



**NOVEMBRE 2019
UN MESE DI MAREE ECCEZIONALI**

DINAMICA E ANOMALIA DELL'EVENTO DEL 12 NOVEMBRE 2019

Dati, statistiche e analisi degli eventi

Rapporto tecnico-divulgativo di analisi dell'evento del 12 novembre 2019 e della serie di maree eccezionali del mese di novembre.

Analisi congiunta condotta dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia (CPSM), dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e dall'Istituto di Scienze Marine del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISMAR)

Hanno partecipato alla definizione di questo documento:

ISPRA: Andrea Bianco, Andrea Bonometto, Marco Casaioli, Elisa Coraci, Michele Cornello, Franco Crosato, Maurizio Ferla, Stefano Mariani, Sara Morucci

CPSM: Marco Favaro, Giovanni Massaro, Alvise Papa, Franca Pastore, Enrico Sambo, Alessandro Tosoni

CNR-ISMAR: Marco Bajo, Luigi Cavaleri, Jacopo Chiggiato, Christian Ferrarin, Georg Umgiesser

Si ringraziano per la collaborazione i colleghi del Centro Meteorologico di ARPA Veneto ed in particolare il dott. Francesco Domenichini, e del Sistema previsionale Idro-Meteo-Mare (SIMM) di ISPRA

Publicato il giorno 15 maggio 2020

PREMESSA	4
1 NOVEMBRE 2019: UN MESE DI ALTE MAREE ECCEZIONALI	6
1.1 ANALISI DEI LIVELLI DI MAREA A VENEZIA	6
1.2 SITUAZIONE METEOROLOGICA E CONDIZIONI DEL MARE	7
2 L'EVENTO DEL 12 NOVEMBRE	9
2.1 ANALISI DELLA DINAMICA METEOROLOGICA	9
2.2 ANDAMENTO DEI LIVELLI DI MAREA	13
CONCLUSIONI	16

Premessa

Questo documento è frutto della collaborazione tra:

- l'Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale (ISPRA);
- il Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia (CPSM);
- l'Istituto di Scienze Marine di Venezia (ISMAR) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

I tre Istituti collaborano da anni in attività di monitoraggio, analisi e previsione dei fenomeni meteo-marini in Laguna di Venezia e in Alto Adriatico.

Il documento ha lo scopo di fornire una descrizione delle dinamiche meteo-marine che hanno determinato l'acqua alta della notte del 12 novembre 2019, quando l'alta marea ha raggiunto la seconda quota più alta registrata dal 1872. La particolare intensità dell'evento meteo-marino è stata dovuta alla sovrapposizione di quattro fenomeni:

- il picco della marea astronomica di sизigia;
- il livello medio insolitamente elevato del mare in Adriatico;
- il forte vento di Scirocco lungo il bacino Adriatico;
- il passaggio di un intenso nucleo di bassa pressione (minimo depressionario) sul bacino Nord Adriatico e sulla laguna di Venezia.

L'evento del 12 novembre va comunque inquadrato all'interno di un mese di novembre eccezionale, nel quale si sono susseguite condizioni marine particolari in termini di frequenza e intensità.

Le reti meteo-mareografiche integrate del CPSM e dell'ISPRA

L'analisi dell'evento è resa possibile dalla notevole mole di dati acquisiti dalle reti mareografiche

integrate del CPSM e dell'ISPRA, che, con un totale di 42 stazioni, garantiscono un monitoraggio capillare e in continuo dei principali parametri meteo-marini in Laguna di Venezia e in Alto Adriatico (Figura 1 e dettaglio Figura 2). Tutti i dati vengono pubblicati in tempo reale e, assieme alle serie storiche, possono essere scaricati dai siti:

- www.venezia.isprambiente.it¹
- www.comune.venezia.it/maree.

I dati osservati in tempo reale sono fondamentali per garantire un tempestivo servizio di informazione, particolarmente importante in una città in cui il livello della marea influenza la vita quotidiana delle persone. Tali dati sono molto importanti anche per le previsioni dell'acqua alta, in quanto la loro assimilazione nei modelli previsionali permette di migliorarne le capacità predittive.

Inoltre, una rete di misura condivisa, permettendo una maggiore copertura geografica, consente di condurre studi climatologici delle tendenze sul medio e lungo periodo e analisi post-evento.

Le altezze di marea registrate dagli strumenti situati in Laguna di Venezia e lungo l'arco costiero Nord Adriatico sono riferite allo Zero Mareografico di Punta della Salute 1897, definito come il livello medio registrato a Venezia nel periodo 1885–1909.

È opportuno specificare che nei pressi di Punta della Salute, vista l'importanza del sito quale punto di riferimento per l'intera rete da quasi un secolo e mezzo, sono presenti due stazioni mareografiche, una lato Canale della Giudecca e una lato Canal Grande (Figura 1).

Inoltre, due delle stazioni meteo-mareografiche sono posizionate in mare aperto e ospitate su siti del CNR-ISMAR di Venezia: la Piattaforma "Acqua Alta", posizionata a circa 16 km al largo del litorale veneziano, e la Meda "Abate", a circa 40 km dal

¹ Sul sito ISPRA sono disponibili solo i dati validati. I dati non disponibili sul sito possono essere richiesti a venezia@isprambiente.it.

litorale. Questi punti osservativi forniscono importanti informazioni relative allo stato del mare e alle condizioni meteorologiche che interessano la porzione di Nord Adriatico prossima alla città di Venezia. Ulteriori osservazioni vengono acquisite dalla Rete Mareografica

Nazionale gestita da ISPRA (www.mareografico.it), composta da un totale di 36 stazioni di misurazione del livello del mare e dei principali parametri meteorologici, distribuite lungo le coste italiane (Figura 2).



Figura 1: Reti mareografiche integrate del CPSM e dell'ISPRA in Laguna di Venezia.



Figura 2: A sinistra, ubicazione delle 36 stazioni appartenenti alla Rete Mareografica Nazionale. A destra, dettaglio delle stazioni ISPRA e CPSM presenti lungo la costa dell'Alto Adriatico e al largo, presso i due siti del CNR-ISMAR, Piattaforma "Acqua Alta" e Meda "Abate".

1 Novembre 2019: un mese di alte maree eccezionali

1.1 Analisi dei livelli di marea a Venezia

Nel 2019 gli eventi meteo-marini avversi si sono susseguiti con particolare frequenza ed intensità in rapporto agli anni che lo hanno preceduto. Considerando la serie storica delle osservazioni di livello registrate dal 1872 al 31 dicembre 2019 dalla stazione di Venezia Punta della Salute (lato Canale della Giudecca), l'anno 2019 ha registrato:

- 28 eventi mareali in cui sono stati raggiunti o superati i 110 cm (di cui 15 in novembre) (Figura 3). Il secondo anno, per numero di eventi, è stato il 2010 quando se ne registrarono 18;
- 13 eventi (7 in novembre) in cui sono stati raggiunti o superati i 120 cm. Il secondo anno è stato il 2010 con 7 eventi;
- 8 eventi (5 in novembre) in cui si sono raggiunti

o superati i 130 cm. Il secondo anno è stato il 2009 con 4 eventi;

- 5 eventi (4 in novembre) maggiori o uguali a 140 cm; mai negli ultimi 150 anni se ne erano presentati più di due nello stesso anno;
- 3 eventi maggiori o uguali a 150 cm, avvenuti tutti nel mese di novembre e in soli 6 giorni (dal 12/11 al 17/11, Figura 3). Mai negli ultimi 150 anni se ne era presentato più di uno nello stesso anno.

Da notare che i 5 eventi estremi del 2019 sono tra i primi 20 della storia (Tabella 1). Anche la permanenza del livello del mare sopra i 110 cm, pari a circa 50 ore nel solo mese di novembre, rappresenta un valore mai registrato negli ultimi 150 anni. Per avere un termine di paragone si deve considerare che, sempre per il solo mese di novembre, il secondo anno più importante per la persistenza dell'alta marea fu il 2012 con circa 24 ore complessive.

