Eventi estremi e gestione della fascia costiera: alcune considerazioni sulla tempesta Vaia (29 – 30 ottobre 2018)

Simone Alesso[1], Luca Carpi[2 3], Carlo Cavallo[1], Nicola Corradi[2], Luigi Mucerino[3], Marco Ferrari[2]

[1]Dipartimento Ambiente e Protezione Civile – Settore Ecosistema Costiero e Acque - Via D'Annunzio, 111 – 16121 Genova, Italia.
[2]Di.S.T.A.V. - Università degli Studi di Genova corso Europa 26, 16132 Genova, Italia.
[3]Geoscape Soc. Coop, Via Varese 2, 16122 Genova, Italia.

Preprint

Riassunto
In questo studio, la costa ligure è stata suddivisa in cinque settori. In ciascuno di essi sono stati censiti i danni causati alle strutture costiere dalla tempesta Vaia, che ha colpito la regione nell'ottobre 2018. Parallelamente, sono stati raccolti e analizzati, per ogni settore, i dati meteomarini che hanno caratterizzato la tempesta.
La ricostruzione delle condizioni meteo marine nei differenti settori ha permesso di definire la genesi e l'evoluzione della mareggiata. Il successivo confronto con i danni registrati ha permesso di identificare le cause che hanno amplificato il fenomeno. Il quadro meteomarino delineato nello studio ha evidenziato che questi eventi fanno supporre che l'area di studio stia subendo una variazione del suo quadro climatico.

Parole chiave: Tempesta Vaia, uragani mediterranei, strutture marittime, cambiamenti climatici

Abstract
In this study, the Ligurian coast was divided into five sectors. In each of them, the damage caused to coastal structures by the Vaia storm, that hit the region in October 2018, was recorded. At the same time, the marine weather data that characterized the storm were collected and analysed for each sector.
The reconstruction of the marine weather conditions in the different sectors allowed us to define the genesis and evolution of the storm surge. The subsequent comparison with the recorded damage allowed us to identify the causes that amplified the phenomenon. The marine weather picture outlined in the study highlighted that these events suggest that the study area is undergoing a change in its climate picture.

Keywords: Vaia Storm, Mediterranean hurricanes, maritime structures, climate change

Introduzione
La tempesta Vaia è stato un evento catastrofico, generatosi nell'area mediterranea, che si è abbattuto sull'Europa nel periodo compreso tra la fine di ottobre e l'inizio di novembre del 2018 (Cavaleri et al., 2022). Si è formata in un contesto di maltempo generale insolitamente lungo (5 giorni) e intenso, che ha coinvolto l'intero sottobacino del Mediterraneo occidentale (Onorato, 2018).

In particolare, tra il 27 ed il 30 ottobre, la penisola italiana è stata interessata da una lunga fase di maltempo. In Liguria si sono registrate piogge intense, localmente persistenti, venti forti ed una mareggiata che ha devastato gran parte della costa. Questa tempesta è stata un evento estremo riconosciuto come uno dei più distruttivi che hanno colpito la costa ligure negli ultimi 50 anni (Iengo e Del Giudice, 2019). Oltre ai valori decisamente elevati dell'altezza significativa dell'onda e la durata dell'evento superiore a 12 ore, vi sono altri fattori che hanno contribuito a rendere eccezionale questo evento ondoso. In primo luogo, i venti al suolo hanno raggiunto velocità medie classificabili tra burrasca forte e tempesta con raffiche fino ad uragano. Essi hanno generato un effetto di *storm surge*, ulteriormente amplificato dal passaggio di un minimo depressionario (976 hPa) sul Golfo Ligure, che ha causato un innalzamento del livello della superficie media marina di superiore a 50 cm. Infine, le modalità evolutive della mareggiata: con onde inizialmente provenienti da Sud-Est, in successiva rotazione da Sud e, nella fase decrescente, da Sud-Ovest. L'evento ondoso, pur interessando tutta la regione, ha avuto intensità ed effetti differenti a scala regionale. Infatti, la tempesta ha causato devastazioni lungo l'intera costa ligure (Oprandi et al., 2020), ma l'entità dei danni non è distribuita uniformemente lungo l'arco ligure, ma si concentra in alcuni settori. Pertanto, comprendere le dinamiche evolutive che hanno determinato questo fenomeno e le modalità con cui si è manifestato nei diversi tratti di costa, costituisce un aspetto fondamentale per la definizione e l'implementazione di nuove strategie di gestione della fascia costiera.
L'obiettivo che si pone questo studio è quello di definire, mettendo in relazione i danni occorsi lungo costa con le condizioni meteo marine che li hanno prodotti, quali sono i parametri meteo marini che maggiormente hanno influito ed amplificato gli effetti devastanti della mareggiata.

