

investiamo nel vostro futuro



EVENTO FINALE

PON SIGIEC - SIstema di Gestione Integrata per l'Erosione Costiera

**Studio del trasporto solido alla foce della
Fiumara Sfalassà e analisi idromorfodinamica
del tratto costiero di Bagnara Calabria**

F. Aristodemo, D. Algieri Ferraro, N. Penna, P. Veltri, R. Gaudio, A. Fiorini Morosini



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE

DINCI

15 gennaio 2016 - Università della Calabria, "University Club"

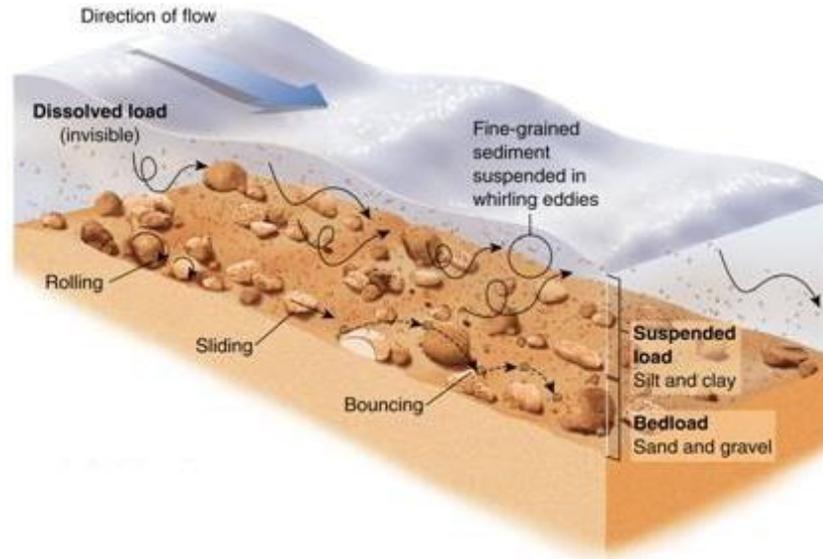
ARGOMENTI TRATTATI

- Trasporto solido della fiumara Sfalassà
- Clima meteomarinò medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria
- Analisi morfologica del litorale di Bagnara Calabria
- Analisi morfodinamica del litorale di Bagnara Calabria



Trasporto solido della fiumara Sfalassà

- La stima del trasporto solido è stata finalizzata all'analisi morfodinamica per l'individuazione del potenziale arretramento o avanzamento di un tratto litoraneo in corrispondenza della foce di un corso d'acqua.

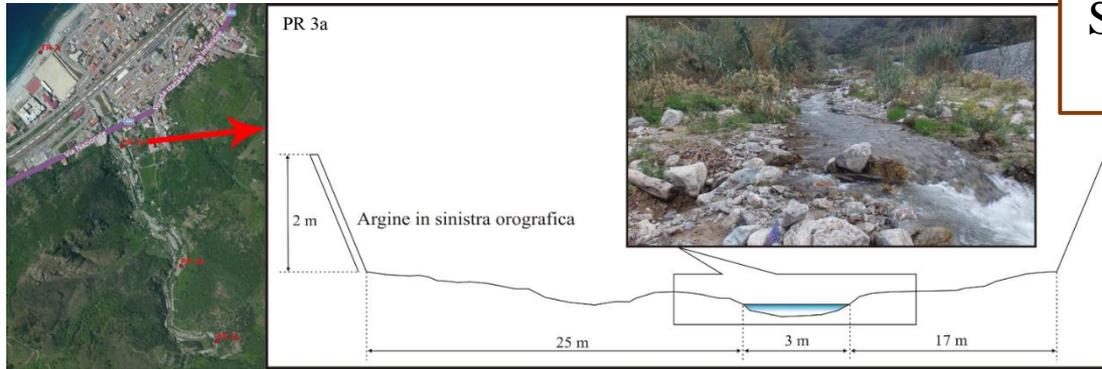


Metodologia di analisi

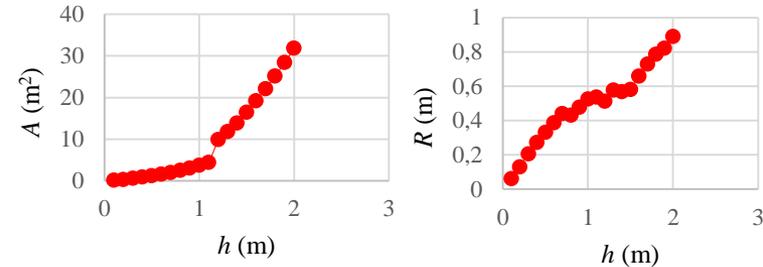
1. Determinazione della scala di deflusso per alveo a fondo piano
2. Determinazione della curva di durata
3. Stima del trasporto solido con formule di letteratura
4. Calcolo del trasporto solido totale medio annuo

Trasporto solido della fiumara Sfalassà

1. Determinazione della scala di deflusso in alveo a fondo piano



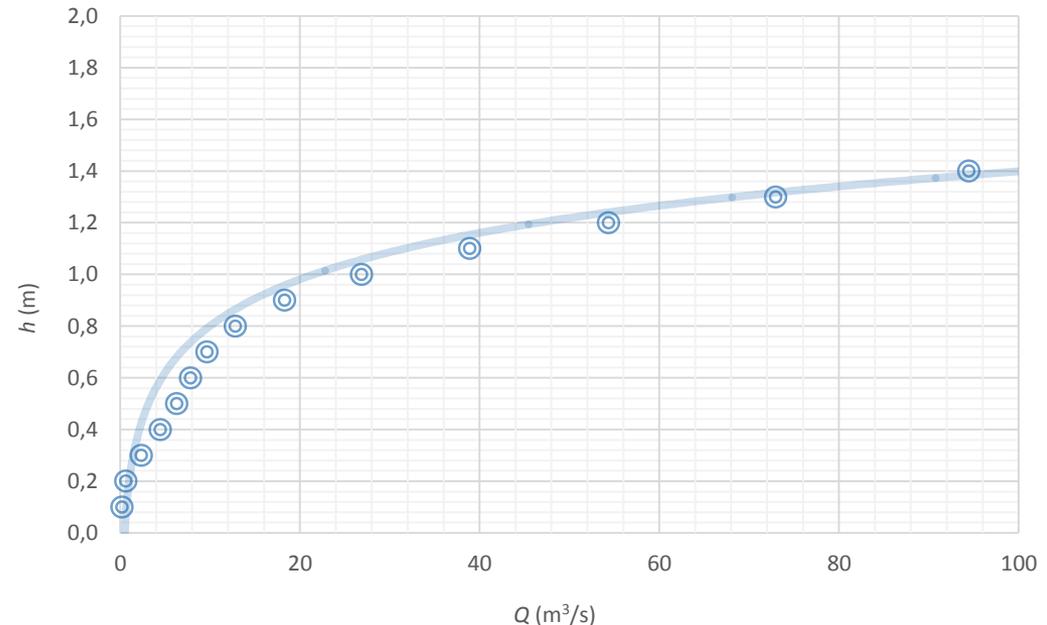
Sezione trasversale della fiumara Sfalassà



Metodo di Keulegan-Einstein

Note le curve $A(h)$ e $R(h)$, rispettivamente dell'area bagnata e del raggio idraulico, per una determinata sezione del corso d'acqua è possibile determinare per ogni tirante h la portata idrica, $Q = VA$.