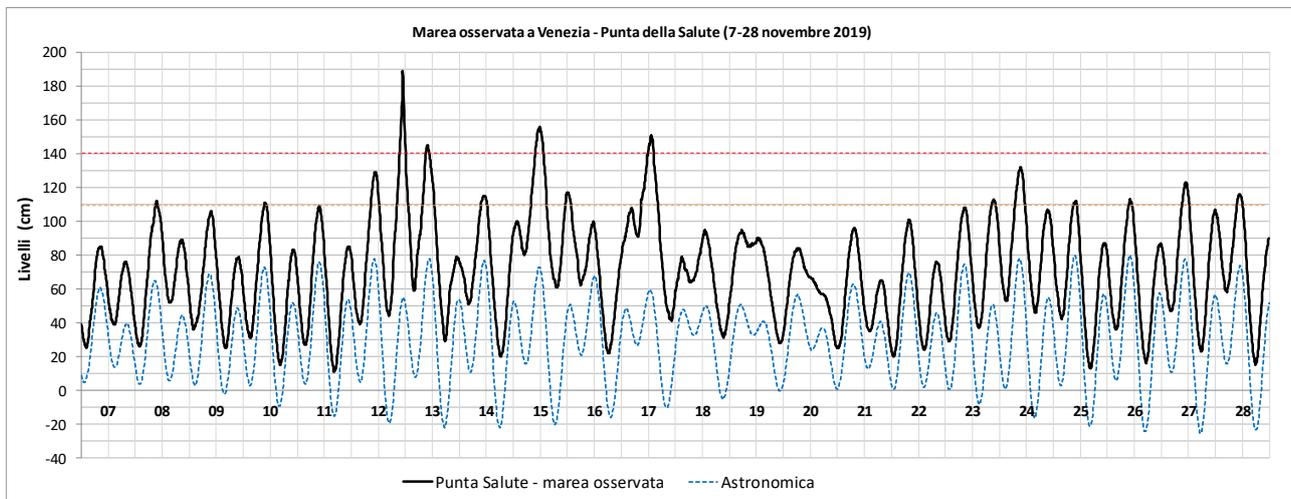


Figura 3: Livelli di marea registrati presso il mareografo di Punta della Salute – Canale della Giudecca. La linea nera indica la marea osservata; la linea blu tratteggiata, la marea astronomica. Sono inoltre evidenziate la soglia in cui vengono attivate le sirene (110 cm) e quella per la definizione delle maree eccezionali (140 cm sullo Zero Mareografico di Punta della Salute – ZMPS 1897).

Più in generale, le analisi statistiche condotte sulle serie storiche evidenziano come l'eccezionalità degli eventi del novembre 2019 vada collocata in un *trend* di lungo periodo, caratterizzato negli ultimi decenni da un progressivo aumento del livello medio del mare e dei fenomeni estremi di

acqua alta a Venezia. Con l'innalzamento del livello del mare relativo (Figura 4), dato dal contributo congiunto di eustatismo (innalzamento del livello del mare) e subsidenza, sono infatti sufficienti eventi di minore entità per provocare allagamenti della città.

Tabella 1: Valori dei 21 livelli di marea più elevati registrati presso il mareografo di Punta della Salute, dal 1872. In verde sono evidenziati gli eventi del 2019.

	Data	cm sullo ZMPS		Data	cm sullo ZMPS
1	04/11/1966	194	12	16/04/1936	147
2	12/11/2019	187 – 189*	13	16/11/2002	147
3	22/12/1979	166	14	15/10/1960	145
4	01/02/1986	158	15	25/12/2009	145
5	01/12/2008	156	16	13/11/2019	145
6	29/10/2018	156	17	03/11/1968	144
7	15/11/2019	156	18	06/11/2000	144
8	17/11/2019	152	19	23/12/2009	144
9	12/11/1951	151	20	24/12/2010	144
10	11/11/2012	148	21	23/12/2019	144
11	29/10/2018	148			

*Come spiegato nella Premessa e riportato in Figura 1, presso Punta della Salute sono installati due mareografi. 187 cm è il dato misurato a Punta della Salute lato Canal Grande; 189 cm è il dato misurato a Punta della Salute lato Canale della Giudecca.

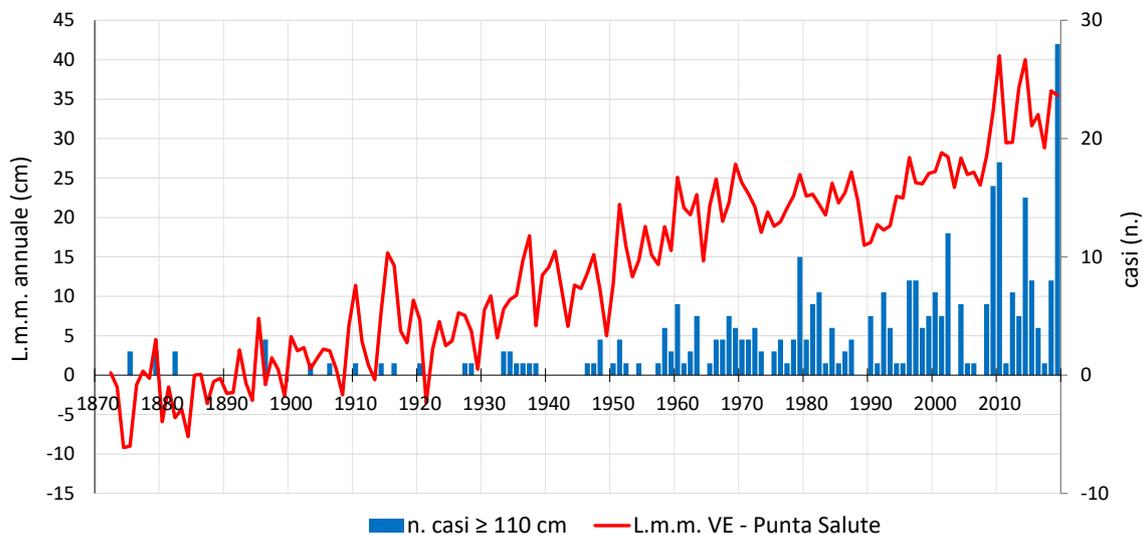


Figura 4: Venezia – Punta Salute: livello medio annuo del mare (linea rossa) e numero di eventi mareali annuali maggiori o uguali a 110 cm (istogramma azzurro).

1.2 Situazione meteorologica e condizioni del mare

All’inizio del novembre 2019 la situazione nel Mediterraneo centrale presentava una configurazione caratteristica del periodo autunnale, anche se non frequente: due anticloni, l’anticiclone delle Azzorre e un anticiclone sull’Est europeo (Figura 5). Questa configurazione ha favorito l’avvezione di aria fredda da Nord sul Mediterraneo occidentale, inducendo una circolazione ciclonica, con il conseguente formarsi di una saccatura depressionaria nella regione compresa tra la Sardegna, la Sicilia e la costa della Tunisia. Questa configurazione a scala sinottica è associata a venti

di Scirocco costanti lungo tutto l’asse del Mare Adriatico, che come ben noto inducono un accumulo di acqua nel Golfo di Venezia. Inoltre, se la circolazione è ampia, come nello scorso novembre, questa induce in modo continuo venti da Sud-Est anche nell’alto mar Ionio, rendendo difficile il deflusso della marea dallo stretto di Otranto, e quindi contribuendo al mantenimento di un elevato livello medio nel bacino Adriatico.

