

TEMPESTE ESTREME NEI MARI ITALIANI E I LORO EFFETTI SULLE COSTE: TECNICHE DI PREVISIONE E ALLARME

EXTREME SEA STORMS IN THE ITALIAN SEAS AND THEIR ACTION ON THE COAST: FORECASTING AND WARNING TECHNIQUES

E. Pugliese Carratelli¹, F. Reale¹, F. Dentale¹, C. Giarrusso², C. Iuppa², A. Di Leo¹; E.Foti²

¹MEDUS - Maritime Engineering Division University of Salerno, ²Università di Catania DICAR

Extended abstract

The damage caused on the coast by extreme storms can be greatly reduced by an appropriate warning system, which is nowadays possible thanks to the widely diffused weather and sea state forecasting services. The task is however particularly challenging for enclosed or semi enclosed seas such as the Mediterranean, where the distances and therefore the warning times are much lower than in the Oceans. The objective of the paper is to evaluate the feasibility of a warning system aimed at forecasting coastal flooding damage; as a test case, the hurricane "Zorbas" has been considered, a storm that hit mainly the western and southern coasts of Sicily during the last few days of September 2018. Many coastal towns and dwellings were seriously damaged by the direct action of the waves as well as by the flooding associated with raising sea level.

A wide area analysis has been carried out by making use of ECMWF wave data, satellite altimeter wave and sea surface height, as well as of sea surface height from the only available tide gauge in the area. A classical set up equation has also been taken into account to derive the effect of shallow depth on the water height. Once the parameters have been estimated, the same calculations have been carried out with forecast – rather than analysis – data.

Results show that by correctly handling sea state forecasts together with tide gauge and satellite data, a timely warning is possible; there is however already ample room for improvement by adopting high resolution sea state forecast such as are nowadays available from many institutional and academic providers. The most important aspect, however, is the need for a reliable network of both wave height and sea level measuring devices.

SOMMARIO.

I danni causati dalle tempeste estreme sulle coste possono essere fortemente ridotti da un adeguato sistema di allarme, cosa oggi possibile grazie ai numerosi enti che producono previsioni del tempo e dello stato del mare. Realizzare tale compito è tuttavia difficile in un mare chiuso o semichiuso come il Mediterraneo, dove le distanze e quindi i tempi di preavviso sono molto minori che nell'oceano.

L'obiettivo di questo articolo è quello di valutare la fattibilità di un sistema di allarme per la previsione del danno costiero, ed in particolare di quello causato dall'allagamento. Come caso di studio è stato preso quello dell'uragano "Zorbas", una tempesta che ha colpito principalmente le coste orientali e meridionali della Sicilia negli ultimi giorni del settembre 2018. Molti centri abitati furono seriamente danneggiati, sia dall'azione delle onde, sia dagli allagamenti causati dall'innalzamento del livello dell'acqua.

E' stata quindi svolta un'analisi di area vasta utilizzando i dati di analisi del moto ondoso prodotti dall'ECMWF oltre che i dati di altezza d'acqua ricavati da altimetri satellitari e dall'unico mareografo in funzione nell'area. Per il calcolo del set-up, cioè dell'innalzamento dovuto ai bassi fondali è stata utilizzata un'equazione classica.

Stimati dunque i parametri al momento di picco dell'evento, sono state fatte le stesse elaborazioni con dati di previsione- invece che di analisi. I risultati mostrano che elaborando correttamente le previsioni insieme ai dati satellitari e di mareografi, è possibile produrre un allarme tempestivo; c'è comunque un'ampia possibilità di miglioramento impiegando previsioni ad alta risoluzione come sono ormai disponibili attraverso vari enti istituzionali ed accademici. L'aspetto più importante, in ogni caso, è la necessità di una rete affidabile di sistemi di misura, sia dell'altezza d'onda, sia del livello idrico.

1. Premessa e background

Le tecniche di previsione e di preallarme di eventi meteorologici sono prassi comune dei centri meteorologici di tutto il mondo e i benefici che esse apportano in termini di riduzione e contenimento dei danni sono incalcolabili. Anche abbastanza consolidati sono i sistemi di previsione degli eventi marini eccezionali negli oceani, in particolare quelli collegati agli uragani (National Hurricane Center, NOAA <https://www.nhc.noaa.gov/>).

Meno sviluppate sono invece le strutture di allarme e preallarme per i danni attesi sulle coste del Mar Mediterraneo. Esistono naturalmente, grazie soprattutto ai Servizi Meteorologici nazionali ed internazionali, adeguati sistemi di previsione dello stato del mare orientati prevalentemente alla sicurezza della navigazione; sono però rari i sistemi di previsione che includano gli effetti del moto ondoso sulle coste.

Ai fini dello studio del rischio costiero è utile il lavoro di Giarrusso *et al.* (1999) che suggerisce tecniche di valutazione del rischio su area vasta, e di Giarrusso *et al.* (2002) che fornisce in particolare un'analisi dell'altezza di run-up in funzione del tempo di ritorno. Wolf (2008) discute le cause fisiche degli allagamenti costieri con esempi relativi sia alla baia di Liverpool sia al mare Adriatico.

Horsburgh *et al.* (2008) analizzano l'utilità e l'accuratezza dei sistemi di allarme, in particolare per quanto riguarda lo storm surge; il loro lavoro è interessante per il tentativo di quantificare l'incertezza delle previsioni attraverso un sistema di previsioni di ensemble.

A proposito di misura ed analisi degli storm surge, anche se non della loro previsione, è importante considerare il progetto ESA eSurge (<http://www.storm-surge.info>) che ha operato dal 2011 al 2016 (Cotton *et al.* 2016) e che ha molto migliorato la comprensione e l'uso dei dati di altimetro satellitare per la misura delle altezze d'acqua.

Il lavoro di Byrne *et al.* (2017) si propone di migliorare le tecniche di previsione operativa degli uragani attraverso l'analisi dei campi di vento ottenute tramite il telerilevamento da satellite.