Inquadramento dell'area

Il litorale ligure (Fig. 1) ha uno sviluppo di circa 350 km ed in gran parte è costituito da costa rocciosa. Le sue caratteristiche geomorfologiche le conferiscono una notevole variabilità (AA.VV. 2006). Sono presenti promontori aggettanti verso mare che racchiudono piccole spiagge a tasca, e tratti di costa deposita che rappresentano il fronte mare di piccole piane costiere. Costituiscono eccezione le spiagge del Savonese, caratterizzato dall'ampia piana d'Albenga. Uno degli aspetti salienti della costa ligure è l'elevato livello di antropizzazione: infatti le aree urbane e portuali ammontano a circa 116 km. Geograficamente costituisce parte del limite settentrionale del Mediterraneo occidentale, quindi, la sua posizione la rende esposta alle agitazioni ondose provenienti dal II e III quadrante (AA.VV., 2010). Pertanto, il clima meteo marino della regione individua nel settore di SW (Libeccio), caratterizzato da un *fetch* superiore a 800 km, la direzione di provenienza delle onde più intense e frequenti ed in subordine le agitazioni ondose provenienti da S e SE (Scirocco e Mezzogiorno).
Anche se il suo sviluppo costiero, con una forma assimilabile, a grandi linee, ad una mezzaluna, con la parte concava rivolta verso meridione, può indurre a credere che il clima marittimo sia sostanzialmente simile in tutta la costa ligure, in realtà il suo orientamento è più complesso e conseguentemente ne condiziona l'esposizione. Nell'estremo di ponente, fino a Capo Mele, lo sviluppo costiero ha un andamento sostanzialmente E – W, che lo espone a tutte le agitazioni ondose, analoga situazione è osservabile nel genovesato fino a Portofino. Mentre nel Savonese l'orientazione costiera risulta essere maggiormente diversificata con tratti ad andamento N – S, quindi parzialmente ridossati dalle agitazioni ondose provenienti dal III quadrante, e tratti con andamento E – W esposti a tutte le agitazioni. Per quanto riguarda il litorale di levante, il promontorio di Portofino costituisce sicuramente un fattore discriminante nell'assetto idrodinamico del Golfo del Tigullio. Infatti, con la sua presenza crea un'ampia zona protetta dalle agitazioni ondose più intense provenienti da SW. Il restante tratto risulta nuovamente esposto a tutte le ondazioni, anche se i settori collocati nell'estremo di levante hanno una collocazione tale che le agitazioni di SE risultano con un *fetch* molto ridotto.

Preprint

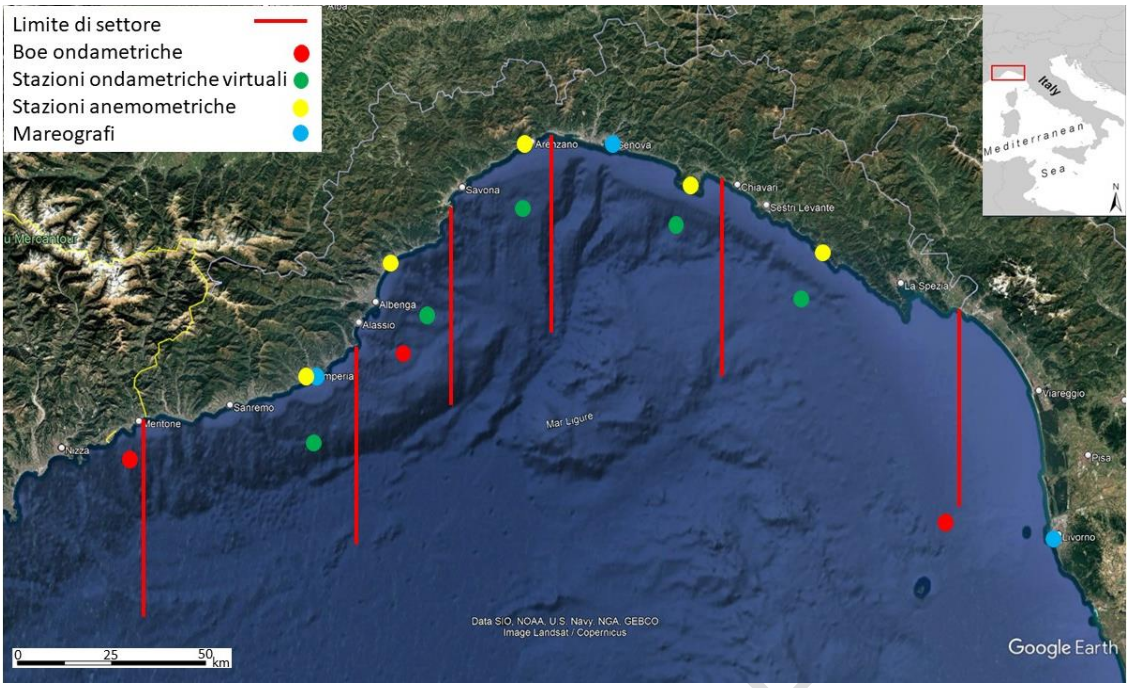

Figura 1. Area d'indagine con i settori in cui è stata suddivisa e le stazioni meteo – marine utilizzate.

Materiali e metodi

Allo scopo di valutare la differente intensità dell'evento ondoso lungo la costa ligure, l'area di studio è stata suddivisa in settori, in relazione all'entità ed alla numerosità dei danni subiti, senza considerare le caratteristiche geomorfologiche della costa e la sua esposizione al moto ondoso. Sono stati considerati solo i danni riportati da strutture progettate per essere in grado di sopportare l'azione del moto ondoso, quindi le opere marittime quali porti, pennelli, barriere, difese aderenti, tralasciando i danni a infrastrutture balneari ed altri manufatti. I danni occorsi sul litorale ligure sono stati individuati utilizzando le informazioni di Regione Liguria relative agli interventi finanziati mediante l'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile (OCDPC) 558/2018. Gli interventi considerati sono quelli riferibili agli anni 2019 e 2020, dedicati al ripristino delle strutture danneggiate durante l'evento; mentre non sono stati considerati i successivi interventi rivolti ad aumentare la resilienza del litorale. Inoltre, sono state raccolte ulteriori informazioni provenienti dalla stampa locale o da osservazioni di campo. I danni sono stati catalogati in tre classi in funzione della gravità:

