

Diario degli Esperimenti TIDES

Filippo Di Ludovico

January 8, 2026

Contents

1	Introduzione	2
2	Experiment A: Baseline (Riferimento)	2
2.1	Configurazione	2
2.2	Risultati	2
2.2.1	1. Evoluzione Spaziale	3
2.2.2	2. Analisi della Varianza (Punto Anfidromico)	3
2.2.3	3. Diagramma di Hovmöller	4
3	Experiment B: Amplitude Sensitivity (Linearity Check)	5
3.1	Configurazione	5
3.2	Analisi dei Risultati	5
3.2.1	1. Verifica della Linearità	5
3.3	Conclusioni	6
4	Experiment C: Bathymetry Sensitivity (Pendenza Adriatica)	7
4.1	Configurazione	7
4.2	Analisi dei Risultati	7
4.2.1	1. Effetto Shoaling (Amplificazione)	7
4.2.2	2. Diagramma di Hovmöller e Velocità Teorica	8
4.2.3	3. Evoluzione Spaziale (Confronto A vs C)	9
5	Experiment D: Resolution Sensitivity	11
5.1	Configurazione	11
5.2	Analisi dei Risultati	11
5.2.1	1. Confronto Serie Temporali	11
5.2.2	2. Diagramma di Hovmöller	11
6	Esperimento E: Validazione Fisica ($f = 0$)	13
6.1	Obiettivo	13
6.2	Risultati	13

1 Introduzione

Questo documento raccoglie i risultati delle prove di sensibilità effettuate sul modello NEMO per il caso TIDES (propagazione Onda di Kelvin in Adriatico idealizzato). L'obiettivo è analizzare la risposta del modello variando parametri come l'ampiezza della perturbazione iniziale.

2 Experiment A: Baseline (Riferimento)

Obiettivo: Stabilire una simulazione stabile.

2.1 Configurazione

- **Dominio:** Bacino idealizzato rettangolare per approssimare l'Adriatico.
 - Estensione: Lon [17.75°E, 19.64°E], Lat [40°N, 49°N].
 - Dimensioni Griglia: 22×102 punti (x, y) .
 - Batimetria: Piatta costante $H = 100$ m.
 - Risoluzione Orizzontale: $\Delta x = 10$ km (`nn_GYRE = 1`).
 - Risoluzione Verticale: 31 livelli.
- **Perturbazione Iniziale:**
 - Tipo: Anomalia Gaussiana di SSH.
 - Ampiezza: $A_0 = 0.1$ m.
 - Posizione: Centrata a 19.0°E, 40.5°N (Angolo Sud-Est, analogo al Canale d'Otranto).
 - Dimensione: Raggio $\sigma = 20$ km.
- **Setup Numerico:**
 - Timestep: $\Delta t = 60$ s.
 - Durata: 24 ore.

2.2 Risultati

Simulazione stabile con timestep 60s.

2.2.1 1. Evoluzione Spaziale

La propagazione dell'onda di Kelvin è mostrata in Figura 1. L'onda viaggia in senso antiorario lungo i bordi del bacino.

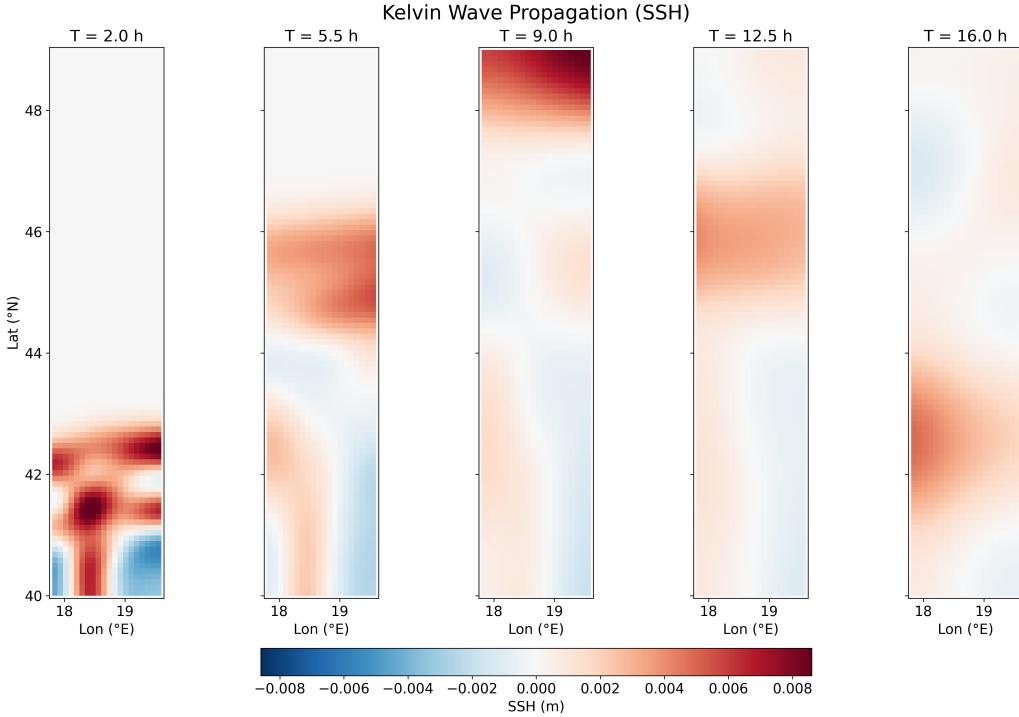


Figure 1: Snapshots SSH per Experiment A (Baseline).

