

# IL MARE E I GHIACCI

## SEGNALI DAL CLIMA IN FVG (2023):

LIVELLO MEDIO DEL MARE: IN CRESCITA ANCHE A TRIESTE	26
SCENARI FUTURI DI INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE	29
TEMPERATURA MEDIA DEL MARE, FRA LE PIÙ ALTE DEGLI ULTIMI VENTI ANNI	32
ONDATE DI CALORE MARINE: LA SITUAZIONE GENERALE E IL CASO DEL 2022	33
L'ACIDIFICAZIONE MARINA: UN FENOMENO GLOBALE CHE INTERESSA ANCHE I NOSTRI MARI	35
SCENARI DI INONDAZIONE COSTIERA: LA REALTÀ DI GRADO	38
LA MARINIZZAZIONE DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO	43
LA CRIOSFERA DELLE ALPI GIULIE, EVOLUZIONE PASSATA E RECENTE	47
LA VALANGA DI GHIACCIO IN MARMOLADA	52

# IL MARE E I GHIACCI

estratto da:

## SEGNALI DAL CLIMA IN FVG

CAMBIAMENTI - IMPATTI - AZIONI

maggio 2023

notizie dal

Gruppo di lavoro tecnico-scientifico

Clima FVG

*“Segnali dal Clima in FVG” è realizzato da:*

**ARPA FVG - Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia**

*nell'ambito dell'attività di coordinamento e segreteria del “Gruppo di lavoro tecnico scientifico Clima FVG” istituito dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con Decreto DC Difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile, n. 2137 del 04/05/2022*

**Coordinamento editoriale:**

**Federica Flapp, Fulvio Stel**

**Elaborazione grafica:**

**Ester Curci, Federica Flapp, Michela Mauro**

**“Segnali dal Clima in FVG” ospita articoli firmati da vari autori: ciascun autore è responsabile per i contenuti (testi, dati e immagini) dei propri articoli ed esclusivamente di essi.**

**ARPA FVG, gli altri enti del “Gruppo di lavoro tecnico scientifico Clima FVG” e i singoli autori non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.**

**Ove non diversamente specificato, le immagini sono state fornite dagli autori dei diversi contributi, che se ne assumono la responsabilità, o sono tratte da:**

<https://pixabay.com/it/>

<https://www.google.com/maps>

<https://it.freepik.com/>

**La foto di copertina è di Agostino Manzato.**

**ARPA FVG**

**Via Cairoli, 14 - 33057 Palmanova (UD)**

**Tel +39 0432 922 611 - Fax +39 0432 922 626**

**[www.arpa.fvg.it](http://www.arpa.fvg.it)**

**<https://twitter.com/arpafvg>**

**Questo prodotto è rilasciato con licenza Creative Commons - Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0):**

**Può essere quindi utilizzato citando la fonte, nel rispetto delle condizioni qui specificate:**

**informazioni generali <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.it>**

**licenza <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.it>**



# Segnali dal Clima

*Segnali dal Clima in FVG* è una pubblicazione divulgativa che racconta i cambiamenti climatici partendo da un'ottica locale e regionale e affronta questo grande tema da tre prospettive: CAMBIAMENTI, IMPATTI, AZIONI.

Nasce dall'impegno del Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG e dalla convinzione che le sfide che i cambiamenti climatici pongono alla nostra società si possano affrontare efficacemente solo se allo sviluppo scientifico e tecnologico si accompagnano una crescita della conoscenza e una consapevolezza sempre più diffusa sul tema da parte di tutta la popolazione.

*Segnali dal Clima* affronta diversi aspetti dei cambiamenti climatici partendo dal racconto di eventi e situazioni che hanno riguardato il Friuli Venezia Giulia nel 2022, ma anche evidenziando come la dimensione locale sia collegata a quella globale attraverso riferimenti a eventi e situazioni verificatisi al di fuori della nostra regione e su scala più ampia.

Al racconto degli eventi e dei fenomeni si accompagnano le spiegazioni delle cause che li hanno prodotti. Un filo rosso - CAMBIAMENTI, IMPATTI, AZIONI - unisce i diversi articoli, i nostri "segnali dal clima", collegando i cambiamenti in atto con i loro effetti sull'ambiente e sulle attività umane, ma anche con le azioni che possiamo mettere in campo sia per limitare il riscaldamento globale e i cambiamenti del clima (mitigazione) che per ridurre gli impatti che ne conseguono (adattamento).

Il 2022 è stato l'anno più caldo mai registrato in Friuli Venezia Giulia: alle alte temperature si è associata una grave e prolungata siccità, che ha determinato pesanti conseguenze per il nostro territorio. Alle criticità più acute che hanno occupato le pagine dei giornali per diversi mesi si affianca però un flusso più graduale e meno evi-dente di effetti che si manifestano negli anni. Il racconto parte quindi dagli argomenti più propriamente "climatici" - a iniziare dalle temperature dell'aria e dalle precipitazioni e dai loro effetti sul mare e sui ghiacci - e indaga poi alcuni ambiti in cui gli effetti dei cambiamenti climatici si manifestano in Friuli Venezia Giulia: dalle modifiche graduali, ma profonde, degli ecosistemi, agli incendi che hanno devastato i nostri boschi nell'estate 2022, all'agricoltura, mettendo in luce alcune possibili risposte e soluzioni e come queste emergano dalle conoscenze prodotte dagli enti scientifici e di ricerca e dalle attività delle agenzie e strutture regionali.

*Segnali dal Clima in FVG* non è quindi un report sullo "stato del clima" in Friuli Venezia Giulia: non ha l'obiettivo di fornire un quadro completo ed esaustivo della tematica, non ne esplora tutti gli aspetti e i settori ambientali e socioeconomici coinvolti, non passa in rassegna tutte le conoscenze disponibili. È però, appunto, un segnale: un segnale di cosa sta accadendo, di quanto sia importante prenderne coscienza ed agire, di come la società, la pubblica amministrazione e il mondo scientifico si stiano già attivando.

*Il gruppo di lavoro tecnico-scientifico  
Clima FVG*

## L'ABC DEL CLIMA

Per rendere gli argomenti accessibili a tutti, negli articoli sono inseriti alcuni box a sfondo arancione pensati per avvicinare al pubblico alcuni termini e concetti tecnico-scientifici a cui è necessario fare riferimento quando si spiegano argomenti e fenomeni collegati ai cambiamenti climatici.

## DAL LOCALE AL GLOBALE

Con uno sfondo grigio sono evidenziati gli articoli che riportano notizie e informazioni relative a realtà extra-regionali e che ci consentono di ampliare la nostra visione, collegando ciò che avviene in Friuli Venezia Giulia con conoscenze generali e con fenomeni a scala più ampia.

## Gruppo di lavoro Clima FVG

Il “Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG” istituito dalla Regione autonoma Friuli Venezia Giulia nel 2022 riunisce le eccellenze tecniche e scientifiche presenti in FVG, in grado di fornire all’Amministrazione regionale e a tutti gli enti e soggetti del FVG le conoscenze più aggiornate per affrontare i cambiamenti climatici sul nostro territorio.

Ad ARPA FVG è stato affidato il coordinamento del team, che è composto da esperti di ICTP, OGS, CNR, delle Università di Udine e di Trieste e della stessa Regione: gli stessi che avevano elaborato e pubblicato, nel 2018, il primo **Studio conoscitivo dei cambiamenti climatici e di alcuni loro impatti in Friuli Venezia Giulia**.

Il Gruppo di lavoro Clima FVG innanzitutto facilita la condivisione e la collaborazione tra i soggetti esperti che in regione producono conoscenze tecnico-scientifiche sui cambiamenti climatici e sui loro effetti.

Fornisce quindi un **orientamento** e un **supporto consultivo alla pianificazione** regionale delle azioni per il clima e in particolare per **l’adattamento ai cambiamenti climatici**.

L’attività del gruppo di lavoro Clima FVG favorisce anche il **trasferimento delle conoscenze** scientifiche ai tecnici che le applicano sul territorio.

E infine, tutti i componenti del gruppo di lavoro credono che sia indispensabile divulgare queste **conoscenze alla cittadinanza**, promuovendo quella che si chiama **“climate literacy”** ovvero **l’alfabetizzazione climatica**, che mette ciascuno di noi in condizione di comprendere la propria influenza sul clima e l’influenza del clima su ciascuna persona e sulla società.

La redazione di “Segnali dal Clima in FVG” è un primo passo per dare concretezza a questo fondamentale obiettivo

## Chi siamo?



ARPA FVG – Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente



Fulvio Stel (coordinatore) e Federica Flapp



CNR - Istituto di Scienze Marine di Trieste



Fabio Raicich



CNR - Istituto di Scienze Polari



Renato Colucci



ICTP - International Centre for Theoretical Physics di Trieste



Filippo Giorgi



OGS - Istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale di Trieste:



Cosimo Solidoro



Regione autonoma Friuli Venezia Giulia



Silvia Stefanelli ed Enzo Dall’Osto



Università degli Studi di Trieste



Giovanni Bacaro



Università degli Studi di Udine



Alessandro Peressotti

# LIVELLO MEDIO DEL MARE: IN CRESCITA ANCHE A TRIESTE

Il livello medio del mare a Trieste nel 2022 è stato coerente con quello osservato nell'ultimo decennio: non da record, ma comunque più alto che in tutto il secolo scorso.

Novembre è stato caratterizzato da due episodi di “acqua alta” lungo il litorale della regione, particolarmente accentuato quello del giorno 22.



## I DATI DELLA STAZIONE PIÙ ANTICA DELL'ADRIATICO

La stazione mareografica di Trieste Molo Sartorio, attiva da oltre 150 anni, conferma che l'andamento del livello medio dell'Adriatico segue quello globale sulle scale temporali pluridecennali e secolari. Su questo si sovrappongono fluttuazioni su tempi più brevi, più direttamente legate alla circolazione atmosferica e marina del nord Atlantico e del Mediterraneo.

Nel 2022 il livello medio è stato di 165.5 cm. Benché sia il secondo più basso dell'ultimo decennio, è superiore ai livelli osservati durante tutto il secolo scorso, come si vede nella curva blu nella figura (pagina successiva).

## COME VIENE MISURATO IL LIVELLO MARINO?

Al Molo Sartorio il livello marino viene misurato rispetto allo zero mareografico chiamato “Zero Istituto Talassografico”, che si trova 166.2 cm sotto lo Zero altimetrico dell'Istituto Geografico Militare Italiano.

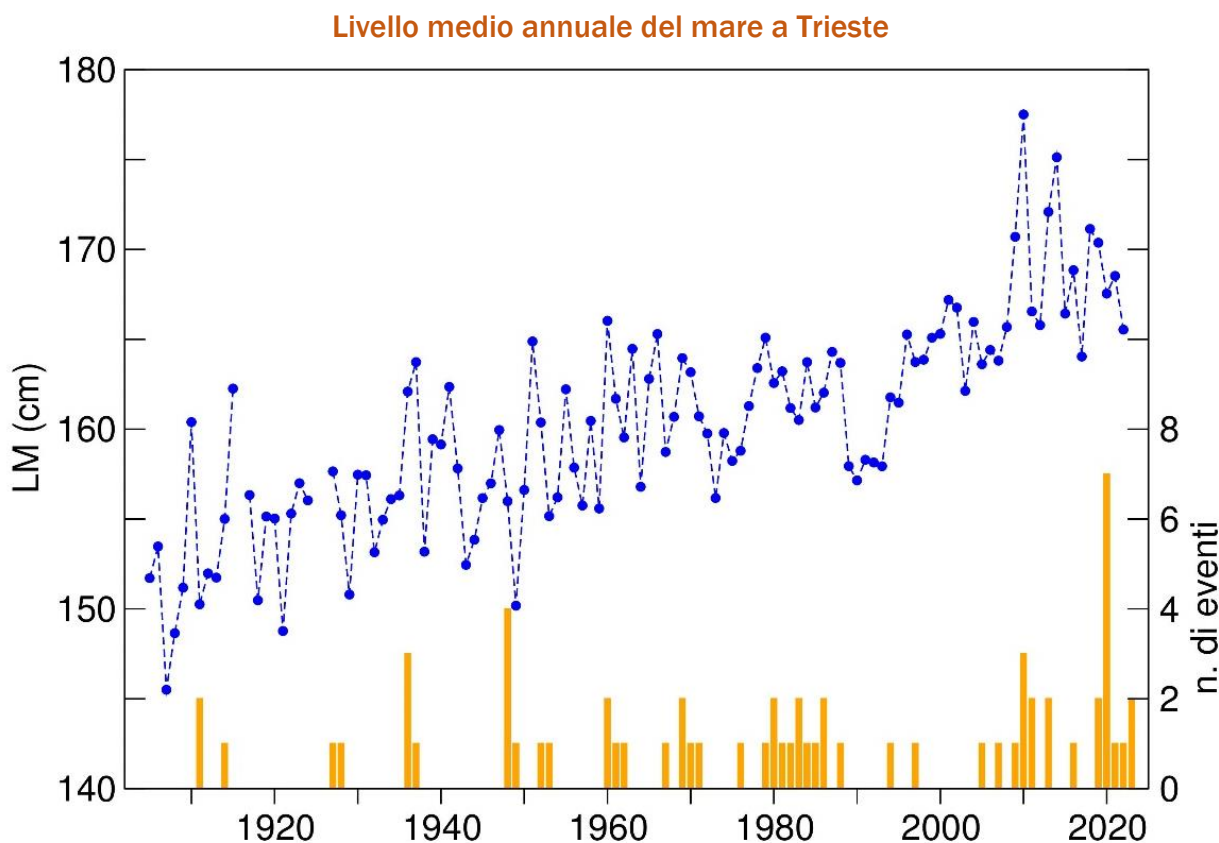
Attualmente la stazione include quattro mareografi. Uno, a sensore radar, è collegato con la centrale operativa della Protezione Civile del FVG e trasmette i dati del livello ogni 30 minuti. Gli altri, due dei quali digitali e uno analogico, sono dotati di sensore a galleggiante e fanno parte della rete meteomarina del CNR-ISMAR di Trieste; la registrazione dell'altezza istantanea del livello avviene ogni minuto.

