



Università degli Studi
di Messina



Università degli Studi Mediterranea
di Reggio Calabria

**Dottorato di ricerca in
"INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E DELLA SICUREZZA"**

Curriculum Ingegneria idraulica, costruzioni idrauliche e marittime, idrologia e
energia dalle acque
Ciclo XXXV

**Un nuovo metodo di ricostruzione del moto
ondoso mediante la tecnica del trasferimento
geografico**

SSD: ICAR/02

Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina

Dottorando: Dott. Ing. Diego Savasta

Coordinatore del Corso di Dottorato: Prof. Ing. Gaetano Bosurgi

Tutor dell'Attività di Ricerca: Prof. Ing. Giuseppe Barbaro

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Abstract	4
1. Inquadramento delle fonti di dati di moto ondoso	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Metodi indiretti.....	7
1.3 Dati Strumentali	9
1.3.1 Rete Ondametrica Nazionale italiana (RON).....	10
2. Metodi di trasposizione geografica dei dati di moto ondoso	15
2.1 Metodo di De Girolamo e Contini.....	16
2.2 Metodo di Barbaro et al.	19
2.3 Nuovo metodo di trasferimento dei dati di moto ondoso	22
2.4 Nuovo metodo modificato di trasferimento dei dati di moto ondoso.....	30
3. Verifica dei metodi.....	31
3.1 Area di studio e dati usati.....	31
3.2 Risultati e discussione	34
3.2.1 Trasferimento dei dati ondosi da Ortona a Isole Tremiti	35
3.2.2 Trasferimento dei dati ondosi da Crotona a Roccella	39
3.3.3 Trasferimento dei dati ondosi da Capo Spartivento a Roccella	43
3.3.4 Trasferimento dei dati ondosi da Civitavecchia a Isola di Giannutri	47
4. Conclusioni e futuri sviluppi.....	52
Riferimenti bibliografici.....	55
Indice delle figure.....	59

Abstract

The availability of quality, site-specific wave data for the investigated area is necessary for an accurate understanding of wave climate. Direct and indirect wave data often has insufficient spatial resolution to ensure the requirement of geographical representativeness for the area under study. The proposed wave data transfer method, in two versions, transfers entire time series of wave data from a point with data to a neighbouring one. The method is based on the empirical relationships of Shore Protection Manual method and the assumption of equal anemometric conditions at the two points, and involves estimating appropriate statistical parameters from the wind data characterizing the area comprising the two points. The method has been tested and compared with De Girolamo and Contini's method in four applications in the Mediterranean Sea, showing significantly better results in two applications. The lower performance exhibited in the further two applications can be attributed, in one case, to the considerable distance, 112 km, between the point with data and the transfer point, and, in the last case, to the difference between the fetches at those points. In fact, transfer methods are more accurate in the case of modest distances between the two points, which is the classic application of the transfer method in engineering practice. Moreover, the new transfer method is all the more reliable the more similar the fetches between the two points are.

The verification of the methods has been carried out by comparing the wave data recorded from one buoy (transfer point) with the simultaneous data obtained at the same point by transferring the wave data recorded from the other buoy (origin point).

The proposed wave reconstruction technique presents good accuracy in predictions of significant wave height and peak period and is susceptible to further improvement.

1. Inquadramento delle fonti di dati di moto ondoso

1.1 Introduzione

La conoscenza del clima meteomarinò è necessaria per la progettazione e realizzazione di opere offshore, portuali, costiere, dispositivi per la produzione di energia, per la mappatura del rischio di inondazione marina, per studi di trasporto e diffusione di sostanze inquinanti e per la previsione dell'evoluzione morfodinamica della linea di costa (*Barbaro et al., 2020; Tomasicchio et al., 2016*).

Una conoscenza esaustiva ed accurata del clima meteomarinò è, oggi, essenziale, dati i cambiamenti climatici attesi ai quali sono associati, principalmente, variazioni dei parametri caratteristici d'onda (altezza significativa, periodo medio, direzione media di propagazione delle onde) medi annuali (*Morim et al., 2020*) e l'innalzamento del livello medio del mare. Le attività citate dovrebbero tenere in conto degli effetti dei cambiamenti climatici e non possono prescindere da un rigoroso studio meteomarinò.

Lo studio meteomarinò è la base della progettazione delle opere in mare e si concretizza nella caratterizzazione del clima ondoso medio ed estremo nella località oggetto di studio. Lo studio è preceduto dall'individuazione, raccolta e analisi dei dati disponibili. I dati, in generale, sono l'origine di qualsiasi attività di calcolo, il cui risultato dipende, precipuamente, dagli stessi. La bontà del risultato è intimamente legata, perciò, alla qualità dei dati. Risultati erronei, nella fattispecie di uno studio meteomarinò finalizzato alla progettazione di un'infrastruttura portuale, possono comportare elevata agitazione ondosa interna, compromessa accessibilità, frequente insabbiamento e insufficiente dimensionamento strutturale delle opere, causando ingenti danni a numerosi soggetti. È d'uopo, dunque, prefiggersi come primo obiettivo la qualità dei dati.

I requisiti ideali dei dati di moto ondoso sono: rappresentatività geografica per il sito oggetto di studio, accuratezza, estensione temporale sufficiente (per la rappresentatività del campione per previsioni a lungo termine), elevato contenuto di informazioni e possibilità di estrarre tutti i parametri caratteristici del moto ondoso, buona copertura del periodo di rilievo, ridotto intervallo fra le registrazioni.

La rappresentatività geografica dei dati per un determinato punto su profondità infinita dipende dalla distanza tra questo e il punto di rilevamento/ricostruzione dei dati considerato, dalla similarità fra i relativi fetch, dall'eventuale influenza dell'orografia dei territori limitrofi. Infatti, all'aumentare della distanza tra i due punti aumenta la differenza tra le condizioni anemometriche dei due siti, quest'ultima eventualmente enfatizzata a causa della presenza di ostacoli al vento quali la presenza di isole o i rilievi della terraferma. Se la differenza fra i fetch è marcata, il moto ondoso prodotto dal vento nei due punti risulta ben diverso. Inoltre, il punto su alti fondali deve essere opportunamente individuato al fine di essere soggetto all'azione delle stesse onde che arrivano al punto sottocosta oggetto di studio.

Le fonti di dati maggiormente impiegate nella pratica ingegneristica sono le boe ondamiche e i metodi di ricostruzione del moto ondoso dai dati di vento.

1.2 Metodi indiretti

I metodi di ricostruzione del moto ondoso (hindcasting) dai dati di vento, denominati anche metodi indiretti, possono essere principalmente classificati in: metodi spettrali, metodi empirici, metodi statistici e reti neurali.

I metodi spettrali rappresentano analiticamente la superficie del mare come la sovrapposizione di un numero infinitamente grande di armoniche, ognuna avente ampiezza infinitesima h (m), frequenza f (Hz), direzione θ ($^\circ$) e energia E , direttamente proporzionale a h^2 . Ciascuna delle componenti dello spettro direzionale d'energia viene considerata separatamente: per ogni punto dello spazio di coordinate (x,y) e per ogni istante temporale t , per ogni valore della frequenza f e della direzione θ si considera $E(x,y,t,f,\theta)$, energia di ogni componente dello spettro; viene quindi operata una discretizzazione del dominio spazio-temporale, del dominio delle frequenze e delle direzioni. Per ciascuna di tali componenti si ha un bilancio dell'energia E espresso da un'equazione avente la seguente forma:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{C_g} E) = S \quad [1]$$

$\overline{C_g}$ è la celerità di gruppo in forma vettoriale. S è la somma dei termini sorgente che rappresentano: trasferimento di energia dal vento alla superficie marina, scambio di energia tra le componenti elementari dovuto alle interazioni non lineari, dissipazione di energia dovuta al white-capping, all'attrito col fondo e al frangimento indotto dalla profondità.

Tra i diversi metodi spettrali presenti in letteratura, i più noti sono: WAM (*Komen et al., 1994; The WAMDI Group, 1988*), impiegato dall'ECMFW (European Center Medium Weather Forecast); WAVEWATCH III (*Tolman, 2014*), impiegato dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration); SWAN (*Booij, Ris, and Holthuijsen, 1999*), modello per acque basse, largamente usato soprattutto per applicazioni locali; MIKE 21 SW (*DHI, 2017*).

In diversi lavori (*Cavaleri, 2009; Vicinanza, Contestabile, and Ferrante, 2013*) è stato rilevato come i dataset ECMFW (ottenuti mediante l'accoppiamento di un modello meteorologico al modello d'onda spettrale WAM), spesso utilizzati dagli ingegneri

marittimi, generalmente sottostimano i parametri d'onda. L'accuratezza nella predizione delle onde decresce ulteriormente nei bacini chiusi, vicino alla costa e per onde con altezza e periodi modesti (*Cavaleri and Sclavo, 2006*). *Liu, Schwab, and Jensen (2002)*, usando quattro differenti modelli spettrali, hanno ottenuto risultati con errori simili, comparandoli con i dati ondametrici misurati dalle boe. Essi credono che il concetto di spettro d'energia delle onde sia la causa della non accuratezza della predizione delle onde operata da tali modelli che, pertanto, non risulterebbero suscettibili di significativi miglioramenti.

Tali considerazioni, unitamente alla sovente limitata accessibilità dei dati derivanti da modelli spettrali, spesso inducono gli ingegneri ad usare altri metodi indiretti, tra cui i metodi di previsione d'onda semplificati. Questi metodi sono utili quando sono necessarie stime rapide e a basso costo e sono ragionevolmente accurati per situazioni semplici in cui gli effetti locali sono modesti (*US Army, 2003*). Sono solitamente basati su equazioni semi-empiriche sviluppate sulla base di interrelazioni tra parametri d'onda adimensionali. In letteratura sono stati presentati diversi metodi empirici quali: SMB (*Bretschneider, 1970*), Wilson (*Wilson, 1965*), Pierson-Moskowitz (*Pierson and Moskowitz, 1964*), JONSWAP (*Hasselmann et al., 1973*), Donelan (*Donelan, 1980; Donelan, Hamilton, and Hui, 1985*), Shore Protection Manual (*US Army, 1984*), Smith (*Smith, 1991*), Coastal Engineering Manual (*US Army, 2002*), Goda (*Goda, 2003*).

1.3 Dati Strumentali

Gli strumenti maggiormente utilizzati per la misura del moto ondoso si suddividono in: strumenti posizionati sul fondo (sensori acustici e sensori di pressione), strumenti di rilevazione remota, strumenti a bordo di navi (ovvero osservazione diretta da navi) e strumenti che galleggiano sulla superficie libera (boe ondometriche).

I sensori acustici sono strumenti collocati sul fondo del mare o su piattaforme o pontili al di sopra della superficie marina. Un segnale acustico viene inviato da un emettitore verso la superficie del mare, viene riflesso e quindi rilevato dopo un certo tempo da un ricevitore. Pertanto, conoscendo la velocità di propagazione del segnale nel mezzo, previa opportuna calibrazione per tener conto delle appropriate caratteristiche di temperatura e di salinità, e misurato il tempo impiegato dal segnale per giungere in superficie e ritornare al punto di emissione, si risale all'elevazione d'onda.

I sensori di pressione sono strumenti situati al di sotto della superficie del mare. La maggior parte dei sensori sono trasduttori che forniscono un segnale elettrico che viene convertito in una registrazione del livello dell'acqua in superficie. In particolare, l'elevazione della superficie marina è calcolata grazie alla misura della pressione dinamica dell'onda. L'ambito di applicazione dei sensori di pressione varia da 10 ai 20 m di profondità.

Sia i sensori acustici sia i sensori di pressione sono spesso utilizzati in accoppiamento a correntometri elettromagnetici per determinare la direzione del moto ondoso.

Con riferimento al telerilevamento dei dati ondosi, la tecnologia più diffusa è l'altimetro satellitare: si tratta di un radar azimutale che permette il rilievo dell'altezza significativa del moto ondoso e della velocità del vento, attraverso l'analisi del segnale elettromagnetico riflesso su di un'area (footprint) di alcuni chilometri di diametro in corrispondenza della verticale del passaggio. I satelliti usati a tal fine compiono un giro completo della Terra in circa 100 minuti e ripercorrono la stessa zona ad intervalli di tempo prefissati dell'ordine dei giorni (5-20 giorni). Essi sono gestiti da diverse agenzie spaziali tra le quali l'ESA, la NASA, l'Agenzia Spaziale Francese (CNES) e l'Agenzia Spaziale Indiana (ISRO). La bassa risoluzione temporale dei dati rilevati tramite i satelliti non ne consente l'uso diretto in studi sul clima ondoso di un paraggio. Invece, i dati satellitari, rivestono un ruolo fondamentale per la calibrazione e la messa a punto dei modelli spettrali.

I dati derivanti dalle osservazioni a vista condotte dalle navi sono forniti da Organizzazioni Meteorologiche quali il KNMI olandese o l'UKMO britannico. Essi consistono in serie statistiche non omogenee, sia nel tempo sia nello spazio. Infatti, le navi seguono rotte preferenziali e i traffici marittimi sono più concentrati in determinate stagioni. Inoltre, in presenza di forti burrasche, le osservazioni dalle navi sono carenti.

I dati di moto ondoso misurati direttamente dalle boe, data la maggiore accuratezza, sono da prediligere. Infatti, con riferimento all'altezza significativa, l'errore si attesta solitamente su pochi punti percentuali (*Cavaleri and Sclavo, 2006*).

1.3.1 Rete Ondametrica Nazionale italiana (RON)

In Italia, i dati diretti registrati da ondometri sono forniti dalla Rete Ondametrica Nazionale (RON), gestita dall'ISPRA dal 2008, e da alcune reti ondametriche di carattere locale.

La Rete Ondametrica Nazionale, dal 1989 al 1999, era costituita da otto boe in grado di misurare i parametri del moto ondoso direzionale e la temperatura dell'acqua. Gli strumenti adottati erano boe a disco direzionali Datawell-Wavec di tipo pitch-roll, dislocate a largo di La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotona, Catania e Mazara. Ogni boa era ormeggiata su fondali dell'ordine di 100 metri ed era dotata di un sistema di localizzazione che utilizzava il satellite ARGOS per il controllo continuo della posizione. I dati, consistenti in altezza significativa H_{m0} , periodo di picco T_p , periodo medio T_m e direzione media delle onde ϑ_m , venivano acquisiti normalmente per periodi di circa 30 minuti ogni tre ore (triorari) e ogni 30 minuti (semiorari) nel caso di superamento di un determinato valore di soglia (diverso per ogni boa) da parte dell'altezza significativa.

Nel corso dell'anno 1999 sono state introdotte alcune modifiche alla rete originaria, la cui consistenza è stata elevata a 10 stazioni, con l'aggiunta di una boa a largo di Ancona e di una boa a largo di Cetraro. Gli strumenti adottati per le due nuove stazioni, ed in via sperimentale per la stazione di Catania, erano boe a traslazione Datawell - Waverider.

La boa Datawell-Wavec segue il movimento della superficie del mare e mediante il sensore Hippy 120 ne misura l'elevazione e le inclinazioni riferite ad una piattaforma inerziale, contenuta all'interno del sensore, che individua il piano di riferimento orizzontale. Per le boe Wavec l'elevazione è ottenuta dalla doppia integrazione dell'accelerazione verticale

misurata da un accelerometro montato sulla piattaforma. Le inclinazioni sono ottenute dalla misura del seno degli angoli formati tra gli assi x e y del sistema di riferimento solidale con la boa ed il piano di riferimento orizzontale. Un sistema di bussole misura le componenti del campo magnetico lungo gli assi del sistema di riferimento solidale con la boa: H_x , H_y , H_z . Da tali componenti del campo magnetico e dalle suddette inclinazioni si ricavano: il valore assoluto e l'inclinazione del campo magnetico terrestre, l'orientamento della boa e le due pendenze locali della superficie dell'acqua nelle due direzioni nord-sud ed est-ovest, che consentono di definire la direzione di propagazione delle onde.