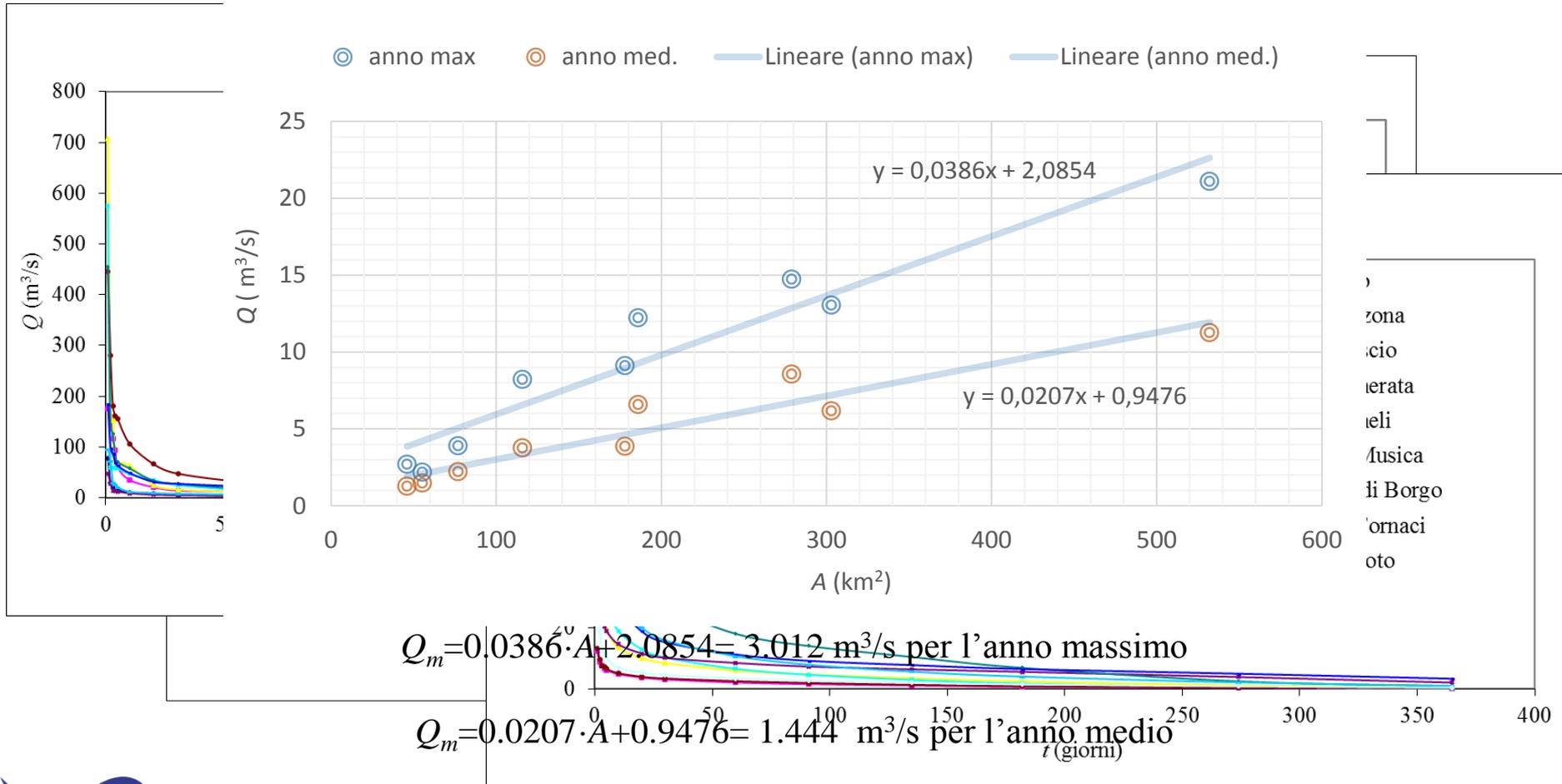
$$\frac{V}{u_*} = 6,25 + 5,75 \log \left(\frac{R}{\Delta} \right)$$



Trasporto solido della fiumara Sfalassà

2. Determinazione della curva di durata di un corso d'acqua

Non disponendo di dati di portata misurati per la fiumara Sfalassà, si è ricorso a un **criterio di regionalizzazione**, estendendo al caso in esame i dati registrati in 9 stazioni idrometrografiche relative a corsi d'acqua con caratteristiche di fiumara presenti sul territorio calabrese.



Trasporto solido della fiumara Sfalassà

3. Stima del trasporto solido con formule di letteratura

- **Formula di Meyer-Peter e Müller (1948)**

$$g_{si} = \frac{8\gamma_s}{(\gamma_s - \gamma)\sqrt{\rho}} (\tau' - \tau_{ci})^{3/2} \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

Portata solida per unità di larghezza d'alveo, relativa all' i -esima classe granulometrica.

$$\tau' = \gamma \frac{V^{3/2} i^{1/4}}{K^{13/2}} \quad (kg/m^2)$$

$$\tau_{ci} = 0,047(\gamma_s - \gamma) d_i \left(\frac{kg}{m^2} \right)$$

$$g_{sTot} = \frac{\sum g_{si}}{n} \longrightarrow G_s = g_{sTot} B \left(\frac{kg}{s} \right) \quad \text{Portata solida totale}$$

- **Formula di Schoklitsch (1950)**

$$g_{si} = 2500 i^{3/2} (q - q_{ci}) \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

Portata solida per unità di larghezza d'alveo, relativa all' i -esima classe granulometrica.

$$q_{ci} = 0,26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{d_i^{3/2}}{i^{7/6}} \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

$$g_{sTot} = \frac{\sum g_{si}}{n} \longrightarrow G_s = g_{sTot} B \left(\frac{kg}{s} \right) \quad \text{Portata solida totale}$$

Trasporto solido della fiumara Sfalassà

3. Stima del trasporto solido con formule di letteratura

- **Formula di Smart e Jaeggi (1983)**

$$g_{si} = 6600qS^{0,6}(S - S_{cr}) \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

Portata solida per unità di larghezza d'alveo, relativa all'*i*-esima classe granulometrica.

$$S_{cr} = d_i / (12,1h)$$

$$g_{sTot} = \frac{\sum g_{si}}{n} \longrightarrow G_s = g_{sTot} B \left(\frac{kg}{s} \right)$$

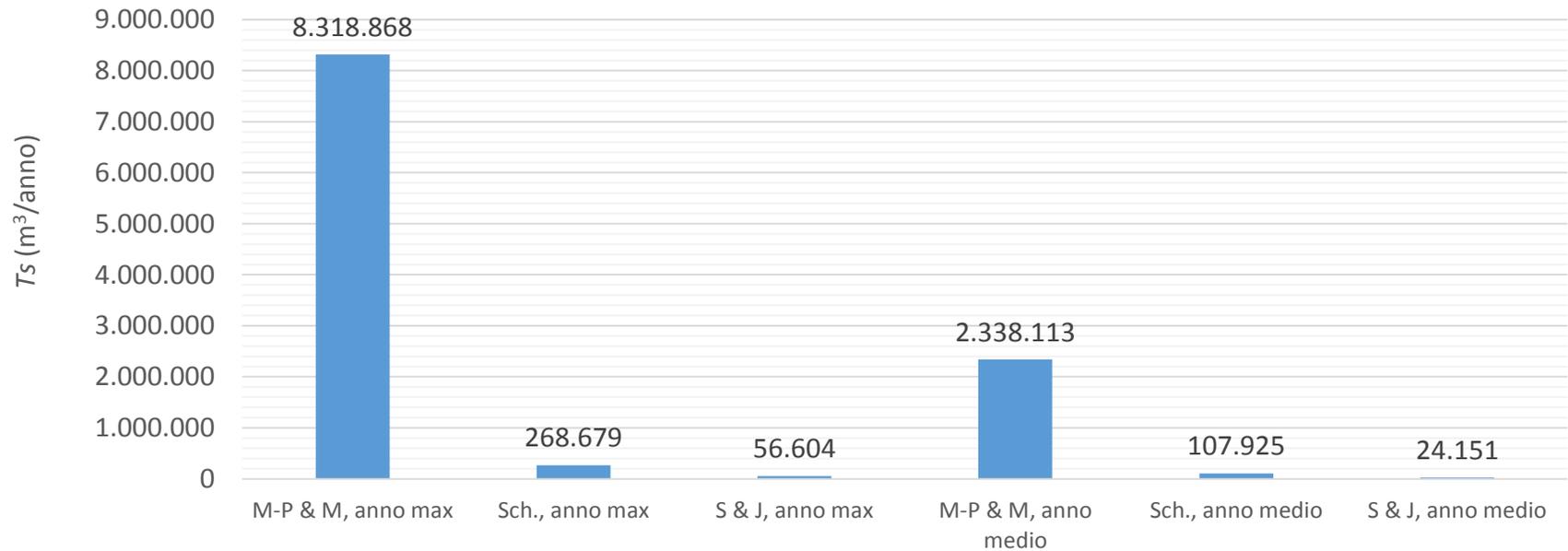
Portata solida totale

4. Calcolo del trasporto solido totale medio annuo

- Il trasporto solido di fondo medio annuo viene calcolato a partire dalle curve di durata, fissando degli opportuni intervalli di tempo e assegnando a questi ultimi la portata liquida media tra quelle che competono agli estremi dell'intervallo stesso.
- Dalla portata liquida si ricava la portata solida di fondo che, moltiplicata per il numero di secondi presenti nell'intervallo di tempo che si sta considerando, fornisce il trasporto solido di fondo per quel dato intervallo. Infine, la somma di tutti i contributi così calcolati fornisce il trasporto solido di fondo medio annuo.