2.2.2 2. Analisi della Varianza (Punto Anfidromico)

La mappa della varianza (Figura 2) mostra dove l'oscillazione è massima (antinodi, agli angoli e ai bordi) e dove è minima (al centro). La regione centrale indica il potenziale punto anfidromico.

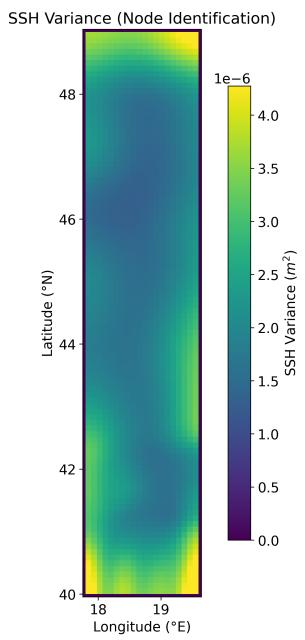


Figure 2: Mappa della Varianza SSH (Exp A). Il blu scuro al centro indica il nodo dell'onda stazionaria.

2.2.3 3. Diagramma di Hovmöller

Il percorso di estrazione per il diagramma di Hovmöller scorre lungo la costa orientale, come mostrato in Figura 3 (sinistra). Il diagramma lungo la costa Est (Figura 3, destra) mostra una propagazione lineare senza distorsioni.

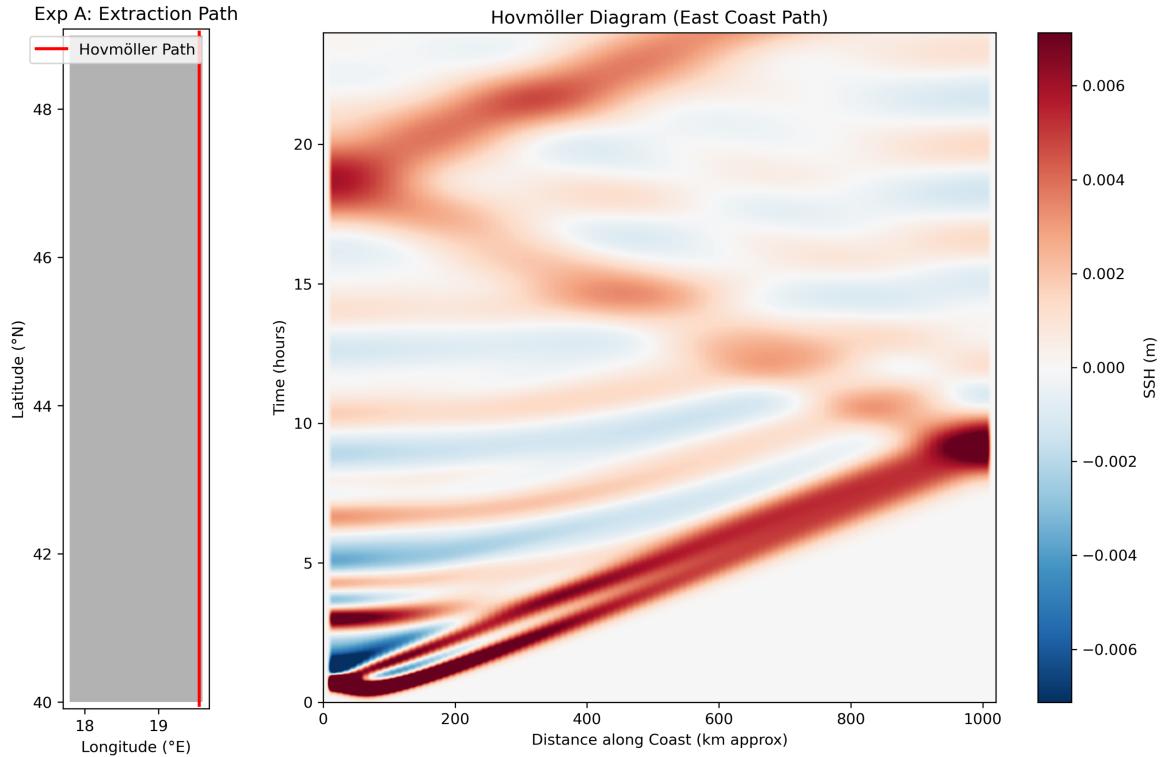


Figure 3: Sinistra: Percorso di estrazione (linea rossa) per il diagramma di Hovmöller. Destra: Diagramma di Hovmöller.