La boa Datawell-Waverider misura il moto ondoso mediante il sensore Hippy 40. Una bussola inerziale misura le componenti del campo magnetico H_x e H_y lungo gli assi x e y del sistema di riferimento solidale con la boa, e la direzione dell'asse z, perpendicolare a x e y. In tal modo la posizione della boa rispetto al sistema fisso di coordinate nord, ovest e verticale è completamente determinata. L'elevazione è ottenuta dalla doppia integrazione dell'accelerazione verticale misurata da un accelerometro montato su una piattaforma stabilizzata. Dalle accelerazioni misurate tramite altri due accelerometri lungo le direzioni x e y solidali con il riferimento mobile della boa vengono calcolate le accelerazioni lungo gli assi fissi orizzontali nord ed ovest. Le tre accelerazioni sono poi sottoposte a doppia integrazione fino ad ottenere i corrispondenti spostamenti e opportunamente filtrate.

Nell'anno 2002 la RON è stata oggetto di un significativo ampliamento ed è stato completamente rinnovato il parco boe impiegato per il monitoraggio. Le boe ondometriche adottate dal 2002 erano del tipo Triaxys in numero pari a 14, avendo quindi aggiunto quattro nuove boe ormeggiate a largo di Civitavecchia, Palermo, Punta della Maestra (alla foce del fiume Po) e Siniscola. Nell'anno 2007, con l'aggiunta di una boa a largo di Cagliari, il numero totale delle stazioni di monitoraggio era pari a 15. Dal punto di vista dei parametri osservati non ci sono state variazioni rispetto alle grandezze misurate dall'anno 1989. Le principali differenze introdotte rispetto alla versione precedente della rete erano dovute all'uso di sensori allo stato solido ed all'aumento della frequenza di campionamento, inoltre, è stato cambiato il sistema di localizzazione satellitare passando al sistema Inmarsat D+. I dati, riferiti a periodi di 30 minuti (semiorari), venivano comunque trasmessi in telemisura ogni tre ore.

Dal 2009 al 2014 la Rete Ondametrica Nazionale è stata completamente rinnovata con l'adozione di boe meteo-ondametriche del tipo WatchKeeper. Tali boe erano equipaggiate con sensore ondametrico allo stato solido del tutto analogo a quello in uso nella RON già dall'anno 2002; inoltre, erano dotate di sensori per la misura di parametri meteorologici (temperatura dell'acqua, temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione atmosferica, velocità e direzione del vento), di riflettore radar e di un fanale marino per segnalazione notturna. I dati, riferiti a periodi di 30 minuti (semiorari), venivano acquisiti in telemisura in tempo-reale ed immessi nella rete internazionale Global Telecommunication System (GTS) del WMO per la condivisione con le comunità meteorologiche e oceanografiche coordinate nel programma internazionale Data Buoy Cooperation Panel (DBCP).

La RON, nella configurazione fin qui descritta (Figura 1), non è più attiva dal 2014.



Figura 1. Configurazione della RON nel 2014

Dal 2021, le misurazioni dirette in mare mediante ondometri sono riprese mediante l'installazione di otto boe a largo di Alghero, Ancona, Venezia, Crotona, La Spezia, Mazara del Vallo, Monopoli, Ponza (Figura 2). Le boe sono progettate e realizzate da SIAP+Micros, dotate di strumenti all'avanguardia per l'osservazione dei parametri meteo-marini e di una sonda multi-parametrica per monitorare le variazioni stagionali di temperatura e salinità dell'acqua.

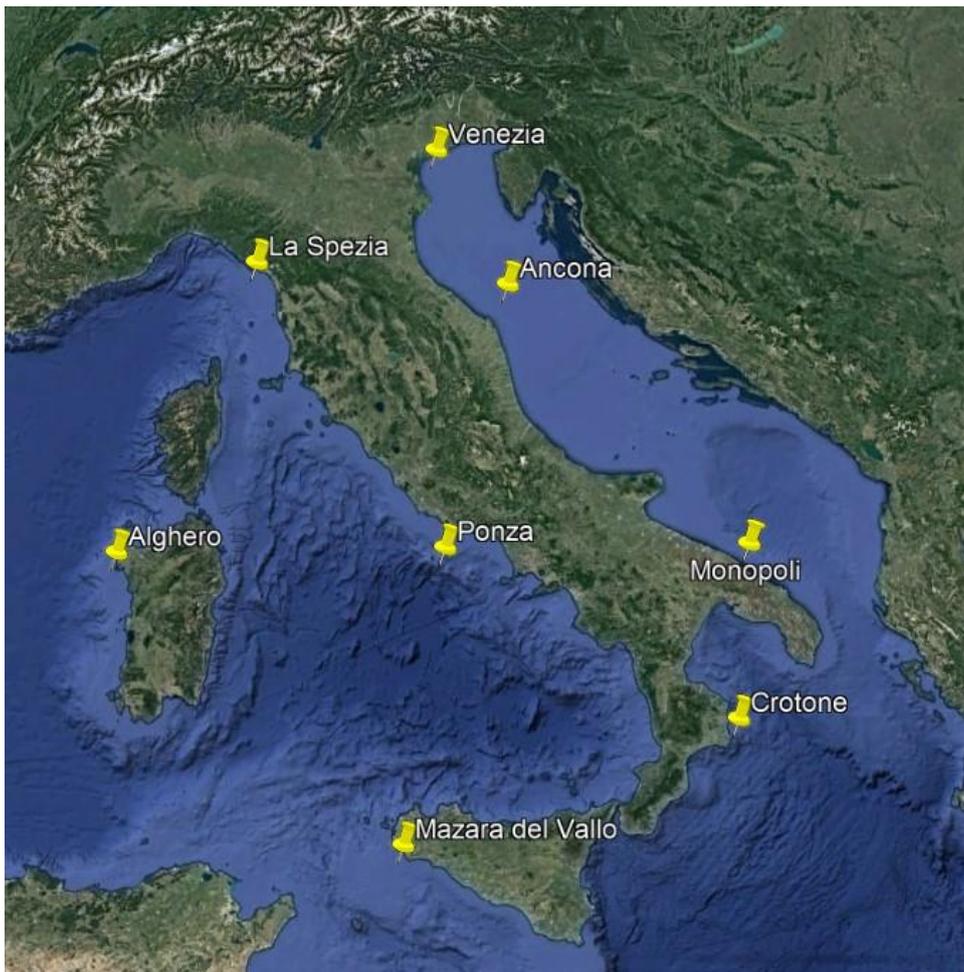


Figura 2. Configurazione della RON dal 2021

Sia la configurazione attuale della RON sia la configurazione del 2014 non sono in grado di rappresentare il clima ondoso dei paraggi lungo i 7500 km di coste italiane. Neanche l'integrazione della Rete Ondametrica Nazionale con reti ondametriche locali, gestite da diversi enti in regioni quali la Calabria, la Puglia, la Campania, la Toscana, la Liguria,

l'Emilia Romagna è sufficiente alla rappresentazione esaustiva del clima ondoso dei mari italiani. Inoltre, si ritiene che un futuro rilevante potenziamento dell'attuale rete ondometrica sia di difficile attuazione dati i costi associati all'installazione, esercizio e manutenzione delle boe ondometriche e le relative problematiche di carattere gestionale e autorizzativo. D'altro canto, il requisito di rappresentatività geografica dei dati di moto ondoso non potrà mai essere soddisfatto per qualsiasi punto di interesse qualsiasi sia la dotazione numerica delle stazioni di misura a largo. Tale circostanza è dovuta al notevole gradiente spaziale dei fetch nel Mar Mediterraneo che implica differenze significative tra i climi ondosi relativi a punti relativamente vicini.

L'insufficiente copertura spaziale delle boe ondometriche, che si riscontra su scala globale, richiede sovente il ricorso ai metodi semplificati. Tra questi vi sono i metodi di trasferimento, meglio descritti nel seguito.

2. Metodi di trasposizione geografica dei dati di moto ondoso

I metodi di trasposizione geografica dei dati di moto ondoso consentono, noti i dati di moto ondoso in un punto (punto di origine), di stimare i dati in un punto vicino (punto di trasferimento). Il ruolo che rivestono tali metodi è di fondamentale importanza in quanto possono essere impiegati anche per trasferire dati derivanti da modelli spettrali, i quali, infatti, presentano spesso una risoluzione spaziale tale da non garantire la rappresentatività geografica dei dati stessi per il paraglio oggetto di studio.

I metodi di trasposizione tengono in conto del trasferimento di energia dal vento alla superficie marina. La loro formulazione non considera lo scambio di energia tra le componenti elementari dell'elevazione d'onda (dovuto alle interazioni non lineari), il whitecapping, i fenomeni indotti dalla presenza del fondale marino quali shoaling, rifrazione, frangimento dovuto alla ridotta profondità dei fondali, attrito col fondo e fenomeni aventi genesi più ampia quali riflessione e diffrazione. In considerazione di ciò, i metodi di trasposizione geografica permettono di trasporre dati di moto ondoso da un punto a un altro, entrambi posti su profondità infinita ($d > \frac{1}{2}L_{p0}$) (Boccotti, 2014). Infatti, su profondità infinita, ovvero su alti fondali, gli effetti indotti dalla presenza del fondo sono trascurabili.

Gli unici metodi di trasferimento presenti in letteratura sono i metodi di De Girolamo and Contini (1998), il metodo di Barbaro et al. (2016) e il metodo dello spread parameter (Gencarelli, Tomasicchio and Veltri, 2007). Nel seguito sono descritti tali metodi e i nuovi metodi proposti eccetto il metodo dello spread parameter, il quale consente la trasposizione geografica dei soli eventi estremi di moto ondoso.

2.1 Metodo di De Girolamo e Contini

Il metodo di *De Girolamo and Contini (1998)* si fonda sulle seguenti ipotesi:

1. Velocità e direzioni del vento uguali nei due punti ovvero l'evento eolico che interessa il punto dotato di dati (punto di origine) interessa sempre anche il punto di trasferimento;
2. Aree di generazione del moto ondoso determinate mediante il concetto di "fetch efficace" (*Seymour, 1977*);
3. Mari limitati dal fetch.

Il fetch è la distesa di mare libero sulla quale il vento soffia con velocità e direzione costanti. Nell'ambito della ricostruzione del moto ondoso in un punto, il fetch viene spesso assunto pari alla distanza tra il punto e la costa più vicina (fetch geografico) prevedendo opportune riduzioni a causa della limitata estensione delle perturbazioni peculiari del sito oggetto di studio.

Il mare si definisce limitato dalla durata quando la durata dell'evento eolico è minore della durata minima, funzione della velocità del vento e del fetch, affinché le onde possano crescere fino ad un valore costante dell'altezza significativa. Quando la durata è maggiore della durata minima suddetta, il mare non è limitato dalla durata e può essere limitato dal fetch o meno. Il mare è limitato dal fetch quando il fetch, in rapporto alla velocità del vento, non è sufficientemente elevato. Viceversa, se il fetch è sufficientemente elevato, il mare si definisce completamente sviluppato, ossia, per data velocità del vento, il fetch e la durata sono tali da generare le onde più alte possibili.

Il metodo di *De Girolamo and Contini (1998)* si fonda sulle relazioni del metodo SPM (*US Army, 1984*) che consentono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale e il periodo di picco in funzione di: lunghezza del fetch F , fattore di forza del vento U_A (dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota di 10 m s.l.m.) e durata del vento t nei casi di durata limitante, fetch limitante e di mare completamente sviluppato. Dividendo membro a membro le equazioni del metodo SPM nel caso di fetch limitante, scritte sia per il punto di origine sia per il punto di trasferimento, De Girolamo and Contini hanno ricavato le seguenti relazioni:

$$\frac{H_S^T}{H_S^o} = \sqrt{\frac{F^T}{F^o}} \quad [2]$$

$$\frac{T_P^T}{T_P^o} = \sqrt[3]{\frac{F^T}{F^o}} \quad [3]$$

Gli apici “o” e “T” indicano rispettivamente le grandezze relative al punto di origine e al punto di trasferimento.

Il metodo si completa utilizzando la legge di *Leenknecht, Szuwalski, and Sherlock (1992)*, che stabilisce il legame tra la direzione del vento e la direzione media del moto ondoso da esso generato. L’angolo tra queste due direzioni, θ , è quello, all’interno dell’intervallo $-90^\circ \leq \theta_i \leq +90^\circ$, a cui corrisponde il valore massimo del prodotto:

$$(\cos \theta_i)^{0.44} (F_i)^{0.28} \quad [4]$$

A partire dalla direzione delle onde nel punto di origine, tramite la legge sopra, si calcola la direzione del vento che agisce sui due punti. Successivamente, la direzione delle onde nel punto di trasferimento si ricava con la procedura inversa, partendo dalla direzione del vento precedentemente calcolata.

Il metodo di *De Girolamo and Contini (1998)* utilizza, contrariamente a quanto riportato nello *Shore Protection Manual (US Army, 1984)*, i fetch efficaci. Inoltre, nell’uso della legge di *Leenknecht*, utilizza ancora i fetch efficaci, diversamente da quanto riportato in *Smith (1991)*.

Il fetch efficace consente di tenere in conto della limitatezza della larghezza della superficie marina su cui soffia il vento. Tale limite causa una riduzione dell’altezza significativa e del periodo di picco rispetto alla condizione che si realizza in mari aperti, dove la larghezza dell’area di generazione del moto ondoso è dello stesso ordine di grandezza del fetch. Il fetch efficace tiene in conto del fatto che, a causa della limitata larghezza dell’area di

generazione delle onde, alla crescita delle onde in un punto non contribuiscono interamente le direzioni adiacenti alla direzione media del vento, condizione che si realizza per mari aperti. Il fetch efficace relativo ad una direzione è funzione dei fetch geografici relativi alle direzioni adiacenti a quella data direzione, comprese in un settore di ampiezza dipendente dai metodi di calcolo del fetch efficace utilizzati (*Saville, 1954; Seymour, 1977; US Army, 1966*). In particolare, il fetch efficace, nella formulazione generale, è dato da:

$$F_{eff,w} = \frac{\sum_{\vartheta_i = \vartheta_w - \vartheta}^{\vartheta_w + \vartheta} F_i \cos^{n+1}(\vartheta_i - \vartheta_w)}{\sum_{\vartheta_i = \vartheta_w - \vartheta}^{\vartheta_w + \vartheta} \cos^n(\vartheta_i - \vartheta_w)} \quad [5]$$

con:

$F_{eff,w}$: lunghezza del fetch efficace relativo alla direzione ϑ_w ;

F_i : lunghezza del fetch geografico relativo alla direzione i -esima ϑ_i ;

ϑ_w : direzione (riferita al Nord geografico) per la quale si intende calcolare il relativo fetch efficace;

$\vartheta_w - \vartheta \leq \vartheta_i \leq \vartheta_w + \vartheta$: direzione i -esima (riferita al Nord geografico) compresa all'interno di un settore di ampiezza 2ϑ centrato nella direzione ϑ_w ;

ϑ : ampiezza del settore di calcolo (il metodo di Saville prevede un valore di $\vartheta = \pm 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\vartheta = \pm 90^\circ$);

n : termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di energia del moto ondoso che caratterizzano il sito in esame; i dati relativi alle misure ondometriche condotte negli ultimi anni lungo le coste italiane indicano una variabilità di n tra 1 e 5: i valori più bassi sono relativi a stati di mare vivo mentre quelli più alti sono relativi a stati di mare morto.

