

CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE SU PROCESSI MORFODINAMICI CAUSATI SULLA COSTA IONICA SALENTINA DA RECENTI TEMPESTE

Marco Delle Rose¹, Luca Ciricugno¹, Corrado Fidelibus², Paolo Martano¹,
Luca Marzo³, Luca Orlanducci⁴

¹Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Lecce

²Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento, Lecce

³Pilota APR, Studio 4L, Racale (Lecce)

⁴Libero Professionista, Lecce - Iscritto ORG Puglia, n. 544

RIASSUNTO

In questa nota si espongono dati relativi a casi di spostamento di blocchi avvenuti in cinque località della costa ionica del Salento nel corso di tempeste tra il 2015 e il 2019. Oltre a massi rocciosi (Torre Sant'Isidoro e Torre Suda; processi morfodinamici in senso stretto), sono stati interessati dal fenomeno anche blocchi di barriere frangiflutti (Gallipoli) e muretti del lungomare (Porto Cesareo e Santa Caterina). Le altezze delle onde impattanti la costa sono state stimate mediante varie equazioni idrodinamiche. I risultati degli studi osservazionali condotti nel Salento, al pari di quelli ottenuti in altre regioni del Mediterraneo, aprono nuove prospettive per la ricerca geomorfologica e per la valutazione dei rischi meteorologici.

INTRODUZIONE

I dati relativi a spostamenti di blocchi di rocce o manufatti avvenuti durante episodi di tempesta sono utili per la stima dell'impatto delle onde sulle coste e, più in generale, per lo studio dell'evoluzione geomorfologica (Hansom *et al.*, 2015; Biolchi *et al.*, 2019a). Negli ultimi cinque anni, almeno tre burrasche hanno causato fenomeni di questo tipo nelle seguenti località della costa ionica salentina: Porto Cesareo, Torre Sant'Isidoro, Santa Caterina, Gallipoli e Torre Suda (Fig. 1). L'individuazione degli spostamenti dei blocchi è un'attività complessa. Il monitoraggio geomorfologico è il sistema più affidabile ma si può eseguire, per ragioni organizzative e gestionali, solo lungo tratti di costa di lunghezza limitata. Diversi sono i metodi osservazionali utilizzati: riprese fotografiche di transetti prestabiliti, rilievi aerofotogrammetrici da drone, riprese con videocamere di sorveglianza, identificazione a radiofrequenza (Delle Rose *et al.*, 2020; Hastewell *et al.*, 2020; Scicchitano *et al.*, 2020). Al di fuori delle attività condotte sistematicamente, la conoscenza di casi di spostamento è spesso legata al reperimento di fonti cronachistiche più o meno attendibili, se non alla casualità di occasionali segnalazioni.

Nell'una e nell'altra situazione, un dato fondamentale esperibile tramite rilievi in situ è la posizione iniziale dei blocchi. Essa, nel caso di massi staccati dal substrato roccioso (processo morfodinamico *stricto sensu*), si identifica con una nicchia di distacco che, nella letteratura internazionale, si indica come *socket* (Knight e Burningham,

2011). La disponibilità di immagini aeree o satellitari ad alta definizione è di particolare utilità in queste indagini, specie per stabilire termini *post quem* degli spostamenti (Causon Deguara e Gauci, 2017).

Allo scopo di illustrare il tipo di risultati conseguibili da monitoraggi e le relative interpretazioni, di seguito si riportano sommariamente le caratteristiche meteorologiche delle tre burrasche summenzionate (fine gennaio 2015; fine ottobre 2018; metà novembre 2019) e dati e osservazioni raccolti nelle località sopracitate. Infine si espongono alcune considerazioni geologiche che scaturiscono da questi dati.

TEMPESTE E SPOSTAMENTI DI BLOCCHI

Nel Mar Mediterraneo le tempeste di moderata intensità hanno prevalso nella seconda metà del XX° secolo. Ciò ha indotto a ritenere costantemente *moderata* la sua tempestosità, "postulato" che prescinde però dagli effetti dei cambiamenti climatici e manca di prospettiva geologi-

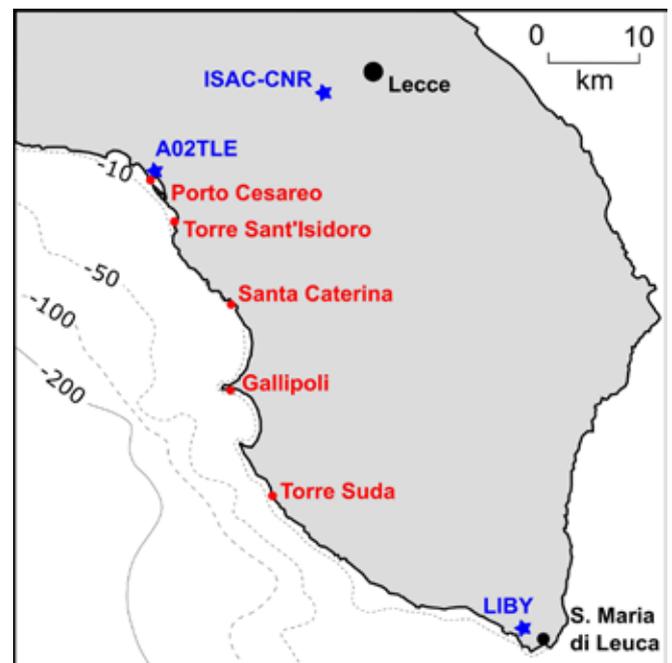


Figura 1 – Località interessate a fenomeni di spostamento di blocchi durante tempeste avvenute tra il 2015 e il 2019. Sono riportate le stazioni meteo i cui dati sono trattati nel testo e le isobate del fondale ionico.

ca (Kaniewski *et al.*, 2016). L'attività eolica nel Mediterraneo ha mostrato comunque una tendenza all'aumento delle intensità medie già dalla metà degli anni '70 (Maheras *et al.*, 2001; Pirazzoli e Tomasin, 2003) ma è con il sempre più frequente manifestarsi dei medicane (ciclone con caratteristiche di tipo tropicale) che la validità del postulato risulta compromessa. Peraltro, proprio la costa ionica del Salento è stata colpita, nel settembre 2006, da uno dei primi medicane analizzati in dettaglio (Moscatello *et al.*, 2008) e che ha provocato considerevoli effetti al suolo per venti forti e precipitazioni intense (De Vitis, 2019). In occasione di tale tempesta, si è registrata una pressione minima al livello del mare di 986 hPa, la più bassa durante eventi simili in tutta l'area mediterranea (Fita *et al.*, 2007). Si tenga presente che la costa in parola ha un *fetch* geografico di oltre 800 km in direzione delle coste libiche ed è, quindi, esposta a onde di alta energia con forti venti dai quadranti meridionali. Altre forti tempeste si sono abbattute sulle coste del Mediterraneo negli ultimi anni (Amores *et al.*, 2020; Ferrarin *et al.*, 2020). I crescenti rischi dovuti ad eventi di burrasca sono confermati dalle misurazioni della stazione di S. Maria di Leuca del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (Codice ICAO: LIBY; v. Fig. 1 per l'ubicazione). Il numero di giorni di tempesta è infatti aumentato negli ultimi quattro anni, mentre nello stesso periodo è cresciuta an-

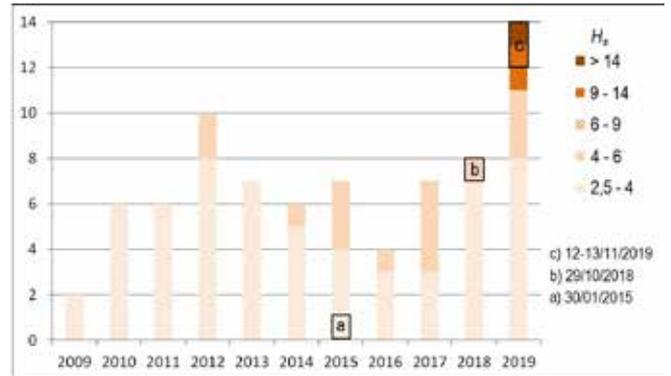


Figura 2 – Numero di giorni di tempesta tra il 2009 e il 2019 in base alle misure della Stazione di S. Maria di Leuca (LIBY). La soglia minima considerata ha una durata di almeno 6 ore e onda significativa H_s stimata maggiore di 2,5 m. Immagine elaborata dai dati scaricati dal sito OGIMET (<https://www.ogimet.com/index.phtml>).

che l'energia degli eventi estremi (Fig. 2).

