ordine dei mesi. Strutture di questo tipo prendono il nome di *gyres* e ruotano in senso opposto in base all'emisfero in cui si trovano. A scale più piccole, comprese tra i 10 e 100 km, si hanno i moti di mesoscala: correnti regolate dall'equilibrio geostrofico. Riducendo ulteriormente la scala si formano strutture di sotto-mesoscala, di dimensioni tra 1 e 10 km, dovute alle instabilità non lineari. Infine, per le scale ancora più piccole, inferiori ai 100 m, si hanno moti dominati totalmente da processi di turbolenza e non influenzati dalla rotazione terrestre. La dinamica oceanica verticale è estremamente differente rispetto a quella orizzontale, perché l'estensione verticale media (4 km) è molto minore rispetto alle scale orizzontali dei bacini. Si osserva, in generale, una stratificazione in temperatura e densità che differenzia le masse d'acqua in base alla profondità a cui esse si trovano. Il primo strato è detto *mixed layer* (ML), di profondità variabile tra 10 e 500 metri, ed è caratterizzato da un profilo di temperatura uniforme, risultante dalla combinazione di diversi fattori, tra cui il flusso radiativo netto, l'effetto di rimescolamento dello stress turbolento del vento, la stagione e la latitudine. Al di sotto del ML è presente una regione di transizione, detta termoclino, la quale è caratterizzata da un forte gradiente di temperatura. Anche lo spessore di questa regione è variabile in funzione di latitudine, stagionalità e morfologia del bacino. Infine, lo strato al di sotto di 1000 m, detto oceano profondo, presenta un profilo costante di temperatura, la cui media è di circa 4°C [1].

In questo elaborato si studiano, in particolare, le strutture di circolazione alla meso e sub-mesoscala nella zona dello Stretto della Florida, importante punto di congiunzione tra il Golfo del Messico e l'Oceano Atlantico. Questa zona di mare è attraversata dalla corrente della Florida, la quale è

alimentata principalmente dalla corrente Loop, che proviene dall'ingresso del Canale dello Yucatan più a sud, ed esce dallo stretto curvando verso nord, costeggiando la Florida. La presenza di meandri e curvature nella corrente principale, accoppiata a effetti topografici, genera delle instabilità non lineari e vortici di sub-mesoscala nelle sue vicinanze [2]. Queste due correnti rappresentano la prima parte del sistema della corrente del Golfo e, in particolare, appartengono al ramo ascendente del *North Atlantic Gyre*. Trasportano, dunque, acqua calda proveniente dalle regioni tropicali verso le medie latitudini. La dinamica orizzontale e verticale di questi sistemi può essere simulata con un modello di circolazione globale, aumentando la risoluzione con un *nesting* di una griglia di passo spaziale minore (dominio *child*) su quella originale (dominio *parent*). In tal modo si aumenta la frazione di processi risolvibili esplicitamente, riducendo il contributo delle parametrizzazioni. In questo studio si utilizza il modello *Nucleus for European Modelling of the Ocean* (NEMO) per l'analisi del campo superficiale e di una sezione meridionale di temperatura; della profondità del *mixed layer* e della sua variazione meridionale, per il dominio *child*. Inoltre, si confrontano il campo delle correnti superficiali e della vorticità relativa per il dominio *child* e quello *parent*. Nella sezione 2 si riportano in dettaglio le approssimazioni e le tecniche utilizzate dal modello per simulare la dinamica; nella sezione 3 si descrivono i parametri e le condizioni al contorno utilizzate. Infine i risultati ottenuti si riportano nella sezione 4.

