

SEGNALI DAL CLIMA

Vincitore dell'EMS2025
Outreach & Communication Award

FVG

CAMBIAMENTI
IMPATTI
AZIONI

COSTE E LAGUNE IN MUTAMENTO

TERRITORIO ED ECOSISTEMI
DI FRONTE ALL'INNALZAMENTO DEL MARE

VERSO
LA STRATEGIA
E IL PIANO
CLIMA FVG
IL PERCORSO E I RISULTATI
DEL PRIMO ANNO DI LAVORO

METEO 2025: IL TERZO ANNO PIÙ CALDO
E L'EVENTO DI VERSA E BRAZZANO DI CORMONS

GHIACCI SOTTERRANEI E PICCOLI BACINI MONTANI:
SITI CRITICI ATTENTAMENTE MONITORATI

UN MARE SEMPRE PIÙ CALDO E SEMPRE PIÙ ALTO:
GLI IMPATTI SU ECOSISTEMI, INSEDIAMENTI URBANI, BENI CULTURALI

COSTE ROCCIOSE E ISOLE BARRIERA:
ALLA SCOPERTA DI UN LITORALE IN CONTINUA EVOLUZIONE

OSSERVATI SPECIALI: HABITAT DI SCOGLIERA,
CANNETI LAGUNARI, PRATERIE SOMMERSE E NIDI SULLE DUNE

NOTIZIE DAL GRUPPO DI LAVORO
TECNICO SCIENTIFICO CLIMA FVG

SOLUZIONI
NATURALI
E NUOVE
TECNOLOGIE
PER AFFRONTARE
I CAMBIAMENTI:
DALLE DUNE CHE PROTEGGONO
LE COSTE AL BLUE CARBON,
DALLA MODELLISTICA
AL TELERILEVAMENTO:
APPROCCI INTEGRATI
PER RISPOSTE EFFICACI

giugno 2026

STAMPA:

Centro stampa regionale della
Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

SEGNALI DAL CLIMA FVG

CAMBIAMENTI
IMPATTI
AZIONI

notizie dal

GRUPPO DI LAVORO TECNICO SCIENTIFICO CLIMA FVG

Giugno 2026

“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:

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://climatevisual.org>

<https://unsplash.com/it>

<https://www.pexels.com/it-it/>

La foto di copertina è di Coastal Group dell'Università degli Studi di Trieste

ARPA FVG

Via Cairoli, 14 - 33057 Palmanova (UD)

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

www.ARPA.fvg.it

<https://x.com/ARPAfvg>

<https://www.instagram.com/ARPAfvg/>

https://www.youtube.com/channel/UCd04ue_5J9nkZzuTet2ISrg

<https://www.linkedin.com/company/ARPA-fvg/posts/?feedView=all>

<https://www.facebook.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>



Come citare questa pubblicazione:

Segnali dal clima in FVG. Notizie dal Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG. (ARPA FVG, 2026)

SEGNALI DAL CLIMA FVG

Segnali dal clima in FVG è una pubblicazione divulgativa nata per rispondere, un'edizione dopo l'altra, a interrogativi cruciali per il territorio e la popolazione del Friuli Venezia Giulia:

- Come sta evolvendo il clima in FVG e quali scenari ci attendono in futuro?
- Quali sono le conseguenze reali su ambiente, società ed economia della regione?
- Di quali strumenti e conoscenze disponiamo per contrastare le cause del riscaldamento globale e attenuarne gli effetti locali? E come si stanno muovendo istituzioni, mondo della ricerca e comunità?

CAMBIAMENTI, IMPATTI, AZIONI sono quindi tre prospettive complementari per raccontare la crisi climatica da un'ottica vicina a chi vive la regione.

Gli articoli nascono dal contributo volontario di decine autori degli enti del **Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG**. Grazie a questa sinergia, temi generali e focus specifici si rinnovano ogni anno, offrendo nuove informazioni e chiavi di lettura per comprendere i "segnali" del clima che cambia in Friuli Venezia Giulia.

Nelle pagine di questa rassegna, gli esperti mettono le proprie competenze a disposizione della cittadinanza, rendendo questo tema, così vasto e complesso, accessibile e coinvolgente per tutti. Le informazioni tecnico-scientifiche sono tradotte in un linguaggio chiaro e immediato, supportato da esempi pratici, immagini e infografiche. Semplificare concetti complessi non significa però banalizzarli: la lettura permette infatti di cogliere le interconnessioni tra i mutamenti climatici, le loro ricadute sui sistemi naturali e socio-economici e le risposte da attuare, mostrando come il contesto locale sia collegato alle dinamiche globali.

Vediamo quindi quali argomenti esplora l'edizione 2026.

Il 2025 è stato il terzo anno più caldo mai registrato in Friuli Venezia Giulia, come anche a livello globale: un dato che si inserisce in una tendenza climatica ben evidenziata dalle osservazioni degli ultimi decenni e che proseguirà in futuro. Per far fronte ai cambiamenti del clima e alle loro molteplici implicazioni, nel 2025 la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ha avviato il percorso per elaborare LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA FVG: gli strumenti per pianificare, con un

approccio integrato e innovativo, le azioni regionali di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. L'edizione 2026 dei Segnali si apre quindi con una sezione che fa il punto su questo percorso, sviluppato con la partecipazione dei diversi attori territoriali e della cittadinanza, che ha portato anche al primo Inventario regionale dei gas serra realizzato da ARPA FVG.

Ritroviamo poi alcuni "classici", come gli aggiornamenti annuali sui trend meteo climatici atmosferici e marini. La sezione IL METEO E IL CLIMA include anche alcuni contributi specifici sull'evento estremo che ha colpito Versa e Brazzano di Cormons nel novembre 2025, sul fenomeno "isola di calore urbano" e sulle cause del riscaldamento globale. La sezione IL MARE contiene un approfondimento sulle ondate di calore marine, particolarmente rilevanti nel Nord Adriatico. La sezione I GHIACCI E LA MONTAGNA esplora due aspetti meno noti, ma di grande rilievo per il territorio del FVG: la criosfera sotterranea e il dissesto idrogeologico nei piccoli bacini montani.

Accanto a queste tematiche, la peculiarità dell'edizione 2026 è uno "speciale" interamente dedicata a LA COSTA E LA LAGUNA. Questo ampio focus esplora l'evoluzione morfologica del litorale, dalla costa rocciosa alle sabbiose isole barriera della laguna, delineando poi gli scenari futuri di innalzamento del mare e i conseguenti rischi per città e beni culturali di inestimabile valore come Grado e Aquileia. Esperti e ricercatori guidano infine il lettore alla scoperta degli ecosistemi marini, costieri e lagunari che subiscono gli effetti dei cambiamenti climatici, ma rappresentano anche un formidabile alleato per agire sulle cause del riscaldamento globale, assorbendo il carbonio dall'atmosfera e immagazzinandolo.

Dall'insieme degli articoli emerge come la chiave per comprendere gli impatti e trovare le soluzioni per affrontare i cambiamenti climatici risieda in un approccio partecipativo e interdisciplinare, capace di produrre conoscenza e innovazione integrando diversi saperi, tecnologie e metodologie di ricerca.

La ricchezza dei contenuti di *Segnali dal clima in FVG* non "invecchia" rapidamente: per questo tutte le edizioni precedenti restano accessibili online, pronte per essere consultate.

IL GRUPPO DI LAVORO
TECNICO SCIENTIFICO
CLIMA FVG

L'ABC DEL CLIMA

I box o le pagine a sfondo arancione spiegano termini e concetti specifici utilizzati nell'articolo, fornendo le informazioni di base necessarie per una piena comprensione.

APPROFONDIMENTI

I box o le pagine a sfondo azzurro contengono ulteriori informazioni sull'argomento, esempi specifici, contenuti extra e spiegazioni tecniche per chi sia interessato a una lettura più approfondita.

CONSIGLI PRATICI

I box o le pagine a sfondo verde propongono suggerimenti sui comportamenti che ciascuno può adottare a livello personale per adattarsi a cambiamenti climatici e/o ridurre le emissioni di gas serra.

GRUPPO DI LAVORO TECNICO- SCIENTIFICO CLIMA FVG

CHI SIAMO

Enti che producono, diffondono e utilizzano la conoscenza sui cambiamenti climatici e sui loro impatti in Friuli Venezia Giulia:

- ARPA FVG
- CNR-ISMAR e CNR-ISP
- ICTP
- OGS
- REGIONE FVG
- UNIVERSITÀ DI TRIESTE
- UNIVERSITÀ DI UDINE

COSA FACCIAMO

- collaboriamo e condividiamo le conoscenze prodotte dai diversi esperti in FVG sui cambiamenti climatici e le tematiche collegate
- forniamo un orientamento tecnico-scientifico e un supporto alle decisioni a chi pianifica l'azione climatica e in particolare l'adattamento
- facilitiamo il trasferimento delle conoscenze tecnico-scientifiche a chi le deve applicare
- divulghiamo al pubblico le conoscenze sui cambiamenti climatici, sui loro effetti e sulle azioni per fronteggiarli, in modo che ciascuno possa accrescere la propria consapevolezza di come il clima agisce su di noi e di come noi agiamo sul clima

LA NOSTRA STORIA

Abbiamo condiviso le nostre conoscenze e competenze per realizzare nel 2018 il primo Studio conoscitivo sui cambiamenti climatici in FVG.

Nel 2022 la Regione FVG ha istituito formalmente il Gruppo di lavoro.

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.

LE FUNZIONI DEL GRUPPO CLIMA FVG: ORIENTAMENTO, SUPPORTO CONSULTIVO ALLA PIANIFICAZIONE CLIMATICA, TRASFERIMENTO E DIVULGAZIONE DELLE CONOSCENZE SCIENTIFICHE

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 Clima FVG favorisce poi il trasferimento delle conoscenze scientifiche ai tecnici che le applicheranno 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.

GLI ENTI E LE PERSONE



ARPA FVG – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente



Fulvio Stel (coordinatore) e Federica Flapp



CNR - Istituto di Scienze Marine di Trieste



Lorenzo Consorti



CNR - Istituto di Scienze Polari



Renato R. 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



Elena Caprotti, Nicolò Tudorov Silvia Stefanelli



Università degli Studi di Trieste



Fabio Candotto Carniel



Università degli Studi di Udine



Alessandro Peressotti

Sommario



11 VERSO LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA FVG

13 IL PERCORSO VERSO LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA DEL FRIULI VENEZIA GIULIA: INTEGRAZIONE TRA NORMA, CONOSCENZA E PARTECIPAZIONE

19 IL PRIMO ANNO DI LAVORO PER COSTRUIRE IL PIANO CLIMA FVG: giugno 2025- maggio 2026

31 REALIZZATO DA ARPA FVG IL PRIMO INVENTARIO REGIONALE DEI GAS SERRA

39 IL METEO E IL CLIMA

41 DATI METEO DEL 2025: IN FVG IL TERZO ANNO PIÙ CALDO CON PIOGGE NELLA MEDIA

49 12 ORE DI PIOGGIA CONCENTRATA SUL BACINO DELLO JUDRIO: LA SPIEGAZIONE METEO DEGLI EVENTI DI VERSA E BRAZZANO DI CORMONS

60 2025: IL TERZO ANNO PIÙ CALDO A LIVELLO GLOBALE ANOMALIE CLIMATICHE ED EVENTI ESTREMI NEL MONDO

63 LE CAUSE DEL RISCALDAMENTO GLOBALE: IL PROBLEMA DELL'ATTRIBUZIONE E LE CONCLUSIONI DELLA COMUNITÀ SCIENTIFICA

69 UN ANNO DI ATTIVITÀ DEL PROGETTO TRANSFRONTALIERO HEATISLANDS ADAPT SULLE ISOLE DI CALORE URBANE

81 SIMULARE L'ISOLA DI CALORE URBANA PER PROGETTARE EDIFICI TENENDO CONTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

91 20 ANNI DI METEO.FVG REPORT: L'INFORMAZIONE METEO-CLIMATICA PER I CITTADINI DEL FVG

97 I GHIACCI E LA MONTAGNA

99 LA CRIOSFERA SOTTERRANEA, NICCHIA DI STUDIO E SENTINELLA DEL CLIMA CHE CAMBIA

107 PICCOLI BACINI MONTANI, GRANDI FENOMENI DI DISSESTO: COME LA TECNOLOGIA AIUTA A LEGGERE GLI EFFETTI DEL CLIMA CHE CAMBIA

114 CONOSCERE IL TERRITORIO • IL MARE • LE COSTE • LE LAGUNE DEL FVG

125 IL MARE

127 2025: ANCORA UN LIVELLO MEDIO DEL MARE TRA I PIÙ ALTI MAI REGISTRATI

130 NEL 2025 LA SECONDA PIÙ ALTA TEMPERATURA MEDIA ANNUA PER IL GOLFO DI TRIESTE

133 UN MARE SEMPRE PIÙ CALDO, IN SUPERFICIE E IN PROFONDITÀ

143 SPECIALE LA COSTA E LA LAGUNA



147 LE COSTE ROCCIOSE

149 LE COSTE ROCCIOSE DEL FVG, TESTIMONI RESISTENTI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

165 VIAGGIO NEL TEMPO: IL LIVELLO DEL MARE ADRIATICO DALLA PREISTORIA A OGGI

169 LA "CASA DELLA MAREA": VITA E STATO DELL'AMBIENTE SULLE NOSTRE SCOGLIERE



181 LE DUNE E LE ISOLE BARRIERA

183 UNA RISPOSTA NATURALE ALL'INNALZAMENTO DEL MARE: L'EVOLUZIONE DELLE ISOLE BARRIERA

195 DIFENDERE LE NOSTRE COSTE CON SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA: IL RIPRISTINO DELLE DUNE COSTIERE

205 UN OCCHIO (SATELLITARE) DI RIGUARDO PER I NIDI DI BECCACCIA, FRATINO E ALTRI UCCELLI SULLE DUNE COSTIERE



213 SCENARI FUTURI PER CITTÀ COSTIERE E BENI CULTURALI

215 SALE IL LIVELLO DEL MARE: LE ANALISI DI ARPA FVG SUI POSSIBILI IMPATTI PER COSTE E LAGUNE DEL FVG

225 GRADO: SCENARI FUTURI DI ALLAGAMENTO COSTIERO SECONDO I LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE

231 INNALZAMENTO DEL MARE, DELLE FALDE ACQUIFERE DEL FIUME: SCENARI FUTURI PER AQUILEIA



243 LA VITA VEGETALE NELLA LAGUNA E SUI FONDALI

245 IL DESTINO DEI CANNETI ALLA FOCE DELLO STELLA IN UNA LAGUNA SEMPRE PIÙ MARINIZZATA

253 L'ESPANSIONE DELLE FANEROGAME MARINE NELLA LAGUNA DI GRADO-MARANO: DALL'O SPAZIO I SEGNALI DI UNA LAGUNA CHE CAMBIA

261 A BORDO DEL PROGETTO BRIGANTINE: UN CONCENTRATO DI TECNOLOGIA PER UN MONITORAGGIO COSTIERO SOSTENIBILE

267 *BLUE CARBON*: IL RUOLO NASCOSTO DEGLI ECOSISTEMI MARINI NELLA LOTTA AL CAMBIAMENTO CLIMATICO

VERSO LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA FVG

Un percorso integrato tra norma, conoscenza e partecipazione

Affrontare la crisi climatica su scala regionale richiede una visione d'insieme capace di tradurre le grandi indicazioni internazionali per la mitigazione e i principi generali per l'adattamento in azioni concrete sul territorio. Questa sezione accompagna il lettore dietro le quinte del percorso che la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ha intrapreso per dotarsi dei suoi due strumenti fondamentali di risposta al riscaldamento globale e alle sue conseguenze locali: la **Strategia e il Piano Clima Regionale**, con il traguardo ambizioso della neutralità climatica entro il 2045.