Venendo alla sinossi della prima tempesta qui considerata, nell'ultima settimana di gennaio 2015 una profonda depressione in alta troposfera, situata tra l'Europa centrale e la Penisola Scandinava, spingeva le sue propaggini meridionali sull'Italia (Fig. 3A). Il giorno 30 la pressione al suolo sul Golfo di Venezia si è ridotta a circa 970 hPa, generando così un profondo ciclone in superficie.

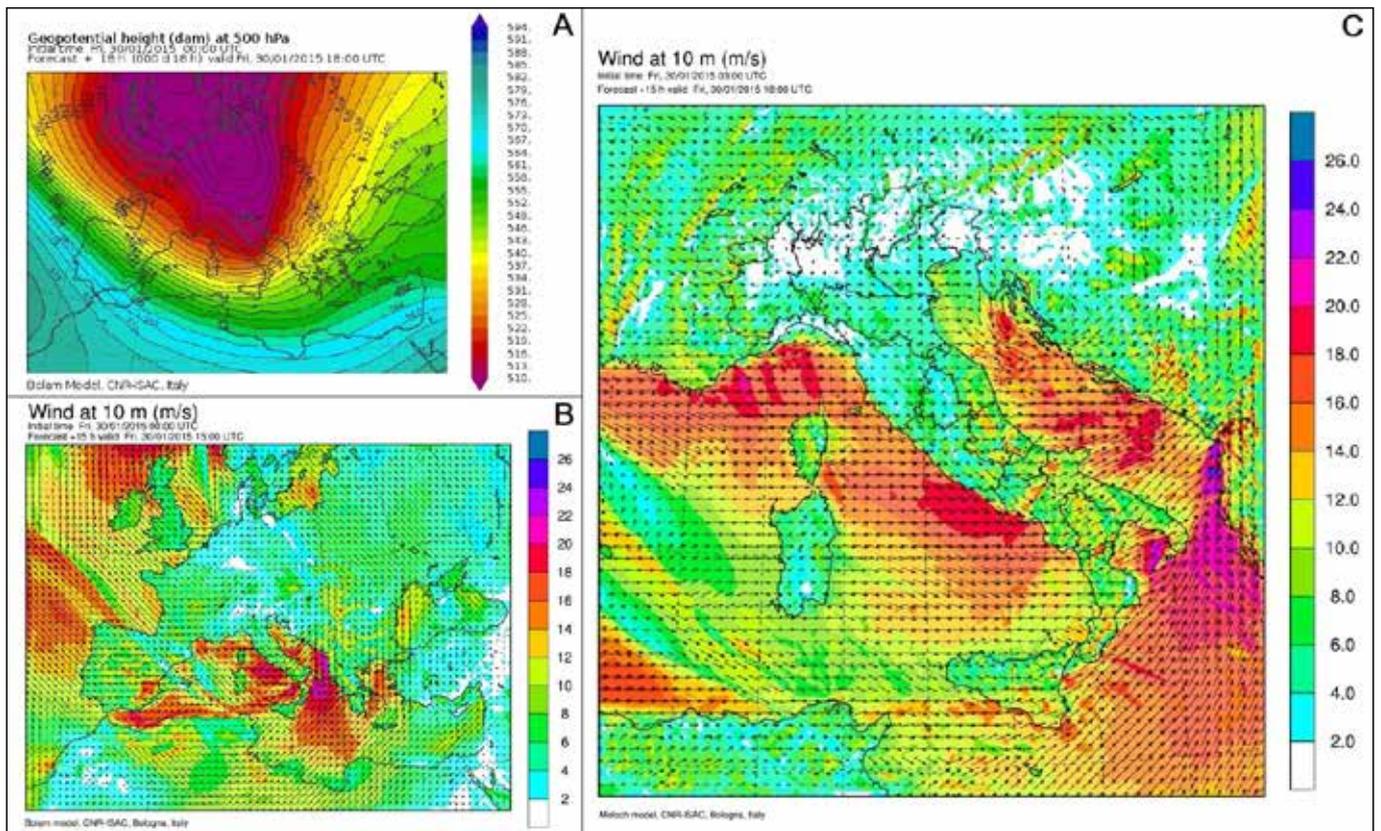


Figura 3 – A) altezza geopotenziale a 500 hPa dal modello BOLAM per il 30/01/2015 alle ore 18 UTC, che mostra la struttura della depressione in media troposfera; B) campo di vento a 10 metri sulla superficie dal modello BOLAM per il giorno 30/01/2015 alle ore 15 UTC; C) campo di vento a 10 m sulla superficie dal modello MOLOCH per il giorno 30/01/2015 alle ore 18 UTC: si noti la rotazione del vento rispetto alla costa salentina con riduzione del *fetch*.

Tale depressione ha innescato al largo delle coste ioniche salentine forti venti occidentali (Fig. 3B); 20 m/s (a 10 m sul livello del mare) sono stati misurati dall'anemometro A02TLE della Protezione Civile regionale (vedi Fig. 1 per la sua ubicazione). La stazione LIBY di S. Maria di Leuca ha misurato un picco di velocità del vento di 26 m/s alle 2:00 p.m., valutando lo stato del mare "agitato" con altezza significativa H_s delle onde in mare aperto stimata nell'intervallo 2,5 – 4 m. La stazione micrometeorologica dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISAC-CNR) situata nell'entroterra salentino (Fig. 1) ha misurato invece venti non superiori a 9 m/s.

Sul Golfo di Taranto la direzione del vento ha virato da sud-ovest a nord-ovest nel corso della notte, riducendo così il *fetch* geografico (150 km circa) e quindi l'al-

tezza delle onde di burrasca (Fig. 3C). La pioggia cumulata al suolo è stata di modesta entità; in base al modello MOLOCH (<http://www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/moloch/>), le precipitazioni sul Salento nei giorni 30 e 31 sono state mediamente di 20-30 mm.

Durante questa tempesta una lunga porzione del muretto del lungomare di Santa Caterina (Nardò) è stata divelta dalle onde e traslata in più punti (Fig. 4). Alcune imbarcazioni sono affondate e il porticciolo è stato coperto da detriti di vario tipo. Brevi filmati amatoriali che documentano l'accaduto sono presenti su Youtube (vedi Appendice). Nel corso di rilievi effettuati sulla adiacente piattaforma costiera, costituita da litotipi attribuiti alla Pietra Leccese (Bossio *et al.*, 1992), è stata osservata la presenza di massi anche di grosse dimensioni, nonché di un *socket* in corrispondenza del ciglio di falesia. Le impli-

