

Diario degli Esperimenti TIDES

Filippo Di Ludovico

January 7, 2026

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

- **Configurazione:** $A_0 = 1.0\text{m}$, Batimetria piatta 100m.
- **Estrazione:** Il percorso di estrazione per il diagramma di Hovmöller è mostrato in Figura 1.

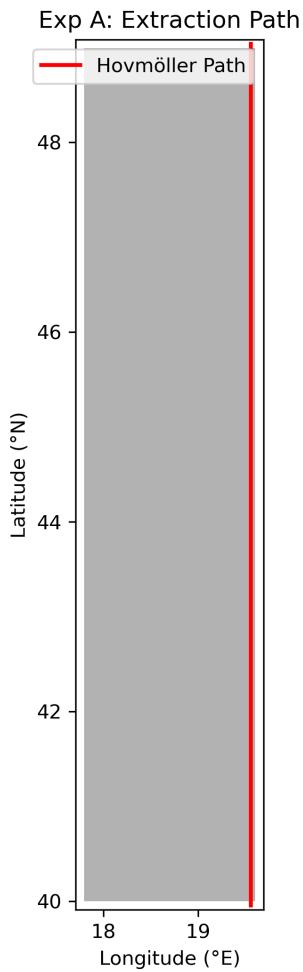


Figure 1: Percorso di estrazione (linea rossa) per il diagramma di Hovmöller (Exp A).

2.2 Risultati

- **Risultato:** Simulazione stabile con timestep 60s.

2.2.1 1. Evoluzione Spaziale

La propagazione dell'onda è mostrata in Figura 2. L'onda viaggia in senso antiorario lungo i bordi del bacino (Kelvin Wave).

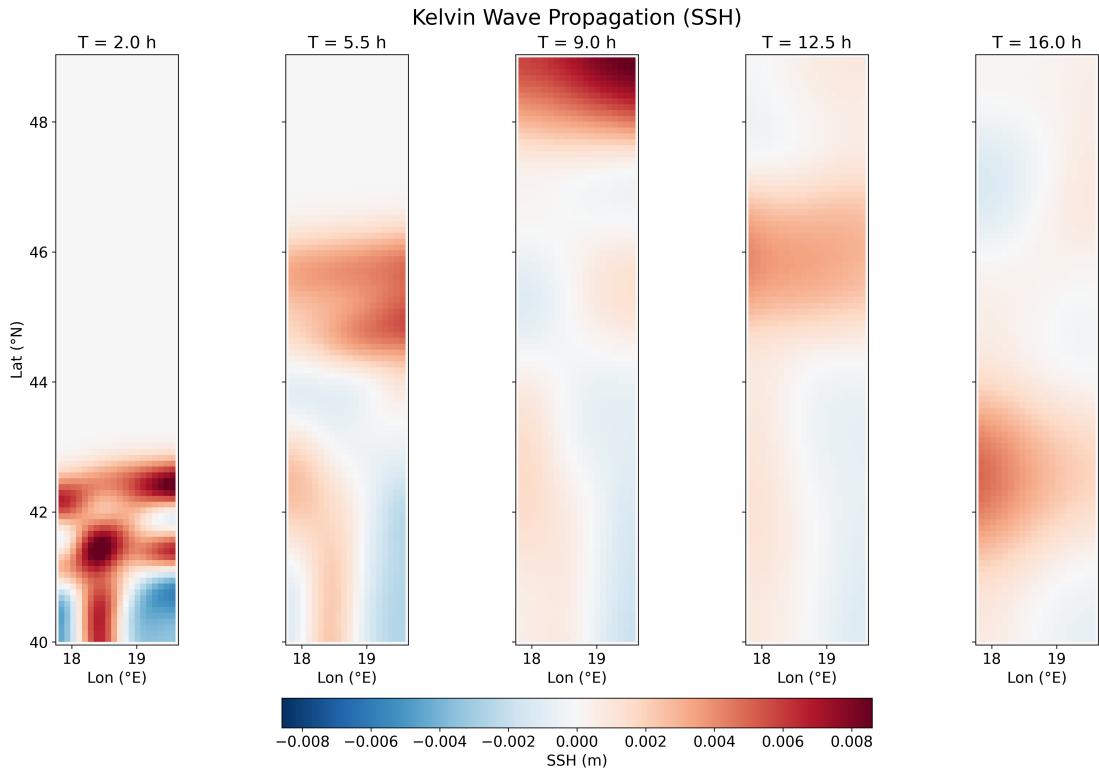


Figure 2: Snapshots SSH per Experiment A (Baseline). Notare il movimento antiorario.