Il percorso di lettura si sviluppa attraverso tre tappe complementari:

- **La cornice istituzionale e le prossime fasi:** il primo contributo delinea l'architettura normativa della legge FVGreen. Viene spiegato come il percorso stia entrando in una fase cruciale attraverso l'avvio della Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e della consultazione pubblica, due passaggi chiave per garantire decisioni condivise e trasparenti.
- **Il lavoro sul campo e la partecipazione:** il secondo articolo traccia il bilancio del primo intenso anno di attività (giugno 2025 – maggio 2026). Qui si scopre il dietro le quinte metodologico: come i tavoli tecnici, i momenti formativi e gli incontri con i cittadini abbiano permesso di mappare le vulnerabilità del territorio, tenendo fermo il principio della giustizia climatica per proteggere i contesti più fragili.
- **I dati scientifici di partenza:** per pianificare il futuro, infine, è indispensabile misurare accuratamente il presente. L'ultimo contributo presenta il primo inventario regionale dei gas serra realizzato da ARPA FVG. Uno strumento scientifico fondamentale che quantifica le emissioni e gli assorbimenti della regione, identificando nei trasporti e nei combustibili fossili i nodi principali su cui intervenire.

Tre letture che, insieme, offrono una panoramica completa di come la conoscenza scientifica, il coinvolgimento delle comunità e l'azione politica si stiano integrando per ridisegnare il futuro climatico del Friuli Venezia Giulia.





IL PERCORSO VERSO LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA DEL FRIULI VENEZIA GIULIA: INTEGRAZIONE TRA NORMA, CONOSCENZA E PARTECIPAZIONE

La Regione Friuli Venezia Giulia sta elaborando la **Strategia e il Piano clima** per raggiungere la neutralità climatica entro il 2045, come previsto dalla legge *FVGreen*. Il percorso, avviato nel 2025 con termine nel 2027, integra mitigazione e adattamento e si sviluppa attraverso un approccio partecipativo.

L'approvazione della Proposta preliminare di Piano avvia ora la Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e la consultazione pubblica, passaggi chiave per definire le azioni territoriali e garantire la trasparenza.

La Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ha avviato negli ultimi anni un processo articolato per dotarsi di una Strategia e di un Piano regionale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. Si tratta di un percorso complesso, che intreccia dimensioni normative, tecniche e partecipative, con l'obiettivo di costruire politiche climatiche integrate e capaci di incidere concretamente sul territorio. Il quadro di riferimento normativo è rappresentato dalla legge regionale 17 febbraio 2023, n. 4, nota come Legge *FVGreen*.

LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA: DUE STRUMENTI COMPLEMENTARI

**LA STRATEGIA DEVE
DEFINIRE LA VISIONE
E GLI OBIETTIVI
STRATEGICI, IL PIANO
DEVE INDIVIDUARE
MISURE CONCRETE
E VERIFICABILI PER
LA MITIGAZIONE E
L'ADATTAMENTO**

La legge fissa obiettivi ambiziosi, tra cui il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2045. All'interno di questo impianto, individua due strumenti fondamentali: la *Strategia regionale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici*, con funzione di indirizzo, e

il Piano clima regionale, strumento operativo che traduce tali indirizzi in azioni, tempi, risorse e responsabilità.

La Strategia dovrà definire la visione e gli obiettivi strategici, coprendo un ampio spettro di settori – dall'energia ai trasporti, dall'agricoltura alla salute – e affrontando congiuntamente mitigazione e adattamento.

Il Piano, invece, rappresenta il dispositivo attuativo, chiamato a individuare misure concrete e verificabili, garantendo coerenza con la programmazione regionale e locale.

L.R. N. 4/2023 ("FVGREEN") «DISPOSIZIONI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE E LA TRANSIZIONE ECOLOGICA DEL FRIULI VENEZIA GIULIA»

STRATEGIA DI MITIGAZIONE E ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Quadro di orientamento

in linea con obiettivi Strategia Regionale per lo Sviluppo Sostenibile e indirizzi SNAC, PNACC, PNIEC e Strategia italiana di lungo termine per la riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra

FASI

- Raccolta dati: **quadro territoriale, climatico, emissivo e normativo**
- Analisi: **vulnerabilità, i rischi e le opportunità collegate ai Cambiamenti Climatici** attuali e futuri in FVG ► **ADATTAMENTO**
- Analisi: **mappatura azioni di MITIGAZIONE** presenti nei vari piani
- **macro obiettivi**
- **obiettivi generali**
- **visione del territorio condivisa**

PIANO DI MITIGAZIONE E ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

definerà:

**le misure e azioni
prioritarie**

**i soggetti attuatori
e responsabili**

i tempi

**la stima delle risorse
necessarie**

L'impostazione adottata è quella di un approccio integrato, che dovrà coniugare appunto la mitigazione, che deve essere affrontata coerentemente con gli obiettivi internazionali, e l'adattamento, che richiede un approccio fortemente legato al territorio. Il Friuli Venezia Giulia si configura come un territorio particolarmente esposto ai cambiamenti climatici, sia per la sua collocazione tra area alpina e mediterranea, sia per l'interconnessione tra sistemi ambientali e socioeconomici. I dati climatici mostrano un aumento significativo delle temperature, il progressivo innalzamento del mare e una crescente pressione sulle risorse idriche, elementi che rendono urgente l'adozione di politiche mirate.

**LA MITIGAZIONE
VA AFFRONTATA
COERENTEMENTE
CON GLI OBIETTIVI
INTERNAZIONALI,
L'ADATTAMENTO
RICHIEDE UN
APPROCCIO
FORTEMENTE LEGATO
AL TERRITORIO**

INTEGRARE CONOSCENZA E GOVERNANCE

In questo contesto, il processo di redazione della Strategia e del Piano deve integrare conoscenza e governance.

**UNA SOLIDA BASE
CONOSCITIVA SU
CLIMA, EMISSIONI E
IMPATTI SUPPORTA
UNA PIANIFICAZIONE
GESTITA IN MODO
COORDINATO,
SUPERANDO LA
FRAMMENTAZIONE
SETTORIALE**

Tra i principali strumenti sviluppati per fornire alla pianificazione una solida base conoscitiva, figurano il quadro climatico regionale, gli inventari emissivi e le analisi di rischio basate sulle "catene d'impatto", che consentono di leggere in modo sistematico vulnerabilità e interconnessioni tra settori.

Parallelamente, la governance del processo è assicurata dalla Cabina di regia regionale, prevista dalla legge e composta dai vertici dell'amministrazione e degli enti regionali, con il compito di coordinare la definizione degli strumenti e garantirne la coerenza. Questo assetto consente di affrontare la sfida climatica con un approccio trasversale, superando la frammentazione settoriale.

LA MITIGAZIONE E L'ADATTAMENTO: LE DUE FACCE DELL'AZIONE PER IL CLIMA

Agire per il clima significa attivarsi a tutti i livelli – individuale e collettivo, locale e globale – per limitare il riscaldamento globale agendo sulle sue cause e per ridurre gli impatti attuali e futuri. Due sono quindi le linee di azione, indispensabili e complementari: la "mitigazione" e l'"adattamento", termini che nell'ambito delle politiche climatiche hanno un significato ben preciso.

MITIGAZIONE

(del cambiamento climatico)

qualsiasi intervento umano che riduca le fonti (*sources*) di rilascio, o rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento (*sinks*) dei gas serra.

La mitigazione agisce sulle cause antropiche dei cambiamenti climatici e quindi, in tempi lunghi, sulla sorgente di pericolo (*hazard*).

ADATTAMENTO

il processo di adeguamento al clima attuale o atteso e ai suoi effetti. Nei sistemi umani, l'adattamento cerca di limitare i danni o di sfruttare le opportunità favorevoli. Nei sistemi naturali, l'intervento umano può agevolare l'adattamento al clima atteso e ai suoi effetti.

L'adattamento agisce sugli effetti del cambiamento climatico: ne riduce i rischi intervenendo sull'esposizione e sulla vulnerabilità



L'Assessore regionale alla Difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile, Fabio Scoccimarro

COS'È LA VAS - VALUTAZIONE AMBIENTALE STRATEGICA

La Valutazione Ambientale Strategica (VAS) è una procedura amministrativa preventiva che garantisce l'integrazione della sostenibilità ambientale nei piani e nei programmi che possono avere un impatto significativo sull'ambiente. Introdotta dall'Unione Europea e recepita in Italia dal Testo Unico Ambientale (D.Lgs. 152/2006), prevede un'analisi dei possibili impatti prima dell'approvazione del piano.

La VAS si sviluppa parallelamente alla stesura del piano, favorendo un processo decisionale trasparente, con l'finalità di "garantire un elevato livello di protezione dell'ambiente e contribuire all'integrazione di considerazioni ambientali all'atto dell'elaborazione, dell'adozione e approvazione di detti piani e programmi assicurando che siano coerenti e contribuiscano alle condizioni per uno sviluppo sostenibile".

IL PROCESSO DI REDAZIONE DI STRATEGIA E PIANO

CON LA PROPOSTA PRELIMINARE DI PIANO SI CHIUDE LA PRIMA FASE DI UN PERCORSO INTENSO, PARTECIPATO E ATTENTO ALLA GIUSTIZIA CLIMATICA

Il processo di redazione ha preso forma concreta a partire dal 2025, con l'avvio delle attività di redazione della Strategia e del Piano, in un orizzonte temporale che porterà al completamento entro il 2027. Le fasi già attuate comprendono la definizione della roadmap, la costruzione del quadro conoscitivo e l'attivazione dei tavoli tecnici interni all'amministrazione, oltreché l'avvio del processo partecipativo. Nei tavoli tecnici, organizzati per settori di mitigazione e di adattamento, sono state elaborate le prime analisi di rischio e raccolti contributi per la definizione degli obiettivi e delle linee di intervento. Sul piano metodologico, un'attenzione specifica è dedicata anche alla dimensione della giustizia climatica, intesa come equa distribuzione di rischi, costi e benefici delle politiche climatiche. Ciò implica la necessità di considerare le diverse vulnerabilità territoriali e sociali, identificando i contesti più esposti e meno resilienti.

CON L'AVVIO DELLA VAS IL PERCORSO ENTRA IN UNA FASE CRUCIALE PER DEFINIRE LE AZIONI A BREVE E IL MODELLO DI NEUTRALITÀ E RESILIENZA A LUNGO TERMINE PER IL FVG

La prima fase formale del processo si conclude a luglio 2026 con l'approvazione di una Proposta preliminare di Piano, come previsto dalla legge FVGreen. Con la Proposta preliminare di Piano viene avviato il processo di Valutazione ambientale strategica (VAS), i cui passi successivi sono l'approvazione della Proposta di Piano, la consultazione pubblica e l'approvazione definitiva del Piano clima regionale.

Nello specifico, con l'avvio della fase di VAS e della consultazione pubblica, il percorso entra in una fase particolarmente importante. Le scelte che verranno sviluppate nei prossimi mesi contribuiranno a definire gli strumenti di risposta ai cambiamenti climatici, e a delineare il modello di neutralità e resilienza che il Friuli Venezia Giulia potrà perseguire nel lungo periodo.



Un elemento qualificante del percorso è rappresentato infine dal coinvolgimento progressivo degli attori territoriali. La normativa regionale prevede infatti esplicitamente un processo partecipativo inclusivo, che coinvolga enti locali, parti sociali, cittadini e stakeholder. Questo approccio si integra con la procedura di VAS, assicurando trasparenza, accesso alle informazioni e possibilità di contribuire alla definizione delle scelte di mitigazione e adattamento.

Elena Caprotti, Nicolò Tudorov
Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia





IL PRIMO ANNO DI LAVORO PER COSTRUIRE IL PIANO CLIMA FVG: giugno 2025- maggio 2026

Il primo anno di lavoro per redigere il Piano clima FVG ha coinvolto amministrazione regionale, esperti esterni, attori territoriali e cittadinanza in un percorso intenso e partecipato. Attività formative, analisi tecnico-scientifiche, tavoli di lavoro, incontri sul territorio hanno consentito di consolidare il quadro conoscitivo territoriale, analizzare i rischi climatici per il FVG nei diversi sistemi esposti e intercettare criticità e bisogni in un'ottica di giustizia climatica, ponendo le basi per la pianificazione delle azioni.