2.2 Metodo di Barbaro et al.

Un metodo di trasferimento più recente è stato proposto da *Barbaro et al. (2016)*. Analogamente al metodo di *De Girolamo e Contini (1998)*, si fonda sul metodo SPM (*US Army, 1984*) e sull'ipotesi di identico evento eolico (direzione e velocità) nei punti di origine e di trasferimento; diversamente dal metodo di *De Girolamo e Contini (1998)*, utilizza i fetch geografici in luogo dei fetch efficaci ed è valido per stati di mare limitati dal fetch o completamente sviluppati.

Parametro peculiare del metodo è la distanza d (Figura 3) tra il punto di origine O e il punto di trasferimento T , da calcolare preliminarmente per ogni direzione di provenienza del vento.

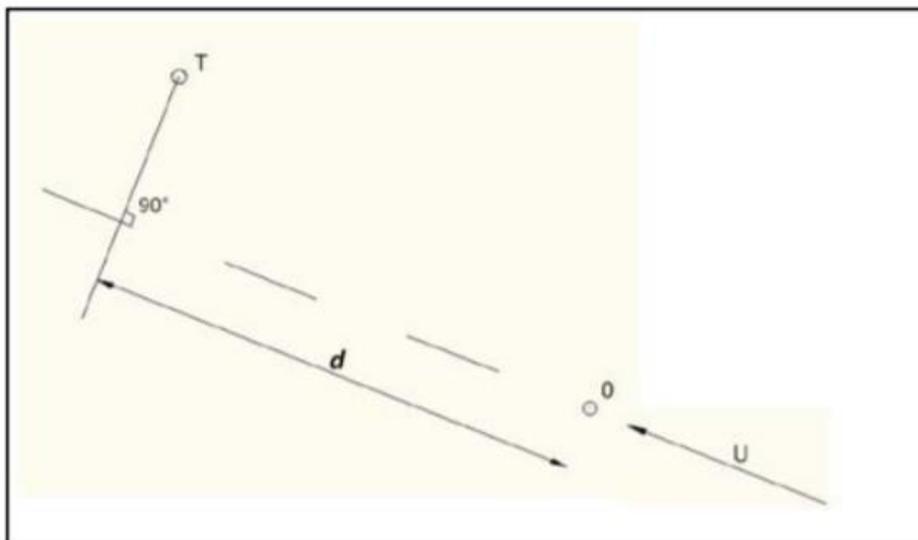


Figura 3. Distanza d tra i punti di origine e di trasferimento

Per dati valori dell'altezza significativa e del fetch geografico nel punto di origine O , le equazioni [6] e [7] consentono di determinare il fattore di forza del vento U_A per i casi di stato di mare limitato dal fetch [6] e completamente sviluppato [7].

$$H_S^o = 0,0016 \frac{U_A^2}{g} \sqrt{\frac{gF^o}{U_A^2}} \quad \text{mare limitato dal fetch} \quad [6]$$

$$H_s^o = 0,2433 \frac{U_A^2}{g} \quad \text{mare completamente sviluppato} \quad [7]$$

La durata dell'azione costante del vento nel punto di origine si calcola mediante le espressioni [8] e [9] per i casi di stato di mare limitato dal fetch [8] e completamente sviluppato [9].

$$t_{(lim)}^o = 68,8 \frac{U_A}{g} \left(\frac{gF^o}{U_A^2} \right)^{2/3} \quad \text{mare limitato dal fetch} \quad [8]$$

$$t_{(fas)}^o = 71500 \frac{U_A}{g} \quad \text{mare completamente sviluppato} \quad [9]$$

Determinata la condizione di sviluppo del mare (limitato dal fetch o completamente sviluppato) nel punto di origine, si calcola la velocità del vento U tramite la seguente espressione;

$$U_A = 0,71U^{1,23} \quad [10]$$

La durata dell'azione costante del vento nel punto di trasferimento si calcola mediante le espressioni [11] e [12] nelle ipotesi di stato di mare limitato dal fetch [11] e di mare completamente sviluppato [12].

$$t_{(lim)}^T = t_{(lim)}^o + \frac{|d|}{U} \quad \text{mare limitato dal fetch} \quad [11]$$

$$t_{(fas)}^T = t_{(fas)}^o + \frac{|d|}{U} \quad \text{mare completamente sviluppato} \quad [12]$$

Si determina quindi la condizione del mare nel punto di trasferimento.

Il fetch nel punto di trasferimento è pari a:

$$F^T = F^o + d \quad [13]$$

dove d può essere positivo o negativo a seconda delle direzioni.

Infine, l'altezza significativa nel punto di trasferimento si calcola mediante le seguenti espressioni:

$$H_S^T (lim) = 0,0016 \frac{U_A^2}{g} \sqrt{\frac{gF^T}{U_A^2}} \quad \text{mare limitato dal fetch in entrambi i punti} \quad [14]$$

$$H_S^T (fas) = 0,2433 \frac{U_A^2}{g} \quad \text{mare completamente sviluppato in entrambi i punti} \quad [15]$$

$$H_S^T = \frac{H_S^T (lim) + H_S^T (fas)}{2} \quad \text{condizione del mare differente nei due punti} \quad [16]$$

Il metodo è risultato affidabile se applicato entro un raggio di circa 60 km dal punto di origine (*Tomasicchio et al., 2016*). Il limite fondamentale del metodo è che non prevede la determinazione del periodo di picco, la cui conoscenza è indispensabile per la definizione del clima ondoso; inoltre non considera la condizione di stato di mare limitato dalla durata.

2.3 Nuovo metodo di trasferimento dei dati di moto ondoso

La procedura descritta nel seguito consente di trasferire intere serie storiche di dati di moto ondoso da un sito sede di una boa ondometrica o in ogni caso dotato di dati (generalmente dati indiretti derivanti da modelli di hindcasting) ad un punto privo di essi.

L'ipotesi di identico evento eolico (direzione e velocità) nei due punti e l'impiego delle relazioni del metodo SPM (*US Army, 1984*) accomunano il nuovo metodo ai metodi finora descritti. L'assunzione di condizioni anemometriche uguali nei due punti è plausibile tanto minore è la distanza tra i punti e tanto minore è l'influenza dell'orografia dei territori limitrofi.

Diversamente dai precedenti metodi, questa metodologia considera tutte le possibili condizioni di sviluppo dello stato di mare, consentendo di determinare sia l'altezza significativa sia il periodo di picco.

Ad ognuna delle nove combinazioni delle condizioni di sviluppo del mare (ad esempio mare limitato dalla durata in un punto e mare limitato dal fetch nell'altro) è possibile associare una probabilità e due espressioni (necessarie per determinare l'altezza significativa e il periodo di picco).

La probabilità di una combinazione è funzione, a sua volta, delle tre probabilità relative alle tre possibili condizioni di sviluppo del mare (duration-limited sea, fetch-limited sea, fully developed sea,). Si definiscono: probabilità di duration-limited sea "dl", probabilità di fetch-limited sea "fl", probabilità di fully developed sea "fd".

Le equazioni [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34] sono state derivate dividendo membro a membro le espressioni del metodo SPM (*US Army, 1984*) e assumendo identica durata e velocità del vento nei due punti (punto di origine e punto di trasferimento).

L'altezza significativa è definita come la somma dei valori derivanti dall'applicazione delle nove formule valide per le nove diverse combinazioni delle condizioni di sviluppo del mare ciascuno moltiplicato per la probabilità associata alla combinazione relativa (eq. [35]). Il periodo di picco è definito in analogia all'altezza significativa (eq. [36]).

$$A = \sqrt{\frac{F^T}{F^o}} H_S^o \quad [17]$$

$$B = H_S^o \quad [18]$$

$$C = 13.499569\sqrt{F^T} t^{-0.75} U_A^{-0.25} H_S^o \quad [19]$$

$$D = 0.074083 \frac{t^{0.75} U_A^{0.25}}{\sqrt{F^T}} H_S^o \quad [20]$$

$$E = H_S^o \quad [21]$$

$$F = 0.003246\sqrt{F^T}\sqrt{H_S^o} \quad [22]$$

$$G = \frac{94921.875}{F^o} H_S^{o2} \quad [23]$$

$$H = 0.0015278t^{0.75} U_A^{-0.75} H_S^o \quad [24]$$

$$I = 654.5244t^{-0.75} U_A^{0.75} H_S^o \quad [25]$$

$$L = \sqrt[3]{\frac{F^T}{F^o}} T_P^o \quad [26]$$

$$M = T_P^o \quad [27]$$

$$N = 5.668731 \frac{\sqrt[3]{\frac{F^T}{F^o}} \sqrt{U_A}}{\sqrt{t}} T_P^o \quad [28]$$

$$J = 0.176394\sqrt{t} \sqrt[3]{\frac{\sqrt{U_A}}{F^o}} T_P^o \quad [29]$$

$$K = T_P^o \quad [30]$$

$$Q = 0.066362\sqrt[3]{F^T}\sqrt[3]{T_P^o} \quad [31]$$

$$R = 13.301378 \sqrt[3]{\frac{U_A^2}{F^o}} T_p^o \quad [32]$$

$$S = 0.01326 \sqrt{\frac{t}{U_A}} T_p^o \quad [33]$$

$$Z = 75.412303 \sqrt{\frac{U_A}{t}} T_p^o \quad [34]$$

$$H_S^T = fl^2A + dl^2B + (dl \cdot fl)C + (fl \cdot dl)D + fd^2E + (fd \cdot fl)F + (fl \cdot fd)G + (fd \cdot dl)H + (dl \cdot fd)I \quad [35]$$

$$T_p^T = fl^2L + dl^2M + (dl \cdot fl)N + (fl \cdot dl)J + fd^2K + (fd \cdot fl)Q + (fl \cdot fd)R + (fd \cdot dl)S + (dl \cdot fd)Z \quad [36]$$

Le combinazioni alle quali fanno riferimento le equazioni [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34] sono descritte in Tabella 1.

Combinazioni	Stato di mare nel punto di origine	Stato di mare nel punto di trasferimento
A, L	Limitato dal fetch	Limitato dal fetch
B, M	Limitato dalla durata	Limitato dalla durata
C, N	Limitato dalla durata	Limitato dal fetch
D, J	Limitato dal fetch	Limitato dalla durata
E, K	Completamente sviluppato	Completamente sviluppato
F, Q	Completamente sviluppato	Limitato dal fetch
G, R	Limitato dal fetch	Completamente sviluppato
H, S	Completamente sviluppato	Limitato dalla durata
I, Z	Limitato dalla durata	Completamente sviluppato

Tabella 1. Definizione delle combinazioni delle condizioni di sviluppo del mare nei due punti

F^T e F^o sono rispettivamente il fetch associato al punto di trasferimento ed il fetch associato al punto di origine presi in esame, espressi in metri. I fetch lungo una determinata direzione sono calcolati in accordo alla procedura suggerita in SPM (*US Army, 1984*) e utilizzata da *Bishop, Donelan, and Kahma (1992)*, ovvero come media aritmetica dei fetch geografici lungo 30 radiali tracciati dal punto di interesse ed equidistanziati di 1 grado, centrati sulla direzione di interesse. I fetch sono calcolati lungo la direzione del vento che si assume, a tale scopo, coincidente con la direzione delle onde.

Determinati i fetch, i dati di input al metodo sono i parametri: dl, fl, fd, t, U_A . Questi caratterizzano l'area di generazione del moto ondoso comprendente i due punti. t e U_A sono rispettivamente la durata media e il fattore di forza del vento medio degli eventi eolici che interessano l'area, espressi in s e m/s.

Per il calcolo dei parametri occorre preliminarmente definire gli eventi eolici a partire dai dati di vento (velocità e direzione). I dati di vento da utilizzare possono essere sia strumentali, generalmente misurati sulla terraferma, sia derivanti da modelli meteorologici e disponibili sulla superficie del mare. Tali dati devono necessariamente essere prossimi al punto dotato dei dati di moto ondoso da trasporre e presentare un ottimo rendimento (dati effettivamente rilevati rispetto a quelli rilevabili); quest'ultimo requisito è necessario per la corretta definizione degli eventi eolici. Qualora la serie storica dei dati di vento non presenti un buon rendimento per tutti gli anni di osservazione, si procede con la scelta degli anni caratterizzati da un sufficiente rendimento e rappresentativi del regime dei venti del sito oggetto di studio in termini di velocità e direzioni medie del vento.

I dati di vento, analogamente ai dati d'onda, necessitano di essere corretti. A titolo esemplificativo ma non esaustivo si operano le seguenti correzioni:

- Eliminazione degli outliers (valori anomali, numericamente distanti dagli altri valori);
- Correzione di orari e date di registrazione;
- Eliminazione dati ad orari ripetuti (in due giorni contigui possono erroneamente risultare uguali dati registrati alla stessa ora);
- Eliminazione dati non completi.

A valle dell'analisi esplorativa e successiva correzione dei dati di vento, che non devono essere influenzati da elementi topografici limitrofi, si procede con le correzioni, riportate nello Shore Protection Manual (*US Army, 1984*), propedeutiche per il loro impiego nelle formule del nuovo metodo. In sintesi, si procede con le seguenti correzioni: trasferimento dei dati di vento alla quota di 10 m sul l.m.m., correzione dovuta alla differenza di attrito terra-mare (nel caso di dati misurati sulla terraferma), correzione di stabilità dovuta alla differenza di temperatura aria-mare, correzione dovuta alla durata media (*Simiu and Scanlan, 1978*) della velocità del vento, calcolo del fattore di forza del vento U_A .

La correzione della velocità nel caso di venti spiranti su terra è operata attraverso il diagramma (Figura 4) di Resio e Vincent (*Resio and Vincent, 1977*), che consente di stimare il coefficiente moltiplicativo da applicare al valore della velocità.

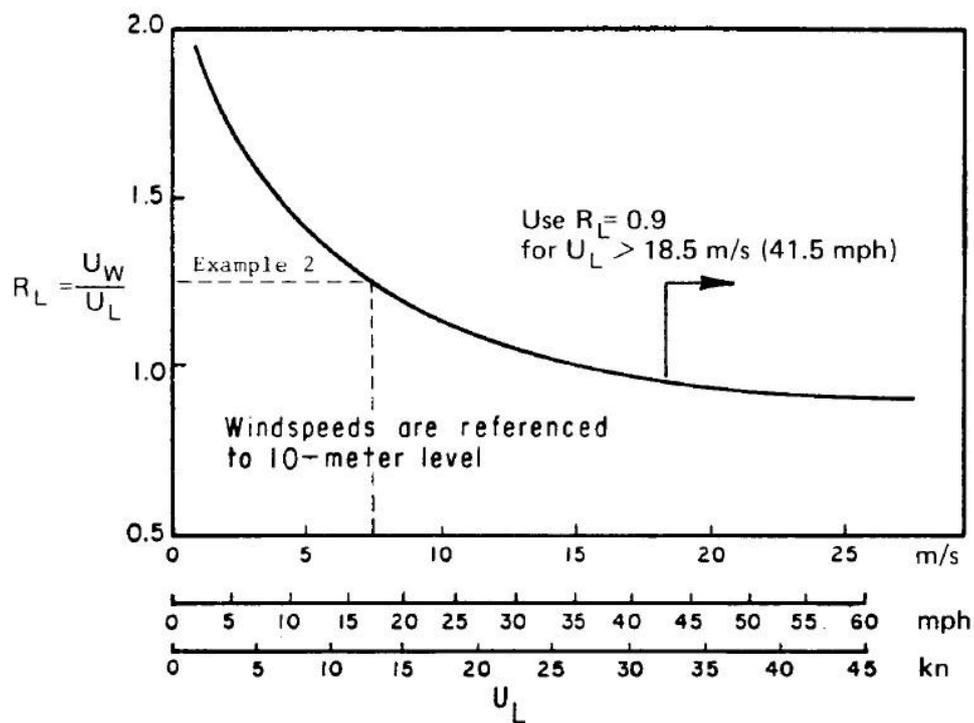


Figura 4. Andamento del rapporto fra velocità del vento su mare e velocità del vento a terra in funzione della velocità del vento a terra

In assenza di informazioni riguardo le temperature di aria e mare, la velocità del vento dovrebbe essere moltiplicata per 1,1 (*US Army, 1984*).