Trasporto solido della fiumara Sfalassà

4. Calcolo del trasporto solido totale medio annuo



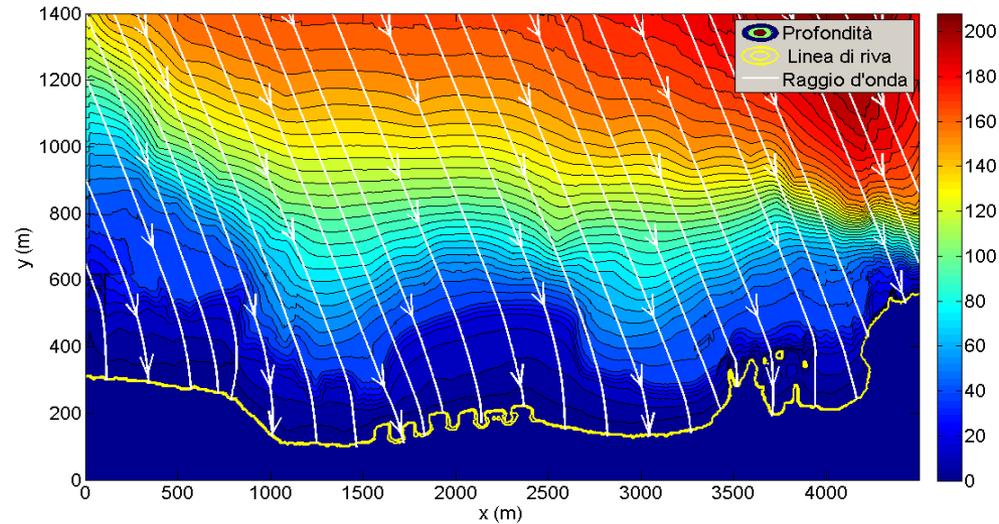
Trasporto solido della fiumara Sfalassà

OSSERVAZIONI SUI RISULTATI

- 1. La stima effettuata con il metodo di Meyer-Peter e Müller può essere ritenuta non significativa per il caso in esame.**
 - a) Quando il legame funzionale $A(h)$ è sempre monotonicamente crescente e il legame $R(h)$ presenta brusche diminuzioni in corrispondenza dei livelli idrici a partire dai quali l'acqua invade le aree golenali, come nel caso in esame, si possono verificare stime errate delle velocità medie e delle portate (decrementi al crescere dell'altezza idrica).
 - b) I risultati ottenuti potrebbero essere affetti anche da errori dovuti all'estrapolazione della formula di Meyer-Peter e Müller, ricavata per pendenze del fondo $0,0004 \leq i \leq 0,020$, alla pendenza del 2,5% della fiumara Sfalassà.
- 2. La stima effettuata con il metodo di Schoklitsch potrebbe essere affetta da errori dovuti alla differente granulometria del materiale d'alveo della fiumara Sfalassà ($0,0004 \text{ m} \leq d \leq 0,01336 \text{ m}$) rispetto alla granulometria dei sedimenti usati nella sperimentazione di Schoklitsch ($d \geq 0,006 \text{ m}$).**
- 3. I risultati ottenuti con la formula di Smart & Jaeggi possono essere ritenuti più attendibili e confrontabili con quelli ottenuti dalla formula di Gavrilovic, in quanto la formula è stata ricavata per pendenze elevate, come quella della fiumara Sfalassà, e con la stessa granulometria del caso in esame.**

Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

- La definizione del clima meteomarinario è finalizzata a fornire l'input delle forzanti idrodinamiche sottocosta per l'analisi morfodinamica e per la stima delle inondazioni prodotte da eventi estremi



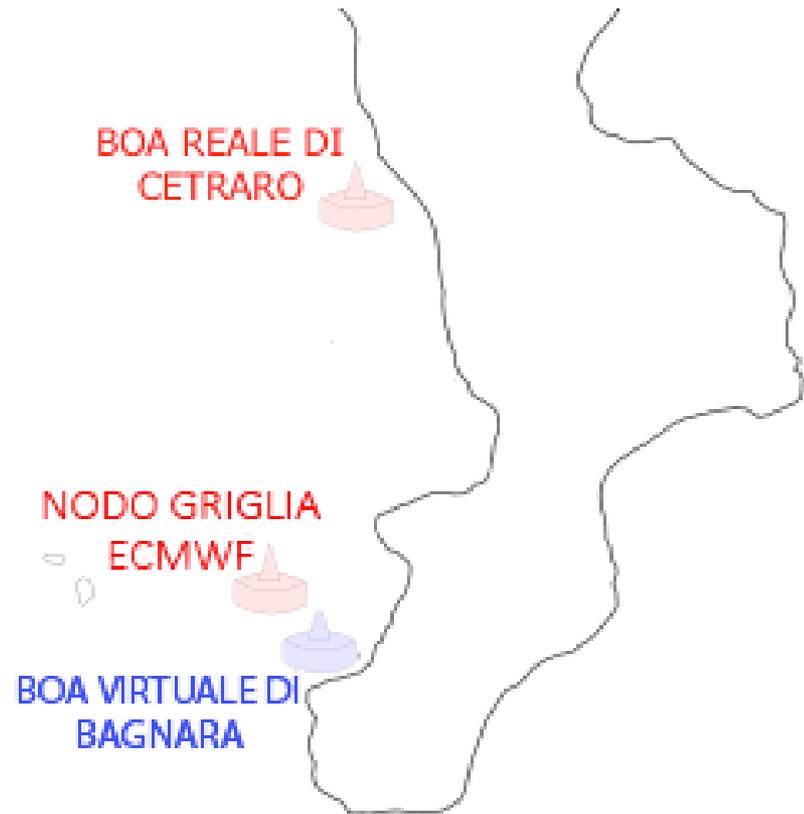
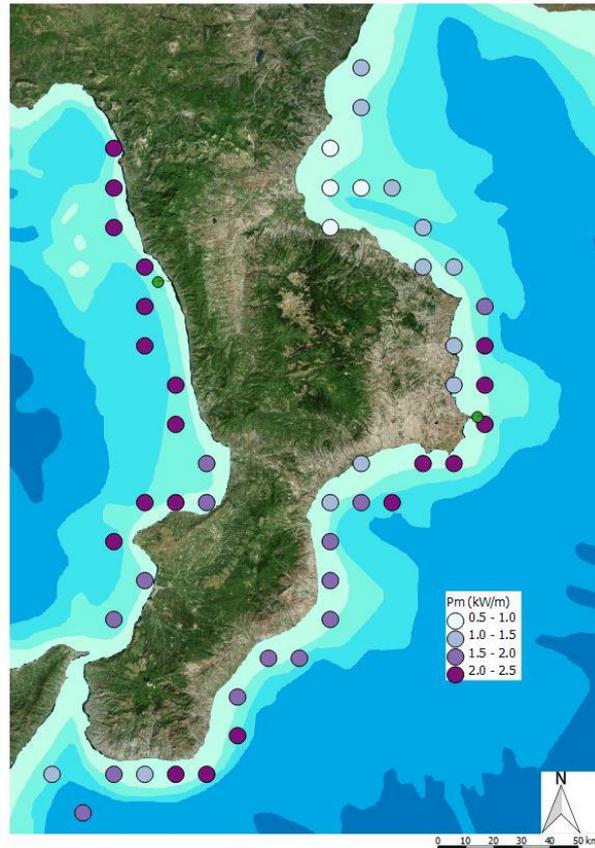
Metodologia di analisi

1. Modellazione del clima meteomarinario al largo
2. Propagazione del moto ondoso sottocosta
3. Modellazione del clima meteomarinario al largo e delle inondazione storiche e future

Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

1. Modellazione del clima meteomarinario al largo

- La caratterizzazione del moto ondoso al largo di Bagnara Calabria è stata effettuata a partire dall'analisi delle serie storiche registrate dell'ondametro di Cetraro della **Rete Ondametrica Nazionale (RON)** e dai dati ottenuti dal centro meteorologico europeo **ECMWF**.



Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

1. Modellazione del clima meteomarinario al largo

- Le serie storiche dei valori di Hs, Tp, Tm e Dir sono state sottoposte a opportuna **validazione**, attraverso l'eliminazione degli eventi non registrati dalla boa e gli eventi considerati anomali.