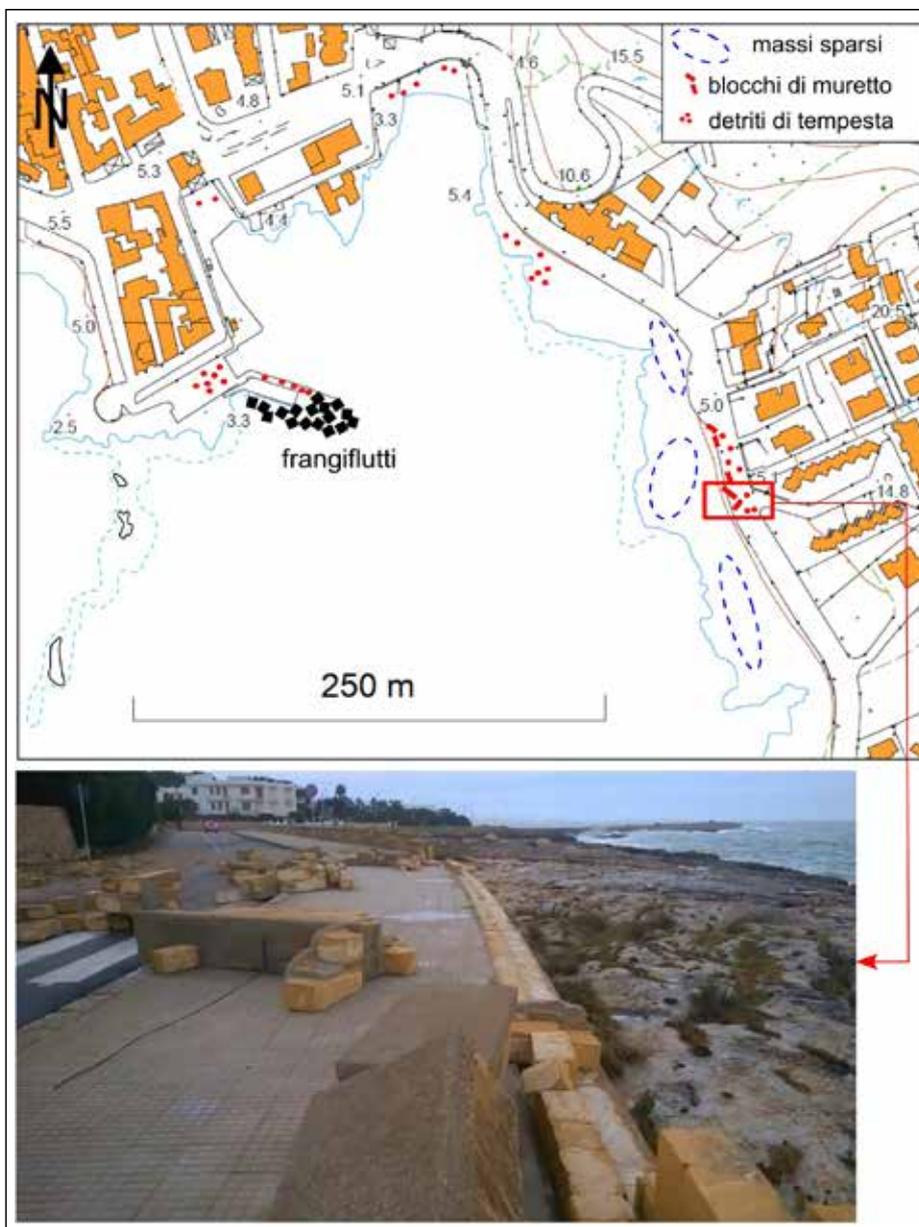


Figura 4 – Muretto del lungomare di Santa Caterina distrutto dalla tempesta del 30 gennaio 2015 (in rosso); le linee tratteggiate delimitano aree dove sono presenti massi costieri messi in posto da eventi non determinati. Base topografica stralciata dalla carta tecnica provinciale a scala 1:5.000. L'immagine in basso è stata estratta dal video 4obbe_a8h1c&ab (gianpieroalerio channel) di Youtube.

cazioni di questi dati si discutono più avanti.

La tempesta del 30 gennaio 2015 è stata di modesta intensità, come mostrato in Figura 2, da cui si evince che nel corso dello stesso anno si sono verificati altri tre giorni di burrasca con mare “agitato” ($2,5 \leq H_s \leq 4$ m) e altrettanti con mare “molto agitato” ($4 \leq H_s \leq 6$ m). Sempre con riferimento allo stesso grafico, la tempesta di fine ottobre 2018 è stata quella di maggiore intensità per quell’anno solare, la sola con la stima dell’altezza significativa delle onde compresa tra 4 e 6 m. A causa di tale burrasca, il 29 ottobre alcuni massi sono stati spostati sulla costa di Torre Suda (Racale). Uno studio idrodinamico sullo spostamento di uno dei blocchi è già stato pubblicato su *Geologi e Territorio* da Ciricugno *et al.* (2019). Dal punto di vista sinottico, la tempesta di vento, abbattutasi dapprima sulla costa tirrenica della penisola italiana, è stata generata da una profonda depressione in avvicinamento sul Mediterraneo dalla penisola iberica. La depressione al suolo di circa 980 hPa, ha attraversato il Mediterraneo nord-occidentale, destando particolare allarme e provocando forti impatti. La tempesta, denominata “Vaia” dalla comunità metereologica, è stata caratterizzata da forti venti meridionali sullo Ionio e sull’Adriatico fino al Golfo di Venezia, mentre in Val di Fiemme (Trentino) ha provocato la distruzione completa del “bosco dei violini”,

famosa foresta di abeti rossi storicamente destinati alla produzione di strumenti musicali di alta qualità (Davolio *et al.*, 2020). Essa ha causato anche lo spostamento di 14 massi di roccia sul promontorio di Kamenjak in Croazia (Biolchi *et al.*, 2019a). La configurazione sinottica ha perdurato per giorni a causa della concomitante alta pressione sull’Europa dell’Est e sull’Oceano Atlantico (Fig. 5A). Peraltro, tale tipo di configurazione sembra aumentata in frequenza negli ultimi decenni (Delle Rose e Martano, 2018). In questa situazione si generano forti venti con direzione stabile da sud-est per lungo tempo e un *fetch* in mare aperto di oltre 800 km (dalle coste libiche a quelle salentine, v. Fig. 5B). In base a MOLOCH, nel corso di Vaia la velocità del vento a 10 m sul livello del mare è stata di 15-20 m/s al largo del Salento e di oltre 20 m/s sull’alto Adriatico (Fig. 5C). La stazione LIBY di S. Maria di Leuca misurava un picco eolico di 17,5 m/s con direzione dai quadranti sud-occidentali alle ore 4:00 p.m. del 29 ottobre; lo stato del mare è stato definito come “molto agitato”. L’anemometro A02TLE (Fig. 1) non era probabilmente in funzione durante questa tempesta poiché non sono presenti dati nel sito della Protezione Civile regionale (<http://93.51.158.171/web/simop/>). La stazione CNR-ISAC ha registrato venti superiori agli 8 m/s, mentre le precipitazioni sul Salento sono state di circa 20 mm.

