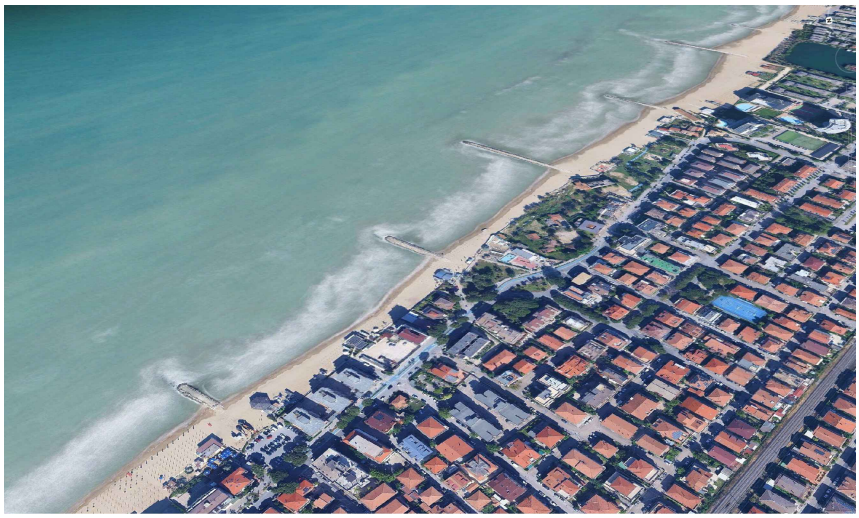
REGIONE ABRUZZO

COMUNE DI SILVI

PROVINCIA DI TERAMO



LAVORI DI COMPLETAMENTO DI PENNELLI E BARRIERE SOMMERSE

(C.U.P.: H32B26003220002)

Progetto Esecutivo

Titolo elaborato :

STUDI SPECIALISTICI DEL PFTE
(METEOMARINO E MORFIDINAMICO)

Committente:
COMUNE DI SILVI MARINA
AREA 2 TECNICA
SERVIZIO LAVORI PUBBLICI E USIP

Responsabile Unico del Progetto:
Ing. Alessandra Ferrante

Progettista:
Ing. Daniela San Lorenzo

Daniela San Lorenzo
Ingegnere Idraulico
email: danielasanlor@gmail.com - pec: daniela.sanlorenzo@ingte.it
P.IVA: 01885620672

ORDINE DEGLI INGEGNERI - TERAMO
1423 SAN LORENZO dott. DANIELA
INGEGNERE CIVILE E AMBIENTALE

Allegato:
R 03

Scala :

Formato foglio:
A4

Data :
Luglio 2026

Visto del Committente:

PROLOGO

Con determinazione n. 1429 del 28/05/2026 del Responsabile, l'Area 2 - Tecnica, del Comune di Silvi ha affidato all' Ing. Daniela San Lorenzo l'incarico di progettazione esecutiva, direzione lavori e coordinamento per la sicurezza per i "Lavori di completamento di pennelli e barriere sommerse (CUP: H32B26003220002)".

In particolare, il Comune di Silvi è stato individuato dalla Regione Abruzzo quale soggetto attuatore dell'intervento denominato Lavori di completamento di "pennelli e barriere sommerse" di somma complessiva pari a 960'000,00 € con Deliberazione di Giunta Regionale nr. 194 del 20/04/2026 "ART.2, L.R. 21/11/2019, N.39 recante "DISPOSIZIONI IN MATERIA DI INTERVENTI PER FRONTEGGIARE LA GRAVE EROSIONE DELLA COSTA NELLA REGIONE ABRUZZO" - PROGRAMMAZIONE INTERVENTI ANNUALITÀ 2026". In data 24/04/2026 è stata sottoscritta la relativa convenzione.

L'intervento in progetto costituisce, nello specifico, uno stralcio funzionale del Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica denominato "D.G.R. 181/21 – D.G.R. 795/22 del 20.12.2022 – Interventi infrastrutturali per la messa in sicurezza ed il rischio idrogeologico – annualità 2021-2022; Legge 30.12.2018 n. 145, art. 1, co. 134-135 – Realizzazione, manutenzione e rifioritura delle scogliere – CUP H37H22000280002" (di seguito PFTE), approvato con Delibera di Giunta Comunale n. 2 del 06/12/2023.

Il Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36 (Codice dei contratti pubblici), all'art. 41, comma 8, prevede che il Progetto Esecutivo sia sviluppato in coerenza con il Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE).

A tal fine, è stato verificato che gli studi specialistici "Studio Meteomarino" e "Studio Morfodinamico", predisposti dal Comune di Silvi e allegati al PFTE, definiscono in modo completo ed esaustivo il quadro conoscitivo dell'area di intervento, con particolare riferimento alle condizioni meteomarine, ai processi idrodinamici e all'evoluzione morfodinamica del litorale, ad un livello di approfondimento pienamente adeguato a supportare la progettazione esecutiva delle opere.

Poiché non sono intervenuti elementi conoscitivi, normativi o progettuali tali da richiederne l'aggiornamento o l'integrazione, nel presente Progetto Esecutivo i suddetti studi specialistici sono integralmente confermati e riportati nelle pagine seguenti, preservandone contenuti, impaginazione e numerazione originali.

REGIONE ABRUZZO

PROVINCIA DI TERAMO



COMUNE DI SILVI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Titolo elaborato :

STUDIO METEOMARINO

23	001	FR	003	- 0	MAR

Committente:

Comune di Silvi
Servizio Direzione e Progettazione Opere Pubbliche
Viale Po' 4 - 64029 Silvi Marina (Te)

IL R.D.P.
Geom. Mauro D'ANTEO

Il progettista:

MODIMAR
Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

Dott. Ing. MARCO MARINI
ORDINE INGEGNERI ROMA N° 14220

Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:
0	Emissione	Milana	Milana	Marini

Dimensioni foglio: A4

Visto del Committente:

INDICE

1. PREMESSA E OBIETTIVI DEL LAVORO 2

2. DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO DEL SITO IN ESAME 3

1.1 PREMESSA E METODOLOGIA SEGUITA 3

1.2 DATI DI MOTO ONDOSO DISPONIBILI E SCELTA DEI DATI DA UTILIZZARE 3

1.3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO 5

1.4 DESCRIZIONE DELLA SERIE STORICA DI MOTO ONDOSO OTTENUTA TRAMITE TECNICHE DI RICOSTRUZIONE ("HINDCASTING") 8

1.5 CONFRONTO CON LE MISURE DELLA BOA DI GIULIANOVA 9

1.5.1 CONFRONTO SINCRONO QUALITATIVO 9

1.5.2 CONFRONTO SINCRONO QUANTITATIVO 13

1.5.3 CONFRONTO TRA I VALORI MASSIMI DI H_s AL COLMO DELLE MAREGGIATE 13

1.6 ANALISI CLIMATICA E STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI MOTO ONDOSO AL LARGO 14

3. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DA LARGO A RIVA 24

1.7 PREMESSA E METODOLOGIA SEGUITA 24

1.8 IDENTIFICAZIONE DELLA PROFONDITÀ DI CHIUSURA 24

1.9 PROPAGAZIONE LARGO RIVA E VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI ONDOSE AL FRANGIMENTO 25

1.10 CALCOLO DEL TRASPORTO SOLIDO COSTIERO LONGITUDINALE 26

1.11 ANALISI ANNUALE DEL TRASPORTO SOLIDO COSTIERO 31

4. ANALISI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE 34

1.12 PREMESSA E METODOLOGIA SEGUITA 34

1.13 DESCRIZIONE DELLA SERIE STORICA DEI LIVELLI MISURATA PRESSO LA STAZIONE RMN DI ORTONA 34

1.14 ANALISI ARMONICA 35

1.15 ANALISI DEL RESIDUO (COMPONENTE METEOROLOGICA) 38

1.16 ANALISI DEL SOVRALZO ASSOCIATO AL MOTO ONDOSO FRANGENTE (WAVE SET-UP) E DELLA RISALITA DEL MOTO ONDOSO (WAVE RUN-UP) 39

1.17 DEFINIZIONE DELLE QUOTE MASSIME DI RISALITA DEL MOTO ONDOSO LUNGO IL LITORALE 40

1.18 VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE CONNESSE A FENOMENI DI EUSTATISMO 41

1. PREMESSA E OBIETTIVI DEL LAVORO

Il Comune di Silvi (TE), con determinazione n.° 43 Sett. LL.PP. del 02/03/2023 del Responsabile di area ing. Valeria ROMMELLI, ha dato incarico alla società Modimar Srl di redigere il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica dei "**Lavori di realizzazione, manutenzione e rifioritura delle scogliere nel Comune di Silvi (TE) - CUP**: **H37H22000280002".**

Per la redazione del presente studio la Modimar Srl si è avvalsa della consulenza del Prof. Paolo De Girolamo.

Le attività descritte nella presente relazione tecnica riguardano:

- la definizione delle caratteristiche statistiche del moto ondoso in acqua profonda a largo del sito in esame (analisi dei valori medi e estremi);
- lo studio della propagazione del moto ondoso largo-riva e la profondità di chiusura del litorale;
- l'analisi delle variazioni del livello medio marino a breve termine finalizzate alla definizione delle quote massime raggiunte dalle onde sul litorale. In particolare questa analisi ha riguardato: (i) la marea astronomica, (ii) la marea meteorologica, (iii) il sovralzo indotto dal moto ondoso frangente e (iv) la risalita del moto ondoso sulla battigia;
- l'analisi delle variazioni del livello medio marino a lungo termine connesse a fenomeni di eustatismo.

2. DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO DEL SITO IN ESAME

1.1 Premessa e metodologia seguita

Allo scopo di definire le caratteristiche del moto ondoso in acqua profonda per il sito oggetto di studio sono state in primo luogo prese in esame tutte le principali fonti di informazione (serie storiche ondametriche) disponibili.

Come descritto in dettaglio nel seguito, oltre alle misure dirette disponibili ed eseguite mediante boe accelerometriche direzionali, si è voluta analizzare una fonte di dati relativamente nuova, ovvero i dati di moto ondoso ricostruiti in ri-analisi (nel seguito indicati anche con il termine “dati di “hindcasting”“) dal Prof. Giovanni Besio del DICCA dell’Università di Genova. Come viene mostrato nel seguito questa fonte di dati risulta particolarmente interessante.

L’analisi delle varie serie storiche di moto ondoso disponibili ha consentito di scegliere quella più affidabile e completa che è stata utilizzata per la redazione del presente studio. Sulla base di tale serie storica, che è risultata quella del DICCA, si sono quindi eseguite le analisi per la definizione delle caratteristiche statistiche del moto ondoso sia medie (clima ondametrico medio annuale e stagionale del paraggio) che estreme.

1.2 Dati di moto ondoso disponibili e scelta dei dati da utilizzare

Per la redazione del presente studio si sono prese in esame tutte le principali fonti di dati di moto ondoso disponibili per il sito in esame le quali consistono in:

a) misure dirette eseguite tramite la boa accelerometrica direzionale dalla stazione ondametrica di Ortona facente parte della RON (Rete Ondametrica Nazionale) gestita dall’ISPRA (serie storica trioraria 1989-2007);
b) misure dirette eseguite dalla Regione Abruzzo tramite la boa accelerometrica direzionale della stazione ondametrica di Giulianova (serie storica semioraria 2006-2008);
c) dati di moto ondoso ricostruiti in ri-analisi (“hindcasting”) dal MeteOcean Group del DICCA (Università di Genova) per un punto posto a largo del sito in esame (serie storica oraria 1979-2016).

Nella Figura 2.1 sono riportate le localizzazioni geografiche dei punti di misura e di ricostruzione sopra indicati.

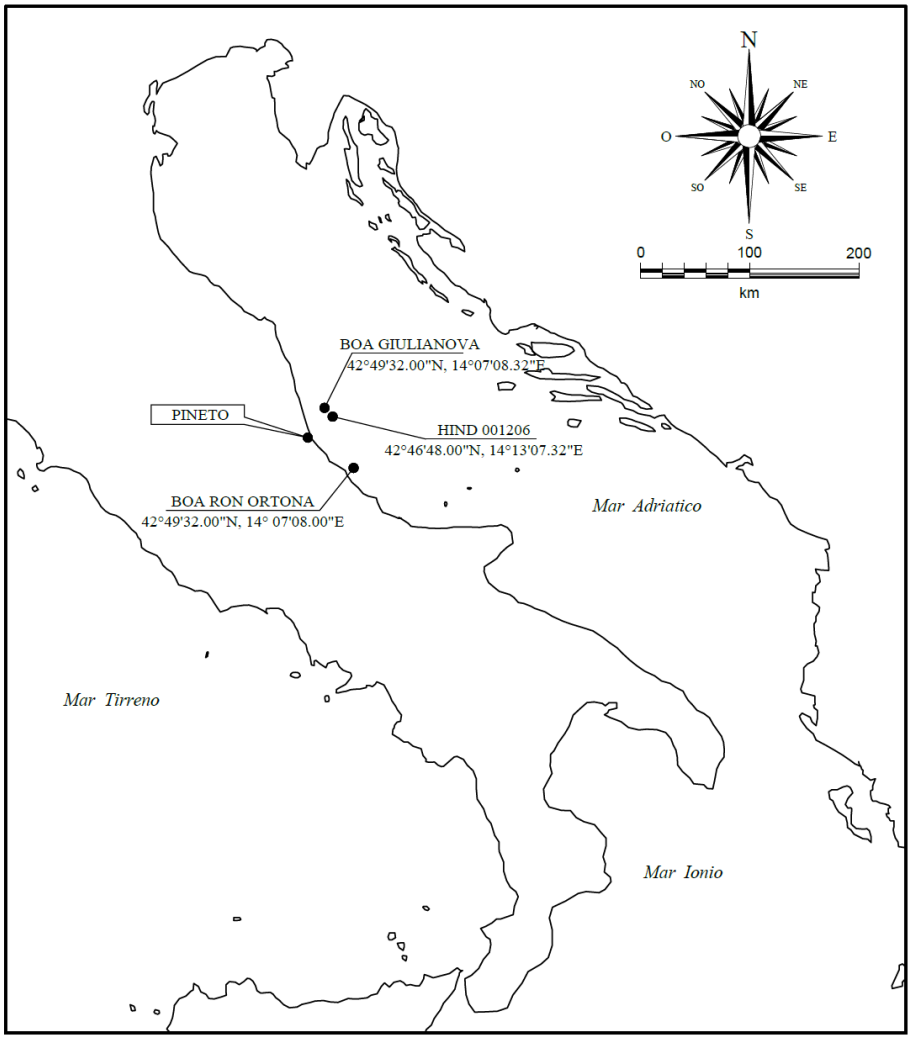


Figura 2.1 - Punti di misura e di ricostruzione del moto ondoso

Oltre ai dati di moto ondoso sopra menzionati, per il sito in esame sono disponibili anche i dati ricostruiti in analisi dall'ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast – Centro Europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine) e i dati provenienti dalle osservazioni dello stato del mare eseguiti a vista dalle navi in transito e forniti dall'Istituto Meteorologico Olandese (dati KNMI - Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut).

Per quanto riguarda i primi (dati ECMWF) si è deciso in questa sede di non prenderli in esame in quanto si ritiene che i dati del DICCA allo stato attuale presentino una qualità superiore, ovvero siano statisticamente più rappresentativi, rispetto a quelli dell' ECMWF per le seguenti ragioni: rispetto alla serie storica dell'ECMWF quella del DICCA è caratterizzata da una maggiore durata temporale complessiva, da una maggiore risoluzione geografica e da un minore intervallo temporale di campionamento, ovvero 1 ora del DICCA contro le 3 ore dell'ECMWF. In particolare il minore tempo di campionamento dei dati del DICCA offre l'indubbio vantaggio di poter cogliere i valori massimi dell'altezza d'onda significativa

raggiunti al culmine delle mareggiate e di poter seguire meglio l'evoluzione temporale delle stesse mareggiate.

Per quanto riguarda i dati del KNMI, diffusamente utilizzati nel passato, ormai devono ritenersi completamente superati dalle altre fonti di dati sia in termini di qualità che di affidabilità.

In sintesi le fonti di dati maggiormente attendibili per il sito in esame sono costituite dalle due serie storiche provenienti dalle misure dirette, (punti *a* e *b* dell'elenco sopra riportato) e quella ricostruite in rianalisi dal DICCA (punto *c* dell'elenco).

Per quanto riguarda le misure dirette relative alla boa RON di Ortona, seppure risultino di estremo interesse per il litorale abruzzese e, in generale, per le coste italiane dell'Adriatico centrale in quanto di fatto costituiscono la serie storica di misure dirette disponibile per questa area di maggiore durata temporale (circa 18 anni), per il sito in esame sono certamente da preferire le altre due fonti di dati che risultano, rispetto alla boa di Ortona, geograficamente più vicine al litorale di Silvi (vedi Figura 2.1).

Pertanto nel seguito sono state prese in esame solo le misure dirette eseguite per mezzo della boa accelerometrica direzionale di Giulianova e i dati di moto ondoso del DICCA.

Queste due fonti di dati sono state analizzate singolarmente e confrontate tra di loro prendendo in esame il periodo di misura comune. Il confronto, come descritto nel seguito, ha mostrato l'elevata affidabilità dei dati del DICCA che di conseguenza sono stati assunti come base di riferimento per la redazione del presente studio.

Per completezza si osserva che nel passato la scrivente si è anche occupata di verificare l'attendibilità delle misure dirette di moto ondoso relative ai siti di Giulianova e di Ortona, riconoscendo la congruità e l'affidabilità di entrambe le fonti di informazioni ondametriche relativamente ai periodi temporali sopra indicati.

1.3 Inquadramento geografico

Il Comune di Silvi si affaccia sul Mar Adriatico e si colloca nella parte centrale dell'Abruzzo, nella provincia di Teramo. In Figura 2.2 e Figura 2.3 viene riportata la localizzazione geografica dell'area in esame a diverse scale spaziali. L'area oggetto di intervento si estende per circa 520 m su un tratto di costa ubicato subito a Nord della foce del Fiume Saline, a circa 3 km dalla stessa foce. Nella parte meridionale dell'intervento si è appena conclusa la realizzazione un sistema di difesa a celle, costituito da pennelli parzialmente sommersi e da barriere debolmente sommerse posizionate a circa 230 m dalla linea di riva, volto a riqualificare e potenziare l'attuale sistema di difesa caratterizzato da pennelli emersi e

barriere sommerse allineate secondo due differenti orientamenti. Nella parte più settentrionale dell'intervento si può osservare un tratto di costa non protetto da alcuna opera di difesa.



Figura 2.2 - Inquadramento geografico



Figura 2.3 - Dettaglio dell'area oggetto di studio

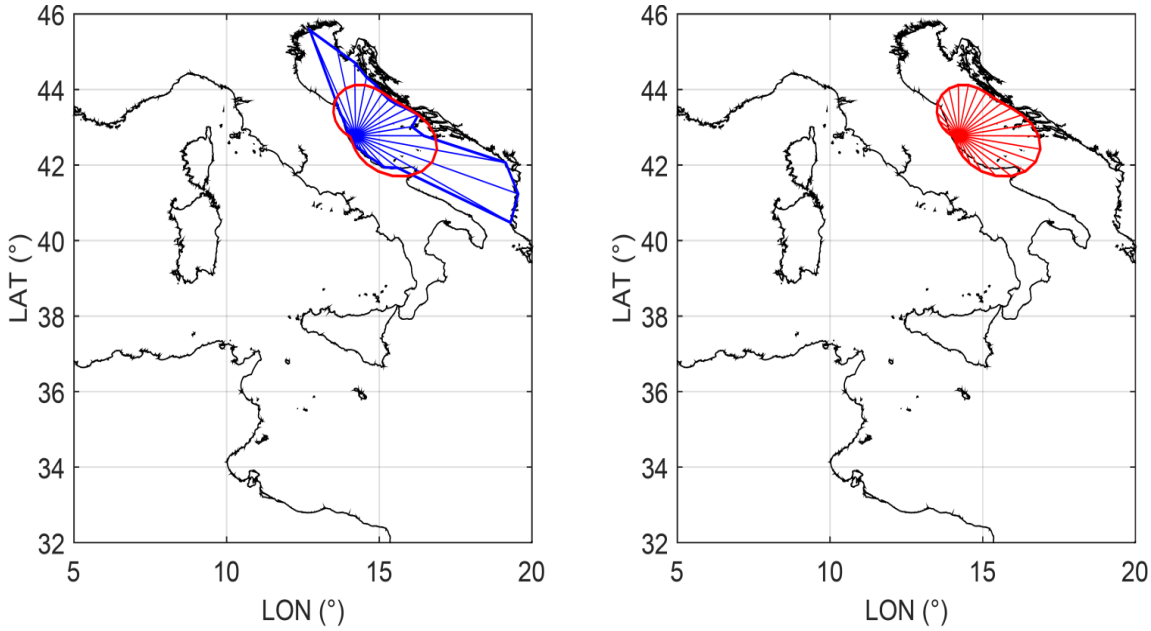


Figura 2.4 - Calcolo dei fetches geografici (pannello di sinistra) ed efficaci (pannello di destra)

1.4 Descrizione della serie storica di moto ondoso ottenuta tramite tecniche di ricostruzione (“hindcasting”)

I dati in rianalisi (“hindcasting”) ottenuti tramite tecniche di ricostruzione sono forniti dal MeteOcean Group del DICCA (Università di Genova). Tale gruppo ha messo a punto un database di serie storiche di moto ondoso ricostruite che copre un periodo di tempo molto ampio (dal 1979 al 2015) per l’intero bacino del Mediterraneo con una risoluzione spaziale pari a 0.1° ed una risoluzione temporale pari a 1 ora. Tale database è unico nel suo genere data la grande accuratezza spaziale delle serie storiche di moto ondoso ricostruite e l’arco temporale delle stesse serie che risulta essere pari a 37 anni. La validazione delle serie storiche ricostruite è stata condotta in maniera rigorosa ed estensiva grazie al confronto con le misure di campo disponibili (si veda Mentaschi et al., 2013a, b, 2015). Tali dati di “hindcasting” inoltre sono stati impiegati con successo in varie applicazioni di ingegneria costiera come ad esempio la stima delle risorse energetiche derivanti dalla conversione dell’energia ondosa in energia elettrica (Besio et al., 2016) e l’analisi degli eventi estremi in numerosi punti del Mar Mediterraneo (Sartini et al., 2015a, b).

Ulteriori informazioni sulle serie di “hindcasting” possono essere reperite su http://www.dicca.unige.it/meteocean/model.html.

La stessa scrivente ha utilizzato di recente questi dati per lo studio di altre opere marittime in Italia constatandone ogni volta l’elevata affidabilità e significatività statistica.

Per quanto riguarda lo studio in oggetto si è analizzata la serie storica di “hindcasting” ottenuta nel nodo di calcolo del data-base del DICCA identificato con la sigla P1206 (42°46'48.00"N, 14°13'7.32"E) riportato in Figura 2.5. Tale punto risulta il più prossimo alla zona oggetto del presente studio. Nella stessa figura viene inoltre riportata la posizione della boa ondametrica direzionale di Giulianova della Regione Abruzzo che, come accennato, ha funzionato tra il 2006 e il 2008, i cui dati sono stati utilizzati per il confronto con i dati di “hindcasting” descritto nella presente sezione della relazione.

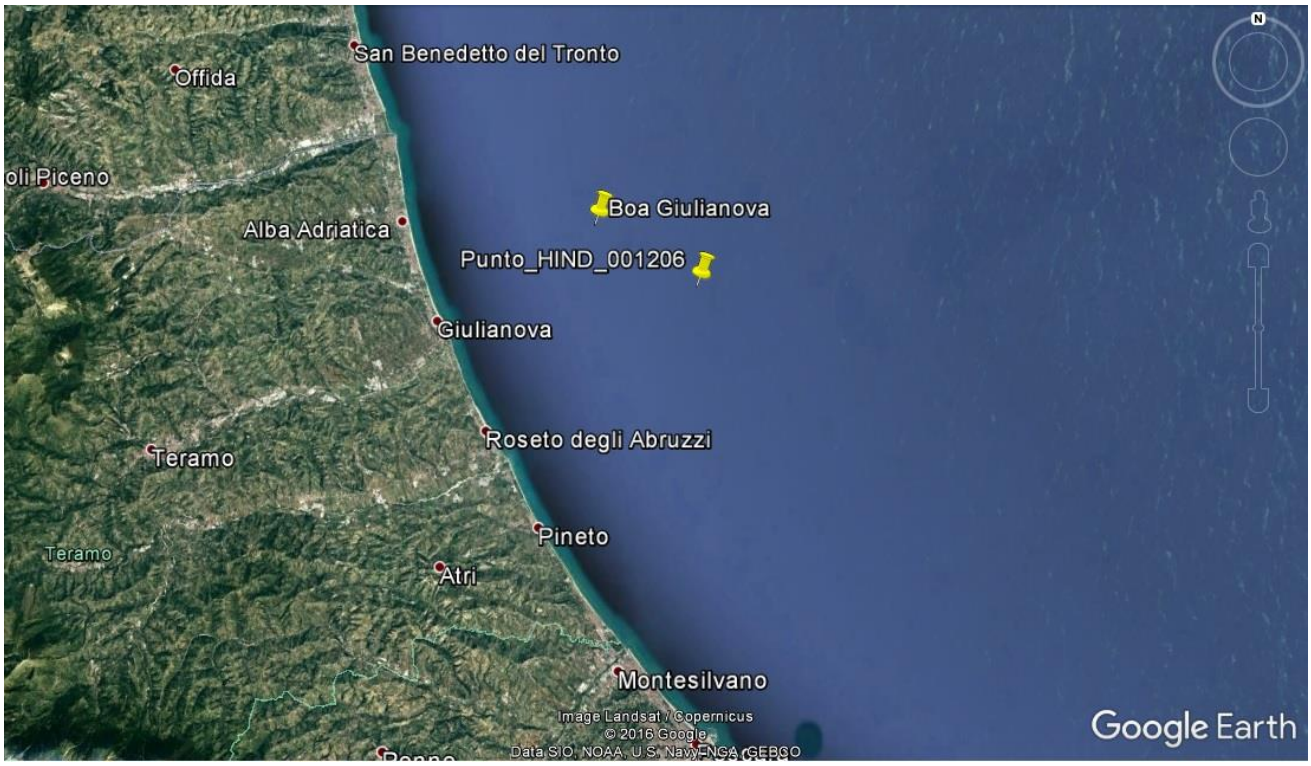


Figura 2.5 - Inquadramento geografico, area di interesse e posizioni del punto di "hindcasting" P1206 e della boa di Giulianova.

1.5 Confronto con le misure della boa di Giulianova

1.5.1 Confronto sincrono qualitativo

Si premette che per confronto sincrono tra le due serie storiche analizzate si intende il confronto tra i parametri sintetici degli stati di mare (H_s, e Dir.) effettuato paragonando i valori forniti dalle serie in corrispondenza dello stesso istante temporale. Ovviamente è praticamente impossibile ottenere che i valori sincroni risultino identici, sia perché hanno origini differenti (una serie storica è misurata mentre l'altra è ricostruita a partire da dati di vento ricostruiti) sia perché il punto di misura e quello di restituzione, seppur vicini tra di loro, non coincidono.

Come descritto nel seguito, il confronto sincrono è stato eseguito in questo paragrafo utilizzando un approccio qualitativo, mentre in quello seguente uno quantitativo.

In Figura 2.6 viene mostrata la serie storica dei valori di altezza d'onda significativa H_s di ""hindcasting"" (in nero). Come anticipato tale serie storica, coprendo un periodo temporale molto esteso pari a 37 anni (dal gennaio del 1979 al dicembre del 2015), è caratterizzata da una elevata significatività statistica. Nella stessa figura è stata inoltre riportata (in rosso) la

serie storica delle misure di altezza d'onda significativa H_s fornita dalla boa di Giulianova (42°49'32.00"N, 14° 7'8.00"E). Si noti che il periodo di sovrapposizione tra le due serie riguarda un arco temporale pari a circa 2 anni e mezzo (dal marzo del 2006 al luglio del 2008). Si può inoltre notare dalla Figura 2.5 che la posizione relativa tra il punto di "hindcasting" e la boa ondametrica permette di assumere un'esposizione geografica sostanzialmente identica tra le due fonti di dati e pertanto di effettuare un confronto diretto tra di esse.