Bertotti *et al.* (2012) trattano l'evoluzione di una tempesta eccezionale nel Mediterraneo Occidentale e presentano i risultati dell'impiego delle previsioni a 24 ore di diversi modelli meteomarini operanti nell'area. Di Luccio *et al.* (2016, 2018a) forniscono un quadro esauriente e recente delle possibilità di previsione del rischio di allagamento delle coste, anche in connessione col modello meteorologico di zona del CCMMA (Campania Center for Marine and Atmospheric Monitoring and Modelling) dell'Università Parthenope. È interessante notare che il sistema è stato impiegato per alcuni mesi in maniera sperimentale per la prevenzione del rischio delle spiagge della città di Napoli. Il loro lavoro si basa principalmente sull'impiego di semplici modelli e formule empiriche per la valutazione del run-up (Di Luccio, 2018b).

Il presente lavoro descrive uno studio volto a valutare la prevedibilità degli effetti dannosi provocati sulle coste da tempeste estreme, prendendo come esempio un evento che si è verificato alla fine di settembre 2018 nel Mediterraneo Centrale e che ha provocato diversi allagamenti e danni in varie località della Sicilia orientale e meridionale. Questo evento ha avuto caratteristiche simili agli uragani tropicali ed è stato classificato dai meteorologi, seguendo una recente tendenza, come “Medicane”, ovvero “Mediterranean Hurricane”, e denominato “Zorbas”.

In particolare il lavoro intende studiare la possibilità di realizzare un sistema di preallarme che sia basato in parte sulle strutture ed i sistemi attualmente esistenti e di valutare l'utilità e le necessità di ulteriori sistemi di misura e di elaborazione che si potrebbero rendere disponibili su base regionale, nazionale o internazionale.

Poiché l'effetto degli allagamenti è stato particolarmente rilevante, è su questi ultimi che si è centrata l'analisi, piuttosto che sull'impatto diretto delle onde su strutture e litorali. Lo studio ha il carattere dell'analisi di area vasta, quindi prescinde dai dettagli morfologici e batimetrici delle singole località allagate, e si propone di verificare la possibilità di determinare delle soglie generali di allarme per interi tratti di costa. Il lavoro è quindi così articolato:

1. nella prima parte si descrive l'evento del 27-29 settembre 2018 dal punto di vista marino, considerando i dati pubblicamente disponibili;
2. in una seconda parte si ricostruisce, sulla base dei dati di analisi, l'innalzamento del livello del mare in corrispondenza della linea di costa a sud-est della Sicilia e lo si paragona con gli elementi disponibili riguardo agli allagamenti che si sono verificati in quelle zone;
3. nella terza parte si considerano i dati di previsione, quali erano disponibili nei giorni precedenti l'evento, e si ricostruisce il parametro di cui sopra nel modo in cui lo avrebbe potuto valutare un ipotetico previsore.
4. nelle conclusioni si esamina la possibilità di un sistema di allarme per la previsione e la prevenzione degli eventi meteomarinari eccezionali, valutando quali sviluppi e quali miglioramenti sono necessari per rendere operativa la procedura proposta.

1.1 L'evento Medicane Zorbas

Nei giorni dal 27 al 29 settembre 2018, si è sviluppato nel Mar Ionio un fenomeno meteorologico di particolare intensità, con le caratteristiche tipiche di un uragano. Questo tipo di fenomeni è da tempo riconosciuto ed indicato spesso in letteratura come Medicane (Mediterranean Hurricane); si veda ad esempio Tous *et al.* (2016).

Non manca la documentazione scientifica su altri episodi simili nell'area. Dal punto di vista atmosferico, ossia senza considerare lo stato del moto ondoso e le sue conseguenze, Pytharoulis (2018) descrive un ciclone di tipo tropicale che si sviluppò nelle acque siciliane attorno al 7 Novembre 2014. Più in generale, nell'ambito degli studi condotti da Cavicchia *et al.* (2014) e più recentemente da Nastos *et al.* (2018), sono state svolte alcune analisi sulla frequenza di accadimento di tali eventi e sui relativi danni causati lungo le coste del Mediterraneo. In particolare, dallo studio di Nastos *et al.* (2018) è emerso che la frequenza di tali eventi è pari a circa 1.3 per anno, e che essi si verificano prevalentemente nei mesi autunnali e invernali, con un picco nel mese di settembre.

Questo articolo non ha lo scopo di trattare gli aspetti meteorologici dell'episodio, d'altronde ben spiegati e discussi altrove (Magnusson, 2018); è però importante seguire e comprendere l'evoluzione del moto ondoso durante le ore precedenti gli allagamenti. La Figura 1 riporta, con dati ECMWF di analisi, le mappe del valore dell'altezza significativa, parametro statistico largamente utilizzato per indicare l'intensità di uno stato di mare. In particolare viene qui riportata HSt (altezza significativa totale), che è relativa a tutta l'agitazione, senza distinzione tra onde di vento e onde di swell.

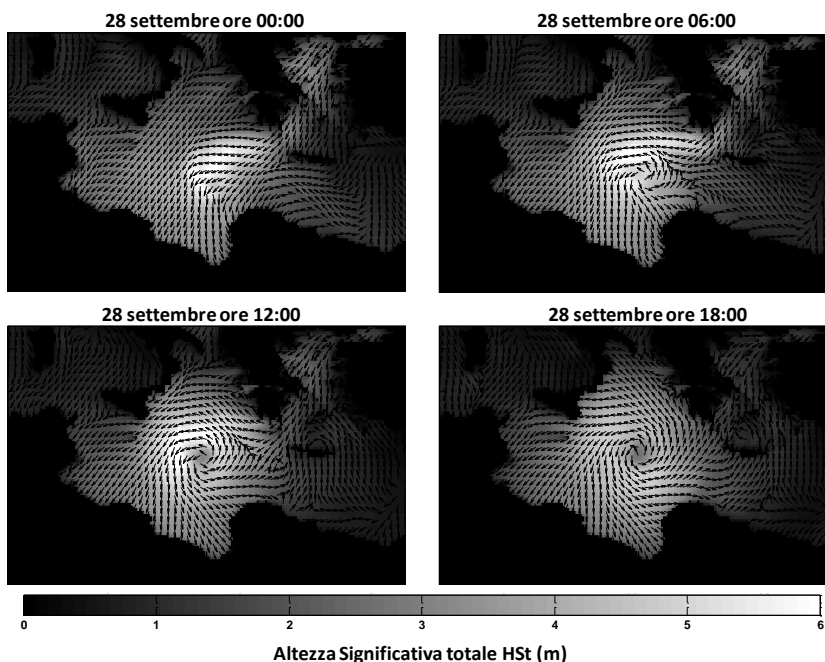


Fig. 1 – Evoluzione dello stato del mare (Altezza Significativa totale HSt) attorno alla Sicilia alle ore 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 del 28/09/2018 (ECMWF dati di analisi).