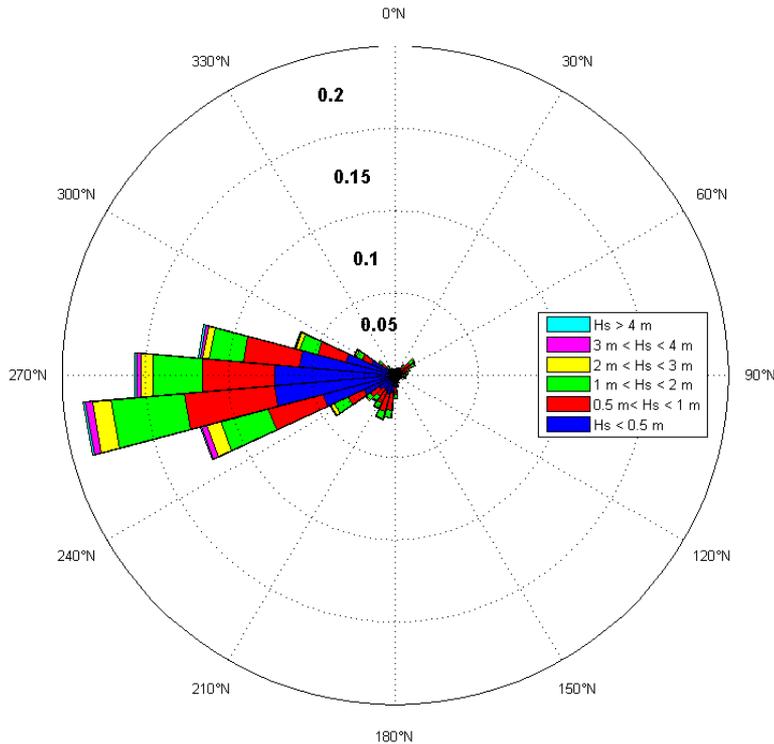


Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso (boa RON di Cetraro)

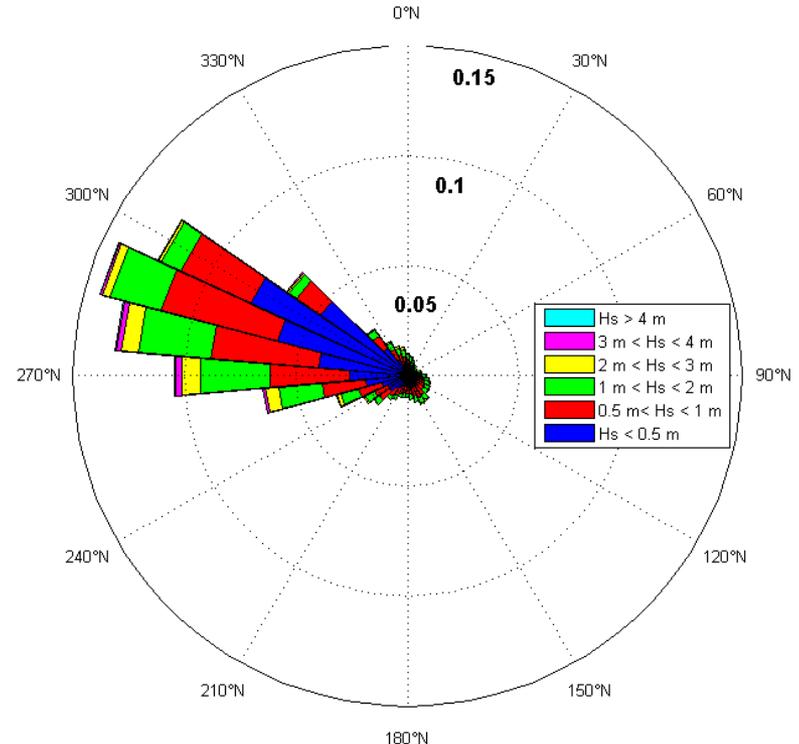


Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso (punto ECMWF)

Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

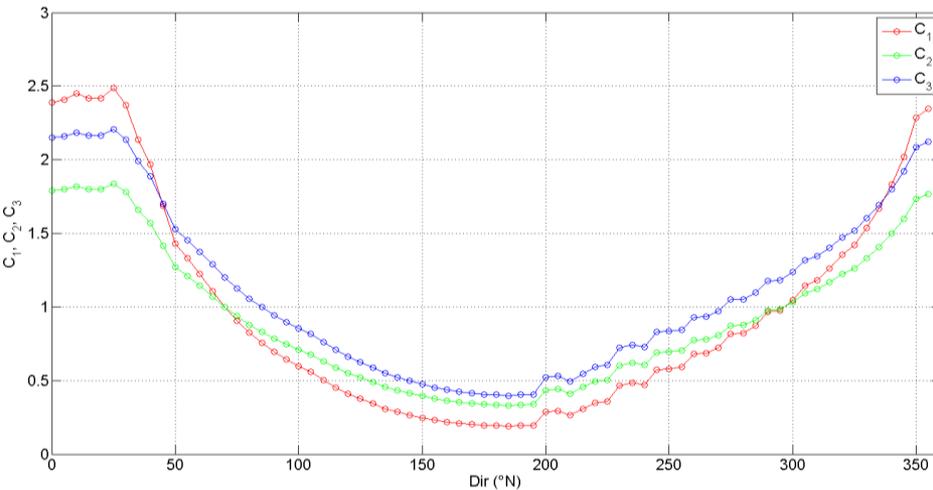
1. Modellazione del clima meteomarinario al largo

- Il clima meteomarinario al largo del paraggio di Bagnara Calabria, che non risulta disporre di misure dirette di moto ondoso, è stato determinato attraverso il metodo della **trasposizione geografica** (Contini e De Girolamo, 1988) attraverso la determinazione dei fetch

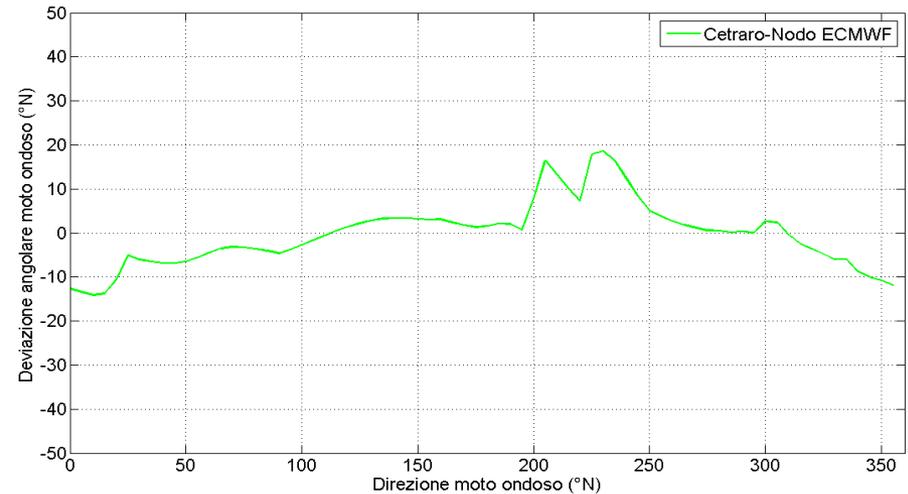
$$\frac{H_s^P}{H_s^O} = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{T_m^P}{T_m^O} = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \sin(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \right)$$



Coefficienti di trasposizione in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso (Cetraro - Bagnara Calabria)



Variazione della deviazione angolare del moto ondoso fra la boa reale e quella virtuale (Cetraro - Bagnara Calabria)

Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

1. Modellazione del clima meteomarinario al largo

- Il clima meteomarinario al largo di Bagnara Calabria è stato individuato all'interno del **settore di traversia**, compreso tra 240°N e 10°N , considerando i dati dell'ECMWF che sono risultati essere più attendibili.

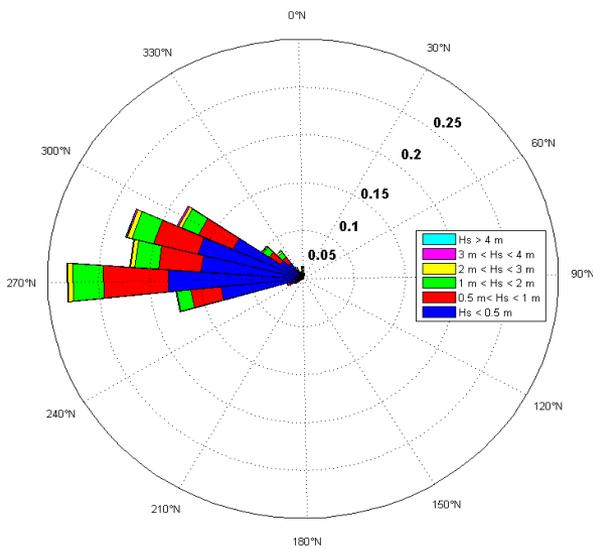


Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Bagnara Calabria (dai dati della boa di Cetraro)