L'istogramma arancione nella figura mostra invece, per ogni anno, il numero di giorni in cui il livello ha superato l'altezza del piano del Molo Sartorio.

Ben un terzo degli eventi (21 su 64) è stato osservato a partire dal 2010; pertanto, la loro **frequenza media è quasi quadruplicata**, passando da 0.4 eventi all'anno prima del 2010, a 1.5 eventi all'anno successivamente.

L'andamento del livello osservato a Trieste è rappresentativo dell'Adriatico settentrionale e quindi delle aree costiere del Friuli Venezia Giulia.

Tuttavia, nel confronto si deve tenere presente che, mentre il suolo a Trieste è relativamente stabile, quello delle aree lagunari è localmente soggetto a un significativo abbassamento per subsidenza. In questi casi, rispetto alla costa, il livello medio marino manifesta un aumento più rapido.



Livello medio (LM) annuale dal 1905 al 2022 osservato a Trieste Molo Sartorio (curva blu); l'altezza è misurata rispetto alla zero mareografico. Numero annuo di eventi di superamento del piano del molo Sartorio (istogramma arancione)

### QUALI SONO LE CAUSE?

Il riscaldamento atmosferico globale in corso è responsabile dell'aumento del livello medio del mare attraverso **due meccanismi**:

- l'aumento del volume dell'Oceano per dilatazione termica,
- l'aumento della massa oceanica dovuto alla fusione dei ghiacci continentali.

Durante il ventesimo secolo il livello medio globale è aumentato alla velocità di 1.5-2.0 mm/anno, ma durante gli **ultimi 30 anni** l'aumento ha raggiunto **circa 3 mm/anno**.

### LA DILATAZIONE TERMICA

Fenomeno fisico che si realizza quando un corpo aumenta di volume all'aumentare della temperatura.

## QUALI SONO LE CONSEGUENZE?

Una delle conseguenze rilevanti per il litorale della nostra regione è, in media, la **crescente frequenza di eventi di “acqua alta”**.

Tali fenomeni si verificano in corrispondenza di bassa pressione atmosferica e correnti di Scirocco lungo l’Adriatico, tipicamente in autunno e inverno.

Questi eventi estremi provocano **allagamenti** e incrementano **l’erosione costiera**, anche a causa del forte moto ondoso che spesso li accompagna.

Con l’aumentare del livello medio crescono i rischi di inondazione ed erosione costiera, lo scarico fluviale in mare è ostacolato, si innalza la tavola d’acqua e l’acqua marina, salata, penetra più facilmente nel sottosuolo costiero.

In novembre 2022 si sono verificati due episodi di “acqua alta”, specificamente nei giorni 4 e 22-23. Particolarmente significativo l’evento del 22, in cui il livello ha superato a Trieste il piano del molo di circa 30 cm.

**Fabio Raicich - CNR-ISMAR**





# SCENARI FUTURI DI INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE

Il livello del mare continuerà ad aumentare per lungo tempo, ma in diversa misura a seconda di quando e quanto ridurremo le emissioni di gas climalteranti. Per il Golfo di Trieste, in attesa di proiezioni più dettagliate a scala locale, fonti internazionali stimano un aumento medio intorno ai 20 cm a metà secolo e intorno ai 40 o 70 cm a fine secolo, a seconda degli scenari emissivi.



Secondo le più aggiornate proiezioni climatiche globali (IPCC, 2021) il livello del mare continuerà ad aumentare, in modo irreversibile e progressivo su scale plurisecolari, ma in diversa misura a seconda degli scenari relativi alle emissioni di gas climalteranti: solo una forte e immediata riduzione delle emissioni consentirà di contenere il riscaldamento globale e il conseguente innalzamento del mare entro livelli con cui riusciremo a convivere adattandoci.

## IL FUTURO LIVELLO DEL MARE NELL'ALTO ADRIATICO

Il rapporto tra l'aumento del livello del mare globale e quello nel Mediterraneo è complesso e oggetto di diversi studi. Sono anche in corso vari progetti e ricerche per elaborare proiezioni più dettagliate a scala locale, per stimare, ad esempio, quale sarà l'innalzamento del livello relativo del mare nell'Alto Adriatico nei prossimi decenni, tenendo conto di diversi fattori come le dinamiche meteo-marine dei vari bacini e il tasso di subsidenza dei diversi tratti di costa.

In attesa di questi risultati, possiamo comunque ricavare delle indicazioni utili dalle proiezioni che i più autorevoli organismi internazionali hanno elaborato, declinandole per quanto possibile anche a scala locale.

La NASA, insieme all'IPCC, ha realizzato uno strumento interattivo disponibile online ([IPCC AR6 Sea Level Projection Tool](#)), da cui possiamo estrarre le **proiezioni di innalzamento del livello del mare per il Golfo di Trieste** rispetto al livello medio del periodo 1995-2014. Selezionando i due scenari utilizzati anche in altri articoli di *Segnali dal Clima in FVG* – lo scenario RCP2.6, che ipotizza una decisa e rapida riduzione delle emissioni, e lo scenario RCP8.5, a emissioni crescenti – otteniamo i relativi grafici, in cui vediamo che:

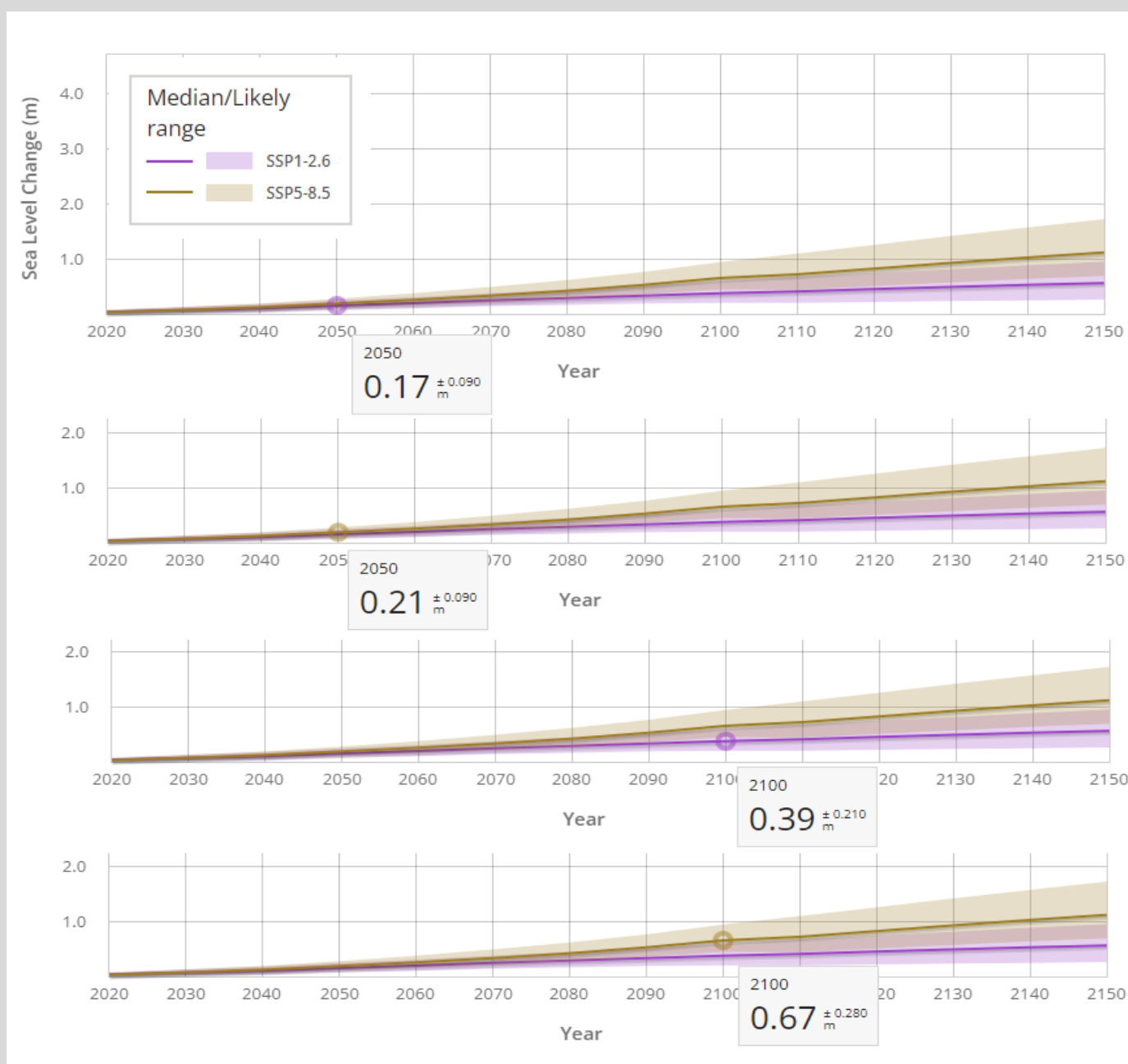
- per ciascuno scenario, è rappresentato il **valore medio delle proiezioni** elaborate da diversi modelli climatici (linea colorata ben definita) e la **relativa incertezza**, cioè la “forchetta” tra i risultati delle diverse proiezioni (fascia di colore sfumato);

- in tutti gli scenari il livello medio del mare continuerà a salire;
- fino a metà secolo, l'innalzamento sarà abbastanza simile in entrambi gli scenari - semplificando e approssimando, possiamo dire che sarà intorno ai 20 cm - e l'incertezza delle proiezioni è limitata;
- nei decenni successivi, le proiezioni per i due scenari divergono sempre più e pro-

gressivamente si allarga anche la “forchetta” dell'incertezza intorno al valore medio delle proiezioni;

- semplificando e approssimando, a fine secolo ci si attende un aumento medio del livello del mare intorno ai 40 cm (+/- 20 cm) nello scenario “Accordo di Parigi” e intorno ai 70 cm (+/- 30 cm) nello scenario “business as usual” a emissioni crescenti.

### Proiezioni di innalzamento del livello medio del mare per Trieste



Proiezioni di innalzamento del livello medio del mare, rispetto al livello medio del periodo 1995-2014, in due scenari (RCP2.6 e RCP8.5) elaborate da NASA e IPCC per il Golfo di Trieste. Fonte: Projected Sea-Level Rise Under Different SSP Scenarios - TRIESTE [https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl\\_id=154](https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=154)  
Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/>)

L'aumento del livello del mare avrà una serie di conseguenze, che si manifesteranno sia in modo graduale che in occasione di eventi estremi. Ad esempio, partendo da un livello del mare più elevato, sarà più facile che si verifichino eventi di "acqua alta" con i relativi allagamenti costieri e sarà ancora più difficoltoso lo smaltimento delle acque in eccesso in occasione di precipitazioni intense.

Queste prime elaborazioni ci aiutano quindi a capire come sarà necessario pianificare e attuare interventi di adattamento specifici per le nostre coste e le aree retrostanti. Interventi che potranno essere efficaci e sostenibili, anche dal punto di vista economico, solo se riusciremo a contenere entro certi limiti il riscaldamento globale e il conseguente innalzamento dei mari.

**Federica Flapp**  
**ARPA FVG**

Ad alcuni effetti dell'innalzamento del livello del mare sono dedicati gli articoli:

- [SCENARI  
DI INONDAZIONE COSTIERA: LA REALTÀ DI GRADO](#)
- [LA MARINIZZAZIONE  
DELLA LAGUNA  
DI MARANO E GRADO](#)
- [L'ACQUA SALE,  
LE PIANTE SOFFRONO:  
LE BARENE LAGUNARI E IL CAMBIAMENTO CLIMATICO](#)

*L'antico idrometro lungo il canale di Ponterosso a Trieste*



Foto: Furio Pieri

Foto: Fabio Raicich

# TEMPERATURA MEDIA DEL MARE, FRA LE PIÙ ALTE DEGLI ULTIMI VENTINI ANNI

La temperatura media del 2022 è stata la terza più alta della serie storica. Si sono registrati alti valori nella prima parte dell'estate e soprattutto dell'autunno, pressoché privo di irruzioni di aria fredda.

La temperatura del mare rappresenta uno degli indicatori dell'evoluzione del clima. Da oltre 120 anni nel porto di Trieste sono disponibili osservazioni della temperatura del mare a 2 m di profondità. Il suo andamento è rappresentativo della zona costiera del Friuli Venezia Giulia e, in generale, della parte meno profonda del nord Adriatico.