2 Metodologia

Il modello utilizzato per la simulazione è la componente OCE di NEMO, che rappresenta le condizioni fisiche dell'oceano, risolvendo le equazioni di Navier-Stokes con l'approssimazione *Reynolds-Averaged Navier Stokes equations* (RANS), per cui si risolve il flusso medio e le componenti turbolente vengono parametrizzate come funzioni di quest'ultimo. Per la discretizzazione del dominio, NEMO utilizza una griglia

strutturata *staggered* di tipo Arakawa C, in cui le variabili scalari sono definite al centro della cella mentre le componenti della velocità sono definite alle intercelle, sia per la direzione orizzontale sia per quella verticale. Si utilizza la coordinata verticale a geopotenziale costante in partial-step, con una maggiore risoluzione in prossimità della superficie e dei livelli intermedi, dove i processi dinamici sono caratterizzati da scale temporali minori. Inoltre, lo spessore del livello di fondo è variabile ed adattato alla batimetria. L'evoluzione temporale delle variabili e le loro derivate sono rappresentate tramite lo schema numerico Leapfrog con filtro di Asselin, per ridurre il peso delle componenti spurie delle soluzioni numeriche e conservare l'ampiezza delle oscillazioni dei campi. Si tratta di uno schema a basso costo computazionale, esplicito, al secondo ordine, centrato e a tre livelli di tempo. Il primo step numerico viene effettuato con lo schema Eulero Forward. Il modello utilizza due differenti passi temporali per rappresentare tutte le tipologie di onde, conservando la stabilità numerica, tramite la tecnica *time-splitting*: nello specifico, essa definisce un time-step barotropico per la variabilità ad alta frequenza e uno baroclico per la variabilità a bassa frequenza. Poichè NEMO è un modello globale, per aumentarne la risoluzione spaziale si utilizza la tecnica del *downscaling dinamico*: si parte dalla griglia di un modello *parent* a bassa risoluzione e si innesta in esso un modello *child* a risoluzione maggiore, le cui condizioni iniziali e al contorno sono fornite dal modello *parent* [1]. In questo caso di studio si è utilizzato un solo *nesting* di tipo passivo, con scambio di informazioni solo da *parent* verso *child* e non viceversa. La dinamica è stata simulata per un totale di 5 giorni, a partire dal 2 febbraio 2021. Per l'analisi dei risultati si considera solo l'ultimo giorno di simulazione, per permettere all'integrazione di raggiungere condizioni stabili. I campi di temperatura, profondità del ML e velocità orizzontali per il dominio *child* sono forniti dalla simulazione come dati orari e ne sono state fatte delle medie giornaliere. In particolare, i campi di velocità sono ottenuti interpolando i valori al centro della cella, per adattare la griglia del modello *child* a quella del modello *parent*. Infine, la componente verticale della vorticità relativa, $\zeta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, è stata calcolata a partire dai campi di velocità orizzontale, con uno schema alle differenze finite centrato.

3 Implementazione del modello

La simulazione è stata generata utilizzando un dominio *parent* con risoluzione orizzontale $1/12^\circ$, come condizione al contorno su un dominio *child* con risoluzione di $1/36^\circ$, in un'area rettangolare tra Florida e Cuba compresa tra le latitudini 22.5°N e 26°N e le longitudini 83.5°W e 79°W . L'evoluzione del modello è stata effettuata su 5 giorni, dal 2 febbraio 2021 alle 00:00 UTC al 6 febbraio 2021 alle 24:00. Il passo temporale è stato scelto in modo tale che fosse soddisfatto il criterio di stabilità numerica CFL. Come condizione iniziale sono stati utilizzati i dati dall'Operational Mercator Global Ocean $1/12^\circ$ Physics Analysis and Forecast del *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), un modello globale che fornisce medie giornaliere per i campi di temperatura, correnti, salinità, livello del mare, profondità del ML e parametri di ghiaccio marino. In

Tabella 1 sono riportati i parametri associati alle due griglie utilizzate nella simulazione.

Parametri	Valori Parent	Valori Child
Numero di giorni	5	5
$\Delta t_{barocline}$		150 s
$n_\lambda \times n_\phi$	4320×2041	163×118
$\Delta\lambda$ e $\Delta\phi$	0.083°	0.027°
Δx e Δy	9.0 km	3.0 km
Livelli verticali	50	100

Tabella 1: Parametri di input per i domini *parent* e *child*: intervallo temporale della simulazione, timestep, numero di punti, risoluzione spaziale in gradi e chilometri per longitudine e latitudine e livelli verticali.

Le condizioni al fondale sono state ottenute dalla batimetria fornita dal dataset *General Bathymetry Chart of the Oceans* (GEBCO).