Fig. 1 – Sea state evolution (Total Significant Wave Height HSt) on Sicilian Seas at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 on the 28/09/2018 (ECMWF analysis data).

L'impatto maggiore della mareggiata sulla costa è avvenuto il giorno 28 settembre dalle 15:00 alle 20:00 circa, e attorno a quell'ora si sono verificati danni ed allagamenti anche di forte entità in varie località, come ad esempio a Catania, Acitrezza, Stazzo, Siracusa, Marzamemi, Portopalo di Capo Passero, Marina di Ragusa e Sampieri. Gli eventi sono ampiamente documentati anche sui media:

1. <https://www.lasicilia.it/news/cronaca/191529/il-primo-ciclone-nel-mediterraneo-si-contano-i-danni-lungo-la-costa-ionica-della-sicilia.html>;
2. <https://video.repubblica.it/edizione/palermo/uragano-medicane-a-ragusa-lidi-distrutti-lungomare-allagato/315506/316136> (Lungomare di Sampieri, RG);
3. https://catania.livesicilia.it/2018/09/29/grida-e-paura-video-choc-il-mare-travolge-le-barche_474681/ (Porto di Stazzo, CT);
4. <https://www.youtube.com/watch?v=74sgpUnqGsk> (Porto di Portopalo di Capo Passero, SR);
5. <https://www.youtube.com/watch?v=HyqzEr25vh4> (Porto di Acicastello, CT);
6. <https://www.youtube.com/watch?v=al65Dqaf3Rk> (Lungomare di Catania);
7. <http://www.meteoweb.eu/foto/maltempo-sicilia-sudorientale-devastata-dal-ciclone-jonico-terribili-immagini-da-marzamemi-foto-e-video/id/775630/#8>.

Oltre all'impatto delle onde su litorali e strutture, dalla documentazione disponibile appare evidente l'allagamento dovuto all'azione congiunta dello storm surge e del set up costiero.

La Figura 1 mostra chiaramente l'aumento di intensità del fenomeno col passar del tempo, e soprattutto il suo spostarsi verso le coste siciliane dove, tuttavia i valori di HSt non appaiono tali da spiegare completamente gli allagamenti che si sono verificati. Un'attenta analisi di tutti i dati disponibili permette però una più chiara interpretazione degli eventi.

2. Dati e ricostruzione degli eventi

In questa sezione viene descritta la ricostruzione degli eventi, sia per quel che riguarda il moto ondoso, sia per quel che riguarda i fenomeni di storm surge che spesso possono verificarsi in presenza di una forte area depressionaria come appunto nel caso considerato.

2.1 Il moto ondoso

Nella zona considerata (Sicilia e Italia Meridionale continentale) non era disponibile nessuno strumento di misura diretta del moto ondoso. Gli unici elementi su cui è possibile basarsi sono dunque i dati di analisi ed eventualmente di previsione provenienti dai modelli di formazione e propagazione del moto ondoso gestiti da servizi meteorologici nazionali e internazionali quali l'ECMWF, il NOAA etc., nonché da organizzazioni internazionali quali COPERNICUS. In particolare per questo lavoro sono stati impiegati i dati dell'ECMWF, sia di analisi (ad intervalli di 6 ore) sia di previsione (ad intervalli di un'ora). A tal proposito è bene precisare che per "dati di analisi" si intendono i risultati della catena modellistica meteorologica e marina corretti attraverso l'assimilazione di dati sperimentali che, nel caso del moto ondoso, sono essenzialmente le misure altimetriche satellitari. I dati di analisi sono dunque evidentemente disponibili solo dopo l'evento e servono ai fini della sua ricostruzione.

La Figura 2 illustra le zone di costa interessate, nonché i punti della griglia di calcolo ECMWF più vicini ad essa e che sono stati quindi considerati nell'analisi.

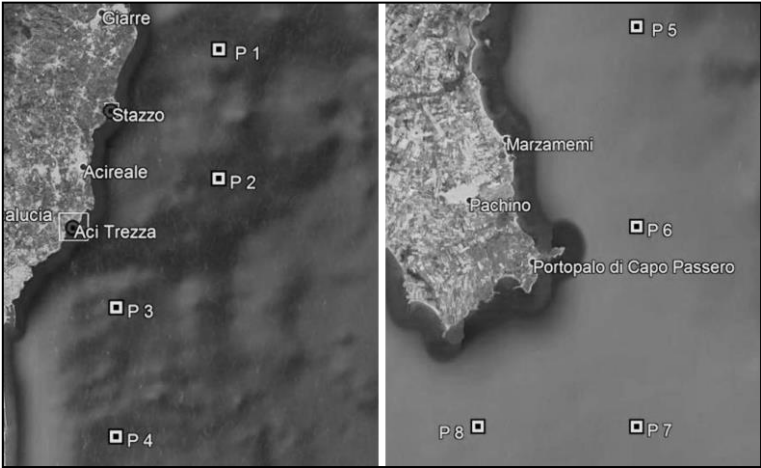


Fig. 2 – Punti di griglia ECMWF considerati nel calcolo e posizione di alcune località allagate.
Fig. 2 – ECMWF grid points and some location subject to flooding.

Le coordinate geografiche esatte dei punti sono invece indicate nella Tabella 1.

Tabella 1 – Esatta posizione dei punti griglia ECMWF considerati.
Table 1 – Exact ECMWF grid points location.