## CONFORMAZIONE DEL BACINO

La scarsa profondità del bacino e il fatto che è in gran parte circondato dal continente fa sì che le variazioni di temperatura siano fortemente influenzate dagli scambi di calore con l'atmosfera, specialmente su scale temporali fino a qualche settimana. D'altra parte, su scale stagionali e più lunghe la temperatura risente anche dal ricambio della massa d'acqua per effetto della circolazione dell'Adriatico, che ne modula l'andamento sul medio-lungo periodo.

## I DATI

La temperatura media annua del 2022 è stata di 17.4 °C, quasi un grado più alta della media del ventennio 2001-2020 e la terza più alta della serie, dopo i 17.6 °C del 2014 e i 17.5 °C del 2018.

## LE CAUSE

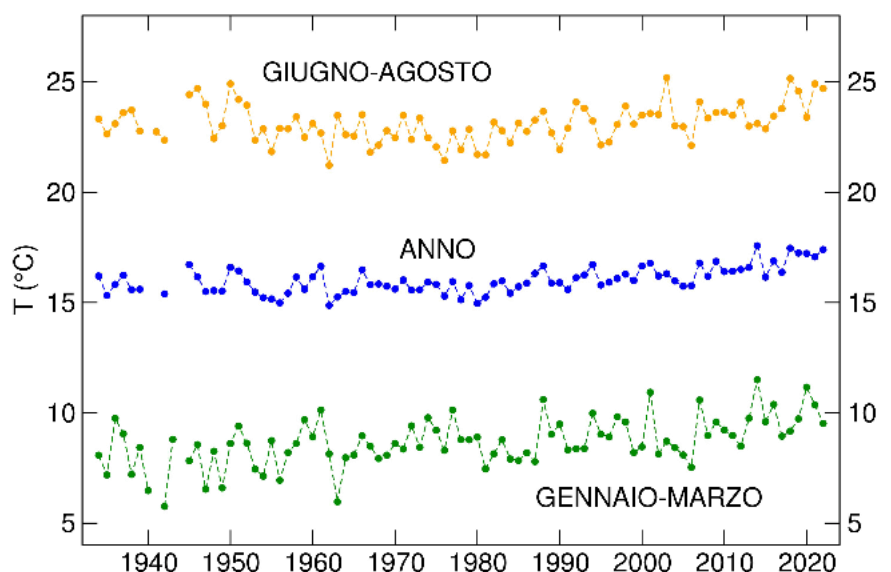
L'elevato valore è stato determinato soprattutto dalla temperatura della prima parte dell'estate (giugno e luglio) e da quella autunnale, la più alta da quando esistono osservazioni.

L'alta temperatura dell'autunno è conseguenza della pressoché totale assenza di irruzioni di aria fredda e di Bora. La temperatura invernale, invece, è stata in linea con la media ventennale.

La figura mette in evidenza la tendenza all'aumento della temperatura del mare, specie nell'ultimo decennio, in corrispondenza con il riscaldamento atmosferico in corso.

*Fabio Raicich - CNR-ISMAR*

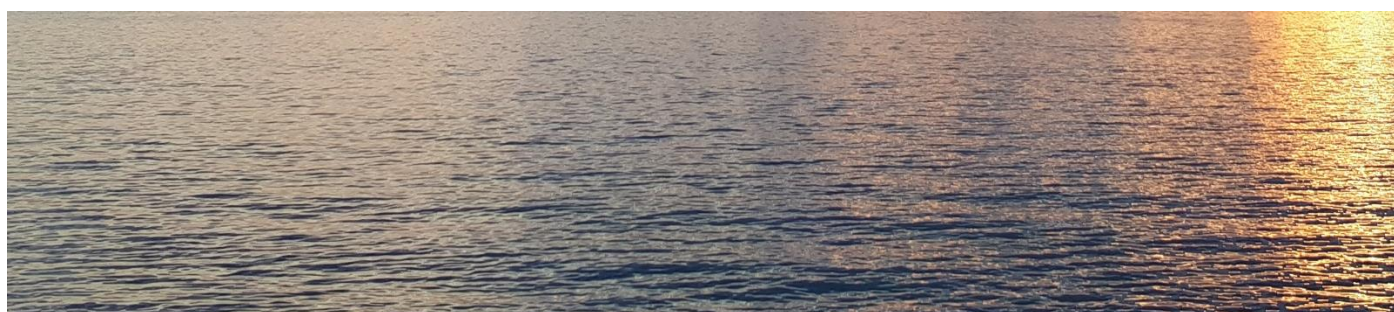
Temperature medie annuali del mare



Temperature (T) medie annuali, estive e invernali dal 1934 al 2022, osservate a 2 m di profondità. (Dati: CNR-ISMAR, Trieste; ARPA FVG-OSMER e GRN)

# ONDATE DI CALORE MARINE: LA SITUAZIONE GENERALE E IL CASO DEL 2022

Le ondate di calore si verificano anche nel mare, con serie conseguenze sugli organismi marini. Negli ultimi anni nel Mediterraneo sono divenute sempre più frequenti, lunghe, intense, interessando aree sempre più ampie e più profonde. Nel 2022 questo fenomeno è stato particolarmente grave nel Mediterraneo occidentale, ma anche nell'alto Adriatico è stato molto rilevante.



Le ondate di calore sono un fenomeno ormai molto noto, visto che da parecchi anni tutte le estati i bollettini sanitari lanciano allarmi legati al verificarsi di periodi anormalmente lunghi di temperature anormalmente alte e alle conseguenti potenziali situazioni di pericolo per la salute umana, con particolare riferimento alle persone più fragili.

Lo stesso fenomeno si presenta anche sott'acqua. Infatti, anche se il mare ha una inerzia termica elevata e si riscalda più lentamente dell'aria, la presenza di aria calda causa anche il riscaldamento del mare.

## LE ONDATE DI CALORE MARINE

Il riscaldamento del mare parte dalla sua parte superficiale, che è quella a contatto dell'aria, e causa una **stratificazione della colonna d'acqua**,

con la parte di superficiale più calda, e quindi meno densa, di quella inferiore, che resta più fredda.

In presenza di caldi prolungati, tuttavia, **lo spessore dello strato superficiale riscaldato diventa sempre più ampio**, fino a raggiungere in situazioni estreme anche le acque intermedie e profonde, esponendo a temperature più calde organismi marini adattati ed abituati ad acque più fredde.

In questi casi, **gli organismi che possono muoversi**, come i pesci, possono cercare acque più fresche spostandosi in altre zone o più in profondità, ma **quelli a mobilità limitata** restano esposti a situazioni sfavorevoli fino a quando il fenomeno perdura.

## LA DEFINIZIONE DEGLI SCIENZIATI

Le ondate di calore sottomarino possono essere più o meno intense e protrarsi per periodi più o meno lunghi. Per analizzare questi fenomeni, gli scienziati hanno convenuto di definire come ondate di calore un evento in cui per un certo periodo (per esempio 5 giorni) la temperatura dell'acqua supera ininterrottamente di una data quantità (per esempio 5 gradi centigradi) la temperatura tipica di un certo periodo.

In pratica, analizzando la serie storica della temperatura in un certo posto si calcola la temperatura media per un certo periodo dell'anno, e se la temperatura misurata eccede quella tipica per un periodo prolungato, si classifica il periodo come ondata di calore. Lo scostamento dalla temperatura tipica definisce l'intensità del fenomeno, il protrarsi dell'evento anomalo definisce la sua lunghezza.

## LA SITUAZIONE NEL MEDITERRANEO

Negli ultimi anni nel mar Mediterraneo le ondate di calore marino sono state sempre più frequenti, più intense, e più lunghe, ed hanno interessato aree sempre più ampie e più profonde. Alcuni eventi sono stati particolarmente studiati, perché particolarmente intensi e con conseguenze particolarmente rilevanti per la salute degli ecosistemi marini.

Fra **gli eventi più estremi** si ricordano quelli dell'estate del 2003, che causò estese morie di organismi nel Mediterraneo settentrionale, fra i quali macro-invertebrati bentonici, gorgonie e spugne. Le zone più colpite furono i golfi liguri, ma tutto il Tirreno, con Corsica, Sardegna e golfo di Napoli furono duramente colpiti. Fra il 2015 ed il 2019 nel mar Mediterraneo ci sono stati almeno 5 eventi di mortalità di massa, collegati alle ondate di calore e che hanno interessato almeno cinquanta specie.

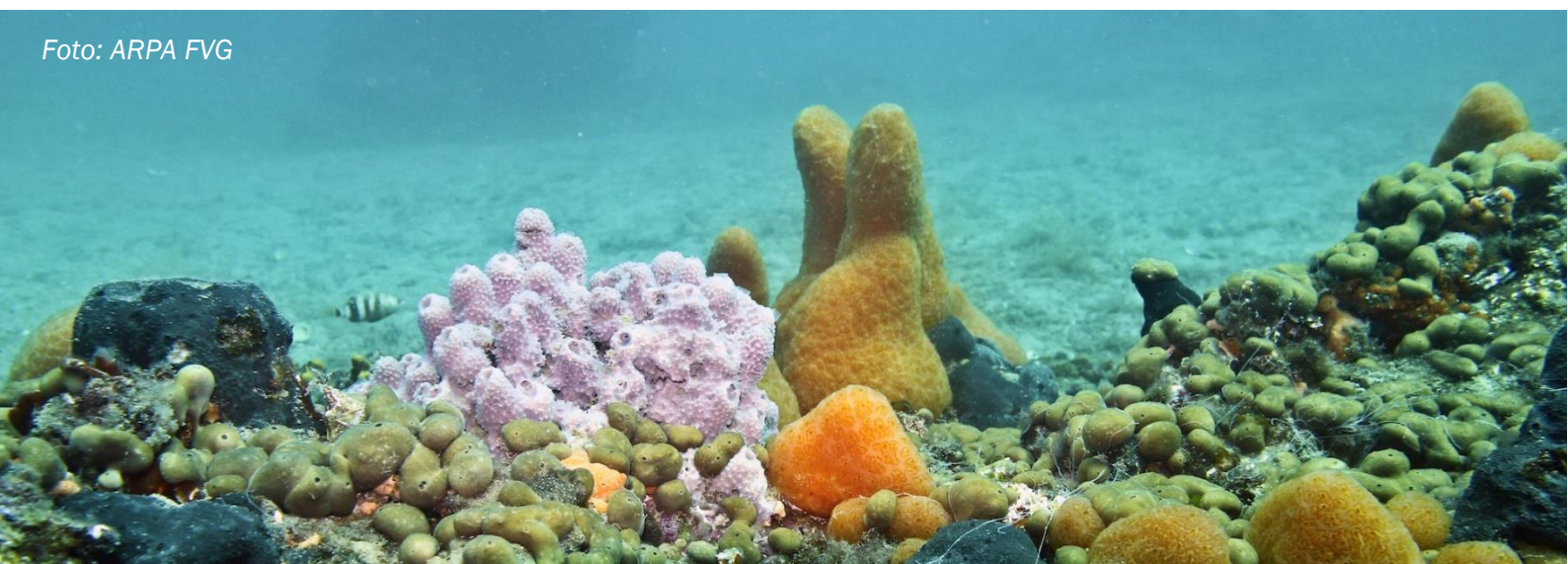
**Il 2022 è stato però un anno anche peggiore**, soprattutto **nel Mediterraneo occidentale**, con temperature molto sopra la media stagionale già a partire da maggio, ed anomalie che si sono protratte ininterrottamente fino ad agosto, per più di 70 giorni. Oltre al confronto con i valori stagionali, è inoltre rilevante il confronto con i limiti di tolleranza specie-specifiche dei diversi organismi.

Le ondate di calore sono presenti anche **nel Nord Adriatico**. In questa zona l'acqua è relativamente poco profonda, quindi il calore può penetrare abbastanza velocemente lungo tutta la colonna d'acqua, fino al fondo, senza lasciare così via di fuga agli organismi marini. Di converso, la temperatura può anche diminuire abbastanza velocemente in caso di venti, piogge, portate fluviali, o raffreddamento dell'aria.

**Nel 2022**, la situazione per il Nord Adriatico è stata comunque molto severa, con anomalie maggiori di 5 °C per più di 50 giorni in larghe zone. Una valutazione completa dell'entità biologica dei danni è ancora in corso di svolgimento.

**Cosimo Solidoro - OGS**

Foto: ARPA FVG



# L'ACIDIFICAZIONE MARINA: UN FENOMENO GLOBALE CHE INTERESSA ANCHE I NOSTRI MARI

Gli oceani assorbono enormi quantità di anidride carbonica, riducendo l'effetto serra, ma la conseguenza è l'acidificazione che si osserva in tutti i mari del mondo e anche nel nord Adriatico: un fenomeno che ha effetti importanti sugli organismi marini e di conseguenza anche sui servizi ecosistemici e sui settori socio-economici che da essi dipendono.



L'oceano è uno dei nostri più preziosi alleati nella lotta al cambiamento climatico, sia perché assorbe parte del calore presente in atmosfera, sia perché l'anidride carbonica presente nell'atmosfera a contatto con il mare si scioglie nell'acqua sottostante. L'oceano, quindi, ha il duplice effetto di ridurre la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria (ed il conseguente effetto serra) e di raffreddare l'aria. Questi effetti sono rilevantissimi: studi recenti stimano che l'oceano ha assorbito circa metà della CO<sub>2</sub> di origine antropica immessa in atmosfera negli ultimi duecento anni, e senza questo fatto la concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera sarebbe oggi oltre i 500 ppm, e la temperatura dell'aria che respiriamo ancora più calda. Purtroppo però **questo effetto tampone, tanto benefico per l'umanità, ha prodotto un impatto non trascurabile sull'oceano stesso** e la vita che esso occupa, causando il riscaldamento di mari e oceano e l'acidificazione marina.