In Figura 1 è rappresentata la regione di dominio *child* utilizzata e la batimetria corrispondente. Si osserva un'ampia regione di oceano costiero nella zona nord-ovest del dominio, mentre nei pressi di Cuba, si hanno profondità molto maggiori, fino a 2 km. Inoltre, si evidenzia una seconda regione poco profonda a nord-est della costa di Cuba. La linea rossa individua il transetto meridionale di longitudine 81.5°W che si utilizza per l'analisi riportata in sezione 4.

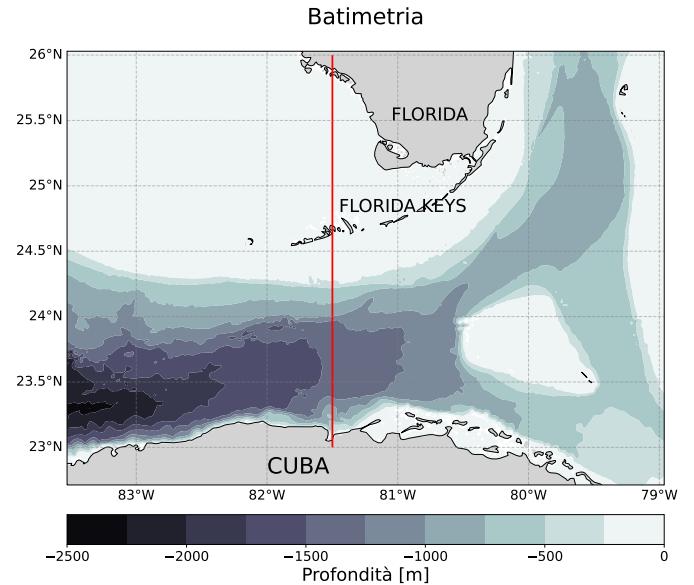


Figura 1: Batimetria del dominio *child*, fornita dal dataset GEBCO. La linea rossa rappresenta la sezione di longitudine 81.5°W utilizzata nelle analisi.

4 Risultati e discussione

In Figura 2 è riportata la media giornaliera del campo di temperatura superficiale per il 6 febbraio 2021, per il dominio *child*. Si nota che è presente un minimo di temperatura

molto esteso nella regione a ovest della penisola della Florida, di circa 18°C . Al contrario, lungo la costa di Cuba, si osserva una regione caratterizzata da più alte temperature, che raggiungono i 26°C . Tale regione si estende verso est, con una forma allungata. Infine, lungo la direzione meridionale tra 23.5°N e 24°N , intorno alla longitudine 81.5°W , si osserva un gradiente di temperatura molto marcato.

Temperatura superficiale (child)

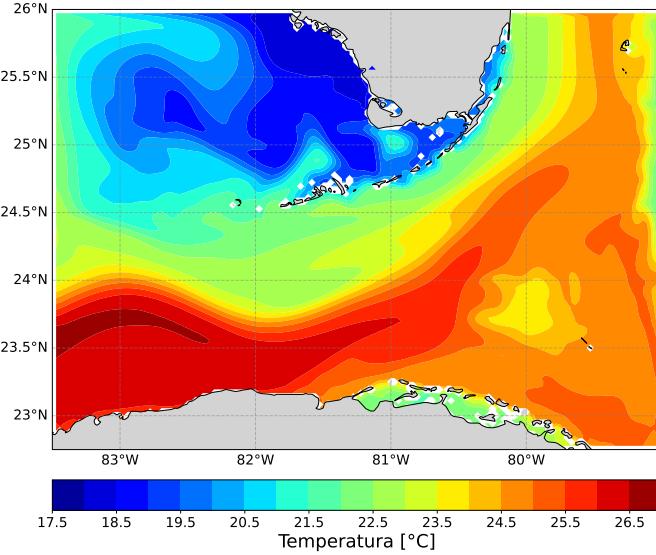


Figura 2: Campo di temperatura superficiale dell'oceano; media giornaliera per il 06/02/2021, dominio *child*.