Il percorso di redazione della *Strategia e del Piano regionale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici*, avviato nel 2025, è stato suddiviso in quindici moduli di lavoro, chiamati "Work package", ognuno dedicato a uno specifico tema, processo o documento da produrre, con l'obiettivo di una approvazione definitiva dei documenti pianificatori entro la fine del 2027.

Il primo anno di lavoro per la redazione del Piano clima del Friuli Venezia Giulia è stato un periodo particolarmente intenso, denso di attività e ricco di passaggi significativi. Tra giugno 2025 e maggio 2026, la Regione ha avviato e consolidato un processo articolato che ha visto la progressiva costruzione di un quadro conoscitivo solido, l'attivazione di un confronto strutturato tra le diverse componenti dell'amministrazione e il coinvolgimento di una pluralità di soggetti esterni.

Si è trattato, in sostanza, di un percorso integrato, caratterizzato da un continuo dialogo tra dimensione amministrativa, tecnico-scientifica, partecipativa, decisionale, che ha posto le basi per lo sviluppo di uno strumento pianificatorio complesso, in grado di realizzare delle azioni che consentano al territorio regionale di affrontare al meglio le sfide poste dai cambiamenti climatici.

UN PROCESSO STRUTTURATO: TRA FORMAZIONE, ANALISI E PARTECIPAZIONE

Il percorso di redazione del Piano clima regionale si è sviluppato secondo una logica integrata, con diverse fasi: la formazione e il rafforzamento delle competenze, l'analisi e l'elaborazione tecnico-scientifica, e infine la partecipazione e il coinvolgimento degli attori istituzionali e territoriali.

**PROCESSO
PARTECIPATIVO E
INTEGRAZIONE TRA
CONOSCENZA E
GOVERNANCE SONO
GLI ELEMENTI CHIAVE
DI UN PERCORSO
CONDIVISO BASATO
SU CONFRONTO E
APPRENDIMENTO
RECIPROCO**

Questo approccio riflette pienamente quanto previsto dalla legge regionale n. 4/2023 "FVGreen", che individua nel processo partecipativo e nell'integrazione tra conoscenza e governance due elementi chiave per la costruzione delle politiche climatiche. In questo quadro, il Piano non sarà concepito come un prodotto tecnico calato dall'alto, ma come il risultato di un percorso condiviso e progressivamente costruito, basato sul confronto e sull'apprendimento reciproco.

diviso e progressivamente costruito, basato sul confronto e sull'apprendimento reciproco.

LA FASE INIZIALE: *CAPACITY BUILDING* E CONSOLIDAMENTO DELLE BASI CONOSCITIVE (giugno – dicembre 2025)

Il percorso ha preso avvio nel giugno 2025 con una fase dedicata al rafforzamento delle competenze dei soggetti coinvolti, in particolare dei referenti tecnici dell'amministrazione regionale. Questa fase di *capacity building* ha rappresentato un passaggio abilitante, volto non solo a condividere le conoscenze, ma soprattutto a costruire un linguaggio comune e una base metodologica condivisa tra attori provenienti da ambiti disciplinari e amministrativi diversi tra loro.

**UN PRIMO
PASSAGGIO
FONDAMENTALE:
AGGIORNARE LE
CONOSCENZE,
COSTRUIRE UN
LINGUAGGIO
COMUNE E
UNA BASE
METODOLOGICA
CONDIVISA**

Il percorso formativo si è sviluppato parallelamente all'elaborazione delle fondamenta conoscitive del Piano (quadro territoriale, climatico, emissivo nonché normativo e pianificatorio) e si è articolato sia in una giornata formativa dedicata ai tecnici di tutti i Servizi regionali (25 giugno 2025), sia in attività di formazione "*on the job*" in corso d'opera.

L'attività formativa è stata strutturata come momento di apprendimento ma anche di



Giornata formativa per i tecnici regionali (25 giugno 2025): intervento sui cambiamenti climatici a cura di ARPA FVG

confronto, con un approccio interattivo che ha favorito il dialogo tra esperti e tecnici regionali. I contenuti hanno riguardato anzitutto il quadro climatico regionale, con un approfondimento sulle principali evidenze osservate e sulle proiezioni future, al fine di comprendere

I CONTENUTI DELLA FASE FORMATIVA HANNO RIGUARDATO: IL QUADRO CLIMATICO ED EMISSIVO REGIONALE E LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO CLIMATICO

le caratteristiche specifiche del Friuli Venezia Giulia e la sua esposizione ai cambiamenti climatici. Parallelamente, è stato affrontato il tema del quadro emissivo regionale, con l'analisi delle principali fonti di emissione e delle dinamiche settoriali, elemento essenziale per orientare le future politiche di mitigazione.

Particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione del rischio climatico, intesa come integrazione tra pericolosità, esposizione e vulnerabilità. In questo ambito, un ruolo centrale è svolto dalla metodologia delle catene d'impatto, che consente di rappresentare in modo strutturato le relazioni tra fenomeni climatici, effetti sui sistemi naturali e socioeconomici e possibili conseguenze in termini di danni o perdite.

La fase di formazione ha inoltre avuto una funzione di allineamento strategico, permettendo di condividere gli obiettivi del percorso pianificatorio e il ruolo del Piano clima all'interno del quadro definito dalla legge regionale n. 4/2023 "FVGGreen". Questo ha contribuito a rafforzare la consapevolezza del carattere trasversale della politica climatica e della necessità di un impegno coordinato da parte dell'intera amministrazione.

L'ATTIVAZIONE DEI TAVOLI TECNICI E L'ANALISI DEI SISTEMI ESPOSTI (settembre 2025)

A partire da settembre 2025, il processo è entrato in una fase più operativa, con l'attivazione dei tavoli di lavoro tematici dedicati all'analisi dei sistemi esposti ai cambiamenti climatici. Sono stati organizzati dodici tavoli, ciascuno corrispondente a uno dei principali sistemi ambientali, socioeconomici e territoriali considerati rilevanti per il contesto regionale:

SONO STATI ATTIVATI 12 TAVOLI DI LAVORO TEMATICI PER DEFINIRE GLI IMPATTI CLIMATICI, LE VULNERABILITÀ E COSTRUIRE LE CATENE D'IMPATTO

Questi tavoli, costruiti a partire dalle indicazioni del *Piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici* e adattati al contesto regionale, hanno rappresentato il primo momento strutturato di elaborazione tecnica condivisa. All'interno di ciascun tavolo, i referenti delle diverse strutture regionali hanno contribuito all'identificazione degli impatti climatici, alla definizione delle vulnerabilità e alla costruzione delle prime catene d'impatto.

Il lavoro svolto ha consentito di mettere in evidenza non solo i rischi specifici dei singoli settori, ma anche le interconnessioni tra sistemi diversi, evidenziando possibili effetti a cascata. Questo elemento ha rafforzato la consapevolezza della necessità di un approccio integrato, capace di superare la tradizionale frammentazione settoriale delle politiche pubbliche.

I 12 TAVOLI TECNICI

- tavolo 1 ACQUE INTERNE: RISORSE, UTILIZZI, ECOSISTEMI**
- tavolo 2 AGRICOLTURA E ALLEVAMENTO**
- tavolo 3 ENERGIA**
- tavolo 4 ECOSISTEMI TERRESTRI**
- tavolo 5 FORESTE**
- tavolo 6 ZONE MONTANE: TERRITORIO, TURISMO, SPORT; VIABILITÀ MONTANA**

- tavolo 7 INSEDIAMENTI E AREE URBANE**
- tavolo 8 INFRASTRUTTURE CRITICHE E TRASPORTI**
- tavolo 9 SALUTE UMANA**
- tavolo 10 MARE E LAGUNA: ECOSISTEMI, PESCA, ACQUACOLTURA**
- tavolo 11 ZONE COSTIERE: TERRITORIO, TURISMO, SPORT D'ACQUA, PORTI MINORI E VIE D'ACQUA**
- tavolo 12 PATRIMONIO CULTURALE E PAESAGGISTICO**

IL PERCORSO PARTECIPATIVO INTERNO ALLA REGIONE

IL CONFRONTO INTERNO HA PERMESSO DI SUPERARE LE SUDDIVISIONI SETTORIALI E RAFFORZARE LA CAPACITÀ DELLA REGIONE DI AFFRONTARE LA SFIDA CLIMATICA

Uno degli aspetti più rilevanti del percorso è stato il coinvolgimento sistematico e continuativo delle strutture regionali. Il processo ha infatti interessato un numero molto ampio di uffici, attivati attraverso i tavoli dei referenti tecnici e attraverso incontri bilaterali e plenari.

Questo coinvolgimento ha contribuito ad alimentare un processo di condivisione e confronto interno alla Regione particolarmente ricco e significativo. Il superamento delle delimitazioni tra i singoli ambiti di competenza ha rappresentato uno degli esiti più importanti del percorso, consentendo di mettere in comune conoscenze tecniche, esperienze amministrative e informazioni settoriali.

GLI INCONTRI CON I SERVIZI PER VALIDARE LE ANALISI DEI RISCHI E IMPOSTARE LE LINEE DI INTERVENTO (gennaio-marzo 2026)

I tavoli di settembre 2025 hanno costituito il primo momento di confronto strutturato, mentre i 28 incontri con i Servizi svolti tra gennaio e marzo 2026 hanno consentito di approfondire e validare i risultati delle analisi, in particolare per quanto riguarda i rischi climatici e le vulnerabilità. In questa

fase, il dialogo diretto con le strutture ha anche favorito l'emersione di criticità, priorità e possibili linee di intervento, gettando le basi per la definizione degli obiettivi del Piano.

Parallelamente, è stata avviata una ricognizione delle misure di mitigazione già presenti nelle politiche e nella pianificazione regionale, con l'obiettivo di costruire un quadro coerente e integrato delle azioni esistenti.

Il lavoro svolto in questa fase ha rappresentato un momento chiave del processo, in quanto ha

28 INCONTRI CON I SERVIZI REGIONALI HANNO PERMESSO DI CONSOLIDARE IL QUADRO CONOSCITIVO E DI ORIENTARE LA DEFINIZIONE DI OBIETTIVI E LINEE DI INTERVENTO

permesso di consolidare il quadro conoscitivo e di orientare in modo più preciso la definizione degli obiettivi e delle linee di intervento del Piano.

Nel complesso, il percorso partecipativo interno ha contribuito a costruire una visione condivisa della sfida climatica, rafforzando la capacità dell'amministrazione regionale di affrontarla in modo coordinato e sistemico.

IL PERCORSO PARTECIPATIVO ESTERNO: IL COINVOLGIMENTO DEGLI STAKEHOLDER (ottobre-novembre 2025)

Accanto al percorso interno, particolare rilevanza è stata attribuita al coinvolgimento degli stakeholder esterni, ossia le persone e le organizzazioni rappresentative delle diverse realtà del territorio regionale. In coerenza con quanto previsto dalla legge regionale n. 4/2023 "FVGreen",

il Piano è stato infatti sviluppato anche attraverso un processo partecipativo volto a coinvolgere una pluralità di soggetti del territorio.

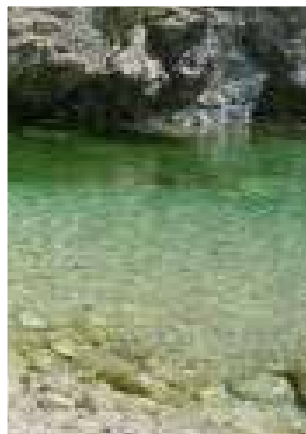
La norma prevede il coinvolgimento di diverse categorie di attori: enti locali, enti pubblici operanti nei settori rilevanti, università e centri di ricerca, rappresentanti del sistema economico e produttivo, associazioni di categoria, organizzazioni della società civile e cittadini.

In particolare, tra ottobre e novembre 2025 sono stati organizzati dei tavoli di confronto tra gli stakeholder, organizzati secondo i 12 sistemi, parallelamente a quanto fatto nel percorso interno all'amministrazione regionale.

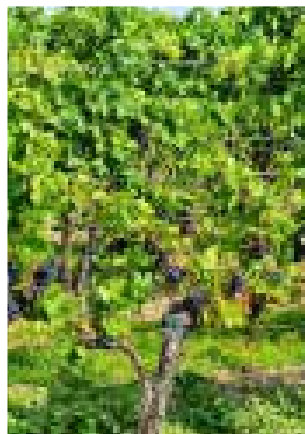
SONO STATI ORGANIZZATI 12 TAVOLI DI CONFRONTO CON GLI STAKEHOLDER PER INTEGRARE L'ANALISI DI RISCHI E VULNERABILITÀ E RACCOGLIERE PROPOSTE DI AZIONE

I TEMI DEI 12 TAVOLI DI CONFRONTO CON GLI STAKEHOLDER

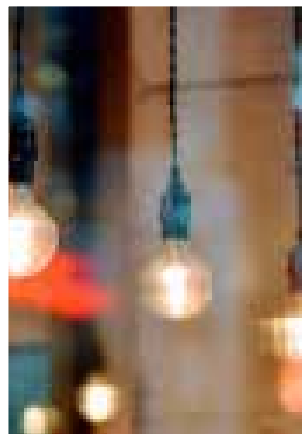
ACQUE INTERNE



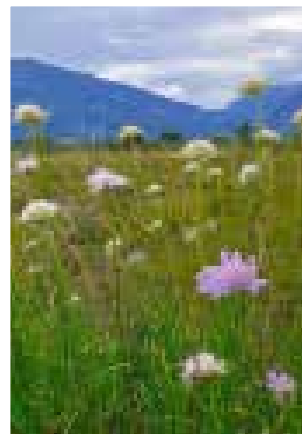
AGRICOLTURA



ENERGIA



ECOSISTEMI TERRESTRI



MONTAGNA territorio, turismo, sport, visibilità montana



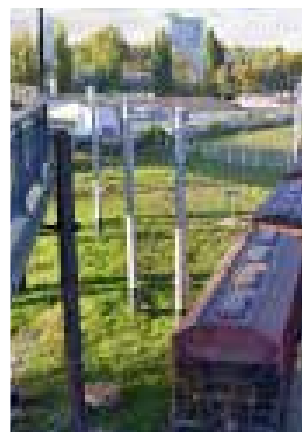
FORESTE



INSEDIAMENTI URBANI



INFRASTRUTTURE CRITICHE E TRASPORTI



SALUTE



MARE E LAGUNA ecosistemi, pesca e acquacoltura



ZONE COSTIERE: territorio, turismo, sport d'acqua, porti minori e vie d'acqua



PATRIMONIO CULTURALE E PAESAGGISTICO





Foto: Kallipolis

L'incontro con gli studenti dell'Università di Trieste presso il roseto del Parco di San Giovanni (27 maggio 2026)

GLI INCONTRI PUBBLICI SUL TERRITORIO (ottobre-dicembre 2025)

Inoltre, si sono tenuti una serie di incontri pubblici di confronto, su varie tematiche collegate ai cambiamenti climatici.