Punti	Latitudine (°N)	Longitudine (°E)
P 1	37° 42' 00"	15° 18' 00"
P 2	37° 36' 00"	15° 18' 00"
P 3	37° 30' 00"	15° 12' 00"
P 4	37° 24' 00"	15° 12' 00"
P 5	36° 48' 00"	15° 12' 00"
P 6	36° 42' 00"	15° 12' 00"
P 7	36° 36' 00"	15° 12' 00"
P 8	36° 36' 00"	15° 06' 00"

Un elemento importante per vari tipi di riscontri e controlli sono inoltre i rilievi degli altimetri satellitari che forniscono sia i valori di altezza significativa totale HSt che quelli dell'altezza d'acqua SSH. In particolare il 28 settembre, giorno in cui si sono avuti i danni maggiori, nell'area in esame si sono verificati i seguenti passaggi satellitari così come riportato in Figura 3.

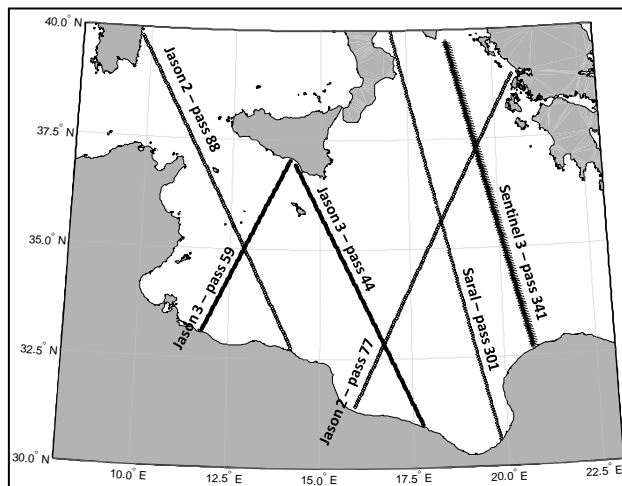


Fig. 3 – Passaggi satellitari disponibili nell’area di interesse il giorno 28/09/2018.

Fig. 3 – Available satellite altimeter tracks on 28/09/2018 in the area of interest.

La Tabella 2 riporta invece nel dettaglio le informazioni relative ai vari passaggi.

Tabella 2 – Informazioni relative ai dati altimetrici satellitari disponibili nell’area di interesse il 28 settembre 2018.

Table 2 – Available satellite altimeter tracks in the area of interest on 28 September 2018.

Satellite	Passaggio	Ciclo	Start Time	End Time	Start Lat.	End Lat.	Start Lon.	End Lon.
Jason-2	77	607	13:58:54	14:01:35	31.41075	38.95043	15.95844	20.55561
Jason-2	88	607	23:50:22	23:52:03	37.50778	32.75714	11.32176	14.20465
Saral	301	123	04:18:40	04:21:26	30.60379	40.3724	19.82311	16.90335
Jason-3	44	97	00:39:55	00:42:00	36.88812	31.04373	14.30923	17.72867
Jason-3	59	97	15:07:20	15:08:44	33.14824	37.0273	11.77451	14.12161
Sentinel-3	341	36	20:14:36	20:16:37	32.70791	39.79365	20.79867	18.63377

È particolarmente rilevante il passaggio 59 del satellite Jason-3, (Figura 4), che è il più vicino sia in senso spaziale che temporale alle zone costiere colpite dall’ evento.

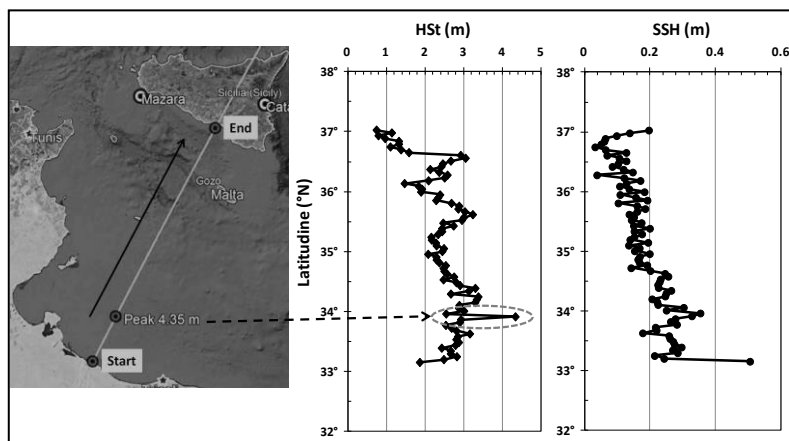


Fig. 4 – Valori di Altezza Significativa totale(HSt) e di altezza d’acqua (SSH) misurati dall’altimetro del satellite Jason-3 (passaggio 59, Ciclo 97) il giorno 28 settembre 2018 dalle ore 15:07:20 alle ore 15:08:44.

Fig. 4 – Total Significant Wave Height (HSt) and Sea Surface Height (SSH) values measured by altimeter onboard Jason-3 satellite (track 59, Cycle 97) on 28 September 2018 from 15:07:20 to 15:08:44.

Un importante elemento di cui tener conto per la comprensione delle azioni sulle coste è la composizione spettrale del campo di moto ondoso, elemento che non appare dal semplice dato dell'HSt. Tra i dati forniti dall'archivio ECMWF sono anche presenti separatamente i valori dell'altezza significativa della parte di spettro relativa all'onda generata dal vento (nel seguito HSw) e dell'altezza dello swell (HSs) con i rispettivi periodi medi Tsm e Twm, così come descritto nel capitolo 10.3 della documentazione ECMWF Integrated Forecasting System (IFS) disponibile al seguente link: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/18717-part-vii-ecmwf-wave-model>.

Nelle Figure 5 e 6 appare evidente la presenza di una sistema di onde lunghe che, sebbene di altezza non eccessiva, contribuisce all'effetto di set up di cui si dirà nel seguito.