2.2.2 2. Analisi della Varianza (Punto Anfidromico)

La mappa della varianza (Figura 3) mostra dove l'oscillazione è massima (antinodi, ai bordi) e dove è minima. Il minimo centrale indica il potenziale punto anfidromico.

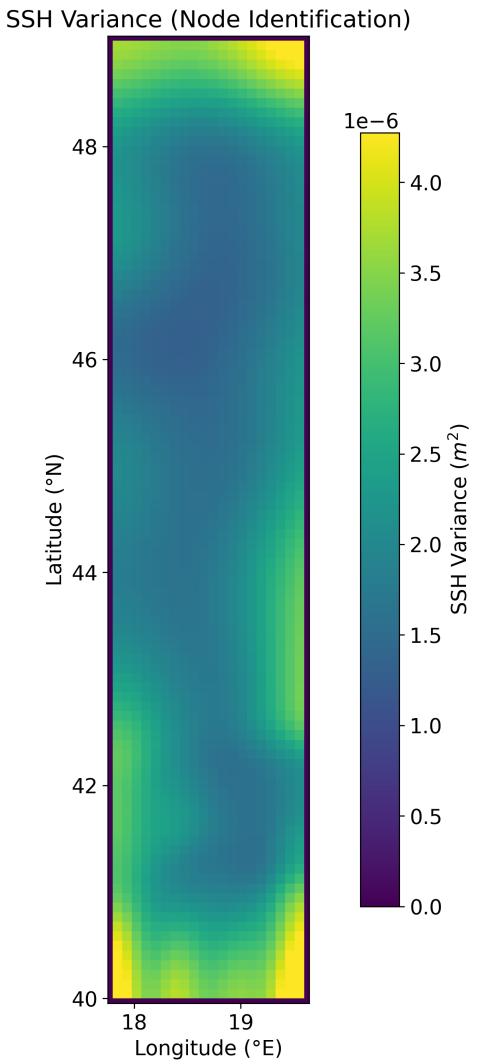


Figure 3: Mappa della Varianza SSH (Exp A). Il blu scuro al centro indica il nodo dell'onda stazionario.

2.2.3 3. Diagramma di Hovmöller

Il diagramma lungo la costa Est (Figura 4) mostra una propagazione lineare senza distorsioni.

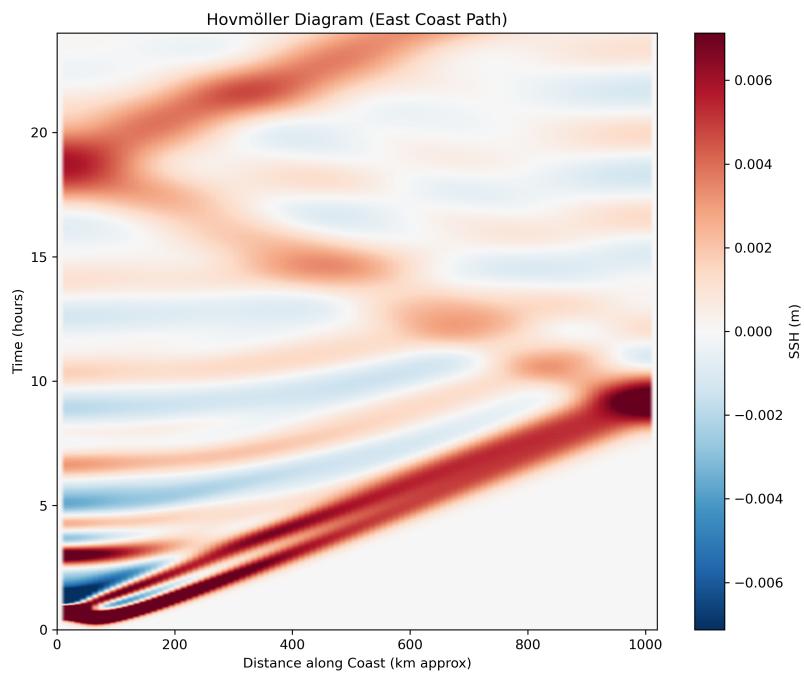


Figure 4: Diagramma di Hovmöller (Exp A).