Nel 2019 tale configurazione ha presentato una persistenza anomala, interessando l’area mediterranea per quasi tutto il mese di novembre e favorendo il perdurare di situazioni di instabilità atmosferica, associate a numerosi fronti perturbativi.

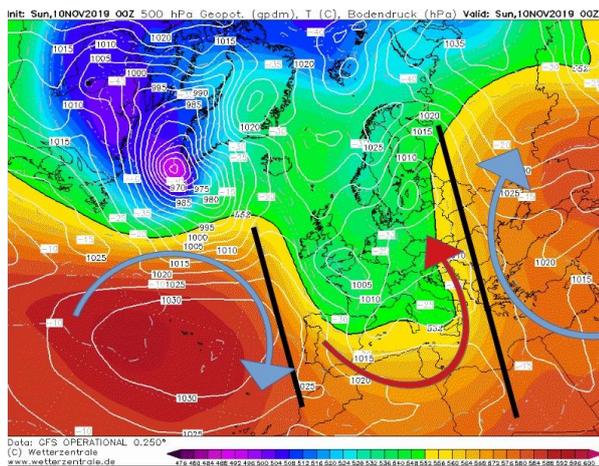


Figura 5: Configurazione barica su scala sinottica per il 10 novembre 2019 alle ore 00:00 UTC nelle rianalisi del Global Forecast System (GFS) del National Weather Service degli Stati Uniti (per gentile concessione del GFS, tramite portale Wetterzentrale). Le aree colorate indicano la pressione in quota (tecnicamente, geopotenziale a 500 hPa) e le linee bianche le isobare alla superficie. Le linee tratteggiate indicano le isoterme. In figura sono raffigurate due linee nere a rappresentare idealmente la situazione di blocco, mentre le frecce indicano la circolazione indotta da quest'ultima.

L'effetto di questa configurazione è riscontrabile anche dall'analisi della differenza di pressione atmosferica registrata presso la Piattaforma "Acqua Alta", posta al largo delle coste veneziane, e presso la stazione mareografica di Otranto. Questa differenza rappresenta un valido indicatore (*proxy*) delle situazioni meteorologiche che favoriscono gli eventi di acqua alta. Infatti a ogni picco negativo della differenza di pressione (differenziale barico) corrisponde, per le particolari condizioni che caratterizzano la meteorologia del bacino Adriatico, un evento intenso di vento dai quadranti meridionali – tipicamente di Scirocco – con conseguente sovrizzo del livello del mare rispetto alla marea astronomica (Figura 6). La differenza media di pressione atmosferica (maggiore a sud e minore a Nord) provoca inoltre uno spostamento della massa d'acqua verso l'area di pressione inferiore (effetto barometrico inverso).

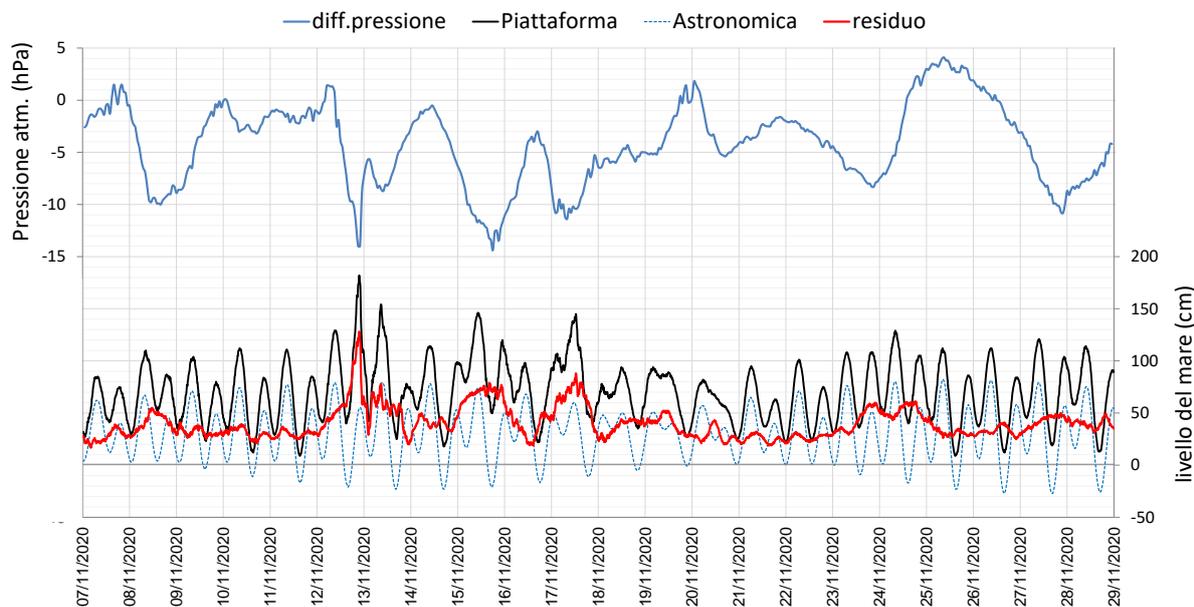


Figura 6: Sopra: differenza di pressione atmosferica tra le porzioni distali del bacino Adriatico (Piattaforma "Acqua Alta", posta al largo delle coste veneziane, e Otranto). Sotto: serie dell'andamento del livello di marea dal giorno 7 al giorno 28 novembre al largo della costa veneziana (Piattaforma "Acqua Alta"). La linea nera indica il livello registrato della marea, la linea tratteggiata la marea astronomica, la linea rossa rappresenta il contributo meteorologico² (storm surge).

² La marea osservata (livello del mare misurato) è dovuta alla somma di più componenti di cui le principali sono: la marea astronomica (componente periodica correlata al moto dei corpi celesti Luna e Sole, che è calcolabile con larghissimo anticipo) e la componente meteorologica (*storm surge*); in particolare, il contributo meteorologico è dovuto all'effetto del vento e alle differenze di pressione. In caso di eventi particolarmente violenti, in zone costiere, diventa importante anche il possibile innalzamento del livello del mare dovuto a mareggiate locali (*wave setup*).

La persistenza di questa struttura barica durante il mese di novembre ha provocato quindi un aumento del livello medio del mare, in particolare nel nord Adriatico; a Venezia si è registrato un valore mensile del livello medio del mare di quasi 68 cm sul livello ufficiale di riferimento ZMPS, quasi 30 cm sopra la media dell'ultimo venticinquennio (Figura 7). Con un livello medio così alto, la sola escursione di marea astronomica è sufficiente per generare livelli tali da portare all'allagamento di parte della città.

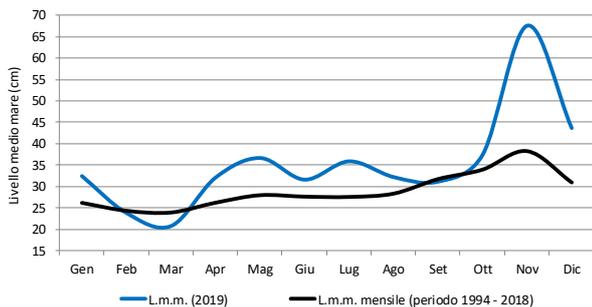


Figura 7: Confronto tra i valori medi mensili del livello del mare per il periodo 1994–2018 (linea nera) e per l'anno 2019 (linea blu) registrati nella stazione di Punta della Salute.

2 L'evento del 12 novembre

Il 12 novembre 2019 si è verificato a Venezia un evento di acqua alta eccezionale secondo solo all'evento del 4 Novembre 1966, che ha portato all'allagamento di quasi il 90% della città. Tale evento, pur rientrando nella fenomenologia tipica degli eventi che originano le acque alte, ha presentato caratteristiche singolari fra cui la presenza locale di un forte vento (100 km/h di media e 110 km/h di raffica).