3 Experiment B: Amplitude Sensitivity (Linearity Check)

Obiettivo: Verificare la linearità della risposta del modello (SSH Input vs Output) e la dipendenza della velocità di fase dall'ampiezza.

3.1 Configurazione

Sono state eseguite tre run con perturbazione Gaussiana ($R = 20$ km) centrata a 19.0°E , 40.5°N :

- **AMP0.1:** $A_0 = 0.1$ m
- **AMP0.5:** $A_0 = 0.5$ m
- **AMP1.0:** $A_0 = 1.0$ m

3.2 Analisi dei Risultati

3.2.1 1. Verifica della Linearità

La Figura 4 mostra il confronto delle serie temporali di SSH registrate all'Estremità Nord del bacino, normalizzate per l'ampiezza iniziale A_0 . Si osserva che le curve normalizzate sono perfettamente sovrapposte. Questo indica che il modello risponde in modo lineare:

$$\frac{\text{SSH}(t)}{A_0} \approx \text{costante}$$

Non si osservano sfasamenti temporali, la velocità di fase $c = \sqrt{gh}$ non è influenzata dall'ampiezza in questo regime di profondità (100m).

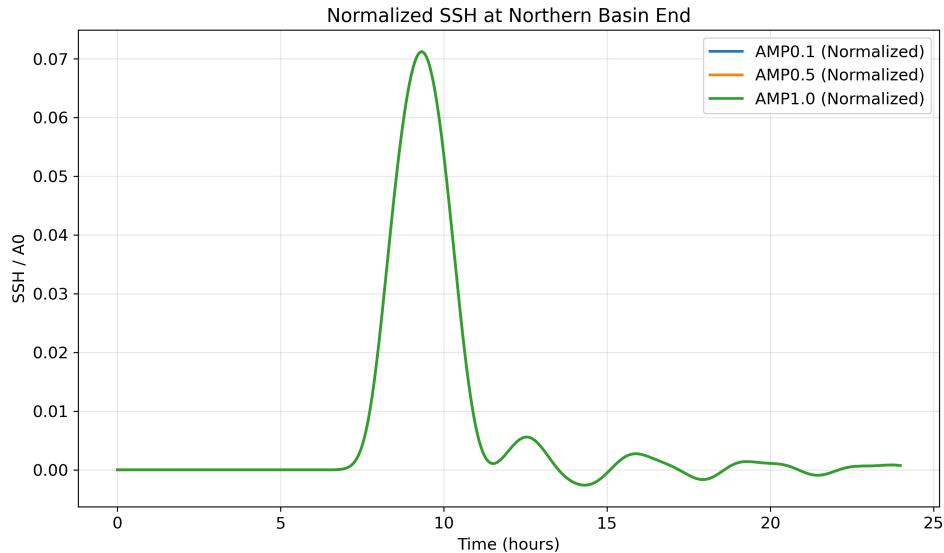


Figure 4: Confronto delle serie temporali normalizzate all'Estremità Nord.

Per quantificare eventuali effetti non lineari e identificare il punto anfidromico, mostriamo le analisi spaziali in Figura 7.

La mappa di non-linearità (sinistra) mostra la varianza della differenza tra i campi normalizzati:

$$\text{Var} \left(\frac{\text{SSH}_{1.0}}{1.0} - \frac{\text{SSH}_{0.1}}{0.1} \right)$$

In un regime perfettamente lineare, questa differenza sarebbe zero ovunque. I valori osservati sono estremamente bassi (ordine 10^{-7} m^2), confermando che per ampiezze fino a 1m la dinamica è dominata dalla fisica lineare. Eventuali residui sono localizzati vicino alle coste.

La mappa a destra (Figura 6) mostra la varianza totale della SSH nel tempo.

- **Significato Fisico:** La varianza è una misura dell'energia dell'onda in quel punto ($\text{Var} \propto \langle \eta^2 \rangle$). Le zone rosse (alta varianza) corrispondono agli antinodi, dove l'oscillazione verticale è massima (lungo le coste).
- **Punto Anfidromico:** La zona blu scuro al centro rappresenta un minimo globale di varianza (quasi zero). Questo è il *Punto Anfidromico*, un nodo immobile attorno al quale l'onda di marea/Kelvin ruota. In questo punto, l'elevazione della superficie rimane costante mentre l'onda gli gira attorno.