Classe 1: danni lievi, modesti sgrottamenti nelle difese aderenti, dislocazione di massi o blocchi nelle strutture marittime, altri modesti dissesti;

Classe 2: danni significativi quali sgrottamenti estesi e scalzamenti al piede nelle difese aderenti, rimozione e/o asportazione di massi e blocchi nelle strutture marittime;

Classe 3: danni gravi con crolli e profondi danneggiamenti nelle difese aderenti, totale o parziale demolizione delle strutture marittime.

In ognuno dei settori individuati sono stati raccolti i dati meteomarini, anemometrici e mareografici, riferiti al periodo temporale dell'evento ondoso.

I dati meteomarini descrittivi delle onde (Hs, T e Dir.) provengono dalle boe ondametriche di Gorgona, Capo Mele e Monaco, rispettivamente appartenenti alle reti ondametriche della Toscana (https://www.cfr.toscana.it/index.php?IDS=42&IDSS=282), Liguria (https://wes.arpal.liguria.it/arpal/boa/) e da CEREMA (https://candhis.cerema.fr/). Ad integrazione di queste informazioni sono stati acquisiti anche informazioni provenienti dal database Copernicus (https://data.marine.copernicus.eu/products). Sono stati determinati punti rappresentativi dei settori omogenei individuati, ed in ciascuno di essi sono stati raccolti i dati meteomarini, con cadenza trioraria.

Con procedimento analogo, sono stati raccolti i dati anemometrici, acquisiti dal geoportale di Regione Liguria (https://omirl.regione.liguria.it/), relativi all'intensità massima e media del vento (kmh^{-1}), e la sua direzione di provenienza. Infine, i dati mareografici provengono dal portale della rete mareografica italiana, gestita da ISPRA (https://www.mareografico.it/). Le stazioni considerate sono quelle di Imperia, Genova e, non essendo disponibili dati relativi alla stazione di La Spezia, sono stati utilizzati quelli forniti dalla stazione di Livorno. In Figura 1 sono riportate le posizioni di tutte le stazioni meteorologiche ed oceanografiche, reali e virtuali utilizzate.
Infine, sono stati confrontati i danni occorsi nei cinque settori indagati con le condizioni meteo marine che li hanno causati.

Risultati

Stima dei danni

I dati relativi ai danni verificatisi alle infrastrutture marittime mostrano che la massima concentrazione è nel settore centrale dell'arco ligure, e tendono a ridursi procedendo verso i settori periferici di levante e ponente. Questa ipotesi trova conferma nei finanziamenti erogati da Regione Liguria nell'anno 2019 dedicati ad interventi somma urgenza e di messa in sicurezza. Infatti, nella Tabella 1, riferita ai finanziamenti distribuiti alle quattro province, si può osservare come Genova sia quella che ha ricevuto i maggiori contributi, circa il 47%, dei quali il 64% per somma urgenza. Le altre tre province hanno percepito tutte contributi mai superiori al 20%.

Tabella 1. Valori percentuale dei finanziamenti ricevuti dalle province liguri nell'anno 2019 da parte di Regione Liguria.

Provincia	Somma urgenza (%)	Messa in sicurezza (%)	**%** regionale
La Spezia	45	55	**20**
Genova	64	36	**47**
Savona	44	56	**18**
Imperia	?	?	**16**

L'analisi di dettaglio dei danni riportati in ogni settore e suddivisi per classe di gravità è presentata in Tabella 2, dove si può osservare che:
Confine toscano – Chiavari. In questo tratto di circa 110 km, si sono verificati principalmente danni di lieve entità ad eccezione del settore orientale della baia di Bonassola (Fig. 2), della scogliera di Portobello a Sestri Levante e danneggiamenti alle scogliere frangiflutti di Chiavari.

Figura 2. Il settore orientale della passeggiata a mare di Bonassola danneggiato dalla mareggiata

PREPRINT

Chiavari – Genova. Questo settore, lungo circa 85 km, risulta essere quello che ha subito i maggiori danni, soprattutto nel settore compreso tra Portofino e Rapallo. In particolare, si segnala: la parziale distruzione del molo foraneo del porto di Rapallo, i gravi danneggiamenti di quello di Santa Margherita, il crollo di parte della strada provinciale di collegamento a Portofino. Nel restante tratto costiero si sono osservati crolli nella passeggiata a mare di Genova Nervi e criticità importanti in C.so Italia a Genova ed a Genova Sturla, mentre nell'estremo occidentale del settore si sono registrati danni alla S.S. Aurelia in località Genova Crevari ed al danneggiamento del pennello semi affiorante ubicato a scoglio Nave a Genova Vesima (Fig. 3).

Figura 3. Genova Vesima: La struttura semi affiorante prima (a) e dopo l'evento ondoso (b).