3 Experiment B: Amplitude Sensitivity (Linearity Check)

Obiettivo: Verificare la linearità della risposta del modello (SSH Output vs Input) 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 (Regime Lineare)
- **AMP0.5:** $A_0 = 0.5$ m
- **AMP1.0:** $A_0 = 1.0$ m (Regime Alta Ampiezza)

3.2 Analisi dei Risultati

3.2.1 1. Verifica della Linearità

Abbiamo confrontato le serie temporali dell'SSH registrate all'Estremità Nord del bacino (proxi per Venezia), normalizzate per l'ampiezza iniziale A_0 . Come mostrato in Figura 5, 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 significativi, suggerendo che la velocità di fase $c = \sqrt{gh}$ non è influenzata dall'ampiezza in questo regime di profondità (100m).

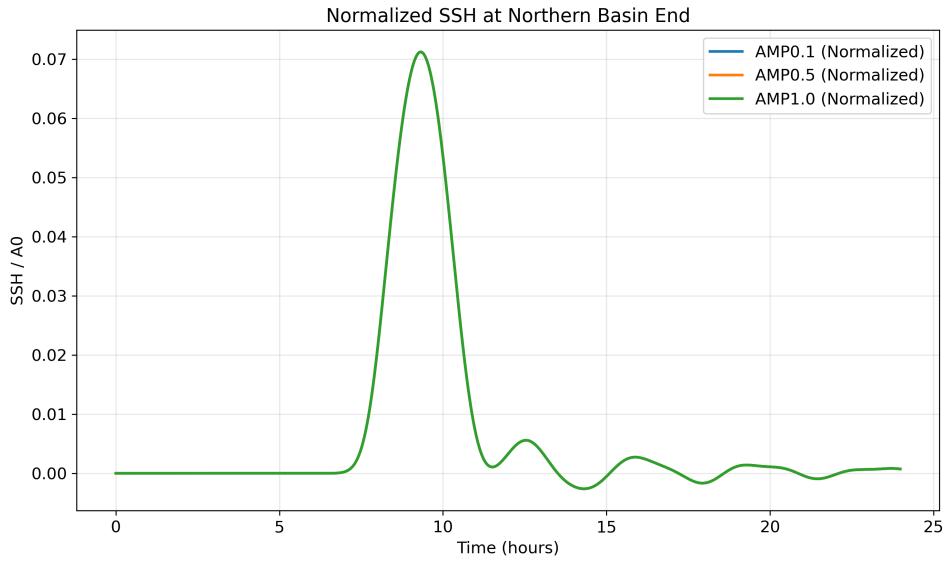


Figure 5: Confronto delle serie temporali normalizzate all'Estremità Nord. La sovrapposizione indica una risposta lineare.

Per quantificare eventuali effetti non lineari, abbiamo calcolato la mappa della varianza della differenza tra i run normalizzati (Figura 6). I valori sono trascurabili, confermando la linearità.