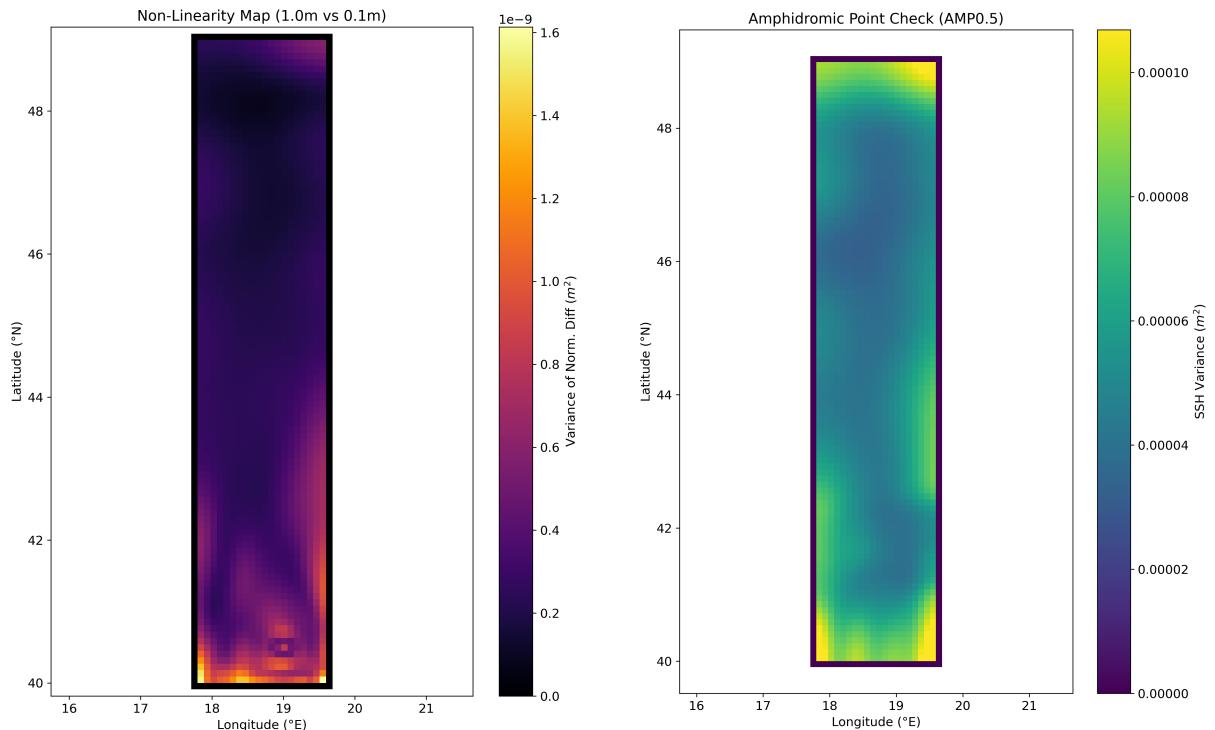


Figure 5: Mappa Non-linearietà (Residui)

Figure 6: Punto Anfidromico (Varianza SSH)

Figure 7: Analisi Spaziale Exp B.

3.3 Conclusioni

Il sistema si comporta in modo **lineare** per perturbazioni fino a 1.0 m su fondale di 100 m. La velocità di propagazione è costante e indipendente dall'ampiezza in questo range.

4 Experiment C: Bathymetry Sensitivity (Pendenza Adriatica)

Obiettivo: Analizzare la propagazione dell'onda di Kelvin su un fondale inclinato, simile a quello reale dell'Adriatico (da 1000m a Sud a 30m a Nord).

4.1 Configurazione

- **Batimetria:** Pendenza lineare $H(y)$ lungo l'asse Nord-Sud.

$$H(y) = 1000 \text{m (Sud)} \rightarrow 100 \text{m (Nord)}$$

Nota: La profondità minima è stata portata a 100m (inizialmente 30m) per evitare problemi di risoluzione verticale. Con 31 livelli ($jpk = 31$), ogni livello è alto circa 33m; una profondità di 30m avrebbe comportato un singolo livello, causando problemi.

La visualizzazione del dominio è in Figura 8.

- **Perturbazione:** $A_0 = 0.1$ m (Regime Lineare) centrata a Sud-Est.
- **Parametri Numerici:** A causa della maggiore profondità ($H = 1000\text{m} \Rightarrow c \approx 100 \text{ m/s}$), il timestep è stato ridotto a $\Delta t = 20$ s (invece di 60 s) per soddisfare la condizione CFL. Durata totale mantenuta a 24h ($N_{steps} = 4320$).

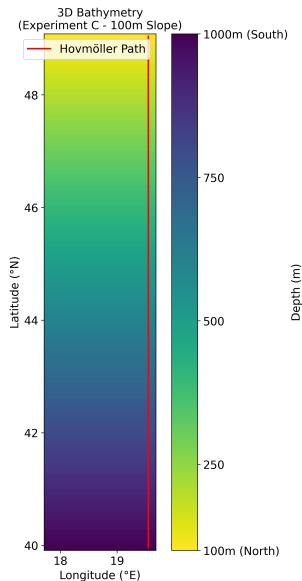


Figure 8: Batimetria Esperimento C: Pendenza lineare lungo Y.