Genova – Vado. Questo settore, di circa 40 km, presenta danni riferibili alla classe 1 che hanno interessato principalmente le opere di difesa ad Arenzano, Cogoleto e Celle Ligure. Danni maggiori alla passeggiata a mare Europa a Varazze.
Vado – Laigueglia. Lungo i 45 km di questo settore sono stati individuati soprattutto lievi danni alle opere nella porzione occidentale, danni di maggiore entità nel tratto compreso tra Loano e Finale Ligure, dove al Malpasso (Finale Ligure) la viabilità è stata interrotta a causa di danni alla strada statale Aurelia. Il restante tratto orientale non ha patito danni significativi.
Laigueglia – Confine Francese. I 65 km di costa sono stati oggetto di dissesti diffusi ma di lieve entità, classe 1, ad eccezione di seri danni occorsi ai moli foranei del porto di Oneglia ad Imperia e di Portosole a Sanremo.

Tabella 2. Danni verificatisi nei cinque settori indagati suddivisi nelle 3 classi di gravità.

Settore	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Confine toscano - Chiavari	14	2	0
Chiavari –Genova	5	5	8
Genova – Vado	6	1	0
Vado – Laigueglia	4	1	1
Laigueglia – Confine Francese	13	0	2
Totale	**42**	**9**	**11**

Moto ondoso

I dati relativi alle tre boe ondametriche utilizzate indicano che l'aumento dell'agitazione ondosa ha avuto inizio nell'estremo di levante e successivamente si è propagato verso ponente. Il picco della mareggiata è stato raggiunto verso mezzanotte nelle boe di Gorgona e Capo Mele rispettivamente con 5.0 metri e 6.4 metri di altezza significativa dell'onda. La boa di Monaco ha misurato valori massimi dell'altezza significativa dell'onda minori, circa 4.2 metri, ed il picco è stato raggiunto alle 22.00, quindi anticipatamente rispetto agli altri settori. Nell'estremo ponente, alle ore 03.00 del 30 ottobre, l'evento può già considerarsi concluso con valori di Hs inferiori a due metri. Nel levante invece l'agitazione ondosa raggiunge valori inferiori ai due metri solo alle ore 18.00 del 30 ottobre, a Capo Mele addirittura alle ore 20.00. I dati relativi al periodo (T) mostrano valori simili in tutti i tre punti di osservazione, compresi tra 10 ed 11 secondi nella fase culminante dell'evento. Per quanto riguarda la direzione di provenienza del moto ondoso, sia a levante che ponente risulta inizialmente da SE. Però, mentre la boa di Gorgona mostra, a partire dalle ore 18.00 del 29 ottobre, una rotazione dei piani d'onda fino ad assumere una direzione da SW, la boa di Monaco ha una rotazione minima con le onde che mantengono sempre una provenienza con direzione inferiore a 180° N. Nella boa di Capo Mele purtroppo, a causa di un malfunzionamento della strumentazione, sono assenti le informazioni relative alla direzione di provenienza del moto ondoso.

Allo scopo di meglio caratterizzare le caratteristiche meteo – marine che hanno interessato la costa ligure, sono stati raccolti i dati forniti dal database Copernicus relativi ai cinque settori precedentemente definiti.

Le informazioni acquisite dal database di Copernicus mostrano che l'evoluzione temporale dell'evento ondoso sia simile a quella determinata con i dati provenienti dalle boe ondametriche, ma sostanzialmente risultano sottostimati in tutto l'arco ligure i valori dell'altezza significativa dell'onda. A titolo d'esempio la stazione virtuale di Loano registra come valore massimo dell'altezza significativa dell'onda di 3.65 m contro i 6.4 m. misurati dalla boa di Capo Mele. I dati riferibili al periodo e alla direzione di provenienza del moto ondoso sono invece in accordo con quelli registrati. Perciò, si possono, con buona approssimazione, effettuare considerazioni anche quantitative sulle caratteristiche della mareggiata nei diversi settori, ad eccezione dell'intensità dell'evento che può essere solo stimata qualitativamente.

I dati confermano che l'agitazione ondosa ha avuto inizio nell'estremo di levante e successivamente si è propagata verso ponente. Per tutte le cinque stazioni virtuali considerate i valori maggiori dell'altezza d'onda significativa sono stati registrati alla mezzanotte del 29 ottobre. Le massime altezze vengono raggiunte a Levanto, Loano e Portofino. Nella fase successiva si assiste ad una riduzione dell'intensità specie nell'estremo ponente, dove ad Imperia si registrano valori inferiori a 2.5 metri già alle ore 03.00 del 30 ottobre, in accordo con quanto registrato con la boa di Monaco. Al contrario, nel settore centro orientale, Levanto e Portofino, l'agitazione ondosa si mantiene con valori relativamente elevati fino alle ore 09.00 del 30 ottobre.

I dati relativi al periodo mostrano, nella fase montante, un rapido aumento del periodo da circa 8.5 secondi a 9.5 secondi su tutto l'arco ligure. Questi valori si mantengono costanti o in leggero aumento ad eccezione dell'estremo ponente, dove si osserva un periodo superiore ai 10 secondi a partire dalle ore 03.00 del 30 ottobre, quando la mareggiata è ormai in fase calante in questo settore.

Infine, la direzione di provenienza del moto ondoso non risulta uniforme su tutto l'arco ligure (Fig. 4). Nella fase iniziale l'agitazione ondosa proviene da SE. Alle ore 18.00 ha inizio una rotazione dei fronti d'onda che assumono una direzione di provenienza da SSW e SW, più accentuata agli estremi dell'arco ligure. A levante questa situazione si manterrà per tutta la durata dell'agitazione ondosa, a ponente invece si assiste ad un'ennesima rotazione che riporta il moto ondoso a svilupparsi da mezzogiorno.