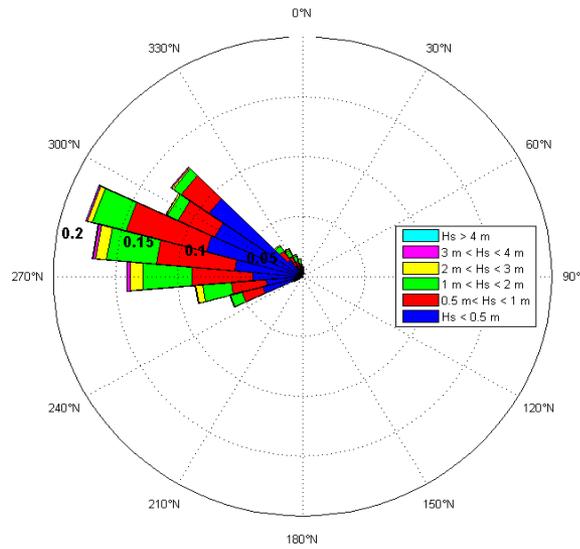
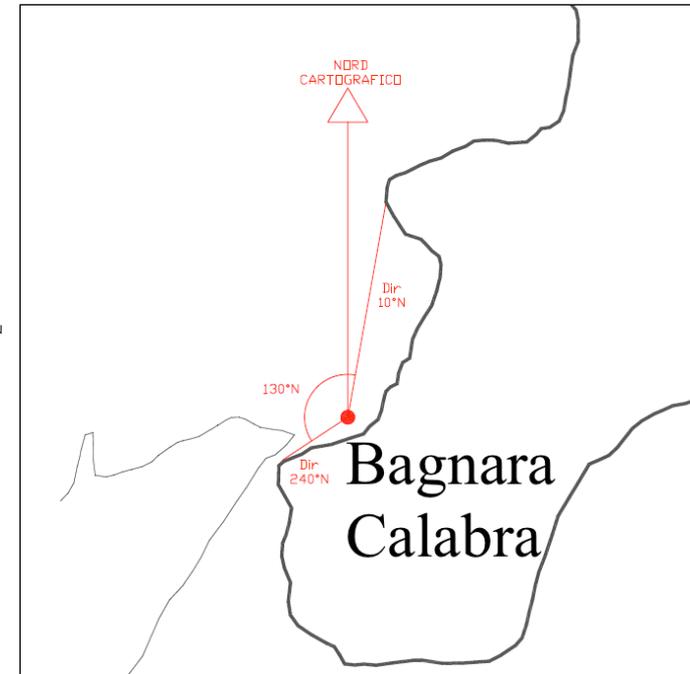


Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Bagnara Calabria (dai dati dell'ECMWF)



Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

1. Modellazione del clima meteomarinario al largo

- L'analisi del clima meteomarinario estremo ha riguardato l'individuazione delle **mareggiate** (con ricostruzione di quelle storiche che hanno indotto inondazioni sul litorale) e delle **onde di progetto** per settori direzionali e a prefissato tempo di ritorno attraverso l'approccio probabilistico di Goda (1988).

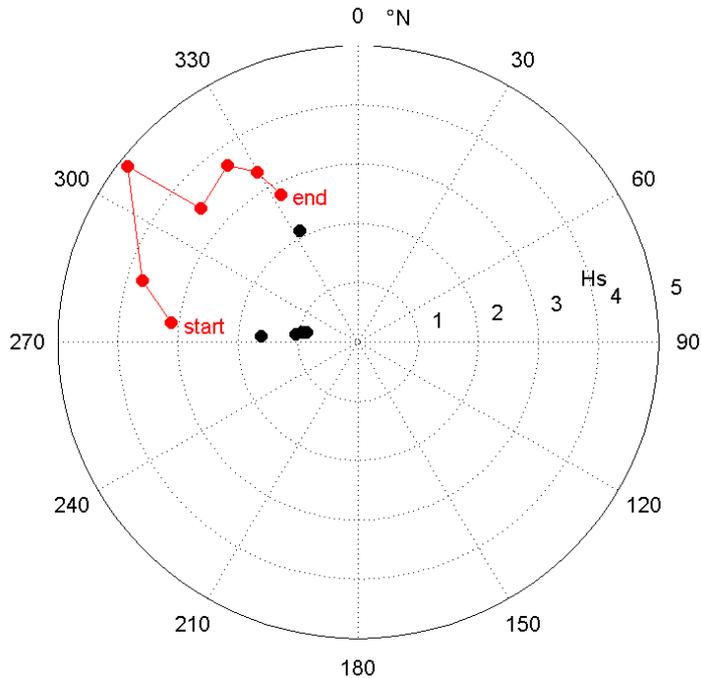
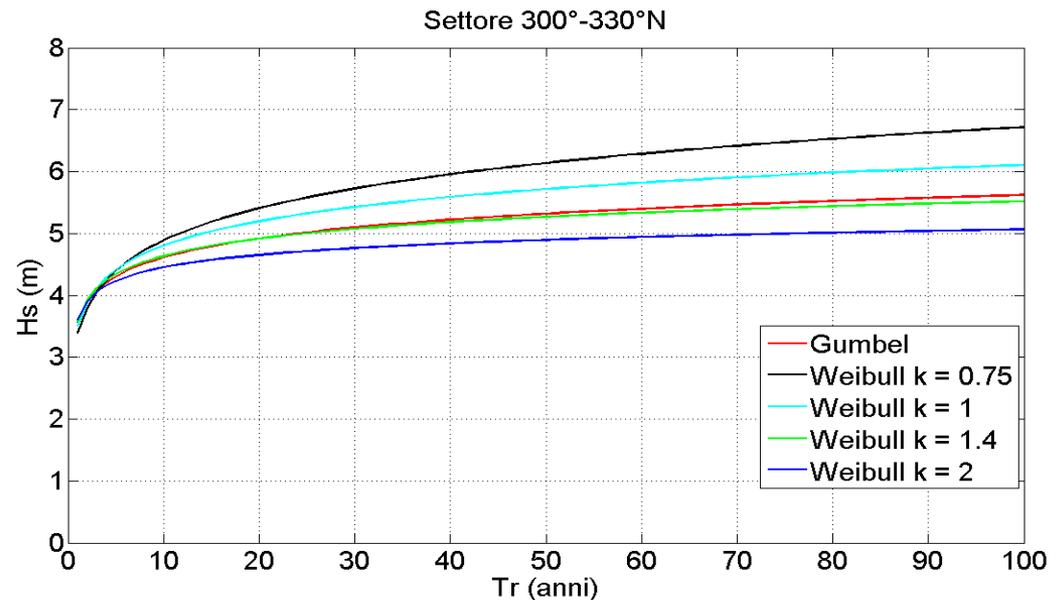


Diagramma polare delle altezze d'onda significative della mareggiata del 06/01/2012 in funzione della direzione di provenienza