4.2 Analisi dei Risultati

4.2.1 1. Effetto Shoaling (Amplificazione)

La teoria prevede che l'ampiezza dell'onda aumenti quando la profondità diminuisce. Per un canale a larghezza costante, la Legge di Green stabilisce che:

$$A \propto H^{-1/4}$$

Confrontando la serie temporale dell'SSH all'Estremità Nord tra l'esperimento C (30m) e la Baseline (100m) in Figura 9, osserviamo chiaramente:

1. Amplificazione (Attesa vs Osservata): Teoricamente (Legge di Green $A \propto H^{-1/4}$), l'onda dovrebbe amplificarsi di un fattore $\approx (1000/100)^{0.25} \approx 1.77$. Tuttavia, osserviamo un'ampiezza minore rispetto alla Baseline. Le cause probabili sono:

- **Dispersione Numerica:** L'onda viaggia molto velocemente ($c \approx 100$ m/s) su una griglia spaziale invariata (10 km). Questo riduce l'accuratezza nel preservare il picco.
- **Dinamica a Grande Scala:** A 1000m di profondità, il Raggio di Rossby ($R \approx 1000$ km) è molto maggiore della larghezza del bacino. L'onda non è più una Kelvin wave confinata, ma uno "sloshing" che coinvolge tutto il bacino, disperdendo energia su un fronte più ampio rispetto al caso a 100m.

2. Velocità di Fase (Corretta): L'onda arriva al Nord dopo circa 4 ore, contro le 9 ore del caso a 100m. Questo è fisicamente corretto e coerente con la maggiore velocità media in acqua profonda.

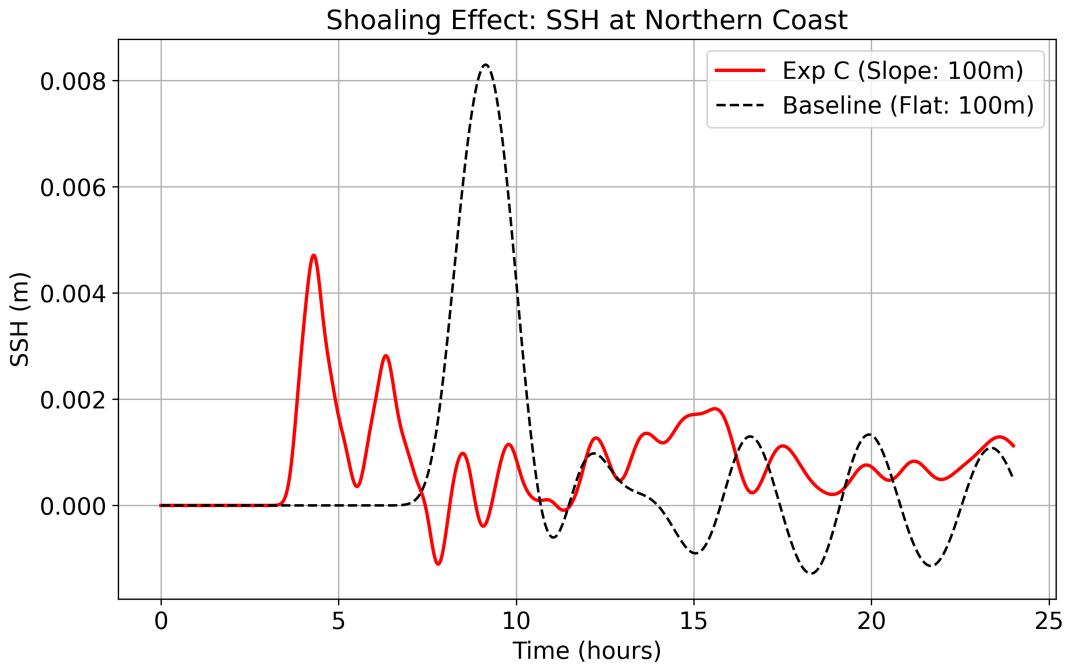


Figure 9: Confronto SSH a Nord: Exp C (Rosso, batimetria lineare) vs Baseline (Nero, batimetria piatta). Evidente lo shoaling e lo sfasamento.

4.2.2 2. Diagramma di Hovmöller e Velocità Teorica

Nel diagramma spazio-tempo (Figura 10) viene sovrapposta la curva teorica del tempo di arrivo $t(y)$, calcolata integrando la velocità di fase locale (dipendente dalla profondità $H(y)$):

$$t(y) = \int_0^y \frac{dy'}{\sqrt{gH(y')}}$$

La pendenza della traccia numerica segue la curva teorica (linea tratteggiata), confermando che l'onda viaggia alla velocità corretta data dalla batimetria. La leggera curvatura indica la decelerazione progressiva mentre l'onda risale verso acque meno profonde.