Il fattore di forza del vento è pari a:

$$U_A = 0.71 U_{10}^{1.23} \quad [37]$$

con U_{10} espresso in m/s.

La metodologia proposta prevede che i valori di direzione e fattore di forza del vento vengano mediati su tre ore qualora presentino un intervallo fra le registrazioni minore. Nella fase di elaborazione della nuova metodologia, sono state considerate dapprima frequenze di trenta minuti e successivamente di tre ore; le frequenze di tre ore hanno condotto a risultati più accurati. Tipicamente, infatti, i metodi empirici fanno uso di dati di vento a bassa risoluzione temporale. Inoltre, nel CEM (*US Army, 2003*) si fa presente come la risoluzione temporale dei dati di vento ottimale per il loro utilizzo nelle applicazioni, sia minore nei grandi bacini rispetto ai piccoli bacini.

La media del fattore di forza del vento dei dati all'interno delle tre ore si esegue come media aritmetica. Diversamente, la media delle direzioni, $\bar{\alpha}$, si calcola come una variante della cosiddetta "media trigonometrica" (*Mardia, 1975*).

$$\bar{\alpha} = \arctan\left(\frac{\sum_i \sin \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i}\right) \quad [38]$$

Se $\bar{\alpha} < 0$ allora $\bar{\alpha} = \bar{\alpha} + 360^\circ$.

Dopo aver trasformato i dati di vento a disposizione in dati ogni tre ore, si definiscono gli eventi eolici aventi fattore di forza e direzione del vento consistenti nelle medie – calcolate come sopra – dei dati successivi che soddisfano due condizioni: $\Delta U_A < 2.5$ m/s, $\Delta \alpha < 30^\circ$. Le condizioni così definite sono in accordo con quanto riportato nello *Shore Protection Manual (US Army, 1984)* e supportate dall'evidenza sperimentale di risultati più accurati rispetto a quelli ottenibili mediante adozione di condizioni differenti.

Definiti gli eventi eolici il metodo prevede, nel caso di dati di vento riferiti ad un punto sulla terraferma, l'eliminazione degli eventi eolici spiranti su terra. Dal confronto fra i risultati ottenuti considerando la totalità degli eventi eolici e i risultati ottenuti scartando quelli

spiranti su terra, emerge una maggiore accuratezza dei primi. Infatti, gli eventi eolici che soffiano sulla terraferma, sono stati derivati da dati probabilmente influenzati dall'orografia del terreno e perciò non rappresentativi del vento nei punti oggetto di studio.

Gli eventi eolici (caratterizzati da fattore di forza del vento, direzione e durata) e i fetch relativi e riferiti al punto di origine, consentono di determinare le conseguenti condizioni di sviluppo del mare (utilizzando le formule del metodo SPM) ovvero limitato dalla durata, limitato dal fetch e completamente sviluppato. Infine, si calcolano le frequenze delle predette condizioni che, per definizione, consistono in dl, fl, fd.

In sintesi, il metodo si articola nelle seguenti fasi:

1. individuazione del punto di trasposizione;
2. individuazione del punto di origine fornito di dati di moto ondoso e della stazione anemometrica di riferimento;
3. raccolta dei dati ondosi e anemologici;
4. definizione dei fetch;
5. correzione dei dati ondosi e anemologici;
6. definizione degli eventi eolici;
7. calcolo dei parametri dl, fl, fd, t, U_A ;
8. trasferimento dei dati ondosi nel punto di trasposizione mediante l'utilizzo delle espressioni [35] e [36].

La Figura 5 mostra l'interdipendenza tra gli input, i parametri del metodo e gli output.

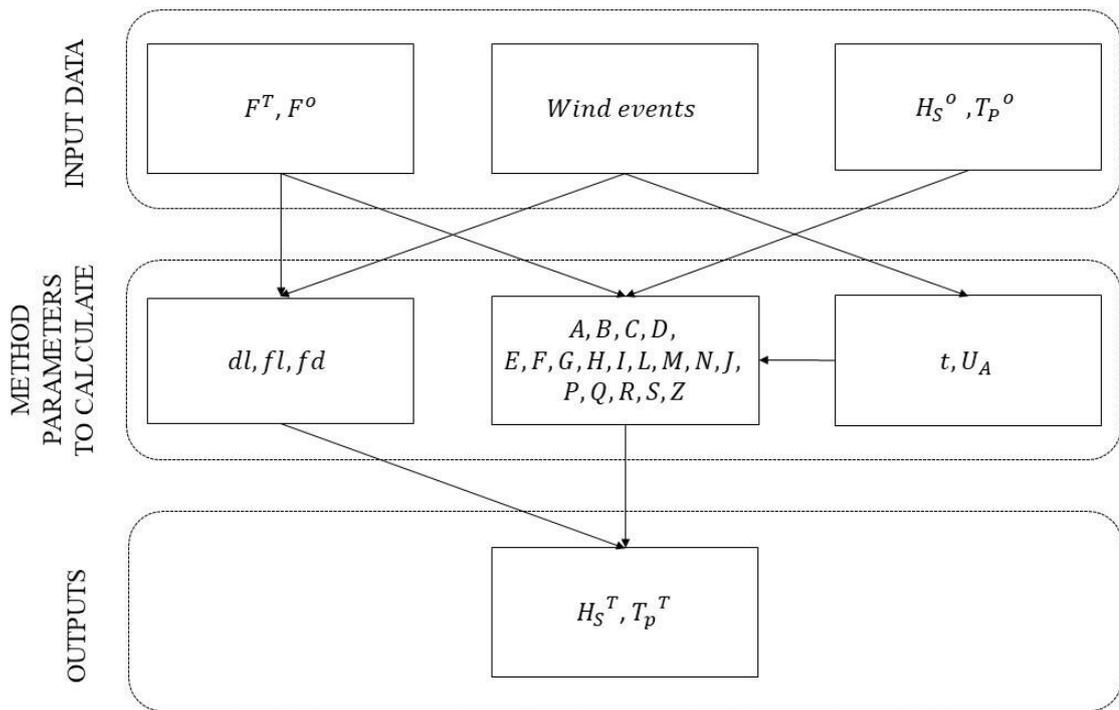


Figura 5. Diagramma di flusso che sintetizza gli step in cui si articola il metodo proposto

2.4 Nuovo metodo modificato di trasferimento dei dati di moto ondoso

Dalla scrittura delle equazioni [35] e [36] si nota come, analogamente alla velocità e alla durata del vento, i parametri fl , dl , fd , sono assunti uguali per il punto di origine e il punto di trasferimento. Tale assunzione è tanto più verosimile quanto più il punto coi dati da trasporre e il punto di trasferimento (i quali devono essere sufficientemente vicini cosicché si possano considerare identici eventi eolici nei due punti) hanno fetches simili, in quanto le probabilità delle condizioni di sviluppo del mare fl , dl , fd , dipendono soprattutto dai fetches. Qualora l'esposizione sia ben diversa occorrerebbe, teoricamente, definire fl , dl , fd anche per il punto di trasferimento, inficiando la praticità del metodo e la sua facile applicazione.

Inoltre, il nuovo metodo assume implicitamente che gli stati di mare nei due punti oggetto di studio siano stocasticamente indipendenti fra loro. In realtà sussiste una certa correlazione tra questi, in quanto dipendenti da venti e fetch che, data la prossimità dei due punti, sono simili. La versione modificata del nuovo metodo, sulla base di questa osservazione, considera le sole combinazioni A, B, E, L, M, K descritte in Tabella 1, ossia i casi in cui le condizioni dello sviluppo dello stato di mare sono uguali nel punto di origine e nel punto di trasferimento. Tale posizione consiste nel considerare nulla la probabilità di condizioni di sviluppo dello stato di mare diverse fra i due punti. Le formule del nuovo metodo modificato sono:

$$H_S^T = \left(fl^2 \sqrt{\frac{F^T}{F^o}} + dl^2 + fd^2 \right) H_S^o \quad [39]$$

$$T_p^T = \left(fl^2 \sqrt{\frac{F^T}{F^o}} + dl^2 + fd^2 \right) T_p^o \quad [40]$$

3. Verifica dei metodi

3.1 Area di studio e dati usati

Per la verifica dei metodi di trasposizione proposti sono stati utilizzati dati anemometrici e ondametrici registrati nel Mar Mediterraneo (Figura 6), caratterizzato da coste molto irregolari ossia fetch con elevato gradiente spaziale.

In particolare, i dati nel Mar Mediterraneo fanno riferimento al Mar Adriatico, avente fetch modesti, al Mar Ionio, con fetch più estesi, e al Mar Tirreno, aventi fetch di media lunghezza.

I dati di vento sono stati registrati dai sensori anemometrici delle stazioni mareografiche della Rete Mareografica Nazionale (RMN) italiana, ubicate nei porti di Ortona, Crotona e Civitavecchia e dall' anemometro gestito dall'ARPACal, sito a Capo Spartivento.

La Rete Mareografica Nazionale, gestita dall' ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), è composta di 36 stazioni di misura uniformemente distribuite sul territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all'interno delle strutture portuali. Le stazioni sono dotate di: sensore di livello, sensore anemometrico, sensore barometrico, sensore di temperatura dell'aria, sensore di temperatura dell'acqua e sensore di umidità relativa. Il sensore anemometrico registra velocità e direzioni medie del vento ogni 10 minuti a una quota di 10 m s.l.m.

La rete gestita dal Centro Funzionale Multirischi ARPACal consiste in stazioni di misura, dislocate sul territorio calabrese, dotate di sensori anemometrici, idrometrici, pluviometrici, barometrici, igrometrici e di temperatura dell'aria. Con riferimento ai dati di vento, gli anemometri registrano velocità e direzioni medie del vento ogni 20 minuti a una quota di 10 m s.l.m.

I dati di moto ondoso sono stati registrati dalle boe ondametriche di Ortona, Crotona e Civitavecchia, appartenenti alla Rete Ondametrica Nazionale italiana, dalle boe di Roccella e Capo Spartivento, appartenenti alla Rete Ondametrica Regionale della Calabria, dalla boa delle Isole Tremiti, appartenente alla Rete di Monitoraggio meteo-marino della regione Puglia e dalla boa dell'isola di Giannutri, gestita dal Servizio Idrologico Regionale della regione Toscana.

La RON, meglio descritta nel primo capitolo, fornisce dati di altezza significativa spettrale,

periodo di picco e direzione media delle onde ogni 30 minuti.

La Rete Ondametrica Regionale della Calabria è costituita da quattro boe, poste su alti fondali, a largo di Tropea (VV), Capo Spartivento (RC), Roccella Ionica (RC) e Corigliano-Rossano (CS). Le boe forniscono diverse informazioni sullo stato del mare, tra le quali altezza significativa spettrale, periodo di picco e direzione media delle onde ogni tre ore, oltre alla temperatura dell'acqua.

La Rete di Monitoraggio meteo-marino della regione Puglia, gestita dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale è costituita da otto stazioni anemometriche, quattro stazioni mareografiche, tre boe ondametriche e due stazioni di video-monitoraggio. Le boe forniscono altezza d'onda significativa spettrale, periodo di picco, direzione dominante dello spettro e temperatura del mare ogni ora.

Il Servizio Idrologico Regionale (SIR) della regione Toscana gestisce una fitta rete di stazioni di misura di dati idro-meteorologici comprendente anche due boe ondametriche ossia la boa dell'isola di Giannutri (GR) e la boa dell'isola di Gorgona (LI), entrambe su profondità infinita. Le boe forniscono altezza significativa spettrale, periodo di picco e direzione dominante dello spettro ogni ora.



Figura 6. Disposizione di ondametri e anemometri utilizzati nello studio

3.2 Risultati e discussione

Il metodo di trasferimento dei dati di moto ondoso di De Girolamo e Contini è stato testato e comparato con i nuovi metodi proposti, in quattro diverse applicazioni: trasferimento da Ortona a Isole Tremiti, da Crotona a Roccella, da Capo Spartivento a Roccella, da Civitavecchia a Isola di Giannutri. Il metodo di De Girolamo e Contini è stato preferito al metodo di Barbaro et al. come punto di riferimento per il confronto in quanto è il più diffuso nella pratica ingegneristica oltre a consentire anche la definizione del periodo di picco. Si procede quindi con l'analisi comparativa della serie storica di dati ondametrici di una boa con i dati simultanei ottenuti nello stesso punto trasponendo i dati ondametrici dell'altra boa. Il confronto è sintetizzato dai seguenti parametri statistici: errore medio in valore assoluto (MAE), radice dell'errore quadratico medio (RMSE), indice di dispersione (SI), coefficiente di correlazione lineare R (o indice di Pearson). Questi sono definiti come segue:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad [41]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad [42]$$

$$SI = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \times 100 \quad [43]$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2)}} \quad [44]$$

dove O_i è il valore osservato, \bar{O} è il valore medio dei dati osservati, P_i è il valore predetto, \bar{P} è il valore medio dei dati predetti, e N è il numero di osservazioni.

La scelta dei quattro casi studio predetti consegue alla necessità di disporre di dati di moto ondoso accurati e registrati da boe ondamiche, le quali devono anche essere sufficientemente vicine per poter apprezzare l'affidabilità dei metodi di trasposizione geografica.

Per la definizione dei fetch geografici e degli eventi eolici sono stati utilizzati rispettivamente il software QuantumGIS (versione 3.4.13) e il linguaggio di programmazione MATLAB.

3.2.1 Trasferimento dei dati ondosi da Ortona a Isole Tremiti

Ai fini dello studio sono stati raccolti i dati di vento registrati dalla stazione anemometrica a Ortona nel 2014, e i dati di moto ondoso registrati dagli ondometri di Ortona e Isole Tremiti dal 2006 al 2010. I dati di vento presentano un rendimento del 98,23%.

La distanza tra le boe ondamiche è pari a 88 km. La distanza tra la boa di Ortona e la stazione anemometrica di Ortona è invece pari a 10 km.

Le Figure 7 e 8 riportano la rappresentazione grafica dei fetch geografici relativi alle due boe.