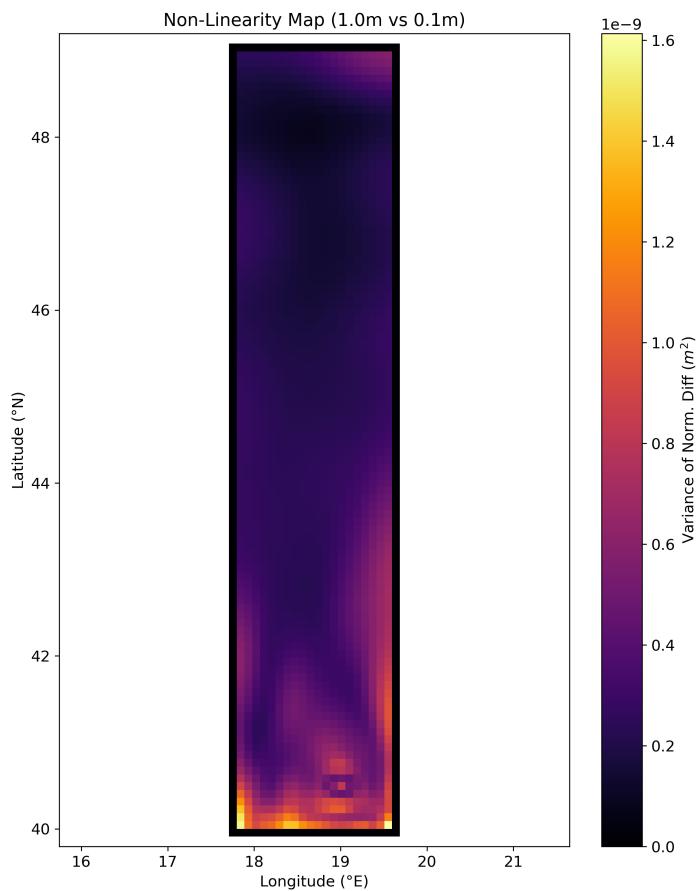


Figure 6: Mappa della non-linearità (Differenza tra run normalizzati).

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 attivo ("step" ripido), causando riflessioni spurie e perdita di energia.

La visualizzazione 3D del dominio è in Figura 7.

- **Perturbazione:** $A_0 = 0.1$ m (Regime Lineare) centrata a Sud-Est (Canale d'Otranto).
- **Parametri Numerici:** A causa della maggiore profondità ($H = 1000\text{m} \Rightarrow c \approx 100$ 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 ($N_{steps} = 4320$).

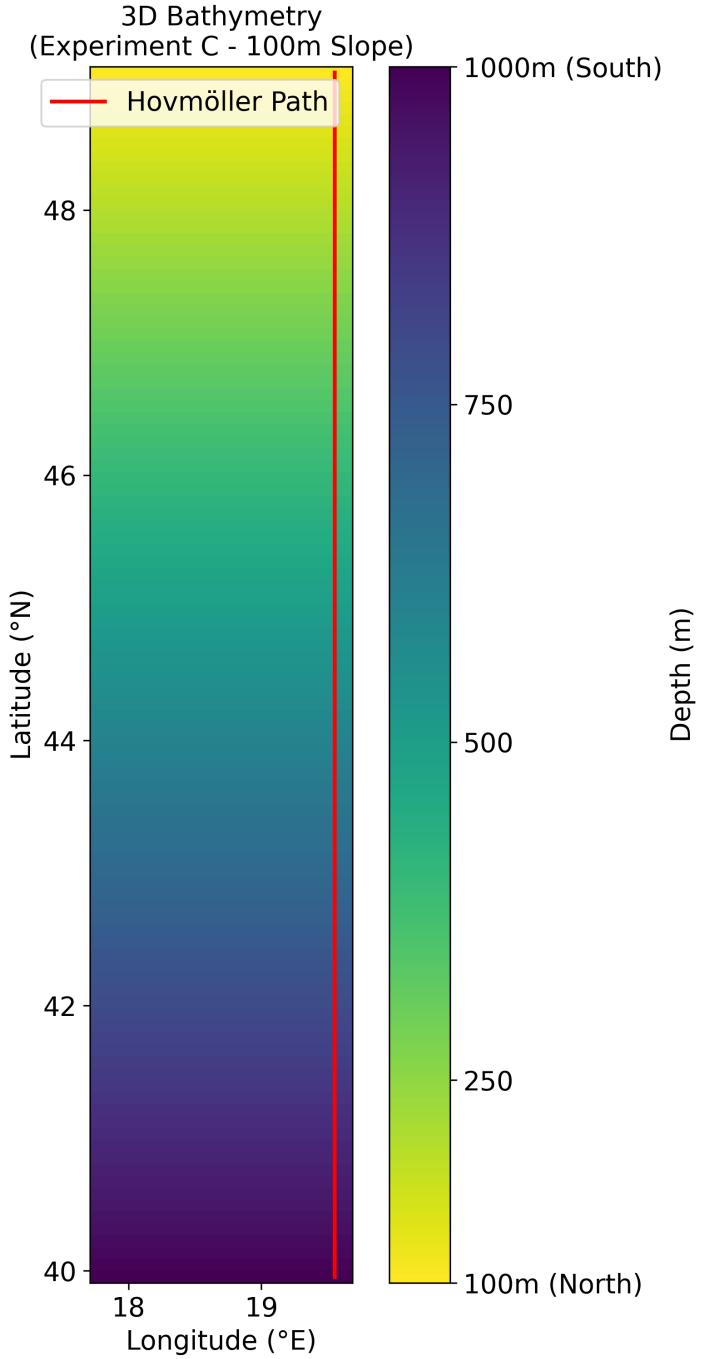


Figure 7: Batimetria 3D Esperimento C: Pendenza lineare lungo Y.