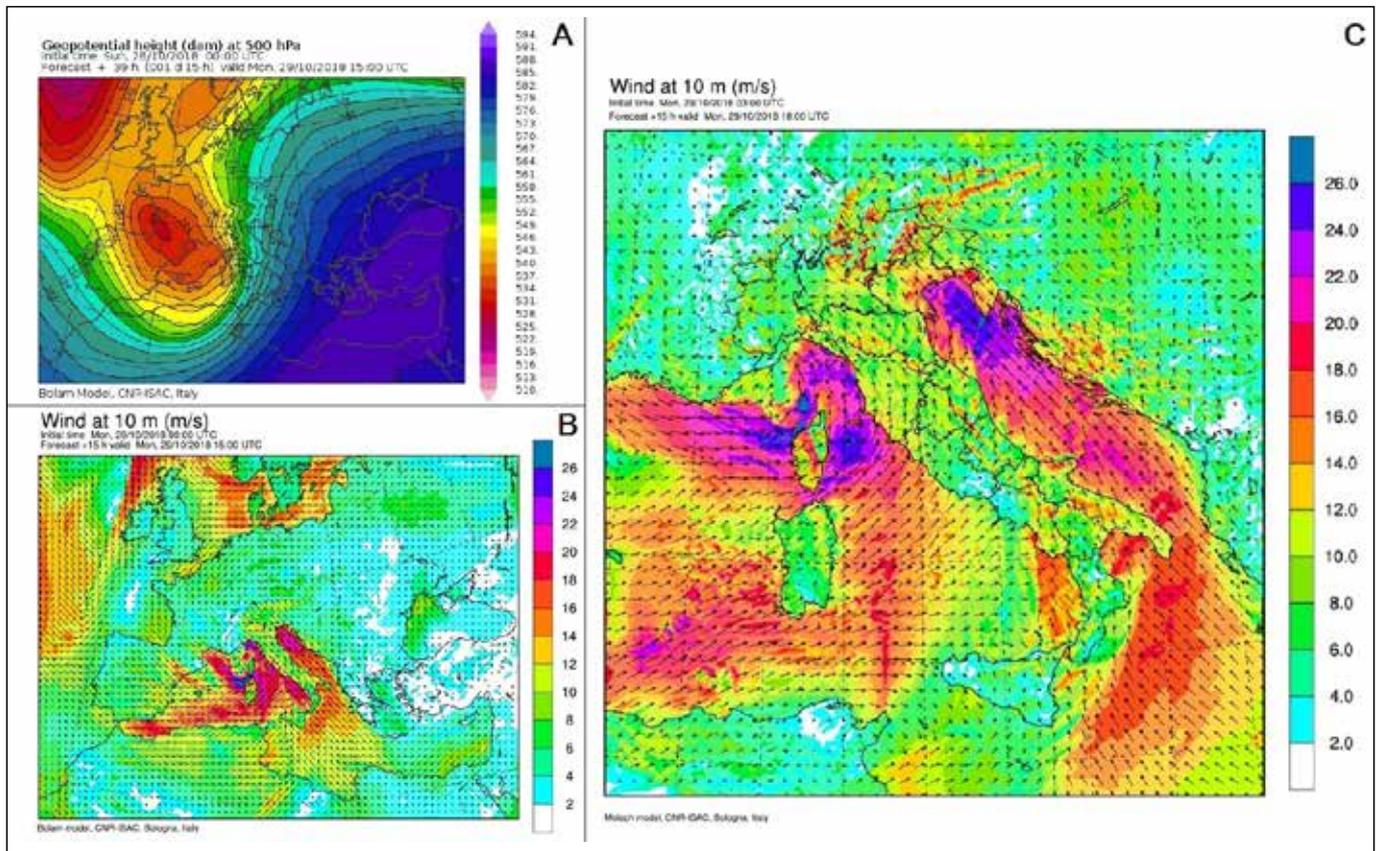


Figura 5 – A) altezza geopotenziale a 500 hPa dal modello BOLAM per il 29/10/2018 alle ore 15 UTC, che mostra la struttura della depressione in media troposfera; B) campo di vento a 10 metri sulla superficie dal modello BOLAM per il giorno 29/10/2018 alle ore 18 UTC; C) campo di vento a 10 m sulla superficie dal modello MOLOCH per il giorno 29/10/2018 alle ore 18 UTC: si noti la persistenza della direzione sulle costa salentina con lungo *fetch* in mare aperto e la intensificazione del vento sulla costa veneta.

Le caratteristiche geologiche della costa di Torre Suda sono dettagliatamente illustrate dal Foglio 536 della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 e dalle relative note allegate (Ricchetti e Ciaranfi, 2013). Lo spostamento dei blocchi è stato segnalato non tempestivamente ma alcune settimane dopo la tempesta. In base alle indagini di terreno è stato riconosciuto il *socket* di un masso dal peso inferiore a 1 t, mentre tramite immagini satellitari di Google Earth si è verificata la posizione iniziale del masso sino a pochi mesi prima della tempesta. In base alla ubicazione della nicchia di distacco e alle caratteristiche della fascia costiera, si è definita e applicata una formulazione derivata da studi di ingegneria costiera con la quale si considerano l'aumento in altezza delle onde impattanti e la successiva perdita di energia del flusso sulla piattaforma. Si è conseguito un valore minimo di altezza d'onda in mare aperto pari a 3,6 m per lo spostamento del masso (Cicicugno *et al.*, 2019), risultato compatibile, quindi, con

l'intervallo di altezze d'onda stabilito dalle misure della stazione dell'Aeronautica Militare (Fig. 2).

Altri dati sono stati ricavati mediante rilievi geomorfologici. Sono stati osservati campi di massi soprattutto a nord del blocco suddetto, oltre a un gruppo di massi e frammenti di massetto in calcestruzzo disposti a embrice (Fig. 6). I frammenti del manufatto provengono da una vicina rampa per natanti e bagnanti. In base alla documentazione fotografica sinora disponibile, la deposizione del gruppo embricato è da attribuire alla tempesta di fine ottobre 2018 oppure a un evento precedente. Nelle immediate vicinanze si sono osservati anche grossi massi traslati da pochi centimetri a circa un metro rispetto alla loro posizioni originarie. In base alle caratteristiche dei *socket*, si ritiene che anche la loro origine sia da attribuire a uno o più eventi recenti (vedi paragrafo conclusivo).

La tempesta del 12-13 novembre 2019 è stata la più intensa di quelle registrate dalla stazione meteo di S. Ma-

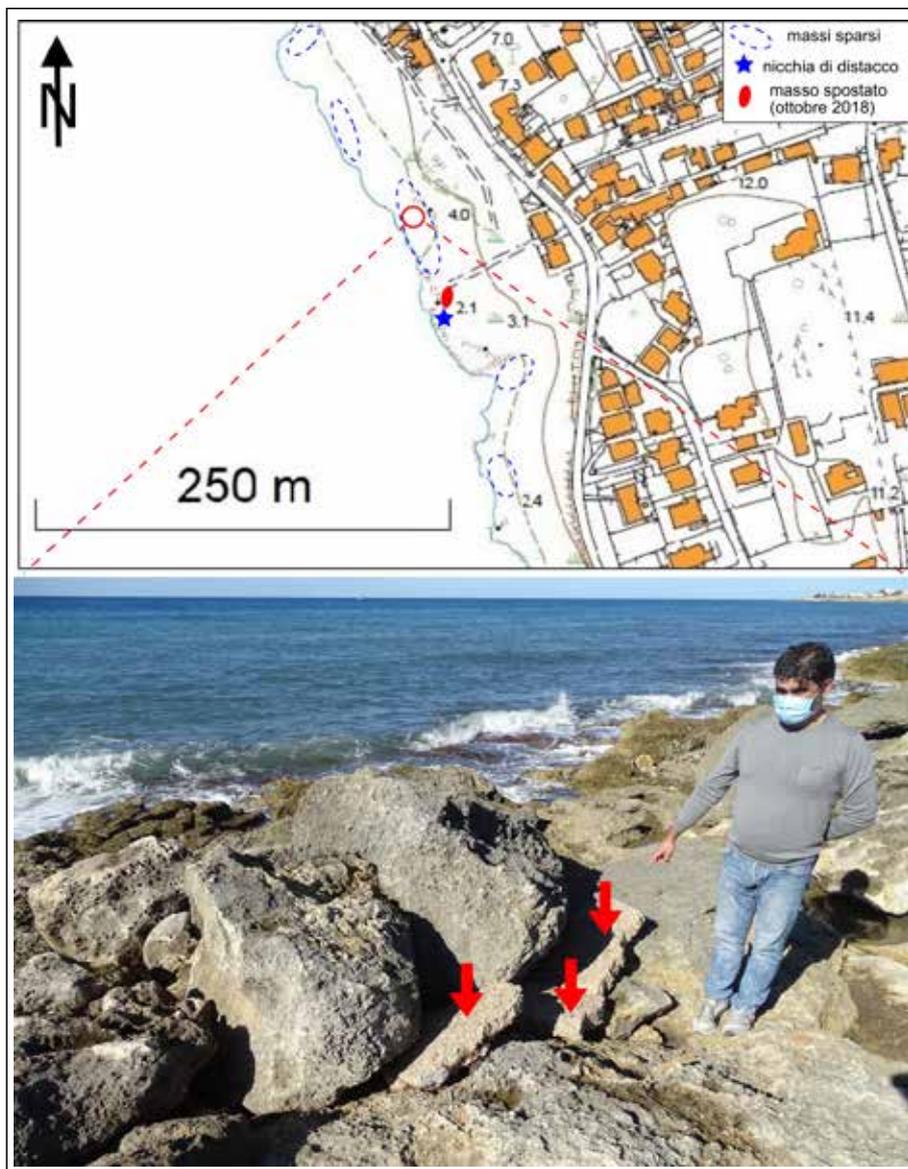


Figura 6 – Gruppo embricato di massi e frammenti di calcestruzzo (indicati dalle frecce) sulla piattaforma costiera di Torre Suda. Base topografica stralciata dalla carta tecnica provinciale a scala 1:5.000; le linee tratteggiate delimitano aree dove sono presenti massi costieri messi in posto da eventi non determinati