## L'ACIDIFICAZIONE MARINA

L'acidificazione marina è una conseguenza diretta dell'aumento di anidride carbonica in aria: quando la CO<sub>2</sub> si scioglie in acqua avvengono una serie di reazioni chimiche che portano alla formazione di acido carbonico ed un aumento dell'acidità, che si misura come diminuzione del pH.

Questo processo, ben compreso da un punto di vista fisico e chimico, è un fatto certo, assolutamente prevedibile e che stiamo già osservando in tutti i mari del mondo.

L'acidità media dell'oceano superficiale è già aumentata di circa il 30% (pari a 0.1 unità di pH) rispetto ai livelli preindustriali e le proiezioni di tutti i modelli climatici sono concordi nel prevedere un ulteriore aumento di circa il 100% (0.3 unità di pH) se le emissioni continueranno con i tassi attuali.

## GLI EFFETTI SUGLI ORGANISMI MARINI

L'acidificazione marina avrà un impatto diretto su molti organismi marini. Gli **organismi che hanno gusci o scheletri calcarei** (per esempio ricci, bivalvi, sistemi a coralligeno) dovranno dedicare più energia alla costruzione e al mantenimento di quelle componenti e avranno quindi meno energia per le altre funzioni vitali. Alcune **alghe** saranno favorite dalle nuove condizioni ed altre sfavorite. Complessivamente si ritiene che **gli ecosistemi marini saranno meno biodiversi, meno produttivi, meno resilienti**.

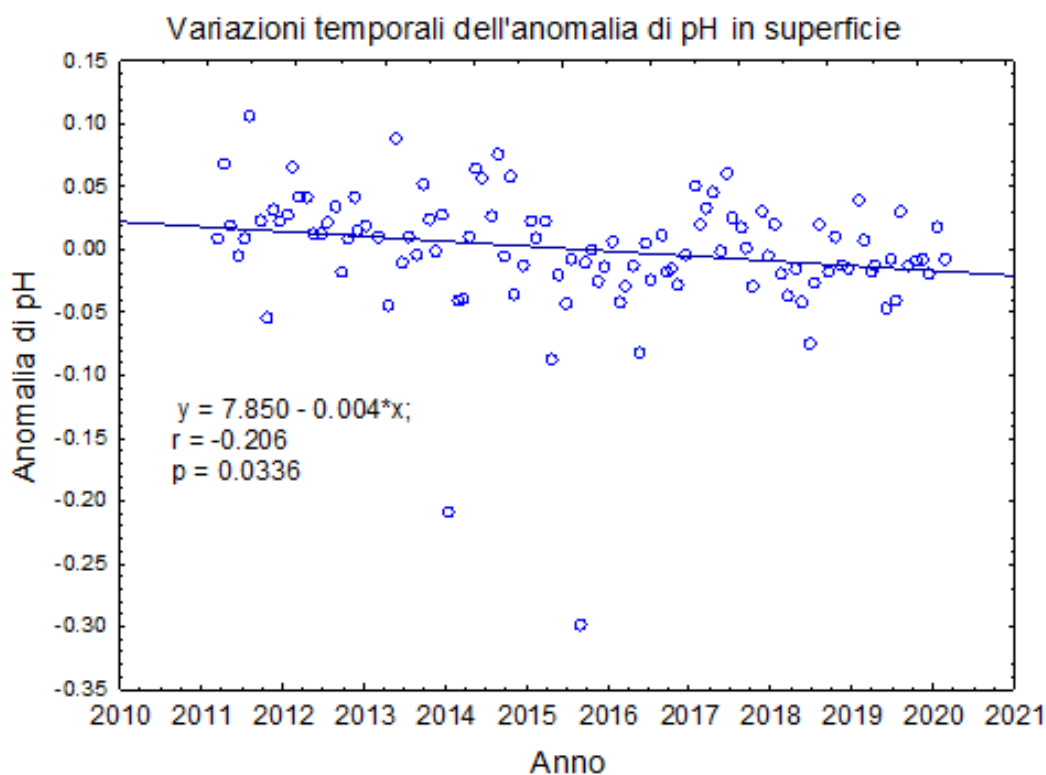
È evidente che le alterazioni agli ecosistemi marini prodotte dalla acidificazione oceanica avranno conseguenze rilevanti anche in termini di servizi ecosistemici e in termini socio-economici.

## L'ACIDIFICAZIONE NEL NORD ADRIATICO

L'acidificazione marina è osservabile anche nei mari italiani ed in nord Adriatico, con intensità paragonabile a quella degli altri mari (circa 0.03 unità di pH/decade) ed anche nelle acque del Friuli Venezia Giulia, le simulazioni climatiche restituiscono proiezioni con ulteriori variazioni:

- di 0.25 unità a fine secolo, se le emissioni di CO<sub>2</sub> continueranno con la attuale intensità,
- di 0.08 unità con scenari di emissioni più conservativi.

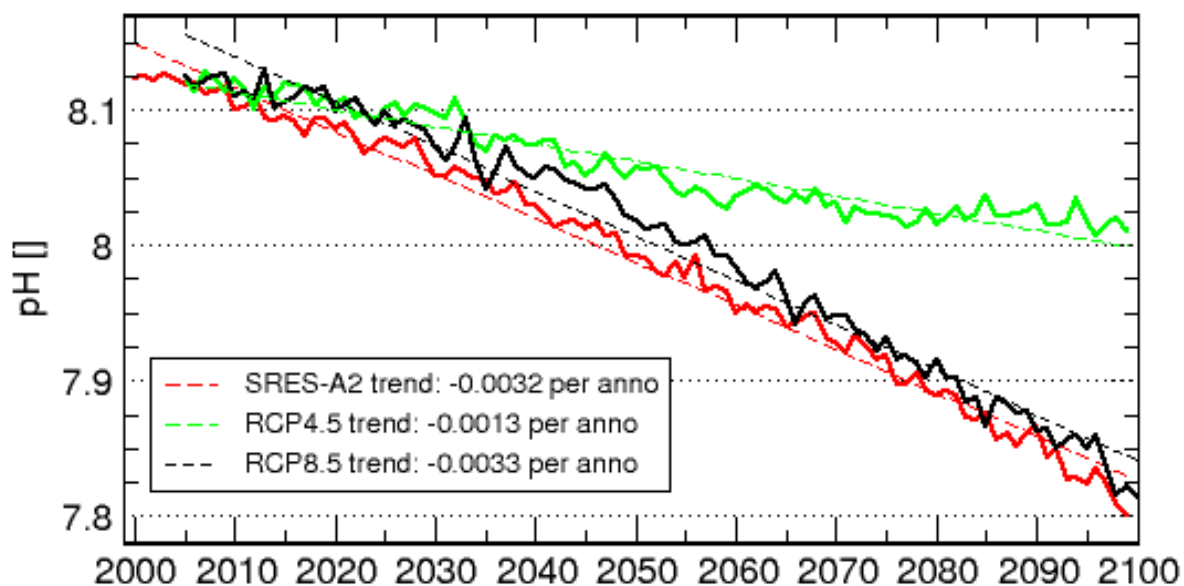
### Variazioni di acidità osservate nelle acque superficiali del Golfo di Trieste



*Il grafico riporta l'evoluzione temporale della variazione di acidità superficiale misurata nelle acque superficiali nel golfo di Trieste. La variazione osservata in 10 anni è di circa 0.04 unità di pH, in linea con quanto osservato su scala globale*



### Possibili evoluzioni future dell'acidità nelle acque superficiali nel Golfo di Trieste



Il grafico riporta le proiezioni ottenute con modelli numerici sulle possibili evoluzioni future dell'acidità nelle acque superficiali nel golfo di Trieste, nel caso in cui emissioni di gas serra permangano a livelli elevati (linee rossa e nera, relativa a proiezioni fatte con due diversi modelli ma riferiti a scenari simili) o moderate (linea verde). Si nota come in corrispondenza di uno scenario di emissioni moderate il cambiamento di acidità, pur esistente, si stabilizza intorno a metà secolo

Cosimo Solidoro - OGS



# SCENARI DI INONDAZIONE COSTIERA: LA REALTÀ DI GRADO

Le zone costiere sono vulnerabili agli eventi di acqua alta causati da una combinazione di alta marea e condizioni meteo-climatiche. Grazie al modello altimetrico delle coste del FVG, preciso e aggiornato, è possibile simulare mappe di allagamento potenziali, sia nelle condizioni attuali che considerando scenari futuri di innalzamento del mare, come fatto ad esempio per Grado.



Le zone costiere sono per loro natura vulnerabili all'ingressione marina determinata dalle condizioni meteo-climatiche (vento, bassa pressione, precipitazioni intense) che possono provocare mareggiate e, unite all'alta marea, le acque alte.

## VULNERABILITÀ E PROTEZIONI DELL'AREA COSTIERA

In Friuli Venezia Giulia questa vulnerabilità è enfatizzata dal fatto che molte aree costiere hanno quote molto basse rispetto al livello del mare, se non addirittura al di sotto di esso. Queste ultime aree, in prevalenza agricole, sono il risultato dei lunghi e complessi lavori di bonifica idraulica realizzati nel passato e sono oggi mantenute solo grazie a un sistema di argini che le protegge verso mare, oltre a canali e idrovore che pompano l'acqua in mare al di là degli argini stessi.

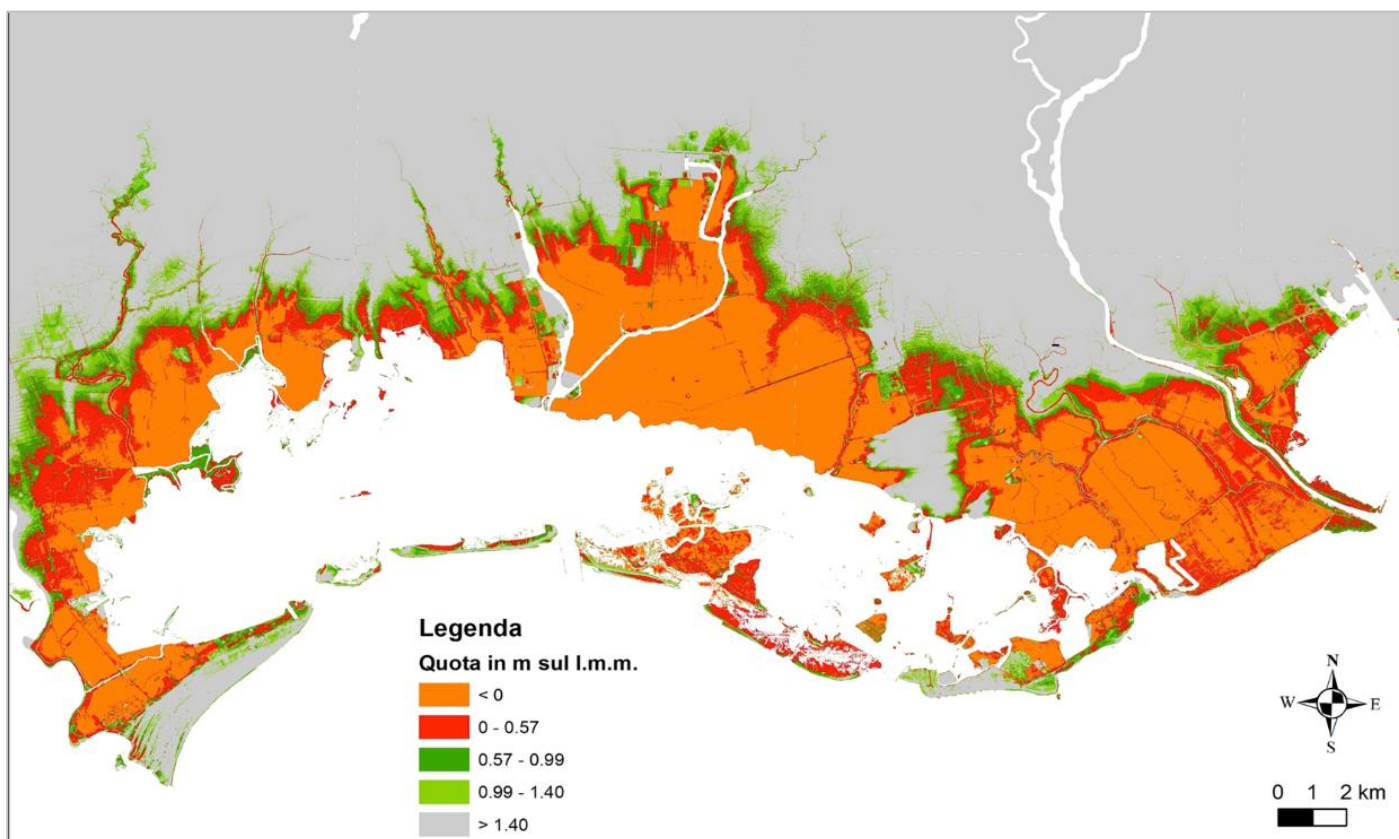
## IL RISCHIO DI ALLAGAMENTO

La conoscenza dell'altimetria del nostro territorio costiero è molto precisa e aggiornata grazie al rilievo condotto nel 2018 dalla Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia con un sofisticato strumento di scansione laser (LIDAR). Il prodotto è un modello digitale, tridimensionale, aggiornato e di estremo dettaglio dei territori costieri.