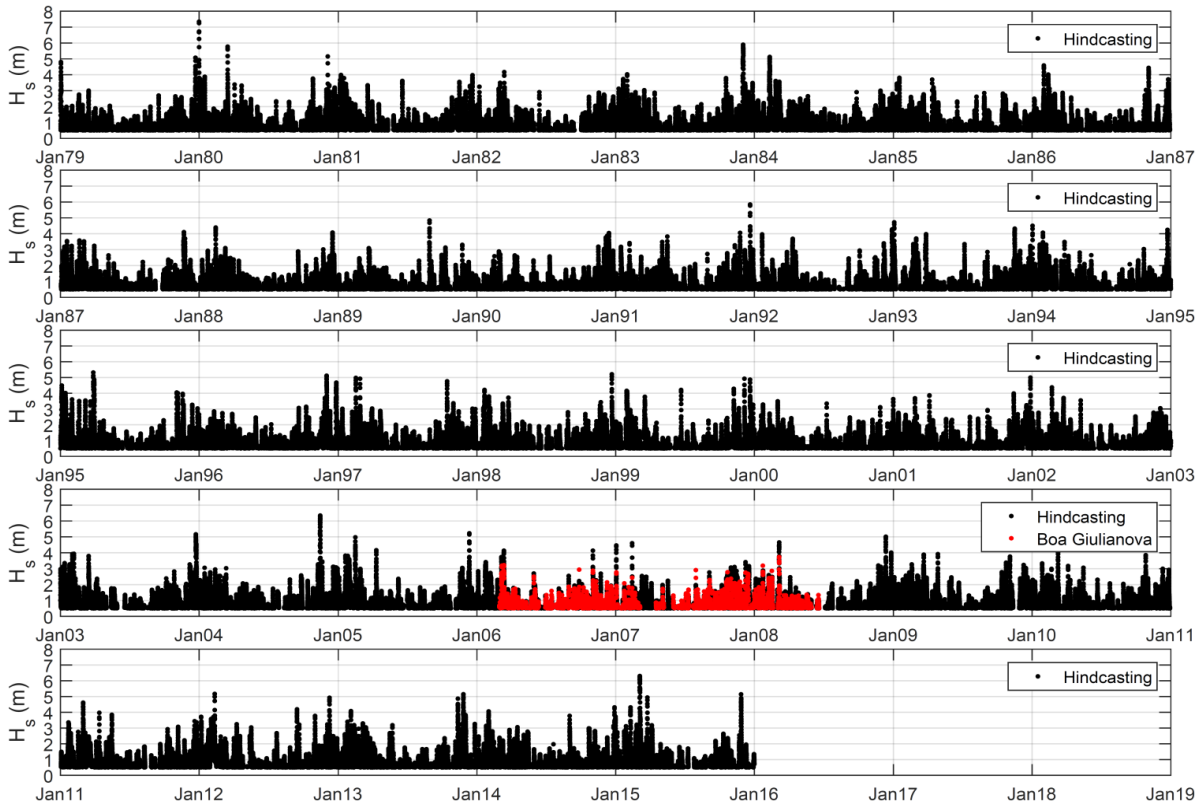


Figura 2.6 - Serie storica di moto ondoso in rianalisi (in nero) e serie storica di moto ondoso misurata dalla boa di Giulianova (in rosso)

In Figura 2.7 e in Figura 2.8 viene mostrato rispettivamente il confronto sincrono (nel solo periodo temporale di sovrapposizione tra le due serie storiche) tra i valori di altezza d'onda significativa e di direzione media di provenienza del moto ondoso ottenuti dai dati di "hindcasting" e dai dati misurati dall'ondametro. Si noti, inoltre, che le serie storiche di "hindcasting" (valori in grigio in Figura 2.7 e in Figura 2.8) sono costituite da dati con cadenza oraria. Poiché i dati misurati dall'ondametro di Giulianova hanno invece cadenza trioraria (valori in rosso in Figura 2.7 e in Figura 2.8) è stato necessario procedere, ai soli fini del confronto, ad un sottocampionamento su base trioraria dei dati di "hindcasting" (valori in nero in Figura 2.7 e in Figura 2.8). Si noti inoltre che tale procedura risulta necessaria per il solo confronto sincrono tra i due campioni di dati.

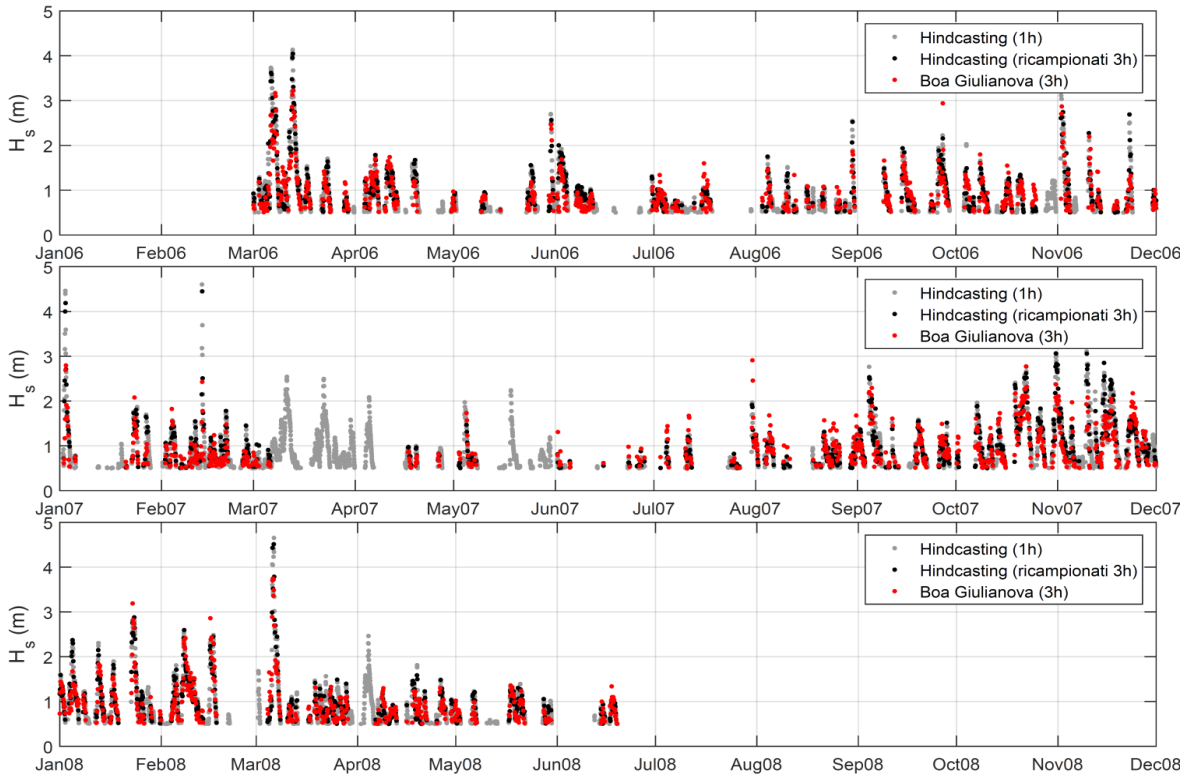


Figura 2.7 - Confronto tra i valori di altezza d'onda in analisi (indicatori grigi e neri) e valori misurati (indicatori rosso).

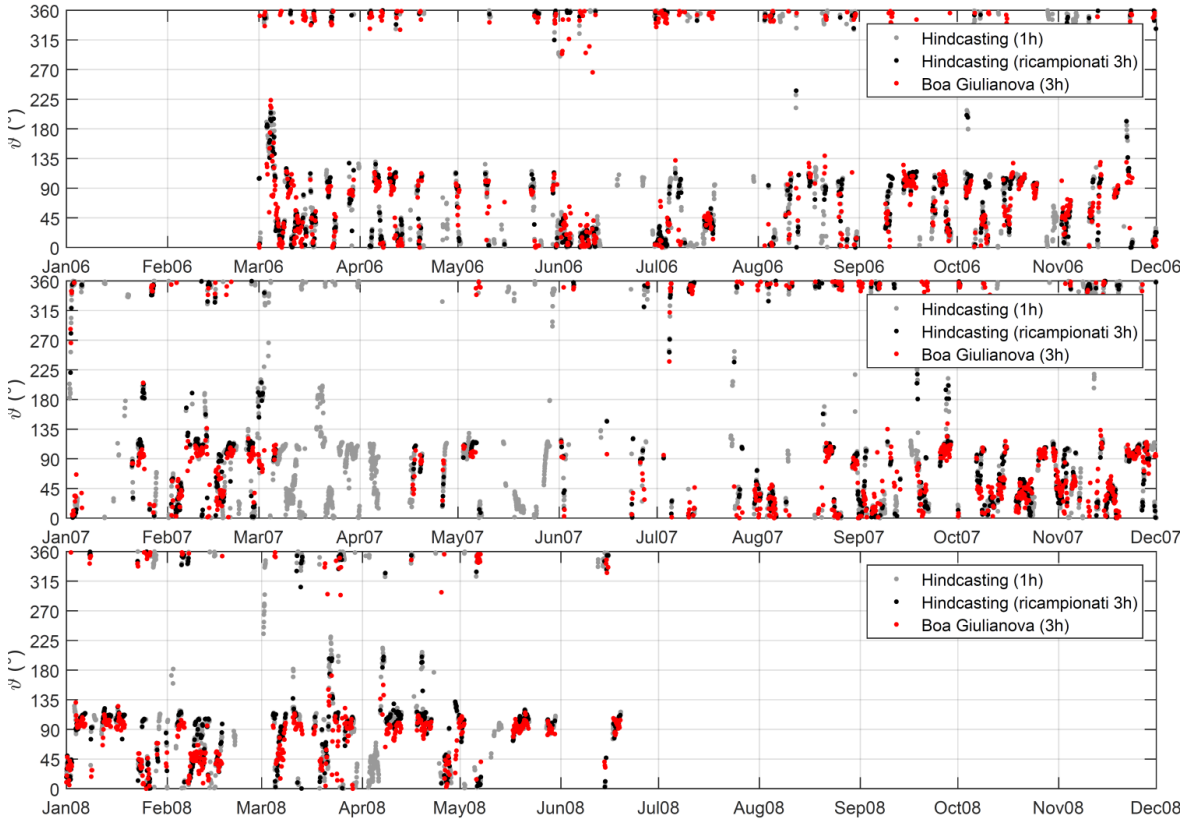


Figura 2.8 - Confronto tra i valori di direzione media di provenienza del moto ondoso in analisi (indicatori grigi e neri) e valori misurati (indicatori rosso).

In Figura 2.9 e in Figura 2.10 vengono riportati sottoforma i diagrammi polari (rose ondametriche) di intensità, frequenza e direzione del moto ondoso calcolati utilizzando i dati misurati (Figura 2.9) e i dati di "hindcasting" (Figura 2.10) relativi al solo periodo temporale di sovrapposizione tra le due serie storiche. Da tali figure risulta osservabile un sostanziale buon accordo (tanto in direzione quanto in intensità) tra i due campioni di dati. In particolare si evidenzia la capacità dei dati di H_s ricostruiti di seguire con una ottima approssimazione le mareggiate misurate dalla boa di Giulianova.

Si noti che tali analisi (così come le analisi descritte nel seguito) sono state effettuate a meno delle "calme" (i.e. Hs < 0.5 m).

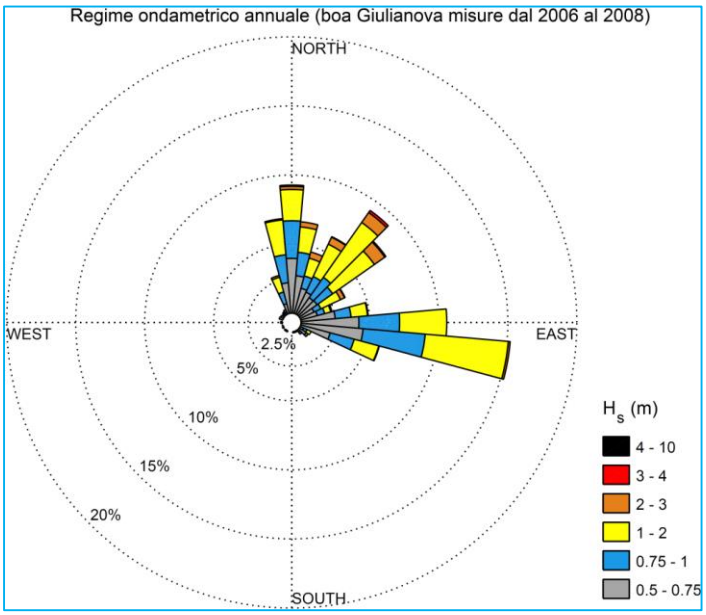


Figura 2.9 - Rosa ondametrica ottenuta dalle misure della boa di Giulianova (dal 2006 al 2008)

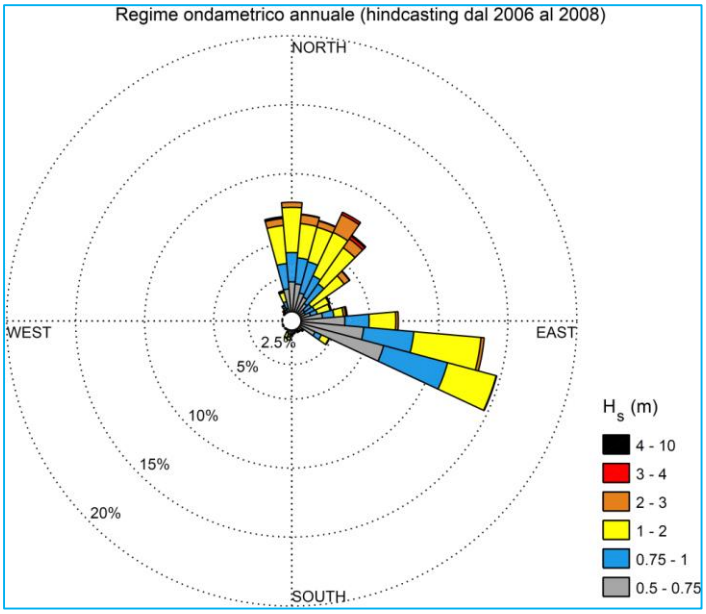


Figura 2.10 - Rosa ondametrica ottenuta dai dati in rianalisi (dal 2006 al 2008)

1.5.2 Confronto sincrono quantitativo

Nel presente sottoparagrafo vengono descritti i risultati del confronto sincrono quantitativo effettuato tra i valori di altezza d'onda significativa ottenuti dalle tecniche di "hindcasting" e gli stessi valori misurati dall'ondametro di Giulianova. In Figura 2.11 viene mostrato il diagramma di confronto (del tipo "scatter plot") tra i due campioni di dati. La linea rossa tratteggiata identifica la retta bisettrice a 45°, mentre la linea blu tratteggiata identifica la retta di miglior interpolazione (ottenuta attraverso lo scarto quadratico medio) tra i due campioni di dati. Osservando tale diagramma risulta possibile rilevare una lieve sovrastima da parte dei dati di "hindcasting". Il grafico di Figura 2.11 (così come i diagrammi mostrati in Figura 2.9 e in Figura 2.10) rende possibile asserire che non è necessario applicare un coefficiente correttivo ai dati di "hindcasting".

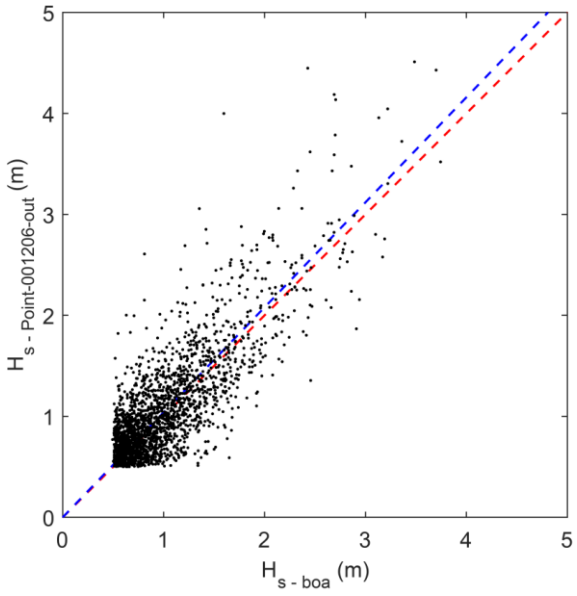


Figura 2.11 - Confronto sincrono tra i valori altezza d'onda in analisi ed i valori misurati dall'ondametro.

1.5.3 Confronto tra i valori massimi di H_s al colmo delle mareggiate

Nel presente sottoparagrafo vengono descritti i risultati del confronto asincrono eseguito utilizzando per ciascuna serie storica i soli valori di H_s raggiunti al culmine di ciascuna mareggiata.

In relazione a tale procedura di confronto è importante descrivere il metodo che si è seguito per selezionare i suddetti valori massimi di H_s raggiunti al colmo delle mareggiate utilizzati per eseguire il confronto asincrono. La procedura di selezione consiste nell'identificazione, attraverso il metodo denominato "dei picchi sopra soglia" o "metodo POT", dei valori di altezza d'onda al colmo di ciascuna mareggiata, omogenei e statisticamente indipendenti,

rilevabili nella serie storica di altezze d'onda misurate dall'ondametro di Giulianova (altezza d'onda di soglia pari a 2.0 m). Successivamente si è proceduto a identificare, all'interno di finestre temporali di durata pari a 48 ore, centrate sui singoli eventi identificati precedentemente con il metodo POT, il massimo assoluto dei valori di altezza d'onda significativa rilevabile nella serie di "hindcasting" all'interno di ciascuna finestra temporale.

In Figura 2.12 viene mostrato il diagramma di confronto (del tipo "scatter plot") tra i due campioni di dati così selezionati. La linea rossa tratteggiata identifica la retta bisettrice a 45°, mentre la linea blu tratteggiata identifica la retta di miglior interpolazione (ottenuta attraverso lo scarto quadratico medio) tra i due campioni di dati. Osservando tale diagramma risulta possibile rilevare una lieve sovrastima (pari circa al 12%) dei valori di H_s registrati al culmine delle mareggiate da parte dei dati ricostruiti.

In conclusione, poiché i dati ricostruiti forniti dal DICCA risultano attendibili e mediamente più conservativi rispetto a quelli misurati, si è deciso di utilizzare tali dati per le analisi seguenti.

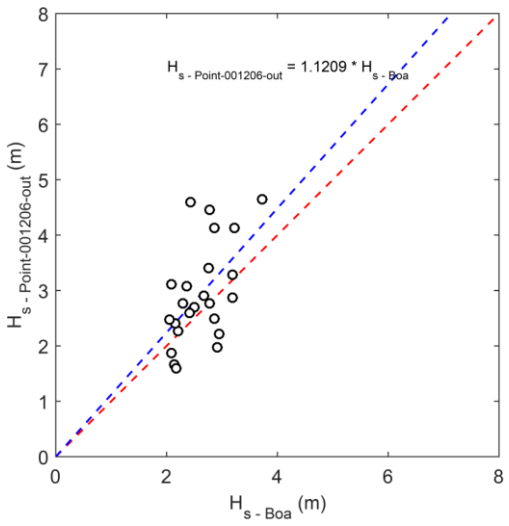


Figura 2.12 - Confronto dei valori massimi di altezza d'onda in analisi e misurati dall'ondametro.

1.6 Analisi climatica e statistica dei valori estremi di moto ondoso al largo

Nel presente paragrafo vengono mostrati i risultati dell'analisi climatica e della statistica degli eventi estremi (eseguita rispettivamente per i due settori di traversia Nord-Nord Est ed Est-Sud Est) effettuate sui dati di "hindcasting".

In Figura 2.13 viene mostrata la rosa ondametrica annuale. Tale diagramma, ottenuto utilizzando i dati dell'intera serie storica di "hindcasting", mostra chiaramente la presenza di due settori di traversia, rispettivamente:

- Settore di Nord-Nord Est (330°N-60°N);
- Settore di Est-Sud Est (60°N-150°N).

La Tabella 2.1 riporta sottoforma numerica la rosa ondametrica climatica mostrata in Figura 2.13.

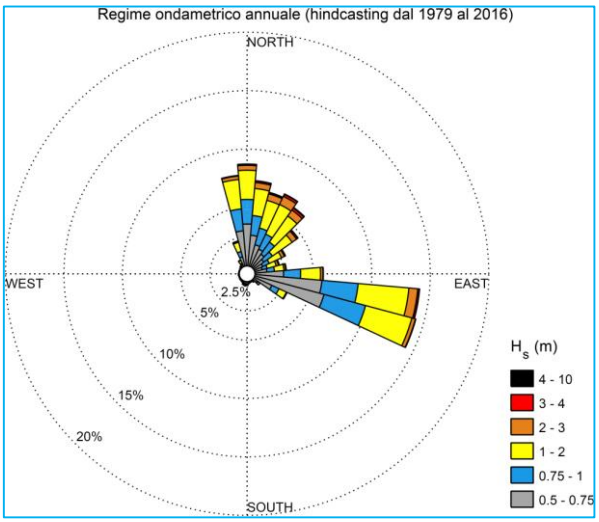


Figura 2.13 - Rosa ondametrica ottenuta dai dati in rianalisi (dal 1979 al 2016)

Tabella 2.1 - Tabella climatica ottenuta dai dati in rianalisi (dal 1979 al 2016).

DIR\H	0.5 - 0.75 m	0.75 - 1 m	1 - 2 m	2 - 3 m	3 - 4 m	4 - 10 m
0° - 10°	3.153	1.876	2.359	0.465	0.124	0.032
10° - 20°	2.185	1.595	2.265	0.531	0.112	0.037
20° - 30°	1.779	1.470	2.710	0.644	0.132	0.042
30° - 40°	1.554	1.322	2.799	0.746	0.210	0.051
40° - 50°	1.234	1.124	2.478	0.559	0.163	0.065
50° - 60°	0.910	0.757	1.578	0.355	0.098	0.034
60° - 70°	0.691	0.526	0.943	0.243	0.073	0.021
70° - 80°	0.742	0.485	0.726	0.167	0.051	0.011
80° - 90°	1.518	0.920	1.116	0.152	0.047	0.003
90° - 100°	3.669	2.103	2.785	0.403	0.053	0.009
100° - 110°	7.144	4.020	5.295	0.723	0.121	0.031
110° - 120°	3.893	2.061	1.843	0.106	0.013	0.000
120° - 130°	0.670	0.293	0.395	0.049	0.001	0.000
130° - 140°	0.223	0.069	0.056	0.008	0.000	0.000
140° - 150°	0.093	0.028	0.019	0.000	0.000	0.000
150° - 160°	0.085	0.028	0.011	0.000	0.000	0.000
160° - 170°	0.103	0.027	0.013	0.000	0.000	0.000
170° - 180°	0.183	0.049	0.021	0.000	0.001	0.000
180° - 190°	0.240	0.082	0.068	0.003	0.000	0.000
190° - 200°	0.192	0.097	0.074	0.007	0.000	0.000
200° - 210°	0.101	0.063	0.077	0.004	0.000	0.000
210° - 220°	0.054	0.038	0.034	0.001	0.000	0.000
220° - 230°	0.050	0.040	0.035	0.004	0.000	0.000
230° - 240°	0.051	0.023	0.028	0.000	0.000	0.000
240° - 250°	0.034	0.011	0.022	0.002	0.000	0.000
250° - 260°	0.049	0.022	0.011	0.001	0.000	0.000
260° - 270°	0.055	0.017	0.014	0.002	0.000	0.000
270° - 280°	0.041	0.018	0.007	0.003	0.001	0.000
280° - 290°	0.030	0.013	0.016	0.004	0.000	0.000
290° - 300°	0.032	0.022	0.013	0.001	0.000	0.000
300° - 310°	0.034	0.015	0.028	0.006	0.000	0.000
310° - 320°	0.051	0.034	0.044	0.006	0.000	0.000
320° - 330°	0.108	0.081	0.144	0.019	0.003	0.000
330° - 340°	0.350	0.233	0.427	0.053	0.007	0.001
340° - 350°	1.822	1.093	1.629	0.195	0.032	0.002
350° - 360°	3.665	2.210	2.771	0.377	0.070	0.006

L’analisi di questi dati mostra chiaramente che le coste abruzzesi, ovvero le coste italiane dell’Adriatico centrale, sono esposte a stati di mare determinati da due genesi meteorologiche distinte.

La prima è causata dai venti settentrionali, anche detti di Bora, dovuti all’aria artica continentale, relativamente densa e secca, che in particolari condizioni meteorologiche e spesso durante la stagione invernale scende in Adriatico e lo attraversa generando violente mareggiate lungo le coste abruzzesi. Tali eventi meteorologici in alcuni casi determinano cospicue precipitazioni (anche di origine nevosa) lungo le coste dell’Adriatico a causa dell’effetto orografico indotto dagli Appennini sulle masse d’aria. Si osserva che tali masse d’aria, in origine a basso contenuto di umidità, aumentano la loro umidità attraversando l’Adriatico.

La seconda riguarda i venti di Scirocco provenienti da Sud-Est, determinati dalle aree cicloniche di origine atlantica che si spostano in Mediterraneo da Ovest verso Est. Lo Scirocco, caratterizzato da aria relativamente caldo-umida di origine africana, tende ad incanalarsi, intensificandosi, in Adriatico a causa della presenza degli Appennini e delle Alpi Dinariche che delimitano longitudinalmente le coste dello stesso bacino. I venti di Scirocco generano moto ondoso proveniente in asse all’Adriatico dalla stessa direzione (Sud-Est). Tuttavia avvicinandosi alle coste abruzzesi il moto ondoso tende a ruotare la propria direzione di provenienza verso Est-Sud-Est come mostrato chiaramente dalla Figura 2.13. La causa di tale rotazione è dovuta principalmente all’ “effetto schermo” operato dalla penisola del Gargano che determina la rotazione del vento verso Est e quindi anche della direzione di provenienza delle onde. Generalmente in Adriatico il vento di Scirocco determina anche un sensibile aumento del livello medio marino (marea meteorologica) il quale risulta particolarmente significativo e rilevante in Adriatico rispetto al resto del Mediterraneo. Infatti l’Adriatico a causa della sua conformazione geografica definibile a “cul de sac” e della presenza di una estesa piattaforma continentale (i fondali tendono a decrescere sensibilmente spostandosi verso nord lungo il suo asse) risulta particolarmente sensibile al fenomeno noto con il termine di “sovralzo di tempesta”, ovvero durante le mareggiate l’azione del vento sulla superficie marina genera un trasporto di massa marina lungo la sua direzione di azione determinando un incremento temporaneo del livello del mare in prossimità delle coste. L’incremento del livello del mare, a parità di velocità del vento, è tanto maggiore quanto maggiore è l’estensione della piattaforma continentale. In Nord Adriatico e in particolare lungo i litorali veneti dove questo fenomeno assume i valori massimi rispetto al resto dell’Adriatico, il fenomeno è noto con il termine di “acqua alta” e può frequentemente superare il metro di altezza. Tale fenomeno, anche se meno rilevante, è comunque presente anche in Adriatico centrale e può perdurare nel tempo anche per alcuni giorni a causa dei

fenomeni di risonanza (sessa) indotti dall'azione del vento sul bacino Adriatico. Queste oscillazioni del livello del mare sono in grado di incrementare l'azione esercitata dal moto ondoso sui litorali e in alcuni casi possono influenzare anche il deflusso a mare degli eventi di piena dei corsi d'acqua causandone fenomeni di rigurgito verso monte.

In sintesi l'analisi della Figura 2.13, mostra chiaramente che il litorale in questione è esposto a condizioni ondametriche riconducibili a due genesi meteorologiche distinte ciascuna inquadrabile in uno dei due settori di traversia in precedenza indicati. Pertanto l'analisi statistica a lungo termine (analisi degli eventi estremi) è stata condotta separatamente per ciascuno dei due settori di traversia individuati.