ria di Leuca negli ultimi 11 anni (Fig. 2). Essa ha causato la distruzione di un tratto di muretto del lungomare di Porto Cesareo; ha rimosso vari massi tra Torre Squillace e Torre Sant’Isidoro (Nardò); ha nuovamente danneggiato il muretto del lungomare di via E. Filiberto a Santa Caterina e spostato alcuni blocchi calcarei da una barriera frangiflutti, posta a protezione del lungomare della Giudecca, a Gallipoli (Delle Rose *et al.*, 2020). Anche di questo episodio sono presenti alcuni filmati sul *web* (vedi Appendice). Il quadro meteorologico generale è stato caratterizzato da una depressione in media troposfera, in avvicinamento dal nord-ovest della Francia, che si è approfondita ulteriormente sul Golfo di Lione, un’area in cui è frequente il rinforzo dei cicloni mediterranei in autunno inoltrato. La depressione ha migrato quindi verso il Tirreno meridionale raggiungendo la Sicilia, acquistando vorticità sul Grande Atlante (Africa nord-occidentale) e causato quindi forti venti sul Golfo di Taranto (Fig. 7A). Una profonda depressione al suolo si è generata sul Mediterraneo occidentale il 12 novembre (si osservi che alcuni modelli predicevano l’evoluzione della tempesta in medicane). Forti venti hanno cominciato a soffiare sul Salento poco dopo la mezzanotte, persistendo per 12 ore circa nella stessa direzione con un *fetch* di oltre 800 fino alle coste libiche (Fig. 7B). Dalla sera del 12, il vento ha virato

da sud-sud-ovest fino al pomeriggio del 13, riducendo il *fetch* dapprima a circa 350 km e poi a lunghezze via via minori sino al termine dell’evento (Fig. 7C). La velocità del vento a 10 m sul livello del mare ha superato i 20 m/s, quella registrata dalla stazione ISAC nell’entroterra i 9 m/s. La stazione LIBY ha registrato un picco di velocità del vento (22 m/s, direzione da sud-est) il 12 novembre alle 7:00 a.m.; lo stato del mare è stato stimato come “tempestoso” e l’altezza significativa delle onde in mare aperto superiore a 14 m (Fig. 2). L’anemometro A02TLE ha registrato due picchi di 22 m/s, rispettivamente il 12 novembre alle 10:00 a.m., direzione da sud-est, e il 13 novembre 5:00 a.m., direzione sud-sudest. Le precipitazioni medie sul Salento si sono attestate intorno ai 30 mm nei giorni 12 e 13.

Undici massi calcarenitici sono stati spostati nel corso di questa tempesta sulla piattaforma costiera compresa tra Torre Sant’Isidoro e Torre Squillace, il volume del maggiore dei quali è di circa 11,5 m³ per un peso stimato di 21 t. Questi dati risultano da un monitoraggio geomorfologico *mirato* che l’ISAC-CNR sta eseguendo dal 2017 (Delle Rose *et al.*, 2020). Come indicazioni comparative, si riporta che il suddetto masso è circa il doppio del masso più grande spostato a Kamenjak (Croazia) durante Vaia (Biolchi *et al.*, 2019a) ma solo la metà di un masso spo-

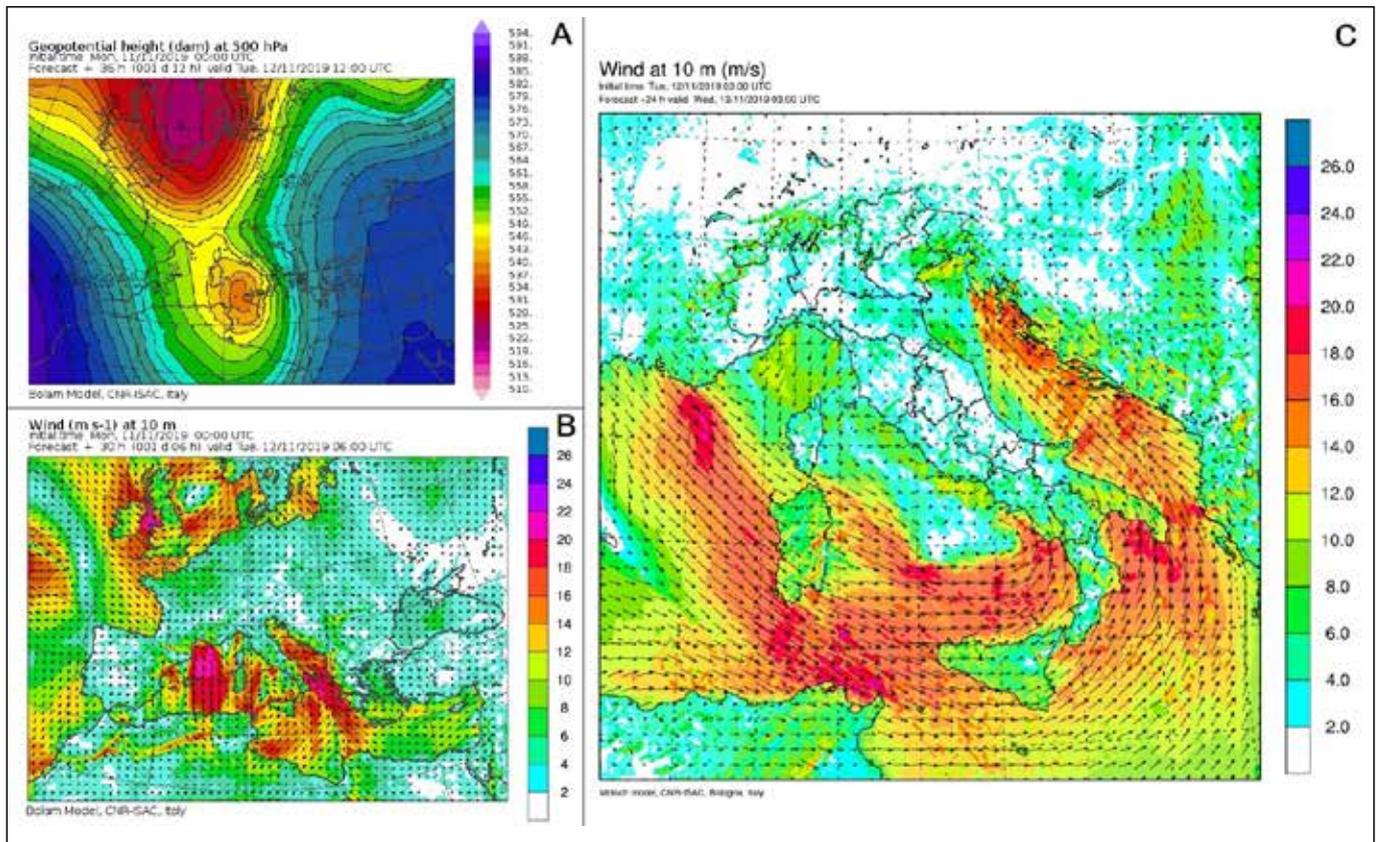


Figura 7 – A) altezza geopotenziale a 500 hPa dal modello BOLAM per il 12/11/2019 alle ore 12 UTC, che mostra la struttura della depressione in media troposfera. Si noti la migrazione verso sud del minimo sul Mediterraneo; B) campo di vento a 10 metri sulla superficie dal modello BOLAM per il giorno 12/11/2019 alle ore 06 UTC; C) campo di vento a 10 m sulla superficie dal modello MOLOCH per il giorno 13/11/2019 alle ore 03 UTC: si noti la variazione della direzione sulla costa salentina con riduzione del *fetch*.

stato sulla costa della Penisola della Maddalena (Sicilia) da tre tempeste negli ultimi 10 anni (Scicchitano *et al.*, 2020). Seguendo l'attuale prassi scientifica (ad esempio Piscitelli *et al.*, 2017, e Biolchi *et al.*, 2019b), per valutare l'energia delle onde che, infrangendosi sulla costa, hanno causato lo spostamento dei massi, si sono usate sia le equazioni di Nandasena *et al.* (2011), sia quelle di Engel e May (2012), tutte derivate dal pionieristico lavoro di Nott (2003). Le prime hanno restituito valori più attendibili; per il masso di 21 t, l'altezza minima dell'onda impattante che potrebbe averne determinato lo spostamento è di quasi 10 m (Delle Rose *et al.*, 2020). Il blocco maggiore (pesante circa 8 t), spostato dalla barriera frangiflutti a Gallipoli, è stato depresso sulla carreggiata stradale dopo aver percorso almeno 15 m (Fig. 8). Le equazioni di Nandasena *et al.* (2011) restituiscono un valore di oltre 12 m per la relativa altezza minima dell'onda impattante. Per completezza d'informazione, si evidenzia che tali equazioni sono ritenute da una parte delle comunità scientifica non del tutto corrette e comunque non considerano importanti processi come, ad esempio, la diminuzione in altezza dell'onda infranta che, proseguendo la sua corsa, sposta blocchi sulla piattaforma costiera (Cox *et al.*, 2020).