- Il primo incontro, dal titolo **“Il clima che cambia: le aree montane e le foreste”**, si è svolto il 13 ottobre 2025, presso l'auditorium del Museo dell'Ex Centrale Idroelettrica “A. Pitter” di Malnisio a Montereale Valcellina: si è discusso di come le foreste siano una risorsa naturale ed economica fondamentale per la regione, evidenziando la centralità per la vitalità delle aree montane, e parallelamente si sono evidenziate le principali vulnerabilità cui tali ecosistemi risultano esposti.

IN 4 INCONTRI PUBBLICI A MONTEREALE VALCELLINA, TRIESTE, PALMANOVA E GRADO SI SONO AFFRONTATI I TEMI PIÙ RILEVANTI PER I DIVERSI CONTESTI TERRITORIALI
- Il secondo incontro, dal titolo **“Il clima che cambia: aree urbane, salute umana e i benefici del verde in città”**, si è svolto il 17 ottobre 2025, presso la sede della Regione di via Cavour a Trieste. L'iniziativa ha visto la presentazione di soluzioni e proposte orientate alla valorizzazione del verde urbano, alla tutela della salute, alla diffusione di pratiche abitative sostenibili e innovative e alla promozione di stili di vita rispettosi dell'ambiente.
- Il terzo incontro, dal titolo **“Il clima che cambia: agricoltura e risorse idriche”** si è svolto il 20 novembre 2025, presso il Salone d'onore del Palazzo Municipale di Palmanova. I temi trattati sono stati gli effetti dei cambiamenti climatici sulla pianura coltivata, evidenziando le nuove sfide per il settore agricolo e l'importanza della ricerca e dell'innovazione per lo sviluppo di modelli produttivi sostenibili e resilienti.
- Il quarto incontro, dal titolo **“Il clima che cambia: aree costiere, beni culturali e paesaggistici”** si è svolto il 4 dicembre 2025, presso l'auditorium “Biagio Marin” di Grado, ha approfondito le criticità connesse alle aree costiere, sempre più esposte a scenari complessi di inondazione e a significative trasformazioni del paesaggio lagunare, soffermandosi anche sui rischi specifici per il patrimonio culturale e sull'importanza di strategie integrate per la sua tutela.

GLI INCONTRI DEDICATI AI COMUNI, ALLA GIUSTIZIA CLIMATICA E AI GIOVANI (febbraio-maggio 2026)

**CON MODALITÀ
PARTECIPATIVE SONO
STATI RACCOLTE
ESPERIENZE,
ESIGENZE E
PROPOSTE DA ENTI
LOCALI, OPERATORI
DEL WELFARE
TERRITORIALE
E STUDENTI
UNIVERSITARI**

Nell'ottica di un coinvolgimento attivo dei Comuni del territorio e di rafforzamento del dialogo tra livello regionale e locale, è stato organizzato anche un incontro dedicato agli enti locali, dal titolo "Il clima che cambia: Il ruolo dei comuni e gli strumenti di pianificazione", che si è svolto il 5 febbraio 2026, a Udine presso l'auditorium della Regione "A. Comelli". L'obiettivo era duplice: da un lato, valorizzare e richiamare gli strumenti già disponibili a supporto delle amministrazioni locali nella mitigazione e nell'adattamento ai cambiamenti climatici; dall'altro, raccogliere contributi, esigenze e buone pratiche provenienti dai territori, esplorando come queste azioni siano già integrate — o possano esserlo — negli strumenti di pianificazione e gestione del territorio. A una serie di relazioni in plenaria è seguito quindi lo svolgimento di una sessione interattiva: in più workshop paralleli i referenti dei Comuni si sono confrontati sui rischi climatici e sulle possibili soluzioni portando l'esperienza dei rispettivi territori.

Inoltre, la giustizia climatica è stata affrontata in un incontro dedicato, che si è svolto il 10 marzo 2026, in cui, con operatori ed esperti dell'ambito socio-economico, sanitario e del volontariato, si sono affrontati i temi delle disuguaglianze sociali connesse alle vulnerabilità indotte dal cambiamento climatico.

Infine, a maggio 2026, sono stati organizzati due incontri con gli studenti delle Università di Udine e di Trieste: attraverso attività laboratoriali organizzate in piccoli gruppi, i giovani hanno portato le loro esperienze e proposte in particolare

LA SQUADRA DI LAVORO

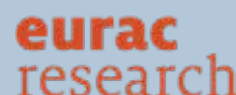
Il percorso descritto, condotto dal Servizio Transizione Energetica della Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile, è stato sviluppato con la consulenza del *Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG* e attraverso un lavoro di squadra che ha visto coinvolti diversi soggetti con le competenze specifiche necessarie a sviluppare le diverse attività e componenti del Piano.

Il team, che si è riunito e confrontato più volte al mese durante tutto il primo anno di lavoro, è composto dalle esperte e gli esperti di:

- Servizio Transizione Energetica della Regione FVG
- ARPA FVG
- Eurac Research
- Cras
- Kallipolis



Agenzia regionale di riferimento per l'elaborazione del quadro climatico e del quadro emissivo regionale



Centro di ricerca incaricato dell'identificazione e valutazione dei rischi legati agli impatti climatici sui sistemi socio-ecologici esposti e delle relative vulnerabilità

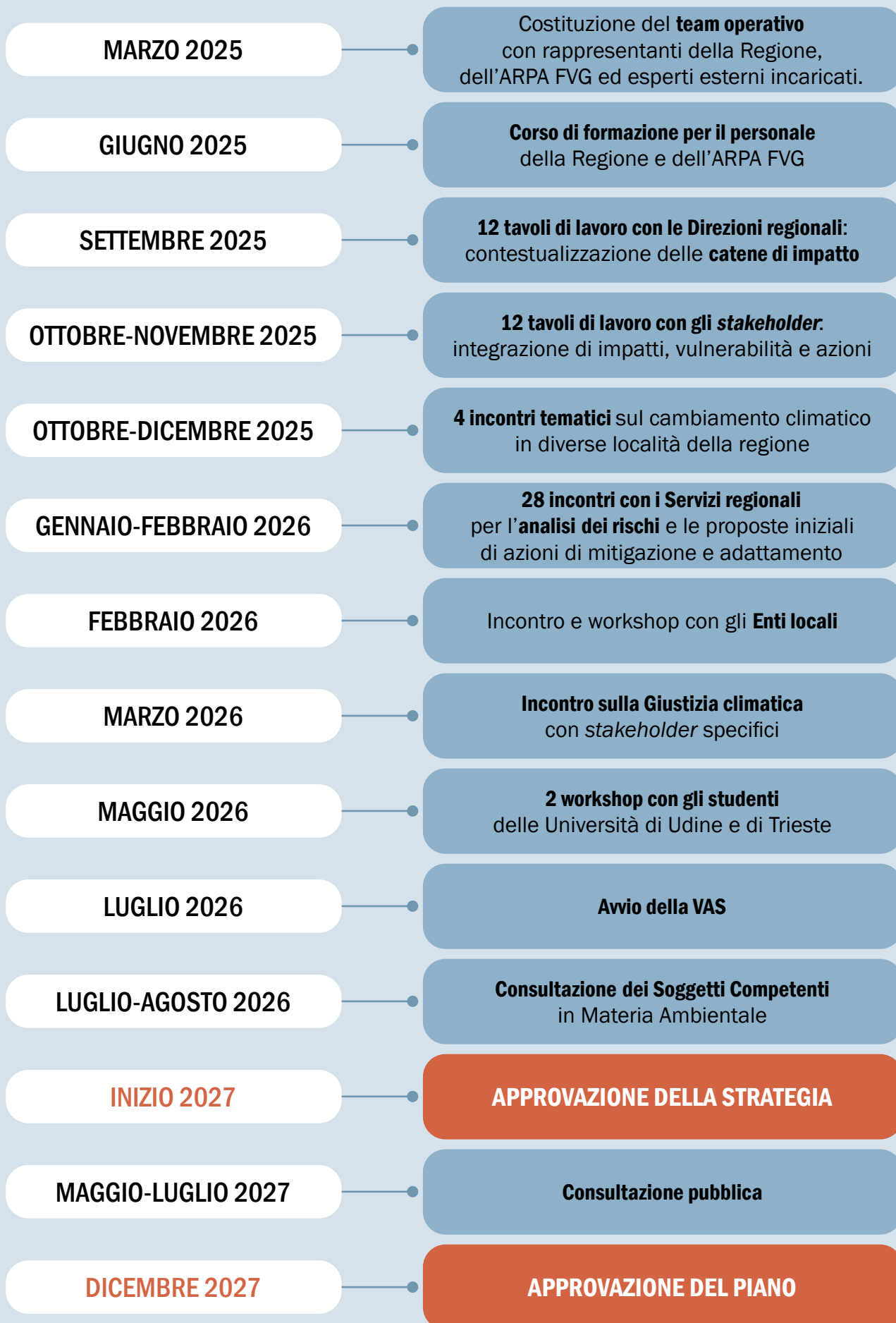


Società nel settore dell'ambiente, del territorio e dello sviluppo sostenibile, che promuove l'integrazione dell'ambiente nelle politiche, nei programmi, nei piani e nei progetti



Associazione di promozione sociale, esperta nel promuovere processi partecipativi e collaborativi supportando le amministrazioni pubbliche, i privati e le comunità

CRONOPROGRAMMA



riguardo alle azioni di mitigazione e adattamento che si possono attuare a livello personale o nella propria cerchia familiare, amicale e sociale, segnalando anche quali interventi l'amministrazione regionale potrebbe attuare per facilitare le azioni dei singoli e delle comunità.

Complessivamente, attraverso le diverse iniziative descritte, il coinvolgimento degli stakeholder ha avuto l'obiettivo di raccogliere contributi, osservazioni e proposte, ma anche di costruire consenso attorno alle scelte strategiche e favorire una maggiore consapevolezza rispetto ai temi climatici. In questo senso, il processo partecipativo ha rappresentato non solo uno strumento di consultazione, ma anche un'occasione di sensibilizzazione e di diffusione della climate literacy, in linea con le attività già avviate a livello regionale.

VERSO LA PROPOSTA PRELIMINARE DI PIANO

Le attività svolte tra giugno 2025 e maggio 2026 hanno portato alla costruzione dei principali elementi della Proposta preliminare di Piano. Questo documento rappresenta il primo esito strutturato del percorso e costituisce la base per le fasi successive, che prevedono l'avvio della Valutazione ambientale strategica e la consultazione pubblica.

Il lavoro realizzato ha consentito di sviluppare un quadro conoscitivo solido, una prima definizione dei rischi e delle vulnerabilità e un insieme articolato di obiettivi e linee di intervento. Allo stesso tempo, ha contribuito a consolidare una modalità di lavoro basata sulla collaborazione, sull'integrazione e sul confronto continuo.