Si ricorda che in statistica i dati oggetto di studio devono rispondere al principio di omogeneità. Tale principio nel caso dell'analisi di valori estremi dei valori massimi assunti dall'Hs durante le mareggiate (valori al colmo delle mareggiate) può sintetizzarsi nell'assumere che gli stati di mare oggetto di analisi siano caratterizzati da una stessa genesi meteorologica.

Identificati i settori di traversia grazie all'analisi climatica è stato pertanto possibile effettuare l'analisi degli eventi estremi. L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT= Peaks Over Treshold) per ciascuno dei due settori di traversia precedentemente identificati.

La Figura 2.14, la Figura 2.15 e la Figura 2.16 mostrano rispettivamente la procedura di selezione degli eventi estremi (altezza d'onda di soglia pari a 3.8 m), lo "scatter plot" degli eventi estremi e l'andamento dell'altezza d'onda in funzione del tempo di ritorno per il settore di traversia Nord-Nord Est (330°N-60°N). I risultati mostrati in Figura 2.16 vengono inoltre proposti in Tabella 2.3.

Analogamente la Figura 2.17, la Figura 2.18 e la Figura 2.19 mostrano rispettivamente la procedura di selezione degli eventi estremi (altezza d'onda di soglia pari a 3.1 m), lo scatter plot degli eventi estremi e l'andamento dell'altezza d'onda in funzione del tempo di ritorno per il settore di traversia Est-Sud Est (60°N-150°N). I risultati mostrati in Figura 2.19 vengono inoltre proposti in Tabella 2.5.

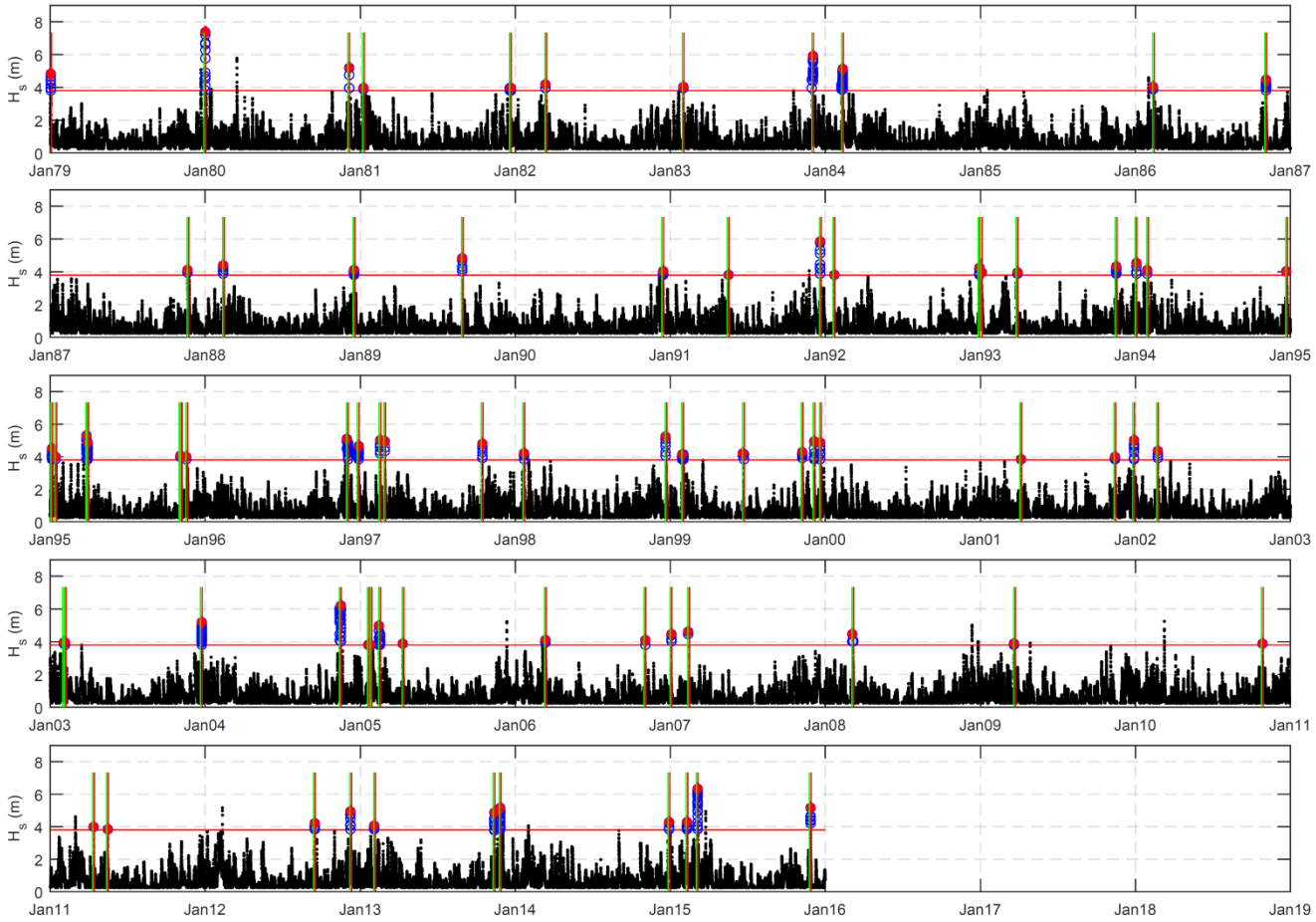


Figura 2.14 - Identificazione degli eventi estremi per il settore di traversia Nord (330°N-60°N) attraverso il metodo POT

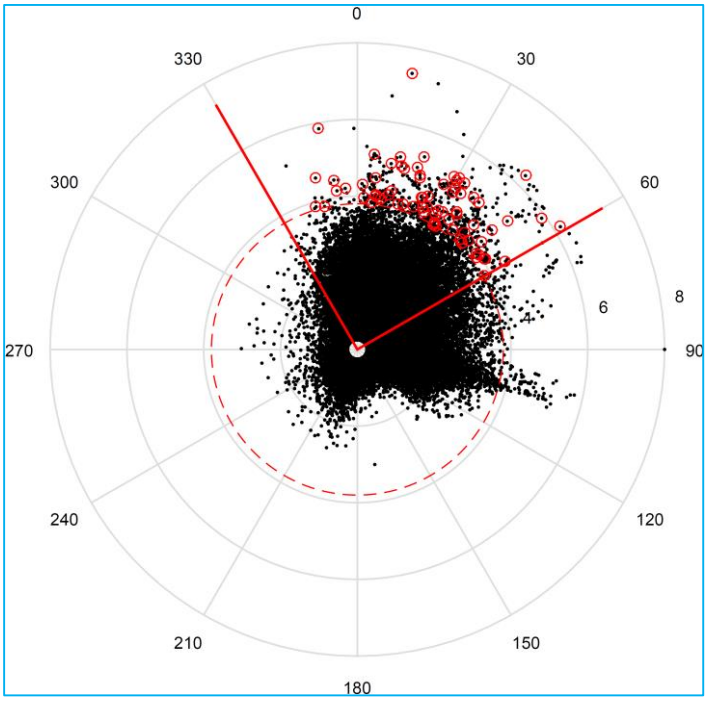


Figura 2.15 - Scatter plot degli eventi estremi per il settore di traversia Nord (330°N-60°N)

Tabella 2.2 - Settore di traversia (330°N-60°N) – Stati di mare al culmine delle mareggiate selezionati per l'analisi statistica degli eventi estremi di Hs.

Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir. mare (°N)
31-Dec-1979 15:00:00	7,34	10,3	11,2
05-Mar-2015 12:00:00	6,301	10,2	44
14-Nov-2004 16:00:00	6,18	10,8	58,8
02-Dec-1983 10:00:00	5,895	10,2	54,5
20-Dec-1991 20:00:00	5,844	9,3	350,1
28-Mar-1995 09:00:00	5,318	9,4	19,2
21-Dec-1998 23:00:00	5,207	9,5	30,8
23-Dec-2003 06:00:00	5,161	9,2	32,7
04-Dec-1980 11:00:00	5,156	9,5	29,3
26-Nov-2013 07:00:00	5,146	9,1	12,6
27-Nov-2015 00:00:00	5,141	9,3	49,4
10-Feb-1984 10:00:00	5,125	9,4	5
01-Dec-1996 07:00:00	5,116	9,1	30,5
27-Dec-2001 12:00:00	4,997	9,4	18,2
16-Feb-1997 07:00:00	4,977	9,3	37,3
15-Feb-2005 00:00:00	4,975	9,2	39,5
05-Dec-1999 19:00:00	4,925	9,1	10,3
27-Feb-1997 10:00:00	4,924	8,7	13,5
09-Dec-2012 00:00:00	4,924	9,7	31,4
30-Mar-1995 14:00:00	4,87	9,2	14,7
20-Dec-1999 17:00:00	4,867	9,2	27,4
11-Nov-2013 19:00:00	4,863	9,3	33,5
29-Aug-1989 06:00:00	4,836	9,2	19,7
02-Jan-1979 05:00:00	4,802	9,2	31,1
14-Oct-1997 12:00:00	4,762	9,2	20,1
26-Dec-1996 22:00:00	4,678	9,4	48,3
13-Feb-2007 08:00:00	4,602	7,7	346,3
02-Jan-1994 01:00:00	4,504	9,4	6,2
04-Jan-1995 11:00:00	4,493	9,3	59,2
02-Jan-2007 17:00:00	4,461	9,2	352,1
03-Nov-1986 14:00:00	4,436	9,1	43
06-Mar-2008 00:00:00	4,429	9,1	35,5
13-Feb-1988 14:00:00	4,393	8,9	24,8
22-Feb-2002 00:00:00	4,375	8,6	36,1
16-Nov-1993 06:00:00	4,325	8,5	1,6
29-Dec-2014 00:00:00	4,312	9,1	23,3
09-Feb-2015 05:00:00	4,312	8,5	22,6
07-Nov-1999 21:00:00	4,287	8,5	48,9

Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir. mare (°N)
28-Dec-1992 06:00:00	4,23	8,5	31,6
20-Jan-1998 22:00:00	4,214	9,1	12
22-Jun-1999 05:00:00	4,213	8,3	355,7
14-Sep-2012 12:00:00	4,19	8,5	30
13-Mar-1982 20:00:00	4,172	9,2	352,7
30-Jan-1999 00:00:00	4,156	9,3	35,2
02-Nov-2006 03:00:00	4,136	8,4	42,4
12-Mar-2006 23:00:00	4,134	9,1	25,9
21-Nov-1987 20:00:00	4,105	8,5	11,4
16-Dec-1988 23:00:00	4,079	8,9	54,5
03-Feb-2013 10:00:00	4,077	8,7	29,9
29-Jan-1994 08:00:00	4,07	9,3	6,6
02-Nov-1995 23:00:00	4,051	8,5	24,7
14-Dec-1990 08:00:00	4,047	9,1	45,3
23-Dec-1994 04:00:00	4,047	8,2	54,5
31-Jan-1983 08:00:00	4,029	9	6,7
12-Feb-1986 09:00:00	4,016	8,9	52,3
14-Jan-1995 03:00:00	4,014	8,3	21,2
06-Nov-1995 00:00:00	4,004	8,6	7,6
08-Jan-1981 04:00:00	3,989	8,4	38,4
13-Nov-2001 14:00:00	3,987	9,2	25,6
20-Dec-1981 08:00:00	3,976	8,9	51,3
27-Mar-1993 21:00:00	3,976	8,4	8,7
13-Apr-2011 05:00:00	3,97	8,3	17,5
18-Nov-1995 17:00:00	3,965	8,3	2,5
05-Feb-2003 09:00:00	3,938	8,7	15,8
03-Jan-1993 00:00:00	3,923	8,9	52,5
01-Feb-2003 10:00:00	3,921	8,9	43
11-Apr-2005 06:00:00	3,892	8,9	44,3
21-Mar-2009 20:00:00	3,881	8,4	31,1
05-Apr-2001 18:00:00	3,872	8,6	343,9
27-Oct-2010 00:00:00	3,851	9	31,3
16-May-2011 05:00:00	3,843	8,3	5,7
21-Jan-1992 11:00:00	3,828	8,5	59,8
17-May-1991 00:00:00	3,826	8,8	347,1
19-Jan-2005 20:00:00	3,818	8,4	32,6
26-Jan-2005 03:00:00	3,807	8,6	31,1

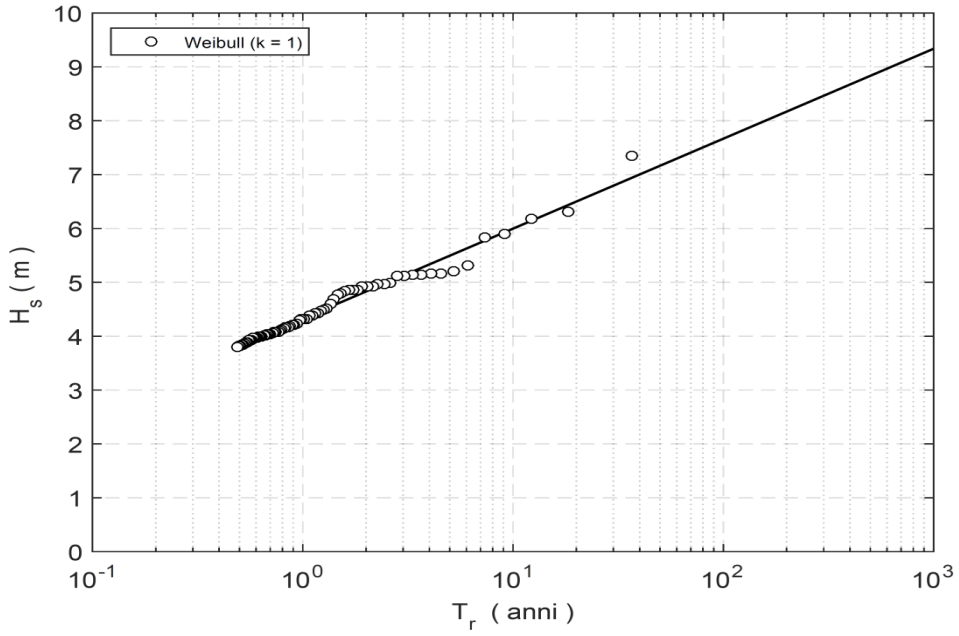


Figura 2.16 - Andamento dell'altezza d'onda in funzione del tempo di ritorno per il settore di traversia Nord (330°N-60°N)

Tabella 2.3 - Andamento dell'altezza d'onda in funzione del tempo di ritorno per il settore di traversia Nord (330°N-60°N)

TR (anni)	Hs (m)
1	4.33
10	6.00
20	6.50
50	7.16
100	7.67
1000	9.34

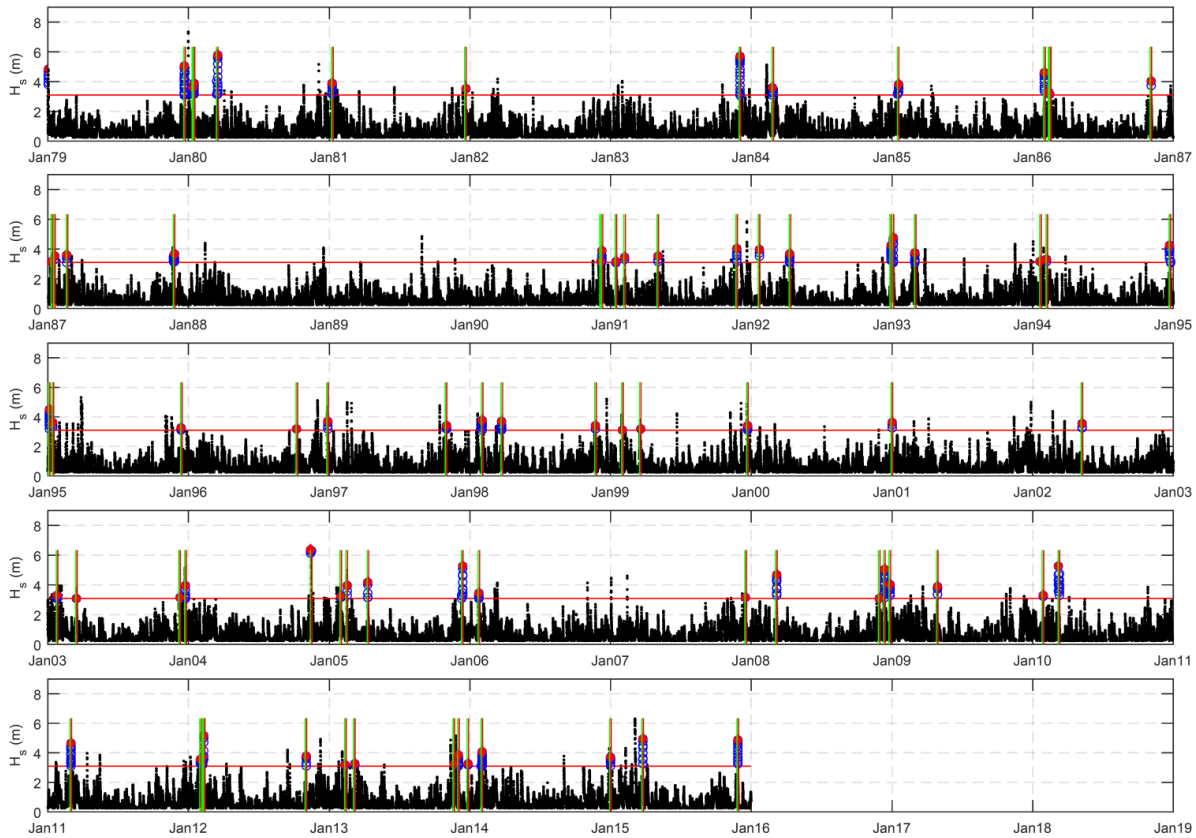


Figura 2.17 - Identificazione degli eventi estremi per il settore di traversia Est (60°N-150°N) attraverso il metodo POT

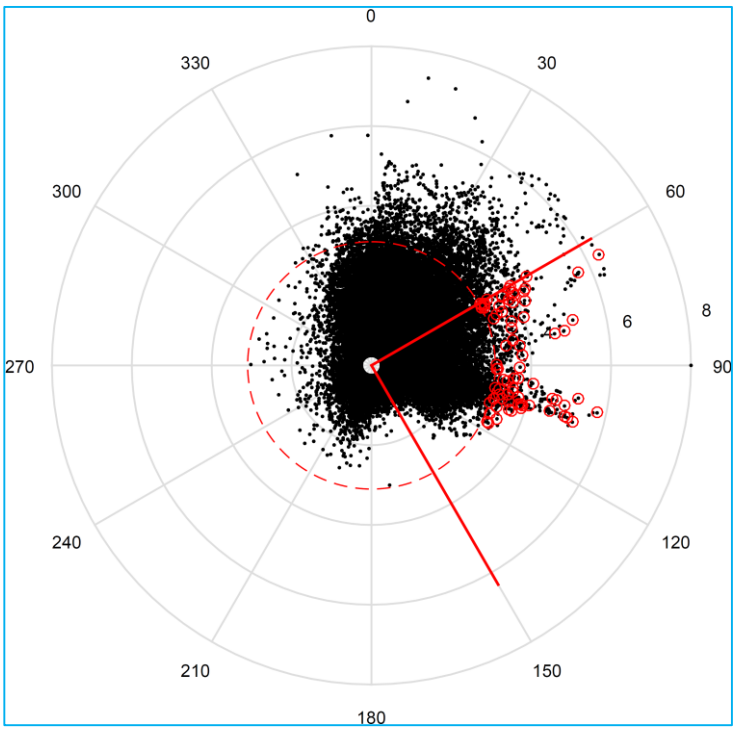


Figura 2.18 - Scatter plot degli eventi estremi per il settore di traversia Est (60°N-150°N)

Tabella 2.4 - Settore di traversia (60°N-150°N) – Stati di mare al culmine delle mareggiate selezionati per l'analisi statistica degli eventi estremi di Hs.

Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir_mare (°N)
14-Nov-2004 14:00:00	6,344	10,9	64
15-Mar-1980 22:00:00	5,773	11	101,9
02-Dec-1983 19:00:00	5,686	10,4	65,8
10-Mar-2010 00:00:00	5,245	9,6	99
12-Dec-2005 00:00:00	5,226	10,1	105,8
10-Feb-2012 21:00:00	5,166	9,4	77,3
22-Dec-1979 05:00:00	5,076	10	105
12-Dec-2008 00:00:00	5,012	10,2	104,9
25-Mar-2015 10:00:00	4,938	9,2	101,9
27-Nov-2015 08:00:00	4,895	9,9	79,8
03-Jan-1993 02:00:00	4,722	10,8	100,8
06-Mar-2008 10:00:00	4,651	9,6	80,2
01-Mar-2011 17:00:00	4,612	9,2	100,5
31-Jan-1986 19:00:00	4,587	9,5	104,2
04-Jan-1995 12:00:00	4,487	9,3	60,3
28-Dec-1992 12:00:00	4,28	9,3	63,5
23-Dec-1994 05:00:00	4,249	8,4	64
11-Apr-2005 05:00:00	4,162	8,8	67
24-Nov-1991 10:00:00	4,061	8,5	96,4
31-Jan-2014 20:00:00	4,056	9,1	104,1
26-Dec-2008 03:00:00	4,012	8,5	72,3
03-Nov-1986 17:00:00	3,995	8,7	62,8
15-Feb-2005 09:00:00	3,988	9,3	60,2
21-Jan-1992 10:00:00	3,965	8,6	64
24-Dec-2003 14:00:00	3,935	9,6	61
27-Apr-2009 23:00:00	3,917	8,3	104,8
08-Jan-1981 21:00:00	3,896	9	65,9
15-Jan-1980 19:00:00	3,881	9,4	105,9
10-Dec-1990 00:00:00	3,879	8,5	104,6
01-Dec-2013 22:00:00	3,823	8,5	64,3
16-Jan-1985 16:00:00	3,812	9,1	104,6
01-Feb-1998 13:00:00	3,796	8,9	86,2
31-Oct-2012 22:00:00	3,773	8,4	102,3
31-Dec-2014 14:00:00	3,725	9	82,6
24-Mar-1998 18:00:00	3,723	8,2	90,7
27-Dec-1996 06:00:00	3,717	9,1	61,7
01-Mar-1993 20:00:00	3,704	9,2	108,2
24-Nov-1987 19:00:00	3,698	9,2	94,9
10-Apr-1992 23:00:00	3,688	8,4	72,6
07-Feb-2012 12:00:00	3,688	9,1	62,2
31-Dec-2000 11:00:00	3,633	8,3	75,2
26-Feb-1984 05:00:00	3,612	7,9	107,6
14-Jan-1995 11:00:00	3,602	8,9	79,7
12-Jan-1980 17:00:00	3,595	8,5	100,9
19-Feb-1987 23:00:00	3,576	8,5	98,8
01-Feb-2012 10:00:00	3,576	8,3	95,4
08-May-2002 19:00:00	3,545	8,3	104,8
18-Jan-1987 04:00:00	3,54	8,4	67,6
20-Dec-1981 10:00:00	3,51	9	65,2
03-May-1991 11:00:00	3,487	8,5	102,1
22-Nov-1998 22:00:00	3,435	9,1	96,5
06-Feb-1991 14:00:00	3,416	7,6	113,1
24-Jan-2006 03:00:00	3,413	9	81,5
22-Dec-1999 06:00:00	3,38	8,3	68,1
30-Oct-1997 22:00:00	3,368	9	104,2
12-Feb-1986 17:00:00	3,338	8,2	60,2
27-Jan-2010 07:00:00	3,332	8,2	95,9
06-Feb-1994 19:00:00	3,316	8,3	108,5
06-Mar-2013 18:00:00	3,292	8,5	102,8
13-Dec-1995 17:00:00	3,27	10,1	100,6
25-Jan-2003 03:00:00	3,268	8,3	68,8
26-Dec-2013 08:00:00	3,259	7,4	116,3
20-Nov-2013 00:00:00	3,225	7,2	116,2
30-Jan-2005 09:00:00	3,219	8,3	61,7
19-Mar-1999 06:00:00	3,216	8,1	61
11-Feb-2013 20:00:00	3,188	8,1	105,2
11-Jan-1987 04:00:00	3,185	7,7	112,2
15-Jan-1991 00:00:00	3,18	7,8	91,3
06-Dec-1990 12:00:00	3,168	8,3	62,7
20-Jan-1994 22:00:00	3,163	7,5	61,1
17-Dec-2007 20:00:00	3,161	8,2	105,2
08-Oct-1996 14:00:00	3,147	8,1	100
09-Dec-2003 00:00:00	3,136	8,2	89,6
15-Feb-1986 15:00:00	3,127	8,3	91,6
01-Feb-1999 00:00:00	3,127	8,1	60,1
16-Mar-2003 10:00:00	3,118	7,9	62,5
28-Nov-2008 16:00:00	3,117	7,9	107,3

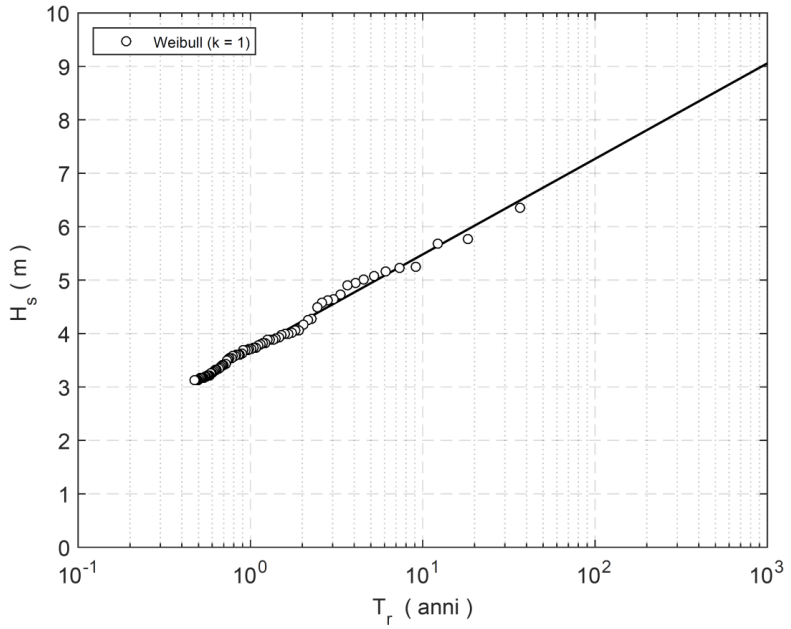


Figura 2.19 - Andamento dell'altezza d'onda in funzione del tempo di ritorno per il settore di traversia Est (60°N-150°N)

Tabella 2.5 - Andamento dell'altezza d'onda in funzione del tempo di ritorno per il settore di traversia Est (60°N-150°N)

TR (anni)	Hs (m)
1	3.69
10	5.48
20	6.02
50	6.73
100	7.27
1000	9.06

3. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DA LARGO A RIVA

1.7 Premessa e metodologia seguita

Nel presente paragrafo viene fornita la descrizione delle procedure utilizzate per propagare la serie storica di moto ondoso ricostruita in ri-analisi da largo a riva, in un punto opportunamente scelto sulla batimetrica -10 m s.l.m. e ritenuto rappresentativo dell'intero paraggio oggetto di intervento.

Nei paragrafi seguenti viene esposta la procedura di calcolo per la propagazione largo-riva dei dati di “hindcasting”.

1.8 Identificazione della profondità di chiusura

La profondità di chiusura individua la fascia litoranea caratterizzata dalla presenza di trasporto solido longitudinale. Al largo della profondità di chiusura il trasporto solido può essere assunto mediamente nullo. Ovviamente tale profondità dipende sia dalle caratteristiche del moto ondoso nel paraggio che dalla profondità in corrispondenza della quale frangono le onde più alte durante l’anno medio statistico.