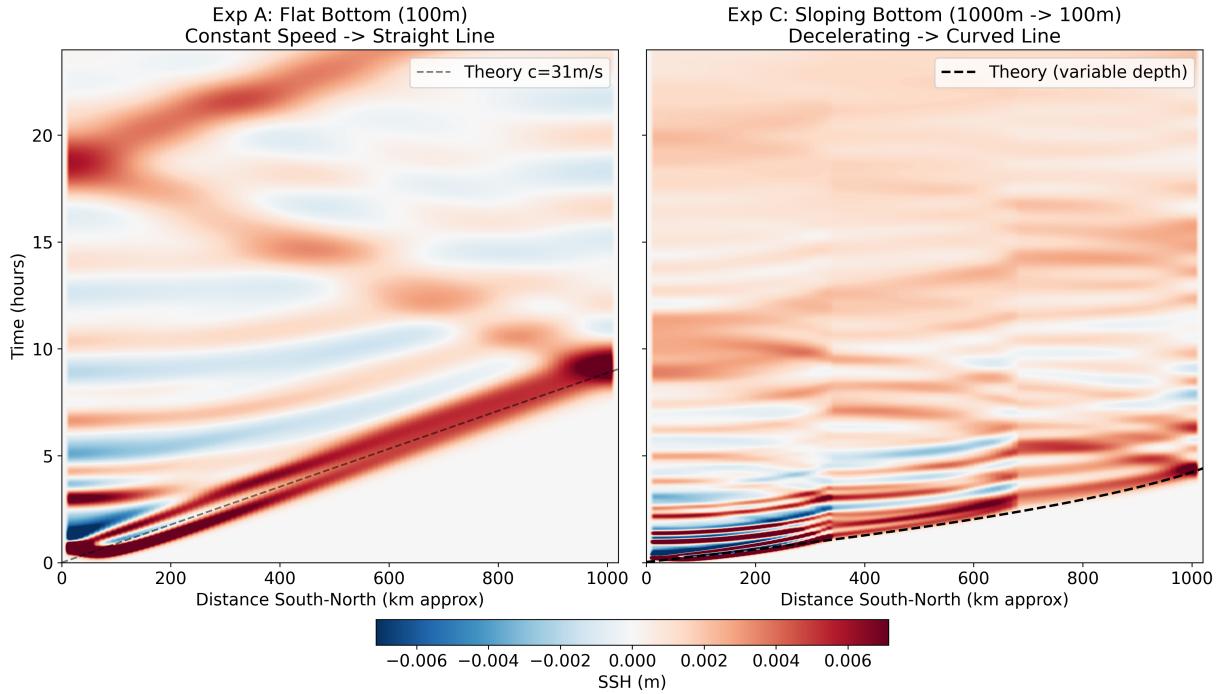


Figure 10: Confronto Diagrammi di Hovmöller. A sinistra: Exp A (velocità costante). A destra: Exp C con curva teorica sovrapposta (linea tratteggiata).

4.2.3 3. Evoluzione Spaziale (Confronto A vs C)

Gli snapshots in Figura 11 (Exp C), confrontati con quelli della Baseline (Exp A), evidenziano differenze dinamiche fondamentali:

- **Velocità:** In Exp C l'onda viaggia molto più velocemente. A $T = 5.5\text{h}$ il fronte ha già percorso gran parte del bacino, mentre in Exp A è ancora nella prima metà.
- **Confinamento Costiero:** In Exp A (100m) l'onda è ben confinata alla costa (Raggio di Rossby $R \approx 300\text{ km}$). In Exp C, nelle zone profonde (1000m), R aumenta drasticamente ($R \approx 1000\text{ km}$), superando la larghezza del bacino. Di conseguenza, l'onda perde il carattere di Kelvin "intrappolata" e assume un comportamento più dispersivo o di oscillazione dell'intero bacino ("sloshing").