Nicolò Tudorov

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

Il percorso complessivo avviato dall'amministrazione regionale per elaborare la *Strategia e il Piano regionale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici* è stato descritto nell'edizione 2025 di Segnali dal clima in FVG, nell'articolo: [LA ROADMAP REGIONALE PER SVILUPPARE LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA FVG.](#)

COM'È ORGANIZZATO IL LAVORO: I "WORK PACKAGE"



Tappe completate a giugno 2026



Attività in corso a giugno 2026

- WP0** AVVIO DEL SERVIZIO, STRUTTURAZIONE, GESTIONE, MONITORAGGIO DELLE ATTIVITÀ
- WP1** GOVERNANCE E PROCESSO PARTECIPATIVO
- WP2** *CAPACITY BUILDING* (attività formative)
- WP3** ANALISI DI CONTESTO: TERRITORIO, CLIMA, EMISSIONI, NORME
- WP4** VALUTAZIONE DELLE VULNERABILITÀ E DEI RISCHI E ASSOCIATI AI CAMBIAMENTI CLIMATICI PER I SETTORI DI RIFERIMENTO(adattamento)
- WP5** VALUTAZIONE DELLE CRITICITÀ E OPPORTUNITÀ DI INTERVENTO SULLA RIDUZIONE DEI GAS SERRA (mitigazione)
- WP6** CO-CREAZIONE DI UNA VISIONE per la RISPOSTA al CAMBIAMENTO CLIMATICO
- WP7** DALLA VISIONE AGLI OBIETTIVI STRATEGICI e AZIONI NEI VARI SETTORI
- WP8** AZIONI DI PIANO
- WP9** ELABORAZIONE DELLA STRATEGIA E DEL PIANO DI MITIGAZIONE E ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI
- WP10** PIANO DI MONITORAGGIO
- WP11** PIANO DI INVESTIMENTI
- WP12** MAINSTREAMING NEI PIANI, PROGRAMMI E STRUMENTI DI GOVERNO
- WP13** PIANO DI COMUNICAZIONE E DIFFUSIONE
- WP14** PROCEDURA VAS
- WP15** STRUMENTI DI LAVORO E DATI

LA ROADMAP PER L'ELABORAZIONE DELLA STRATEGIA E DEL PIANO REGIONALE DI MITIGAZIONE E ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

 TAPPE COMPLETATE

 ATTIVITÀ IN CORSO

A GIUGNO 2026

AVVIO

WP0

AVVIO DEL SERVIZIO

WP2

FORMAZIONE

WP3

ANALISI DI
CONTESTO

WP4

VULNERABILITÀ
E RISCHI

WP5

GAS SERRA

WP13

PIANO DI COMUNICAZIONE

WP15

STRUMENTI DI LAVORO E DATI

WP1

PROCESSO
PARTECIPATIVO


PARTECIPAZIONE

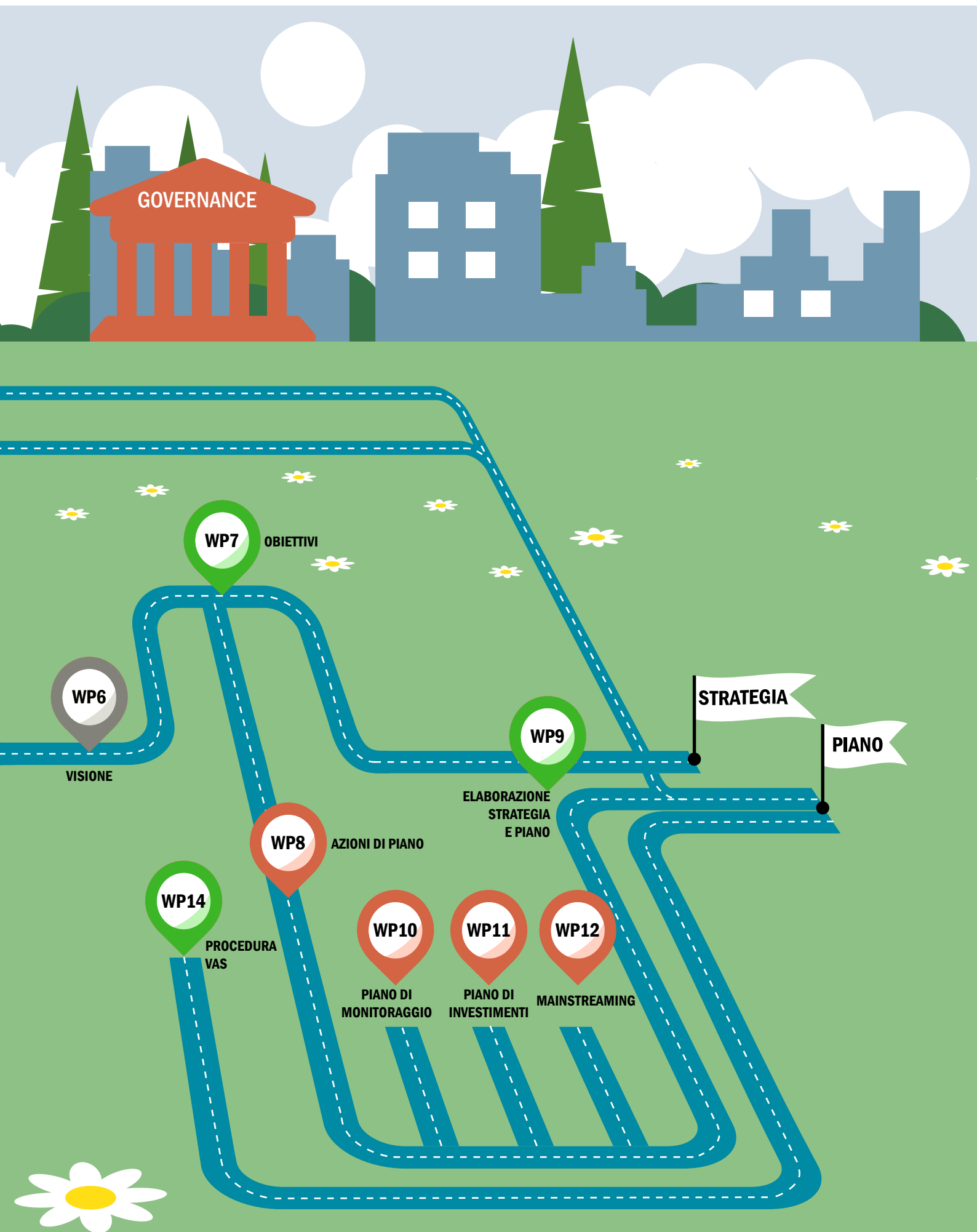




Foto di Daniel Moqvist su Unsplash

REALIZZATO DA ARPA FVG IL PRIMO INVENTARIO REGIONALE DEI GAS SERRA

Per scegliere le azioni di “mitigazione” dei cambiamenti climatici più adatte e monitorare nel tempo la loro l’efficacia è necessario contabilizzare le emissioni dei gas climalteranti.

Perciò, per il Friuli Venezia Giulia, ARPA FVG ha realizzato l’inventario regionale dei gas serra, che quantifica sia le emissioni prodotte che gli assorbimenti dall’atmosfera nella nostra regione”.

La gran parte delle emissioni regionali derivano dall’uso di combustibili fossili, con un significativo contributo dei trasporti.

All’interno del processo di redazione della *Strategia e del Piano regionale di mitigazione e di adattamento ai cambiamenti climatici* previsti dalla legge regionale n. 4/2023 “FVGreen”, ARPA FVG cura il Quadro emissivo dei gas climalteranti. Tale Quadro analizza le emissioni per sorgente, tipo di combustibile, territorio e individua i comparti che maggiormente contribuiscono alle emissioni, permettendo così di orientare in fase iniziale gli interventi di mitigazione più efficaci e di monitorare nel tempo i risultati ottenuti.

Ad aprile 2026 ARPA FVG ha messo a punto e inviato alla Regione la prima stesura del Quadro emissivo regionale dei gas a effetto serra (*GreenHouse Gas - GHG*) riferito all’anno 2021 e sta lavorando ai dati dell’anno 2023.

Il documento è di fatto un inventario, cioè un insieme ordinato di emissioni/assorbimenti che fotografa lo stato emissivo della regione nelle sue specificità territoriali e nell’anno preso in considerazione.

QUALE DIFFERENZA FRA INVENTARIO DEI GAS SERRA E L'IMPRONTA DI CARBONIO?

L'impronta di carbonio fotografa tutti i gas serra originati – anche indirettamente - da un'attività, o da un'organizzazione. In essa, sono comprese anche le emissioni su cui il "soggetto" di cui si intende calcolare l'impronta non può intervenire direttamente: ad esempio le emissioni originate per produrre l'energia elettrica che il soggetto ha acquistato, oppure quelle derivanti dalla produzione e dal trasporto dei prodotti che utilizza nella propria attività.

I gas serra analizzati sono gli stessi dell'inventario GHG, così come l'unità di misura scelta per esprimerli (in kilo-

grammi o tonnellate di CO₂ equivalente). Tuttavia un inventario è essenzialmente un documento tecnico rigorosamente standardizzato, che quantifica e categorizza le fonti di emissione al fine di verificare il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni climalteranti, mentre l'impronta di carbonio è uno strumento che definisce l'impatto di un servizio, di un prodotto, di un'attività al fine di fare confronti tra differenti soggetti oppure orientare le azioni di riduzione dell'impatto calcolato.

All'impronta di carbonio e alle sue applicazioni per individui e organizzazioni è stato dedicato l'articolo:

[SOSTENIBILITÀ E CLIMA: MISURARE LA NOSTRA "IMPRONTA" PER AGIRE CONSAPEVOLMENTE in Segnali dal clima in FVG 2023](#)

LA METODOLOGIA IPCC PER CONTABILIZZARE LE EMISSIONI DI GAS SERRA

La classificazione IPCC prende in considerazione i principali gas serra regolati dal Protocollo di Kyoto (anidride carbonica-CO₂, metano - CH₄, protossido di azoto - N₂O, gas fluorurati- F-gas).

La metodologia prevede, nei casi più semplici, di moltiplicare i dati di attività (ad esempio le tonnellate – t – di gasolio utilizzato per i

trasporti, oppure il numero di capi di bovini allevati), per un fattore di emissione – FE - (nell'esempio in tCO₂/t gasolio oppure tCH₄/capo) che consente di convertirli in emissioni prodotte (nell'esempio tCO₂ e tCH₄).

Successivamente, per confrontare e sommare il contributo dei diversi gas serra, si convertono le quantità dei diversi GHG in CO₂-equivalente (nel seguito indicata come CO₂eq), pesandoli per il potenziale di riscaldamento globale dei singoli gas (*Global Warming Potential* - GWP) (vedi box seguente).

COS'È LA CO₂ EQUIVALENTE?

I gas serra sono parecchi, e comprendono non solo la CO₂ (prodotta da fenomeni di trasformazione della sostanza organica come la combustione), ma anche il metano (prodotto tipicamente da fenomeni di fermentazione della sostanza organica in assenza d'aria), il protossido di azoto (derivante ad esempio dall'uso di fertilizzanti azotati), e gli F-gas (gas utilizzati soprattutto come liquidi refrigeranti).

Non tutti questi gas hanno lo stesso comportamento in termini di "effetto serra" e quindi di alterazione del clima. Per meglio stimare il loro contributo all'effetto serra vengono espressi in termini di CO₂ equivalente (CO₂ eq), utilizzando i valori di potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential* - GWP) del singolo gas in rapporto al potenziale dell'anidride carbonica (CO₂).

Moltiplicando il fattore GWP per la quantità del corrispondente gas climalterante si ottiene la CO₂eq. Come si vede nella tabella seguente che riporta i GWP per singolo gas (5° *Assessment Report* IPCC, dati riferiti a un arco di tempo di 100 anni) il metano è circa 30 volte più dannoso della CO₂ in termini di effetto serra, il protossido di azoto circa 300 volte, mentre gli F-gas sono una famiglia di gas molto diversi tra loro, con GWP che possono arrivare a molte migliaia di volte quello dell'anidride carbonica

$$\text{QUANTITÀ DI GAS CLIMALTERANTE} \times \text{GWP GLOBAL WARMING POTENTIAL} = \text{QUANTITÀ DI CO}_2\text{eq}$$

GAS CLIMALTERANTE	GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP100)
Anidride carbonica (CO ₂)	1
Protossido di Azoto (N ₂ O)	265
Metano (CH ₄)	30
Metano Biogenico (CH ₄ b) uso	28
F-gas	2.000-3.000 e oltre (dipende dal gas)

UNA METODOLOGIA STANDARD PER L'INVENTARIO

Per predisporre il Quadro emissivo per il Friuli Venezia Giulia, ARPA FVG ha utilizzato un metodo standardizzato e coerente per calcolare le emissioni e gli assorbimenti dei gas serra, che garantisce la credibilità e la comparabilità degli inventari tra differenti Paesi e/o territori. Il riferimento metodologico internazionale per il calcolo delle emissioni climalteranti è rappresentato dalle Linee guida 2006 dell'Intergovernmental *Panel on Climate Change* (IPCC), nella versione aggiornata (riassunta nel box blu nella pagina precedente).



Foto: Diana by Pexels

LA CLASSIFICAZIONE DELLE FONTI EMISSIVE

La metodologia IPCC raggruppa sia le fonti emmissive che i processi di assorbimento della CO₂ nelle seguenti quattro principali macrocategorie, ulteriormente suddivise in categorie, macroclassi e classi:

ARPA FVG UTILIZZA LA METODOLOGIA STANDARDIZZATA DELL'IPCC, RAGGRUPPANDO LE FONTI EMISSIVE IN 4 MACROCATEGORIE

- **Energia:** include le emissioni dovute alla combustione di combustibili nelle attività produttive (manfatturiere ed energetiche), nei trasporti e nei sistemi destinati al riscaldamento, oltre alle emissioni fuggitive legate a produzione, trasformazione, trasporto e distribuzione di combustibili.
- **Processi industriali e uso dei prodotti - IPPU** (*Industrial Processes and Product Use*): emissioni derivanti da processi industriali specifici (es. fabbricazione di vetro e cemento, industria dei metalli etc.) ed emissioni di gas fluorurati derivanti dall'utilizzo di apparecchi che li contengono.
- **Agricoltura, foreste e uso del suolo - AFOLU** (*Agriculture, Forestry, and Other Land Use*): comprende le emissioni e gli assorbimenti legati alle attività agricole (Agricoltura, essenzialmente emissioni legate alle coltivazioni agricole, agli allevamenti etc.) e di uso del suolo (*LULUCF Land Use, Land Use Change and Forestry*, essenzialmente assorbimenti dovuti alle foreste, prati e pascoli etc.).
- **Rifiuti:** emissioni derivanti da trattamento e smaltimento dei rifiuti (in particolare gestione delle discariche e trattamento delle acque reflue).



Foto: Ali Arapoğlu by Pexels

LA PRIMA “FOTOGRAFIA” DELLE EMISSIONI IN FVG

L'inventario realizzato da ARPA FVG fotografa l'anno 2021 e fornisce alcune interessanti indicazioni.

Si osserva innanzitutto che la maggioranza delle emissioni (86% delle emissioni totali) deriva dalla macrocategoria **Energia**, analogamente a quanto si osserva negli inventari di altre regioni italiane e nell'inventario nazionale.