La Figura 3.1 mostra la curva di durata annuale dell’altezza d’onda (a largo). Il pannello inferiore della figura mostra l’ingrandimento dell’intervallo 0-48 ore e l’identificazione dell’altezza d’onda H_{s12h} superata per 12 ore all’anno. Tale valore dell’altezza d’onda risulta importante per il calcolo della profondità di chiusura D. Il valore della profondità di chiusura D, calcolato mediante la nota formula di Hallermeier, è risultato essere pari a 6.80 m.

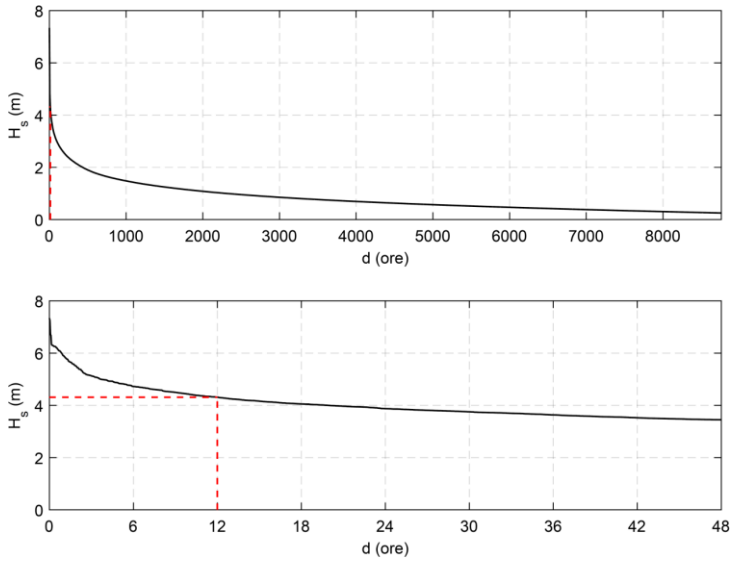


Figura 3.1 - Curva di durata annuale dell’altezza d’onda (pannello superiore). Zoom dell’intervallo 0-48 ore (pannello inferiore).

1.9 Propagazione largo riva e valutazione delle condizioni ondose al frangimento

La propagazione da largo a riva dell'intera serie storica di "hindcasting" è stata effettuata:

- propagando dal **punto Zero** (punto di "hindcasting" P1206, collocato in condizioni di acqua profonda) fino al **punto Uno** (punto posizionato in prossimità della costa alla batimetrica -10.0 m sul l.m.m.);
- propagando dal **punto Uno** fino al **punto Due** (linea di riva); si noti che nella propagazione tra il punto Uno e il punto Due si è reso necessario, al fine di poter descrivere opportunamente le variazioni subite dalle onde durante la propagazione, identificare e valutare le condizioni di frangimento (altezza d'onda H_{sb}, angolo di attacco α_b e tirante idrico al frangimento h_b) per ciascuno stato di mare propagato.

Per quanto riguarda la propagazione dal punto Zero al punto Uno si è utilizzata la teoria lineare del moto ondoso, ovvero la teoria di Stokes al I° ordine valida per fondali lentamente variabili (condizioni di "mild-slope"). Pertanto, al fine di valutare le modifiche subite dal moto ondoso durante la propagazione si sono considerati i soli fenomeni di "shoaling" e rifrazione (trascurando l'attrito sul fondo e l'eventuale rigenerazione ad opera del vento). Infatti si è ritenuto opportuno e ragionevole non tenere in considerazione eventuali fenomeni di frangimento dovuti al fondale dato che il punto Uno è collocato sulla batimetrica -10.0 m sul l.m.m.

Si noti inoltre che non tutti gli stati di mare della serie storica di "hindcasting" sono stati propagati dal punto Zero al punto Uno. Infatti, solo gli stati di mare aventi un angolo relativo θ, calcolato come la differenza tra l'angolo di provenienza dello stato di mare considerato e l'angolo di orientamento della normale alla linea di costa rispetto al Nord geografico, compreso nel campo $-90° \leq \theta \leq +90°$ sono stati oggetto di propagazione dal punto Zero al punto Uno. In Figura 3.2 viene mostrata la rosa ondametrica della serie di "hindcasting" propagata al punto Uno. Il confronto con la Figura 2.13 mostra che l'effetto di rifrazione causato dal fondale tra il largo e la batimetrica -10,0 m causa la rotazione verso Est sia degli stati di mare provenienti a largo dal settore settentrionale sia di quelli provenienti dal settore orientale.

Per quanto riguarda la propagazione dal punto Uno al punto Due si è nuovamente utilizzata la teoria lineare del moto ondoso descritta precedentemente. In tal caso però si è reso necessario completare tale teoria, che per ipotesi non è in grado di tener conto di processi dissipativi quali ad esempio il frangimento, con un criterio di frangimento. Nel caso specifico si è applicato il criterio di frangimento di Kamphuis. Si noti inoltre che, come descritto nel seguito, parallelamente alla propagazione da largo a riva, dal punto Uno al punto Due (con valutazione delle caratteristiche delle onde in condizioni di frangimento e post-frangimento),

si è applicato un modello numerico alle differenze finite, basato sulle equazioni lineari delle onde lunghe mediate sul periodo delle onde corte, per la valutazione del sovralzo associato al moto ondoso frangente (wave set-up).

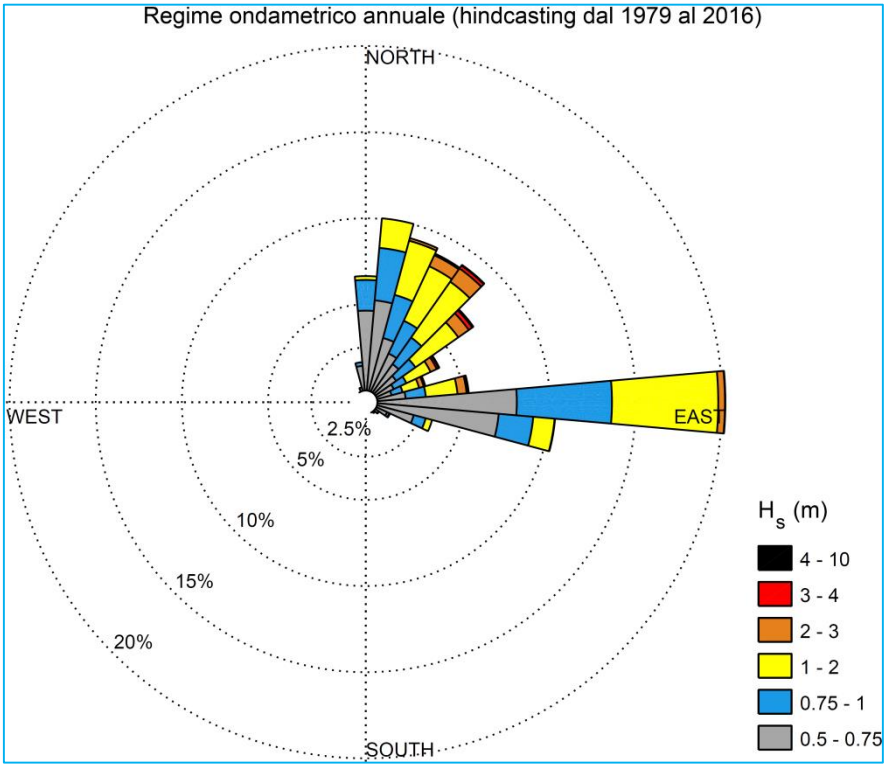


Figura 3.2 - Rosa ondametrica ottenuta dai dati in analisi (dal 1979 al 2016) propagati dal largo alla profondità di -10m sul l.m.m. (NOTA: tale profondità verrà considerata come la profondità di "inizio" per la procedura di valutazione delle caratteristiche del moto ondoso al frangimento).

1.10 Calcolo del trasporto solido costiero longitudinale

In questo paragrafo viene descritta la procedura di valutazione del trasporto solido costiero longitudinale (potenziale) dovuto al moto ondoso frangente. Tale valutazione è stata effettuata mediante la formula del CERC, di seguito riportata:

$$Q = \frac{k_1}{16\,(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)(1-n)} H_{sb}^{5/2} c_{gb} \sin(2\alpha_b) \qquad (2)$$

Dove Q è la portata solida (potenziale) longitudinale dovuta al moto ondoso frangente espressa in m^3/s, k_1 è una costante di calibrazione (assunta pari a 0.3, come suggerito dalla letteratura scientifica in mancanza di una calibrazione diretta), ρ_s e ρ_w sono rispettivamente le densità del materiale solido e dell'acqua di mare, H_{sb}, c_{gb} e α_b sono rispettivamente l'altezza

d'onda significativa, la celerità di gruppo e l'angolo di attacco del moto ondoso (rispetto alla normale alla linea di costa) valutate in condizioni di frangimento. E' importante notare che la valutazione del trasporto solido costiero longitudinale (potenziale), valutato mediante la (2), è stata effettuata su tutti gli stati di mare propagati in costa e quindi sull'intera serie storica di durata 37 anni. Pertanto le elaborazioni mostrate nel seguito fanno riferimento alla serie storica di portate solide così ottenuta.

Nei grafici di Figura 3.3 vengono mostrate le analisi volte alla valutazione probabilistica della distanza media di frangimento e della distanza media a cui l'intensità del trasporto solido longitudinale risulta massima (entrambe valutate rispetto alla linea di riva s = 0).

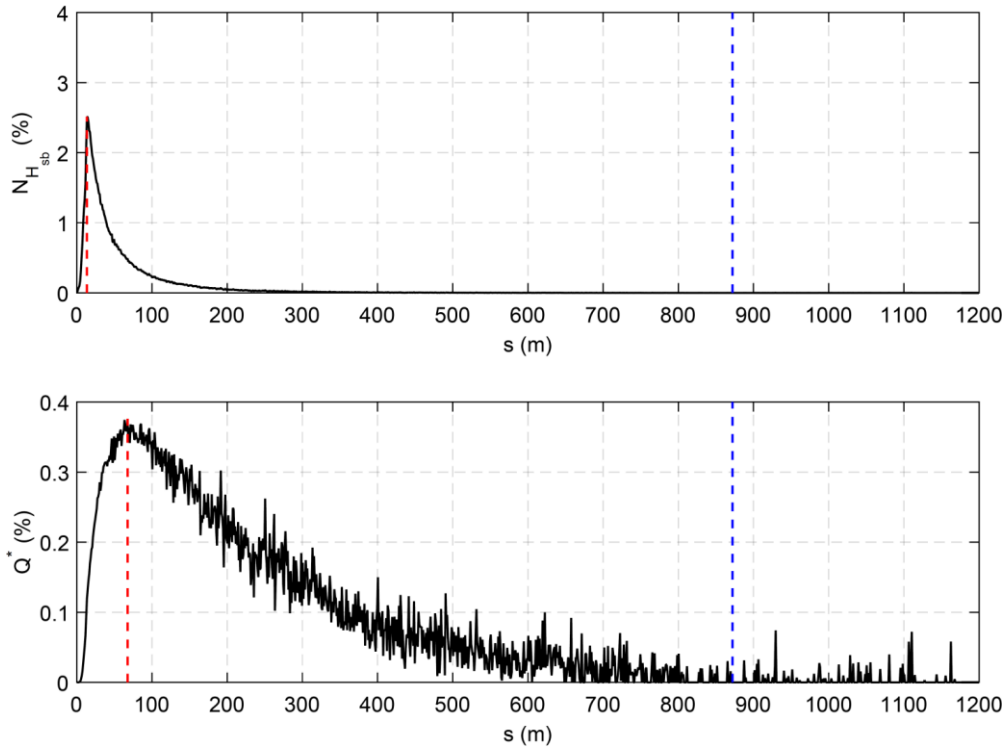


Figura 3.3 - Pannello superiore: percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per il numero totale di onde frangenti) delle onde al frangimento in funzione della distanza da riva. Pannello inferiore: percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per la cumulata delle portate solide Q) delle portate solide in funzione della distanza da riva

Il pannello superiore della Figura 3.3 mostra l'andamento del parametro N_{Hsb} (percentuale normalizzata delle onde al frangimento) in funzione della progressiva s (i.e. distanza dalla linea di riva). Tale parametro rappresenta il numero percentuale delle onde al frangimento. Per ottenere tale parametro è stato necessario suddividere l'ascissa s in opportune classi di ampiezza 100.0 m. Per ciascuna classe si è proceduto al calcolo del numero di onde aventi distanza di frangimento ricadente nella i-esima classe considerata. Tale numero è stato infine diviso per il numero totale di onde frangenti. Il risultato mostra che la maggior parte delle onde frange entro ad una distanza di circa 200 m dalla linea di riva.

Il pannello inferiore della Figura 3.3 mostra l'andamento del parametro Q^* in funzione della progressiva s. Tale parametro rappresenta l'intensità, valutata in termini percentuali, della portata solida longitudinale (potenziale) ed è stato calcolato dividendo ciascun valore della serie storica di portate solide longitudinali per la cumulata $\sum_{i=1}^{N} Q_i$ delle portate solide longitudinali.

E' importante notare che tale elaborazione non ha un significato fisico di diretta interpretazione. Tuttavia tale analisi è di grande aiuto per individuare (seppur qualitativamente) la fascia di distanza dalla linea di costa ove il trasporto solido potenziale innescato dal moto ondoso frangente esplica la sua azione con maggior intensità. Questo risultato mostra, in accordo con la determinazione della profondità di chiusura eseguita in precedenza e indicata nella Figura 3.3 con la linea verticale tratteggiata, che il trasporto solido longitudinale interessa una fascia di litorale larga circa 800 m pur essendo concentrato in una fascia di circa 400 m. Il diagramma inferiore della figura mostra che in occasione di eventi estremi il trasporto solido riesce a movimentare sedimenti fino ad una distanza dalla riva di circa 1200 m.

I due grafici di Figura 3.3 sono stati inoltre riportati in Figura 3.4 e in Figura 3.5 con l'ausilio di una mappa di colore. Inoltre, al fine di valutare l'andamento del parametro Q^* in funzione del settore di traversia considerato, oltre che della distanza dalla linea di riva, vengono proposti i diagrammi di Figura 3.6. In particolare nel pannello intermedio e nel pannello inferiore di tale figura vengono mostrati gli andamenti del parametro percentuale Q_N^* e Q_E^* ottenuti rispettivamente utilizzando le portate solide provenienti dal settore di traversia Nord e dal settore di traversia Est in funzione della distanza dalla linea riva.

Infine, in Figura 3.7 viene mostrato il diagramma polare complessivo del trasporto solido potenziale (calcolato su tutta la serie storica propagata). Si noti inoltre che nella figura descritta sono riportati anche:

- la giacitura (rispetto al Nord geografico) della normale alla linea di costa (linea nera tratteggiata);
- la frequenza di accadimento percentuale (D) degli stati di mare provenienti dal settore di traversia Nord e dal settore di traversia Est;
- l'intensità, in termini percentuali, delle portate solide longitudinali potenziali (I) dovute agli degli stati di mare provenienti dal settore di traversia Nord e dal settore di traversia Est.

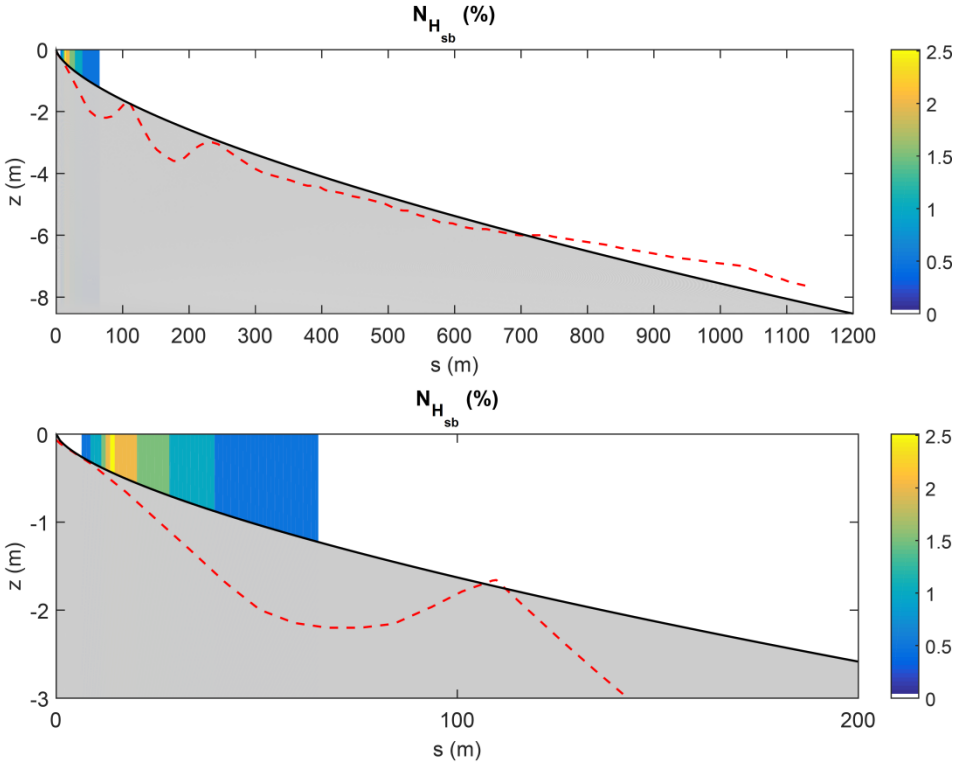


Figura 3.4 - Percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per il numero totale di onde frangenti) delle onde al frangimento in funzione della distanza da riva.

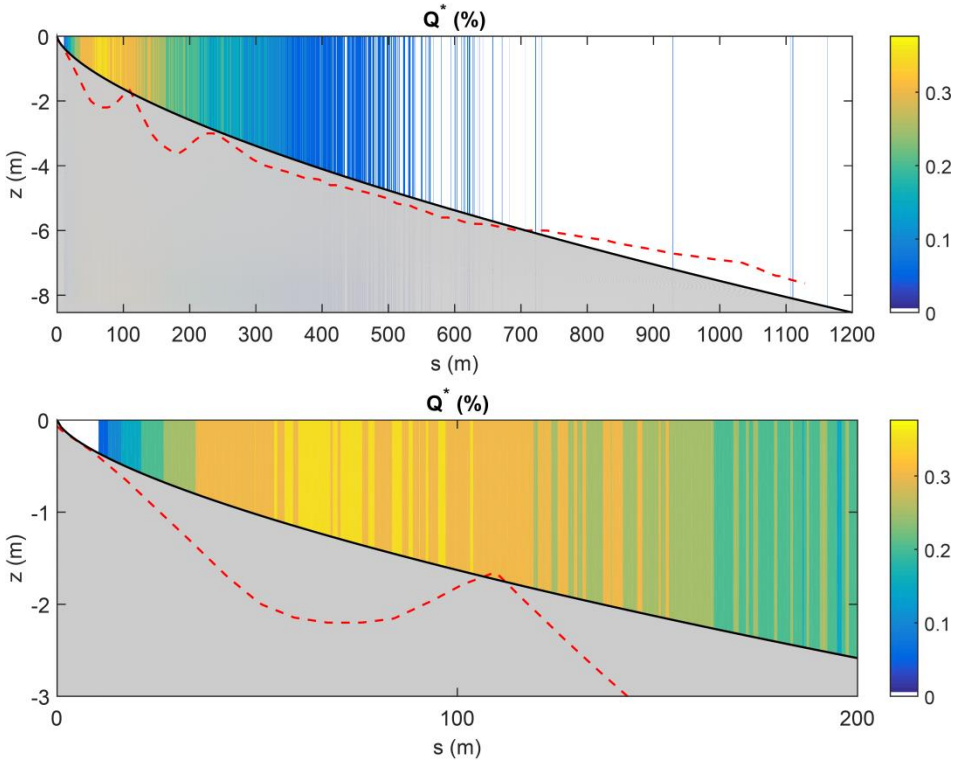


Figura 3.5 - Percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per la cumulata delle portate solide Q) delle portate solide in funzione della distanza da riva.

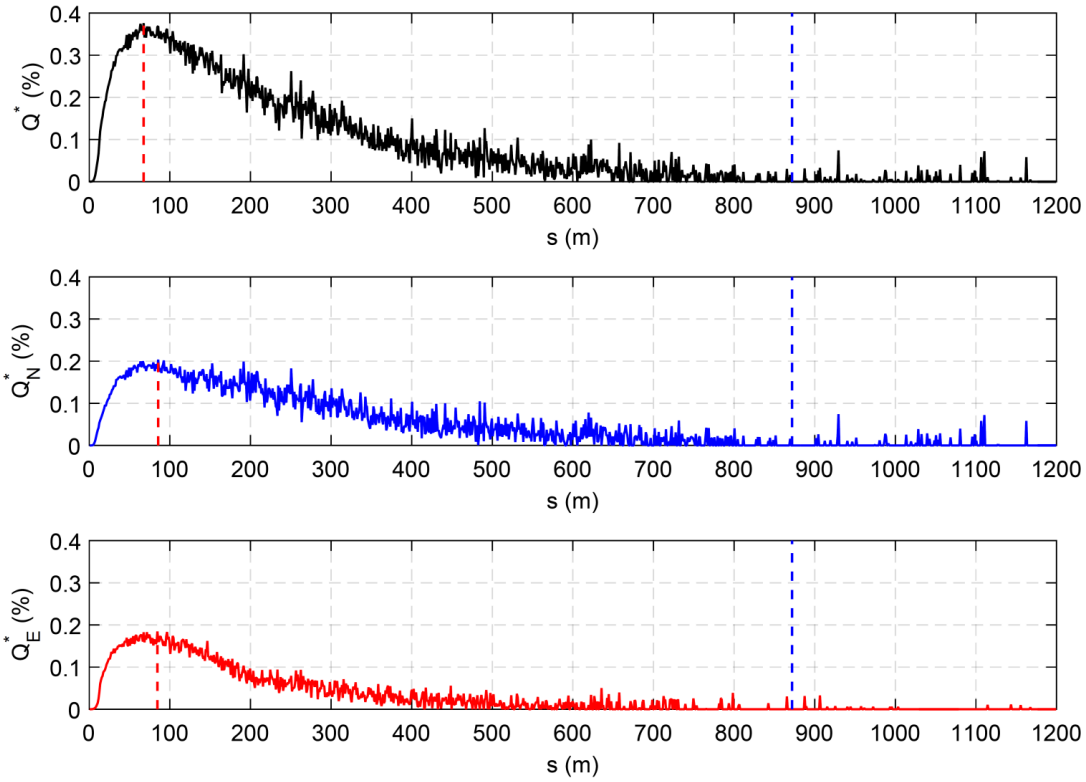


Figura 3.6 - Pannello superiore: percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per la cumulata delle portate solide Q) delle portate solide in funzione della distanza da riva. Pannello intermedio: percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per la cumulata delle portate solide Q) delle portate solide provenienti dal settore di traversia Nord in funzione della distanza da riva. Pannello inferiore: percentuale (normalizzazione effettuata dividendo per la cumulata delle portate solide Q) delle portate solide provenienti dal settore di traversia Est in funzione della distanza da riva

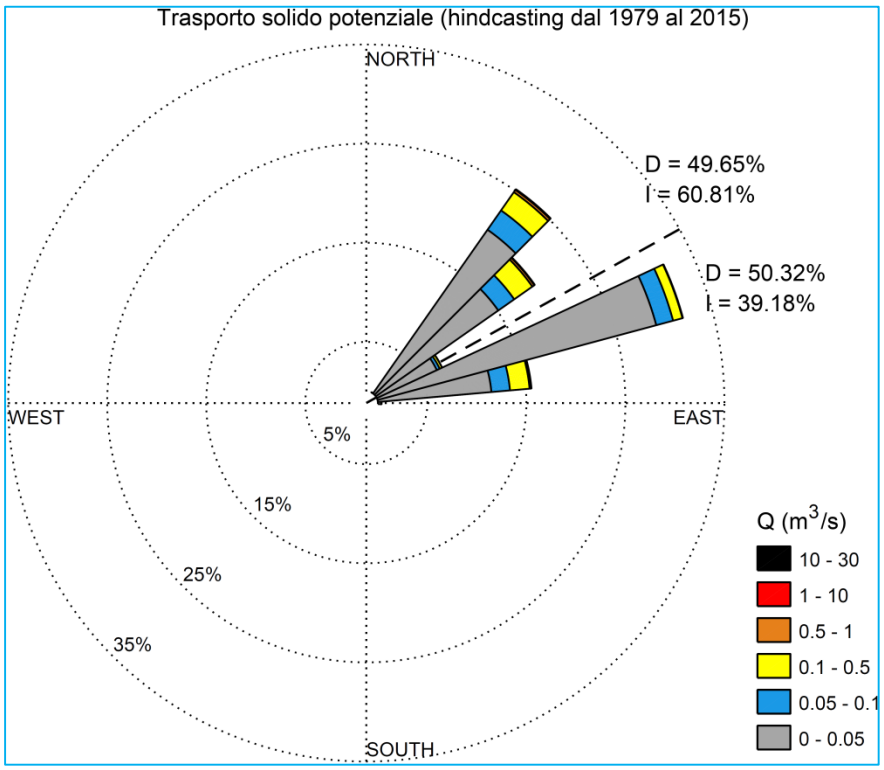


Figura 3.7 - Diagrammi polari del trasporto solido potenziale (calcolato su tutta la serie storica propagata globale)

1.11 Analisi annuale del trasporto solido costiero

Le analisi descritte in precedenza, ed illustrate in Figura 3.7, sono relative alla valutazione complessiva (i.e. relativa all'intera serie storica propagata) del trasporto solido costiero longitudinale. Tuttavia, data la natura spiccatamente bimodale del trasporto solido longitudinale nel paraggio di interesse, risulta interessante effettuare lo stesso tipo di analisi su base annuale. I risultati di tali analisi vengono pertanto mostrate in Figura 3.8, in Figura 3.9, in Figura 3.10 e in Figura 3.11.

L'analisi delle figure mostra che nella bimodalità del trasporto solido longitudinale mediamente prevale la componente di trasporto solido proveniente da Nord. Solo raramente nei 37 anni di analisi ha prevalso la componente proveniente da Sud. In particolare la componente proveniente da Sud ha prevalso su quella proveniente da Nord solo in 5 anni, ovvero nel 1992, nel 2000, nel 2002, nel 2008 e nel 2010.

Questo risultato, ovvero che nella bimodalità del trasporto solido longitudinale si verifica una prevalenza media annuale della componente longitudinale proveniente da Nord, è riscontrabile anche dalla giacitura media della linea di riva che si osserva, nel litorale in questione, in prossimità di opere aggettanti in mare.