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 (Legge di Green: $A \propto H^{-1/4}$). Confrontando la serie temporale dell'SSH all'Estremità Nord tra l'esperimento C (30m) e la Baseline (100m) in Figura 8, 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.

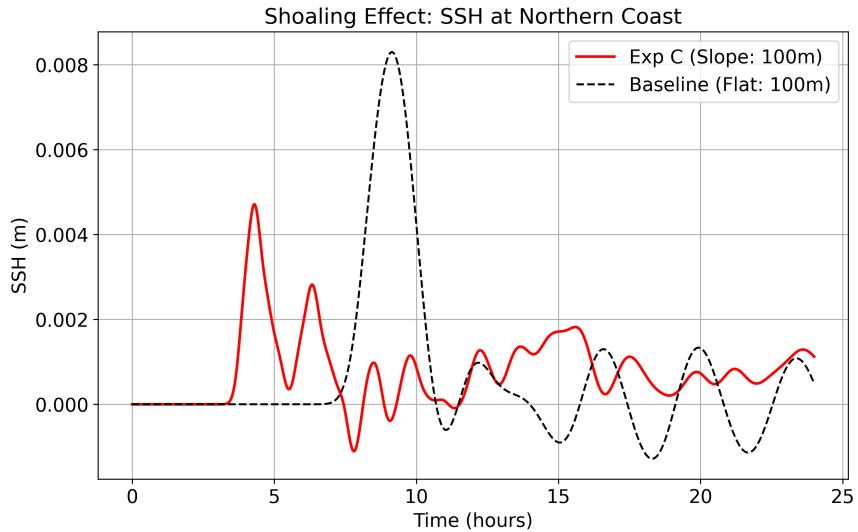


Figure 8: Confronto SSH a Nord: Exp C (Rosso, 30m) vs Baseline (Nero, 100m). Evidente lo shoaling e il ritardo di fase.

4.2.2 2. Diagramma di Hovmöller e Velocità Teorica

Il diagramma spazio-tempo (Figura 9) conferma la natura fisica della propagazione. Abbiamo sovrapposto 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 perfettamente la curva teorica (linea tratteggiata), confermando che l'onda viaggia alla velocità corretta data dalla batimetria. La curvatura indica la decelerazione progressiva mentre l'onda risale verso acque più basse.