Tra le cronache locali, gli operatori VERITAS, che si trovavano a San Zaccaria al momento dell'aumento del vento, raccontano di aver sentito un "boato" che ha preceduto il vento (associato probabilmente all'arrivo della raffica più potente) e di una "ondata d'aria" che li ha travolti. Raccontano come in pochi istanti le passerelle per l'acqua alta, sebbene già accatastate, abbiano cominciato a volare da ogni parte e l'edicola davanti al pontile di San Zaccaria sia stata sradicata e spinta verso il ponte. Poco più in là, il

prefabbricato dei controlli doganali di Riva dei Sette Martiri veniva anch'esso sradicato e sospinto verso l'interno. Sempre a San Zaccaria, gli operatori VERITAS, che a stento sono riusciti a trattenersi a forza alle colonnine del ponte, hanno visto un taxi incunearsi nella calle a fianco dell'hotel Danieli e alcune imbarcazioni della Guardia di Finanza rompere gli ormeggi all'interno della darsena coperta della Giudecca. Dai filmati si vedono i battelli del servizio pubblico ACTV agitarsi e sbattere violentemente uno contro l'altro. Via Garibaldi si è tramutata in una sorta di fiume in piena con una corrente molto intensa. Similmente, alle Zattere un'edicola è stata scaraventata verso il centro del Canale della Giudecca, a circa 20 m dalla sua posizione originale, ed è sprofondata verticalmente nelle acque del canale.

2.1 Analisi della dinamica meteorologica

Per comprendere le cause dell'*Aqua grande* del 12 novembre è necessario ricostruire la situazione meteorologica di quel giorno, che si è sviluppata nel quadro della particolare situazione meteorologica dell'intero mese, sopra descritta.

Una prima percezione dell'eccezionalità del fenomeno emerge dal confronto con l'evento del 29 ottobre 2018, la cosiddetta *tempesta Vaia*, da cui appare evidente che la causa dei livelli di marea eccezionali registrati il 12 novembre 2019 non sia riconducibile al solo vento di Scirocco in Adriatico (Figura 8). Durante la *tempesta Vaia*, i venti di Scirocco hanno soffiato sull'intero Mare Adriatico con intensità molto elevate su tutto il bacino, cosa che non è successa il 12 novembre 2019. Tuttavia, in quella occasione, i valori massimi di livello registrati a Venezia sono stati inferiori a 160 cm. Sebbene nel 2018 il contributo meteorologico fosse decisamente maggiore, il picco di tale contributo si è verificato in corrispondenza di un minimo di marea astronomica. Al contrario, per una sfortunata coincidenza, nell'evento del 12 novembre 2019 il picco del contributo meteorologico è stato perfettamente in fase con il picco di marea astronomica.

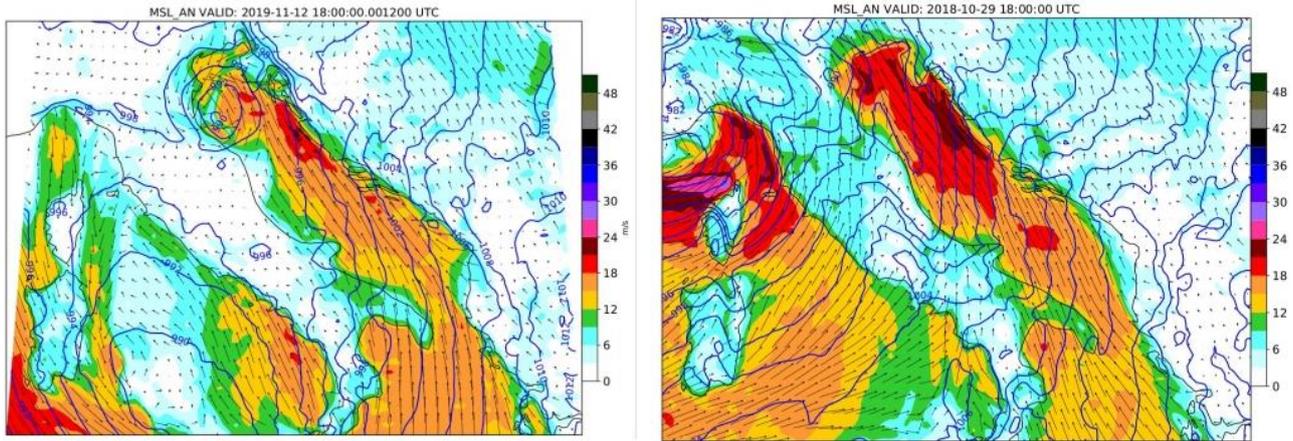


Figura 8: Confronto dell'intensità del vento registrata nel bacino Adriatico durante l'evento del 12 novembre 2019 (a sinistra) e del 29 ottobre 2018 in occasione della Tempesta Vaia (a destra). Campi di analisi prodotti dall'ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

Oltre a ciò, decisamente inusuale è stata la forza del vento locale, dovuta a una situazione meteorologica eccezionale. L'analisi dettagliata della dinamica della circolazione atmosferica può aiutare a comprendere quanto accaduto nella sera del 12 novembre.

Fra l'11 e 12 novembre lo spostamento del centro depressionario verso il Tirreno meridionale ha indotto venti di Scirocco lungo l'Adriatico, ma limitati al bacino centrale. Nell'Adriatico settentrionale erano presenti persistenti venti da Nord, Nord-Est con velocità medie fino a 14 m/s.

Nel corso del 12 novembre lo spostamento verso Nord-Est del minimo di pressione principale presente sul Mar Tirreno (L1 in Figura 9) ha provocato la formazione di un minimo secondario sull'Adriatico, sottovento all'Appennino umbro-marchigiano. Si tratta di un evento analogo – su scala ridotta – alla ben più comune formazione di un ciclone sul Golfo di Genova per effetto dell'interazione tra una bassa pressione in arrivo da Ovest e il rilievo alpino (la cosiddetta "ciclogenesi alpina"): un oggetto meteorologico estremamente raro in Alto Adriatico, come dimensione spaziale e temporale, e con un'evoluzione altrettanto inconsueta.

Nel pomeriggio, questa depressione locale si è spostata verso Nord-Ovest fino all'Alto Adriatico (L2 in Figura 9), generando un rinforzo di venti di

Bora e Scirocco nella sua risalita dalle Marche al Veneto.

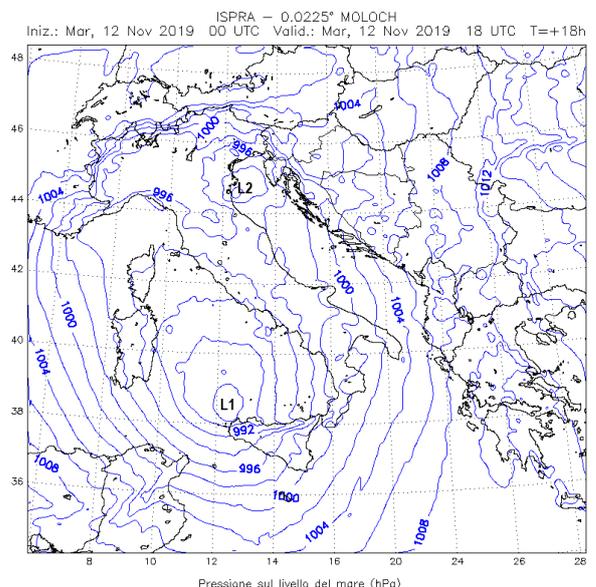


Figura 9: Previsione della pressione s.l.m. per le ore 19:00 (1800 UTC) del 12 novembre. A titolo di esempio si riporta la previsione prodotta dal modello MOLOCH (sviluppato dal CNR-ISAC) del SIMM – Sistema Idro-Meteo-Mare dell'ISPRA. Sul Tirreno centro-meridionale era presente una profonda depressione barica (denominata L1) che generava forti venti di Scirocco lungo l'asse principale dell'Adriatico. La sera del 12 novembre risulta essere anche presente una depressione secondaria (L2), in passaggio sul delta del Po con direzione da Sud a Nord.