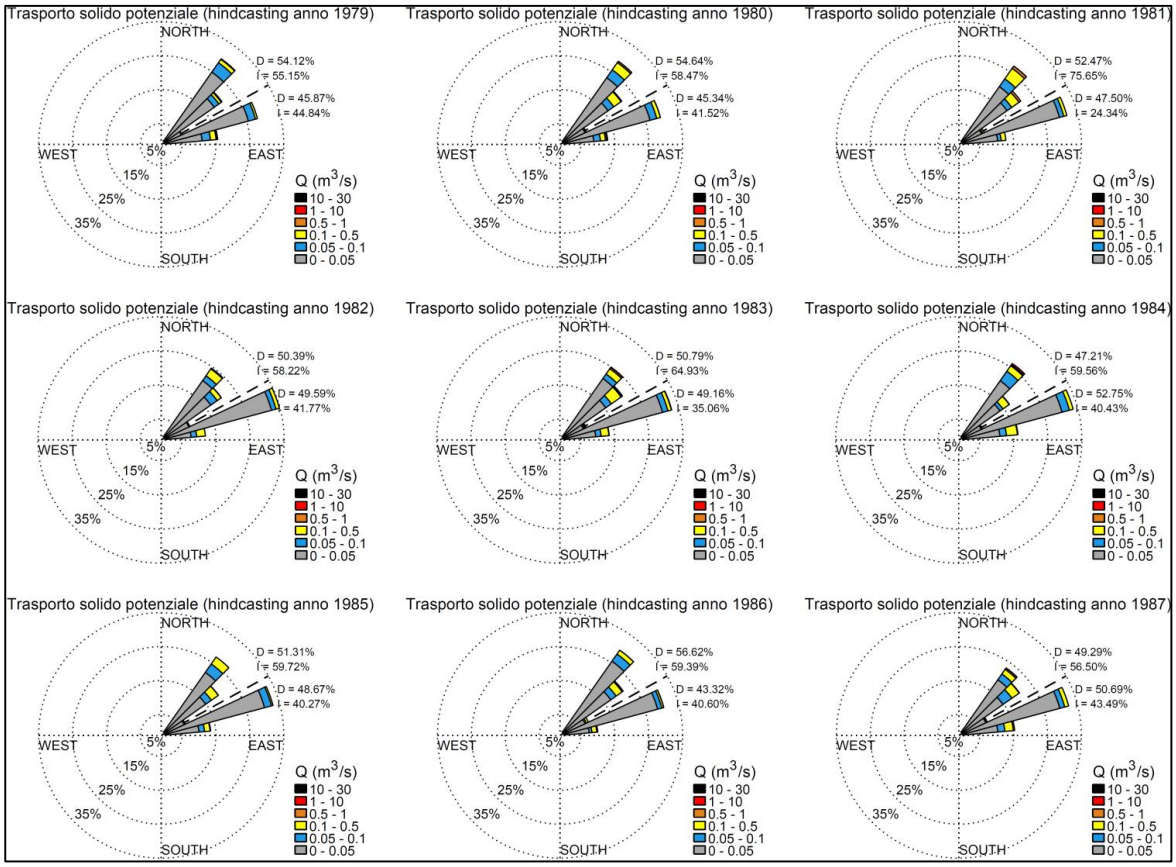


Figura 3.8 - Diagrammi polari del trasporto solido potenziale (calcolato annualmente)

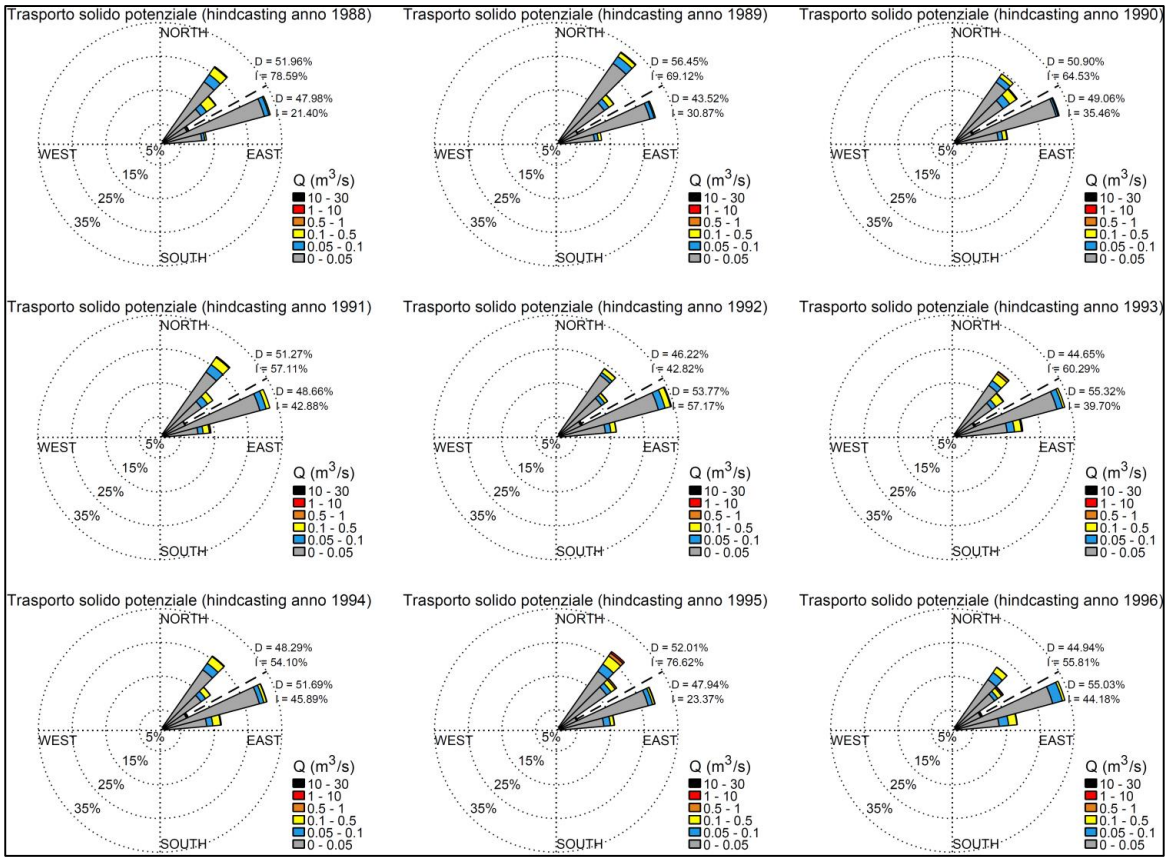


Figura 3.9 - Diagrammi polari del trasporto solido potenziale (calcolato annualmente)

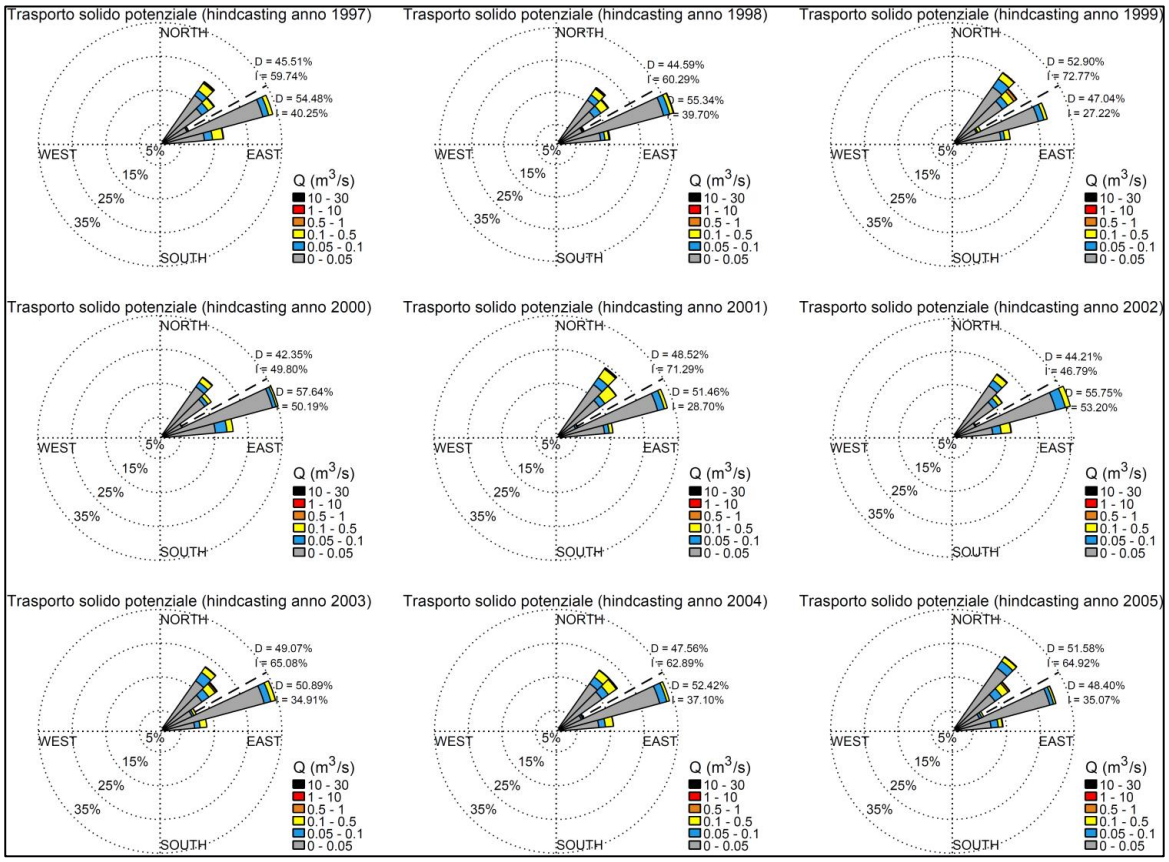


Figura 3.10 - Diagrammi polari del trasporto solido potenziale (calcolato annualmente)

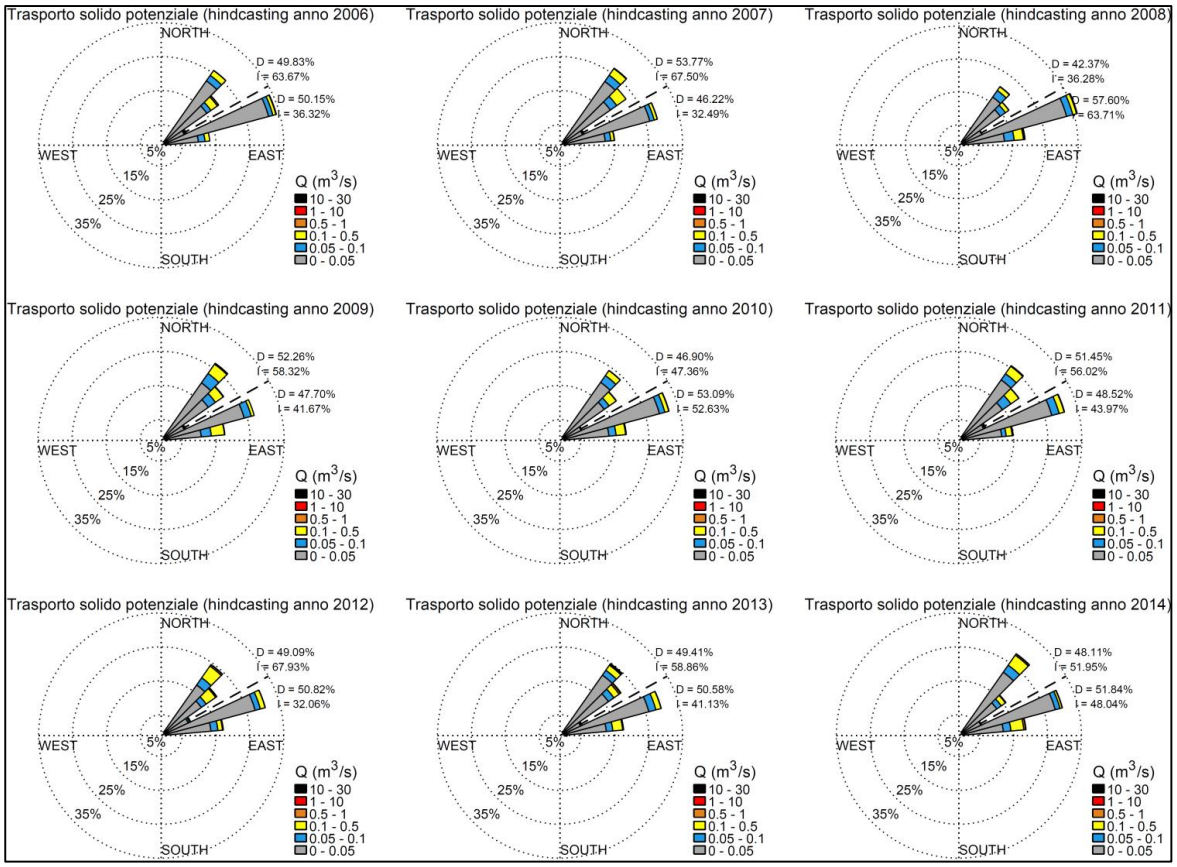


Figura 3.11 - Diagrammi polari del trasporto solido potenziale (calcolato annualmente)

4. ANALISI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE

1.12 Premessa e metodologia seguita

Le variazioni del livello del mare lungo la costa sono dovute a varie cause inquadrabili nei seguenti fenomeni:

- variazioni dovute alla componente astronomica della marea (assimilabili a deterministiche);
- variazioni dovute alla componente meteorologica della marea (di tipo probabilistico) indotte essenzialmente da due fenomeni: (i) effetto barometrico inverso e (ii) azione esercitata dal vento sulle masse d'acqua ("wind set-up"). In presenza di aree cicloniche (perturbazioni atmosferiche), la componente meteorologica della marea da luogo ad un aumento del livello del mare. Tale aumento è comunemente indicato con il termine sovralzo di tempesta ("storm surge");
- aumento del livello del mare indotto dal moto ondoso frangente ("wave set-up");
- risalita del moto ondoso sulle spiagge ("wave run-up").

Per la progettazione di opere di difesa della costa la definizione di queste variazioni del livello del mare risulta molto importante.

In questa sezione viene affrontato il calcolo di queste variazioni. Con riferimento ai paragrafi seguenti lo studio dei livelli è stato diviso in tre sottosezioni:

- analisi armonica delle misure di livello per l'identificazione dei coefficienti di marea (componente armonica) e il calcolo dei parametri di riferimento mareali;
- analisi del residuo (componente meteorologica);
- analisi del sovralzo associato al moto ondoso frangente ("wave set-up") e della risalita del moto ondoso ("wave run-up").

1.13 Descrizione della serie storica dei livelli misurata presso la stazione RMN di Ortona

La definizione delle componenti astronomiche e meteorologiche della marea può essere condotta analizzando serie storiche di misure del livello del mare, ovvero i dati campionati da una stazione mareografica.

La stazione mareografica più vicina al sito in esame è quella situata nel Porto di Ortona (coordinate geografiche della stazione 42° 21' 21.24''N, 14° 24' 53.50''E) facente parte della rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita dall'ISPRA. Pertanto per la redazione del

presente studio si è utilizzata la serie storica di misura del livello del mare fornita da questa stazione.

Le misure del mareografo di Ortona coprono un periodo piuttosto lungo (dal gennaio del 1999 a oggi (18 anni). Risulta importante sottolineare che le misure di livello hanno un intervallo temporale di acquisizione pari a 10 minuti dal 1999 al 2009 (compreso). Dal 2010 a oggi l'intervallo temporale di acquisizione è stato portato a 1 ora.

Si osserva che la stazione mareografica in esame è localizzata all'interno del Porto di Ortona il quale attualmente presenta una imboccatura portuale localizzata a circa -6,0 m sul l.m.m. locale e pertanto non si esclude che il residuo meteorologico dei livelli possa essere influenzato in alcune occasioni anche dalla componente dovuta al moto ondoso frangente.

1.14 Analisi armonica

In questa sezione viene descritta l'analisi armonica delle misure di livello mareografico volta all'individuazione delle costanti armoniche (marea astronomica) e al calcolo dei livelli caratteristici della marea astronomica. In Figura 4.1 viene mostrata la serie storica delle misure di livello registrate dallo strumento mareografico della stazione di Ortona.

Tali misure sono state processate mediante l'algoritmo Matlab T-TIDE (Pawlowicz et al., 2002), comunemente utilizzato a livello mondiale per l'analisi armonica delle misure di livello. Le costanti armoniche sono quindi state utilizzate per la generazione della serie storica della sola componente astronomica di marea nel periodo di riferimento. Tale segnale, sottratto alle misure di livello registrate dal mareografo, ha reso possibile sia il calcolo dei livelli di marea (HAT, MHWS, MHWN, MSL, MLWN, MLWS, LAT) comunemente impiegati per la progettazione di opere marittime che l'identificazione della componente meteorologica (residuo). I valori dei livelli di marea sono riportati nella Tabella 4.1 mentre la Figura 4.2 mostra rispettivamente la serie storica delle misure di livello (in nero), la serie storica della componente armonica (in rosso) e la serie storica della componente meteorologica (in blu).

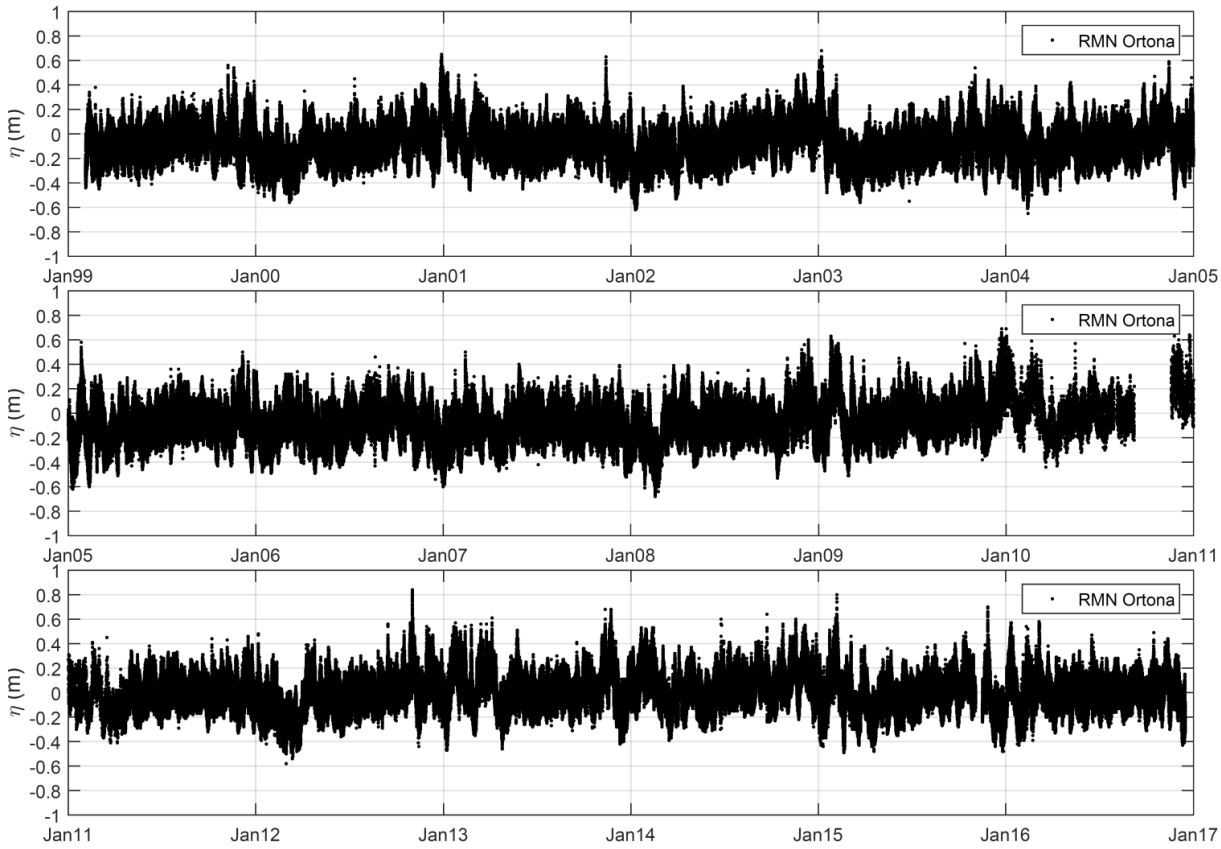


Figura 4.1 - Serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione RMN di Ortona

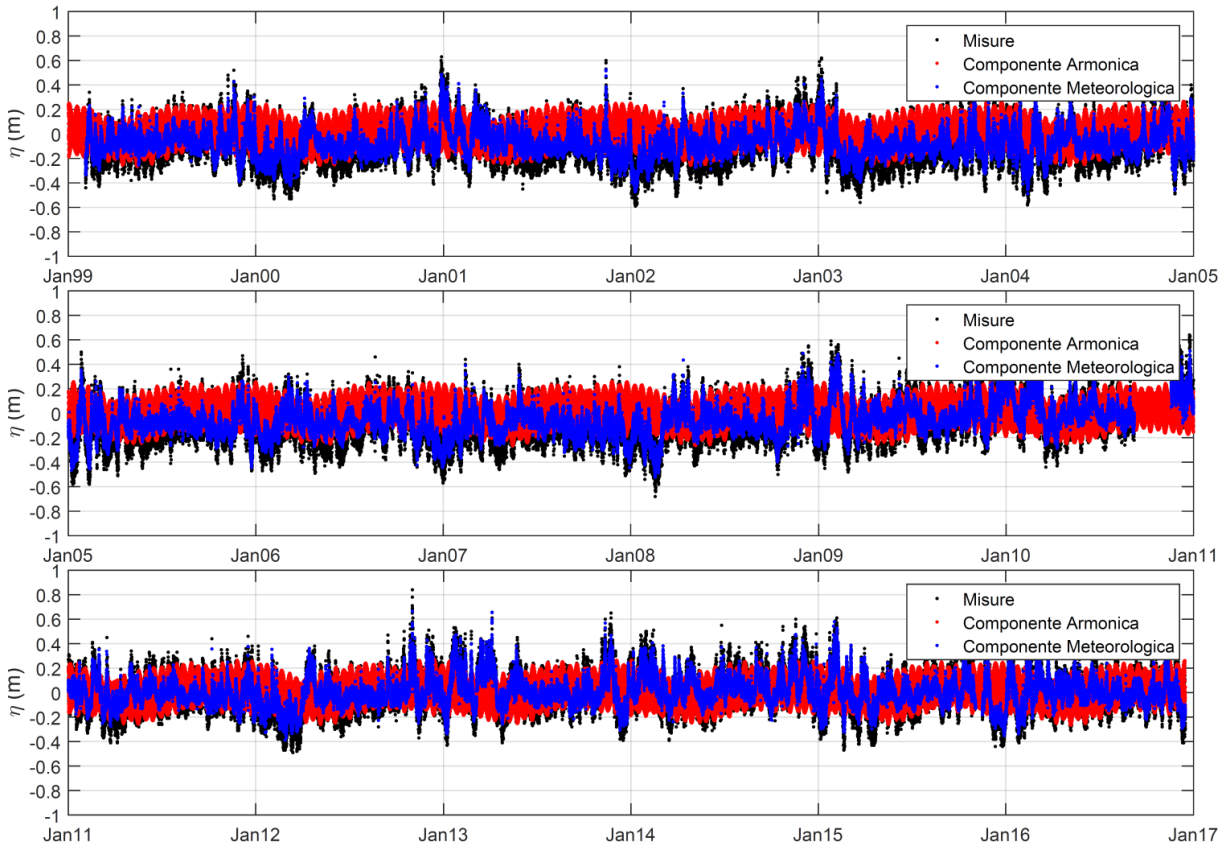


Figura 4.2 - Analisi della storica delle misure di livello misurate presso la stazione mareografica di Ortona: identificazione delle componenti armonica e meteorologica

Tabella 4.1 - Livelli di marea

HAT	0,225084	m
MHWS	0,152567	m
MHWN	0,068509	m
MSL	-0,04511	m
MLWN	-0,15446	m
MLWS	-0,2223	m
LAT	-0,31132	m

La tabella mostra che lo zero idrografico della stazione è posto al di sopra del livello medio marino locale (MSL) di circa 4,5 cm.

1.15 Analisi del residuo (componente meteorologica)

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica (residuo) è stato pertanto possibile effettuare l'analisi dei valori estremi di tale forzante. L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT) con valore di soglia del sovralzo meteorologico pari pari a +0.40 m sul l.m.m.. Anche in questo caso la distribuzione di di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull (k=1).

In Figura 4.3 e in Tabella 4.2 viene riportato l'andamento del sovralzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno.

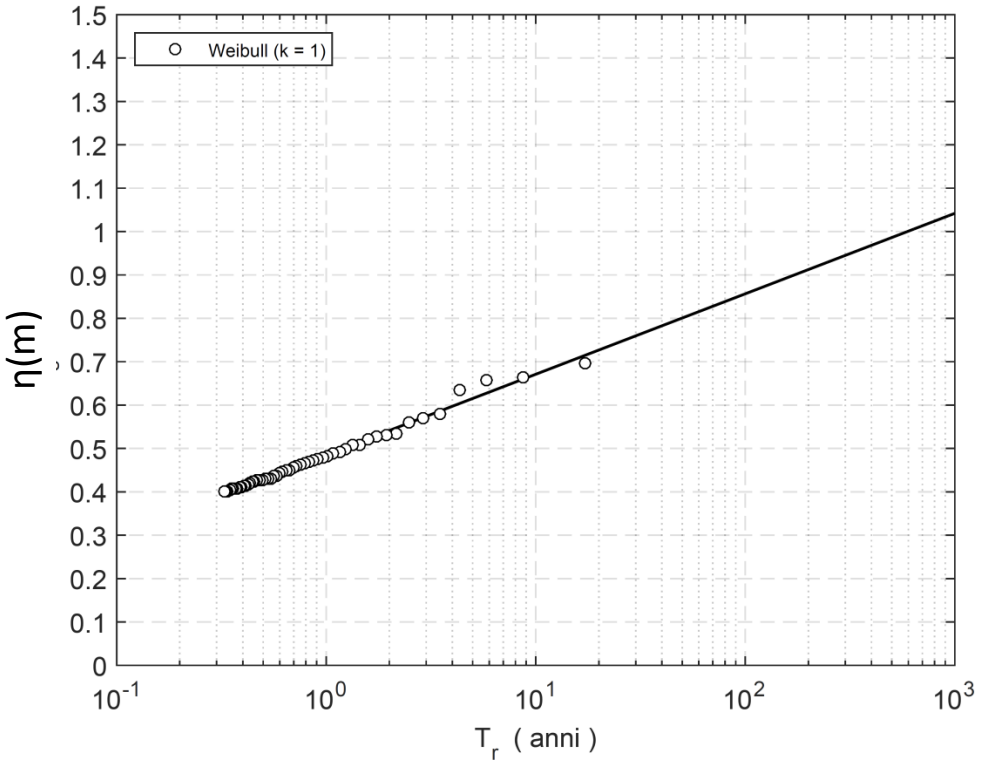


Figura 4.3 - Analisi della storica delle misure di livello misurate presso la stazione RMN di Ortona: identificazione delle componenti armonica e meteorologica

Tabella 4.2 - Andamento del sovralzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno

TR (anni)	η_R (m)
1	0.49
10	0.67
20	0.73
50	0.80
100	0.86
1000	1.04

1.16 Analisi del sovralzo associato al moto ondoso frangente (wave set-up) e della risalita del moto ondoso (wave run-up)

Infine, vengono proposti in questa sezione i risultati dell'analisi relativa al sovralzo associato al moto ondoso frangente ("wave set-up") e della risalita del moto ondoso ("wave run-up").

Per il calcolo del sovralzo associato al moto ondoso frangente si è fatto uso dell'integrazione numerica delle equazioni lineari delle acque basse mediate sul periodo delle onde corte (LSWE). Tali equazioni hanno la seguente forma funzionale:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{\varrho g h}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \qquad (3)$$

Dove $\bar{\eta}$ rappresenta la variazione del livello medio, *x* la coordinata ortogonale alla linea di costa, *ρ* la densità dell'acqua, *g* l'accelerazione di gravità, *h* il tirante idrico locale ed infine S_{xx} il cosiddetto "radiation stress" che rappresenta il termine forzante per le variazioni di livello e dipende dall'altezza d''onda.

La (3) è stata risolta tramite integrazione numerica mediante il metodo delle differenze finite. I valori del sovralzo associato al moto ondoso frangente ottenuti da tale metodo sono riportati nel pannello di sinistra della Figura 4.4 in funzione dell'altezza d'onda frangente.

Per il calcolo della risalita del moto ondoso lungo la costa si è invece utilizzata la relazione di Holman (Holman, 1986) che permette di calcolare il parametro $R_{2\%}$, che rappresenta il livello di risalita delle onde, misurato verticalmente rispetto al l.m.m.m, che risulta essere superato dal 2% delle onde incidenti, in funzione del parametro di Irribarren e dell'altezza d'onda a largo mediante la seguente espressione:

$$R_{2\%} = (0.83\xi_0 + 0.2)H_0 \qquad (4)$$

I valori della risalita del moto ondoso $R_{2\%}$, ottenuti utilizzando la (4), vengono mostrati nel pannello di destra della Figura 4.4 in funzione dell'altezza d'onda a H_0 (propagata alla profondità z = -10.0 sul l.m.m.).