DISCUSSIONE

L'energia delle onde che si infrangono sulle coste dipende da numerose variabili, a partire dalla potenza complessiva sviluppata dalle tempeste. Le diverse ciclogenesi sopra descritte hanno influito sulle intensità delle rispettive tempeste e, soprattutto, sulle posizioni dei minimi barici. La prima burrasca ha avuto origine da una saccatura in discesa da nordest verso il Mediterraneo, mentre le altre due da minimi barici in posizione nord-occidentale rispetto alla penisola italiana. Questo ha causato differenti orientamenti e persistenze delle direzioni dei venti sullo Ionio e, quindi, sostanziali diversità di *fetch* e di altezza d'onda al largo delle coste salentine. Durante la tempesta di fine gennaio 2015, i venti sono stati tendenzialmente occidentali e hanno generato un moto ondoso di modesta entità. Decisamente più intense sono state le tempeste di fine ottobre 2018 e di metà novembre 2019. Quest'ultima è stata caratterizzata da una spiccata migrazione verso sud e conseguente aumento di intensità del minimo barico (vedi paragrafo precedente) che, a dispetto di una minore persistenza del vento dai quadranti meridionali, ha determinato maggiori velocità del vento e altezze delle onde di burrasca. Per un quadro più completo, che consideri anche il fattore *periodicità*, si dovranno stabilire i tempi di ritorno di ciascuna delle tre tempeste acquisendo

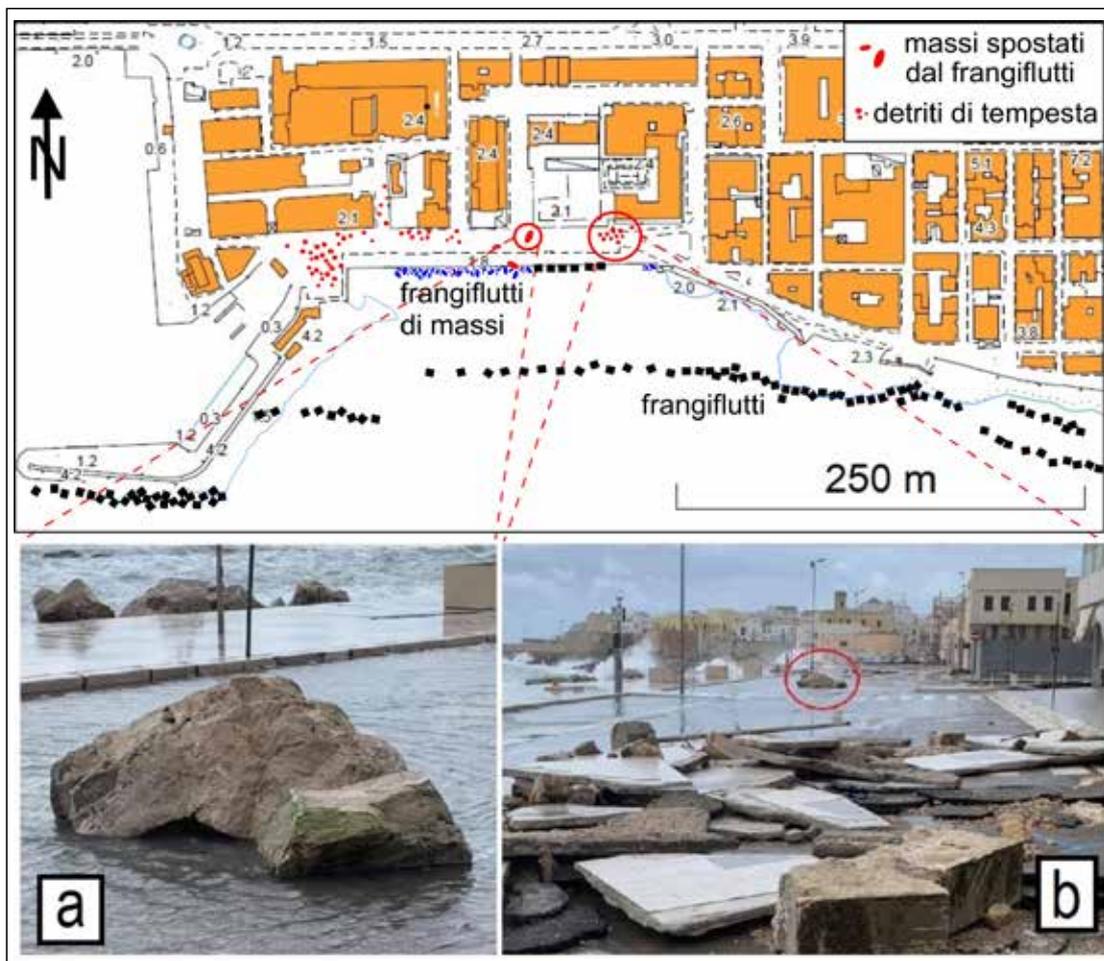


Figura 8 – Effetti prodotti dalla tempesta del 12-13 novembre 2019 a Gallipoli. Base topografica stralciata dalla carta tecnica provinciale a scala 1:5.000. In basso: a) dettaglio del blocco di 8 tonnellate (v. testo); b) panoramica sui detriti ammassati sul lungomare con evidenziato il medesimo blocco (al centro, cerchiato in rosso).

e analizzando i dati della boa ondometrica di Crotona, di riferimento per l'intero Golfo di Taranto (Dentale *et al.*, 2018). La medesima serie numerica potrà fornire anche i rispettivi valori *convenzionali* di altezza delle onde significative, necessari per qualsiasi analisi comparativa con gli impatti prodotti sulle coste del Golfo di Taranto da altri eventi meteorologici. Nell'attesa di tali indispensabili approfondimenti, si espongono di seguito alcuni spunti preliminari.

Nella valutazione del valore minimo di altezza d'onda necessaria per lo spostamento dei blocchi costieri, andrebbe anche considerato l'innalzamento del livello del mare durante l'evento di burrasca (*storm surge*). Tale fenomeno è regolato sia dalle condizioni atmosferiche, sia dalle caratteristiche batimetriche dei fondali. A causa dell'attrito del vento con la superficie marina, si genera una corrente superficiale che determina un trasporto di massa d'acqua dal mare aperto verso terra. Inoltre, la depressione atmosferica ciclonica produce due diverse effetti: un'elevazione della superficie del mare e un precursore che si muove più velocemente dello stesso ciclone, che generano onde lunghe senza trasporto di massa. Per comprendere il comportamento delle mareggiate su scala locale è importante valutare l'entità di ogni componente del *surge* (Mori *et al.*, 2014).

Un primo approccio può essere tentato in base a schemi generali. Nel caso ideale di falesia rettilinea con profondità costante, si può derivare una formula analitica dipendente dall'effetto di blocco della falesia sulla *corrente di Ekman* causata da un transiente di vento parallelo alla costa (Gill, 1982). Diversamente, si può utilizzare una relazione empirica tra l'innalzamento del livello del mare e la depressione atmosferica al centro dell'area ciclonica, tenendo conto dell'effetto del fondale costiero (Hsu, 1988). Il primo schema è ben adattabile alle due tempeste più recenti, in quanto le direzioni dei venti sono state circa parallele alla costa ionica del Salento. I valori di innalzamento del livello del mare ottenuti applicando tale modello sono compresi tra 1,5 e 2 m per la tempesta del novembre 2019 e tra 1,2 e 1,7 m per quella di ottobre 2018. Il modello a transiente mal si adatta invece alla tempesta del gennaio 2015, in quanto il vento ha spirato trasversalmente alla linea di costa; in questo caso, i valori ottenuti sono compresi tra 1,1 e 1,5 m. La relazione empirica riportata da Hsu (1988) restituisce invece i seguenti valori: 1 m di innalzamento per la tempesta 2019, 1,5 m per quella del 2018 e 2,1 m per quella del 2015. L'ultimo risultato è dovuto in gran parte alla maggiore depressione del centro ciclonico e alla sua maggiore velocità di spostamento perpendicolarmente alla linea di costa. Con riferimento al tratto di costa di Santa Caterina danneggiata in egual misura dalla intensa tempesta del 2019 e da quella moderata del 2015 (Fig. 4), la differenza tra i valori calcolati con la relazione empirica suggerisce un contributo significativo dello *storm surge* nel determinare l'impatto delle onde. Da verificare è anche la configurazione batimetrica del fondale antistante la costa in rela-

zione a eventuali aumenti significativi dell'ampiezza delle onde (effetto *shoaling*).