Le previsioni per il 12 novembre del modello globale dell'ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts individuavano correttamente la situazione del vento di Scirocco (Figura 10), la formazione del minimo secondario e, su grandi linee, la sua traiettoria. Ciò vale anche

per i modelli meteorologici ad area limitata (BOLAM del SIMM – Sistema Idro-Meteo-Mare del ISPRA, COSMO-LAMI) impiegati anch'essi per la previsione dell'acqua alta in Alto Adriatico e sulla Laguna di Venezia.

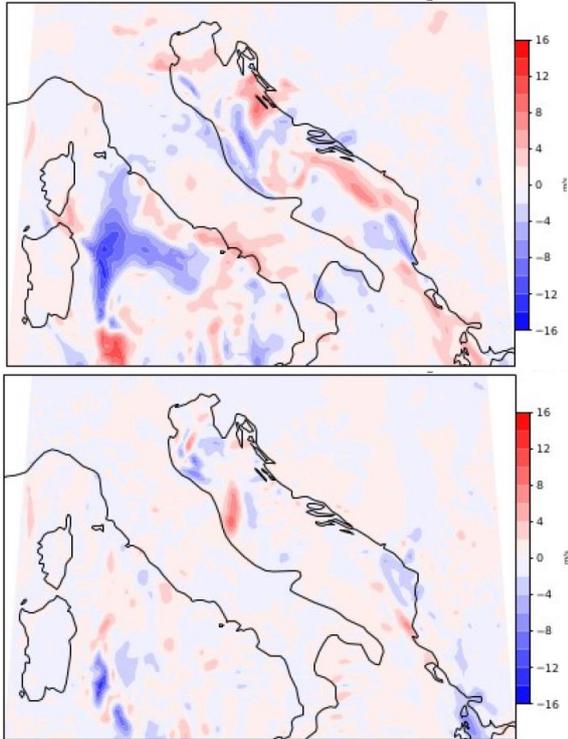


Figura 10: Sopra, indicazione della sovrastima (area rossa) e sottostima (area blu) delle velocità del vento prevista dall'ECMWF per le ore 12:00 del giorno 12 novembre rispetto ai campi meteo di analisi. Sotto, un grafico analogo per le ore 18:00 del giorno 12 novembre.

Tuttavia, il passaggio del minimo secondario di pressione a Sud-Ovest della Laguna di Venezia previsto, in generale, dai modelli meteorologici

non concorda con le osservazioni a terra e da satellite che ne evidenziano invece il transito sopra la Laguna (Figura 11, Figura 12, Figura 13). Inoltre, la depressione prevista dai modelli meteorologici era molto meno profonda rispetto a quanto osservato, con conseguente sottostima dell'intensità del vento in Nord Adriatico e in Laguna, associato al passaggio del minimo secondario.

Per tutta la giornata, fino alla sera, i modelli meteorologici avevano previsto correttamente la diminuzione costante della pressione atmosferica fino al valore di circa 993 hPa in mare (Piattaforma "Acqua Alta") poco prima delle 19 e in centro storico (Palazzo Cavalli) alle ore 20, valore ben previsto (Figura 12).

Da quel momento i dati misurati cominciano però a discostarsi significativamente dalle previsioni, evidenziando il passaggio di una depressione molto intensa e localizzata. La pressione misurata continua infatti a diminuire molto rapidamente, perdendo complessivamente circa 6 hPa in due ore e raggiungendo così i minimi di 986,6 hPa in Piattaforma e di 987,5 hPa a Palazzo Cavalli (Figura 12). L'errore nella previsione meteorologica si deve soprattutto proprio alla sottostima della profondità del minimo barico e, in misura minore, all'inesattezza della traiettoria percorsa (con un errore dell'ordine dei 50 km) e della tempistica del passaggio (con un errore dell'ordine delle 2 ore).

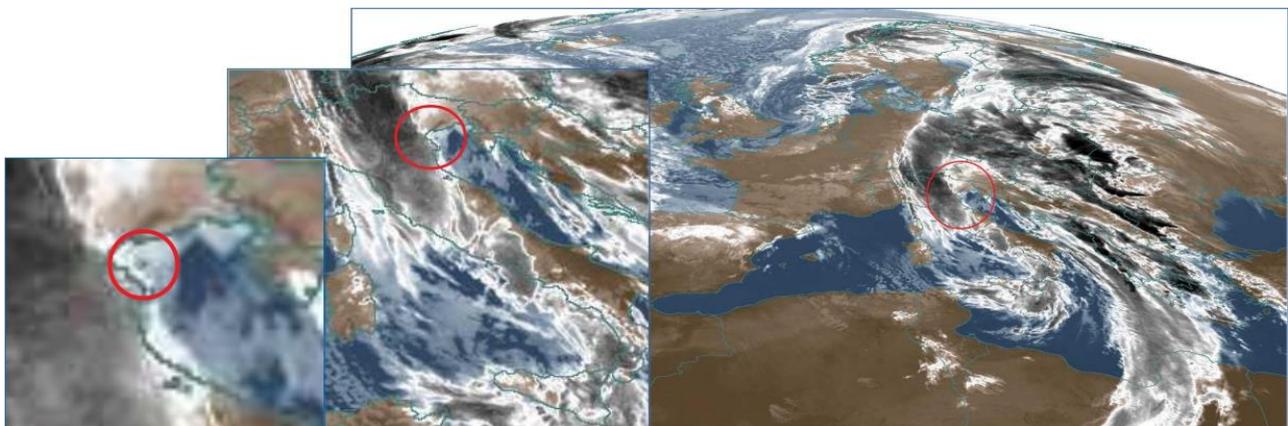


Figura 11: Immagine Meteosat delle ore 2100 UTC del 12 novembre 2019. Il cerchio rosso evidenzia la presenza del ciclone secondario (per gentile concessione dell'EUMETSAT).

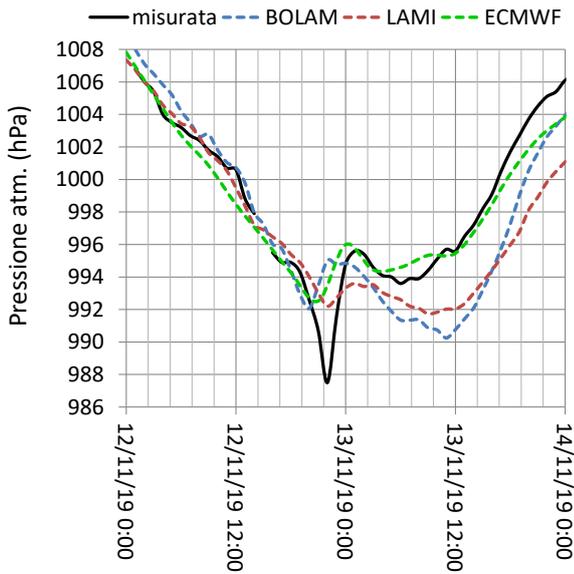


Figura 12: Confronto tra la pressione misurata alla stazione di Palazzo Cavalli (linea continua in nero) e quella prevista nel punto griglia più vicino dal modello globale dell'ECMWF (linea tratteggiata in verde), dal modello ad area limitata COSMO-LAMI (linea tratteggiata in rosso) e dal modello BOLAM del SIMM (linea tratteggiata in azzurro).

Molto significativa è anche l'analisi dei dati di vento, il cui andamento conferma il passaggio di una formazione ciclonica molto compatta sull'area del Golfo di Venezia e della laguna centrale tra le 20:00 e le 23:00 circa, mentre fino a poco prima, in tutto l'Alto Adriatico era presente un intenso vento di Bora da Nord-Est (Figura 13a).