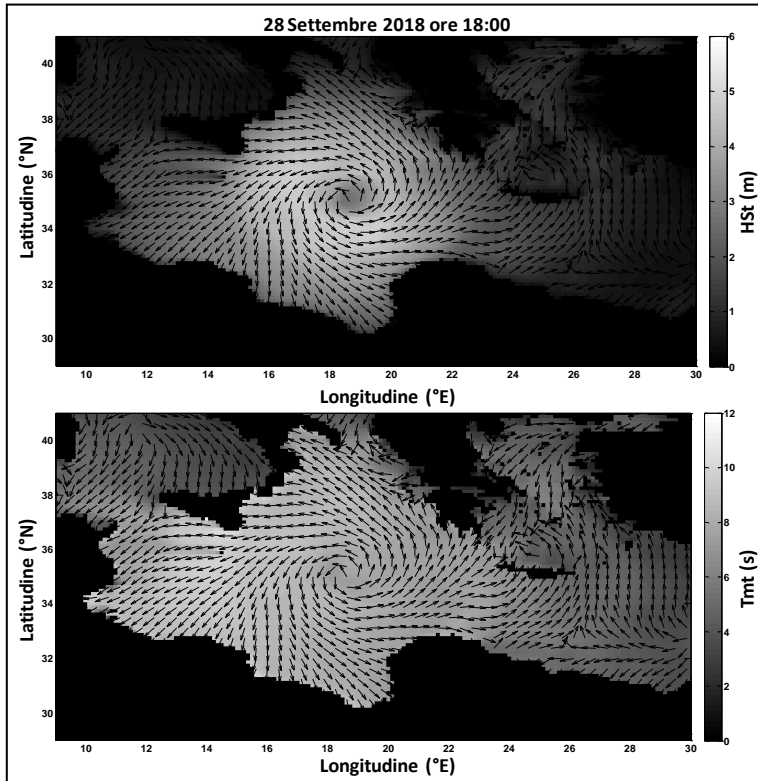


Fig. 5 – Stato dei mari attorno alla Sicilia alle ore 18:00 del 28/09/2018 secondo i dati di analisi dell'ECMWF: altezza significativa totale HSt (in alto) e periodo medio totale Tmt (in basso). I vettori indicano la direzione media delle onde.

Fig. 5 – Sea state on Sicilian Seas at 18:00 on 28 September 2018 from ECMWF analysis data: significant total wave height HSt (top) and total average period Tmt (bottom). Black arrows indicate mean wave direction.

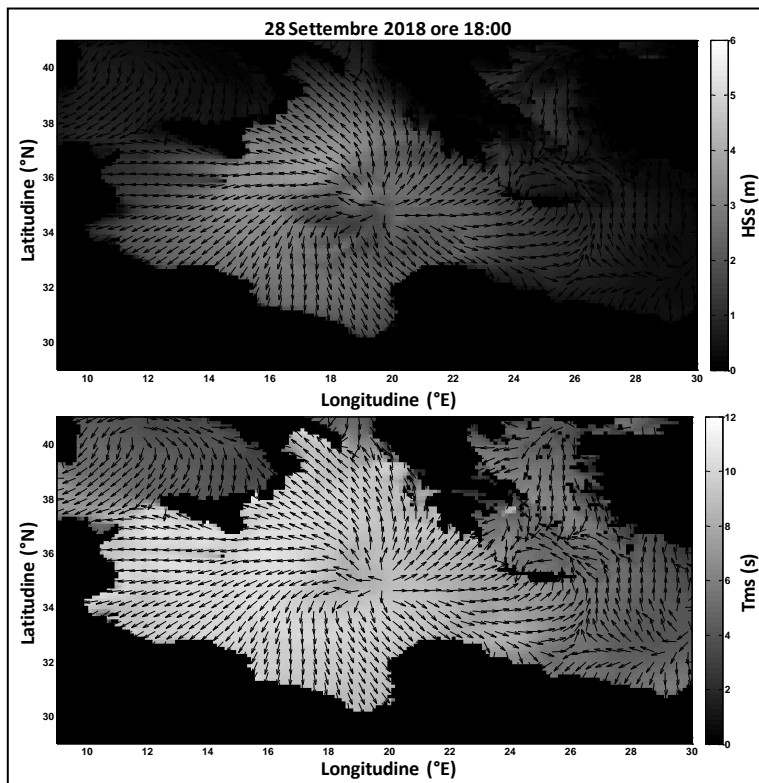


Fig. 6 – Stato dei mari attorno alla Sicilia alle ore 18:00 del 28/09/2018 secondo i dati di analisi dell’ECMWF: altezza significativa del solo swell H_s (in alto) e periodo medio del solo swell T_{ms} (in basso). I vettori indicano la direzione media delle onde di swell.

Fig. 6 – Sea state on Sicilian Seas at 18:00 on 28 September 2018 from ECMWF analysis data: significant height of total swell H_s (top) and mean period of total swell T_{ms} (bottom). Black arrows indicate mean direction of total swell.

2.2 Lo Storm Surge

Un elemento molto importante ai fini della valutazione dei danni di allagamento ed alla loro previsione, è lo “storm surge”, cioè l’innalzamento del livello dell’acqua (SSH, nel seguito δ_{surge}) al largo a causa di condizioni meteo avverse. Con questo termine non viene incluso il “set-up”, che è invece l’innalzamento dovuto all’interazione delle onde con la batimetria (nel seguito δ_{setup}).

Un indicatore dello storm surge è dato dalla lettura dei mareografi che, se localizzati in una zona calma e profonda quale un porto, non risentono del set-up. Nel caso specifico l’unico dato disponibile per il versante Sud-Est dell’isola è quello proveniente dal mareografo situato a Portopalo di Capo Passero. Il mareografo ISPRA di Porto Empedocle è infatti troppo lontano dalla zona di interesse, mentre quello di Catania non ha acquisito dati durante l’evento. Il mareografo di Portopalo di Capo Passero è gestito dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e i dati rilevati sono disponibili sul sito della Intergovernmental Oceanographic Commission dell’ UNESCO (IOC-UNESCO): <http://ioc-sealevelmonitoring.org>.

Un ulteriore importante elemento è il valore di SSH misurato dall’altimetro satellitare di Jason-3 durante il già citato passaggio 59. La Figura 7 riporta i dati di entrambe le fonti. Per consentire il confronto entrambi i dati sono stati riferiti al loro valore medio calcolato su tutta la durata delle rispettive registrazioni, denominato nel seguito “anomalia”¹.

¹Col termine “anomalia”, in questo caso intendiamo la semplice differenza tra valore misurato ed il valor medio generale. Nel caso delle misure satellitari pubblicate, l’anomalia comprende tutta una serie di correzioni tra cui anche una correzione di marea.