La macrocategoria Energia raccoglie essenzialmente le emissioni dovute

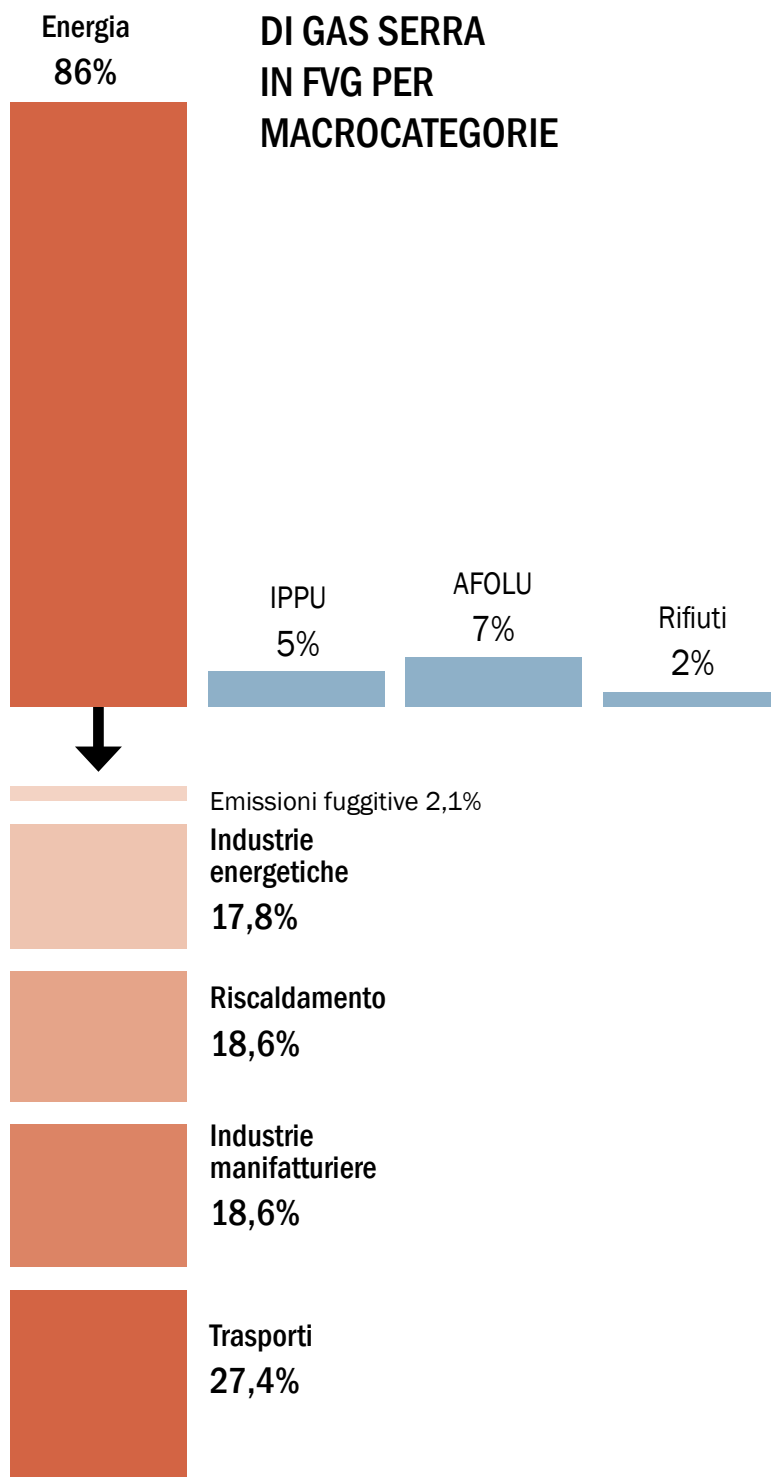
**LA MACROCATEGORIA
“ENERGIA” GENERA
L'86% DELLE
EMISSIONI TOTALI E
COMPRENDE L'USO
DI COMBUSTIBILI PER
I TRASPORTI, PER
IL RISCALDAMENTO
E PER L'INDUSTRIA
ENERGETICA E
MANUFATTURIERA**

alla combustione di combustibili e comprende: trasporti, riscaldamento domestico, combustione nell'industria manifatturiera e nell'industria energetica. Le elevate emissioni riflettono il forte legame tra CO₂eq e utilizzo di

combustibili fossili, che è alla base del funzionamento dei trasporti, degli impianti industriali (combustione nell'industria), del riscaldamento civile e dei sistemi di produzione di energia elettrica (industrie energetiche).

Se i contributi emissivi dei quattro principali ambiti della macrocategoria Energia (Trasporti, Combustione nell'industria, Riscaldamento, Industrie energetiche) risultano simili, il più rilevante tra essi è quello delle emissioni dovute ai **Trasporti**. In particolare, dall'inventario regionale emerge la prevalenza del **Trasporto su strada** (25% del totale delle emissioni), con una netta predominanza delle **autovetture**, seguite dalla somma dei veicoli industriali pesanti (>3,5t) e autobus, dai veicoli industriali leggeri (<3,5t) e dai motocicli.

EMISSIONI 2021 DI GAS SERRA IN FVG PER MACROCATEGORIE



EMISSIONI 2021 DI GAS SERRA DEL TRASPORTO SU STRADA

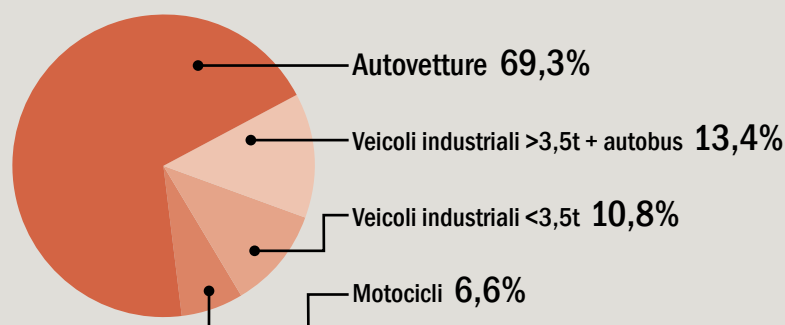




Foto: Olena Bohovyk by Pexels

OLTRE ALLE EMISSIONI, CONTANO GLI ASSORBIMENTI

È importante ricordare che il Quadro emissivo comprende, per quanto possibile, tutte le emissioni e gli assorbimenti. Alle emissioni sopra descritte (derivanti dalla macrocategoria Energia) si sommano quelle, minoritarie, derivanti dalle attività industriali, da quelle agricole, dalla gestione dei rifiuti: tuttavia ci sono anche gli assorbimenti (essenzialmente forestali) che ricadono nella sezione LULUCF della macrocategoria AFOLU. Essi rappresentano uno strumento indispensabile per raggiungere quello che gli esperti definiscono con l'espressione "net zero" o "neutralità climatica", ossia il bilancio finale pari a zero tra emissioni (di segno positivo) e assorbimenti (di segno negativo).

GLI ASSORBIMENTI FORESTALI "COMPENSANO" CIRCA IL 25% DELLE EMISSIONI DI GAS SERRA IN FVG: UN CONTRIBUTO IMPORTANTE PER RAGGIUNGERE LA NEUTRALITÀ CLIMATICA

Nel 2021 gli assorbimenti forestali hanno "compensato" circa il 25% delle emissioni nella nostra regione, grazie alla estesa superficie forestale del Friuli Venezia Giulia (diversamente dalla media nazionale, in cui gli assorbimenti oscillano intorno al 10% delle emissioni totali).

Sebbene possano svolgere un ruolo importante nella rimozione di anidride carbonica dall'atmosfera, gli alberi da soli non possono essere visti come l'unica opzione per raggiungere la neutralità climatica a causa dell'estrema variabilità della loro azione (che può improvvisamente ridursi drasticamente ad esempio a causa di incendi o parassitosi). Le soluzioni "naturali" debbono pertanto affiancarsi e non sostituirsi allo sforzo per ridurre le emissioni alla fonte.

L'AUMENTO DEGLI ASSORBIMENTI DEVE AFFIANCARSI MA NON SOSTITUIRSI ALLO SFORZO PER RIDURRE LE EMISSIONI ALLA FONTE

ANCHE LE EMISSIONI INDIRETTE SONO IMPORTANTI

Nel Quadro emissivo, in un focus a parte, sono state anche valutate, le emissioni collegate ai consumi complessivi di energia elettrica in Friuli Venezia Giulia.

In accordo con la metodologia IPCC per gli inventari nazionali, l'inventario FVG contabilizza infatti solo le emissioni dirette del sistema elettrico, cioè quelle che fuoriescono dagli impianti regionali di produzione di energia e non quelle dovute al consumo di energia elettrica, la quale è in parte prodotta all'estero in quanto importata per integrare la produzione locale, altrimenti non sufficiente.

Si è ritenuto quindi opportuno elaborare nel Quadro emissivo un capitolo a parte sui consumi elettrici per fornire una panoramica dei settori più energivori e, di conseguenza, del loro contributo, seppure indiretto, alle emissioni globali di gas climalteranti. Tali informazioni sono infatti utili per pianificare le azioni per ridurre i consumi elettrici.

UN LAVORO COMPLESSO, IN CONTINUO MIGLIORAMENTO

La stesura del primo inventario GHG per il FVG ha visto ARPA impegnata in un'attività nuova e complessa. Oltre a lavorare per aggiornare l'inventario al 2023, ARPA sta operando in stretta collaborazione con la Regione per migliorare la rappresentatività e la completezza del Quadro emissivo, anche sviluppando nuove sinergie con diversi enti e società per facilitare l'acquisizione dei dati e, quindi, affinare l'accuratezza delle stime delle emissioni originate dalle principali categorie dell'inventario.

ARPA FVG inoltre partecipa, mediante una convenzione, a un tavolo di confronto con altre Agenzie regionali, che si propone il miglioramento della raccolta di dati di base e una più adeguata scelta dei fattori di emissione, anche attraverso l'utilizzo di dati specifici per impianto o attività, e allo scambio di informazioni su studi scientifici e nuove fonti.

**OLTRE ALLE
EMISSIONI DEGLI
IMPIANTI CHE
PRODUCONO
ENERGIA IN FVG
SI CONSIDERANO,
A PARTE, ANCHE
QUELLE DOVUTE
AL CONSUMO DI
ENERGIA ELETTRICA
"IMPORTATA"**

IL METEO E IL CLIMA

Il surriscaldamento locale e globale, gli eventi estremi, il fenomeno “isola di calore urbana”

Tenendo come sempre ben presente la distinzione tra “meteo” e “clima”, in questa sezione partiamo dal racconto delle condizioni atmosferiche che hanno caratterizzato il 2025 in FVG (**meteo**), confrontandole con la norma (**clima**) ed analizzando poi le tendenze nel lungo periodo (**cambiamenti climatici**): si evidenzia così come il **2025 sia stato il terzo anno più caldo** finora registrato in Friuli Venezia Giulia, con piogge annuali nella norma, ma non sono mancati eventi intensi.

All’evento estremo del novembre 2025 che ha causato l’**alluvione a Versa** e la **frana letale a Brazzano di Cormòns** è dedicato un articolo di approfondimento che ne spiega la dinamica meteorologica.

Due articoli ci consentono poi di allargare lo sguardo a ciò che accade a **livello globale**. Temperature elevatissime ed eventi estremi hanno caratterizzato il 2025 anche a scala planetaria. Sono fenomeni collegati al riscaldamento globale, sulla cui “attribuzione” gli scienziati sono concordi: **la causa principale sono le emissioni di gas serra** dall’uso di combustibili fossili.

Altri due articoli ci accompagnano a comprendere il fenomeno dell’**isola di calore urbana** e le modalità con cui viene studiato in FVG. A Gorizia viene affrontato, tramite la cooperazione transfrontaliera, con il progetto Interreg Italia-Slovenija **Heatiland Adapt**, su cui facciamo il punto a un anno dall’avvio. A Trieste, uno studio lo ricostruisce a partire dai dati climatici extraurbani grazie ai nuovi strumenti della **modellistica**.

Conclude questa sezione un contributo sul **meteo.FVG Report**, un bollettino mensile che documenta la meteorologia e la variabilità climatica regionale, che nel 2026 ha compiuto 20 anni.



DATI METEO DEL 2025: IN FVG IL TERZO ANNO PIÙ CALDO CON PIOGGE NELLA MEDIA

Nel 2025 sulla pianura regionale la temperatura dell'aria è risultata la terza più elevata dal 1901, superata soltanto dai valori del 2024 e 2022.

Anche la temperatura del mare misurata a Trieste è stata eccezionalmente alta, inferiore solo a quella del 2024.

Questi sono chiari segnali del riscaldamento globale che interessa anche il FVG.

Le piogge totali sono risultate nella norma rispetto alla media climatica.

Gli eventi degni di nota sono stati principalmente di natura convettiva e hanno generato precipitazioni intense e fenomeni grandinigeni tra marzo e novembre.

Quali “segnali dal clima” possiamo cogliere guardando ai dati meteo registrati in Friuli Venezia Giulia nel 2025?

Sebbene meteo e clima restino concetti ben distinti, le temperature dell'aria e del mare registrate l'anno scorso nella nostra regione ribadiscono la tendenza osservata negli ultimi decenni, confermando il trend di lungo periodo: un progressivo riscaldamento climatico che interessa il nostro territorio, coerentemente con l'aumento delle temperature rilevato a livello globale.

METEO

Il meteo o tempo meteorologico è dato da condizioni e fenomeni atmosferici che si verificano in un determinato momento e in un breve periodo di tempo (alcune ore o giorni).

CLIMA

Il clima è dato dalla media delle condizioni atmosferiche registrate in lunghi periodi di tempo (in genere 30 anni) in un determinato territorio.