Da quanto esposto emerge l'importanza di intensificare i rilievi geologici al fine di documentare gli spostamenti dei massi costieri. Peraltro, i litotipi affioranti lungo la costa ionica salentina mostrano caratteristiche che agevolano l'identificazione delle nicchie di distacco (Fig. 9).

In Figura 9a si osserva un *socket* ubicato sul ciglio della ripa antistante il tratto di lungomare di via E. Filiberto a Santa Caterina (cfr. Fig. 4). In base alla documentazione disponibile si può supporre la sua formazione in occasione delle ultime tempeste. Il sito di Santa Caterina si conferma quindi di particolare interesse per la ricerca. Ciò è ulteriormente avallato dalla presenza sulla piattaforma di numerosi massi costieri, anche di dimensioni notevoli, in merito alla quale sarebbe opportuno indagare sui possibili eventi causativi. Ciò specie al fine di comprendere se le tempeste possano essere annoverate tra questi, oppure se la causa debba essere ricondotta a un episodio tellurico (cfr. Mastronuzzi e Sansò, 2000; Mastronuzzi e Pignatelli, 2012; Scicchitano *et al.*, 2020). La Figura 9b supporta l'idea di includere nei siti da monitorare anche il tratto di costa di Torre Suda sopra descritto. La superficie del *socket* evidenziata in figura presenta tracce di alterazione meno marcate di quelle visibili sulla nicchia di distacco del masso studiato da Ciricugno *et al.* (2019), ed è quindi ragionevole supporre una sua origine più recente.

Nel caso di spostamenti avvenuti nel corso degli ultimi anni, un buon indizio per l'individuazione dei *socket* consiste quindi nella diversa colorazione della loro superficie rispetto alla roccia circostante. Considerando che occorrono alcuni anni prima che i processi di alterazione mascherino tali evidenze, la disponibilità di immagini acquisite in tempi diversi con aeromobili a pilotaggio remoto (APR) può consentire di individuare l'evento causativo con pochi margini di incertezza. I rilievi aerofotogrammetrici da drone costituiscono la tecnica meglio rispondente allo scopo. Tuttavia anche tramite semplici riprese aeree con videocamera è possibile acquisire dati utili per programmare i rilievi geologici in situ (Fig. 10).

L'importanza di incrementare le osservazioni sui processi morfodinamici causati dalle onde di tempesta è avvalorata dalla possibilità di dedurre dati utili anche per migliorare le conoscenze sui rischi geologici (Hansom *et al.*, 2015; Causon Deguara e Gauci, 2017). Non a caso, proprio i più recenti studi osservazionali condotti nel Mediterraneo centrale (Biolchi *et al.*, 2019a; Delle Rose *et al.*, 2020; Scicchitano *et al.*, 2020), hanno mostrato che gli eventi di tempesta causano lo spostamento di massi pesanti fino a decine di tonnellate. Questo risultato contrasta con l'assunzione diffusa (basata sul lavoro di Nott, 2003) che spostamenti di tali proporzioni avvenuti in "tempi antichi" *debbano* essere ricondotti a *tsunami* di origine sismica, e invita a percorrere nuove direzioni nella ricerca sulla evoluzione geomorfologica delle coste e sulla valutazione dei rischi.

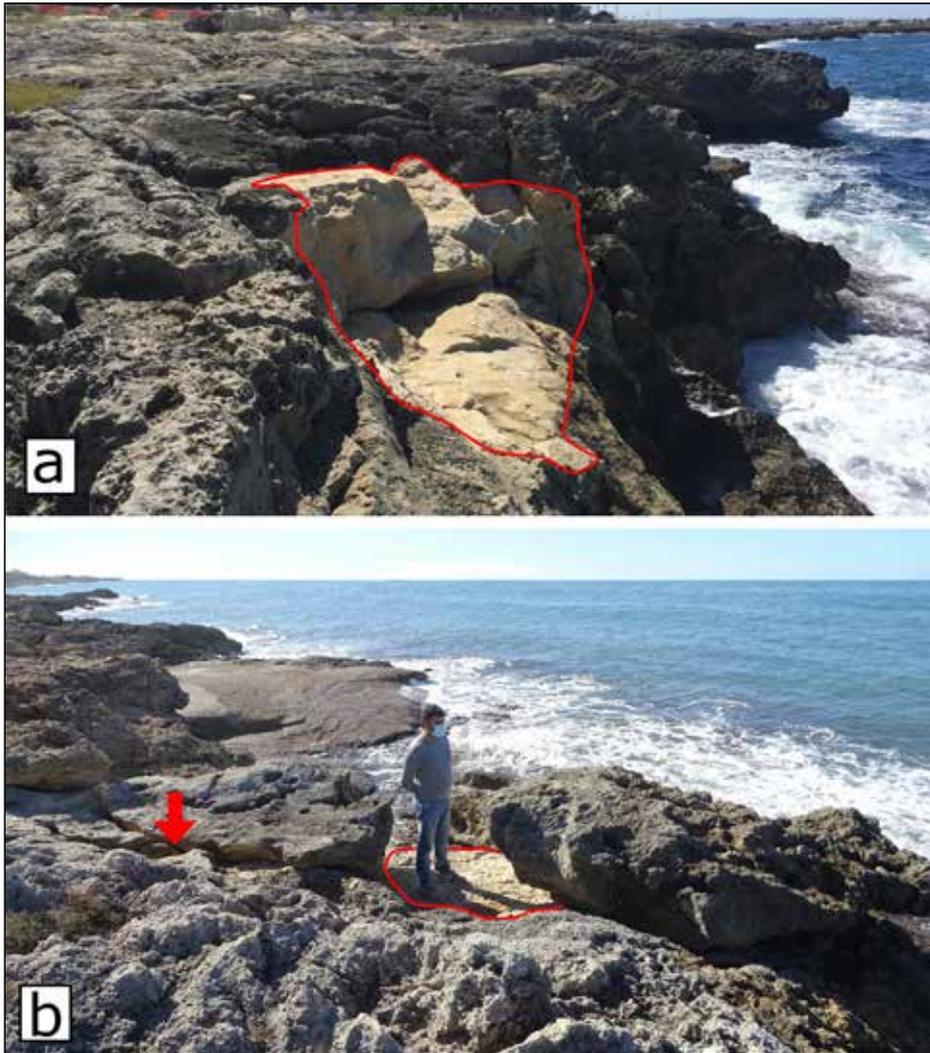


Figura 9 – a) nicchia di distacco individuata mediante rilievo geologico (località Santa Caterina); b) nicchia di distacco (contornata in rosso), frattura allargata (indicata dalla freccia) e relativi blocchi spostati (località Torre Suda).



Figura 10 – a) individuazione di una nicchia di distacco (evidenziata dal cerchio) mediante ripresa da APR (località Torre Suda); b) immagine ripresa durante la successiva indagine di terreno.

BIBLIOGRAFIA

AMORES A., MARCOS M., CARRIÓ D.S., GÓMEZ-PUJOL L. (2020) - *Coastal impacts of Storm Gloria (January 2020) over the north-western Mediterranean*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 1955-1968.

BIOLCHI S., DENAMIEL C. DEVOTO S., KORBAR T., MACO-

VAZ V., SCICCHITANO G., VILIBIC I., FURLANI S. (2019a) - *Impact of the October 2018 storm Vaia on coastal boulders in the northern Adriatic Sea*. Water, 11, 2229.

BIOLCHI S., FURLANI S., DEVOTO S., SCICCHITANO G., KORBAR T., VILIBIC I., SEPIC J. (2019b) - *The origin and dynamics of coastal boulders in a semi-enclosed shallow*

basin: A northern Adriatic case study. *Mar. Geol.*, 411, 62-77.