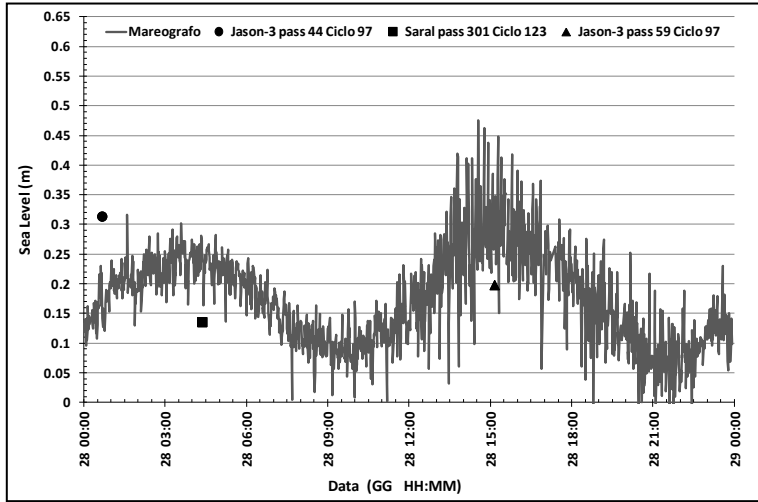


Fig.7 – Curva continua: altezza d’acqua misurata al mareografo di Capo Passero (anomalia sulla media) –Marcatori: altezza d’acqua misurata da altimetri satellitari (anomalia grezza).

Fig. 7 – Curve: Water height as measured at the Portopalo Tide Gauge. Markers: water height measured by satellite altimeters (raw anomaly).

Il dato satellitare in vicinanza del massimo dell’evento (approssimativamente le ore 18 del 28 settembre) è minore di quello del mareografo ($\delta_{\text{surge}} = 0.30$ m), ma la differenza è in parte spiegabile considerando la distanza tra i rispettivi punti di rilievo. Va peraltro notata la presenza di oscillazioni nel valore del mareografo registrato e campionato ad intervalli di un minuto, il che potrebbe far pensare ad oscillazioni indotte dal moto ondoso nel porto dove è situato lo strumento.

2.3 Il set-up

Il calcolo del set up è un problema ben noto e facilmente risolvibile integrando l’equazione (1):

$$\frac{D\bar{\eta}}{Dx} = \frac{1}{\gamma h} \frac{DS_{xx}}{Dx} \quad (1)$$

dove η è l’altezza d’acqua, h è la profondità e S_{xx} è la componente del radiation stress lungo la normale x alla costa.

L’equazione (1), in cui non compare la pendenza del fondo, è valida solo per pendenze relativamente piccole, e per rotture di tipo “spilling”, che sono peraltro proprio quelle che possono provocare il fenomeno. I parametri dell’onda lungo la sua trasformazione si calcolano con gli ordinari metodi della teoria lineare di Airy (Smith, 2003). La Figura 8 riporta alcuni esempi di integrazione numerica.

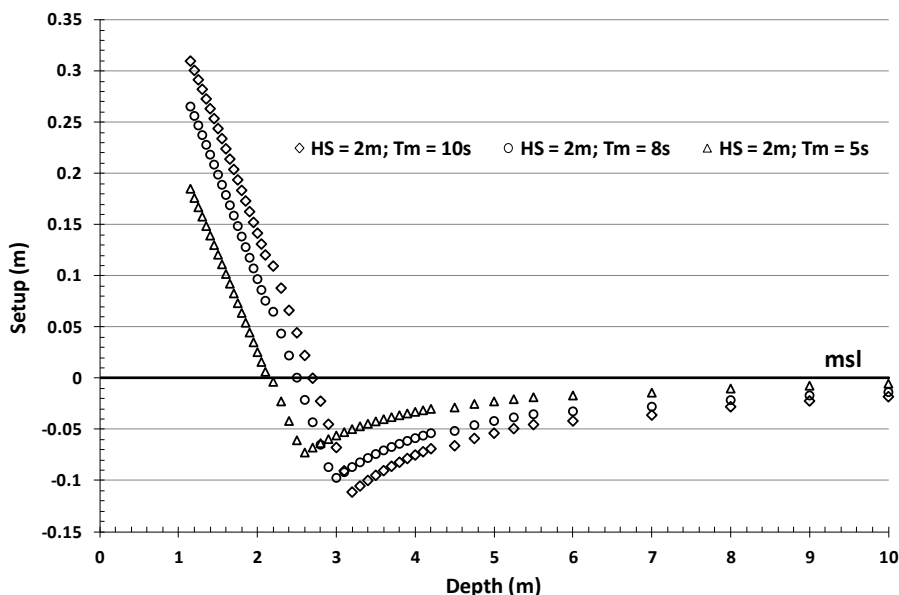


Fig. 8 – Set up per un'onda monocromatica in funzione della profondità.

Fig. 8 – Set up for a monochromatic wave as a function of the depth.

Una valutazione accurata del set-up nelle varie situazioni in esame richiederà uno studio locale della batimetria e della topografia caso per caso. In questo studio, che è di carattere generale e parametrico, assumiamo per δ_{setup} il valore di η ottenuto integrando numericamente l'equazione (1) per una profondità di 1.5 m, e per i valori di HSt e Tmt forniti dai dati di analisi dell'ECMWF per le ore 18:00 del 28 settembre relativamente al punto 6 della griglia di calcolo riportata in Figura 2 (si veda anche la Tabella 1). Tali valori sono rispettivamente di 3.3 m (HSt) e 7.26 s (Tmt), sulla cui base l'equazione (1) fornisce un $\delta_{\text{setup}} = 0.41$ m.

2.3 Valutazione complessiva dell'altezza d'acqua

Aggiungendo quindi il valore dell'altezza d'acqua al largo δ_{surge} a quello del set up δ_{setup} calcolato in precedenza, si ottiene la seguente stima del valore del parametro "altezza d'acqua sulla linea di costa" ($\delta_{\text{tot}} = \delta_{\text{surge}} + \delta_{\text{setup}}$) valutato durante l'evento che risulta dunque di circa 0.70 m.

3. Possibilità di previsione

Avendo esaminato il meccanismo principale di allagamento, è interessante adesso verificare la possibilità di previsione di un evento di questo tipo da parte di un'organizzazione che avesse avuto a disposizione gli strumenti già attualmente esistenti.