Le caratteristiche del campo di temperatura che si sono appena evidenziate sono dovute in parte alla morfologia della regione: in particolare, la presenza delle isole Florida Keys separa la dinamica della parte interna da quella esterna al golfo, differenziando le due masse d'acqua. La regione di maggiore temperatura è associata al trasporto di acqua calda da parte della corrente della Florida, proveniente dai tropici. In aggiunta, il profilo verticale di temperatura può essere studiato analizzando una sezione meridionale a 81.5°W , riportata in Figura 3. Si distinguono una regione di oceano aperto e una di oceano costiero, rispettivamente tra Cuba e le isole Florida Keys e tra le isole e la Florida, in accordo con la batimetria in Figura 1. La regione di oceano aperto presenta un'intensa stratificazione verticale: le temperature maggiori sono concentrate nei primi 200 m e, scendendo in profondità, diminuiscono sia la temperatura, che raggiungere circa 3°C , sia il suo gradiente. La regione costiera, invece, presenta una temperatura più uniforme lungo la verticale, a causa della profondità limitata che impedisce la formazione della stratificazione. Il profilo uniforme presente nei primi metri dell'oceano è dovuto al mescolamento, causato dalla combinazione di forzanti termiche e meccaniche, e identifica il ML, la cui profondità varia localmente, come riportato in Figura 4. I valori minimi di profondità sono di circa 20 m e sono osservati al centro del golfo del Messico e intorno al punto di coordinate 24°N e 80°W , in corrispondenza delle regioni meno profonde. D'altra parte, i valori massimi raggiungono i 100 m e sono molto localizzati in prossimità delle coste o delle piattaforme sottomarine. Nello stretto si osservano valori intermedi e con una distribuzione spaziale

non omogenea.

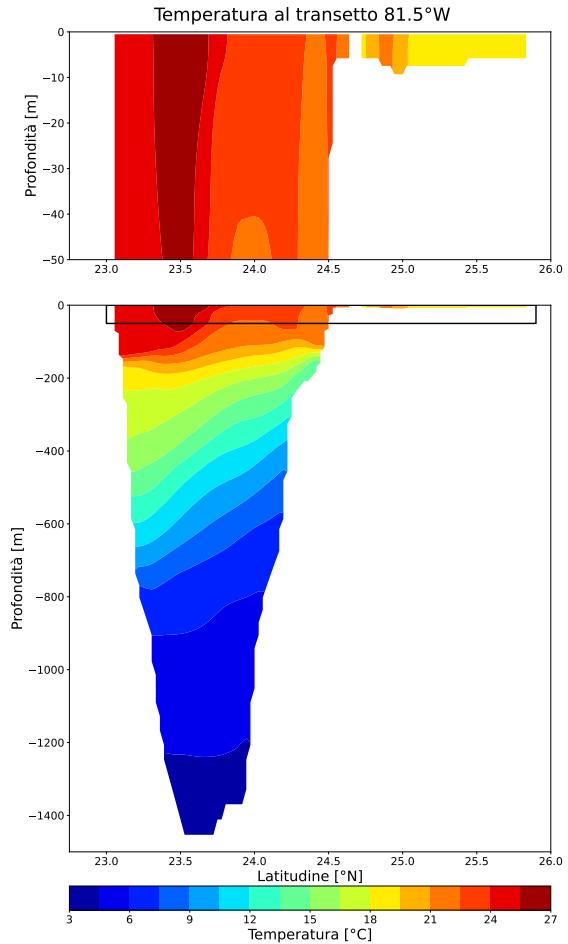


Figura 3: Sezione meridionale di temperatura alla longitudine 81.5°W ; media giornaliera per il 6/02/2021, dominio *child*. Il rettangolo nero in figura evidenzia la regione da 0 a 50 m di profondità, riportata nel pannello superiore.