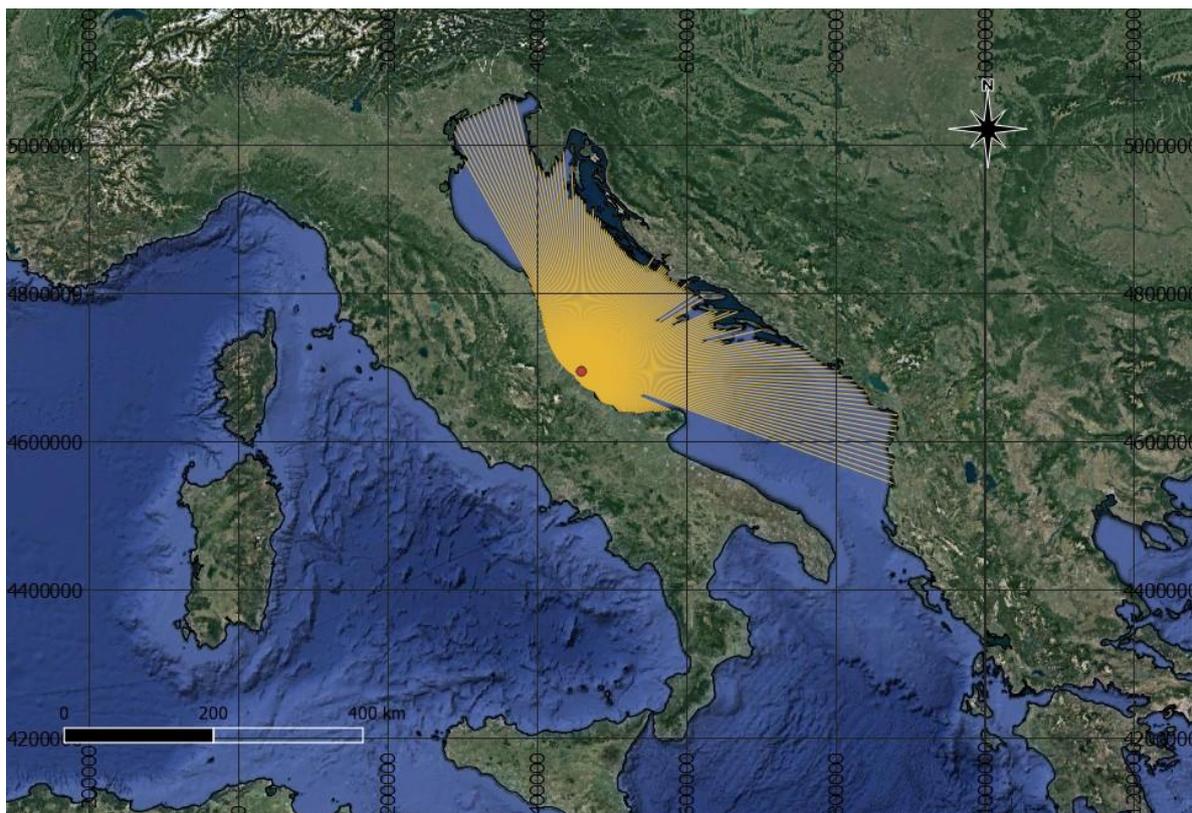


Figura 7. Fetch geografici relativi alla boa di Ortona

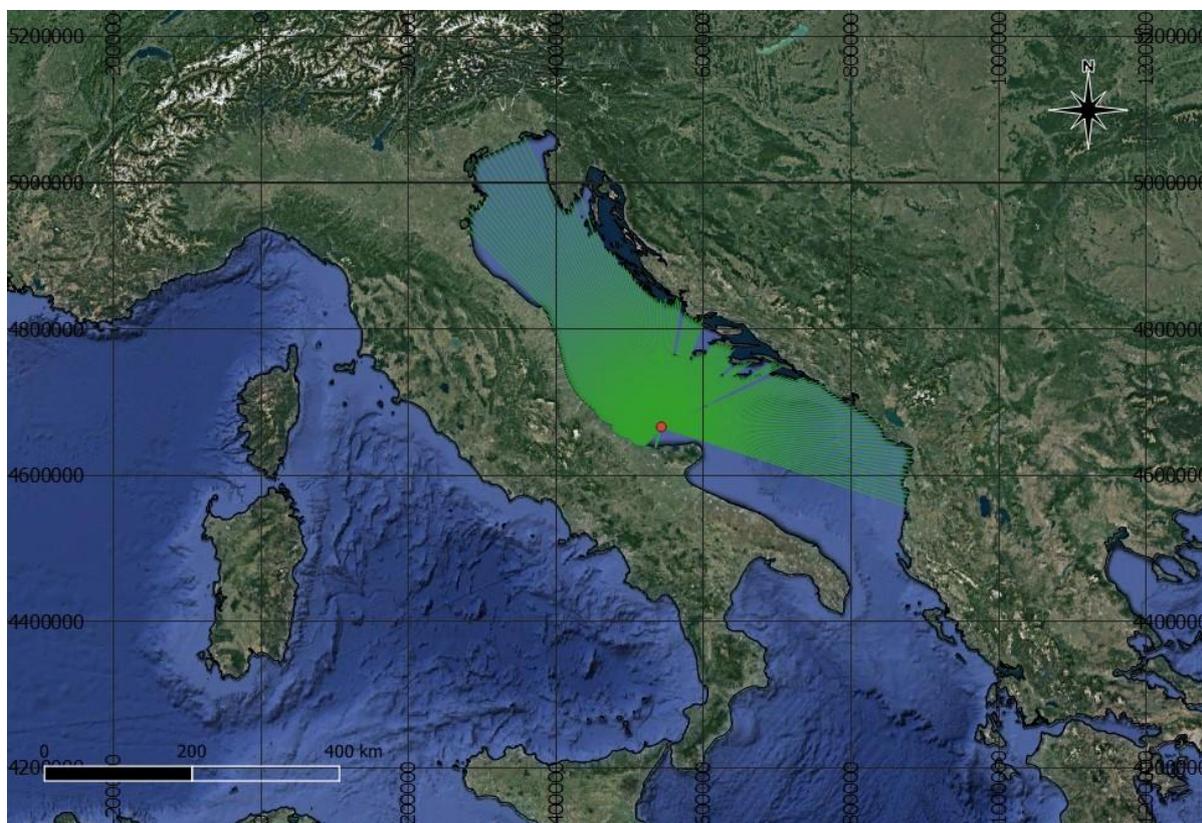


Figura 8. Fetch geografici relativi alla boa delle Isole Tremiti

I parametri che caratterizzano l'area di generazione del moto ondoso comprendente le due boe sono riportati in Tabella 2.

Parametri				
dl	fl	fd	t [s]	U_A [m/s]
0,99382	0,00545	0,00073	12483,21	3,30179

Tabella 2. Parametri relativi alla boa di Ortona

I risultati dell'applicazione sono sintetizzati in Tabella 3.

	Hs (significant wave height)				Tp (peak period)			
	MAE [m]	SI [%]	RMSE [m]	R	MAE [s]	SI [%]	RMSE [s]	R
De Girolamo e Contini method	0,317	71,840	0,503	0,681	1,599	43,052	2,210	0,436
New method	0,199	44,259	0,310	0,862	1,053	31,117	1,597	0,525
New method modified	0,198	44,198	0,309	0,862	1,050	30,929	1,587	0,526

Tabella 3. Parametri statistici per la valutazione dei risultati del nuovo metodo, del nuovo metodo modificato e del metodo di De Girolamo e Contini

Le Figure 9 e 10 rappresentano il confronto grafico tra le altezze significative registrate dalla boa delle Isole Tremiti e quelle ottenute tramite il metodo di trasferimento modificato.

Dalla Tabella 3 si evince come, con riferimento a tutti i parametri statistici relativi sia alle altezze significative sia ai periodi di picco, sia il nuovo metodo sia il nuovo metodo modificato forniscano risultati più accurati ovvero più prossimi ai dati registrati dalla boa. La versione modificata del nuovo metodo risulta quella con la maggiore affidabilità.

3.2.2 Trasferimento dei dati ondosi da Crotona a Roccella

Ai fini dello studio sono stati raccolti i dati di vento registrati dalla stazione anemometrica a Crotona dal 2013 al 2014, e i dati di moto ondoso registrati dagli ondometri di Crotona e Roccella dal 2003 al 2006. I dati di vento presentano un rendimento del 99,22%.

La distanza tra le boe ondometriche è pari a 112 km. La distanza tra la boa di Crotona e la stazione anemometrica di Crotona è invece pari a 9 km.

Nel Mar Mediterraneo velocità e direzione del vento possono essere considerate costanti per una lunghezza massima di 500 km (*Pasanisi and Tebano, 2016*), pertanto i fetch geografici sono stati limitati a questa estensione.

Le Figure 11 e 12 riportano la rappresentazione grafica dei fetch geografici relativi alle due boe.

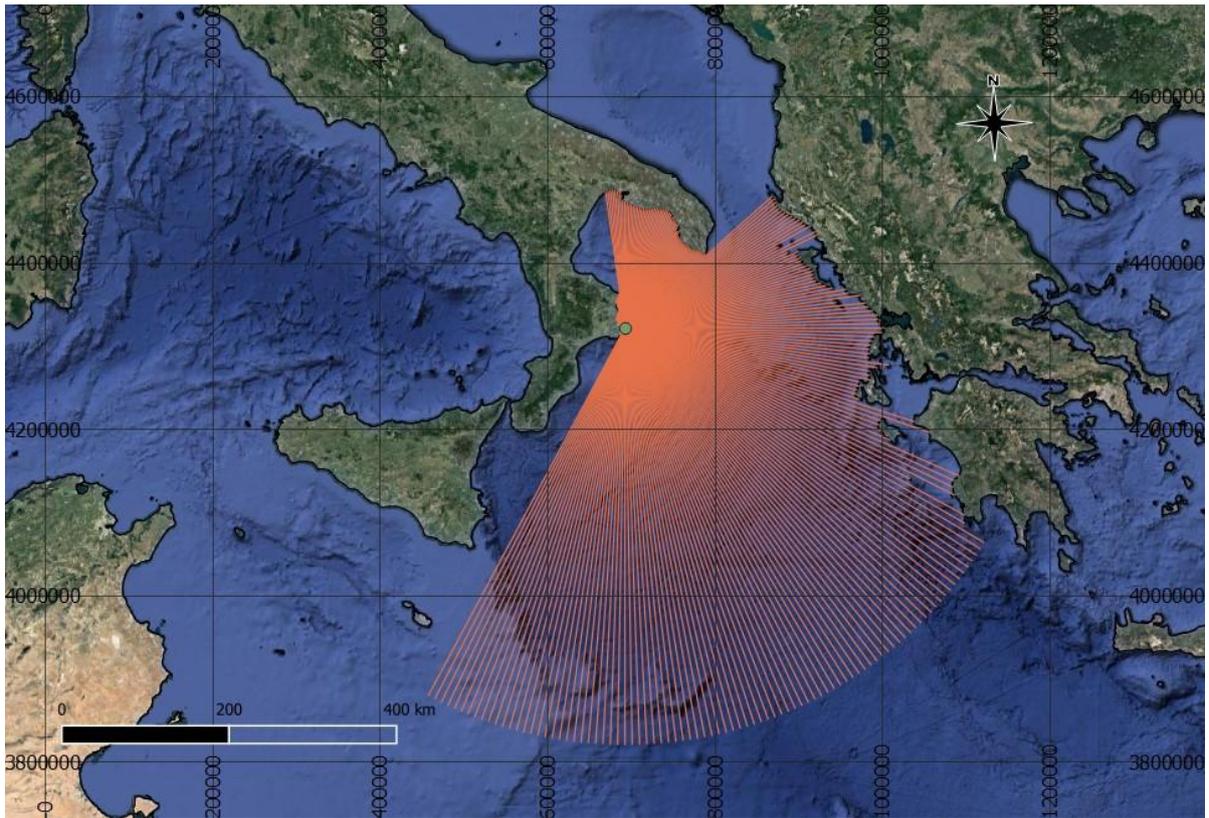


Figura 11. Fetch geografici relativi alla boa di Crotona

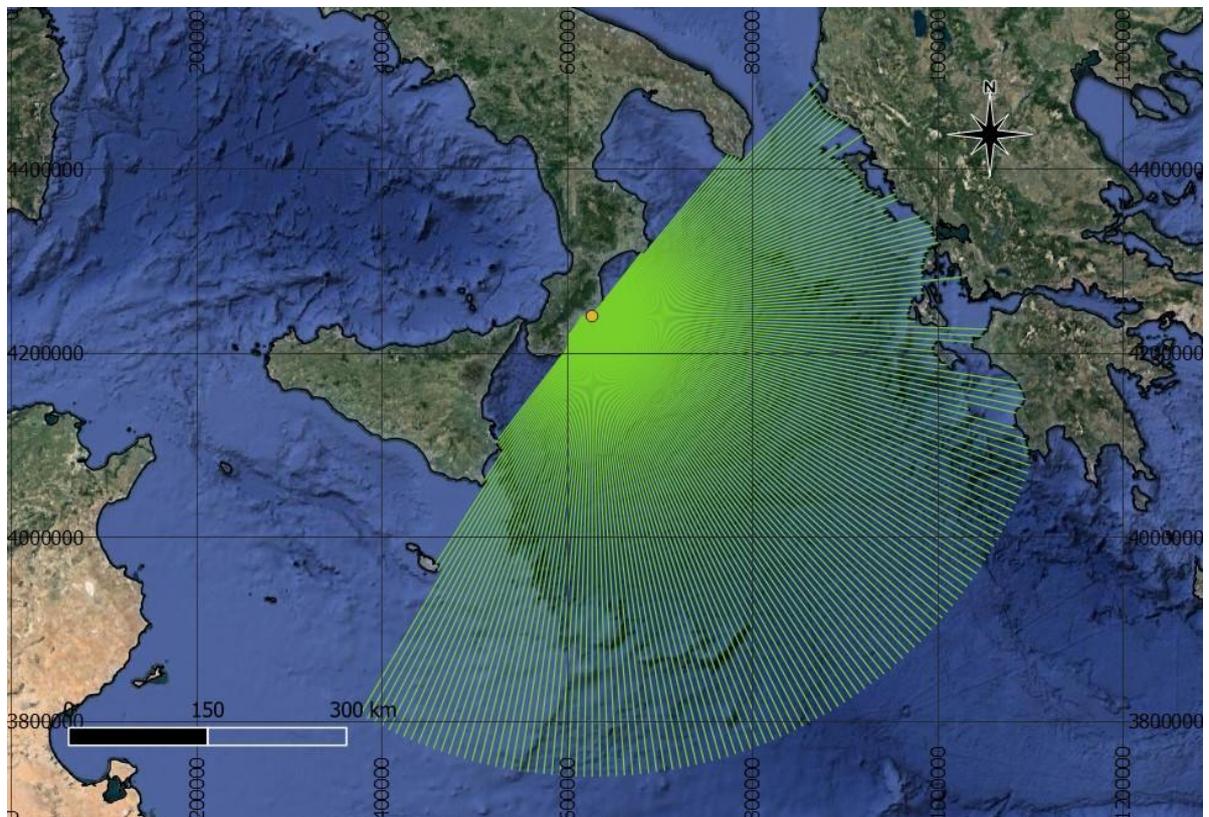


Figura 12. Fetch geografici relativi alla boa di Rocella

I parametri che caratterizzano l'area di generazione del moto ondoso comprendente le due boe sono riportati in Tabella 4.

Parametri				
dl	fl	fd	t [s]	V [m/s]
0,99399	0,00600	0	10868,2	5,95005

Tabella 4. Parametri relativi alla boa di Crotona

I risultati dell'applicazione sono sintetizzati in Tabella 5.