Alle 20:10, il sensore del vento del CPSM, presso la stazione "sentinella" Meda "Abate" posizionata a circa 40 km a Est dalla costa di Chioggia, misura una variazione repentina del vento da Nord ad Est Sud-Est, aumentando di intensità (Figura 13b). Tutte le altre stazioni invece segnalano ancora direzioni del vento da Nord-Est.

Alle 21:00 circa anche la Piattaforma inizia a registrare vento da Est, mentre a Foce Po (area del delta) il vento ruota in senso antiorario posizionandosi con direzione da Sud Ovest (Figura 13c). Tale configurazione conferma la presenza di una struttura ciclonica al largo della costa veneta a Nord del delta del Po.

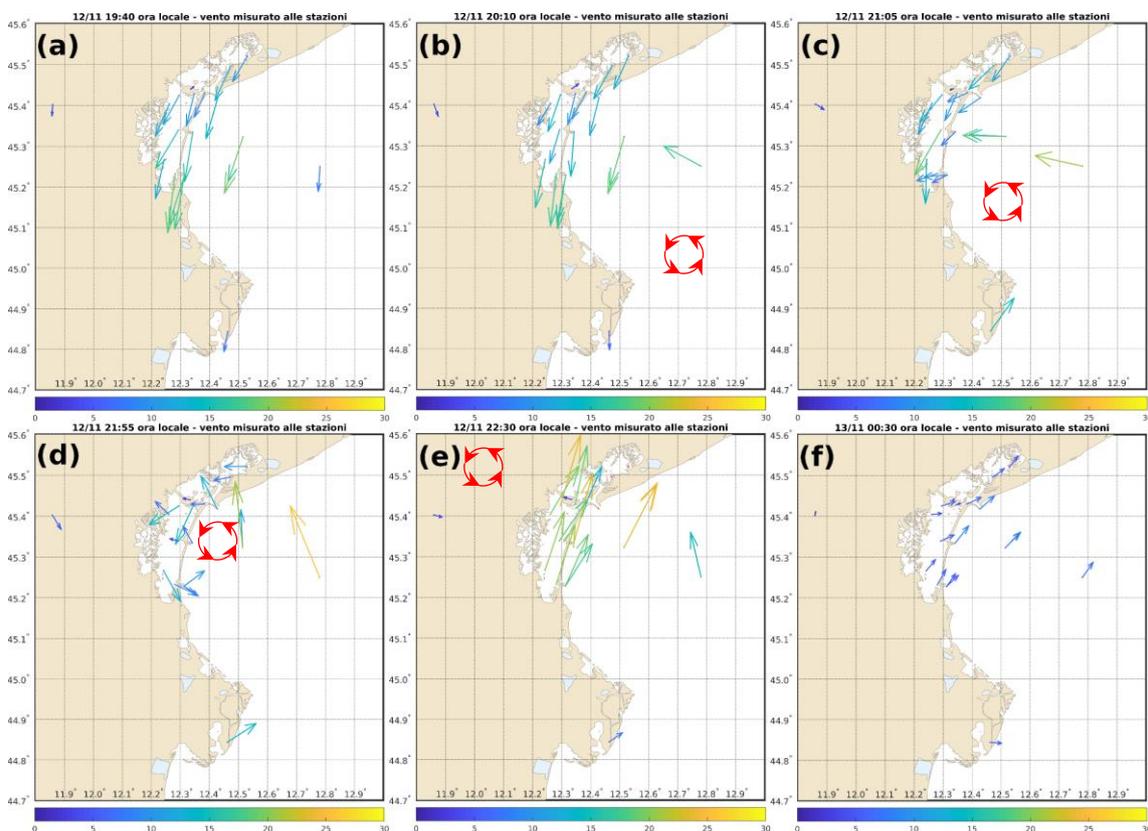


Figura 13: Intensità e direzione del vento in Alto Adriatico e in Laguna di Venezia registrato dalle varie stazioni meteo-mareografiche, dalle ore 19:40 del 12 novembre alle ore 00:30 del 13 novembre 2019. Il simbolo rosso, che rappresenta la posizione ipotetica del minimo che ha attraversato il Golfo di Venezia, è inserito al solo scopo di agevolare la lettura dei dati di vento.

Alle 21:55 l'intensità del vento nel golfo di Venezia aumenta (Meda "Abate" e Piattaforma "Acqua Alta") e ruota con direzione del vento da Sud. Anche il vento in laguna, dove fino a quel momento tutte le stazioni registravano venti da Nord, Nord-Est, inizia a ruotare, diminuendo in parte di intensità, ma in modo non uniforme: alla bocca di Lido si orienta con direzione da Sud, Sud-Est; a San Giorgio il vento si mantiene da Nord-Est; alla bocca di Chioggia si posiziona da Sud-Ovest (Figura 13d). Una configurazione con un orientamento "circolare", che indica la presenza di una piccola struttura ciclonica al largo della costa centrale della laguna di Venezia.

Alle 22:30 la variazione del vento è molto rapida. In tutta la laguna il vento aumenta fortemente di intensità, orientandosi in modo uniforme con direzione da Sud-Ovest (Figura 13e). Pochi minuti di raffiche violentissime, che in bacino di San Marco toccano i 30 m/s, circa 110 km/h, e poi il vento improvvisamente cala di velocità portandosi a valori attorno a 6 m/s e praticamente nulli a mezzanotte (Figura 13f).

Una indicazione del passaggio locale del minimo barico è data dalla sequenza dei venti misurati, tipicamente così caratterizzata: attorno ai 20 m/s (circa 70 km/h), seguita, 20-30 minuti dopo da una diminuzione di oltre 10 m/s, per poi, dopo altri 20 minuti circa, tornare su valori di velocità ancora più alti di prima (Figura 13). Per esempio: Malamocco passa da 18 da NE a 5 m/s per poi riportarsi a 24 m/s da SO; San Giorgio da 21 da NE a 8 m/s e poi a 25 m/s da SO; San Giorgio in Alga da 15 da NE a 7 m/s per misurare 20 minuti dopo, 24 m/s da SO. Valori ancora più alti in mare aperto con velocità che passano da 9 m/s a 28 m/s.

Associate al variare del vento, vi sono anche repentine variazioni della pressione atmosferica e della temperatura dell'aria coerenti con la descrizione fornita sopra del passaggio del ciclone secondario sull'Alto Adriatico e sulla laguna: un oggetto compatto con un massimo di temperatura in corrispondenza del minimo di pressione,

diminuzione di vento al centro e forti venti intorno (Figura 14).

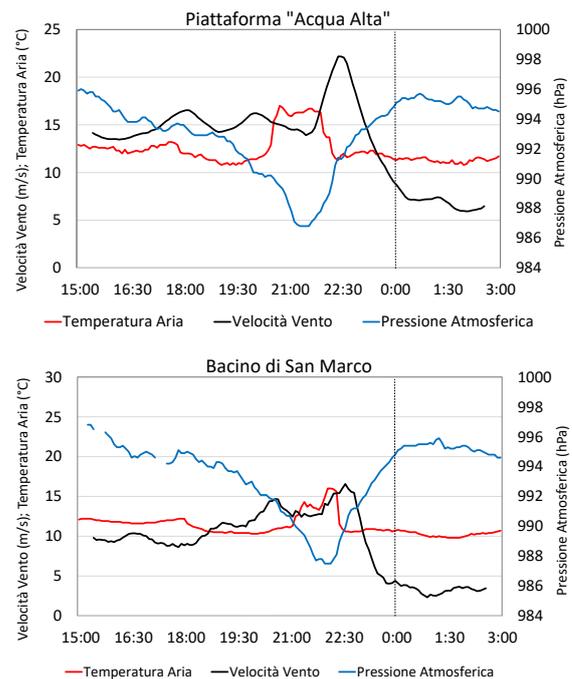


Figura 14: Andamento della temperatura dell'aria (linea rossa), della velocità del vento (linea nera) e della pressione atmosferica (linea blu) alla Piattaforma "Acqua Alta" e in Bacino di San Marco.