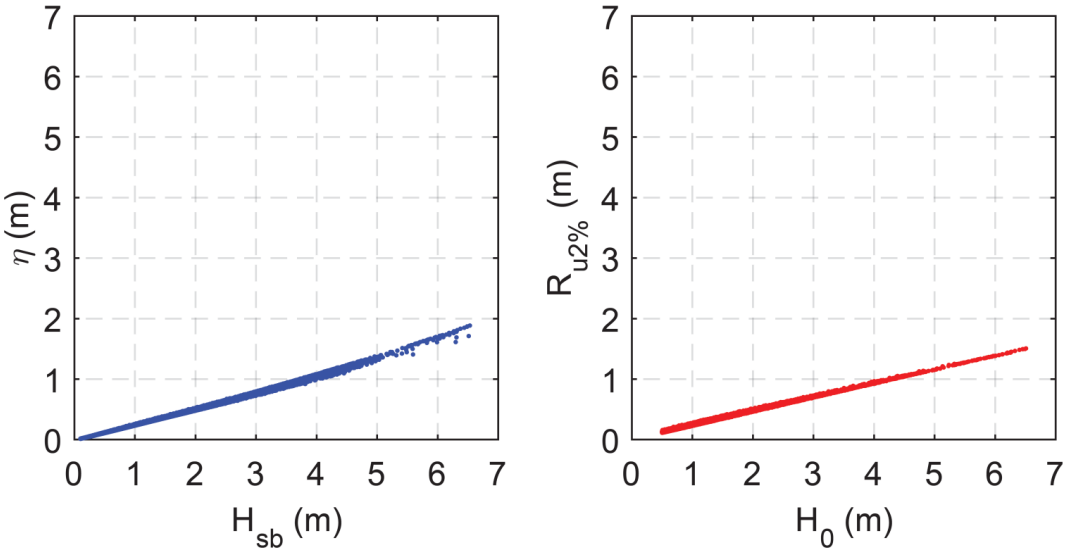


Figura 4.4. Pannello di sinistra: sovralzo dovuto al moto ondoso frangente (wave-set-up) in funzione dell'altezza d'onda al frangimento. Pannello di destra: altezza di run-up Ru2% in funzione dell'altezza d'onda H0 (propagata alla profondità z = -10.0 sul l.m.m.)

1.17 Definizione delle quote massime di risalita del moto ondoso lungo il litorale

La quota massima di risalita del moto ondoso lungo il litorale è calcolabile tenendo conto delle varie componenti analizzate nei paragrafi precedenti. A causa della prevalente natura stocastica delle cause che la determinano, la sua definizione deve essere effettuata in senso probabilistico.

Nell'effettuare tale calcolo comunque si deve tenere conto del fatto che il sovralzo dovuto al moto ondoso frangente e la componente meteorologica della marea così come è stata calcolata, non sono perfettamente correlati tra di loro. Inoltre, anche le variazioni di livello indotte dalla componente astronomica della marea non sono correlate alle altre cause che determinano la variazione dei livelli.

In sintesi, per definire le quote massime di risalita del moto ondoso lungo la spiaggia si è tenuto conto di un fattore di correlazione tra le componenti di marea astrologica e meteorologica pari a 0,7. Assumendo tali ipotesi, è stata calcolata la quota massima di risalita del moto ondoso sulla battigia per i tempi di ritorno T_r uguali a 1 anno e a 10 anni.

MASSIMA QUOTA DI RISALITA PER T_R= 1 ANNO

Assumendo il tempo di ritorno T_r = 1 anno, un valore medio della componente astronomica della marea pari a +0,1 m, un valore di H_s a largo pari a 4,0 m (valore medio tra i due settori di traversia), si ottiene:

$$Q_1 = 0,7 \times (0,1 + 0,49) + 1,0 + 1,0 \approx 2,41 \text{ m}$$

MASSIMA QUOTA DI RISALITA PER TR= 10 ANNI

Per il tempo di ritorno di 10 anni invece assumendo per la marea astronomica sempre lo stesso valore pari a + 0,1 m e per l'H_s a largo il valore medio tra i due settori di traversia, ovvero 5,7 m, si ottiene:

$$Q_{10} = 0,7 \times (0,1 + 0,67) + 1,4 + 1,4 \approx 3,34 \text{ m}$$

1.18 Variazioni del livello del mare connesse a fenomeni di eustatismo

Il fenomeno di innalzamento o abbassamento relativo del livello medio del mare rispetto alle terre emerse valutato a lungo termine, ovvero su scale temporali dell'ordine delle decine, centinaia e migliaia di anni, è indicato nella letteratura scientifica con il termine eustatismo.

Le cause di questo fenomeno possono essere diverse e sono tuttora oggetto di ricerca da parte della comunità scientifica. L'unica accertata è connessa alle glaciazioni e ai disgeli che hanno interessato la terra nel passato diverse volte.

Ricerche specifiche indicano che durante l'ultima glaciazione che ha interessato la terra, quella di Wűrm avvenuta nel Pleistocene, il livello del mare era più basso rispetto a quello attuale di circa 120 m. La glaciazione di Wűrm è iniziata circa 110.000 anni fa e ha avuto temine circa 18.000 anni fa.

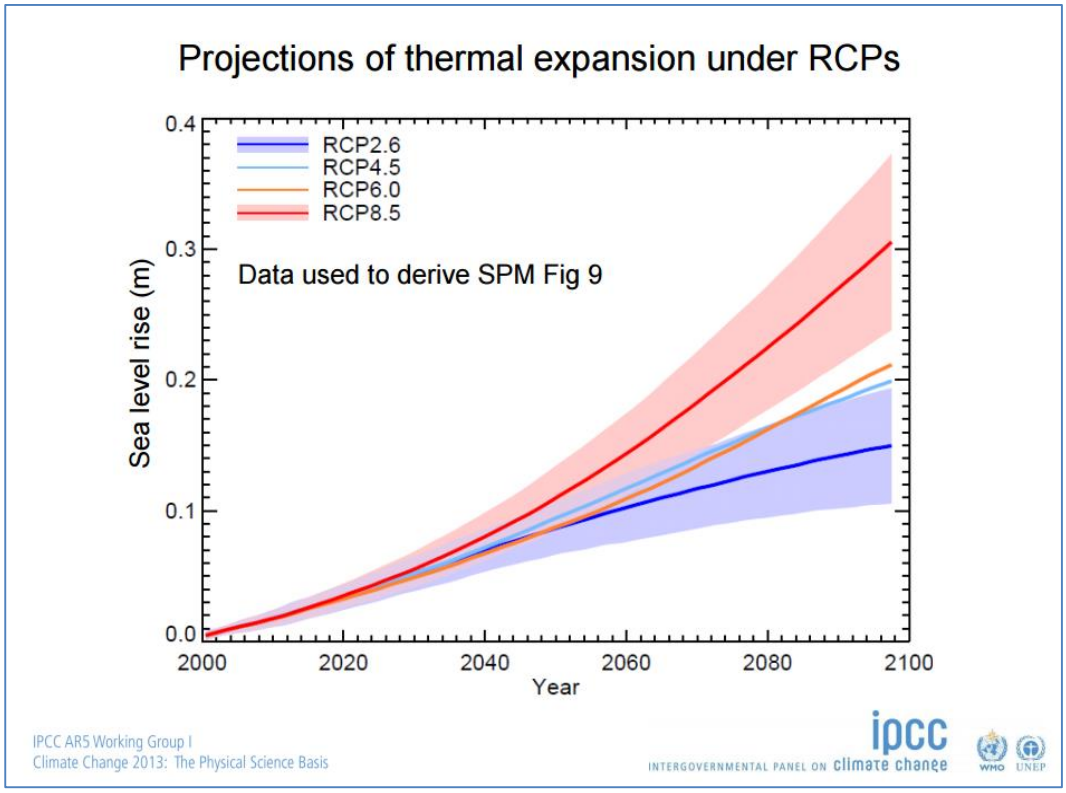
Pertanto da circa 18.000 anni il livello del mare è in fase di risalita a causa del progressivo riscaldamento della terra. Negli ultimi tempi la comunità internazionale ha riconosciuto che il fenomeno del riscaldamento della terra può avere avuto una accelerazione a causa dell'intervento umano. Pertanto la Comunità Europea ritiene importante che i progetti di difesa delle coste tengano conto anche di questo fattore.

Oltre all'eustatismo allo stato attuale non vi sono elementi per ritenere che le coste dell'Abruzzo possano essere interessate da altri fenomeni, come ad esempio dalla subsidenza, che possano accelerare localmente l'innalzamento relativo del livello del mare.

Per quanto riguarda l'eustatismo, l'unica previsione disponibile è quella effettuata dall' "International Panel on Climate Change (IPCC)" riportata nella Figura 40. Si evidenzia a tal riguardo che le misure mareografiche disponibili sono caratterizzate da serie storiche relativamente troppo brevi per poter essere utilizzate per valutare una eventuale tendenza (trend) di innalzamento del livello del mare (sea level rise).

La Figura 40 mostra la previsione di innalzamento del livello del mare per il nostro secolo. Le tre linee colorate presenti nella figura mostrano gli scenari in termini di innalzamento di livello

forniti da diversi modelli climatologici. La previsione di variazione del livello a 100 anni risulta molto ampia essendo compresa tra un minimo di circa 10 cm in un secolo (1 mm/anno) ad un massimo di circa 38 cm (3,8 mm/anno). Assumendo per il rateo di innalzamento il valore medio pari a 2,4 mm/anno e assumendo un tempo di vista delle opere di difesa in progetto di 20 anni, si ottiene una previsione di innalzamento del livello da assumere per la progettazione di circa 5,0 cm.



REGIONE ABRUZZO

PROVINCIA DI TERAMO

COMUNE DI SILVI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Titolo elaborato :

STUDIO MORFODINAMICO

23	001	FR	004	- 0	MAR

Committente:

Comune di Silvi
Servizio Direzione e Progettazione Opere Pubbliche
Viale Po' 4 - 64029 Silvi Marina (Te)

IL R.D.P.
Geom. Mauro D'ANTEO

Il progettista:

Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:
0	Emissione	Milana	Milana	Marini

Dimensioni foglio: A4

Visto del Committente:

INDICE

1. PREMESSE 2

2. FINALITÀ E METODOLOGIA DI ANALISI 3

3. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO 4

3.1 IL MODELLO NUMERICO 4
3.2 SCHEMATIZZAZIONE DEL LITORALE E DOMINI DI CALCOLO 7
3.3 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI E DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO 10
3.4 MOTO ONDOSO 10

4. CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO 12

4.1 APPROCCIO METODOLOGICO 12
4.2 ANALISI DIACRONICA DELLE LINEE DI RIVA 12
4.3 PORTATA SOLIDA LONGITUDINALE SU BASE MORFOLOGICA 17
4.4 CONFRONTO CON I RISULTATI NUMERICI 20

5. SCENARI DI SIMULAZIONE 22

5.1 OPZIONE ZERO 22
5.2 CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 23

6. ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI 24

6.1 CONSIDERAZIONI GENERALI 24
6.2 OPZIONE ZERO 24
6.3 CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 26
6.4 ANALISI COMPARATIVA DI SINTESI 26

7. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE 28

8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 29

1. PREMESSE

La presente relazione illustra lo “Studio Morfodinamico” del progetto di fattibilità tecnico economica degli interventi di difesa costiera da attuare nel Comune di Silvi (TE). Esso consiste nella valutazione della tendenza evolutiva a lungo termine del litorale valutata mediante approccio numerico tramite applicazione di un modello “a una linea”.

Il progetto è costituito, in estrema sintesi, dall’estensione a nord dell’attuale sistema di protezione “a celle” che caratterizza il litorale di Silvi Marina e dalla realizzazione di ulteriori due opere trasversali per la limitazione degli effetti al contorno.

Questo documento è organizzato come segue. Il successivo Capitolo 2 descrive nel dettaglio la finalità dello studio e la metodologia di analisi. Il Capitolo 3 descrive il modello numerico implementato per la previsione della tendenza evolutiva a lungo termine del litorale in esame mentre nel successivo Capitolo 4 viene mostrato il procedimento di calibrazione del modello numerico. Il Capitolo 5 esplicita le configurazioni oggetto delle simulazioni. Nel successivo Capitolo 6 viene analizzata la tendenza evolutiva a lungo termine del litorale per gli scenari di simulazione valutandone i risultati in relazione alla “Opzione zero” (assenza di interventi, “*Do Nothing*”) nell’ambito di un approccio comparativo. Il Capitolo 7, a favore di sintesi, traccia alcune osservazioni conclusive.

2. FINALITÀ E METODOLOGIA DI ANALISI

Lo “Studio Morfodinamico” ha l’obiettivo di valutare la tendenza evolutiva a lungo termine del litorale in esame. In particolare, il tratto di costa oggetto dell’analisi coinvolge i litorali, procedendo da nord a sud, dei comuni di Pineto, Silvi e Città S. Angelo. Esso è finalizzato a valutare l’efficacia dell’intervento del progetto in epigrafe, nonché di ottimizzarne la configurazione.

L’intervento consiste nella realizzazione di un’estensione del sistema di difesa a cella presente a Sud del litorale di Silvi in fase di riqualificazione e di due opere trasversali (pennelli) a Nord del suddetto prolungamento del sistema di difesa a celle. A tal fine è necessario utilizzare strumenti numerici in grado di valutare l’evoluzione del litorale a lungo termine in seguito alla realizzazione delle suddette opere, al fine di valutarne l’efficacia e gli eventuali effetti sul litorale limitrofo (i cosiddetti “effetti al contorno” ovvero “di bordo”). Con l’utilizzo dei dati disponibili (linee di riva, sedimentologici e topografici) e i risultati dell’analisi meteomarina a disposizione, è stato implementato un modello numerico “a una linea” (Kraus et al., 1989), il quale è stato preventivamente e opportunamente calibrato e verificato in relazione al litorale in esame dopo aver effettuato un’analisi morfologica del litorale. Nel dettaglio, i modelli “a una linea”, assumendo l’invarianza della forma del profilo trasversale del litorale, si fondano sulla determinazione della variazione a lungo termine della linea di riva indotta dal moto ondoso frangente. Tale modello, in sintesi, è stato utilizzato per stimare la tendenza evolutiva del litorale in assenza di interventi (nel seguito indicata come “Opzione Zero”) e in presenza delle opere di progetto al fine di valutarne l’efficacia e gli eventuali effetti al contorno.

Più nel dettaglio, lo scenario di intervento prevede l’estensione della cella con il prolungamento della barriera sommersa esistente posta a quota -1.50 lmm, che si intesta a un pennello parzialmente sommerso con parte emersa di lunghezza pari a 150 m e un pennello emerso centrale alla cella di lunghezza pari a 100 m. Gli effetti al bordo sono limitati tramite la realizzazione di due pennelli parzialmente sommersi di lunghezza complessiva pari a 100 m. In particolare, il primo più a sud, posto a una distanza pari a 260 m dal sistema di difesa esistente ha una lunghezza della parte emersa pari a 75 m con quota della berma pari a +1.50 m lmm e una lunghezza della parte sommersa pari a circa 25 m con quota della berma pari a -1.50 m lmm. Il secondo pennello da realizzare, posto una distanza pari a 260 m più a nord del primo, ha una lunghezza della parte emersa pari a 45 m con quota della berma pari a +1.50 m lmm e una lunghezza della parte sommersa pari a 55 m con quota della berma pari a -1.50 m lmm.

Le simulazioni mirano a fornire una stima della tendenza evolutiva a lungo termine del litorale su un orizzonte temporale di 10 anni.

3. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

3.1 Il modello numerico

I modelli numerici ad una linea si fondano sulle seguenti ipotesi, comunemente accettate dalla comunità scientifica e tecnica, per la stima della tendenza evolutiva a lungo termine di un litorale:

- il litorale presenta un profilo trasversale di equilibrio di forma costante che può traslare in conseguenza del manifestarsi sia di fenomeni di arretramento sia di avanzamento della linea di riva;
- il trasporto solido litoraneo è indotto essenzialmente dall'azione delle correnti connesse alle onde di superficie, mentre può ritenersi trascurabile l'effetto delle correnti di marea o correnti collegate all'azione diretta del vento;
- il flusso solido litoraneo responsabile dei fenomeni evolutivi a lungo termine si realizza essenzialmente lungo la direzione longitudinale alla linea di riva e rimane confinato entro una fascia (fascia 'attiva') alle cui estremità di 'riva' (*foreshore*) e 'largo' (*offshore*) il flusso solido può ritenersi trascurabile;
- il regime del flusso solido longitudinale è funzione principalmente del contenuto energetico e dell'angolo di incidenza delle onde frangenti lungo il litorale;
- i possibili scambi di materiale solido tra la fascia attiva e l'esterno sono di tipo puntuale (foci fluviali; canyons sottomarini) e comunque quantificabili in termini di portata solida entrante e/o uscente intese come perdite o guadagni del bilancio dei sedimenti.

Sulla base di queste ipotesi è possibile semplificare la complessa dinamica a lungo termine di un litorale sabbioso imponendo, e risolvendo alle differenze finite, l'equazione di conservazione (continuità) del volume di sabbia associata al flusso del materiale sabbioso relativo alla sola componente longitudinale e calcolato in funzione delle caratteristiche del moto ondoso al frangimento.

Con riferimento alla simbologia delle Figura 3.1, nonché per le ipotesi anticipate, l'equazione di continuità del volume di sedimento nella fascia attiva (3-1) espressa alle differenze finite risulta espressa come segue:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{1}{(D_B + D_C)}\left(\frac{\Delta Q}{\Delta x} \pm q\right) \quad = 0 \qquad (3\text{-}1)$$

dove:

y(x,t) (m) è la posizione della linea di riva nell'istante di tempo t;

Q(x,t) (m^3/s) è la portata solida longitudinale;

D_B (m) l'altezza media della berma;

D_C (m) la profondità di chiusura;

q ($m^3/s/m$) la portata trasversale entrante o uscente riconducibile a fattori naturali o antropici lungo la direzione trasversale;

Δx (m) larghezza della cella (costante) di discretizzazione;

Δt (s) intervallo di discretizzazione temporale (costante).

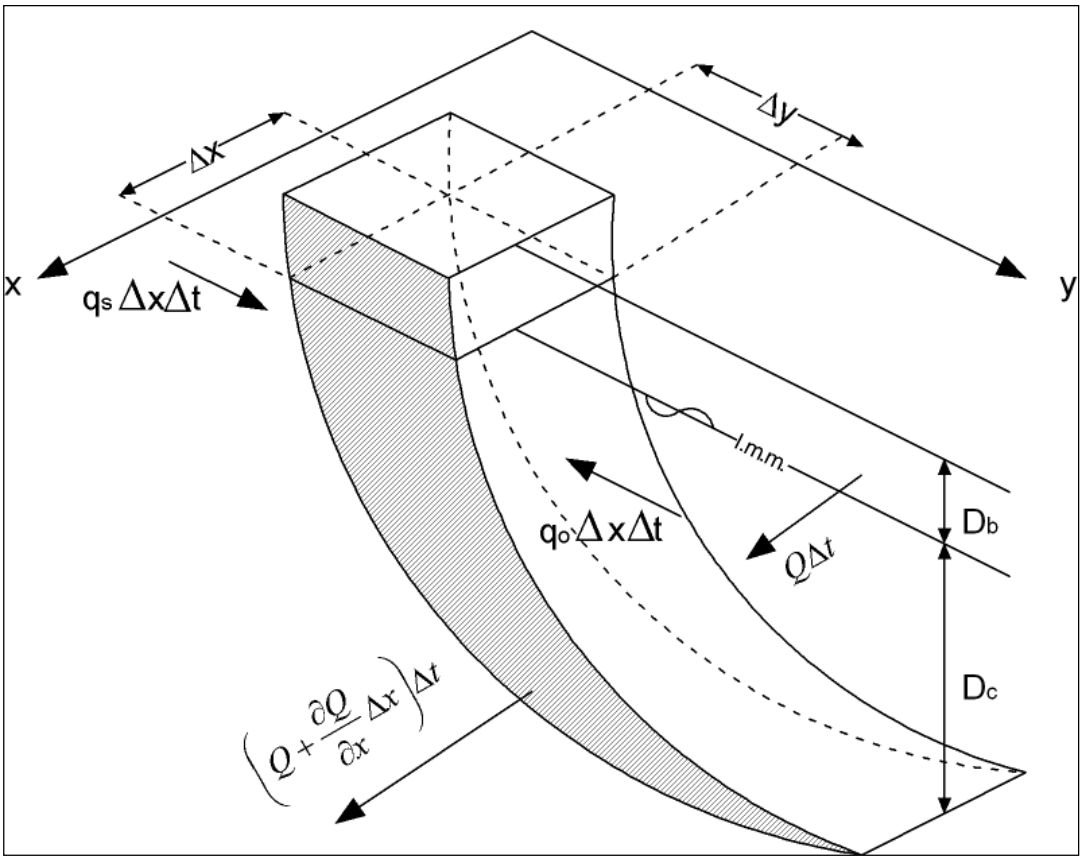


Figura 3.1: *Schema qualitativo di calcolo dei modelli a una linea.*

Per risolvere l'equazione è necessario calcolare preliminarmente l'entità del trasporto solido longitudinale *Q* e degli eventuali flussi trasversali q_i e individuare il valore della profondità *D* intesa come risultante della profondità di chiusura D_C lato mare e altezza di *swash* (berma) D_B lato terra.

In sintesi, la legge di conservazione della massa, intesa nella sua forma più generale, è esplicitata secondo la sola componente longitudinale *Q*, riferendosi a una relazione di derivazione empirico-concettuale.

Questa metodologia di stima, tipica della scuola americana e giapponese, può apparire semplificata ma, considerata la notevole incertezza dei dati cui solitamente si può fare riferimento (caratteristiche meteo-marine e morfologiche), risulta la più pratica e attendibile per le applicazioni proprie dell'ingegneria costiera, a patto che si accetti di voler stimare la sola "tendenza" evolutiva a lungo termine.

L'espressione usata, che deriva da un approccio di questo tipo, è una relazione che contiene molteplici parametri quali la pendenza del profilo trasversale, la tessitura dei sedimenti, la ripidità dell'onda e la variabilità dell'altezza d'onda lungo la linea di riva.

In definitiva, il termine *Q*, che esprime il trasporto solido longitudinale, viene espresso con la nota relazione, di origine semi empirica, elaborata dal CERC (SPM, 1984):

$$Q = (H^2\, c_g)_b \left[a_1 \sin 2\vartheta_b - a_2 \cos \vartheta_b \, \frac{\partial H}{\partial x}\right]_b \qquad (3\text{-}2)$$

nella quale *H* è l'altezza d'onda significativa, c_g rappresenta la celerità di gruppo, ϑ è l'angolo che localmente il fronte d'onda forma con la normale locale alla linea di riva (e quindi con la generica linea batimetrica). Il pedice *b* indica che le grandezze contenute tra le parentesi, vanno valutate in condizioni di frangimento. I parametri adimensionali a_1 e a_2 sono espressi dalle seguenti relazioni:

$$a_1 = \frac{K_1}{16\left(\frac{\rho_S}{\rho}-1\right)(1-p)(1.416)^{5/2}} \qquad (3\text{-}3)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8\left(\frac{\rho_S}{\rho}-1\right)(1-p)(\tan\beta)(1.416)^{7/2}} \qquad (3\text{-}4)$$

dove ρ_S e ρ rappresentano, rispettivamente, la densità della sabbia e dell'acqua, *p* la porosità del fondo sabbioso, *tan*β la pendenza media del fondale dalla riva alla profondità

di chiusura. I coefficienti K_1 e K_2 rappresentano i parametri di calibrazione (e verifica) del modello.

In prima approssimazione, si può fare riferimento ai valori riportati dalla letteratura specializzata definiti in funzione delle caratteristiche del sedimento movimentato dalla corrente longitudinale (granulometria, porosità, peso specifico), della morfologia trasversale del fondale, nonché della tipologia del frangente:

$$K_1 = 0{,}1 \div 1; \qquad \mathrm{K}_2 = (0{,}5 \div 1{,}5) \cdot K_1 \tag{3-5}$$

La risoluzione dell'equazione (3-1) con la portata longitudinale espressa dalla (3-2) è possibile soltanto dopo aver valutato le caratteristiche del moto ondoso incidente in condizioni di frangimento e dopo aver imposto idonee condizioni al contorno. A tale scopo, è stata utilizzata la serie propagata sotto costa, in prossimità del litorale di interesse. Tale serie, dalla batimetrica posta sotto costa è stata propagata sino alle condizioni di frangimento tramite un modello che utilizza la teoria lineare del moto ondoso. In sintesi, le caratteristiche del moto ondoso stimate in corrispondenza della batimetrica sotto costa (altezza d'onda significativa H_s, periodo di picco T_p e direzione ϑ) sono propagate sino al punto di frangimento (H_s, T_p e ϑ in condizione di frangimento) utilizzando la teoria lineare. Questi valori sono poi utilizzati per il calcolo della componente longitudinale del trasporto solido (3-2), necessaria alla risoluzione dell'equazione (3-1) del modello a una linea.

3.2 Schematizzazione del litorale e domini di calcolo

La griglia di calcolo per l'analisi morfodinamica si estende dalla Foce del Fiume Vomano alla foce del Fiume Saline, per una estensione complessiva del dominio di calcolo di circa 17.0 km. La scelta dell'estensione dell'area in esame è legata alla identificazione della cosiddetta "unità fisiografica" ai contorni della quale gli scambi sedimentari possono essere ragionevolmente trascurati.

L'analisi morfologica effettuata per l'unità fisiografica (dalla foce del Fiume Vomano alla foce del Fiume Saline) e, in particolare, l'analisi diacronica delle linee di riva riportata nel paragrafo §4.2, ha permesso di effettuare la caratterizzazione delle tendenze evolutive del tratto di litorale in esame, fondamentale per la calibrazione e la verifica del modello numerico.

Nella costruzione del dominio di calcolo si è tenuto conto anche delle opere rigide presenti lungo tutta l'unità fisiografica, evidenziate in Figura 3.3.

Alla luce di quanto esposto al paragrafo precedente l'utilizzo del modello numerico implementato si scompone in due fasi:

- propagazione della serie di eventi rappresentativi del clima ondametrico sottocosta sino al punto di frangimento mediante teoria lineare;
- stima dell'evoluzione del litorale soggetto all'azione del moto ondoso.

La griglia di calcolo del modello a una linea è monodimensionale. Il dominio è stato discretizzato con una risoluzione spaziale pari a 20 m, per un totale di nodi di calcolo pari a 839 (estensione del dominio di calcolo pari a 16'780 m). In particolare, è stato assunto un sistema di riferimento ortometrico con origine in corrispondenza del Fiume Vomano, e con asse delle ordinate orientato secondo la direzione 51° N, come schematizzato in Figura 3.2.