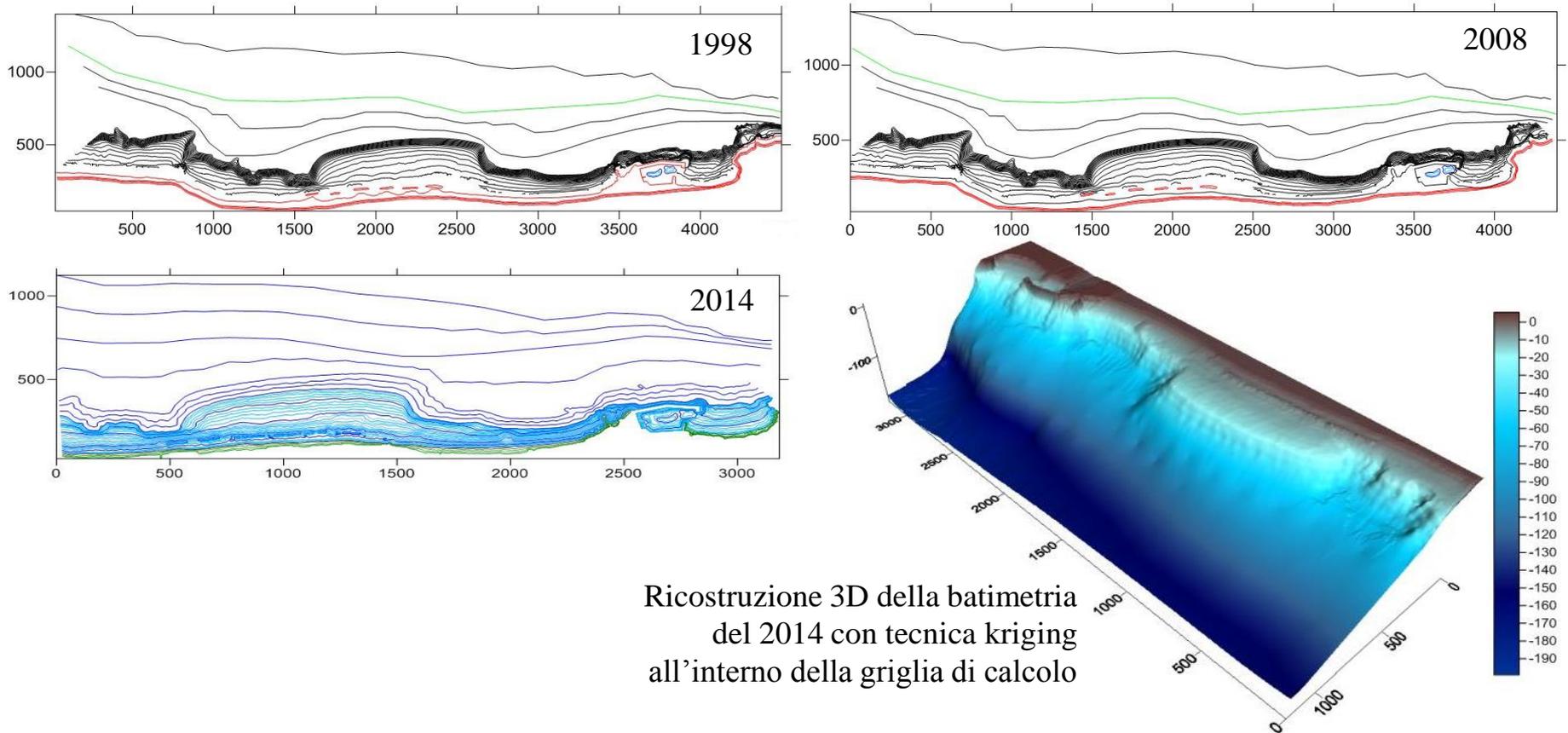


Variazione dell'altezza significativa in funzione del periodo di ritorno per il settore 300°-330°N

Clima meteomarinico medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

2. Propagazione del moto ondoso sottocosta

- Lo studio di propagazione del clima ondoso (stati di mare, mareggiate storiche e onde di progetto) da largo a sottocosta ha riguardato la preparazione della **griglia di calcolo** innestata su specifiche batimetrie sottocosta e carte nautiche dell'I.I.M. al largo.

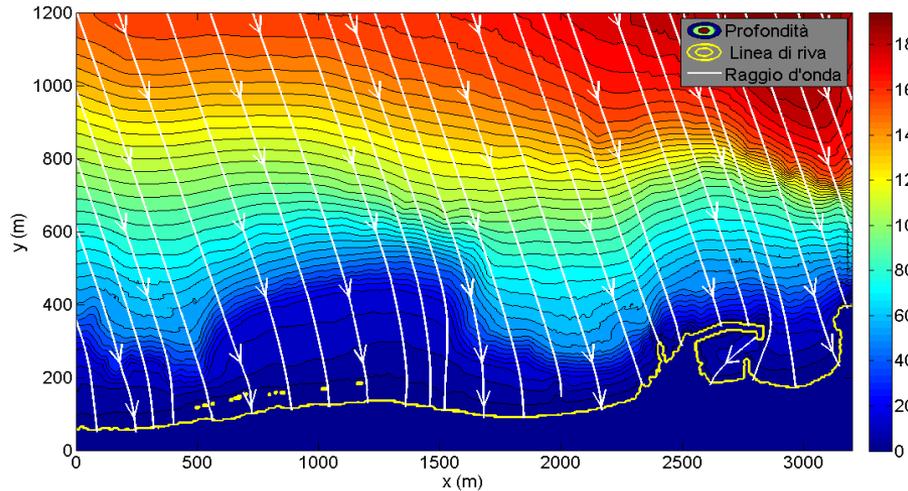


Ricostruzione 3D della batimetria
del 2014 con tecnica kriging
all'interno della griglia di calcolo

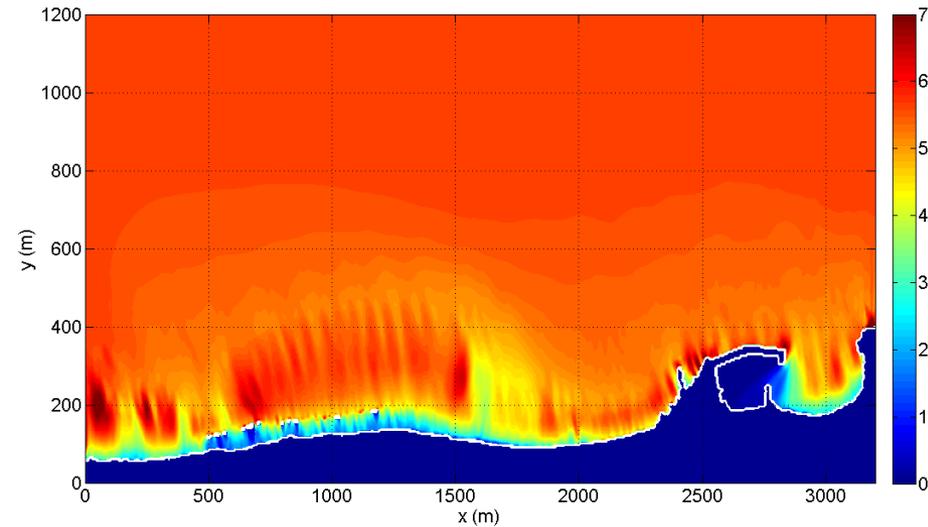
Clima meteomarinero medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

2. Propagazione del moto ondoso sottocosta

- La propagazione del moto ondoso da largo al frangimento è stata effettuata con il **modello spettrale SWAN**



Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso (onda di progetto con $T = 100$ anni - $H_s = 5.61$ m, $T_p = 12.46$ s e $Dir = 285^\circ N$)

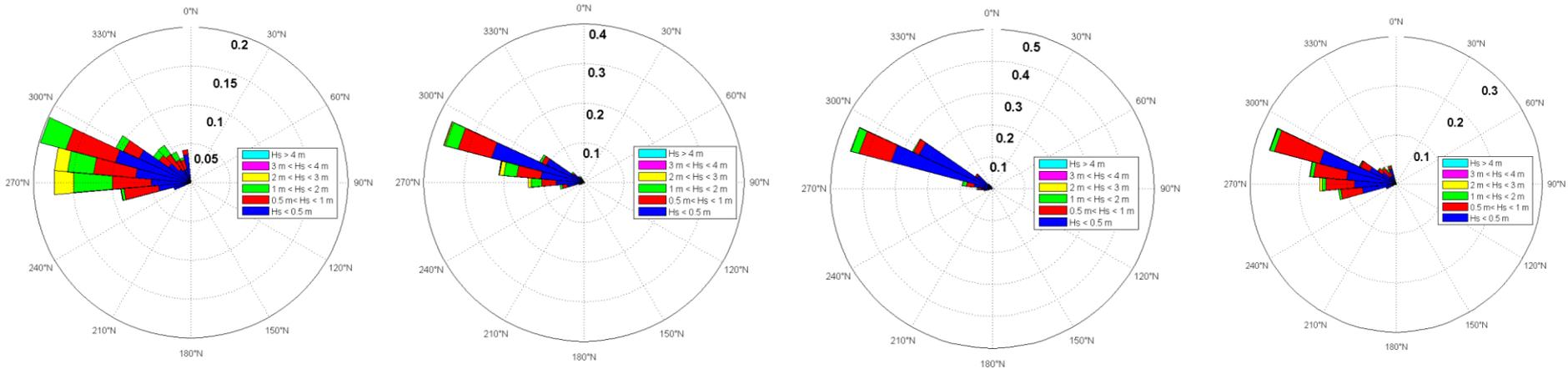


Distribuzione spaziale 2D dell'altezza d'onda significativa (onda di progetto con $T = 100$ anni - $H_s = 5.61$ m, $T_p = 12.46$ s e $Dir = 285^\circ N$)

Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

3. Modellazione del clima meteomarinario sottocosta e delle inondazioni storiche e future

- Dalla propagazione del moto ondoso, è stato determinato il **clima meteomarinario medio** (a base annua e stagionale, come input per la successiva analisi morfodinamica) ed **estremo** in condizioni pre-frangimento.