BOSSIO A., MAZZEI R., MONTEFORTI B., SALVATORINI G. (1992) - *Notizie preliminari sul Miocene di S. Maria al Bagno – S. Caterina presso Nardò (Lecce)*. *Paleopelagos*, 2, 99-107.

CAUSON DEGUARA J., GAUCI R. (2017) - *Evidence of extreme wave events from boulder deposits on the south-east coast of Malta (Central Mediterranean)*. *Nat. Hazards* 86, 543–568.

CIRICUGNO L., DELLE ROSE M., FIDELIBUS C., ORLANDUCCI L., MANGIA M. (2019) - *Sullo spostamento di massi costieri causato da onde “estreme” (costa ionica salentina)*. *Geologi e Territorio*, 16, 15-23.

COX R., ARDHUIN F., DIAS F., AUTRET R., BEISIEGEL N., EARLIE C.S., HERTERICH J.G., KENNEDY A., PARIS R., RABY A., SCHMITT P., WEISS R. (2020) - *Systematic review shows that work done by storm waves can be misinterpreted as tsunami-related because commonly used hydrodynamic equations are flawed*. *Front. Mar. Sci.*, 7, 4.

DAVOLIO S., DELLA FERA S., LAVIOLA S., MIGLIETTA M.M., LEVIZZANI V. (2020) - *Heavy precipitation over Italy from the Mediterranean storm “Vaia” in October 2018: assessing the role of an atmospheric river*. *Mon. Weather Rev.*, 148, 3571-3588.

DELLE ROSE M., FIDELIBUS C., MARTANO P., ORLANDUCCI L. (2020) - *Storm-induced boulder displacements: inferences from field surveys and hydrodynamic equations*. *Geosciences*, 10, 374.

DELLE ROSE M., MARTANO P. (2018) - *Infiltration and short-time recharge in deep karst aquifer of the Salento Peninsula (southern Italy): an observational study*. *Water*, 10, 260.

DENTALE F., FURCOLO P., PUGLIESE CARRATELLI, E., REALE F., CONTESTABILE P., TOMASICCHIO G.R. (2018) - *Extreme wave analysis by integrating model and wave buoy data*. *Water*, 10, 373.

DE VITIS G. (2019) - *“L’Uragano Maria” spazza il Salento*. (<https://www.supermeteo.com/luragano-maria-spazza-il-salento-martedi-26-settembre-2006-ore-11-00/>)

ENGEL M., MAY S.M. (2012) - *Bonaire’s boulder fields revisited: evidence for Holocene tsunami impact on the Leeward Antilles*. *Quat. Sci. Rev.*, 54, 126-141.

FERRARIN C., VALENTINI A., VODOPIVEC M., KLARIC D., MASSARO G., BAJO M., DE PASCALIS F., FADINI A., GHEZZO M., MENEGON S., *et al.* (2020) - *Integrated sea storm management strategy: The 29 October 2018 event in the Adriatic Sea*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 73–93.

FITA L., ROMERO R., LUQUE A., EMANUEL K., RAMIS C. (2007) - *Analysis of the environments of seven Mediterranean tropical-like storms using an axisymmetric, nonhydrostatic, cloud resolving model*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 41-56.

GILL A. (1982) - *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, 662 pp.

HANSOM J.D., SWITZER A.D., PILE J. (2015) - *Extreme waves: causes, characteristics, and impact on coastal en-*

vironments and society. In: *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters*, Elsevier, pp. 307-334.

HASTEWELL L., INKPEN R., BRAY M., SCHAEFER M. (2020) - *Quantification of contemporary storm-induced boulder transport on an intertidal shore platform using radio frequency identification technology*. *Earth Surf. Process. Landforms*, 45, 1601-1621.

HSU S.A. (1988) - *Coastal Meteorology*, Academic Press, 260 pp.

KANIEWSKI D., MARRINER N., MORHANGE C., FAIVRE S., OTTO T., VAN CAMPO E. (2016) - *Solar pacing of storm surges, coastal flooding and agricultural losses in the Central Mediterranean*. *Scientific Reports*, 6, 25197.

KNIGHT J., BURNINGHAM H. (2011) - *Boulder dynamics on an Atlantic-facing rock coastline, northwest Ireland*. *Mar. Geol.*, 283, 56-65.

MAHERAS P., FLOCAS H. A., PATRIKAS I., ANAGNOSTOPOULOU CHR. (2001) - *A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution*. *Int. J. Climatol.*, 21, 109-130.

MASTRONUZZI G., SANSÒ P. (2000) - *Boulders transport by catastrophic waves along the Ionian coast of Apulia (southern Italy)*. *Mar. Geol.*, 170, 93-103.

MASTRONUZZI G., PIGNATELLI C. (2012) - *The boulder berm of Punta Saguerra (Taranto, Italy): a morphological imprint of the Rossano Calabro tsunami of April 24, 1836?* *Earth Planets Space*, 64, 4.

MORI N., KATO M., KIM S., MASE H., SHIBUTANI Y., TAKEMI T., TSUBOKI K., YASUDA T. (2014) - *Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf*, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5106-5113.

MOSCATELLO A., MIGLIETTA M.M., ROTUNNO R. (2008) - *Numerical Analysis of a Mediterranean “Hurricane” over Southeastern Italy*. *Mon. Weather Rev.*, 136, 4373-4397.

NANDASENA N.A.K., PARIS R., TANAKA N. (2011) - *Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis)*. *Mar. Geol.*, 281, 70-84.

NOTT J. (2003) - *Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting*. *Earth Planetary Sci. Lett.*, 210, 269-276.

PIRAZZOLI P.A., TOMASIN A. (2003) - *Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas*. *Int. J. Climatol.*, 23, 963-973.

PISCITELLI A., MILELLA M., HIPPOLYTE J.C., SHAH-HOSSEINI M., MORHANGE C., MASTRONUZZI, G. (2017) - *Numerical approach to the study of coastal boulders: The case of Martigues, Marseille, France*. *Quat. Int.*, 439, 52–64.

RICCHETTI G., CIARANFI N., a cura di (2013) - *Note Illustrative della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000 – Foglio 536 Ugento*. ISPRA, Serv. Geol. It., 124 pp.

SCICCHITANO G., SCARDINO G., TARASCIO S., MONACO C., BARRACANE G., LOCURATOLO G., MILELLA M., PISCITELLI A., MAZZA G., MASTRONUZZI G. (2020) - *The first video witness of coastal boulder displacements recorded during the impact of medicane “Zorbas” on southeastern Sicily*. *Water*, 12, 1497.

APPENDICE

(documenti filmici, selezione di indirizzi web)

Forte mareggiata a Santa Caterina di Nardò - Danni - 30 1 2015 (https://www.youtube.com/watch?v=4obbe_a8h1c&ab_channel=gianpieroalerio)

Gallipoli auto travolta dalle onde (https://www.youtube.com/watch?v=xFCYIL_OiTM&ab_channel=Trainatore83)

Forte mareggiata a Santa Caterina di Nardò 13 novembre 2019 (https://www.youtube.com/watch?v=dAh7Tdha7lQ&ab_channel=gianpieroalerio)

Gallipoli, gli effetti della mareggiata alla "Giudecca"

visti dal drone (https://www.youtube.com/watch?v=Iv_be1VcDbA&ab_channel=piazzasalento)

Maltempo Puglia tromba d'aria Porto Cesareo (https://www.youtube.com/watch?v=6RONc4lycJU&ab_channel=Vocididonna2)

ERRATA CORRIGE

L'equazione (6) di pagina 20 in Ciricugno *et al.* (*Geologi e Territorio* n. 2-2019) è riportata erroneamente. La sua forma corretta è:

$$R = 3H$$



TRASPORTO E SMALTIMENTO RIFIUTI SPECIALI TOSSICI E NOCIVI
BONIFICA SITI INQUINANTI
SMALTIMENTO AMIANTO - NUOVE COPERTURE
CONSULENZA AMBIENTALE

e-mail: amianto@ecosudambiente.it
www.ecosudambiente.it

Via Bruxelles, 84 - 73010 Soletto
Tel/Fax: 0836/427612