	Hs (significant wave height)				Tp (peak period)			
	MAE [m]	SI [%]	RMSE [m]	R	MAE [s]	SI [%]	RMSE [s]	R
De Girolamo e Contini method	0,229	45,961	0,348	0,832	1,483	34,188	1,998	0,536
New method	0,268	55,667	0,422	0,782	1,079	26,176	1,530	0,602
New method modified	0,262	54,351	0,412	0,778	1,064	25,909	1,514	0,603

Tabella 5. Parametri statistici per la valutazione dei risultati del nuovo metodo, del nuovo metodo modificato e del metodo di De Girolamo e Contini

Le Figure 13 e 14 rappresentano il confronto grafico tra le altezze significative registrate dalla boa di Roccella e quelle ottenute tramite il metodo di trasferimento modificato.

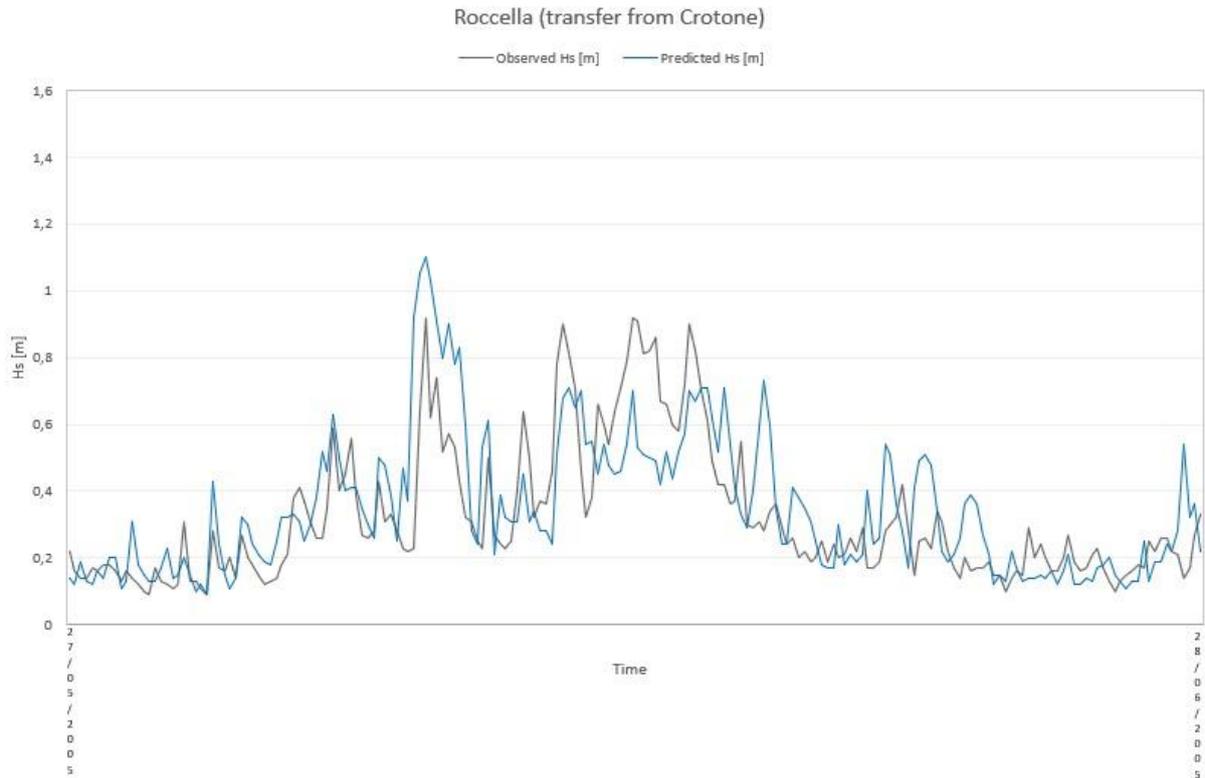


Figura 13. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa di Roccella e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato applicato alla boa di Crotona

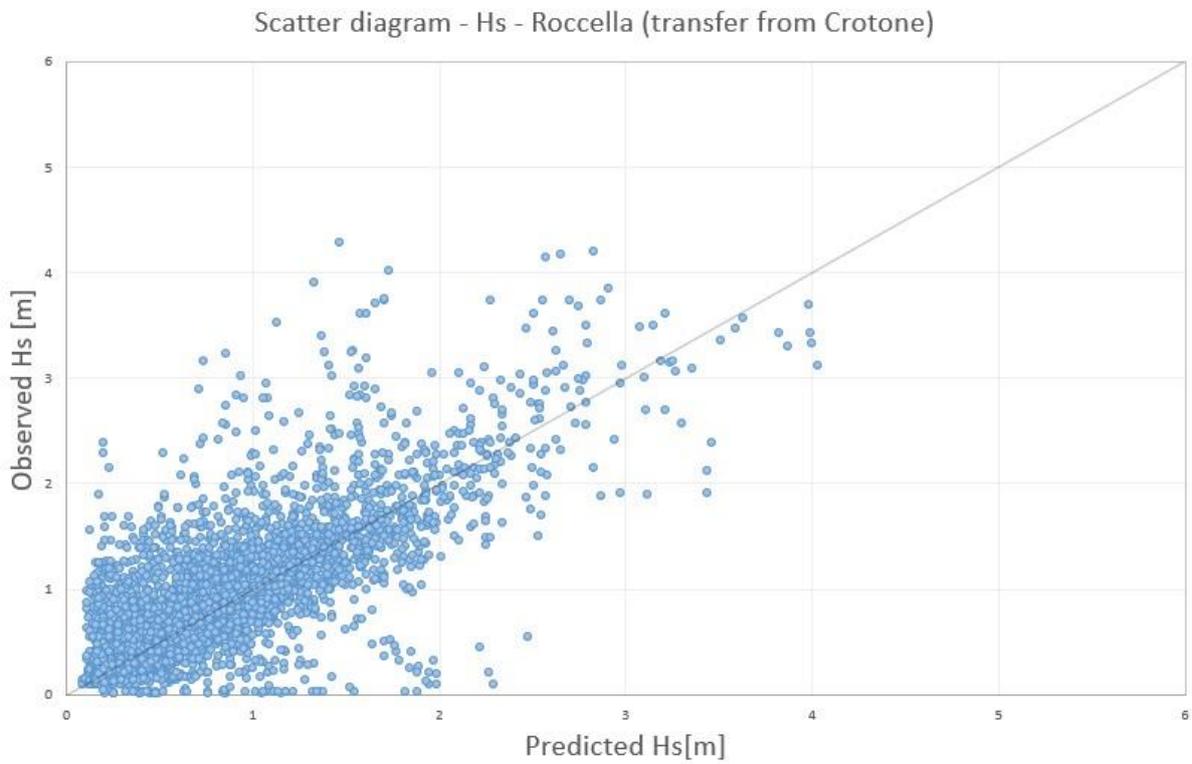


Figura 14. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato applicato alla boa di Crotona

Dalla Tabella 5 si evince come, nella predizione dei periodi di picco, i due nuovi metodi forniscano risultati più accurati del metodo di De Girolamo e Contini. Viceversa, nella predizione delle altezze significative, quest'ultimo offre performance migliori. Confrontando i due nuovi metodi, la versione modificata risulta la migliore con riferimento a tutti i parametri statistici ad eccezione del coefficiente di correlazione lineare relativo alle altezze significative. L'equivalenza tra la versione modificata del nuovo metodo e il metodo di De Girolamo e Contini è giustificata dall'eccessiva distanza tra il punto di origine (boa di Crotona) e il punto di trasferimento (boa di Roccella) che limita la bontà delle previsioni operate mediante i metodi di trasferimento. Inoltre, questi metodi conducono a risultati migliori in bacini poco ampi in quanto si fondano su formulazioni empiriche il cui campo di applicazione è limitato a fetch poco estesi.

3.3.3 Trasferimento dei dati ondosi da Capo Spartivento a Roccella

Ai fini dello studio sono stati raccolti i dati di vento registrati dalla stazione anemometrica di Capo Spartivento dal 2003 al 2005, e i dati di moto ondoso registrati dagli ondometri di Capo Spartivento e Roccella dal 2003 al 2005. I dati di vento presentano un rendimento del 99,39%.

La distanza tra le boe ondometriche è pari a 54 km. La distanza tra la boa di Capo Spartivento e la stazione anemometrica di Capo Spartivento è invece pari a 2,5 km.

La Figura 15 riporta la rappresentazione grafica dei fetch geografici relativi alla boa di Capo Spartivento.

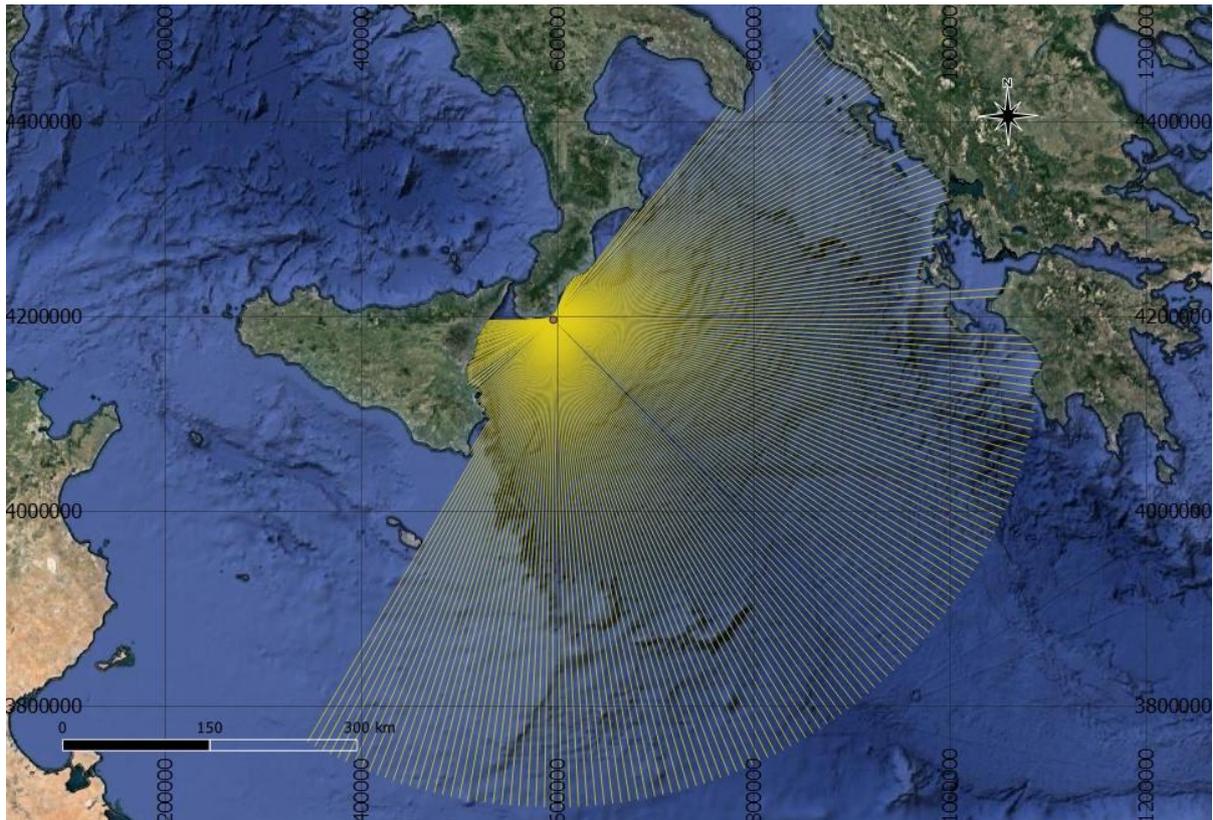


Figura 15. Fetch geografici relativi alla boa di Capo Spartivento

I parametri che caratterizzano l'area di generazione del moto ondoso comprendente le due boe sono riportati in Tabella 6.

Parametri				
dl	fl	fd	t [s]	V [m/s]
0,95117	0,02706	0,02177	17404,29	5,19451

Tabella 6. Parametri relativi alla boa di Capo Spartivento

I risultati dell'applicazione sono sintetizzati in Tabella 7.

	Hs (significant wave height)				Tp (peak period)			
	MAE [m]	SI [%]	RMSE [m]	R	MAE [s]	SI [%]	RMSE [s]	R
De Girolamo e Contini method	0,176	36,890	0,271	0,878	0,997	23,920	1,390	0,691
New method	0,201	41,742	0,306	0,880	0,979	23,601	1,372	0,697
New method modified	0,175	36,140	0,265	0,879	1,037	23,528	1,367	0,695

Tabella 7. Parametri statistici per la valutazione dei risultati del nuovo metodo, del nuovo metodo modificato e del metodo di De Girolamo e Contini

Le Figure 16 e 17 rappresentano il confronto grafico tra le altezze significative registrate dalla boa di Roccella e quelle ottenute tramite il metodo di trasferimento modificato.

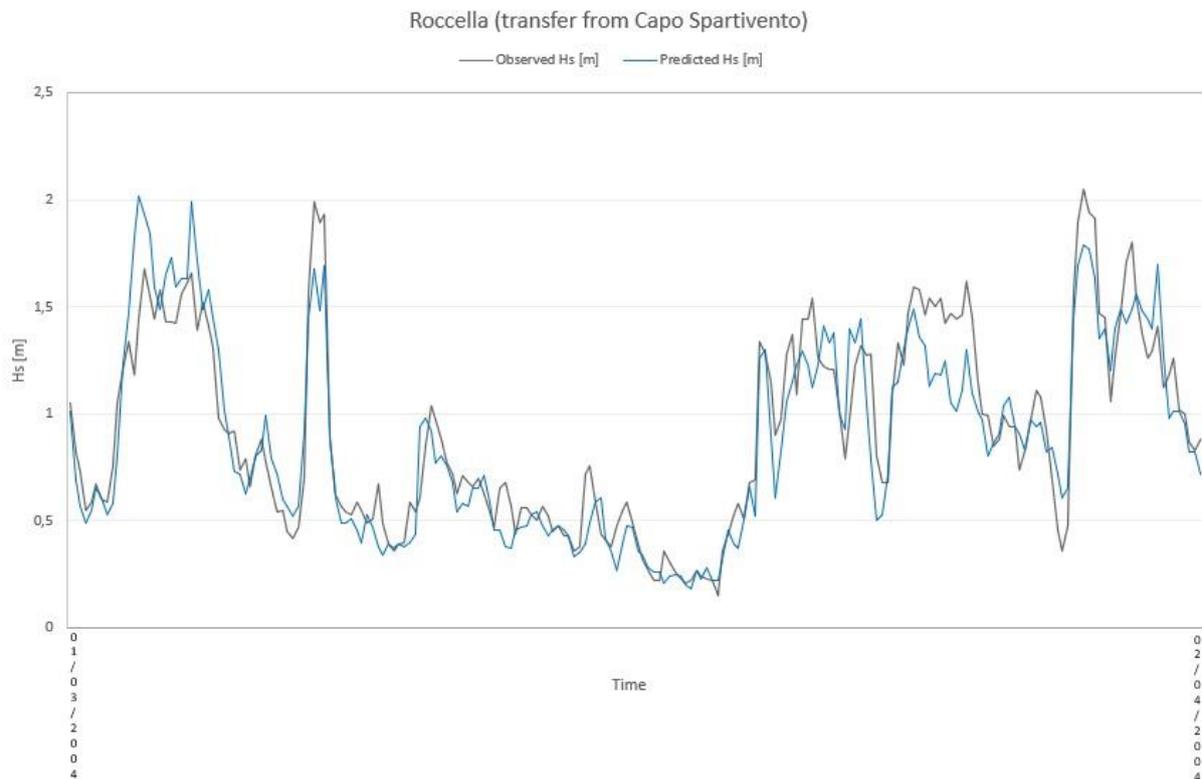


Figura 16. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa di Roccella e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato applicato alla boa di Capo Spartivento