CAMBIAMENTI CLIMATICI

I cambiamenti climatici portano a variazioni statisticamente significative delle condizioni medie climatiche e tali variazioni persistono per un periodo esteso, decine o centinaia di anni. Le attività umane sono la causa principale di cambiamenti climatici rilevati negli ultimi due secoli

IL TERZO ANNO PIÙ CALDO

IL 2025 IN FVG È STATO IL TERZO ANNO PIÙ CALDO DAL 1900, SUPERATO SOLO DAL 2024 E DAL 2022

La serie termometrica più che secolare di Udine mostra come il 2025 in Friuli Venezia Giulia sia stato il terzo anno più caldo almeno dal 1900, superato solo dal 2024 e dal 2022. In confronto al trentennio climatico di riferimento 1991 - 2020 la temperatura del 2025 nella pianura del FVG è risultata più alta di 1.2 °C, mentre

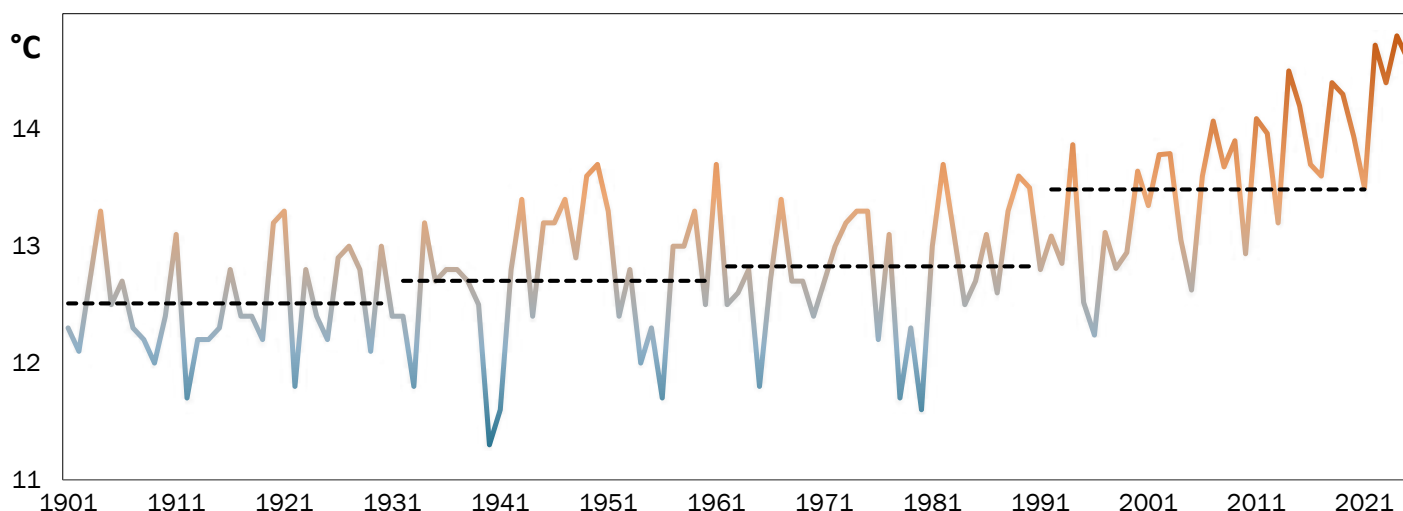
l'incremento è ancora più accentuato se consideriamo la media del secolo scorso: +1.8 °C.

Considerando le temperature medie mensili diversi mesi hanno fatto registrare più caldo rispetto a quanto ci si aspetti: a giugno le temperature sono state caldissime con valori superiori a 3 °C

rispetto alla media del trentennio di riferimento 1991-2020, sfiorando (e a volte superando) i massimi mai raggiunti. Anche a gennaio e dicembre la temperatura media è stata più alta di circa 2.5 °C rispetto alla norma del periodo. Febbraio, marzo, aprile e settembre sono stati mesi in cui le temperature sono state più calde della media, con temperature più calde di 1/1.7 °C rispetto alla climatologia.

Si può sottolineare che, con l'evidente eccezione di giugno, sono stati i mesi invernali e primaverili a determinare maggiormente l'incremento termico nel 2025 rispetto alla climatologia.

OLTRE A GIUGNO, SONO STATI I MESI INVERNALI E PRIMAVERILI A DETERMINARE MAGGIORMENTE L'INCREMENTO TERMICO NEL 2025

TEMPERATURA MEDIA ANNUALE A UDINE DAL 1901 AL 2025

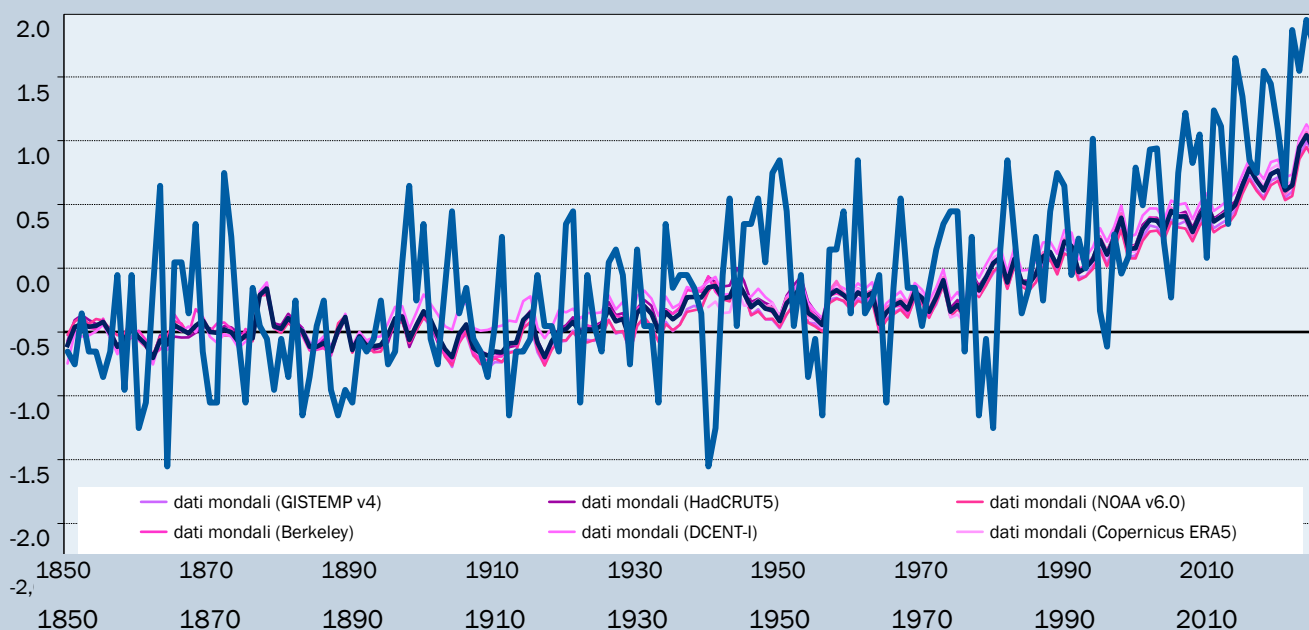
Andamento secolare della temperatura media annuale a Udine. (Dati: serie HistAlp 1901-1991, RAFVG 1992-2025). Le linee tratteggiate orizzontali indicano le temperature medie trentennali.

IL CONFRONTO TRA L'ANDAMENTO LOCALE E GLOBALE DELLE TEMPERATURE

Confrontando i dati e gli andamenti a scala globale con quelli registrati in Friuli Venezia Giulia, si osserva che l'andamento locale della temperatura media annua (dati di Udine, linea blu) ricalca quello registrato a scala globale, ma con un incremento ancora più accentuato. Nella nostra regione la soglia del 1.5 °C in più rispetto al periodo 1850-1900 è già stata superata più volte (a livello globale è stata superata per la prima volta nel 2024): in FVG nel 2025 questa anomalia termica ha raggiunto i + 2.2 °C.

Per comprendere questo confronto, dobbiamo considerare che l'andamento della temperatura media globale risulta naturalmente più "smussato" rispetto all'ampia variabilità inter-annuale tipica di una singola serie di dati locali, ma anche che il più marcato riscaldamento registrato in Friuli Venezia Giulia rispecchia la sua collocazione geografica, a cavallo di due "hot spot" ossia due aree particolarmente sensibili al riscaldamento globale: il Mediterraneo e le Alpi.

ANOMALIA DELLA TEMPERATURA MEDIA ANNUALE A UDINE VS GLOBALE RISPETTO AL PERIODO PREINDUSTRIALE (1850-1900)



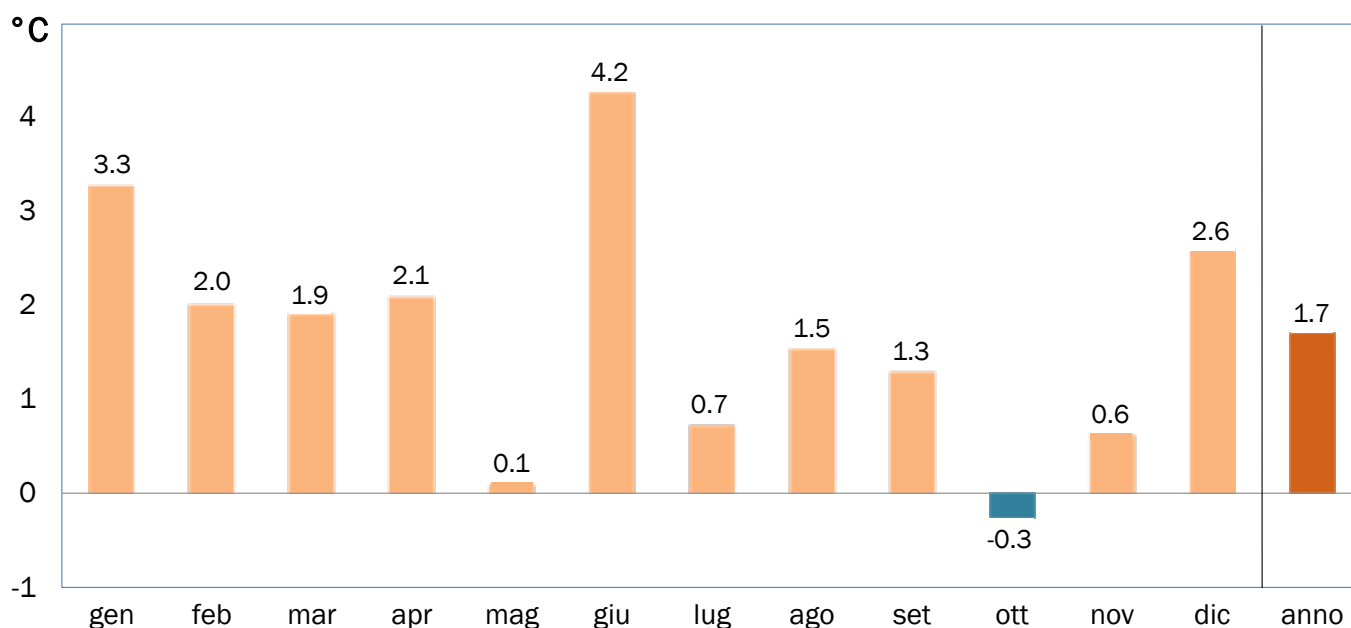
Anomalia della temperatura media annuale rispetto al periodo 1850-1900 considerando i dati di Udine (linea blu, serie HistAlp 1850-1991, RAFVG 1992-2025) e i dati mondali provenienti da diversi dataset (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/t2025/>; col permesso di University of East Anglia - UEA).

LE ANOMALIE TERMICHE MENSILI

Se allunghiamo lo sguardo nel passato e confrontiamo i dati termici medi mensili di quest'anno con le medie di più di 120 anni precedenti (1901-2024), notiamo come in pianura la temperatura sia risultata sempre superiore alla media ultra-

centenaria tranne a maggio e ottobre, dove le temperature si sono mantenute molto vicine alla media. Particolarmente rilevanti le anomalie positive di gennaio, giugno e dicembre, con valori eccedenti la media rispettivamente di 3.3, 4.2 e 2.6 °C. Considerando l'intero anno, l'anomalia è di 1.7 °C più alta rispetto al periodo considerato.

ANOMALIA TERMICA MENSILE NEL 2025 RISPETTO ALLA MEDIA DELL'INTERA SERIE STORICA



Anomalia delle temperature medie mensili del 2025 a Udine rispetto al periodo 1901-2024.
(serie HistAlp 1901-1991 RAFVG 1992-2025)

GIORNI CALDI E ZERO TERMICO: INFERIORI AL 2024, MA SI CONFERMA LA TENDENZA ALL'AUMENTO

Nel monitorare i cambiamenti del clima è interessante anche prendere in considerazione due indicatori collegati all'andamento della temperatura atmosferica:

- il numero di giorni caldi, ossia quelli in cui la temperatura massima supera i 30° C
- l'altezza media annuale dello zero termico (la quota a cui si misurano 0 °C nella libera atmosfera)

Nel 2025 i giorni caldi nella pianura regionale sono stati 46; nettamente più bassi rispetto al 2024 in cui si erano raggiunti i 67 giorni caldi. Si osserva che il dato di quest'anno è comunque più alto di 4 giorni rispetto alla media del trentennio di riferimento 1991-2020 (42 giorni).

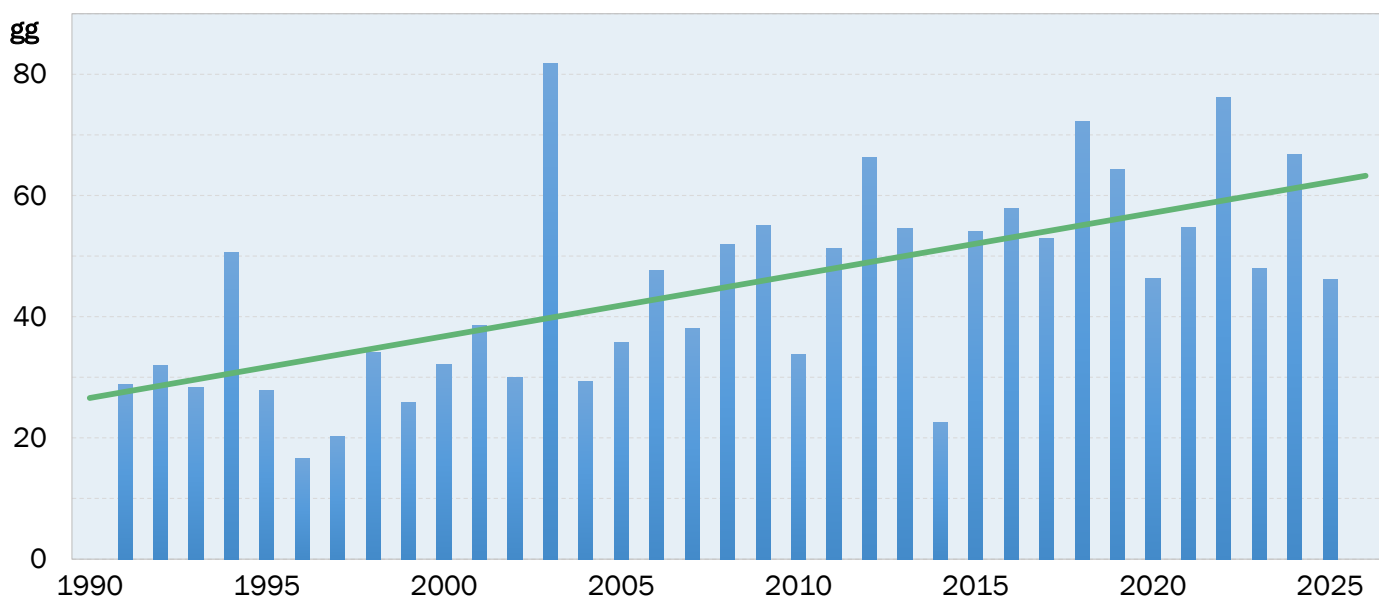
Considerando la linea verde che interpola i dati si può osservare un aumento dei giorni caldi di 1 giorno in più all'anno.