Nella Figura 9, ad esempio, sono mostrati gli andamenti del valore di HSt previsti per il giorno 28 settembre per i punti di cui alla Figura 2 rispettivamente dal run delle ore 00:00 del giorno 27 settembre (in alto) e dal run delle ore 00:00 dello stesso giorno 28 (in basso), i dati di previsione sono disponibili ad intervalli di un'ora.

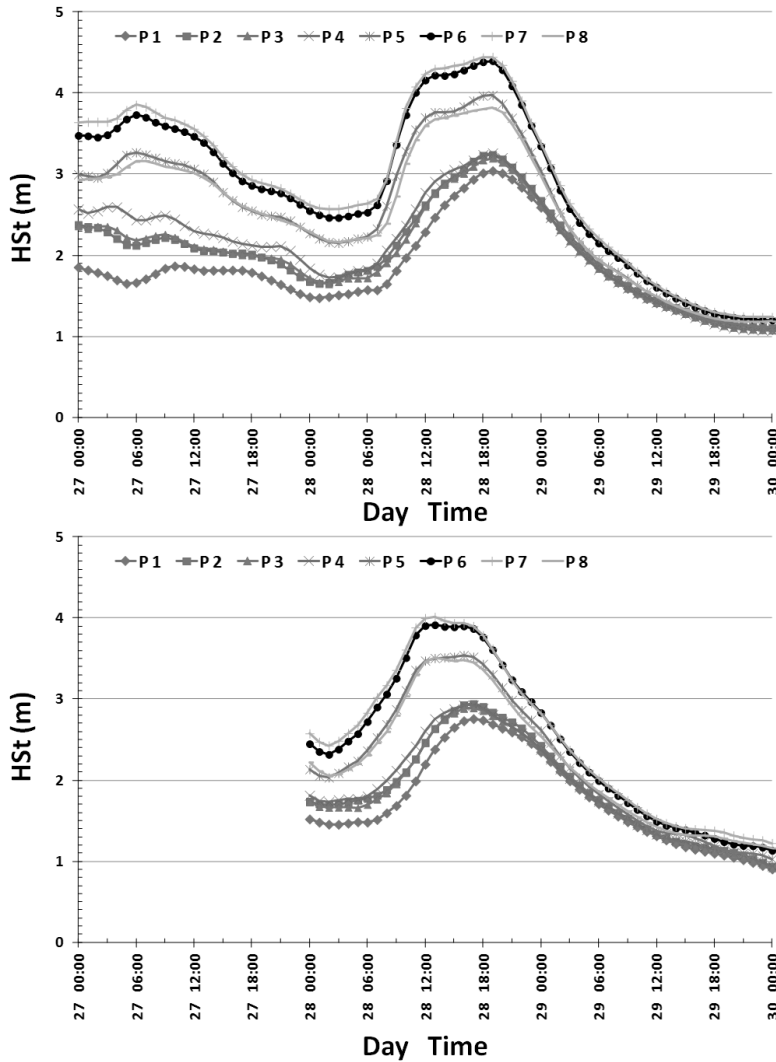


Fig.9 – HSt previsto per i punti della griglia ECMWF considerati (si veda Figura 2 e Tabella 1) per il giorno 28 settembre 2018: (in alto) run delle ore 00:00 del 27 settembre 2018; (in basso) run delle ore 00:00 del 28 settembre 2018.

Fig. 9 – HSt ECMWF forecast at considered grid point location (see Figure 2 and Table 1) on 28 September 2018: (top) run at 00:00 on 27 September 2018; (bottom) run at 00:00 on 28 September 2018.

Utilizzando pertanto i dati di previsione (HSt e Tmt) dei due runs giornalieri (alle ore 00:00 ed alle ore 12:00) a partire dal giorno 25 settembre 2018 si sarebbe potuta fare una previsione del valore del parametro δ_{setup} dell'altezza d'acqua per le ore 18 del 28 settembre. I risultati di tale previsione, relativi sempre al punto 6 di Figura 2, sono riportati nella seguente Tabella 3. Nell'ultima riga della stessa Tabella 3 viene anche indicato il valore del δ_{setup} già calcolato in precedenza, ovvero quello che si ottiene utilizzando i dati di analisi relativi proprio alle ore 18:00 del 28 settembre.

Tabella 3 – Valori di setup (δ_{setup}) previsti per le ore 18:00 del 28 settembre 2018 per il punto 6 della griglia ECMWF (si veda Figura 2) usando i dati di previsione ECMWF a partire dalle ore 00:00 del 25 settembre 2018.

Table 3 – Setup forecast values (δ_{setup}) for point 6 of ECMWF grid (see Figure 2) at 18:00 of 28 September 2018 by using available ECMWF forecast data from 25 September 2018 at 00:00.

Data run	Ora run	Tipo dati	Data previsione	Ora previsione	HSt (m)	Tmt (s)	δ_{setup}
25/09/2018	00:00	Prev.	28/09/2018	18:00	2.41	7.17	0.25
25/09/2018	12:00	Prev.	28/09/2018	18:00	2.97	8.59	0.40
26/09/2018	00:00	Prev.	28/09/2018	18:00	3.34	7.47	0.42
26/09/2018	12:00	Prev.	28/09/2018	18:00	2.95	8.94	0.40
27/09/2018	00:00	Prev.	28/09/2018	18:00	2.86	8.56	0.38
27/09/2018	12:00	Prev.	28/09/2018	18:00	3.62	8.90	0.52
28/09/2019	00:00	Prev.	28/09/2018	18:00	3.76	9.06	0.55
28/09/2019	12:00	Prev.	28/09/2018	18:00	3.46	9.04	0.50
28/09/2019	18:00	Anal.	-	-	3.33	7.26	0.41

4. Conclusioni

Già con i dati disponibili è possibile una previsione, sia pure di larga massima, dei valori di innalzamento idrico e quindi del rischio di allagamento. Naturalmente questa previsione è soggetta agli inevitabili errori della catena modellistica e principalmente quindi all'incertezza meteorologica.