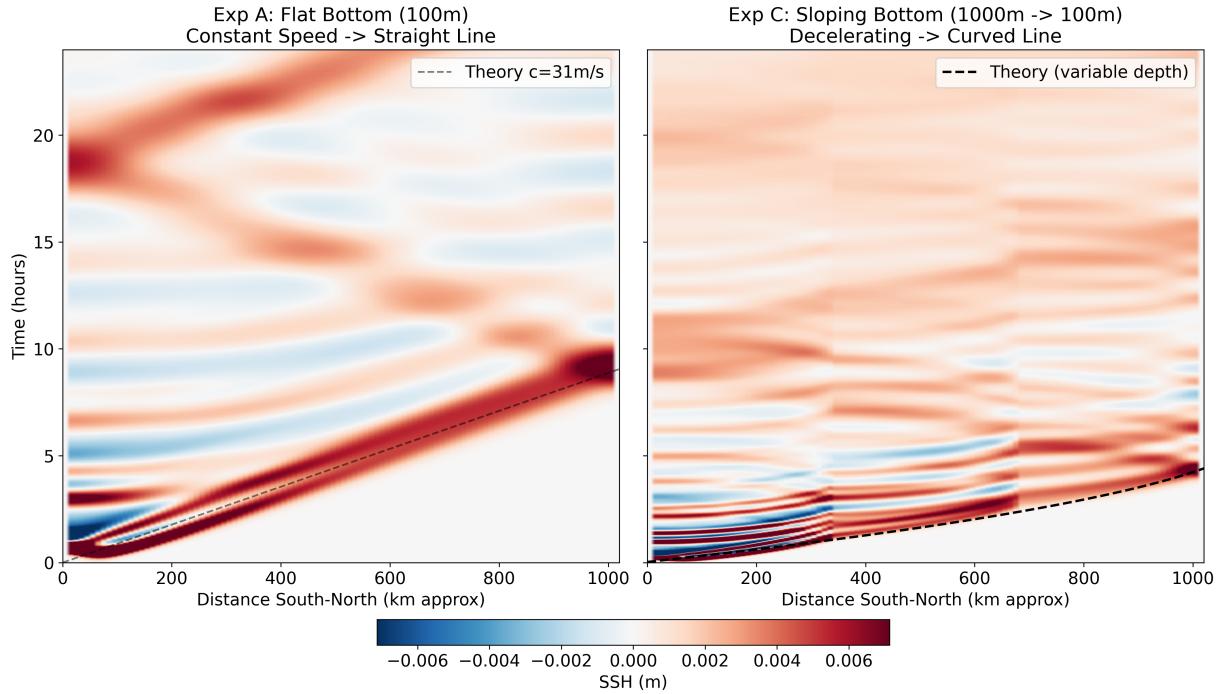


Figure 9: Confronto Diagrammi di Hovmöller. A sinistra: Exp A (velocità costante). A destra: Exp C con curva teorica sovrapposta (linea tratteggiata).

4.2.3 3. Evoluzione Spaziale

Gli snapshots in Figura 10 mostrano l'onda che si "accumula" e cresce mentre risale il bacino.

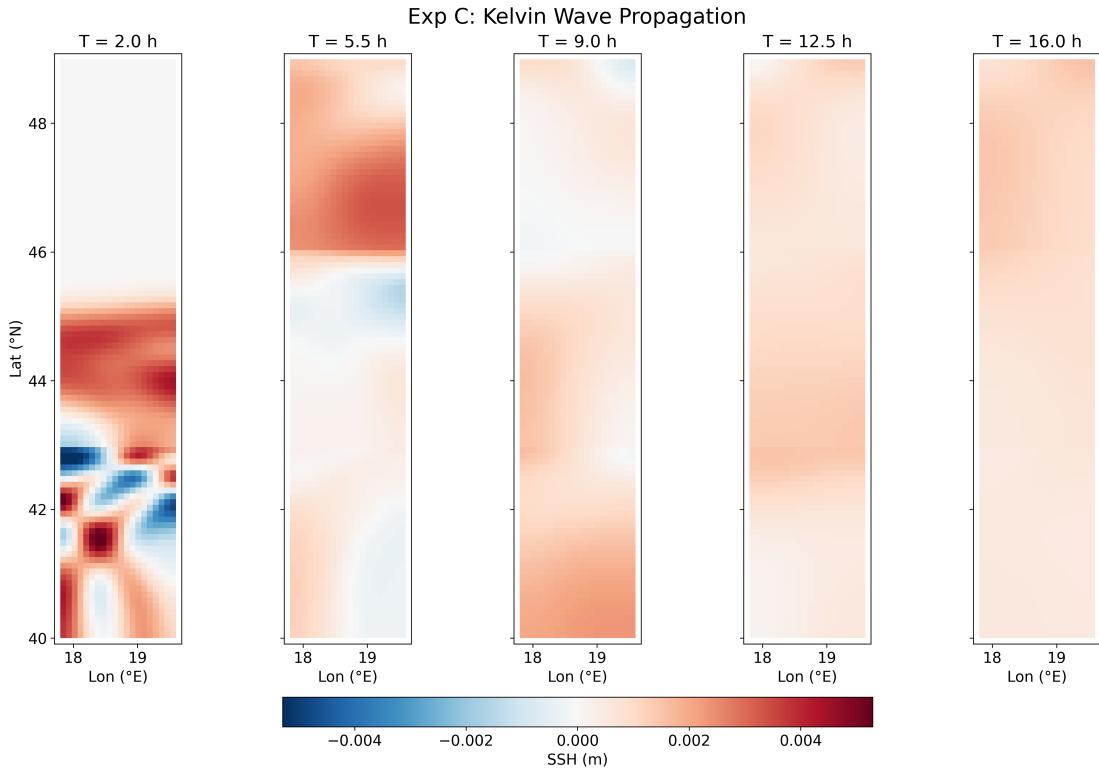


Figure 10: Snapshots Esperimento C. Notare l'aumento di intensità del colore (ampiezza) verso Nord.