Figura 3.2: *schema del sistema di riferimento della griglia di calcolo per l'applicazione del modello numerico ad una linea.*

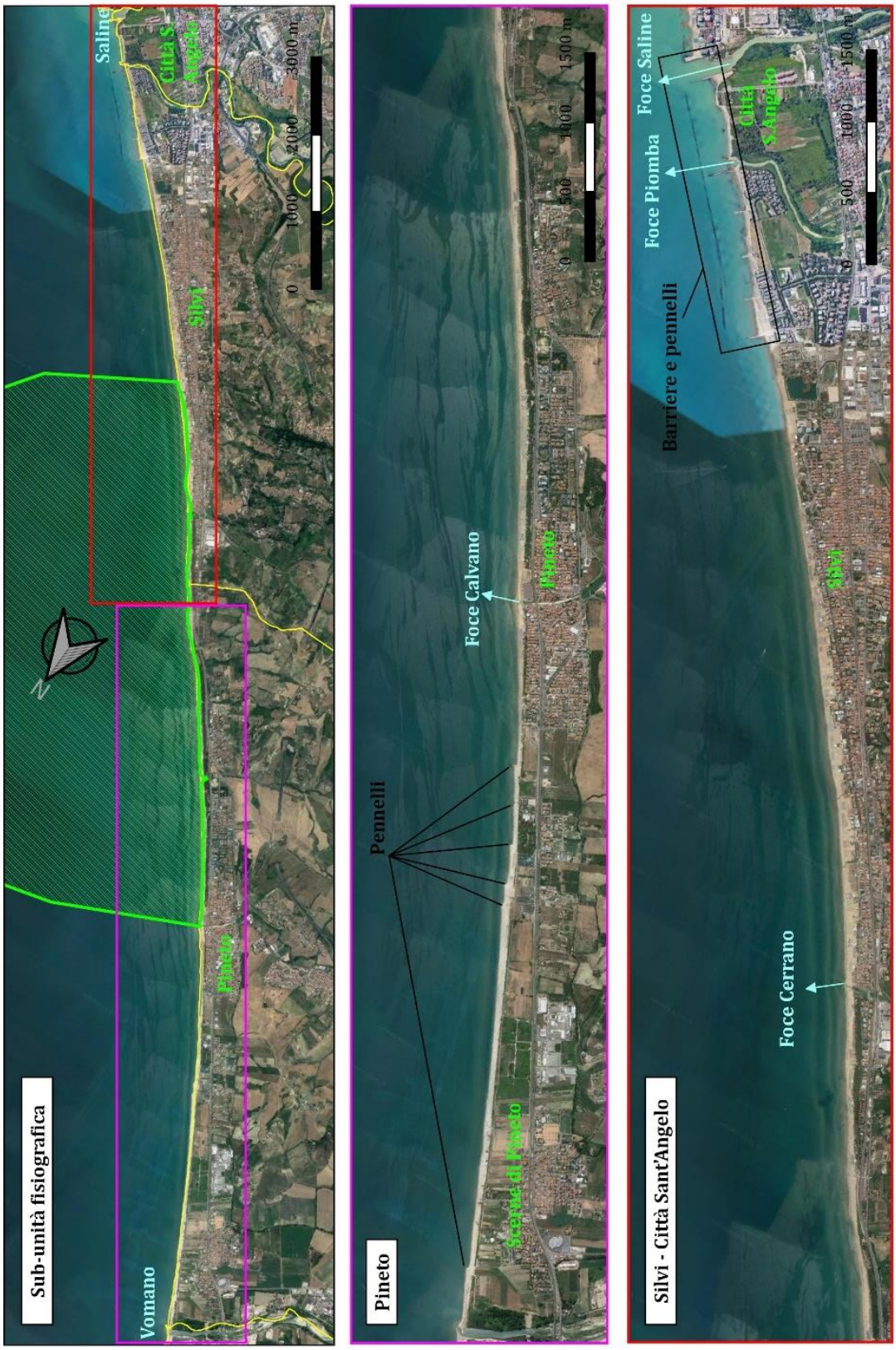


Figura 3.3: *Immagini satellitari dell'intera unità fisiografica analizzata (a sinistra) e il dettaglio del litorale di Pineto (al centro) e di Silvi e Città S.Angelo (a destra) con evidenziate le opere e i corsi d'acqua presenti.*

3.3 Definizione dei parametri e delle condizioni al contorno

Come osservato, l'applicazione del modello morfodinamico richiede la definizione di condizioni al contorno quali le caratteristiche del moto ondoso agente sul litorale e le caratteristiche dei sedimenti che lo costituiscono. A tali condizioni si aggiungono quelle da imporre alle estremità della linea di riva simulata, nonché quelle derivanti dall'eventuale esistenza, all'interno del tratto di litorale simulato, di apporti solidi trasversali.

Alla luce della strategia comparativa dello studio, e con riferimento ai risultati ottenuti nell'analisi diacronica delle linee di riva delle epoche passate (si veda successivo capitolo, paragrafi §4.2 e §4.3), è stato imposta la condizione di scambio sedimentario nullo sia nel contorno Nord (Foce Vomano) che a Sud, in corrispondenza della Foce del Fiume Saline. Seppur tali condizioni non siano verificate a rigore nella realtà, l'estensione del dominio è tale da poter accettare l'indipendenza della soluzione numerica nell'area di interesse dalle condizioni al contorno. Tuttavia, sono stati simulati gli apporti solidi trasversali derivanti dal Fiume Vomano e dai corsi d'acqua presenti lungo il dominio di calcolo, stimati nell'ambito dell'analisi della portata solida longitudinale su base morfologica (paragrafo 4.3) riportati nella Tabella 4-1.

I modelli a una linea prevedono, inoltre, la caratterizzazione dei sedimenti mediante l'utilizzo di un diametro medio (D_{50}) costante lungo tutto il litorale simulato. Nelle simulazioni numeriche è stato preso in considerazione un diametro dei sedimenti pari a 0.20 mm. Tale valore è stato desunto dal Progetto Preliminare relativo ai "*PAR – FAS 2007-2013 "Linea di azione IV.2.1.A – riduzione del rischio derivante da fenomeni alluvionali, franosi ed erosivi delle diverse fasce di territorio regionale (montagna interna, pedemontana e costiera)" - ripascimento con sabbie provenienti dall'utilizzo di sedimenti e/o dragaggio della fascia costiera esterna alla zona attiva a complementarieta' degli interventi di difesa della costa nei comuni di: Martinsicuro (TE), Alba Adriatica (TE), Pineto (TE), Silvi (TE), Francavilla al Mare (CH) e Ortona (CH)*", redatto dal Servizio Opere Marittime e Acque Marine della Regione Abruzzo.

È da sottolineare, tuttavia, che eventuali inaffidabilità nella stima del diametro caratteristico del litorale sono bilanciate dalla scelta dei parametri di calibrazione del modello numerico.

3.4 Moto ondoso

L'applicazione del modello numerico per la stima dell'evoluzione morfodinamica futura della linea di riva richiede la definizione della forzante idrodinamica che induce il trasporto solido longitudinale, responsabile dell'evoluzione a lungo termine del litorale.

La definizione della forzante idrodinamica può essere effettuata secondo due approcci, congruenti da un punto di vista concettuale. Il primo approccio è quello di calcolare le caratteristiche (altezza d'onda, periodo, direzione e durata) della cosiddetta "onda morfologicamente equivalente" o "onda di modellazione". Tale onda è definita con l'intento di rappresentare l'anno climatico medio da un punto di vista energetico.

In alternativa, approccio seguito nel presente studio, è possibile utilizzare direttamente la sequenza di onde dell'anno climatico medio propagate sottocosta (sino alla batimetrica posta alla -10 m lmm).

La serie rappresentativa dell'anno climatico medio sottocosta è stata propagata fino al punto di frangimento mediante la teoria lineare delle onde.

4. CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

4.1 Approccio metodologico

Allo scopo di assicurare l'affidabilità dei risultati delle simulazioni numeriche orientate alla definizione della tendenza evolutiva futura della linea di riva è necessario anteporre alla vera e propria fase predittiva una fase preliminare di calibrazione del modello mediante utilizzo dei dati storici a disposizione. A tal proposito, per verificare in modo oggettivo le tendenze evolutive del litorale di interesse risulta necessario condurre l'analisi diacronica di almeno due linee di riva, rilevate in tempi diversi (epoche). Pertanto, il modello, sulla base delle schematizzazioni operate e delle condizioni al contorno imposte, è stato calibrato mediante simulazione dell'evoluzione del litorale tra la linea di riva del 2007 e quella del 2018. Tali risultati sono stati comparati con quelli ottenuti dall'analisi diacronica effettuata sulle linee di riva misurate nelle suddette epoche e riportate nel paragrafo successivo.

4.2 Analisi diacronica delle linee di riva

Nell'ambito di questo studio è stata effettuata l'analisi sulle linee di riva del 2007 e del 2018 desunte da immagini satellitari georeferenziate e digitalizzate. Pertanto, l'analisi si estende su un orizzonte temporale di 13 anni, ritenuto rappresentativo da un punto di vista morfologico. Tali linee di riva sono state opportunamente regolarizzate tramite discretizzazione con passo pari a 10 metri.

Le linee di riva sono state comparate al fine di calcolare, in corrispondenza di ciascun vertice di discretizzazione, le variazioni subite secondo la relazione:

$$\Delta Y_{1,2} = Y_2 - Y_1$$

dove il pedice indica l'epoca di misura della riva. Valori positivi di ΔY rappresentano un avanzamento della linea di riva, mentre valori negativi ne denunciano un arretramento.

Nei grafici di Figura 4.1 e Figura 4.2 e Figura 4.3 sono riportati i risultati dell'analisi. In particolare, in ognuna delle figure, l'immagine a sinistra mostra i risultati sull'intera unità fisiografica analizzata, l'immagine al centro evidenzia i risultati in corrispondenza dell'intero litorale di Silvi mentre quella a destra, il dettaglio dei risultati in corrispondenza dell'area oggetto di intervento. Nello specifico, la Figura 4.1, mostra i risultati in termini di posizione della linea di riva, la Figura 4.2 mostra i risultati in termini di rateo medio annuo di variazione della posizione della linea di riva con passo pari a 10 m mentre la Figura 4.3 mostra le aree di litorale in avanzamento e in arretramento valutate tra il 2007 e il 2018.

In sintesi, con riferimento ai risultati evidenziati in Figura 4.2 e Figura 4.3, l'analisi relativa al periodo di osservazione tra il 2007 e il 2018 evidenzia che l'intera unità fisiografica è in sostanziale stabilità con una variazione media di circa +0.25 m/anno per l'intero litorale. Utilizzando la stima della profondità di chiusura desunta dallo "Studio Meteomarino" disponibile nell'area (pari a circa 7.00 m) e considerando un'altezza della berma pari a 1.00 m, si stima un incremento volumetrico medio annuo pari a circa 35'000 m^3/anno. Tale valore deve essere imputato parzialmente ai lavori di ripascimento effettuati negli anni passati e al contributo sedimentario dei corsi d'acqua che alimentano il litorale.

In particolare, è possibile osservare (Figura 4.2 e Figura 4.3) che in generale il litorale di Silvi, così come quello di Pineto, sono in sostanziale stabilità. Tuttavia, si osservano criticità locali, anche piuttosto evidenti, in particolare nel tratto immediatamente a Nord del litorale antistante il centro abitato di Pineto e nel tratto a nord del sistema di difesa a celle in corrispondenza del litorale sud di Silvi. In quest'ultimo caso si riscontra un arretramento in prossimità del litorale oggetto di intervento mediamente pari a circa -0.45 m/anno con un valore massimo di arretramento pari a circa -0.80 m/anno. In questo tratto, di estensione longitudinale pari a circa 1300 m, il deficit sedimentario può essere stimato pari a 4'000 m^3/anno (3,20 m^3/anno/m). È da osservare che tale valore è influenzato verosimilmente (ovvero può rappresentare una sottostima) dagli interventi di sversamento effettuati negli anni passati.

Si ritiene che nell'intervallo temporale considerato, il deficit sedimentario non sia influenzato dalla diminuzione dell'apporto dei corsi d'acqua a causa della presenza di invasi (soprattutto lungo il corso del Fiume Vomano) e degli interventi di sistemazione dei bacini idrografici che risalgono ad un periodo precedente.

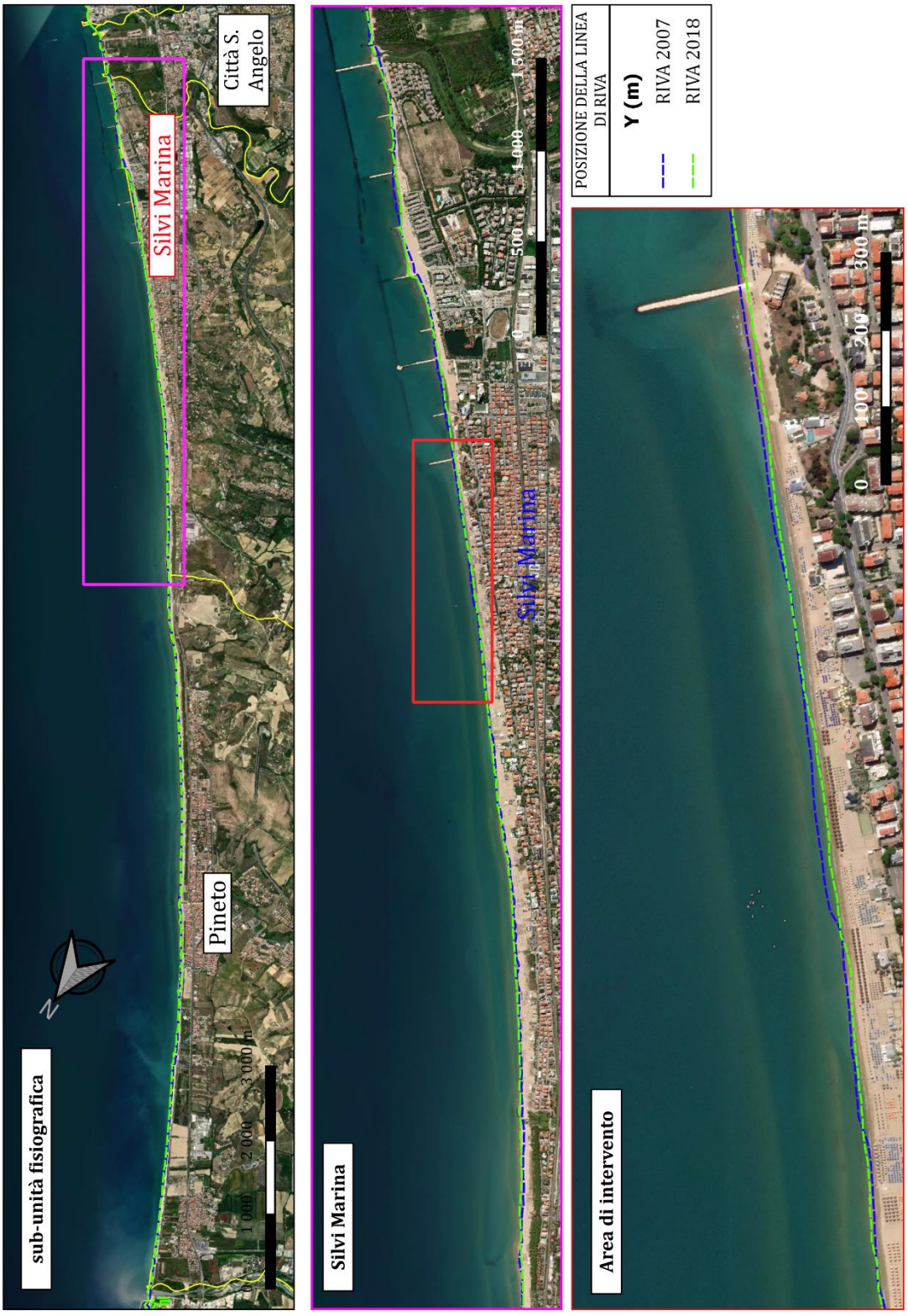


Figura 4.1: *Posizione della linea di riva nel 2007 e nel 2018. A sinistra, in corrispondenza dell'intera unità fisiografica, al centro, in corrispondenza del litorale di Silvi Marina mentre a destra in corrispondenza dell'area di intervento.*



Figura 4.2: *Rateo annuo della variazione della posizione della linea di riva tra il 2007 e il 2018. A sinistra, in corrispondenza dell'intera unità fisiografica, al centro, in corrispondenza del litorale di Silvi Marina mentre a destra in corrispondenza dell'area di intervento.*

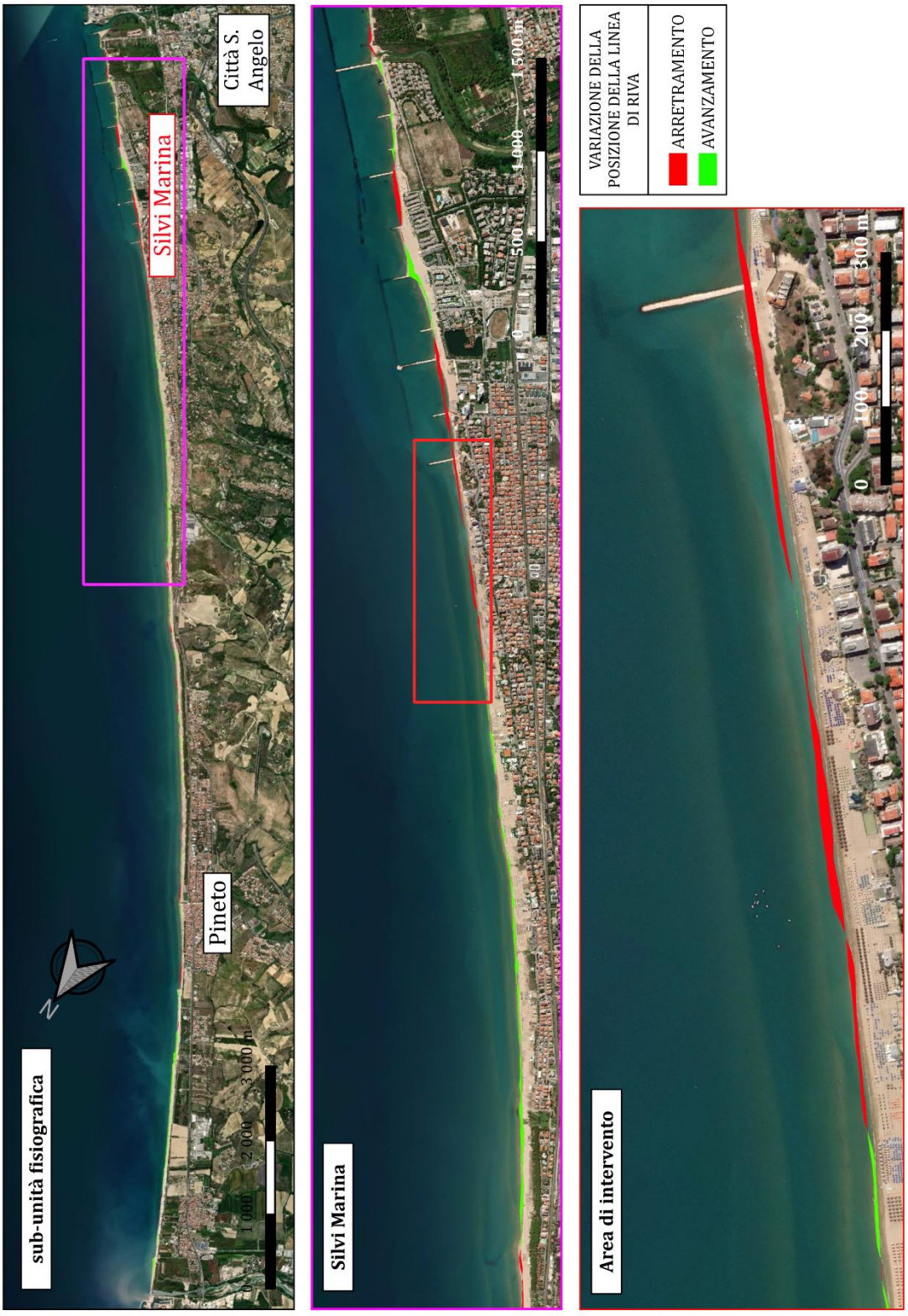


Figura 4.3: *Variazione areale della posizione della linea di riva tra il 2007 e il 2018. A sinistra, in corrispondenza dell'intera unità fisiografica, al centro, in corrispondenza del litorale di Silvi Marina mentre a destra in corrispondenza dell'area di intervento.*

4.3 Portata solida longitudinale su base morfologica

L'analisi diacronica della linea di riva consente il calcolo del flusso solido longitudinale attraverso la risoluzione, secondo uno schema alle differenze finite, della nota equazione differenziale del bilancio solido litoraneo utilizzata dai modelli numerici ad una linea come descritto nel capitolo precedente, in funzione della componente longitudinale Q del flusso solido litoraneo:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D}\left(\frac{\partial Q}{\partial x} \pm q\right) = 0 \qquad (4\text{-}1)$$

nella quale la variazione temporale a lungo termine della posizione della linea di riva (y) è legata alla variazione spaziale della componente longitudinale del trasporto solido volumetrico (Q), agli eventuali apporti e perdite sedimentari trasversali (q) e al valore dell'estensione verticale della spiaggia (D). Poiché risulta nota, sulla base dei rilievi, l'evoluzione nel tempo della posizione della linea di riva, si evince che l'equazione del bilancio sedimentario può essere utilizzata per la valutazione del gradiente della componente longitudinale del trasporto solido e degli apporti sedimentari:

$$-\mathrm{D}\,\frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta x} \pm q \qquad (4\text{-}2)$$

Si osserva che l'analisi diacronica delle linee di riva non permette la stima diretta della componente longitudinale del trasporto solido (Q), bensì del suo gradiente e della somma algebrica degli apporti e perdite trasversali (q). Questi ultimi rappresentano, in generale, l'influenza di fattori riconducibili agli effetti a lungo termine della dinamica trasversale (deflazione eolica, apporto solido fluviale, perdite sedimentarie dovute a correnti di *rip*, etc…) e di eventuali interventi di ripascimento. Tuttavia, note le condizioni al contorno, è possibile stimare il valore del termine trasversale (q).

Al fine di stimare l'andamento della portata solida longitudinale su base morfologica, è necessario prefissare alcuni parametri ed ipotizzare le condizioni di flusso solido ai due estremi del tratto di costa in esame. Per quanto riguarda quest'ultimo punto, l'attuale morfologia degli apparati di foce del Fiume Vomano e del Fiume Saline, anche in considerazione della presenza di opere di difesa a ridosso degli apparati di foce, lascia supporre che gli scambi di materiale solido con i litorali limitrofi siano praticamente trascurabili. Pertanto, il tratto di costa in esame si prefigura come un'unità fisiografica indipendente, e quindi con flussi longitudinali trascurabili agli estremi. Inoltre, e come già anticipato nell'ambito dell'analisi diacronica delle linee di riva, è necessario definire il

parametro (D) dell'equazione (4-2), che rappresenta l'estensione verticale di spiaggia, intesa come somma della profondità di chiusura (D_c) e dell'altezza della berma (D_b). La profondità di chiusura D_c rappresenta il limite di largo della cosiddetta fascia attiva, oltre la quale l'azione del moto ondoso non ha capacità di indurre significative variazioni di profondità. La profondità di chiusura, desunta dallo "Studio Meteomarino", ha un valore di D_c circa pari a 7.00 m, alla quale va sommata l'altezza della berma, assunta pari a circa 1.00 m ottenendo così un valore della profondità D pari a 8.00 m.

Nella Figura 4.4 è riportato l'andamento della componente longitudinale del trasporto solido litoraneo nel periodo di osservazione 2007-2018, espresso in m^3/anno, ottenuta imponendo un valore nullo al valore del termine q nell'equazione (4-2). Come atteso, la portata solida longitudinale in corrispondenza del limite Sud della sub-unità fisiografica considerata non è nulla. Infatti, come già anticipato, il litorale mostra un incremento medio di sedimento pari a +35'000 m^3/anno.

Trascurando il ruolo degli sversamenti operati negli anni passati, l'incremento della quantità di sedimento presente nel litorale può essere associato al ruolo sedimentario delle foci fluviali. In tal senso, è stato considerato il ruolo dei fiumi Vomano, Calvano, Cerrano e Piomba nel bilancio sedimentario dell'unità fisiografica. In prima approssimazione, in assenza di dettagliate informazioni relative al trasporto solido dei fiumi, il contributo di ogni asta fluviale è stato stimato in funzione dell'estensione e delle caratteristiche geomorfologiche del bacino idrografico sotteso alla foce fluviale. La Tabella 4-1 mostra il contributo di ogni asta fluviale considerato per la valutazione della componente longitudinale del trasporto solido litoraneo riportato in Figura 4.5.

I risultati mostrano che il trasporto solido longitudinale è diretto mediamente verso Sud-Est nel primo tratto del dominio di calcolo, in particolare, in corrispondenza di tutto il litorale di Pineto, mentre è diretto mediamente verso Nord-Ovest in corrispondenza del litorale di Silvi.

Asta fluviale	Estensione del bacino idrografico (km^2)	Contributo specifico (m^3/anno/km^2)	Contributo totale (m^3/anno)
Fiume Vomano	793	22.7	18000
Torrente Calvano	50	240.0	12000
Torrente Cerrano	22	113.6	2500
Torrente Piomba	110	22.7	2500
Totale	975	35.9	35000

Tabella 4-1: *Stima del contributo sedimentario di ogni asta fluviale presente nell'unità antropica in esame.*

La Figura 4.6 mostra i valori medi del trasporto solido longitudinale. Complessivamente il trasporto solido longitudinale ha un valore medio su tutta l'unità fisiografica pari a 4300 m^3/anno diretta verso sud-est. In corrispondenza del tratto di litorale nord si stima una portata media, diretta verso Sud-Est, pari a circa 9'400 m^3/anno. La portata solida longitudinale assume un andamento pressoché costante in corrispondenza del litorale Sud di Pineto e decresce fino al litorale immediatamente a nord dell'area di intervento (evidenziata in grigio nella figura) per poi tornare a crescere in corrispondenza del litorale Sud di Silvi, in cui si registrano valori del trasporto solido mediamente pari a circa 5100 m^3/anno diretti verso nord-est. Occorre sottolineare che l'andamento del trasporto solido in quest'ultimo tratto di litorale è influenzato dalla presenza delle opere di difesa presenti.