Tra gli strumenti necessari ad un sistema di preallarme c'è innanzitutto l'accesso a più di un sistema di previsione dello stato del mare: non pare infatti utile prevedere lo sviluppo di una catena modellistica ad hoc, vista la disponibilità di numerosi sistemi di origine accademica o istituzionale: prima di tutti il sistema Nettuno dell'Aeronautica militare (Pezzutto *et al.*, 2016) ma anche quelli – ad esempio – dell'Università Parthenope (Di Luccio *et al.*, 2016), o dell'Università di Genova (Mentaschi *et al.*, 2015, Sartini *et al.*, 2015, 2016).

E' invece certamente necessario lo sviluppo di un sistema di generazione e di propagazione del moto ondoso che sia annidato (nested) alle griglie dei modelli di largo esistenti e che consenta di calcolare la trasformazione fino alla costa e di stimare con maggiore esattezza i valori del set-up. Quest'ultima parte è particolarmente onerosa perché richiede un'attenta messa a punto e calibrazione sui dati reali.

Per quello che riguarda la modellistica dello storm surge, la scelta è minore: occorrerà quindi verificare l'accessibilità in tempo reale o quasi reale dei dati di mareografo e, qualora fossero disponibili, dei dati di previsione di un modello di circolazione.

L'aspetto che comunque emerge con la massima chiarezza è l'assoluta necessità di dati sperimentali, sia dei valori di altezza d'acqua, sia del moto ondoso. Le misure satellitari – certamente un utile riscontro – sono troppo rade nel tempo per essere utilizzate come strumento di analisi in tempo reale: è dunque necessaria la realizzazione di una rete credibile ed efficiente di mareografi e soprattutto di ondametri, sia convenzionali (boe, pali) sia radar.

Bibliografia

- Bertotti L., Bidlot J.-R., Bunney C., Cavaleri L., DelliPasseri L., Gomez M., Lefèvre J.-M., Paccagnella T., Torrisi L., Valentini A., Vocino A. (2012). Performance of different forecast systems in an exceptional storm in the Western Mediterranean Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 138 (662): 34-55.
- Byrne D., Horsburgh K., Zachry B., Cipollini P. (2017). Using remotely sensed data to modify wind forcing in operational storm surge forecasting. *Natural Hazards* 89 (1): 275-293.
- Cavicchia L., von Storch H., Gualdi S. (2014). A long-term climatology of medicanes. *Climate dynamics* 43(5-6): 1183-1195.
- Cotton P.D., Andersen O., Stenseng L., Boy F., Cancet M., Cipollini P., Gommenginger C., Dinardo S., Egido A., Fernandes M.J., Garcia P.N., Moreau T., Naeije M., Scharroo R., Lucas B., Benveniste J. (2016). Improved oceanographic measurements from SAR altimetry: Results and scientific roadmap

from ESA cryosat plus for oceans project (2016). *Proc., Int. Symp. on Living Planet 2016*, ESA SP-740, Praga, Repubblica Ceca, 9-13 maggio 2016.

Di Luccio D., Mucerino L., Benassai G., Budillon G., Montella R., Pugliese Carratelli E., Reale F., Dentale F. (2016). Operational modeling issues in extreme weather coastal flooding. *Proc., 8th Int. Workshop on Modeling the Ocean (IWMO)*, Bologna, Italia, 10 June 2016.

Di Luccio D., Benassai G., Di Paola G., Roskopf C.M., Mucerino L., Montella R., Contestabile, P. (2018a). Monitoring and Modelling Coastal Vulnerability and Mitigation Proposal for an Archaeological Site (Kaulonia, Southern Italy). *Sustainability* 10 (6).

Di Luccio D., Benassai G., Budillon G., Mucerino L., Montella R., Pugliese Carratelli E. (2018b). Wave run-up prediction and observation in a micro-tidal beach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18 (11): 2841-2857.

Magnusson L. (2018) 201809 - Rainfall - Zorba < <https://confluence.ecmwf.int/display/FCST/201809+-+Rainfall+-+Zorbas>> (Mar 30, 2019).

Giarrusso C.C., Pugliese Carratelli E., Spulsi G. (1999). Assessment Methods for Sea-Related Hazards in Coastal Areas. *Natural Hazards* 20 (2-3): 295-309.

Giarrusso C.C., Pugliese Carratelli E., Spulsi G. (2002). Large Scale Coastal Storm Hazard Mapping. *Proc., Int. Symp. on Solution to Coastal Disasters '02*, ASCE, Reston, VA, 108-117.

Horsburgh K.J., Williams J.A., Flowerdew J., Mylne K. (2008). Aspects of operational forecast model skill during an extreme storm surge event. *Journal of Flood Risk Management* 1(2008): 213 - 221.

Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling* 90: 82-94.

Nastos P.T., Papadimou K.K., & Matsangouras I.T. (2018). Mediterranean tropical-like cyclones: Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic patterns. *Atmospheric Research* 208: 156-166.

Pezzutto P., Saulter A., Cavaleri L., Bunney C., Marcucci F., Torrisi L., Sebastianelli S. (2016). Performance comparison of meso-scale ensemble wave forecasting systems for Mediterranean sea states. *Ocean Modelling* 104: 171-186.

Pytharoulis I. (2018). Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface temperatures. *Atmospheric Research* 208: 167-179.

Sartini L., Mentaschi L., Besio G. (2015). Comparing different extreme wave analysis models for wave climate assessment along the Italian coast. *Coastal Engineering* 2015 100: 37-47.

Sartini L., Besio G., Dentale F., Reale F. (2016). Wave Hindcast Resolution Reliability for Extreme Analysis. *Proc., 26th Int. Ocean and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Cupertino, CA, USA.

Smith J.M. (2003). Surf Zone Hydrodynamics. Chapter 4 Part II of US Coastal Manual Engineering, <http://www.a-jacks.com/Coastal/GeneralInfo/CEM/PartII_CoastalHydrodynamics/II-4_Surf_Zone_Hydrodynamics.pdf> (Mar. 30, 2019).

Tous M., Zappa G., Romero R., Shaffrey L., Vidale, P.L. (2016). Projected changes in medicanes in the HadGEM3 N512 high-resolution global climate model. *Climate Dynamics* 47 (5-6): 1913-1924.

Wolf J. (2008). Coupled wave and surge modelling and implications for coastal flooding. *Advances in Geosciences* 17: 19-22.