5 Experiment D: Resolution Sensitivity

Obiettivo: Verificare l'impatto della risoluzione spaziale sulla dissipazione numerica. Aumentando la risoluzione, ci aspettiamo che l'onda mantenga meglio la sua forma e ampiezza nel tempo, riducendo la viscosità numerica implicita.

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 11 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.

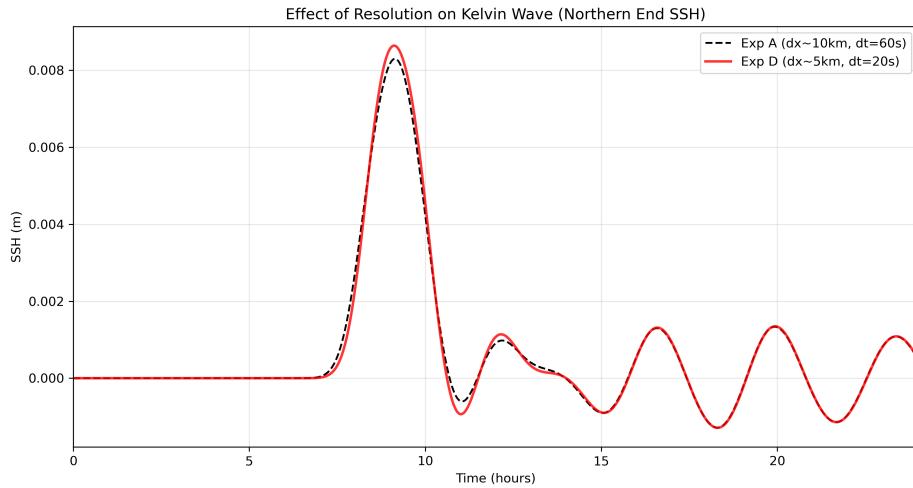


Figure 11: Confronto SSH all'Estremità Nord: Baseline (Nero, 10km) vs Alta Risoluzione (Rosso, 5km).

5.2.2 2. Diagramma di Hovmöller

Il diagramma spazio-tempo per il caso ad alta risoluzione (Figura 12) mostra dettagli più fini nella struttura dell'onda.

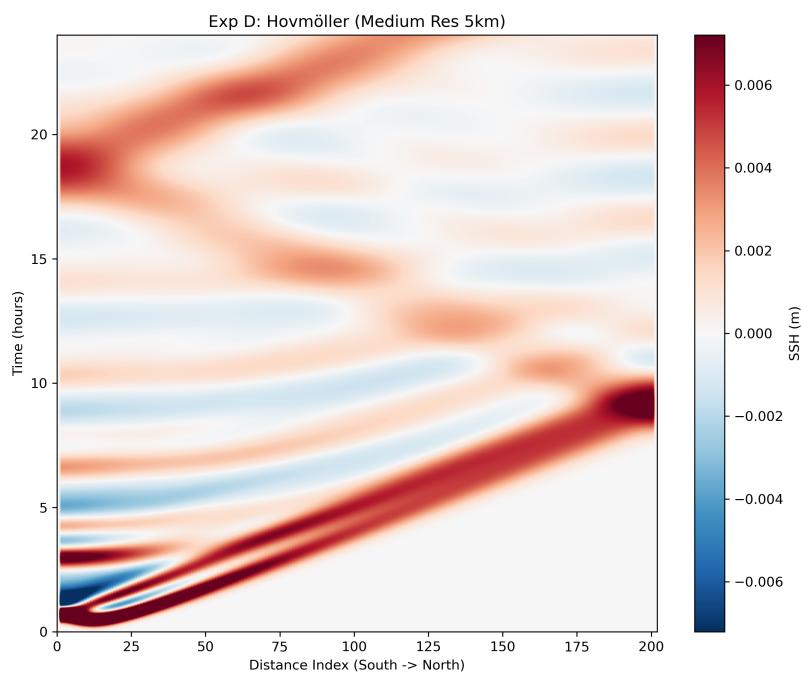


Figure 12: Diagramma di Hovmöller per Exp D (5km). Notare la nitidezza del fronte d’onda.