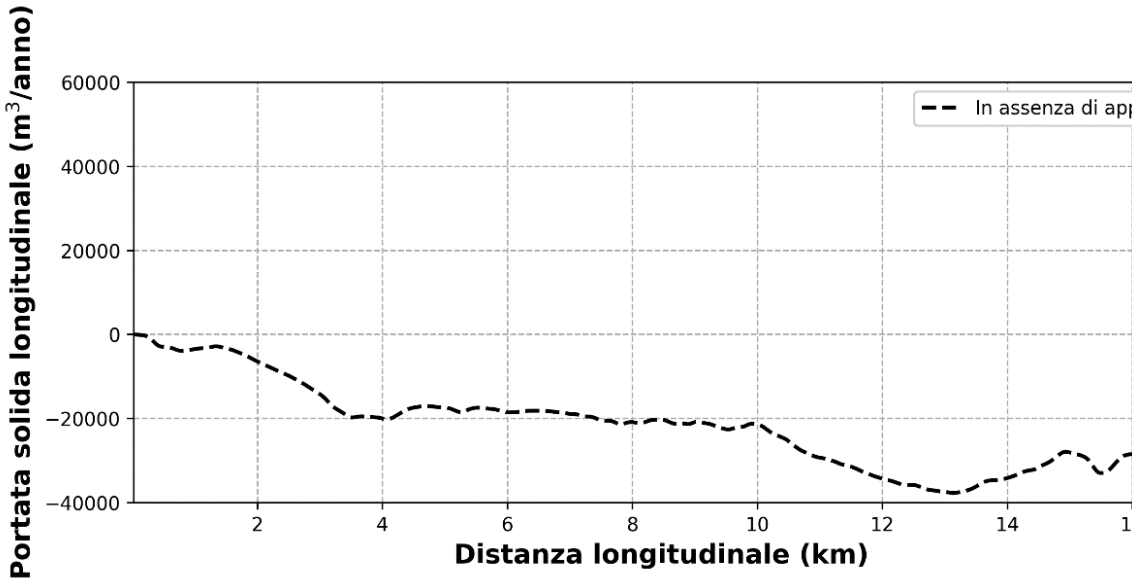


Figura 4.4: *Componente longitudinale del trasporto solido litoraneo calcolato in funzione delle variazioni diacroniche della linea di riva dal 2007 al 2018 in totale assenza di perdite o apporti sedimentari. L'origine dell'asse delle ascisse è posta in corrispondenza della Foce del Vomano.*

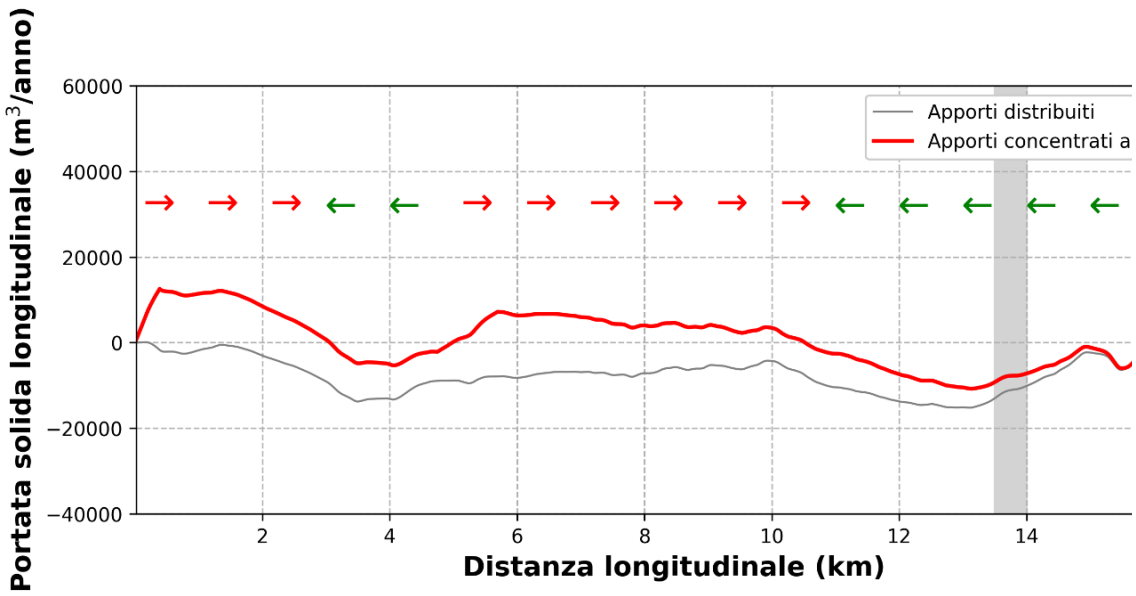


Figura 4.5: *Componente longitudinale del trasporto solido litoraneo calcolato in funzione delle variazioni diacroniche della linea di riva dal 2007 al 2018 in presenza degli apporti fluviali. L'origine dell'asse delle ascisse è posta in corrispondenza della Foce del Vomano.*

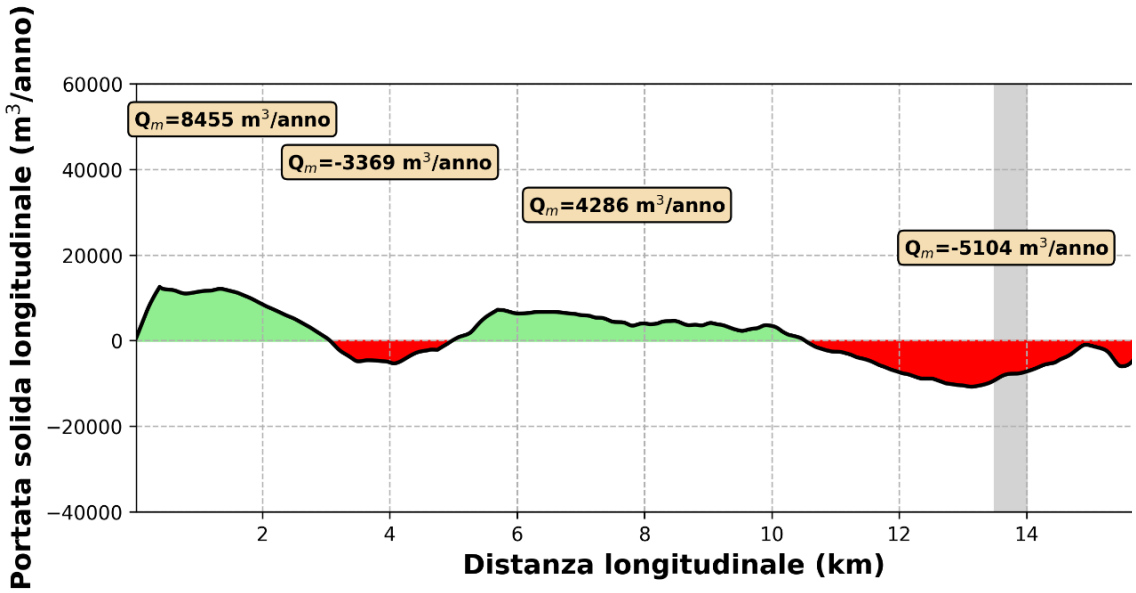


Figura 4.6: *Valori medi del trasporto solido longitudinale in corrispondenza dell'intera unità antropica in esame. L'origine dell'asse delle ascisse è posta in corrispondenza della Foce del Vomano.*

4.4 Confronto con i risultati numerici

La Figura 4.7 mostra il risultato della calibrazione in termini di trasporto solido longitudinale ricostruito numericamente (grafico in alto) e stimato sulla base dell'analisi diacronica delle linee di riva riportato nel paragrafo precedente (grafico in basso). Il confronto della stima numerica con la stima morfologica permette di ritenere affidabile l'utilizzo del modello

numerico per l'esclusiva valutazione della tendenza evolutiva a lungo termine del litorale in esame. In particolare, è importante sottolineare che la variazione del trasporto solido longitudinale (in diminuzione, ovvero in aumento) è ben colta dal modello numerico calibrato. È altrettanto ben colto l'ordine di grandezza del trasporto solido longitudinale (valori massimi nell'ordine dei 20'000 m^3/anno). Si sottolinea che l'evoluzione a lungo termine della linea di riva, secondo l'equazione di conservazione della massa sedimentaria, è "forzata" dal gradiente del trasporto solido longitudinale.

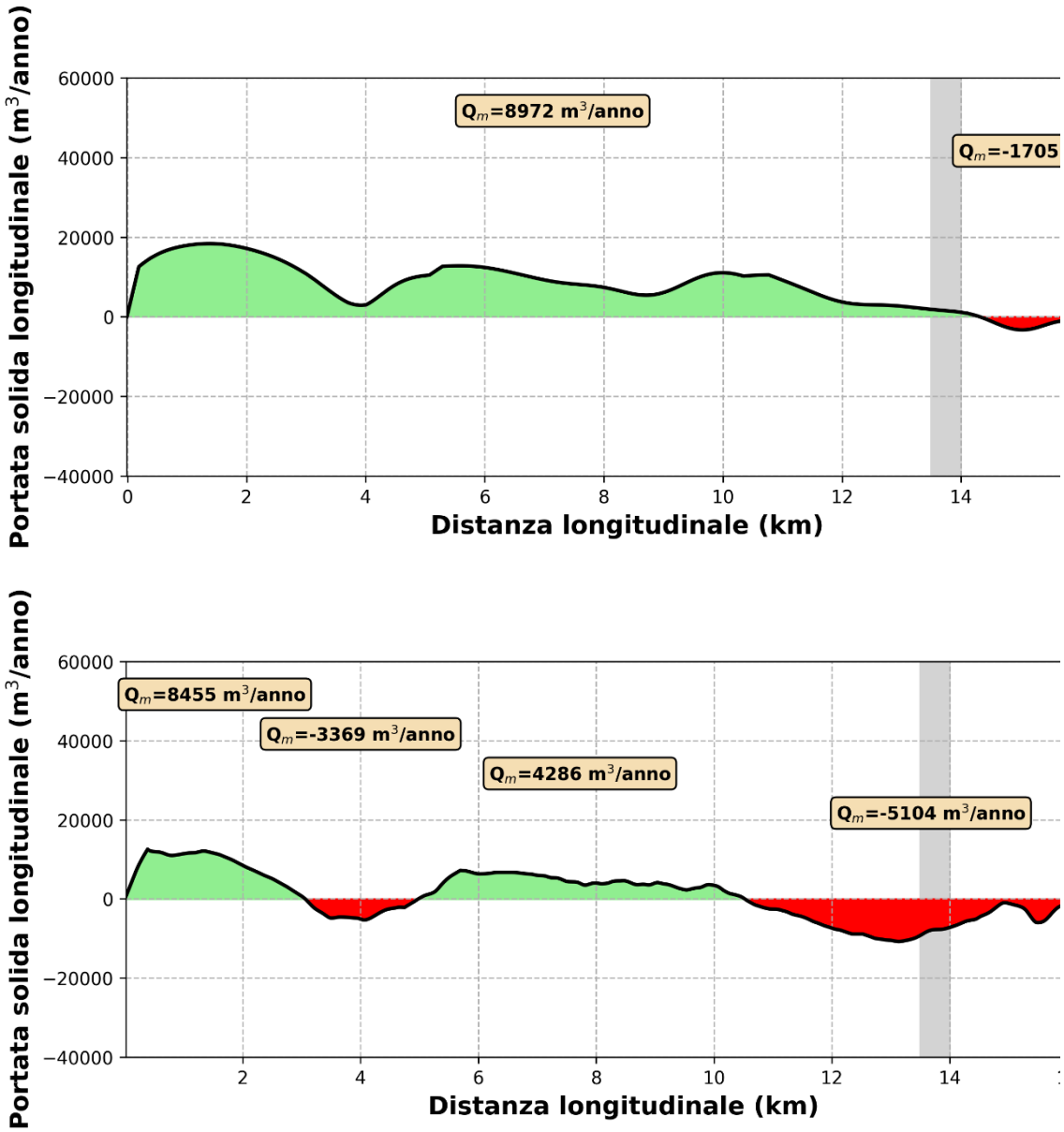


Figura 4.7: *Risultati della calibrazione. In alto è riportato il trasporto solido longitudinale ricostruito numericamente, in basso il trasporto solido longitudinale ricostruito su base morfologica. L'area in grigio si riferisce alla zona di intervento.*

5. SCENARI DI SIMULAZIONE

Questo capitolo ha lo scopo di descrivere le caratteristiche degli scenari di simulazione.

Nel seguito vengono mostrati gli scenari di totale assenza di interventi (la cosiddetta “opzione 0”) e della configurazione di intervento limitatamente in corrispondenza del tratto di litorale oggetto di intervento.

Nel capitolo successivo vengono mostrati i risultati limitatamente in corrispondenza del tratto di litorale oggetto di intervento e al fine di evidenziare gli eventuali effetti al contorno, in corrispondenza del litorale posto a nord dell’area.

5.1 Opzione Zero

La simulazione di riferimento è costituita dalla situazione di fatto (Opzione zero, “*do nothing”*). Pertanto, è stata effettuata una simulazione con orizzonte temporale pari a 10 anni dell’evoluzione naturale a lungo termine del litorale compreso tra la Foce del Vomano e la Foce del Saline, allo scopo di stimarne la tendenza evolutiva. La Figura 5.1 mostra la configurazione attuale in corrispondenza del litorale oggetto di intervento, con evidenziata la linea di riva del 2018 e parte del sistema di difesa esistente e di cui si è tenuto conto nelle simulazioni numeriche.



Figura 5.1*: Scenari di simulazione: schematizzazione dell’Opzione* 0

5.2 Configurazione Di Progetto

Lo scenario di intervento, schematizzato in Figura 5.2, prevede l'estensione verso Nord del sistema di difesa "a celle" esistente per un tratto di circa 500 m e la realizzazione di due pennelli emersi a Nord del prolungamento del suddetto sistema di difesa a cella per limitarne gli effetti di bordo. In particolare, la cella è costituita dal prolungamento della barriera sommersa esistente posta a quota -1.50 lmm, che si intesta a un pennello parzialmente sommerso con parte emersa di lunghezza pari a 150 m e un pennello emerso centrale alla cella di lunghezza pari a 100 m. Invece il primo pennello subito a Nord della suddettta cella, ha una lunghezza pari a 100 m con quota della berma pari a +1.50 m lmm. Il secondo pennello, posto una distanza pari a 170 m più a nord del primo, ha una lunghezza pari a 35 m con quota della berma pari a +1.50 m lmm.



***Figura 5.2**: Scenari di simulazione: schematizzazione della Configurazione di progetto.*

6. ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI

6.1 Considerazioni generali

Come già anticipato, le simulazioni numeriche sono state effettuate sull'intera unità fisiografica identificata. In particolare, l'analisi si è estesa dalla Foce del Vomano alla foce del Saline per un'estensione pari a circa 17 km. Nel seguito, tuttavia, i risultati sono analizzati e mostrati in corrispondenza dell'area di intervento e dell'area potenzialmente interessata dagli effetti al contorno.

È necessario un commento rispetto all'analisi comparativa. Infatti, come è d'uso comune nell'ambito delle analisi morfodinamiche, gli effetti di qualsivoglia intervento devono essere valutati rispetto allo scenario del non intervento e non rispetto alla condizione iniziale.

6.2 Opzione Zero

La Figura 6.1 riporta il dettaglio dei risultati della tendenza evolutiva del litorale su un orizzonte temporale di 10 anni, per lo scenario di totale assenza di intervento.

Si può osservare che la zona a nord del sistema di opere di difesa esistenti corrispondente all'area di intervento risulta in arretramento. In tale area l'arretramento medio della linea di riva a lungo termine è pari a circa -1.0 m/anno. Nelle restanti aree, si osserva una sostanziale stabilità del litorale. In particolare, si osservano avanzamenti e arretramenti non significativi da un punto di vista pratico, in quanto inferiore al limite di ±0.50 m/anno usualmente considerato per poter considerare il litorale in effettivo avanzamento o arretramento.

In estrema sintesi, l'assenza di intervento vede continuare il processo di arretramento della linea di riva per una distanza di circa 600 m a nord del sistema di difesa esistente.

Come già anticipato, il risultato ottenuto per questo scenario è utilizzato come termine di paragone, nell'ambito dell'approccio comparativo.

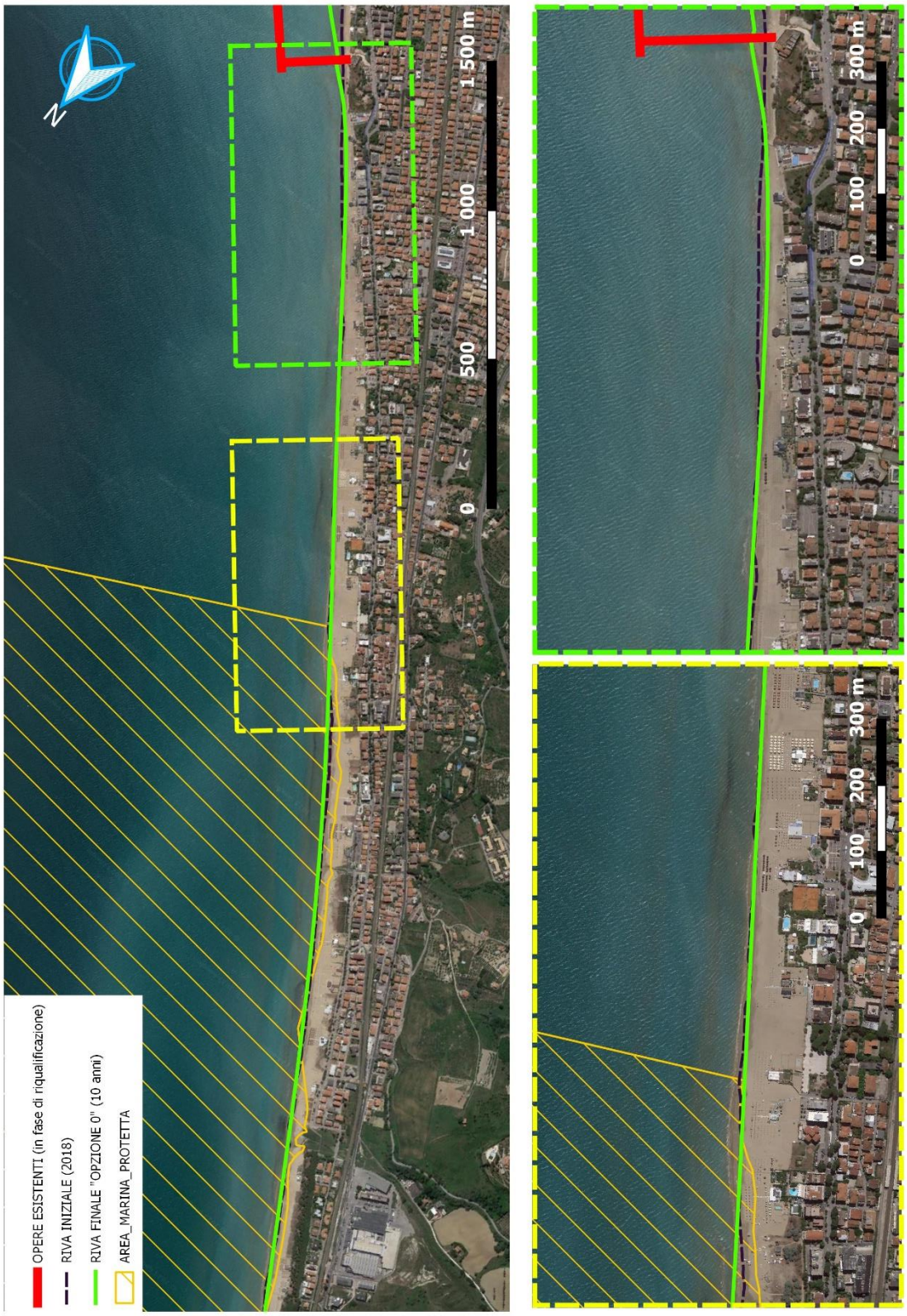


Figura 6.1: *Risultati numerici ottenuti per la totale assenza di interventi (Opzione zero).*

6.3 Configurazione di progetto

La Figura 6.3 riporta il dettaglio dei risultati della tendenza evolutiva del litorale su un orizzonte temporale di 10 anni, per la configurazione di progetto, dove risulta evidente un avanzamento della linea di riva in corrispondenza del prolungamento del sistema di difesa a cella di progetto.

6.4 Analisi comparativa di sintesi

La Figura 6.2 sintetizza qualitativamente i risultati dell'analisi comparativa rispetto all'opzione di assenza di interventi in termini di variazione della posizione della linea di riva. Dal grafico riportato in figura è possibile osservare che non si verificano effetti significativi nell'area a nord dell'area di intervento, a meno che in diretta corrispondenza dell'area di realizzazione delle opere. In particolare, gli effetti di bordo delle opere di progetto si esauriscono in corrispondenza dell'area marina protetta in cui, pertanto non si riscontrano modifiche significative dell'evoluzione della linea di riva rispetto all'opzione 0.

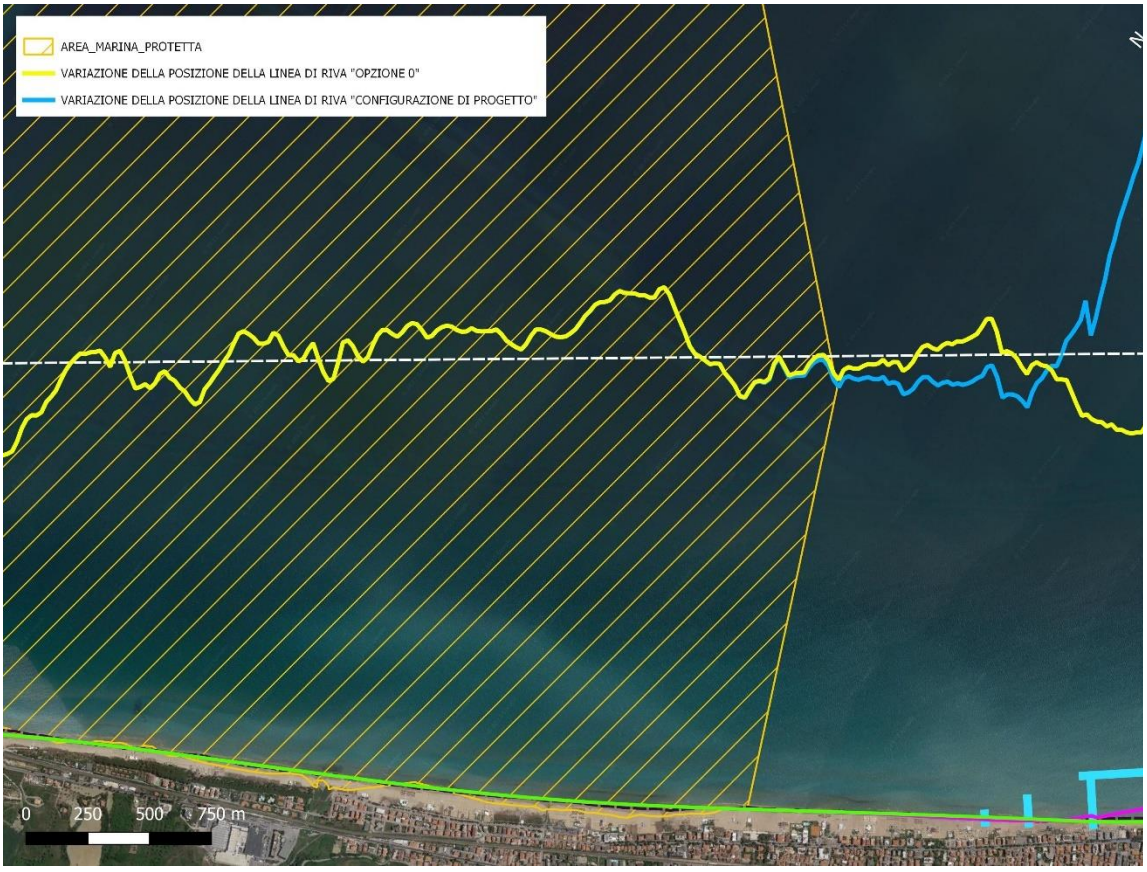


Figura 6.2: *analisi comparativa dei risultati tra Opzione 0 e Configurazione di progetto in termini di variazione della posizione della linea di riva calcolata*

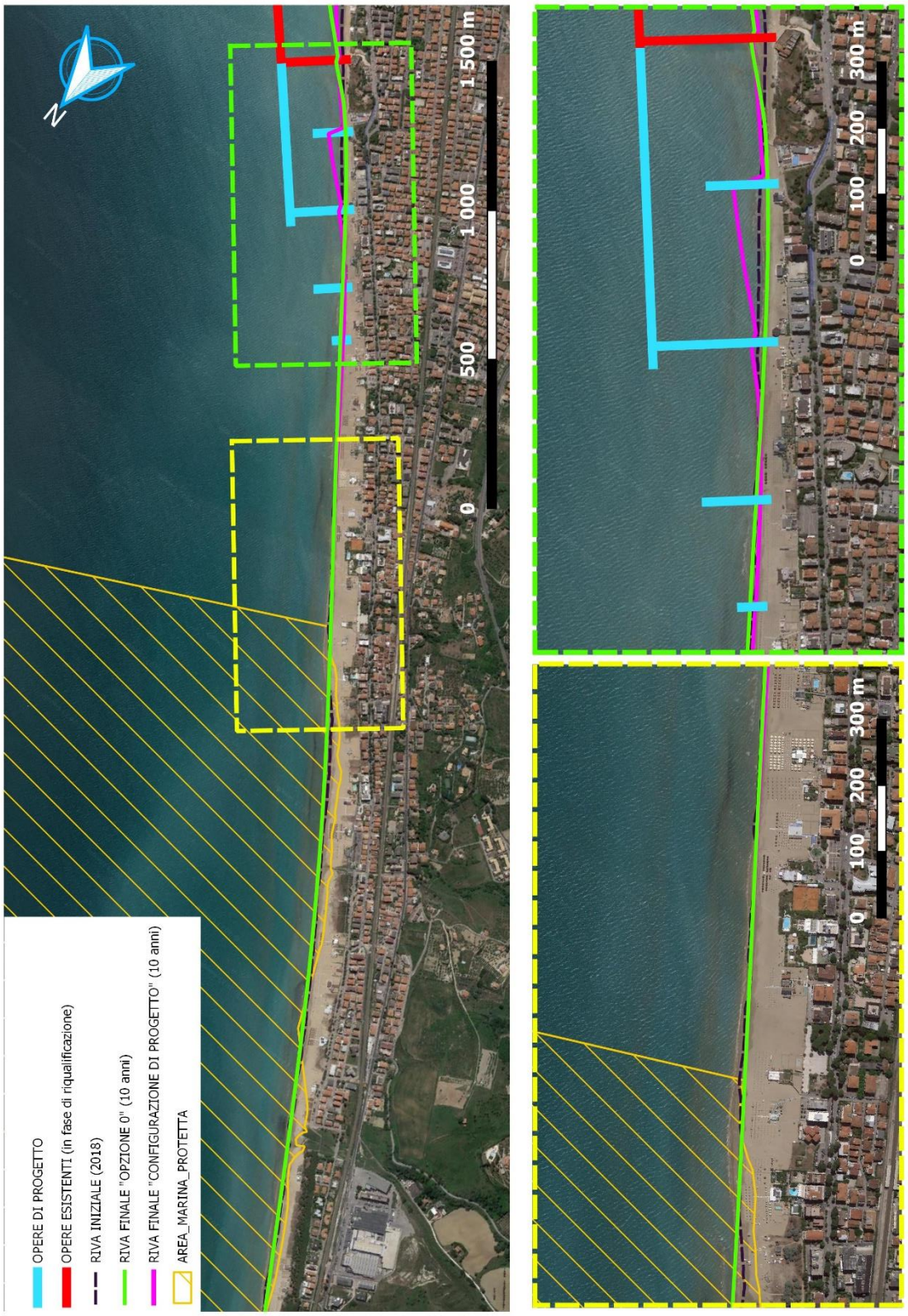


Figura 6.3: *Risultati numerici ottenuti per lo la configurazione di progetto".*

7. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Lo “Studio Morfodinamico” illustrato in questa relazione ha l’obiettivo di valutare la tendenza evolutiva a lungo termine del litorale al fine di valutare l’efficacia nonché di ottimizzare l’intervento di difesa in epigrafe.

L’area di intervento è localizzata immediatamente a nord del sistema di difesa “a celle” esistente lungo il litorale di Silvi Marina. L’intervento consiste nel prolungamento verso Nord del suddetto sistema di difesa “a celle” per un tratto di circa 500 m, e la realizzazione di due pennelli a Nord emersi di lunghezza complessiva pari a 100 m quello più a Sud e 35 m quello più a Nord, finalizzati a limitare gli effetti di bordo del sistema di difesa “a cella”.

Il modello numerico utilizzato per stimare la tendenza evolutiva a lungo termine del litorale è stato calibrato sulla base dei risultati di una dettagliata analisi morfologica effettuata sulla base delle linee di riva rilevate nel 2007 e nel 2018, su un orizzonte temporale di 11 anni.

L’approccio dello studio è di tipo comparativo: l’evoluzione a lungo termine in assenza di (ulteriori) interventi (opzione zero) è stata confrontata con quella ottenuta in presenza delle due opere trasversali.

L’analisi dei risultati permette di osservare che la realizzazione delle opere in progetto sortiscono un effetto localizzato nell’area di intervento. Infatti, in corrispondenza del litorale posto a nord dell’area, ove è localizzata l’Area Marina Protetta “Torre Cerrano”, non si riscontrano modifiche significative dell’evoluzione a lungo termine della linea di riva rispetto a quanto ottenuto in assenza di interventi.

8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AA.VV. (2003): “Coastal Engineering Manual: Part III – Coastal Sediment Transport”.

Brampton, A.H. e H. Ozasa (1980) “Mathematical Modelling of Beaches Backed by Seawalls”. Coastal Engineering, vol.4, No.11.

Gravens, M., Kraus, N.C., Hanson, H. (1991) “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. CERC Report 89-19.

Hanson, H. (1987) “GENESIS: A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use. University of Lund. Report 1007.

Hanson, H. e N.C. Kraus (1989) “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. CERC Report 89-19.

Kraus, N.C. e S. Harikai (1983) “Numerical model of the shoreline change at Oarai beach”. Coastal Engineering, vol.7, No.1.

Mimura, N., Shimizu, T., Horikawa K. (1983) “Laboratory study on the influence of detached breakwater on coastal change”. Proc. Coastal Structures '83, ASCE.

Pelnard-Considere, R. (1956): “Essai de theorie de l'evolution des formes de rivages en plages de sable et de galets” 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No.1.

Silvester, R. e Hsu, J.R.C. (1993). “Coastal stabilization”. World Scientific.