Grazie alla disponibilità di questo modello altimetrico è possibile simulare mappe di allagamento potenziali per le realtà costiere più importanti della nostra regione, immaginando sia singoli eventi di mareggiata sia un futuro scenario di innalzamento di livello del mare, in conseguenza del riscaldamento globale.

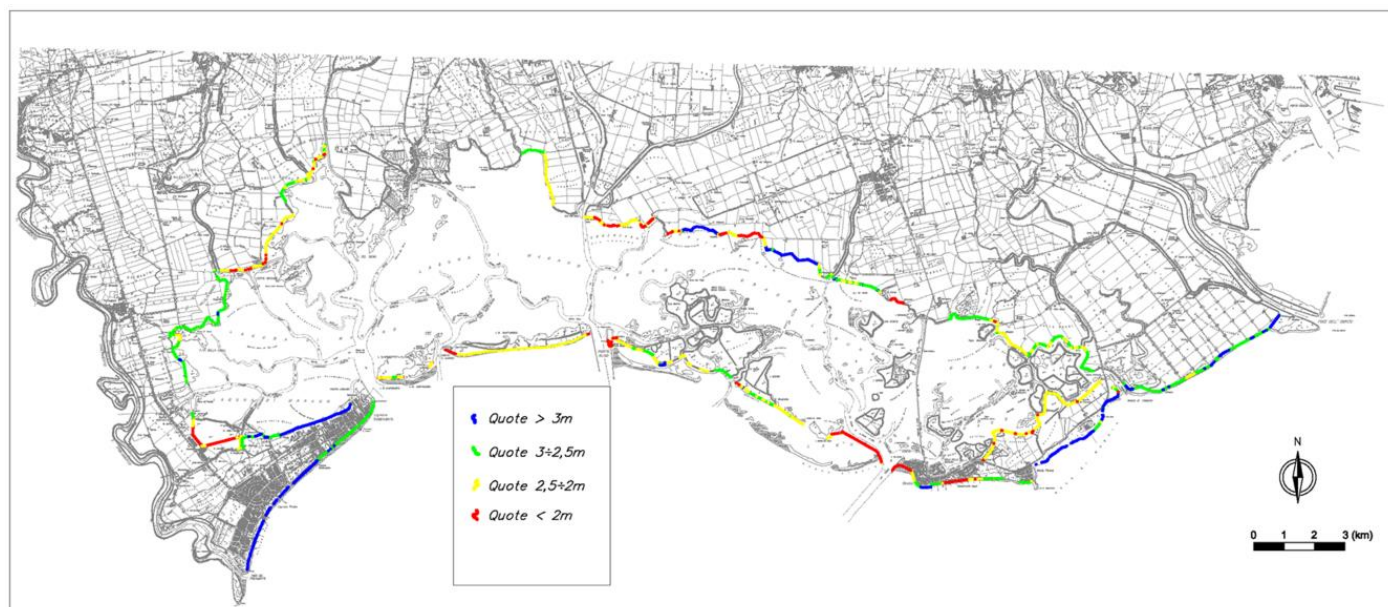
**LIDAR** (acronimo dall'inglese Light Detection and Ranging): è una tecnologia basata sull'uso di un sensore che emette raggi laser. Montato su un aereo o su un drone consente di rilevare milioni di punti della superficie terrestre in breve tempo, determinandone l'altimetria con grande precisione.

### Altimetria delle zone costiere



Mapa delle quote sul livello del mare delle aree costiere del Friuli Venezia Giulia tra Monfalcone e la foce del Tagliamento (elaborazione Università di Trieste)

### Protezioni costiere



Mapa degli argini di difesa delle coste e dei margini lagunari del Friuli Venezia Giulia tra le foci dell'Isonzo e del Tagliamento. La mappa è ricavata dall'Indagine sullo stato degli argini della bassa pianura realizzate del 2005 dall'Università di Trieste- Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine

## LE MAREGGIATE A GRADO

Se immaginiamo un sovrizzo marino da mareggiata che provoca un aumento episodico del livello del mare pari a 128 cm - come statisticamente si prevede possa accadere ogni 30 anni -

otteniamo una mappa di possibile allagamento per la cittadina di Grado che mostra come gran parte delle vie del centro risultino allagate.

### Mappa di allagabilità attuale di Grado



Mappa di allagabilità di Grado a oggi, nell'ipotesi di un aumento episodico del livello del mare pari a 128 cm.

La mappa è stata elaborata dal Coastal Group dell'Università di Trieste sulla base del rilievo LIDAR della protezione Civile FVG del 2018. La base della figura è la foto aerea del 2018 (da Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - <https://eaglefv.giulia.regione.fvg.it>)

## L'INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE

Considerando una proiezione futura di innalzamento del livello del mare all'anno 2100, pur utilizzando quella più "ottimistica" immaginata dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) cioè quella indicata con lo scenario RCP2.6, il livello medio delle acque sarà stabilmente ben più elevato di oggi.

Di conseguenza, nel 2100, lo stesso evento di mareggiata ipotizzato precedentemente si sommerà a un livello medio del mare più alto di 40 cm rispetto a quello attuale: gli effetti dell'inondazione risulterebbero molto più rilevanti, in quanto sommergerebbero gran parte della cittadina di Grado.

### Mappa di allagabilità futura di Grado



Mappa di allagabilità di Grado al 2100, nell'ipotesi di un aumento episodico del livello del mare pari a 128 cm che si sommi a un aumento del livello medio del mare di 40 cm (scenario RCP2.6).

La mappa è stata elaborata dal Coastal Group dell'Università di Trieste sulla base del rilievo LIDAR della protezione Civile FVG del 2018. La base della figura è la foto aerea del 2018 (da Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - <https://eaglefvg.regione.fvg.it>)

## IL FUTURO

Queste simulazioni sono di fondamentale importanza per la definizione delle possibili future situazioni di criticità. Analisi più approfondite saranno eseguite grazie alla collaborazione avviata tra l'Università degli studi di Trieste e la Protezione Civile regionale del Friuli Venezia Giulia e riguarderanno sia lo stato degli argini sia una mi-

gliore definizione delle mappe di allagabilità, soprattutto nelle aree più vulnerabili. Ad esempio saranno individuati e analizzati nel dettaglio i punti critici, ossia i "varchi" attraverso i quali l'acqua proveniente dal mare o dalla laguna può trovare facile accesso, causando danni e disagi alla popolazione.

## LE DIVERSE SOGLIE DEL LIVELLO DEL MARE

Il livello del mare in una determinata località varia continuamente a differenti scale di tempo.

Un elevato rialzo del livello del mare che si verifica a scala di ore può essere considerato un evento episodico ed essere il risultato di varie componenti. In primo luogo l'alta marea astronomica che interessa le coste del Friuli Venezia Giulia con periodicità semidiurna (ogni 12 ore).

Una differenza di pressione atmosferica lungo il bacino dell'Adriatico può provocare un sovralzato meteorologico ("surge") del livello del mare noto anche come "sessa" che, sommato all'alta marea astronomica, causa la cosiddetta "acqua alta".

Se a questo si accompagna l'azione del vento sul bacino si ha la formazione di onde che, quando giungono vicino alla costa, diventano più ripide e si rompono (frangenza) andando a formare uno "strato di acqua" in più, chiamato sovralzato d'onda (setup).

Sulla spiaggia infine l'onda può provocare un flusso d'acqua che ne risale la superficie inclinata (risalita dell'onda o runup).

Tutte queste componenti se sommate tra loro rappresentano dei "livelli" di cui bisogna tener conto nella pianificazione territoriale, nei piani di emergenza e nella progettazione delle opere di difesa costiera.

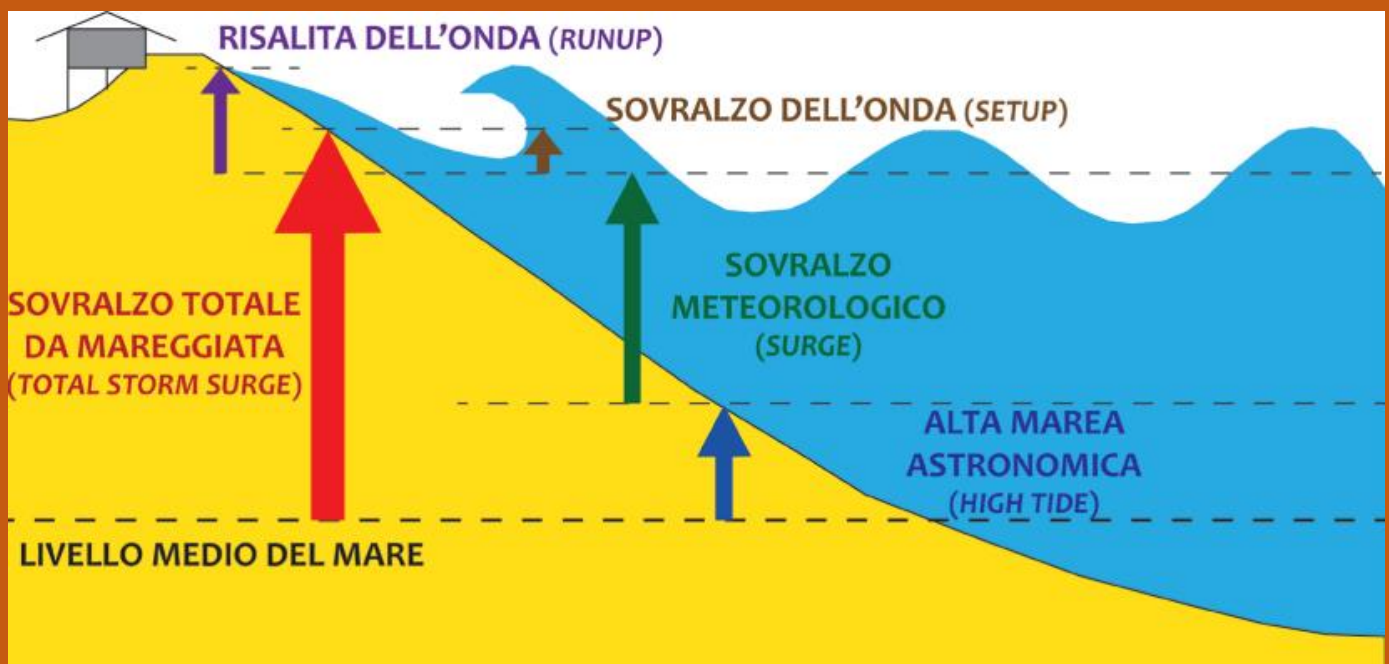
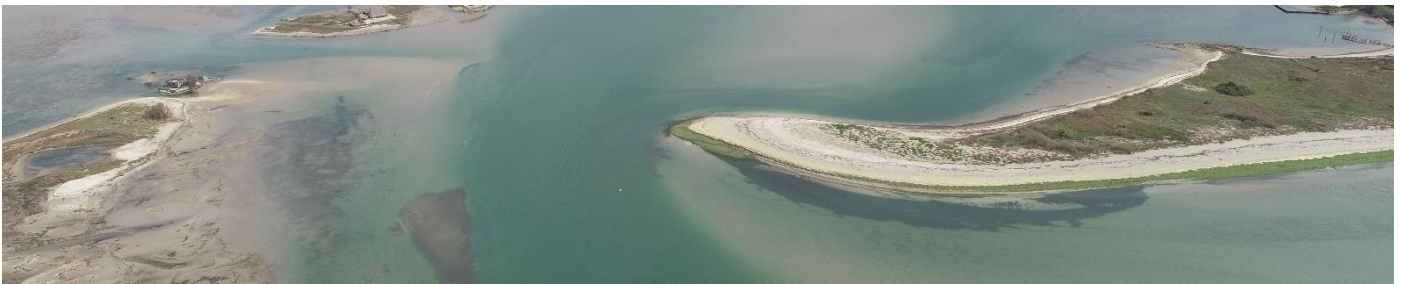


Figura tratta da *Mareggiate e impatti sulla costa - aggiornamento dei dati al 2020, degli indicatori e analisi delle tendenze*. A cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, in collaborazione con Arpae-Servizio Idro-Meteo-Clima e Università di Ferrara, nell'ambito del progetto EU Micore (2008-2011) - Gennaio 2021

Giorgio Fontolan, Sebastian Spadotto, Luisa Fontanot, Annelore Bezzi – Università di Trieste  
Antonio Bratus – Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

# LA MARINIZZAZIONE DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO

Le forme tipiche della laguna di Marano e di Grado hanno subito importanti mutamenti dalla metà del secolo scorso, ben documentati. L'ambiente fisico continua a trasformarsi per la "marinizzazione" causata dall'innalzamento del livello del mare, accentuato da altri fattori locali. Assistiamo così a una progressiva semplificazione delle morfologie lagunari come canali, velme e barene, che si modificano, si riducono e spesso scompaiono.



Dal punto di vista geologico le lagune sono forme giovani, naturalmente destinate ad avere breve durata.

Oggi, la loro esistenza è minacciata in primo luogo dall'innalzamento del livello del mare associato al cambiamento climatico, ma anche dalle attività antropiche che ne modificano l'assetto naturale e la capacità di adattarsi al cambiamento. Gli apporti dei sedimenti che arrivano dal mare e dai fiumi e una corretta gestione delle attività umane possono in parte compensare il degrado.