Durante il passaggio del ciclone secondario si osserva infatti il contemporaneo abbassamento della pressione, prima l'aumento e dopo la diminuzione della temperatura dell'aria, analoghe al passaggio di un fronte caldo seguito da uno freddo. La velocità del vento aumenta con l'ingresso e l'uscita del ciclone, per attenuarsi proprio durante il transito.

2.2 Andamento dei livelli di marea

Il 12 novembre già al mattino il contributo meteorologico addizionato alla marea astronomica aveva fatto segnare un livello massimo a Punta della Salute di 127 cm. Le previsioni meteo per il mattino del 12 novembre si erano mostrate piuttosto accurate, sebbene con velocità del vento leggermente sovrastimata rispetto a quanto osservato, tanto che la previsione di 140 cm per le ore 10:30 si è dimostrata leggermente eccessiva rispetto ai 127 cm registrati. Per tutta la tarda mattinata e il pomeriggio il vento osservato lungo l'Adriatico confermava le previsioni.

Tra le 18:00 e le 20:00 il contributo meteorologico sembrava essersi stabilizzato attorno ad un valore di 80 cm (Figura 15), che sommato ai 56 cm corrispondenti al valore massimo della marea astronomica della sera, avrebbe dovuto portare a un livello massimo del mare a Punta della Salute prossimo a 140 cm.

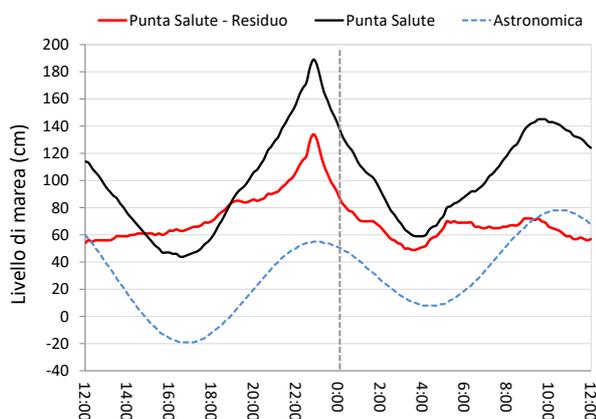


Figura 15: Livello di marea registrato al mareografo di Venezia – Punta della Salute lato Canal Grande (linea nera), marea astronomica (linea blu tratteggiata) e valore del residuo (linea rossa) tra le ore 12:00 del 12 novembre e le ore 12:00 del 13 novembre 2019.

Tra le 21:00 e le 22:00 il contributo meteorologico ha ripreso a crescere (Figura 15) portando i livelli del mare in Alto Adriatico e alle bocche di Porto a valori maggiori di quelli previsti. In mare, i valori di livello massimi sono stati registrati alle 21:30-21:35 in Piattaforma (184 cm) e a Chioggia Diga Sud (185 cm) (Figura 16, a sinistra), e 20 minuti più tardi alla bocche di porto di Malamocco (199 cm, alle 21:50) e alla bocca di Lido (195 cm, alle 21:55) (Figura 16, al centro).

Alle 21:55, all'interno della laguna il livello presentava un marcato gradiente decrescente da Sud a Nord: 169 cm a Chioggia città (Laguna meridionale), 155 cm a Venezia Punta della Salute e 154 cm alla Misericordia (Laguna centrale), 130 cm a Burano e 95 cm a Grassabò (Laguna settentrionale). Queste differenze di livello all'interno della laguna erano il risultato della situazione meteorologica presente fino a tarda sera, caratterizzata da Scirocco in Adriatico e vento locale da Nord-Est nel Golfo di Venezia, con

conseguente spostamento della massa d'acqua da Nord a Sud.

Tra le 22:00 e le 22:50 (istante in cui è stato registrato il picco a Punta della Salute) i livelli di tutta la laguna hanno subito variazioni repentine:

- a partire dalle 22:00, a Venezia il livello del mare è salito rapidamente, fino a raggiungere alle 22:50 il picco di 189 cm al mareografo di Punta della Salute lato Canale della Giudecca (con un aumento di 33 cm in meno di un'ora), valore particolarmente elevato, se considerato che la marea astronomica era prossima al colmo (Figura 17, linea rossa);
- sul lato opposto della città, ovvero alla Misericordia, il livello tra le 22:00 e le 22:30 sembrava aver raggiunto il colmo attorno a 160 cm (Figura 17, linea grigia); alle 22:45 ha ripreso improvvisamente a crescere, raggiungendo il massimo di 173 cm alle 23:00 (quindi con una differenza di -15 cm rispetto a Punta della Salute);
- valori massimi prossimi a quelli di Punta della Salute sono stati registrati a Marghera (186 cm) e Tessera (187 cm), mentre risultano inferiori presso le stazioni mareografiche a Nord della città di Venezia (164 cm a Sant'Erasmus e 156 cm Burano) (Figura 18);
- al di fuori delle tre bocche di porto, il livello del mare dopo aver raggiunto i valori di picco è sceso molto rapidamente (di oltre 80 cm in un'ora alla diga del Lido e di oltre 60 cm alle altre due bocche) (Figura 16).

L'analisi dei dati osservati, indica come la rapida variazione dei livelli sopra descritta sia stata causata non solo dagli apporti in ingresso in laguna attraverso le tre bocche di porto, ma anche dal cambio di direzione e intensità del vento (Figura 16, Figura 17), con conseguente spostamento verso Nord anche della massa d'acqua già presente all'interno della laguna meridionale.

Dal confronto tra i dati di vento registrati nella stazione di Petta de Bò (Laguna Sud) e i livelli di marea si nota infatti una perfetta corrispondenza,

dalle ore 22:00, tra l'inversione della direzione del vento da Nord-Est a Sud-Ovest, con aumento della sua intensità, e la cuspide del livello del mare registrato a Punta della Salute (Figura 17). Da evidenziare come questo abbia portato ad un ulteriore aumento del contributo meteorologico proprio in corrispondenza del picco di marea astronomica (Figura 15). Analogo comportamento si osserva sui valori dei livelli massimi registrati nelle altre stazioni esposte al vento da Sud-Ovest, in particolare Marghera e Tessera.

Diversamente, la stazione mareografica della Misericordia, distante poco più di 1 km da Punta della Salute, non viene inizialmente influenzata dal sovrizzo dovuto al vento da Sud-Ovest, per l'effetto diga esercitato da Venezia. Successivamente però il livello è salito anche alla Misericordia, seppur attenuato per il più lento deflusso dell'acqua attraverso i rii della città. Questo ha provocato una elevata differenza di

livello tra le due sponde opposte della città (di circa 20 cm tra le 22:35 e le 22:50), fenomeno molto raro, causa della forte corrente che si è generata in tutti i canali di comunicazione fra i lati Nord e Sud di Venezia, e addirittura in via Garibaldi, quando la marea ha raggiunto un livello tale da mettere in comunicazione diretta le due zone lagunari.

Una conferma di come l'innalzamento del livello a Venezia dalle 22:00 in poi non sia riconducibile esclusivamente alla normale propagazione della marea dalle bocche all'interno della laguna, ma anche a dinamiche interne causate dal passaggio del minimo depressionario sopra descritto, deriva dal confronto tra il livello massimo misurato a Punta della Salute (189 cm) e i livelli sensibilmente inferiori registrati in prossimità delle bocche di Lido (Meda Bocca Lido, 171 cm alle 21:55) e Malamocco (Faro Rocchetta, 169 cm alle 22:25) (Figura 18).