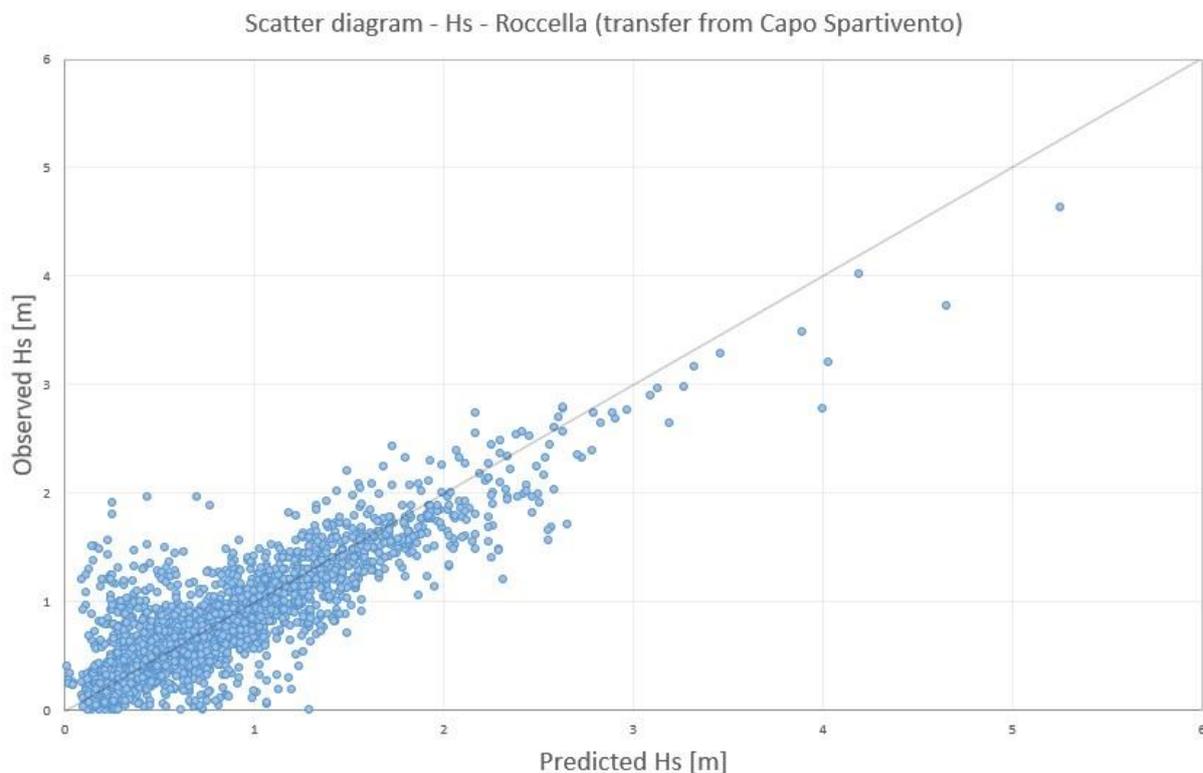


Figura 17. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato applicato alla boa di Capo Spartivento

Dalla Tabella 7 si evince come il nuovo metodo modificato, facendo riferimento a tutti i parametri statistici, sia migliore rispetto alla versione originale a eccezione del coefficiente di correlazione lineare relativo alle altezze significative e dell'errore medio in valore assoluto e del coefficiente di correlazione lineare relativi ai periodi di picco. Il nuovo metodo, considerando tutti i parametri statistici, risulta migliore del metodo di De Girolamo e Contini a eccezione dell'errore medio in valore assoluto, dell'indice di dispersione e dell'errore quadratico medio relativo alle altezze significative; il metodo di De Girolamo e Contini fornisce quindi risultati migliori nella predizione delle altezze significative. Ciò non vale nel confronto tra il nuovo metodo modificato e il metodo di De Girolamo e Contini dove tutti i parametri statistici del primo sono migliori ad eccezione dell'errore medio in valore assoluto relativo ai periodi di picco. Dal confronto tra la Tabella 7 e la Tabella 5 emerge la maggiore accuratezza delle previsioni dei metodi di trasposizione geografica da Capo Spartivento a Roccella. Tale evidenza scaturisce dalla maggiore vicinanza della boa di Capo Spartivento alla boa di Roccella rispetto alla boa di Crotona. Infatti, all'aumentare

della distanza tra il punto di origine e il punto di trasposizione aumenta la differenza tra le condizioni anemometriche dei due siti, la cui uguaglianza è un presupposto fondamentale dei metodi di trasposizione.

3.3.4 Trasferimento dei dati ondosi da Civitavecchia a Isola di Giannutri

Ai fini dello studio sono stati raccolti i dati di vento registrati dalla stazione anemometrica di Civitavecchia dal 2013 al 2014, e i dati di moto ondoso registrati dagli ondometri di Civitavecchia e di Isola di Giannutri dal 2009 al 2011. I dati di vento presentano un rendimento del 98,59%.

La distanza tra le boe ondametriche è pari a 66 km. La distanza tra la boa di Civitavecchia e la stazione anemometrica di Civitavecchia è invece pari a 10,5 km.

Le Figure 18 e 19 riportano la rappresentazione grafica dei fetch geografici relativi alle due boe.



Figura 18. Fetch geografici relativi alla boa di Civitavecchia

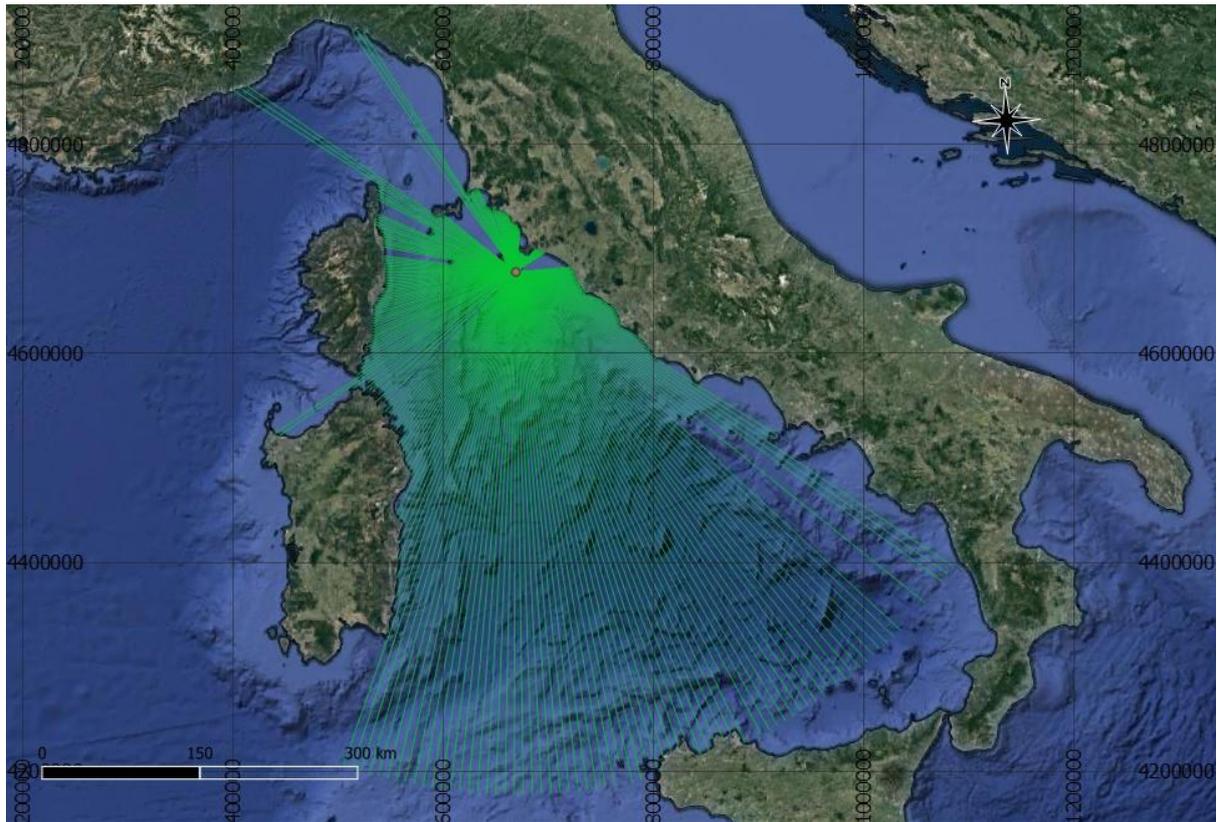


Figura 19. Fetch geografici relativi alla boa di Isola di Giannutri

I parametri che caratterizzano l'area di generazione del moto ondoso comprendente le due boe sono riportati in Tabella 8.

Parametri				
dl	fl	fd	t [s]	V [m/s]
0,97510	0	0,02489	22687,04	4,13894

Tabella 8. Parametri relativi alla boa di Civitavecchia

I risultati dell'applicazione sono sintetizzati in Tabella 9.

	Hs (significant wave height)				Tp (peak period)			
	MAE [m]	SI [%]	RMSE [m]	R	MAE [s]	SI [%]	RMSE [s]	R
De Girolamo e Contini method	0,170	33,368	0,24	0,885	1,0287	31,758	1,526	0,560
New method	0,189	37,528	0,27	0,866	1,235	36,754	1,766	0,556
New method modified	0,184	36,455	0,26	0,866	1,106	32,512	1,562	0,557

Tabella 9. Parametri statistici per la valutazione dei risultati del nuovo metodo, del nuovo metodo modificato e del metodo di De Girolamo e Contini

Le Figure 20 e 21 rappresentano il confronto grafico tra le altezze significative registrate dalla boa di Isola di Giannutri e quelle ottenute tramite il metodo di trasferimento modificato.

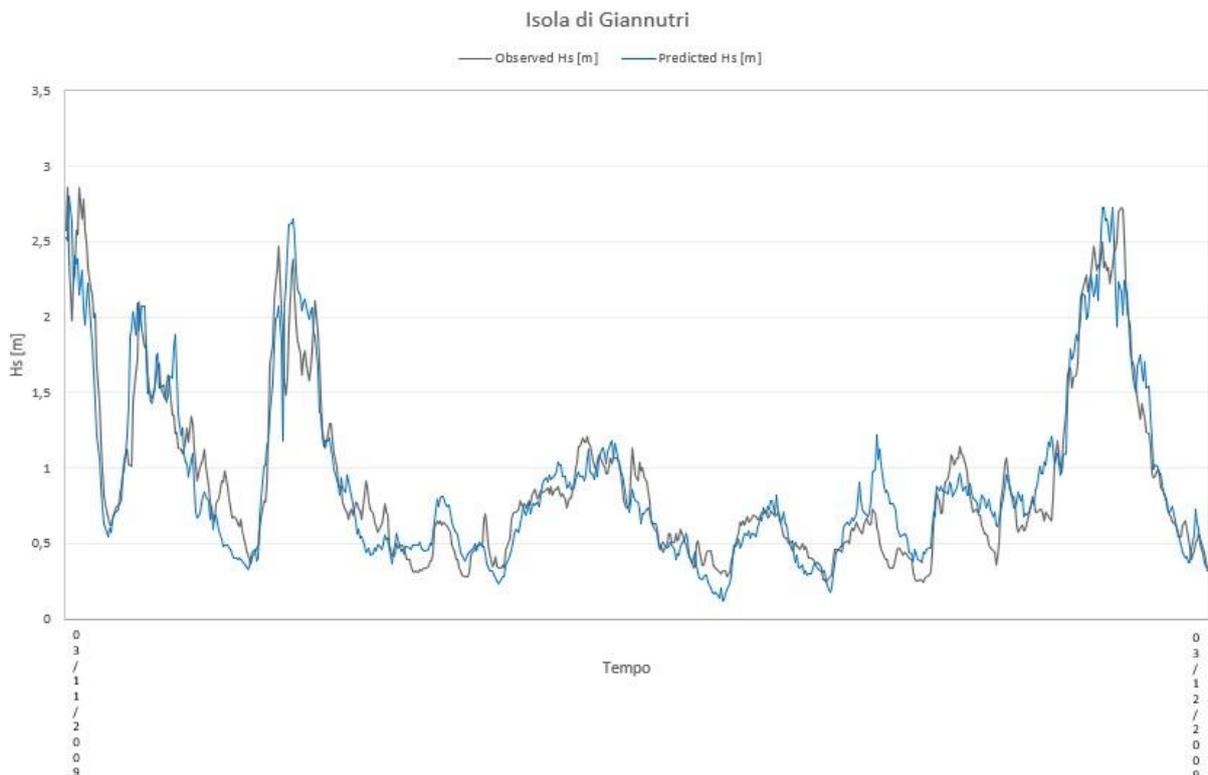


Figura 20. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa di Isola di Giannutri e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato

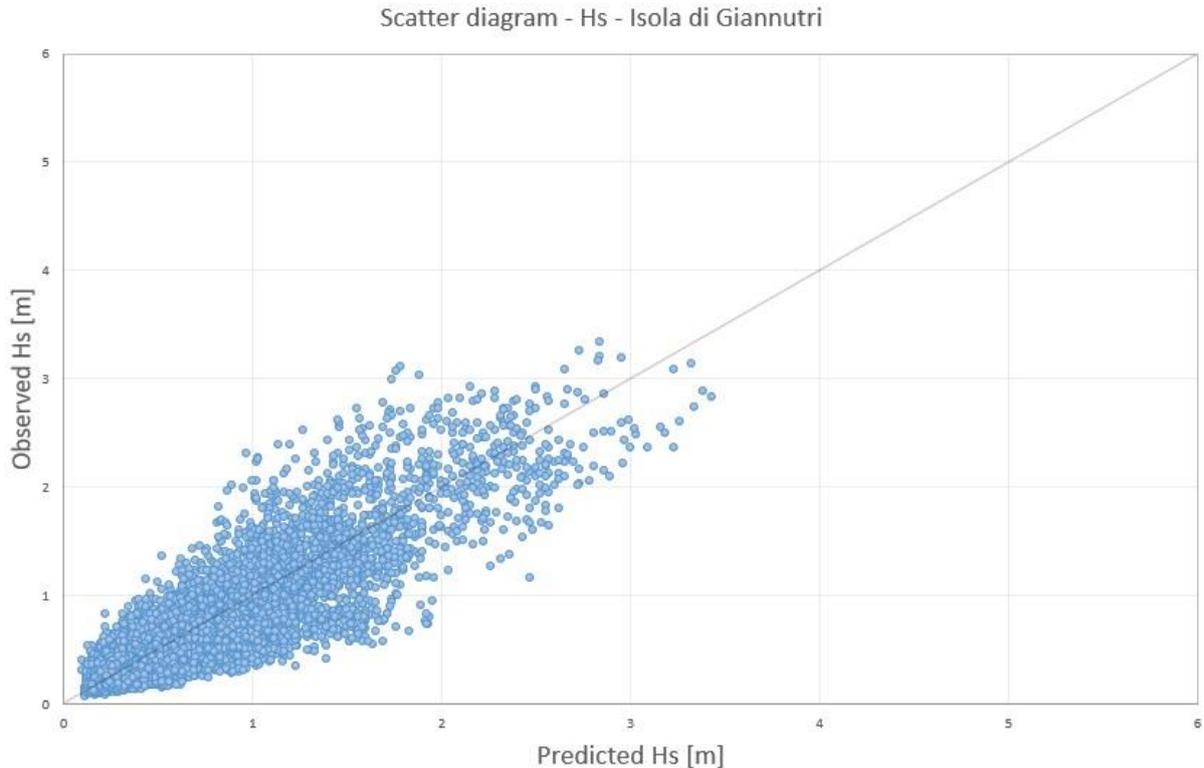


Figura 21. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato

Dalla Tabella 9 emerge che il nuovo metodo modificato si conferma più affidabile del metodo nella versione originaria. Inoltre, si evince come, con riferimento a tutti i parametri statistici relativi sia alle altezze significative sia ai periodi di picco, il metodo di De Girolamo e Contini fornisca risultati più accurati. Si ritiene che tale evidenza scaturisca dalla marcata differenza fra i fetch geografici relativi alle boe di Civitavecchia e di Isola di Giannutri. Questa circostanza inficia la bontà dei risultati dei nuovi metodi di trasposizione i quali, nel considerare uguali i parametri d_l , f_l , f_d , t e V tra le due boe, assumono uguaglianza fra i fetch.