Diagrammi polari delle frequenze di apparizione degli eventi di moto sottocosta a base stagionale (inverno, primavera, estate ed autunno)

- I **massimi livelli d'acqua sulla spiaggia emersa** indotti da onde di progetto e mareggiate storiche sono stati determinati come somma tra il valore del massimo run up e un'aliquota del valore del sovralzo di tempesta, inteso come somma del massimo sovralzo di tempesta meteorologica (onde, venti ed effetto barico inverso) e del massimo della marea astronomica:

$$R = R_{U,2\%} + 0.6 * \text{Sovralzo di tempesta}$$

Clima meteomarinero medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

3. Modellazione del clima meteomarinero sottocosta e delle inondazioni storiche e future

- Esempio di inondazione per effetto della mareggiata del 06/01/2012



Clima meteomarinario medio ed estremo del litorale di Bagnara Calabria

3. Modellazione del clima meteomarinario sottocosta e delle inondazioni storiche e future

- Esempio di inondazione per effetto di un'onda di progetto con $T_r = 50$ anni



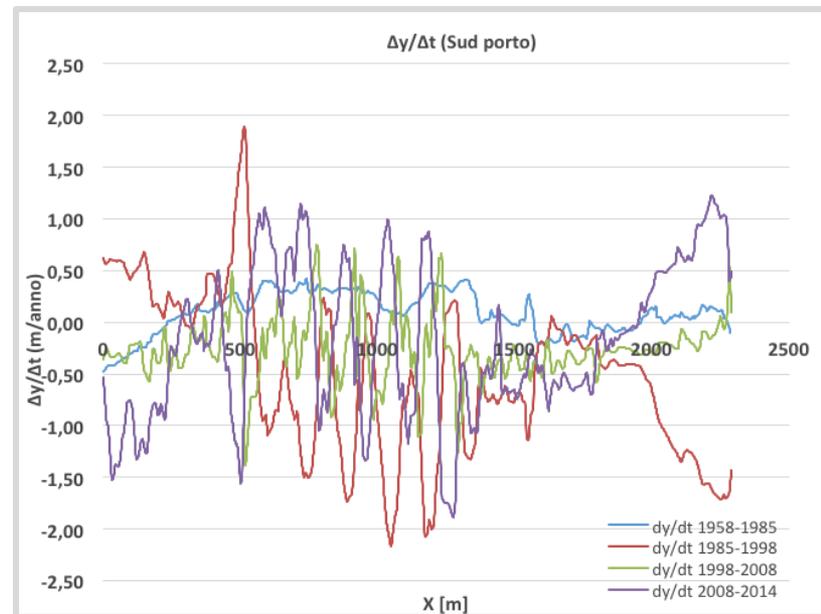
Analisi morfologica del litorale di Bagnara Calabria

1. Analisi diacroniche delle linee di riva

- Le linee di riva considerate nel presente studio sono relative ai periodi 1958, 1985, 1998, 2008, 2014. L'area investigata è un tratto di costa con un'estensione di circa 3.15 km ricadente nel comune di Bagnara Calabria (circa 2300 m a Sud del porto e circa 400 m a Nord del porto).



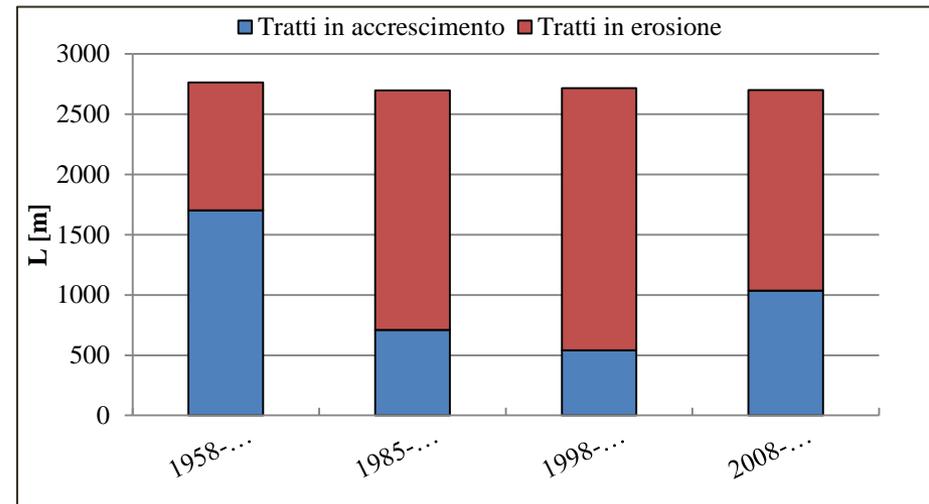
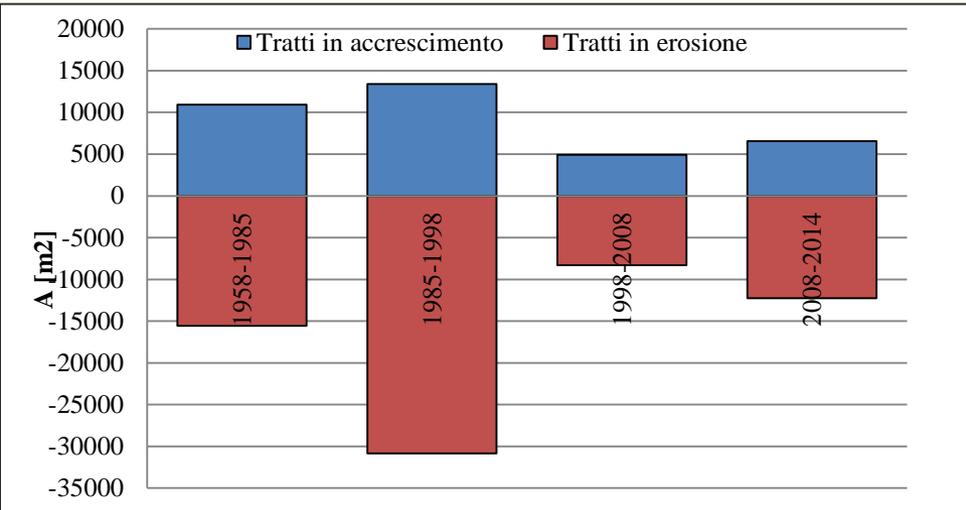
- Le linee di riva sono state discretizzate ogni 1 m, ottenendo la variazione relativa e la velocità di erosione e arretramento negli anni considerati



Analisi morfologica del litorale di Bagnara Calabria

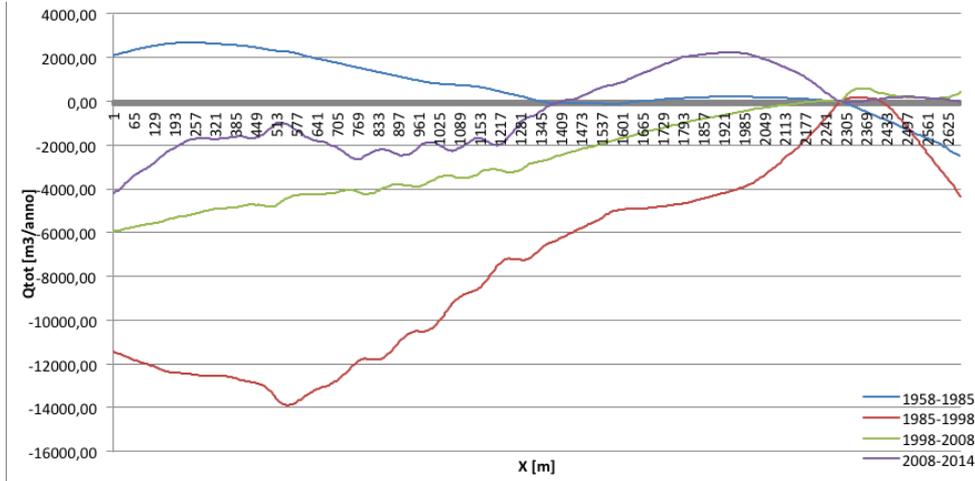
2. Analisi diacroniche d'insieme

- L'analisi ha riguardato il bilancio delle aree e delle lunghezze di spiaggia a livello planimetrico in erosione o in accrescimento (il litorale in esame risulta in tendenziale erosione su scala globale).



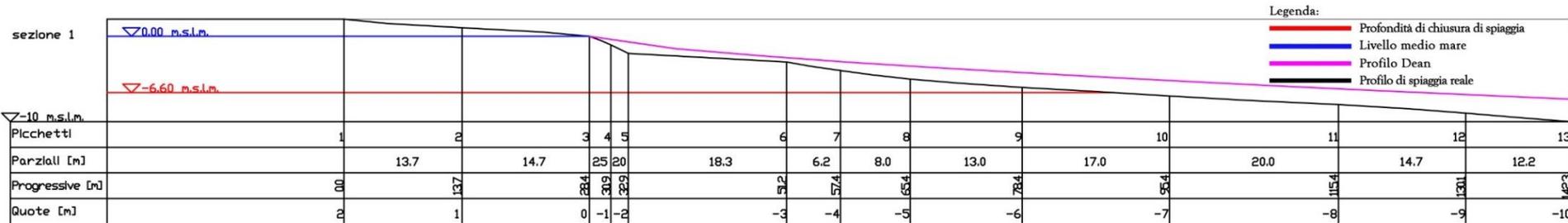
Analisi morfologica del litorale di Bagnara Calabria

3. Stima del trasporto solido litoraneo



Schema di bilancio del trasporto solido litoraneo calcolato in funzione dei ratei annui di variazione $\Delta y/\Delta t$