Il settore centrale invece risente in minor misura di questa traslazione e si mantiene sempre con una direzione inferiore a 200° N per tutta la durata dell'evento.

Preprint

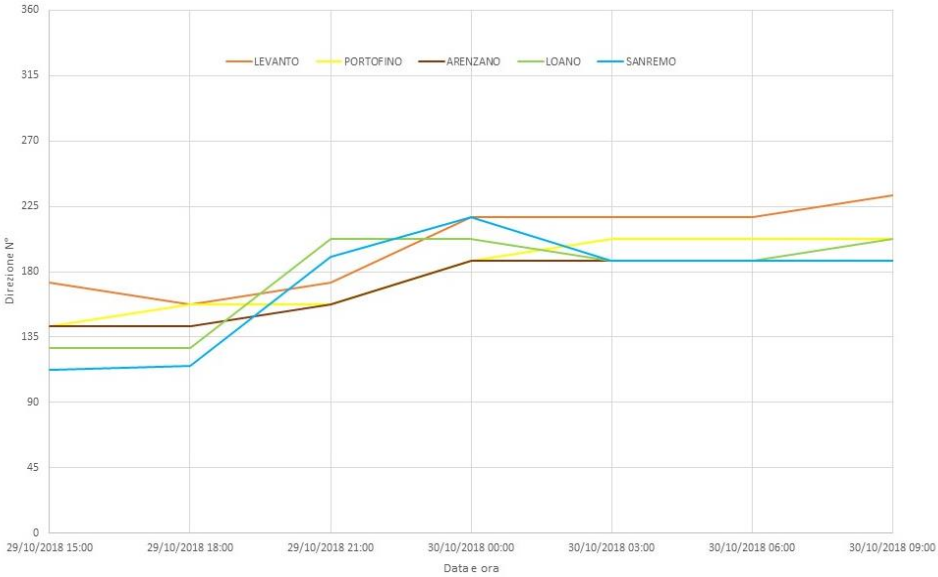

Figura 4. Direzione di provenienza del moto ondoso nei cinque settori considerati (database Copernicus).

Dati anemometrici

L'analisi dei dati anemometrici mostra che le velocità massime del vento (Fig. 5) sono state raggiunte a Loano alle ore 19.00 del 29.10.2018 ed a Portofino alle ore 18.00. La velocità raggiunta è stata rispettivamente 180 kmh^{-1} e a 138 kmh^{-1}. Il grafico mostra che nel levante ligure le raffiche di vento non hanno mai superato gli 80 kmh^{-1}, e a partire dalla mezzanotte i valori erano scesi al di sotto di 40 kmh^{-1}. Al contrario a Portofino ed a Loano l'intensità massima del vento, superiore a 80 kmh^{-1}, si mantiene costante fino alle prime ore del giorno successivo. Infine, le stazioni di Arenzano ed Imperia mostrano valori elevati nella fase iniziale, specie ad Arenzano con valori superiori a 100 kmh^{-1}, che si riducono rapidamente, e risultano essere inferiori a 60 kmh^{-1}, prima della mezzanotte.

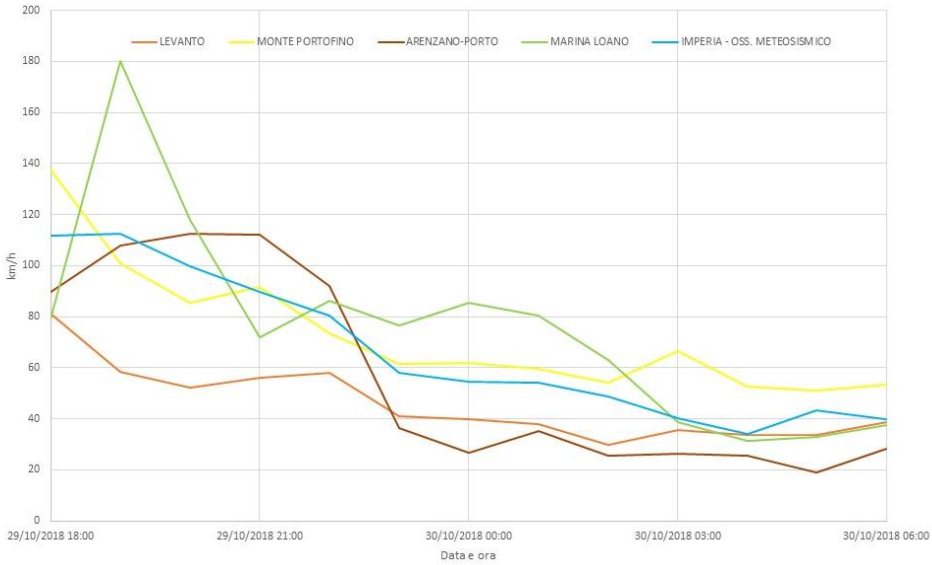

Figura 5. Velocità massima del vento nei cinque settori considerati (database Geoportale Omirl Regione Liguria).