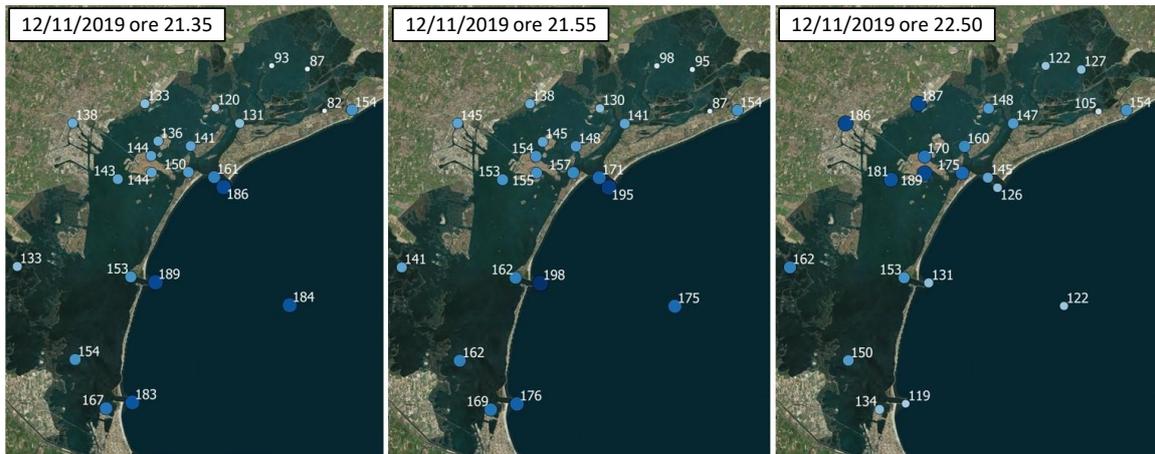


Figura 16: Valori del livello di marea registrati: a sinistra alle ore 21:35 (orario in cui è stato registrato il valore massimo alla Piattaforma); al centro alle ore 21:55 (orario in cui sono stati registrati il valore massimo al mareografo di Lido Diga Sud); a destra alle 22:50 (orario in cui è stato registrato il valore massimo di 189 cm a Punta della Salute lato Giudecca).

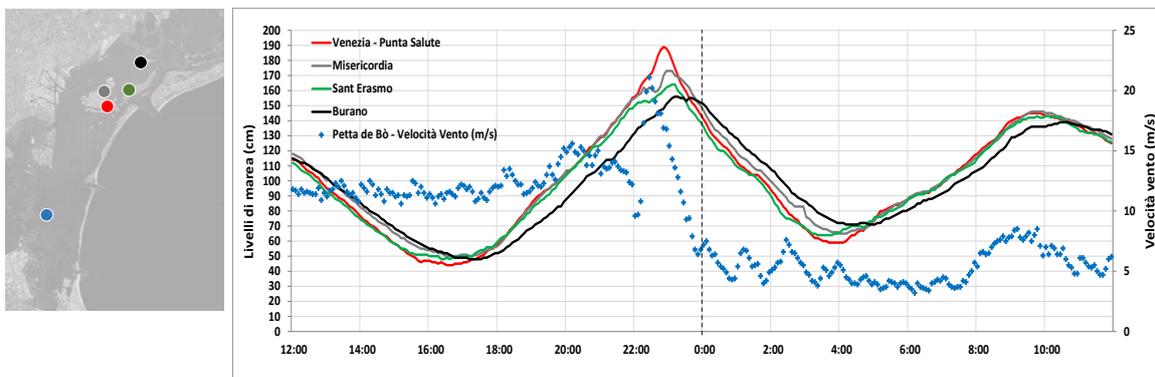


Figura 17: Valori di marea osservata in laguna settentrionale (Punta della Salute, Misericordia, Sant'Erasmus, Burano). I puntini indicano la velocità del vento nel centro della laguna Sud, nella stazione di Petta de Bò.



Figura 18: Livelli massimi raggiunti nelle stazioni mareografiche della Laguna di Venezia e dell'arco costiero Nord Adriatico il 12 novembre 2019.

È comunque la complessiva distribuzione dei massimi registrati nei mareografi di tutta la laguna a testimoniare la particolarità dell'evento, caratterizzata da valori più elevati in Bacino di San Marco e nell'area tra Venezia e la terraferma e valori inferiori in laguna meridionale e settentrionale (Figura 18). Tale distribuzione evidenzia l'effetto locale del susseguirsi dei venti di Bora per l'intera giornata e del forte vento da Sud-Ovest indotto dal passaggio della perturbazione sopra la laguna in tarda serata.

Livelli elevati sono stati registrati in tutto l'Alto Adriatico (Figura 18). Prima di arrivare a Venezia, il passaggio del nucleo di bassa pressione ha infatti interessato, con una dinamica molto simile, anche la costa Adriatica a Sud della Laguna di Venezia, ed in particolare le lagune del Delta del Po, quali Porto Caleri e la Sacca di Scardovari. Il valore massimo a Porto Caleri è stato di 187 cm, registrato alle 21:55. Valori analoghi sono stati rilevati anche lungo la costa a Nord della laguna di Venezia, presso i mareografi di Caorle (186 cm alle ore 22:15) e Grado (184 cm alle 22:40).

Conclusioni

L'evento del 12 novembre è risultato particolarmente intenso a causa della

concomitanza di quattro fattori: l'anomalo livello medio del mare Mediterraneo e dell'Alto Adriatico, la persistenza del vento di Scirocco lungo il bacino Adriatico, la coincidenza del massimo del contributo meteorologico con il picco della marea astronomica di sizigia, il passaggio di un minimo depressionario secondario, particolarmente intenso, sopra la laguna di Venezia.

Inoltre quest'ultimo evento ha generato in brevissimo tempo delle onde di notevole ampiezza che, addizionate all'elevato livello del mare, hanno causato danni devastanti sul lato Sud della città di Venezia e a riva Sette Martiri in particolare.

Si è trattato di una conformazione meteorologica con caratteristiche peculiari e inusuali, con una perturbazione di piccole dimensioni e alta velocità di propagazione lungo la costa, che per sua natura è di difficile previsione nel dettaglio. Tali caratteristiche hanno indotto i modelli di previsione meteorologica a una sottostima dell'intensità di vento e del minimo barico.

Gli errori di previsione della traiettoria e della profondità del ciclone che si sono riscontrati nella prima serata del 12 novembre hanno avuto una ripercussione nella previsione dei livelli di marea fornita dai modelli operativi, causando una

sottostima del picco di acqua alta. Ciononostante, l'impiego delle previsioni fornite dai modelli meteorologici ad area limitata ha permesso di ridurre parzialmente l'impatto dell'errore sulla previsione di marea. Ciò conferma che la direzione intrapresa in questi ultimi anni, volta a rafforzare l'impegno per lo sviluppo e impiego di modelli meteorologici ad altissima risoluzione, potrebbe favorire una maggiore capacità predittiva di questi particolari fenomeni meteo.

La previsione numerica e le misurazioni sono strumenti imprescindibili per assicurare un elevato livello di protezione alla cittadinanza. Il CPSM e l'ISPRA, con il supporto scientifico del CNR-ISAC (per la modellistica meteo) e del CNR-ISMAR (per

la modellistica idrodinamica e di onde), assieme a ricercatori di altri istituti del CNR, come CNR-IBF e CNR-ISP, e con il contributo del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), lavorano quotidianamente per il miglioramento degli strumenti di previsione e la stima della loro incertezza.

In un periodo in cui sono evidenti gli effetti dei cambiamenti climatici, caratterizzato da eventi sempre più frequenti, localizzati e intensi, la consapevolezza dell'incertezza associata ai fenomeni meteo-marini dovrà essere compresa e impiegata tanto nei sistemi previsionali quanto nelle misure intraprese dalle istituzioni e nella condotta dei singoli cittadini.