Profondità del Mixed Layer (child)

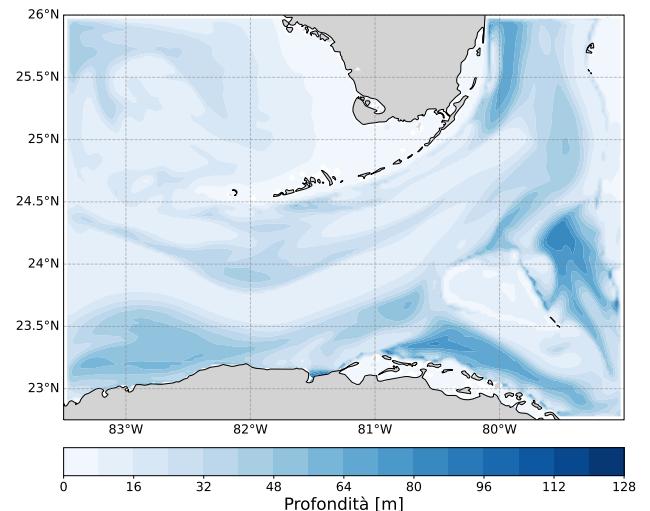


Figura 4: Campo di profondità del mixed layer; media giornaliera per il 6/02/2021, dominio *child*.

Inoltre, confrontando qualitativamente la distribuzione del ML con il campo di temperatura superficiale in Figura 2, si nota che non vi è una correlazione netta tra profondità locale e temperatura. Ciò è legato al fatto che i meccanismi che contribuiscono alla formazione del ML sono molteplici e dipendono anche dalle interazioni con atmosfera e attriti sul fondale: turbolenza generata dallo stress del vento alla superficie, eventuali gradienti di profondità, propagazione di onde di gravità interne ed esterne, flussi di calore e massa, forzanti mareali.

La sezione meridionale di temperatura e profondità del ML è riportata in Figura 5. Il profilo non è uniforme e ha una profondità media compresa tra i 20 e 40 m. Si osserva che nella regione di mare aperto sono presenti due massimi locali vicino alle coste (latitudini 23°N e 24.5°N) e nel punto in cui è localizzato il massimo di temperatura (latitudine 23.5°N).

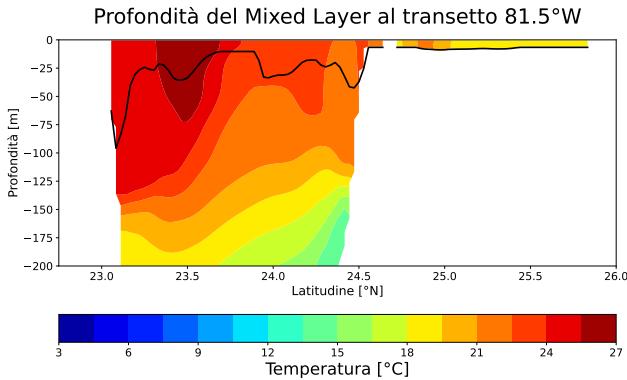


Figura 5: Sezione meridionale di profondità del *mixed layer* alla longitudine 81.5°W ; media giornaliera per il 6/02/2021, dominio *child*.

Si suppone che questi approfondimenti locali siano associati all'aumento dei processi turbolenti dovuti alla combinazione di alte temperature, passaggio della corrente e instabilità topografiche, associate a variazioni rapide della profondità del fondale. In aggiunta, si osserva che nel dominio costiero il ML coincide con la batimetria, poiché la bassa profondità impedisce la formazione di stratificazione, come già osservato per il campo di temperatura. Si suppone che la mancanza di dettaglio in questa regione sia dovuta alla risoluzione non sufficientemente alta lungo la direzione verticale. In conclusione, i valori di profondità di ML previsti sono coerenti con quanto riportato in letteratura per la stagione invernale e sono massimi annuali [3]. In Figura 6 sono rappresentate direzione e intensità del campo di velocità orizzontale per entrambi i domini. Si notano due regimi di moto disaccoppiati: uno interno al Golfo del Messico e uno esterno. La direzione delle correnti varia significativamente nel passaggio attraverso lo stretto. All'interno dello stretto, la direzione è prevalentemente zonale e verso est; in questo punto la corrente Loop e la corrente della Florida si congiungono. All'uscita verso l'Oceano Atlantico, la corrente della Florida curva bruscamente verso nord, seguendo la direzione del North Atlantic Gyre, quindi coerente con il verso della rotazione terrestre. L'intensità è intorno a 1.2 m/s. D'altra parte, nella regione nord-ovest del dominio si formano delle strutture di scala più piccola di tipo *eddy*, la cui direzione

di rotazione è indipendente dal verso della rotazione terrestre. Esse sono generate da instabilità non-lineari, dovute alla presenza delle isole Florida Keys.