Il grafico relativo alla direzione di provenienza del vento (Fig. 6) mostra che nelle fasi iniziali della tempesta il vento, su tutto l'arco ligure, proveniva dal II quadrante (SE). Successivamente, a partire dalle ore 19.00, inizialmente nell'estremo ponente e successivamente a Loano e ad Arenzano è iniziata una rotazione antioraria che ha traslato la direzione del vento a SW ed infine ad W. Al contrario, le stazioni di Portofino e di Levanto, per tutta la durata dell'evento, hanno registrato valori comprese tra 135° e 180°.

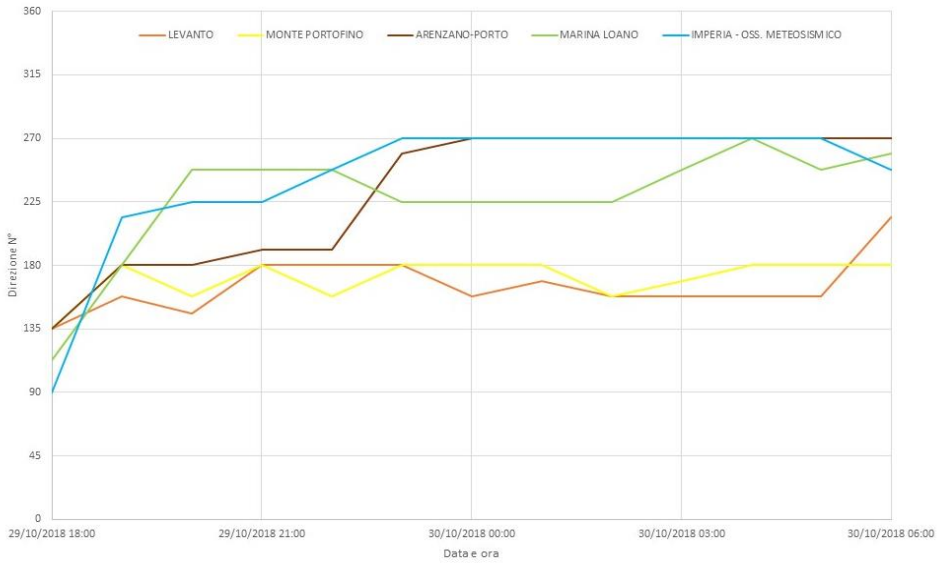

Figura 6. Direzione di provenienza del vento nei cinque settori considerati (database Geoportale Omirl Regione Liguria).

Dati Mareografici

I livelli idrometrici rappresentativi dei settori orientale, centrale ed occidentale della costa ligure, mostrano una evoluzione simile, ma con intensità diverse (Fig. 7). Il settore occidentale risulta essere quello con valori idrometrici più contenuti, sempre inferiori a 0.6 metri. I restanti settori hanno, inizialmente valori sostanzialmente simili ma più elevati rispetto al precedente, con punte anche superiori ad 0.8 metri.

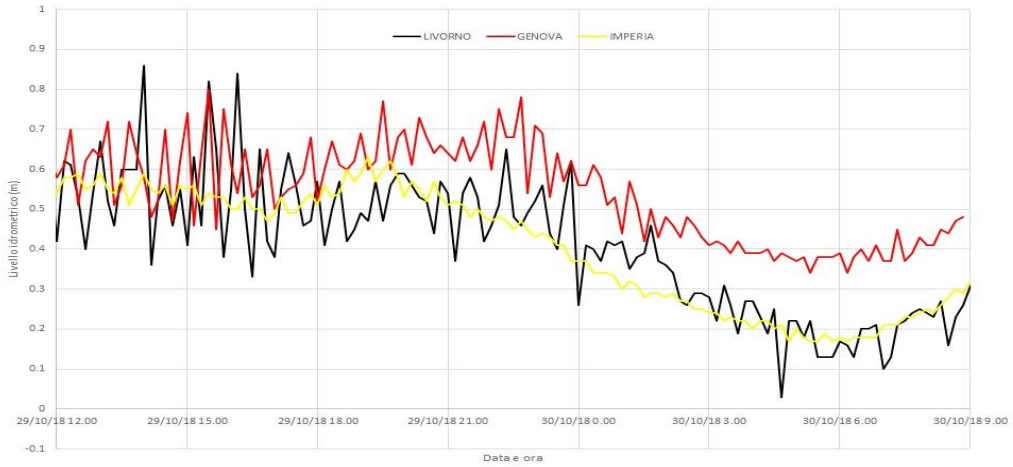

Figura 7. Livelli idrometrici misurati nelle tre stazioni rappresentative dell'area d'indagine (database Rete Mareografica Nazionale ISPRA).

A partire dalle ore 18.00 fino alla mezzanotte del 29 ottobre, il settore centrale registra valori sempre superiori a 0.6 metri, al contrario di quello di levante dove si osservano misure inferiori a 0.6 metri. Per tutta la durata della mareggiata il settore centrale risulta essere quello con i valori idrometrici maggiori.