## LA LAGUNA DI MARANO E GRADO

La laguna di Marano e Grado è una delle più importanti lagune del Mediterraneo, di vitale interesse per la conservazione della biodiversità. Qui l'innalzamento del livello del mare in atto a livello globale è enfatizzato dall'abbassamento del suolo per subsidenza e non è compensato

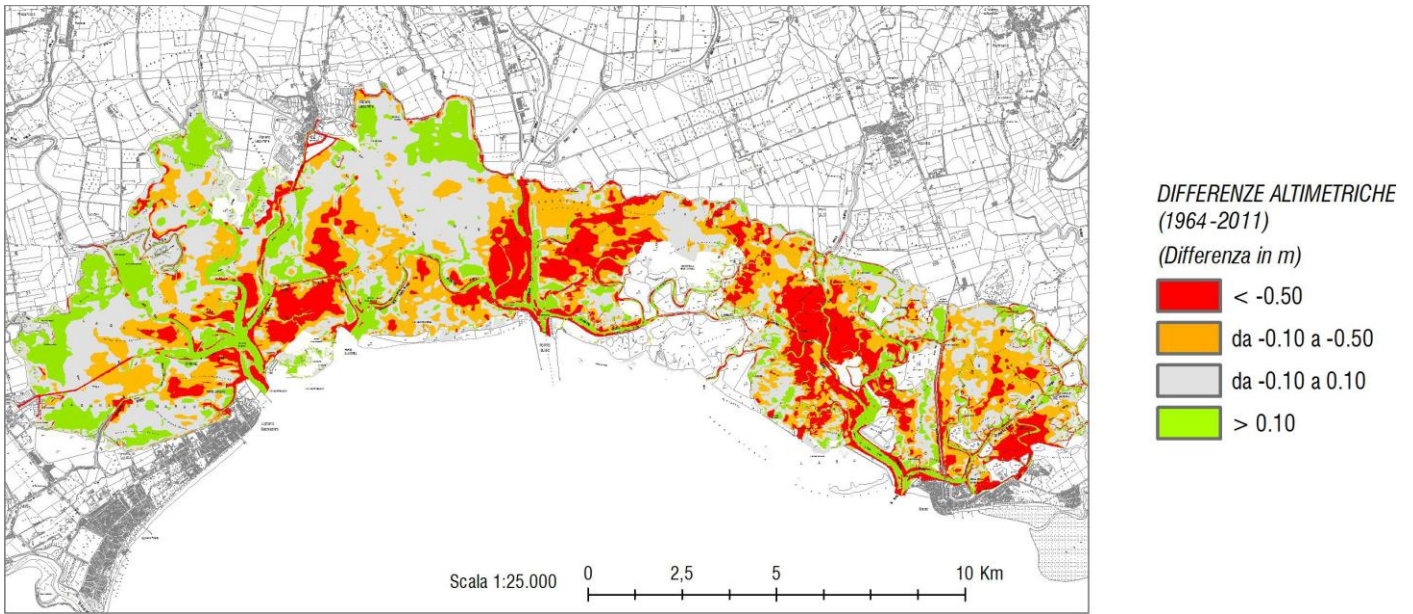
abbastanza dagli apporti di sabbia e fango da parte dei principali fiumi, Isonzo e Tagliamento.

L'Università degli Studi di Trieste e quella di Udine in collaborazione con la Regione Friuli Venezia Giulia e ARPA FVG hanno realizzato una serie di studi, a partire dal 2010, per comprendere le dinamiche e le modifiche dell'ambiente fisico lagunare.

## LA MARINIZZAZIONE DELLA LAGUNA

Dalla sovrapposizione dei modelli digitali ottenuti dalle due uniche carte batimetriche esistenti per la Laguna di Marano e Grado si è potuta ricavare una "carta delle differenze altimetriche" che ci mostra i cambiamenti avvenuti nel corso di circa 45 anni per l'intera laguna. Si possono qui individuare con immediatezza le zone che si sono approfondite (in giallo, arancione e rosso) e quelle che si sono interrate (scala di verdi).

Variatione delle altimetrie nella Laguna di Marano e di Grado in circa 45 anni



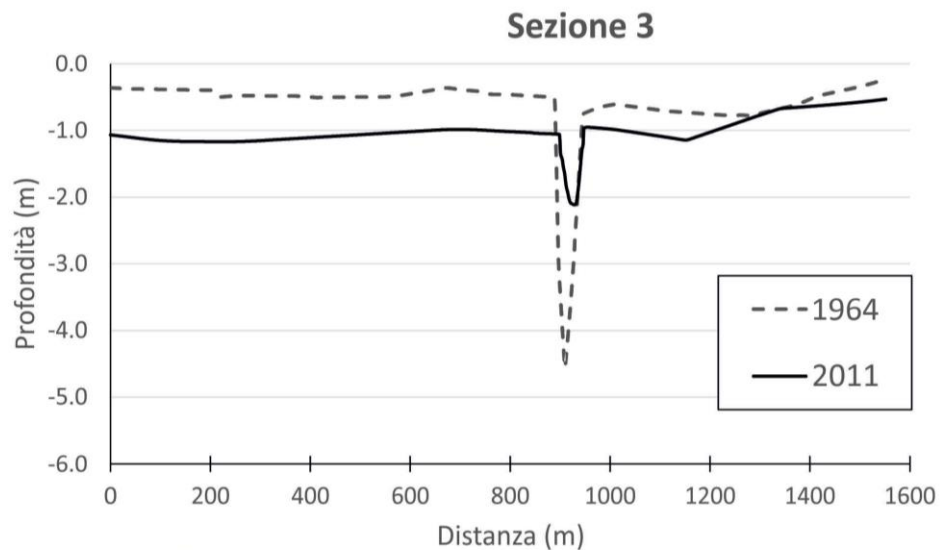
Carta delle differenze altimetriche ottenuta dal confronto tra le carte batimetriche del 1964 e del 2011. In giallo, arancione e rosso le zone che si sono approfondite. In verde le zone che si sono interrate. Elaborazione: Università di Trieste

Variatione delle altimetrie: dettaglio

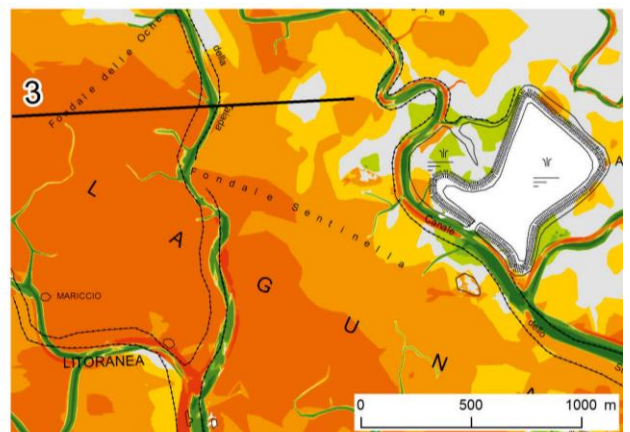
Grazie a questa carta è possibile quantificare il processo di “marinizzazione” che sta coinvolgendo la laguna di Marano e Grado e che consiste in una graduale trasformazione morfologica.

Questo processo induce una semplificazione delle forme tipiche delle lagune ed è già stato osservato nella Laguna di Venezia, che, a causa dei noti fenomeni di subsidenza indotti dal prelievo delle acque dal sottosuolo, ha subito per prima il degrado a cui oggi assistiamo a livello più generale.

Particolare delle modificazioni avvenute in una zona della laguna di Grado, viste in pianta (stralcio dalla carta delle differenze) e lungo una sezione trasversale al canale della Taiada



DIFFERENZE ALTIMETRICHE (1964-2011) (Differenza in m)





## LE SEMPLIFICAZIONE DELLE FORME LAGUNARI

La semplificazione morfologica avviene sotto i nostri occhi con diverse manifestazioni: **l'erosione e riduzione di estensione delle barene e l'approfondimento dei fondali lagunari a bassa profondità** cioè le piane di marea, meglio note come “velme”.

A ciò si accompagna **la scomparsa dei canali secondari e l'interrimento di quelli principali**. Infatti, man mano che il mare si alza la funzione dei canali viene meno nell'agire come veicolo di trasporto delle masse d'acqua durante le fasi montanti e calanti della marea. Come se la laguna fosse una baia marina, la massa d'acqua entra ed esce in modo più generalizzato e non limitato ai canali, poiché si attenuano i contrasti morfologici tra le zone a bassa profondità e i canali stessi. In questo modo **la velocità di corrente dei canali si riduce, favorendo la sedimentazione** e portando di fatto a un loro progressivo riempimento. I sedimenti che li riempiono sono prodotti dal rimaneggiamento dei bassi fondali, sempre a causa dell'incremento del livello del mare: man

mano che aumenta il battente d'acqua, le onde originate dal vento e dal traffico marittimo hanno infatti una maggiore capacità erosiva, provocando un generale approfondimento dei fondali nelle piane di marea e un attacco dei bordi delle barene.

I dati disponibili, che sono tuttora in fase di aggiornamento, evidenziano come le **barene**, al 2006, avessero **perso il 16%** della loro estensione misurata nel 1954. Questa perdita ammonta a 144 ettari. **Ben peggiore è stata la perdita osservata per le velme**, cioè quelle aree della laguna maggiormente soggette agli effetti erosivi dovuti all'azione combinata delle correnti di marea e del moto ondoso: dal confronto 1964 – 2011 infatti risulta una **perdita di 2672 ettari, pari al 45.9%** dell'estensione complessiva originaria. Questa perdita si è tradotta in un contestuale incremento dei fondali più profondi, cioè di fatto quelli che oggi non sono influenzati dall'oscillazione di marea.



*Barena con fioritura di *Limonium* sp (noti come “fiori de tapo”) sommersa dall'alta marea*



*Margine di una barena eroso dal moto ondoso*

## IL FUTURO

Le modifiche che la laguna subisce richiedono di essere continuamente monitorate con il contributo di diverse discipline tra cui la geomorfologia, la sedimentologia, la modellistica idrodinamica. Grazie a queste basi conoscitive si potranno affrontare i cambiamenti futuri nel modo

migliore possibile e sviluppare adeguate politiche di gestione e adattamento, mirate alla tutela sia del patrimonio naturale che degli usi antropici tradizionali della laguna.

## LA MAREA E LE ZONE DELLA LAGUNA

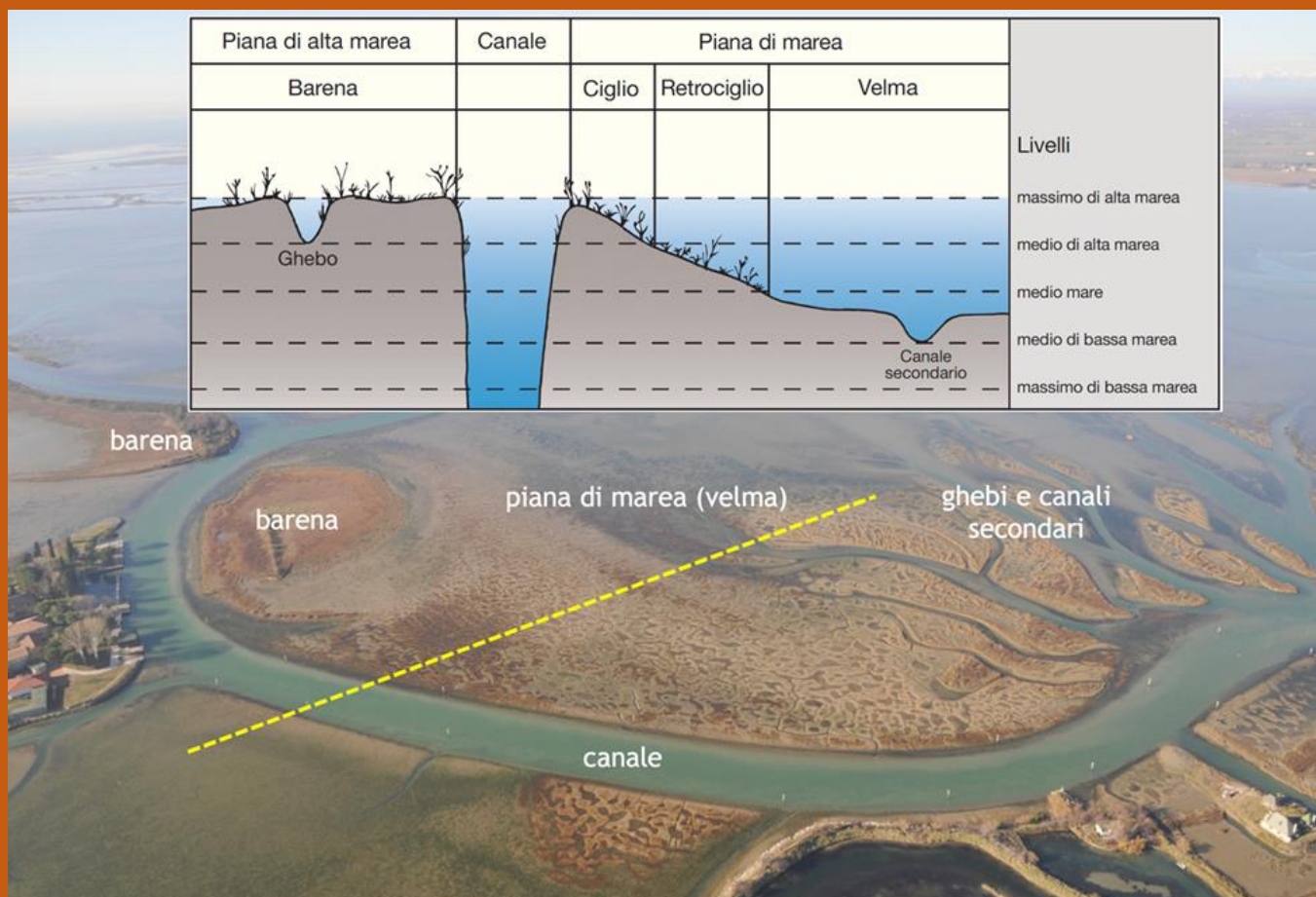
Il motore principale della morfodinamica interna alla laguna è la marea e la definizione stessa di laguna dipende dall'esistenza di questa forzante. Infatti, secondo il modello "classico" di laguna le diverse parti che la compongono si classificano proprio in base all'elevazione rispetto ai differenti livelli che la marea assume nella sua oscillazione periodica.