4. Analisi dei profili trasversali di spiaggia

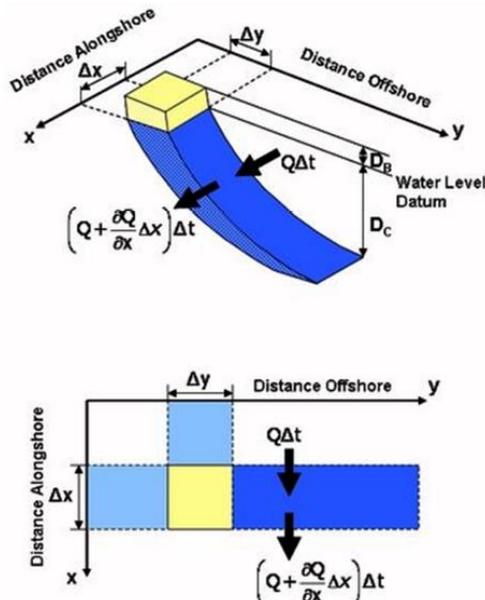


Esempio di profilo trasversale reale e di equilibrio per la stima delle aree erose e in avanzamento

Analisi morfodinamica del litorale di Bagnara Calabria

1. Input del modello

- L'evoluzione futura della linea di riva del litorale, in termini medio annui, è stata effettuata attraverso il **modello ad una linea GENESIS**.
- Nel modello è stato inserito il **clima meteomarinico medio annuo sottocosta** (a base stagionale e randomizzato), il **trasporto solido medio annuo della fiumara Sfalassà**, il **D₅₀** proveniente da appositi campionamenti, la **fascia attiva di spiaggia** e le caratteristiche geometriche e idrauliche delle **opere di difesa costiera**.



Schematizzazione 3D e planimetrica del profilo di spiaggia secondo il modello GENESIS

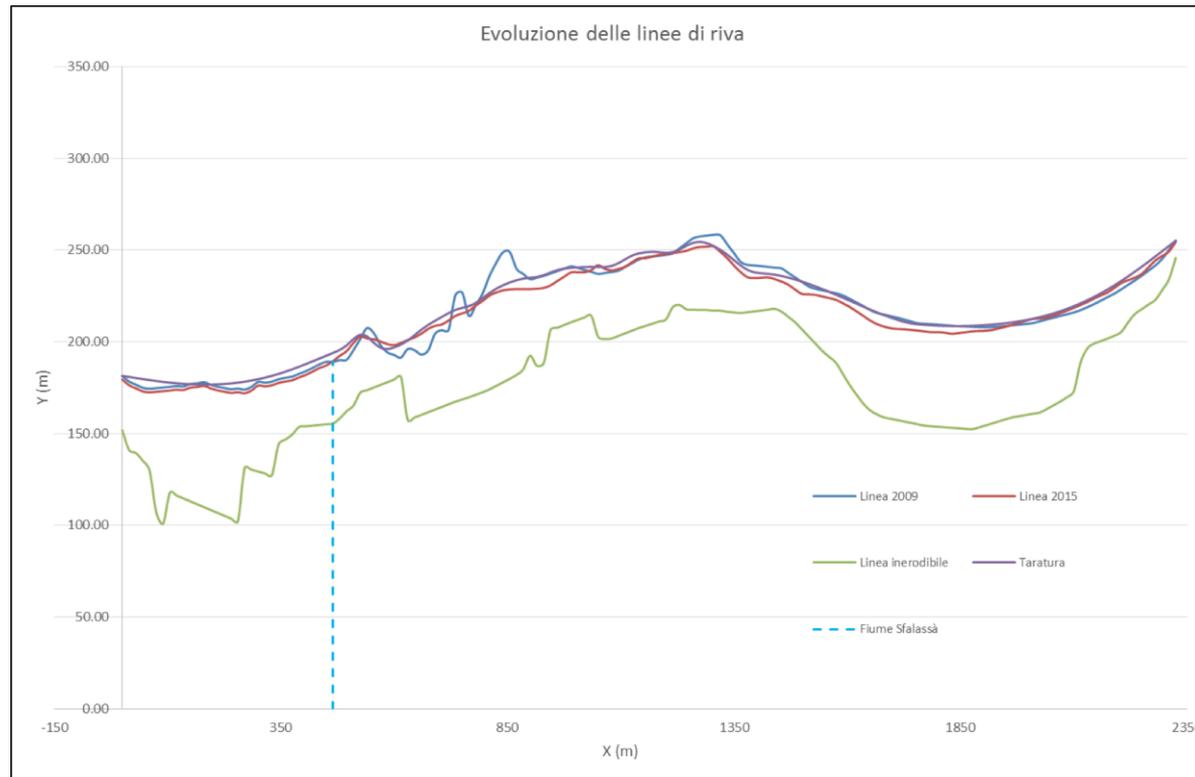


Posizione dei punti di campionamento per l'analisi granulometrica del tratto di spiaggia in esame (a sinistra, vista del litorale parte Sud; a destra, vista del litorale parte Nord)

Analisi morfodinamica del litorale di Bagnara Calabria

2. Calibrazione del modello

- Il **modello GENESIS** è stato soggetto ad un'opportuna procedura di taratura dei parametri dipendenti dal trasporto solido long-shore e cross-shore, determinando una linea di riva simulata approssimabile a quella rilevata.

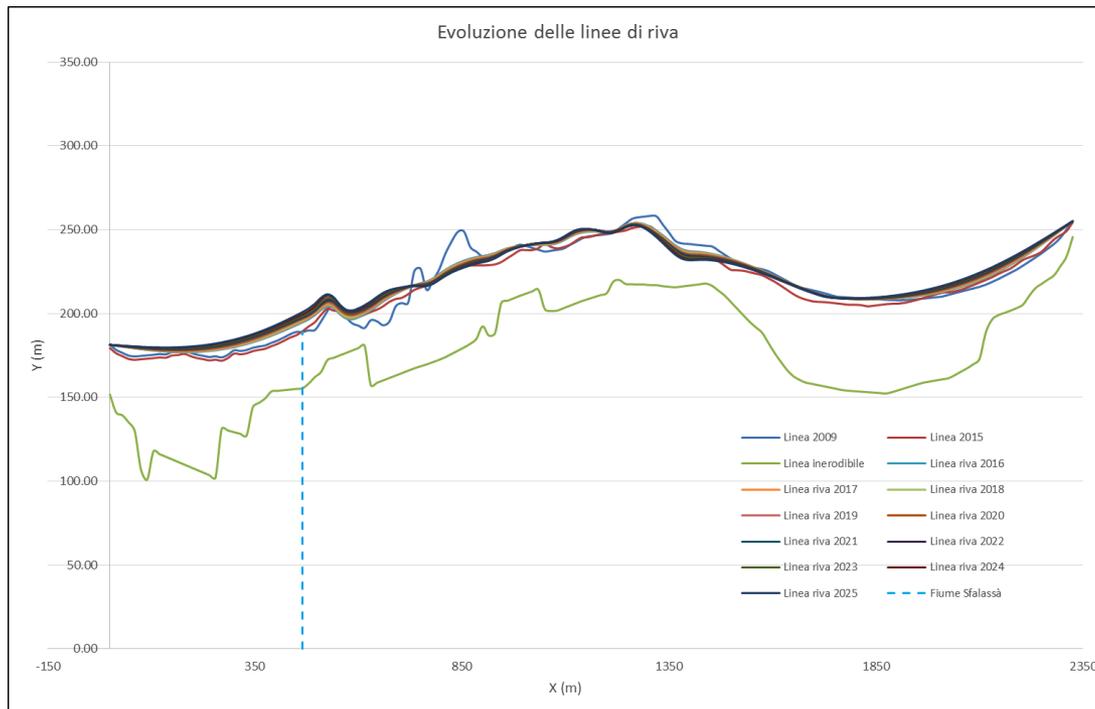


Linea di riva: 2009 rilevata, 2015 rilevata e 2015 simulata

Analisi morfodinamica del litorale di Bagnara Calabria

3. Evoluzione delle linee di riva

- Dalla linea di riva simulata al 2015, è stata effettuata l'evoluzione per ogni anno fino al 2025.
- Si riscontra a Sud un primo tratto stabile grazie al trasporto solido proveniente dalla Sfalassà, quindi un tratto centrale caratterizzato dalla presenza dei frangiflutti che fa sì che il litorale non arretri, tranne per i piccoli tratti tra i varchi, e un tratto a Nord che presenta erosione subito dopo l'ultimo frangiflutto e un successivo lieve avanzamento. I massimi avanzamenti e arretramenti medi annui sono di circa 1.5 m e 1 m, rispettivamente.



Evolutione dello stato attuale della linea di riva fino al 2025

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