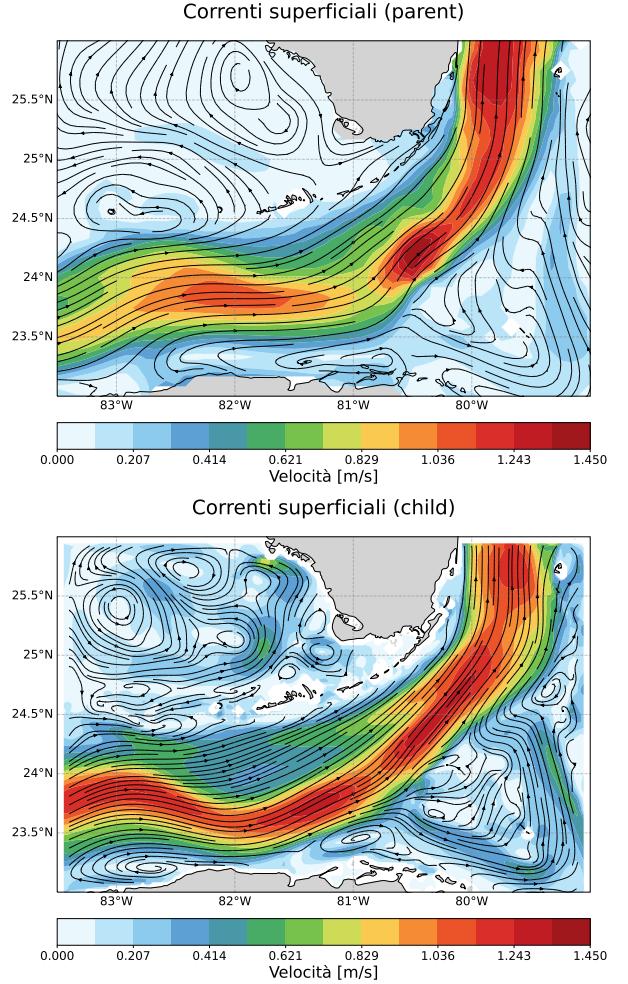
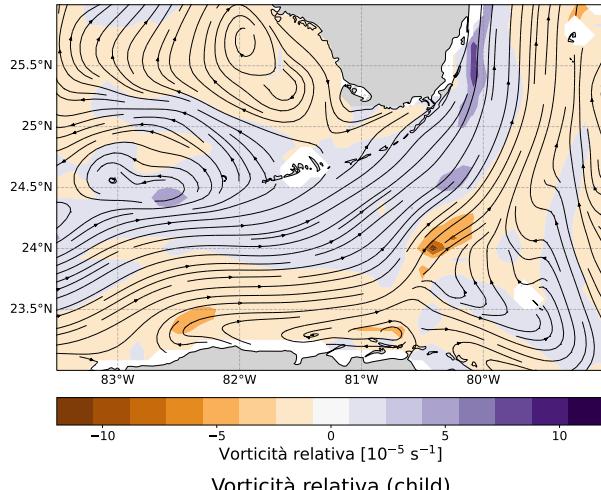


Figura 6: Direzione (streamlines) e intensità (colormap) del campo di velocità orizzontale; media giornaliera per il 6/02/2021, per i domini *parent* e *child*.

Si osserva che il dominio *child* rappresenta in modo più dettagliato la struttura dinamica di questi moti, che sono solo accennati nel dominio *parent*. Lo stesso si verifica a sud-est della corrente, attorno alla piattaforma osservata a 80°W di longitudine. La forma e l'intensità della corrente principale sono comunque ben riprodotte anche dal modello *parent*, essendo un moto alla mesoscala. Invece, le strutture di tipo *eddy* sono moti di sub-mesoscala, che il modello *parent* non è in grado di risolvere accuratamente. L'analisi della struttura delle correnti si completa studiando i campi della componente verticale della vorticità relativa, riportati in Figura 7. Si osserva che, in entrambi i domini, sono presenti una regione di vorticità negativa accanto a una positiva nell'area attraversata dalla corrente, il cui segno è coerente con la curvatura della morfologia della regione. Nelle regioni caratterizzate dalle strutture di moto alla sub-mesoscala, si osserva che i vortici sono ben risolti solo dal modello *child*, mentre il modello *parent*, nella porzione nord-ovest del dominio, stima solamente una regione con diffusa vorticità negativa e, nella porzione sud-est, con vorticità positiva. Tali

strutture di moto turbolento sono dovute a instabilità create dalla particolare morfologia: presenza di isole piccole e frammentate [4] o variazione significativa di batimetria.