Discussione

Il contesto meteorologico creatosi nell'ottobre 2018 presentava caratteristiche simili a quegli eventi che vengono comunemente definiti "*Medicane*" (Cavicchia ed al, 2014). La tempesta infatti presentava un minimo baroclinico molto basso, una elevata intensità del vento associata a piogge torrenziali (Onorato, 2018), che hanno indotto un importante effetto *storm surge* con un significativo innalzamento del livello medio mare, favorendo la penetrazione delle onde sulla costa. Inoltre, va considerata anche la notevole durata dell'evento, pari a circa 12 ore. Questi aspetti però giustificano solo in parte le devastazioni che hanno colpito certi settori della costa ligure. Infatti, nonostante l'elevata intensità dell'agitazione ondosa, nel recente passato si sono registrati valori simili (Pedemonte et al., 2018). La sua eccezionalità è da ricercarsi nella genesi ed evoluzione dell'evento. Come evidenziato in molti studi (Iengo e Del Giudice, 2019; Onorato, 2018; Cavaleri et al., 2022), l'agitazione ondosa è stata caratterizzata da due diverse mareggiate provenienti da Sud-Est, la prima e da Sud-Ovest la successiva. Esse hanno agito in sinergia, amplificando l'impatto risultante sulla costa, creando uno stato di mare incrociato complesso con direzione di provenienza del moto ondoso inusuali per il Mar Ligure.

Quindi i fattori discriminanti sono da ricercarsi nell'inusuale direzione di provenienza del moto ondoso nei confronti della diversa esposizione della costa. I tratti di costa che risultano esposti a tutte le agitazioni ondose provenienti dai quadranti meridionali hanno subito danni minori e simili a quelli verificatisi durante altre mareggiate dello stesso ordine di grandezza. I tratti che invece presentano un'orientazione e/o una morfologia che può limitare la loro esposizione hanno tratto vantaggio o svantaggio a causa dell'inusuale direzione di provenienza dell'attacco ondoso.

Non a caso il settore compreso tra Chiavari e Genova risulta essere il più danneggiato, sia a causa delle condizioni meteomarine tra le più severe, ma soprattutto per la relativa inusualità della direzione di provenienza del moto ondoso. Infatti, la presenza del promontorio di Portofino che offre protezione alle mareggiate più intense provenienti da SW ad un ampio settore del golfo del Tigulio, durante questo evento non è stato in grado di intercettare l'attacco ondoso proveniente da S e SE, che in questo settore si è mantenuto tale per tutta la durata della mareggiata, ma con un'intensità tipica delle mareggiate di SW. Conseguentemente il tratto di costa, generalmente non interessato a questi eventi, è risultato inadeguato a ricevere sollecitazioni di questa intensità. L'eccezionalità dell'evento è testimoniata anche dai numerosi danni occorsi alle praterie di Posidonia Oceanica in questo settore (Oprandi et al., 2020). La restante parte del settore, posto ad occidente del promontorio di Portofino, così come il tratto successivo fino a Capo Vado, esposti a tutte le agitazioni ondose meridionali, quindi strutturati per ricevere anche le agitazioni ondose più intense, hanno subito danni più contenuti.

L'anomala direzione d'attacco delle onde spiega i danni occorsi alle strutture portuali dell'estremo ponente ed i danni occorsi alle infrastrutture di levante. A Ponente l'attacco ondoso si è sempre mantenuto proveniente da SE e S, a levante ha invece subito una relativamente rapida rotazione, ma in entrambi i tratti, pur non raggiungendo l'intensità di altri settori costieri, la mareggiata è stata in grado di danneggiare le strutture più esposte alle agitazioni ondose provenienti dal II quadrante, come il molo foraneo del porto di Oneglia e la passeggiata a mare di Bonassola (SP).

La mareggiata del 29 e 30 ottobre 2018 è stato un evento dei più distruttivi che hanno colpito la costa ligure negli ultimi 50 anni (Iengo e Del Giudice, 2019), anche se eventi con intensità paragonabile sono avvenuti in passato ed anche successivamente. In Tabella 3 sono riportati i dati relativi ad alcune delle più intense mareggiate che hanno interessato l'arco ligure negli ultimi 25 anni (https://forecast.meteocean.science/hindcast/).

Pre-print

Tabella 3. Maggiori eventi ondosi e loro caratteristiche.

Data	Direzione	Hs (m)	T (sec.)	Durata (h)	Livello Idrometrico
28.12.1999	SW	5.1	10 - 11	18	N.D.
06.11.2000	SE → SW	5.8	9 - 11	16	N.D.
30.10.2008	S → SW	6.4	10 - 11	12	0.45
16.12.2011	SW	6	9 - 11	28	0.40
29.10.2018	SE → SW	6.4	10	12	0.80
27.10 2023	SW	5.9	10 – 11	13	0.65
03.11.2023	SW	6.5	10 - 11	12	0.70
05.11.2023	SW	5.6	10 - 11	24	0.40

Come si può osservare questi eventi ondosi hanno generalmente una provenienza dal III quadrante, l'altezza significativa dell'onda è paragonabile a quella dell'evento studiato così come il periodo, sempre compreso tra 9 e 11 secondi. Anche la durata di questi eventi è sempre simile o addirittura superiore. Il solo livello idrometrico in alcuni casi risulta inferiore. Tutti questi eventi, pur presentando intensità simili hanno causato danni minori ad eccezione della mareggiata avvenuta nel novembre 2000, che presentava caratteristiche evolutive analoghe a quella studiata. Anche in questo caso i danni maggiori si sono registrati nel Golfo del Tigulio, a Santa Margherita Ligure e Rapallo (https://www.youtube.com/watch?v=L7tDDGC1Ing), e nell'estremo ponente ligure (Donini L., 2015). Questo aspetto, oltre a confermare che le cause delle distruzioni provocate dalla mareggiata siano da ricercarsi nelle modalità evolutive dell'evento, sembra indicare che, allo stato attuale, questi tratti della costa, ma in generale tutta la Liguria, non siano in grado di sopportare questa tipologia di eventi.