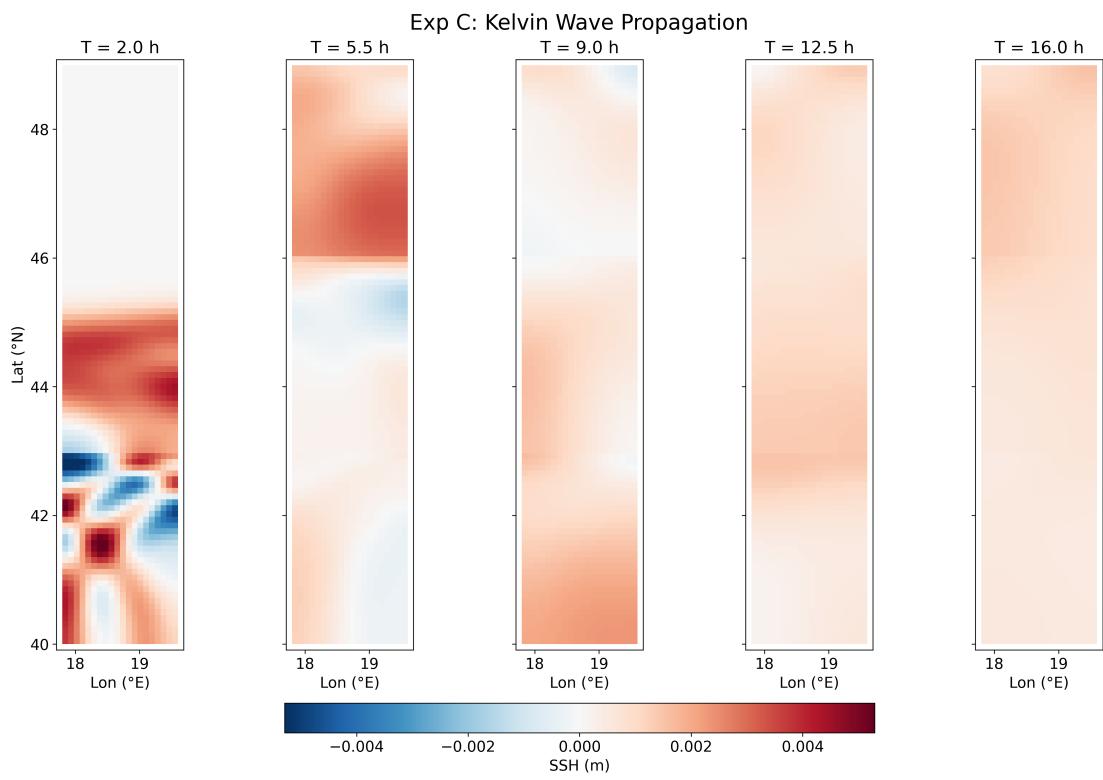


Figure 11: Snapshots Esperimento C.

5 Experiment D: Resolution Sensitivity

Obiettivo: Verificare l'impatto della risoluzione spaziale sulla dissipazione numerica. Aumentando la risoluzione, mi aspetto che l'onda mantenga meglio la sua forma e ampiezza nel tempo, riducendo la diffusività numerica.

5.1 Configurazione

- **Risoluzione:** GYRE = 2 ($\Delta x \approx 5$ km). Risoluzione raddoppiata rispetto alla Baseline (10 km).
- **Timestep:** $\Delta t = 20$ s (ridotto per CFL).
- **Batimetria:** Piatta 100m (come Exp A).

5.2 Analisi dei Risultati

5.2.1 1. Confronto Serie Temporali

La Figura 12 mostra il confronto diretto dell'SSH all'Estremità Nord tra Exp A (10km) e Exp D (5km).

- L'ampiezza del picco è leggermente diversa, indicando che la risoluzione influenza la conservazione dell'energia.
- La fase è coerente, confermando che la velocità fisica dell'onda è ben risolta in entrambi i casi.

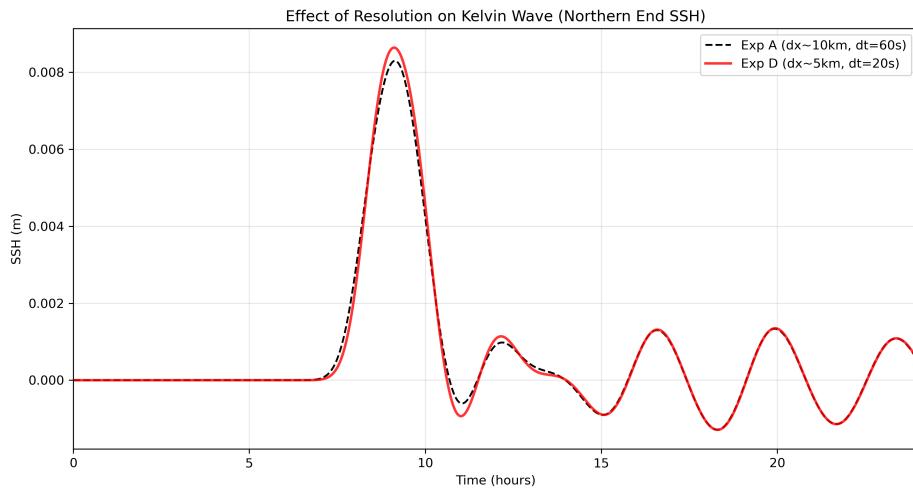


Figure 12: Confronto SSH all'Estremità Nord: Baseline (Nero, 10km) vs Alta Risoluzione (Rosso, 5km).

5.2.2 2. Diagramma di Hovmöller

Il diagramma spazio-tempo per il caso ad alta risoluzione (Figura 13) mostra dettagli più fini nella struttura dell'onda.