Vorticità relativa (parent)



Vorticità relativa (child)

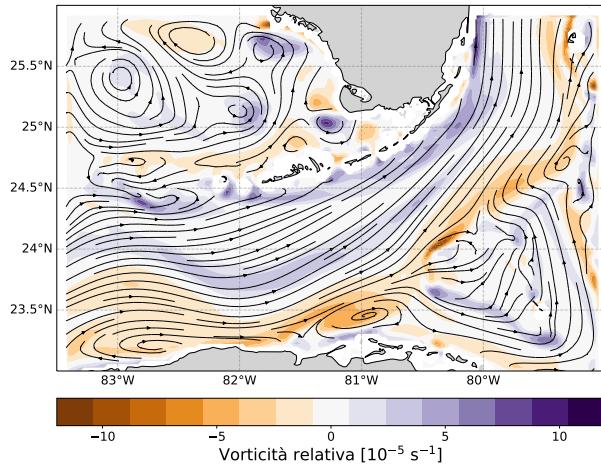


Figura 7: Vorticità relativa (colormap) e direzione delle correnti superficiali (streamlines); media giornaliera per il 6/02/2021, per i domini *parent* e *child*.

Conclusioni

Lo stretto di Florida è una regione importante per la dinamica oceanica, essendo attraversato dalla corrente della Florida, primo tratto del sistema della corrente del Golfo. Una simulazione numerica realizzata con il metodo del *downscaling* dinamico, utilizzando il modello NEMO, permette di studiare non soltanto questa corrente, ma anche le strutture alla sub-mesoscalca presenti nella regione. La dinamica è fortemente influenzata dalla morfologia: la presenza delle isole Florida Keys, da una parte, forza la corrente a cambiare direzione all'uscita dello stretto da est verso nord, dall'altra, separa la regione interna ed esterna al golfo. All'interno di questo, la bassa profondità impedisce la formazione di un profilo stratificato e le temperature sono uniformi e più fredde rispetto al resto della regione. Si generano, inoltre, dei moti di sub-mesoscalca, con vorticità sia positiva sia negativa. All'esterno del golfo, invece, si raggiungono profondità fino a

4 km, permettendo la stratificazione verticale e la formazione del *mixed layer*. In questa regione si osserva il passaggio della corrente, caratterizzata da acqua calda e velocità fino a 1.2 m/s. Si conclude che incrementare la risoluzione del modello porta a un aumento significativo della comprensione dei fenomeni in questa regione, soprattutto all'interno del golfo e in prossimità di coste o piattaforme sottomarine. La struttura della corrente della Florida, invece, è ben riprodotta anche lavorando a risoluzione più bassa.

Riferimenti bibliografici

- [1] Francesco Trotta. Slides del corso Numerical Laboratory for the Ocean and the Atmosphere. https://www.francescotrotta.com/presentations/courses/numerical_laboratory_of_the_atmosphere_and_ocean/numerical_laboratory_of_the_atmosphere_and_ocean.php, dicembre 2022.
- [2] Joanna Gyory et al. The Florida current. <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/caribbean/florida.html>, dicembre 2022.
- [3] Frank E. Muller-Karger, Joseph P. Smith, Sandra Werner, Robert Chen, Mitchell Roffer, Yanyun Liu, Barbara Muhling, David Lindo-Atichati, John Lamkin, Sergio Cerdeira-Estrada, and David B. Enfield. Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 134:54–76, 2015.
- [4] Laurent M. Chérubin, Nicolas Le Paih, and Xavier Carton. Submesoscale instability in the Straits of Florida. *Journal of Physical Oceanography*, 51(8):2599 – 2615, 2021.