Al di sopra del livello delle alte maree di sizigia (quelle più ampie che avvengono due volte al mese) vi sono le **isole interne** e le **isole barriera** che delimitano la laguna verso mare, alcune parti di esse vengono allagate solo nel caso di eventi eccezionali di acqua alta o mareggiata.

Tra le alte maree di sizigia e il livello medio del mare si collocano le **barene** che, ricoperte da una vegetazione peculiare, devono la loro esistenza proprio alla periodica sommersione da parte delle alte maree, soprattutto quelle di sizigia. Le barene sono solcate dalle ultime terminazioni dei canali, i cosiddetti **ghebi**, che si diramano dai canali secondari, permettendo l'espansione delle masse d'acqua durante le alte maree.

Al di sotto del livello medio del mare ed entro il livello medio delle basse maree si identificano le **piane tidali (o velme)** e i **canali secondari**. Le velme emergono durante le basse maree più importanti.

Nella porzione sempre sommersa si identificano i **fondali lagunari sub-tidali**, le **bocche tidali** e i **canali lagunari principali**.



Schema delle più importanti morfologie lagunari e loro relazioni con i livelli di marea (ridisegnata da Albani et al., 1983 *Apparati intertidali della laguna di Venezia*. In *Laguna, fiumi, lidi: cinque secoli di gestione delle acque nelle Venezia*. Venezia, 10-12 giugno 1983). Foto della laguna di Grado dall'elicottero (Antonella Triches)

# LA CRIOSFERA DELLE ALPI GIULIE, EVOLUZIONE PASSATA E RECENTE

Le Alpi Giulie, situate nell'area più orientale della catena alpina, dalla fine della piccola età glaciale (peg) ai giorni nostri, hanno subito profonde modificazioni nel paesaggio. Le semplici immagini testimoniano l'imponente riduzione delle masse di ghiaccio avvenuta nel corso di pochi decenni.



Le evidenze geomorfologiche hanno permesso di ricostruire le aree ed i volumi dei ghiacciai al loro picco di estensione olocenica, e di calcolare quindi poi nel dettaglio di quanto essi si siano ridotti in un arco temporale complessivo di circa 150 anni.

Va però sottolineato come una **gran parte di questa riduzione** si sia estrinsecata in una rapida fase parossistica iniziata **dalla metà degli anni '80 del '900**. In questa recente fase climatica di repentino cambiamento, indotta dal riscaldamento globale di origine antropica, si è avuta la scomparsa di circa il 60-70% di tutto quello che era rimasto dall'ultima espansione olocenica della PEG (piccola era glaciale). Complessivamente, oggi rimangono circa solo il 17% dell'estensione areale ed il 4% del volume dei corpi glaciali delle Alpi Giulie.

Le più recenti ricostruzioni della curva delle variazioni di temperatura verificatesi nel corso dell'Olocene, ossia negli ultimi 11700 anni della storia paleoclimatica della Terra, ci forniscono in-

formazioni molto utili ad interpretare le recenti e rapide variazioni del clima.

Dall'optimum climatico olocenico, lungo periodo mite tra circa 9000 e 5000 anni fa, quando i ghiacciai alpini sono molto ridotti in superficie e verosimilmente relegati solo a quote superiori ai 3500-4000 metri, si passa al periodo neoglaciale, nel corso del quale la Terra inizia un lento e graduale raffreddamento naturale verso la prossima era glaciale.

In questa "discesa", la PEG si colloca generalmente all'apice di questo raffreddamento di lungo periodo con i ghiacciai alpini mai così estesi come nel corso di tutto l'Olocene. Localmente, però, alcune brevi fasi fredde oloceniche lasciano testimonianza di avanzate glaciali confrontabili a quelle della PEG, se non addirittura leggermente più estese. Questi aspetti rappresentano ancora terreno di studio, e per quanto riguarda le montagne del Friuli Venezia Giulia, non sono ancora interamente chiariti.

## I ghiacciai del Canin in estate nel 1893 e nel 2020



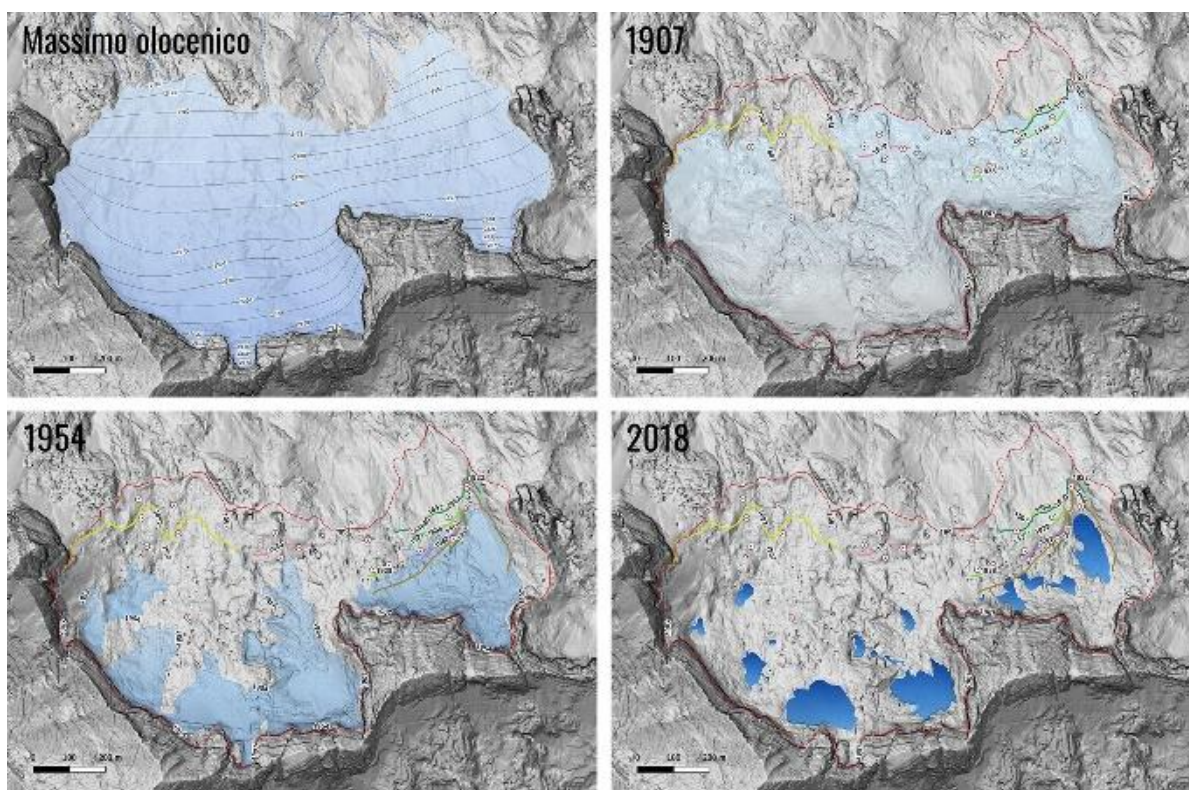
30 luglio 1893  
Arturo Ferrucci - Archivio Società Alpina Friulana



22 agosto 2020  
Renato R. Colucci - Società Meteorologica Alpino-Adriatica

In queste immagini, scattate dal medesimo punto di osservazione il 31 luglio 1893 da Arturo Ferrucci e il 22 agosto 2020 da Renato R. Colucci, si apprezza l'imponente riduzione dei ghiacciai del Canin quantificabile in una perdita di volume del ghiaccio del 96% rispetto alla massa glaciale presente durante la Piccola Età Glaciale

## Fasi evolutive del ghiacciaio del Canin



Fasi evolutive del ghiacciaio del Canin: (a) massimo olocenico ricostruito grazie alle indagini geomorfologiche (Colucci & Zebre, 2016); (b) areale 1907 grazie al rilievo topografico eseguito da Olinto Marinelli; (c) areale 1954 generato grazie alle foto aeree; (d) estensione 2018 grazie ad un rilievo LiDAR commissionato da Società Meteorologica Alpino-Adriatica

### I RILIEVI DEGLI ULTIMI ANNI

Negli ultimi 10 anni, sono state implementate **misure sistematiche almeno annuali dei bilanci di massa di alcuni dei corpi glaciali residui** del Friuli Venezia Giulia. Attualmente questi rilievi sono condotti dalla Società Meteorologica Alpino-Adriatica e dall'Istituto di Scienze Polari del CNR, in collaborazione con il Parco Naturale delle Prealpi Giulie, per quanto riguarda il corpo glaciale orientale del Canin e quello della Prevala. È invece l'Università degli Studi di Udine che si occupa del monitoraggio annuale del ghiacciaio occidentale di Montasio. La Protezione Civile del FVG fornisce un importante supporto logistico per l'esecuzione dei rilievi sul campo.

La **peculiarità degli apparati glaciali del Friuli Venezia Giulia**, in parziale controtendenza rispetto a quello che avviene per la quasi totalità del resto delle Alpi, è quella di essere **piuttosto resilienti al riscaldamento in atto**. Recentemente, alcuni lavori scientifici hanno dimostrato come la riduzione volumetrica ed areale degli ultimi 15 anni sia trascurabile. In alcuni casi, addirittura, sono stati osservati dei piccoli incrementi di massa glaciale. **Tale anomalia è ascrivibile a fattori topografici e climatici**. I corpi glaciali attuali, dopo la forte riduzione avvenuta in particolare tra la metà degli anni '80 e l'inizio degli anni 2000, si trovano ora spesso addossati alle ripide pareti rocciose settentrionali, in posizioni che favoriscono l'ombreggiamento estivo e moltiplicano l'accumulo nevoso sia di natura eolica sia valanghivo.

Inoltre, il mutamento del ciclo idrologico e la sostanziale modifica dei pattern sinottici, ha portato alcune annate invernali eccezionalmente nevose che hanno avuto il pregio di caricare di neve in maniera straordinaria le aree di accumulo dei corpi glaciali. Questi fattori assieme, sono attualmente in grado di controbilanciare l'osservato aumento delle temperature medie estive che ha portato un allungamento del periodo di ablazione dai 170 giorni della fine degli anni '70 ai 190 giorni del 2020, e incrementato la fusione potenziale da 4200 mm w.e. a 5300 mm w.e.

### L'ANNO IDROLOGICO

#### 2021-2022

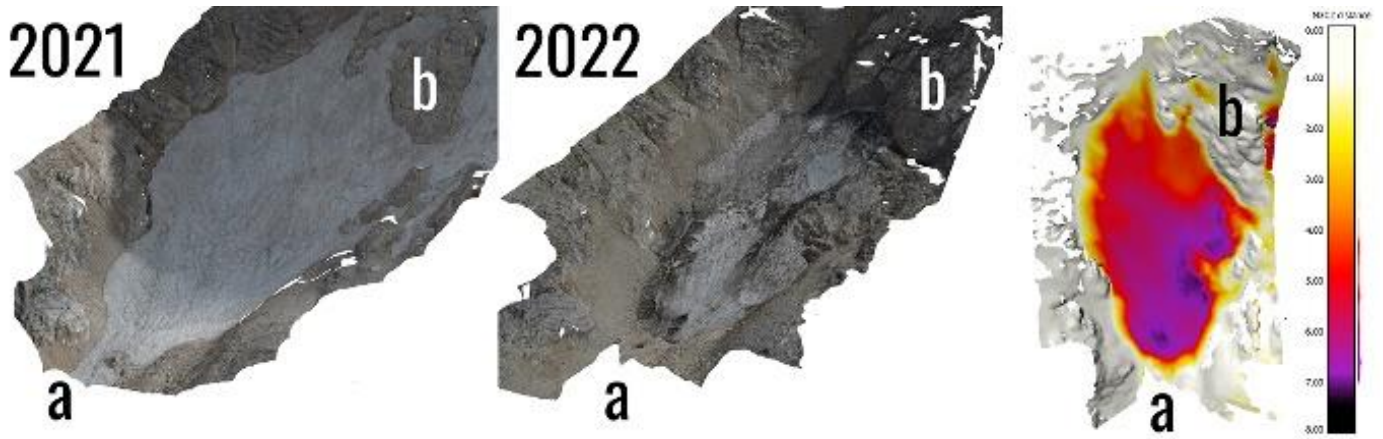
L'estate 2022, per vaste porzioni d'Europa, è stata eccezionalmente calda e paragonabile, dal punto di vista termico, all'estate del 2003. L'importante anomalia di temperatura ha interessato anche l'intero arco alpino.