Secondo recenti studi (Garnier et al., 2018), il numero di tempeste storiche con danni ingenti in Liguria è quintuplicato e il loro tempo di ritorno si è più che dimezzato tra il 1600 e il 2000. Anche Easterling et al., (2000) ritengono probabile che il cambiamento climatico aumenti l'entità e la frequenza di eventi meteorologici estremi. Invece altri studi sulle previsioni future del clima ondoso nel Mar Mediterraneo nord-occidentale prevedono importanti alterazioni non nell'altezza significativa delle onde, ma piuttosto nella direzione di provenienza del moto ondoso, con onde W-NW e SE più frequenti (Casas-Prat e Sierra, 2013). In entrambe le ipotesi risulta evidente che le soluzioni progettuali fino ad oggi adottate rischiano di risultare inadeguate ed il futuro approccio alla gestione della fascia costiera non potrà prescindere dalla valutazione di una potenziale variazione del quadro climatico dell'area.

Conclusioni

Questo studio ha permesso di ricostruire le modalità con cui la mareggiata indotta dalla tempesta Vaia ha colpito la costa ligure e conseguentemente di spiegare i meccanismi che hanno reso l'evento estremamente devastante, specie in alcuni settori della regione. L'analisi dei dati meteomarini ha messo in evidenza che, pur trattandosi di un'agitazione ondosa di notevole forza, nel recente passato vi sono stati numerosi eventi simili che non hanno prodotto danni così ingenti. Quindi, gli aspetti che hanno reso straordinaria questa mareggiata non sono da ricercare nell'intensità del fenomeno, ma nelle modalità evolutive che l'hanno caratterizzata. L'aspetto maggiormente discriminante è identificabile nel duplice attacco ondoso che, favorito dall'azione incessante del vento, ha dato origine ad un'agitazione ondosa molto intensa, simile ai maggiori eventi registrati con provenienza da SW, ma con una direzione delle onde da mezzogiorno. L'inusuale sviluppo ha permesso al moto ondoso di raggiungere tratti di costa generalmente non interessati da queste agitazioni e quindi sostanzialmente inadeguati a sollecitazioni così intense. Infatti, i settori maggiormente penalizzati sono

Preprint

relativi al tratto costiero di Rapallo e Santa Margherita Ligure, che beneficia della protezione del promontorio di Portofino dalle agitazioni ondose di Libeccio. Benché gli effetti dei cambiamenti climatici sul clima meteomarino del mar Mediterraneo non siano ancora ben definiti, questi eventi fanno ritenere che sia necessario rivedere la gestione della fascia costiera in un potenziale inedito quadro climatico.

Ringraziamenti
Gli autori desiderano ringraziare il Prof. Giovanni Besio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova per aver fornito parte dei dati ondosi necessari allo svolgimento della ricerca.

Bibliografia

AA.VV., 2006. Lo stato dei litorali italiani, le spiagge della Liguria. Studi Costieri, 10, 9-14.

AA.VV., 2010. The Ligurian Sea: present status, problems and perspectives. Chemistry and Ecology, 26, 319-340

Cavaleri L., Barbariol F., Bertotti L., Besio G., Ferrari F., 2022. The 29 October 2018 storm in Northern Italy: Its multiple actions in the Ligurian Sea. Progress in Oceanography, 201, 102715.

Easterling D. R., Evans J. L., Groisman P. Ya, Karl T. R., Kunkel K. E., Ambenje P., 2000. Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. Bulletin of the American Meteorological Society, 81:3, 417-426.

Casas-Prat M., Sierra J.P., 2013. Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Research Oceans, 118 (7), 3548-3568.

Cavicchia L., von Storch H., Gualdi S., 2014. A long-term climatology of medicanes. Climate Dynamics, 43, 1183-1195.

Donini L., 2015. Indice speditivo per la valutazione delle mareggiate in Mar Ligure. Tesi Inedita. Università degli studi di Genova Facoltà di Ingegneria A.A. 2014-15.

Garnier E., Ciavola P., Spencer T., Ferreira O., Armaroli C., McIvor A., 2018. Historical analysis of storm events: case studies in France, England, Portugal and Italy. Coast. Eng. 134, 10-23.

Iengo A., Del Giudice T., 2019. Analysis of the 29 October 2018 sea-storm in the Ligurian Sea. 2019 IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea, Genoa, Italy.

Onorato L., 2018. Riassunto meteorologico mensile. ARPAL. https://www.arpal.liguria.it/contenuti_statici/pubblicazioni/rapporti_mensili/2018/201810_ottobre_meteo.pdf.

Oprandi A., Mucerino L., De Leo F., Bianchi C.N., Morri C., Azzola A., Benelli F., Besio G., Ferrari, M., Montefalcone M., 2020. Effects of a severe storm on seagrass meadows. Science of the Total Environment 748.

Pedemonte L., Corazza M., Forestieri A., Turato B., 2018. Rapporto di evento meteoidrologico del 27 – 30 ottobre 2018. A.R.P.A.L. – Centro funzionale meteo – idrologico di protezione civile della regione Liguria, 1-16.

Romero R., Emanuel K., 2013. Medicane risk in a changing climate. Journal of Geophysical Research. Atmospheres 118 (2013), 5992–6001.

Manoscritto ricevuto il 20/07/2025; accettato il 07/09/2025

PRELIM.