Dal confronto tra la Tabella 9 e le Tabelle 3, 5, 7, emerge che le previsioni operate dai metodi di trasposizione applicati da Civitavecchia a Isola di Giannutri, sono complessivamente più accurate con riferimento alle altezze significative e meno accurate con riferimento ai periodi di picco. Si ritiene che le modeste performance esibite nella predizione dei periodi di picco siano riconducibili all' utilizzo di dati di moto ondoso, relativi alla boa di Isola di Giannutri, acquisiti in forma grezza e non sottoposti ad alcun

processo di controllo, sebbene, preliminarmente all'applicazione dei metodi, sia condotta la correzione sia dei dati ondosi sia dei dati anemometrici. Da ultimo si osserva che la presenza dell'isola di Giannutri modifica le condizioni anemometriche locali, aumentando la differenza tra i venti spiranti sull'area di generazione del moto ondoso comprendente la boa di Isola di Giannutri e i venti che generano le onde registrate dalla boa di Civitavecchia.

4. Conclusioni e futuri sviluppi

Il presente lavoro di tesi propone un nuovo metodo di trasferimento geografico dei dati di moto ondoso, in due versioni. Questi metodi consentono di trasferire intere serie storiche di altezza significativa, periodo di picco e direzione delle onde da una boa ondometrica o, in generale, da un punto dotato di dati, a un punto privo di essi, entrambi posti su profondità infinita. La ricostruzione dei dati di moto ondoso nel particolare punto di interesse per mezzo dei metodi di trasposizione geografica, in luogo del semplice utilizzo dei dati relativi ad un punto considerato vicino a tal fine, garantisce il requisito di rappresentatività geografica dei dati.

I due metodi proposti, la cui impostazione e formulazione ultima scaturisce da diverse iterazioni volte all'ottimizzazione delle performance di predizione dei parametri caratteristici del moto ondoso, si fondano sull'ipotesi di identico evento eolico nei due punti (uguale velocità e direzione del vento) e sulle relazioni empiriche del metodo SPM (*US Army, 1984*). Essi prendono in esame tutte le possibili condizioni di sviluppo dello stato di mare, derivando parametri statistici dai dati di vento caratterizzanti l'area comprendente i due punti: d_l , f_l , f_d , t e V .

Le due versioni del nuovo metodo sono state verificate e confrontate con il metodo di De Girolamo e Contini in quattro casi studio nel Mar Mediterraneo, evidenziando risultati significativamente migliori nelle trasposizioni da Ortona a Isole Tremiti e da Capo Spartivento a Roccella. Il trasferimento dei dati da Crotona a Roccella mediante i nuovi metodi risulta equivalente, in termini di accuratezza, al metodo di De Girolamo e Contini. Si ritiene che ciò sia dovuto alla notevole distanza tra il punto di origine e il punto di trasferimento (112 km) che inficia l'accuratezza delle previsioni dei metodi di trasferimento. L'accuratezza diminuisce ulteriormente in mari aperti in quanto le formule del metodo SPM, sulle quali si fondano i metodi di trasposizione, presentano maggiore affidabilità nel caso di fetch poco estesi. Con riferimento alla trasposizione da Civitavecchia a Isola di Giannutri, il metodo di De Girolamo e Contini esibisce performance poco migliori rispetto ai nuovi metodi. Si ritiene che ciò possa derivare dalla diversa esposizione geografica dei due siti di installazione degli ondometri. Infatti, l'assunzione di uguali parametri d_l , f_l , f_d , t e V tra i punti di origine e di trasferimento, implica l'uguaglianza fra i fetch.

Ulteriore evidenza sperimentale è la maggiore affidabilità del nuovo metodo modificato rispetto al metodo nella versione originale. Il metodo modificato, infatti, tiene in conto della correlazione tra le condizioni di sviluppo del mare nei due punti, data la similarità di venti e fetch dovuta alla prossimità delle località, considerando solo condizioni uguali tra i due siti.

L'originale approccio descritto in questo studio consente di garantire il soddisfacimento del requisito di rappresentatività geografica dei dati di moto ondoso, ottenendo nuovi dati in corrispondenza del sito oggetto di studio da dati esistenti e limitrofi. Il nuovo metodo, nella versione modificata, è di facile implementazione, economico e necessita di pochi dati di input.

I primi risultati suggeriscono che il nuovo metodo modificato è sufficientemente affidabile fino ad una distanza di 90 km tra il punto di origine e il punto di trasferimento. Sono raccomandate ulteriori verifiche del nuovo metodo modificato anche in mari internazionali, al fine di definire il suo campo di applicazione in termini di distanza tra i due punti. L'affidabilità del metodo non è però legata al particolare sito oggetto di studio; essa dipende, invece, dalla verosimiglianza dell'assunzione di uguale vento nei due punti. La veridicità di tale ipotesi dipende dalla larghezza dell'area su cui spira il vento e dall'eventuale presenza di elementi topografici che ostacolano il vento. Per tali ragioni ci si attende una notevole accuratezza del metodo nel caso di distanze, tra il punto di origine e il punto di trasferimento, minori di quelle indagate nel lavoro di ricerca condotto; d'altro canto, verificare la bontà delle previsioni del metodo per brevi distanze è di difficile attuazione a causa della consueta distanza esistente tra dati rilevati da ondometri.

Il nuovo metodo modificato è suscettibile di ulteriori migliorie.

Una prima opportunità di perfezionamento consiste nella possibilità di implementazione di diversi metodi di trasposizione utilizzando le formule di altri metodi empirici di ricostruzione del moto ondoso quali i metodi SMB (*Bretschneider, 1970*), Wilson (*Wilson, 1965*), Pierson-Moskowitz (*Pierson and Moskowitz, 1964*), JONSWAP (*Hasselmann et al., 1973*), Donelan (*Donelan, 1980; Donelan et al., 1985*), Smith (*Smith, 1991*), Coastal Engineering Manual (*US Army, 2003*), Goda (*Goda, 2003*). Infatti, la relativa letteratura scientifica non è concorde riguardo al migliore metodo empirico.

Un ulteriore significativo miglioramento del metodo risulterebbe nel definire i parametri del metodo dl, fl, fd per settori di provenienza del vento. A tal fine, occorre ricavare una nuova formula per la stima della deviazione tra la direzione media del moto ondoso e la direzione del vento. Infatti, le formule di *Donelan (1980)* e *Smith (1991)* (*Leenknecht, Szuwalski, and Sherlock (1992)*) fanno riferimento alla formula proposta da Smith nel 1991) valgono solo per stati di mare limitati dal fetch e conducono a risultati poco accurati. Nella pratica, noti i dati ondosi nel punto di origine, tramite la formula di deviazione onda-vento si risale dalla direzione del moto ondoso alla direzione del vento alla quale sono associati i parametri relativi al settore di appartenenza di quella direzione del vento.

In conclusione, la ricerca condotta fornisce alla comunità scientifica e ai professionisti operanti nel settore dell'ingegneria marittima un nuovo metodo di trasposizione geografica dei dati di moto ondoso, accurato nella predizione sia delle altezze significative sia dei periodi di picco.

Riferimenti bibliografici

- Barbaro, G.; Tomasicchio, R.; D'Alessandro, F.; Dattilo, F., and Foti, G., 2016. Trasposizione geografica del moto ondoso. *Atti XXXV Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, (Bologna, Italy), 289-292.
- Barbaro, G.; Foti, G.; Nucera, A.; Barillà, G.C.; Canale, C.; Puntorieri, P., and Minniti, F., 2020. Risk mapping of coastal flooding areas. Case studies: Scilla and Monasterace (Italy). *Int. J. Safety Security Engin.*, 10(1), 59-67.
- Bishop, C.T.; Donelan, M.A., and Kahma, K.K., 1992. Shore protection manual's wave prediction reviewed. *Coastal Engineering*, 17(1-2), 25-48.
- Boccotti, P., 2014. *Wave mechanics and wave loads on marine structures*. Butterworth-Heinemann, pp. 323.
- Booij, N.R.R.C.; Ris, R.C., and Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
- Bretschneider, C.L., 1970. Wave forecasting relations for wave generation. *Look Lab, Hawaii*, 1(3), 31-34.
- Cavaleri, L. and Sclavo, M., 2006. The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, 53(7), 613-627.
- Cavaleri, L., 2009. Wave modeling—Missing the peaks. *Journal of Physical Oceanography*, 39(11), 2757-2778.
- Coastal Engineering Research Center (US), 1966. *Shore Protection, Planning, and Design*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, *Technical Report No. 4*.
- Coastal Engineering Research Center (US), 1984. *Shore Protection Manual*. Washington, D.C.: US Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineer, pp. 559.
- Contini, P. and De Girolamo, P., 1998. Impatto morfologico di opere a mare: casi di studio. *Atti VIII Convegno AIOM*, (Lerici, Italy).

- Danish Hydraulic Institute, 2017. *MIKE 21 spectral wave module. Scientific documentation*. Danish Hydraulic Institute, pp. 56.
- Donelan, M.A., 1980. Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions. *Proceedings of Canadian Coastal Conference*, (Canada), pp. 47-61.
- Donelan, M.A.; Hamilton, J., and Hui, W., 1985. Directional spectra of wind-generated ocean waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 315(1534), 509-562.
- Gencarelli, R.; G. R. Tomasicchio, and P. Veltri, 2007. Wave height long term prediction based on the use of the spread parameter. *Coastal Engineering 2006*, 701-713.
- Goda, Y., 2003. Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 129(2), 93-95.
- Group, T.W., 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775-1810.
- Hasselmann, K.; Barnett, T.P.; Bouws, E.; Carlson, H.; Cartwright, D.E.; Enke, K; Ewing, J.A.; Gienapp, H.; Hasselmann, D.E.; Kruseman, P.; Meerburg, A.; Muller, P.; Olbers, D.J.; Richter, K.; Sell, W., and Walden, H, 1973. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Hamburg, Germany: Deutsches Hydrographisches Institut, pp. 93.
- Komen, G.J.; Cavaleri, L.; Donelan, M.; Hasselmann, K.; Hasselmann, S., and Janssen, P.A.E.M., 1994. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 533.
- Leenknecht, D.A.; Szuwalski, A., and Sherlock, A.R., 1992. *Automated coastal engineering system: Technical reference*. Vicksburg, MS: Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 214.
- Liu, P.C.; Schwab, D.J., and Jensen, R.E., 2002. Has wind-wave modelling reached its limit? *Ocean Engineering*, 29(1), 81-98.
- Mardia, K.V., 1975. Statistics of directional data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 37(3), 349-371.

- Morim, J.; Hemer, M.; Wang, X. L.; Cartwright, N.; Trenham, C.; Semedo, A.; ... and Andutta, F., 2019. Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change*, 9(9), 711-718.
- Pasanisi, F. and Tebano, C., 2016. A QGIS Plugin for Offshore Wave Hindcasting Based on Geographic Transposition of Wave Gauge Data. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 6(2), 33-40.
- Pierson Jr, W.J. and Moskowitz, L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*, 69(24), 5181-5190.
- Resio, D. T. and Vincent, C. L., 1977. Estimation of winds over the Great Lakes. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 103(2), 265-283.
- Saville, T., 1954. *The effect of fetch width on wave generation*. Denver, Colorado: US Beach Erosion Board Office, U.S. Army Corps of Engineers, pp. 13.
- Seymour, R.J., 1977. Estimating wave generation on restricted fetches. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 103(2), 251-264.
- Simiu, E.; Scanlan, R.H.; Sachs, P., and Griffin, O.M., 1978. *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering and wind forces in engineering*. New York: John Wiley & Sons, pp. 468.
- Smith, J.M., 1991. *Wind-wave generation on restricted fetches*. Vicksburg, MS: Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 51.
- Tolman, H.L. and the WAVEWATCH III ® Development Group., 2014. *User Manual 1042 and System Documentation of WAVEWATCH III® version 4.18. Technical note 316*. College Park, MD: National Centers for Environmental Prediction, pp. 311.
- Tomasicchio, G.R.; Dattilo, F.; Barbaro, G.; Foti, G.; D'Alessandro, F., and Ligorio, F., 2016. Geographical shifting of deep water wave data based on JONSWAP method. *Coastal Engineering Proceedings*, (Antalya, Turkey), pp. waves.28.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2002. *Coastal Engineering Manual*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, pp. 1513.

Vicinanza, D.; Contestabile, P., and Ferrante, V., 2013. Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*, 50(C), 506-521.

Wilson, B.W., 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 18(3), 114-130.

Indice delle figure

Figura 1. Configurazione della RON nel 2014	12
Figura 2. Configurazione della RON dal 2021	13
Figura 3. Distanza d tra i punti di origine e di trasferimento	19
Figura 4. Andamento del rapporto fra velocità del vento su mare e velocità del vento a terra in funzione della velocità del vento a terra.....	26
Figura 5. Diagramma di flusso che sintetizza gli step in cui si articola il metodo proposto....	29
Figura 6. Disposizione di ondometri e anemometri utilizzati nello studio.....	33
Figura 7. Fetch geografici relativi alla boa di Ortona	36
Figura 8. Fetch geografici relativi alla boa delle Isole Tremiti	36
Figura 9. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa delle Isole Tremiti e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato	38
Figura 10. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato.....	38
Figura 11. Fetch geografici relativi alla boa di Crotona	40
Figura 12. Fetch geografici relativi alla boa di Roccella	40
Figura 13. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa di Roccella e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato applicato alla boa di Crotona	42
Figura 14. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato applicato alla boa di Crotona	42
Figura 15. Fetch geografici relativi alla boa di Capo Spartivento	44
Figura 16. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa di Roccella e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato applicato alla boa di Capo Spartivento	45
Figura 17. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato applicato alla boa di Capo Spartivento	46
Figura 18. Fetch geografici relativi alla boa di Civitavecchia	47
Figura 19. Fetch geografici relativi alla boa di Isola di Giannutri	48
Figura 20. Confronto fra i valori di altezza significativa registrati dalla boa di Isola di Giannutri e predetti tramite il metodo di trasferimento modificato	49

Figura 21. Diagramma di dispersione relativo alle altezze significative calcolate col nuovo metodo modificato..... 50