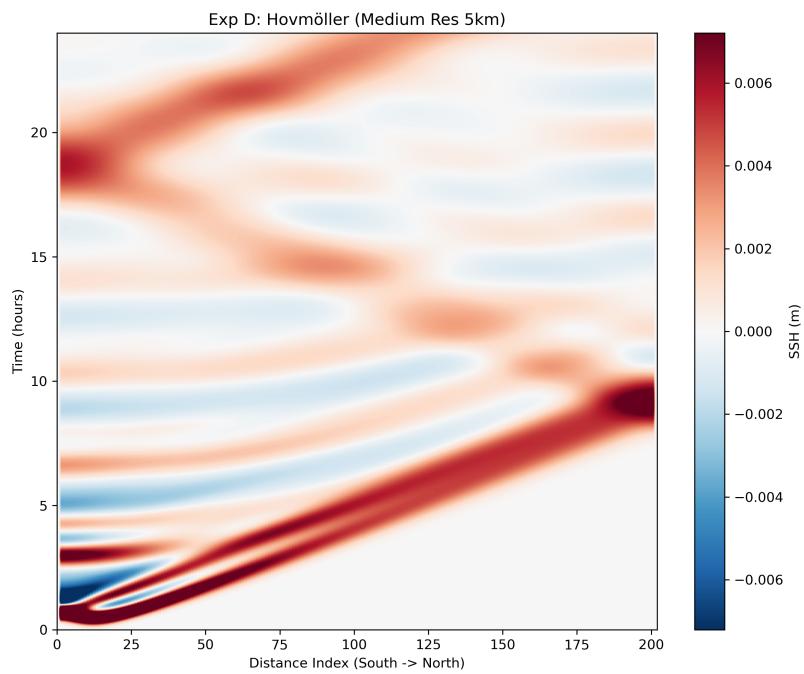


Figure 13: Diagramma di Hovmöller per Exp D (5km).

6 Esperimento E: Validazione Fisica ($f = 0$)

6.1 Obiettivo

Per confermare che l'onda osservata nell'Esperimento A sia effettivamente un'onda di Kelvin costiera, abbiamo rimosso la rotazione terrestre imponendo il parametro di Coriolis $f = 0$ ovunque nel dominio. Senza la forza di Coriolis, il meccanismo di intrappolamento costiero (bilancio geostrofico trasversale) viene meno.

6.2 Risultati

La Figura 14 mostra l'evoluzione dell'SSH. A differenza dell'Exp A, dove l'onda restava incollata alla costa destra, qui osserviamo:

- **Propagazione Radiale:** La perturbazione si espande in tutte le direzioni come un'onda di gravità pura ("Poincaré wave" o "Gravity wave" in acqua bassa).
- **Simmetria:** Non c'è preferenza per il lato destro.
- **Decadimento:** L'energia si disperde nel bacino invece di canalizzarsi lungo la costa.

Questo conferma che il confinamento costiero osservato nella Baseline è dovuto esclusivamente alla rotazione terrestre (Onda di Kelvin).

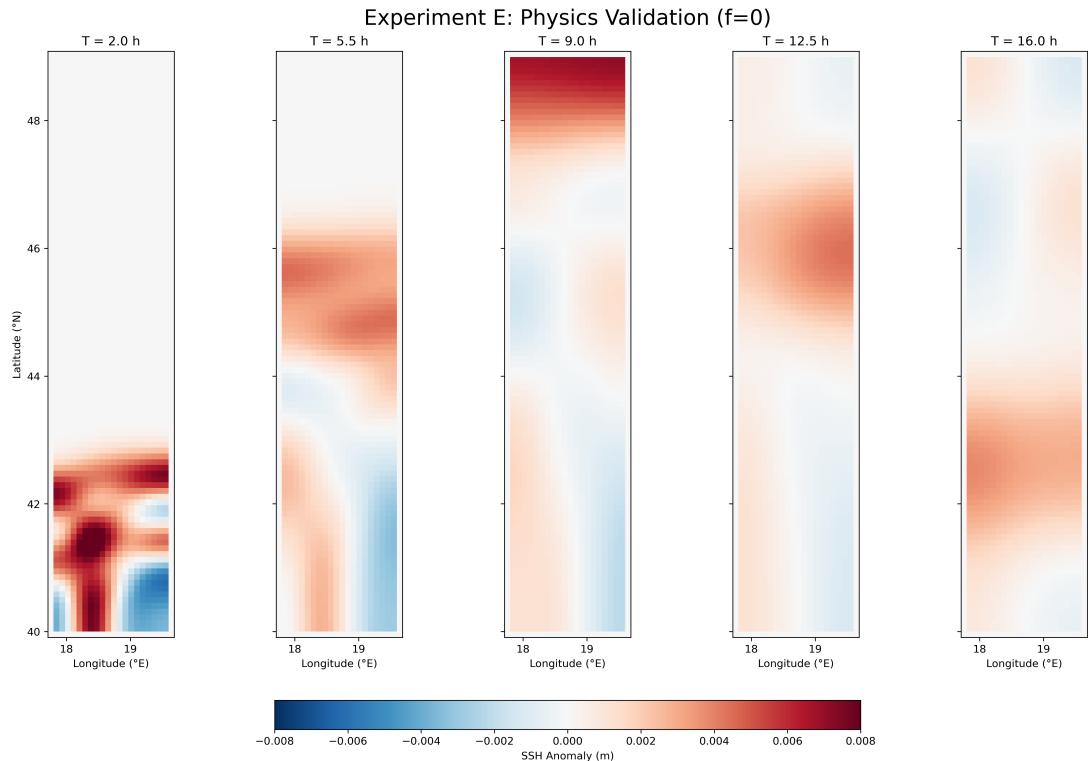


Figure 14: Snapshots Exp E ($f = 0$). L'onda si propaga radialmente e simmetricamente, confermando che il confinamento costiero (Exp A) è dovuto alla rotazione.