**L'estate 2022 è seguita ad un inverno estremamente avaro di precipitazioni nevose per gran parte delle Alpi, ed ha portato a bilanci di massa straordinariamente negativi**, e mai osservati nella storia delle osservazioni glaciologiche delle Alpi, che sono peraltro quelle attive da più tempo a livello globale. Non stupisca l'uso apparentemente esagerato dei superlativi, motivato dal dover descrivere un qualcosa di mai osservato in precedenza dalla comunità scientifica e dagli enti preposti ai monitoraggi.

Per quanto riguarda i rilievi effettuati sul corpo glaciale orientale del Canin, i dati preliminari derivati dalle analisi geodetiche e fotogrammetriche eseguite nel mese di ottobre 2021 e 2022, ancora in fase di elaborazione, mostrano un quadro meno estremo se riferito ai grandi ghiacciai alpini, ma comunque pesantemente negativo.

Nell'immagine allegata si notano riduzioni topografiche mediamente di 5-7 metri rispetto al rilievo effettuato nel medesimo periodo dell'anno precedente.

Da rilevare in ogni caso come l'apparato glaciale in questione abbia comunque beneficiato di apporti nevosi complessivamente prossimi alle medie di lungo periodo, contrariamente al resto delle Alpi. La superficie topografica del 2022 risulta di alcuni metri superiore rispetto al dato del 2006, per ora il peggiore degli anni 2000.



Modelli digitali del terreno eseguiti con tecniche fotogrammetriche del corpo glaciale orientale del Canin e relativo differenziale con l'entità delle variazioni topografiche osservate

## EVOLUZIONE DEL GHIACCIO SOTTERRANEO DEL CANIN

Anche i depositi di ghiaccio in grotta, parte della criosfera sotterranea, stanno subendo delle significative perdite in volume a livello globale. I tassi di fusione, in aumento negli ultimi anni, minacciano la preservazione di queste spesso sottovalutate fonti di informazioni paleoclimatiche.

Sebbene l'intera comunità scientifica sia concorde su questo aspetto, manca una stima precisa di come questi depositi stiano effettivamente reagendo agli attuali cambiamenti climatici, soprattutto in termini di variazioni di volume.

Si inserisce in questo contesto il lavoro *“Long-term mass-balance monitoring and evolution of ice in caves through structure from motion-multi-view stereo and ground-penetrating radar techniques”* da poco pubblicato sulla rivista scientifica internazionale *Progress in Physical Geopgraphy* ed interamente eseguito nel comprensorio del Canin.

Il lavoro si pone come obiettivo la ridefinizione della metodologia alla base dello studio dell'evoluzione dei depositi di ghiaccio permanente in grotta, con un approccio multidisciplinare. Sono infatti utilizzate la Structure from Motion (SfM), per la ricostruzione 3D e il calcolo dei bilanci di massa, e il Ground Penetrating Radar (GPR), per la misura dei volumi e degli spessori del ghiaccio.

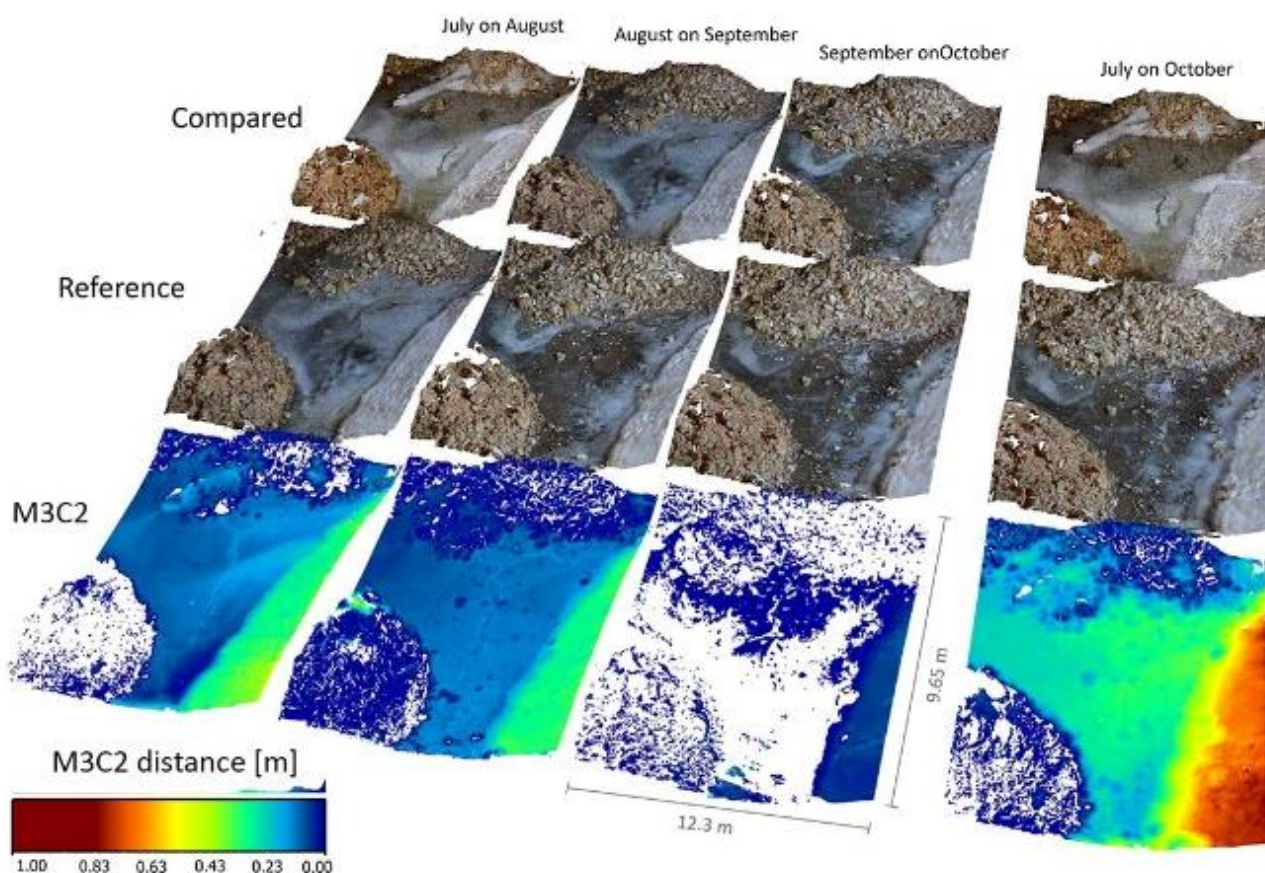
Fino ad ora le variazioni di spessore della criosfera sotterranea si misuravano in maniera puntuale, tramite questa metodologia si passa invece ad un calcolo in 3D basato su nuvole di punti. La SfM permette di raggiungere una risoluzione sub-centimetrica utilizzando una strumentazione leggera, portatile ed economica, perfetta per rilievi in ambienti difficili come quelli delle cavità alpine.



Confronto fotografico 2014-2021 in un deposito di ghiaccio sotterraneo del Canin

14 acquisizioni eseguite fra il 2017 e il 2020 in due cavità del Massiccio del Monte Canin (Alpi Giulie), combinate con dei rilievi GPR precedenti

(2012), hanno permesso il calcolo preciso delle variazioni di volume osservate all'interno delle cavità e la stima dei volumi totali.



*Esempio di confronto stagionale (luglio-ottobre) fra le scene acquisite. Il soffitto e le pareti della cavità vengono presi come riferimento e non sono presenti in questa immagine. Oltre alle variazioni di volume in m<sup>3</sup> è possibile ottenere anche la distribuzione spaziale delle variazioni all'interno della cavità. M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison) è il nome dell'algoritmo utilizzato per i confronti di volume*

Le potenzialità e le future applicazioni di questo approccio verranno ulteriormente studiate ed approfondite in diversi siti del Friuli Venezia Giulia tramite il progetto CryoKarst - Cryosphere in the Karstic environments of Friuli Venezia Giulia grazie ad un accordo operativo stipulato tra l'Istituto di Scienze Polari del CNR ed il Servizio Geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

Il progetto ha tra gli obiettivi primari lo sviluppo di tecniche di rilevamento in ambienti glaciali ipogei e l'implementazione del catasto speleologico regionale attraverso la revisione del Catasto stesso, la stesura di un protocollo di rilevamento, l'organizzazione di eventi formativi, il monitoraggio e studio delle interazioni clima-criosfera negli

ambienti glaciali sotterranei dell'area pilota del Monte Canin (clima, paleoclima, geomorfologia ed evoluzione del permafrost), lo sviluppo e la sperimentazione di tecniche SfM-MVS per l'esecuzione di rilievi tridimensionali e l'evoluzione dei depositi nel corso del tempo.

**Renato R. Colucci**  
Istituto di Scienze Polari  
CNR & Società Meteorologica Alpino-Adriatica  
**Costanza Del Gobbo**  
Istituto di Scienze Polari - CNR  
**Andrea Securo**  
Università Cà Foscari, Istituto di Scienze Polari  
& Società Meteorologica Alpino-Adriatica

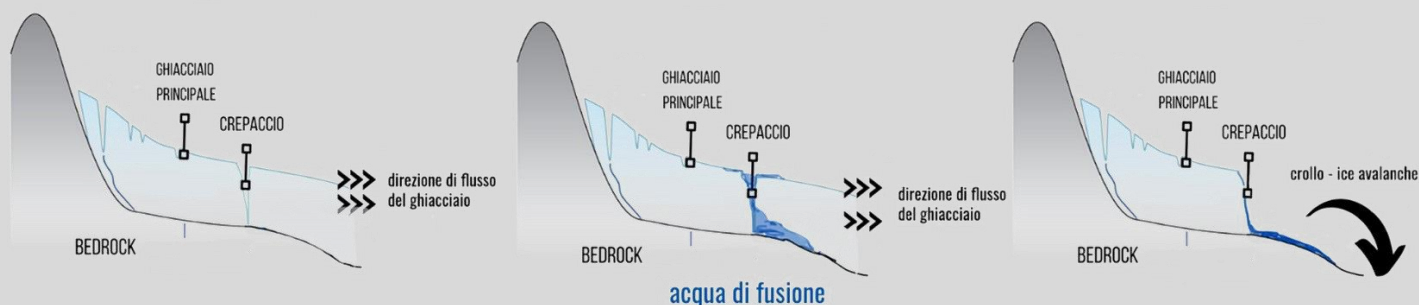
# LA VALANGA DI GHIACCIO IN MARMOLADA

Il 3 luglio 2023 una porzione di ghiacciaio della Marmolada è crollata e crollata a valle in quella che i glaciologi definiscono una ice avalanche (valanga di ghiaccio).

Le temperature eccessivamente alte per diverse settimane con valori che fino a pochi decenni fa non appartenevano alla climatologia alpina, ma piuttosto che sono tipiche del Nord Africa, hanno portato ad una enorme disponibilità di acqua di fusione glaciale. L'acqua ha saturato una frattura trasversale del ghiacciaio (un crepaccio) che si genera per deformazione e dinamica del ghiacciaio stesso sotto l'azione della sua stessa massa modificando la pressione idraulica interna che ha ulteriormente allargato la frattura e poi lubrificato

la parte basale di quella porzione di ghiacciaio facendola rovinosamente crollare verso valle.

Il riscaldamento globale sta alla base di questo evento in quanto ha ormai modificato il clima del pianeta e delle Alpi, queste ultime peraltro considerate hot-spot climatico, ossia un luogo della Terra dove gli effetti del riscaldamento globale sono più accentuati. Eventi estremi ad impronta calda per questo motivo diventano sempre più frequenti ed intensi.



Spiegazione schematica delle cause alla base del collasso di una porzione di ghiacciaio in Marmolada.

Nel 2019 uno studio condotto da CNR, Università di Trieste, Università di Genova, Aberystwyth University (Wales-UK) e ARPA Veneto ha pronosticato la scomparsa del ghiacciaio della Marmolada entro 25-30 anni. Il calcolo è stato eseguito semplicemente proiettando temporalmente in avanti i tassi di riduzione del ghiacciaio osservati tra il 2004 ed il 2014, lasciando però il clima stabile, così com'era. Ma le temperature continuano ad alzarsi a causa del riscaldamento globale; quindi, oggi potremmo anche stimare al ribasso quella ipotesi. Un'inversione di tendenza sarebbe possibile solo con un repentino raffreddamento del clima almeno sui valori degli anni 1970-1980, cosa davvero poco verosimile dal momento che è

ormai appurato inconfutabilmente che l'aumento delle temperature terrestri è strettamente correlato all'aumento dei gas serra in atmosfera dovuti ai combustibili fossili usati per produrre l'energia di cui abbiamo bisogno.

I famosi "cicli e cause naturali" invocati dagli ormai pochi negazionisti, ci dicono infatti che dal 1850 ad oggi la terra si sarebbe dovuta raffreddare di circa 0.1°C, e quindi dal punto di vista glaciologico ci troveremmo verosimilmente con ghiacciai nella medesima situazione di 170 anni fa, o anche leggermente più "sani" in alcuni casi.

**Renato R. Colucci**  
Istituto di Scienze Polari - CNR





Tutti i “Segnali dal clima in FVG”:

<https://www.arpa.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/sezioni-principali/clima-e-cambiamenti-climatici/segnali-dal-clima-in-fvg>