Nel 2025 l'altezza media annuale dello zero termico è stata di 2760 m slm, 190 m più in alto rispetto alla media del trentennio di riferimento 1991-2020 (2570 m slm), più bassa invece rispetto al valore del 2024 (2895 m slm).

Considerando l'intera serie si può osservare un andamento in aumento dell'altezza di 8 m all'anno (linea verde). Questo andamento indica che nel corso degli anni gli 0 °C misurati nella libera atmosfera si trovano sempre più in alto ed è un'ulteriore conferma del riscaldamento che anche la nostra regione sta subendo.

**SI OSSERVA
UNA TENDENZA
SIGNIFICATIVA
DI AUMENTO DEI
GIORNI CALDI:
1 GIORNO IN PIÙ
ALL'ANNO**

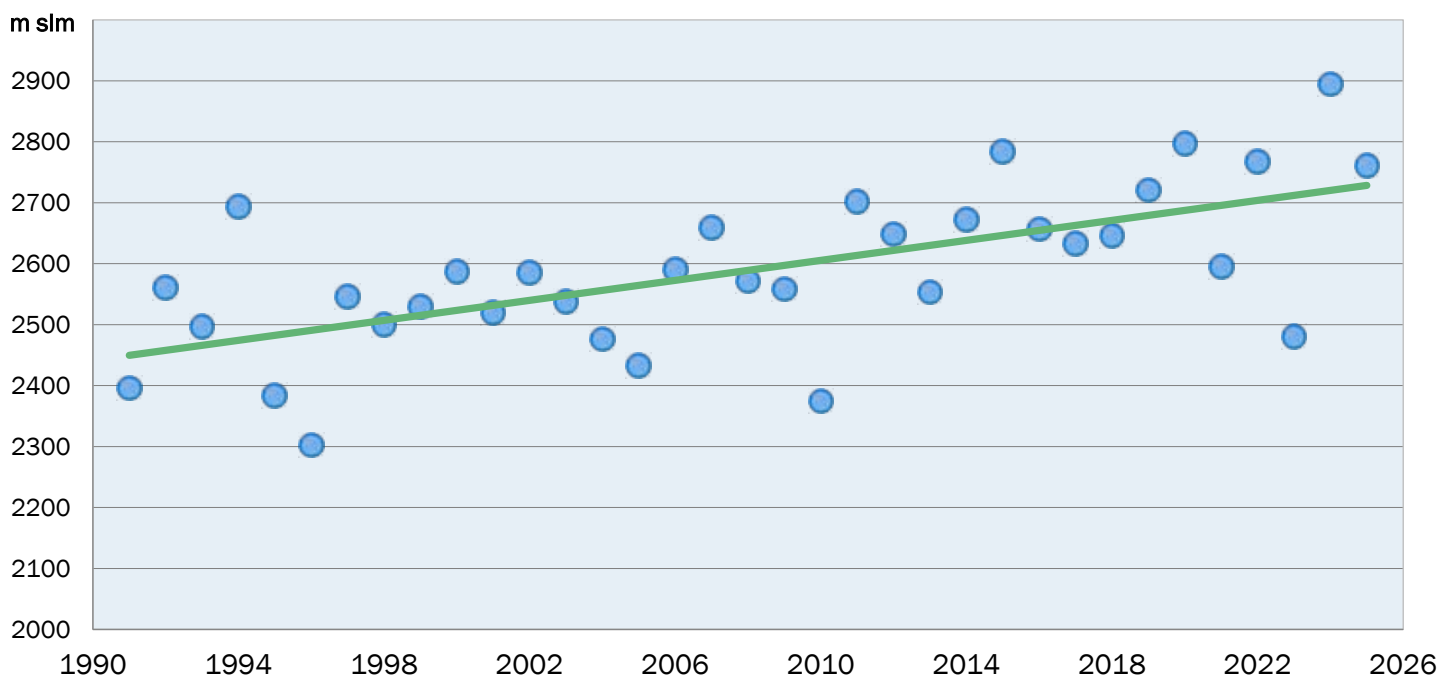
NUMERO DI GIORNI CALDI (TMAX > 30 °C) IN PIANURA DAL 1991 AL 2025



Il grafico rappresenta il numero di giorni caldi (Tmax > 30 °C, istogrammi blu) mediato su 14 località rappresentative dell'intera pianura regionale (Brugnera, Capriva del Friuli, Cervignano del Friuli, Cividale del Friuli, Codroipo, Fagagna, Gemona del Friuli, Gradisca d'Isonzo, Palazzolo dello Stella, Pordenone, San Vito al Tagliamento, Talmassons, Udine e Vivaro).

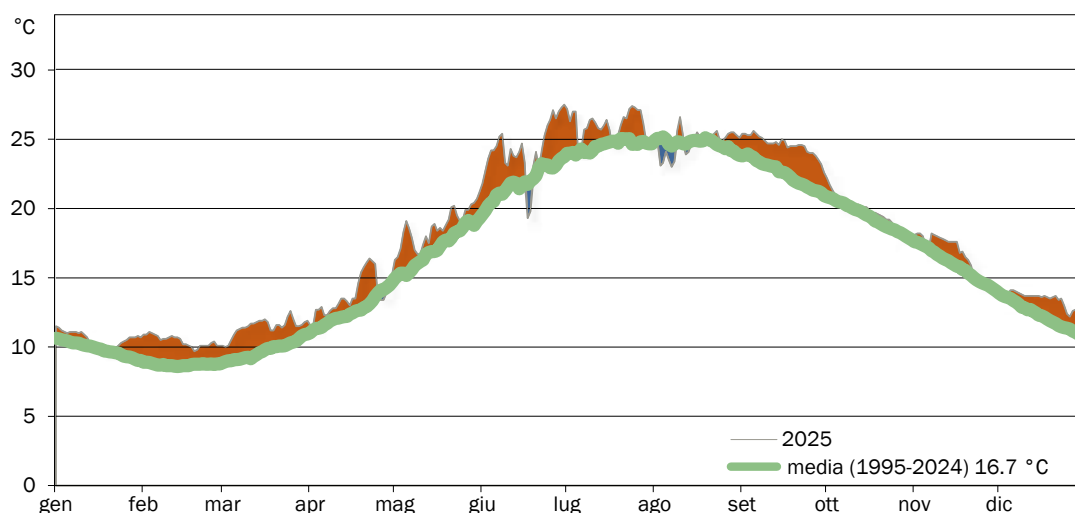
La linea verde che interpola i dati indica il trend (pendenza +1 giorni/anno) che risulta statisticamente significativo al test di Mann-Kendall.

ALTEZZA DELLO ZERO TERMICO (QUOTA IN M) DAL 1991 AL 2025



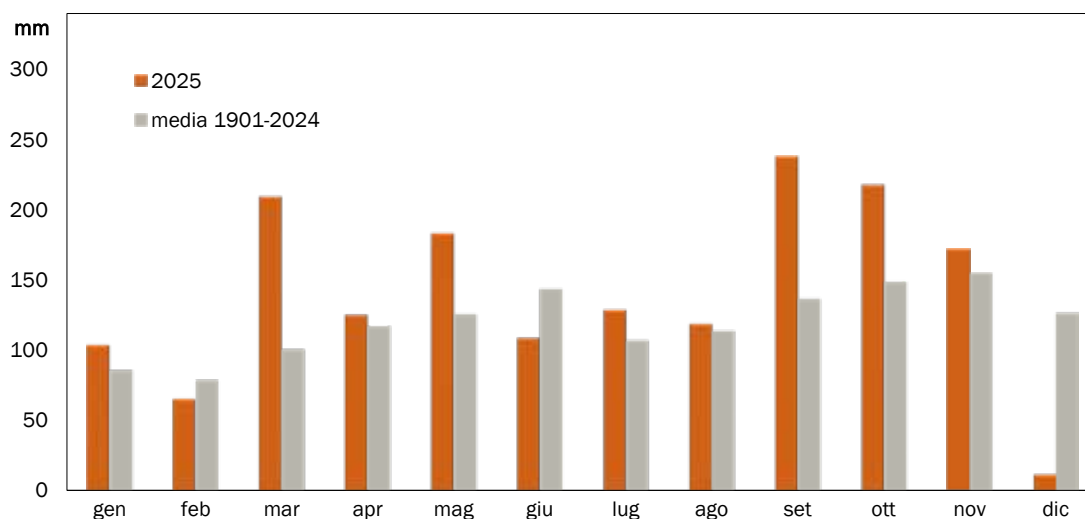
Il grafico rappresenta l'altezza media annua dello zero termico (punti azzurri). La linea verde rappresenta l'andamento crescente (+8 m/anno). Due volte al giorno l'Aeronautica Militare Italiana effettua dei radiosondaggi (fino al 17 gennaio 2016 partivano dalla base di Campoformido – UD, ora invece partono dalla base di Rivolto Codroipo – UD). La radiosonda sale in cielo grazie a un grande pallone riempito di gas elio e durante la salita misura pressione, umidità, vento e temperatura. Al salire della quota la temperatura decresce (generalmente) e quindi si può stabilire a che altezza si raggiungono gli 0 °C

TEMPERATURA MEDIA GIORNALIERA DEL MARE A TRIESTE - 2025



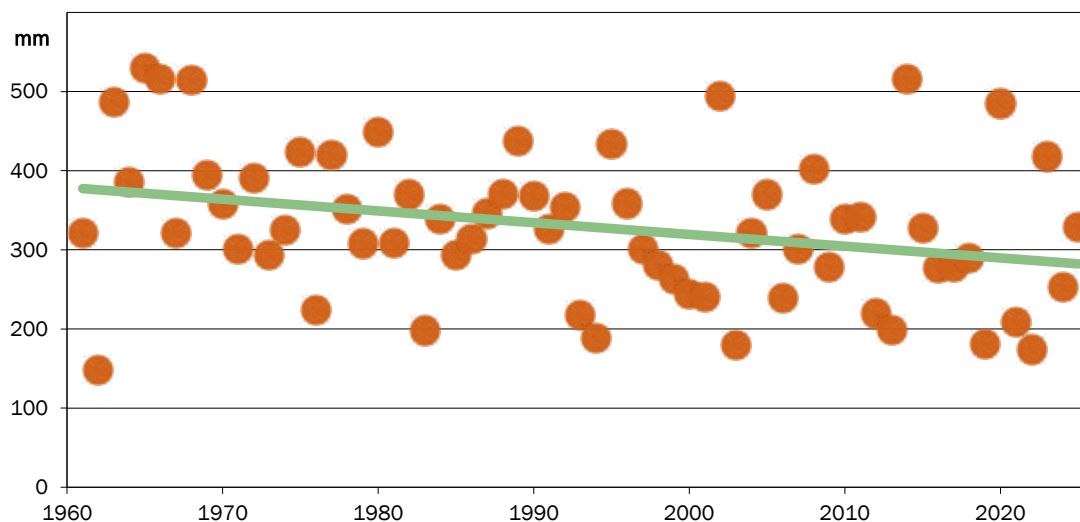
Andamento della temperatura media giornaliera del mare a 2 m di profondità a Trieste nel 2025 e confronto con la media 1995-2024.

PIOVOSITÀ MENSILE A UDINE



Precipitazioni mensili nel 2025 e confronto con la media del periodo 1901-2024 a Udine (serie HistAlp 1901-1991 RAFVG 1992-2025).

ANDAMENTO DELLE PIOGGE ESTIVE SU COSTA E PIANURA



Media delle precipitazioni estive in 36 stazioni di pianura e costa (punti arancioni) dal 1961 al 2025.

La linea verde indica il trend che interpola i dati (pendenza 1.5 mm/anno, r^2 0.09).

PER GRAN PARTE DELL'ANNO UN MARE PIÙ CALDO DELLA NORMA

Anche la temperatura media del mare - misurata a Trieste a 2 metri di profondità - è risultata più alta di 1.2 °C rispetto alla norma (1995-2024). Le anomalie positive più importanti si sono registrate a giugno e settembre, ma anche febbraio, marzo, aprile, maggio, luglio e dicembre hanno fatto registrare temperature di circa 1/1.5 °C più alte della norma.

PIOGGE ANNUALI NELLA NORMA

Il 2025 ha fatto registrare precipitazioni in media rispetto alla norma (1991-2020): le misure annuali sono variate dai 1000-1300 mm della costa, ai 1400-1700 mm della pianura, incrementandosi fino ai 4000 mm delle Prealpi Giulie, per poi scendere sotto i 1500 mm nelle zone alpine più interne.

LE PRECIPITAZIONI ANNUALI, NONCHÉ QUELLE INVERNALI ED ESTIVE, SONO STATE NELLA NORMA

LA PRIMAVERA È STATA PIÙ PIOVOSA RISPETTO ALLA MEDIA

A livello stagionale si può notare che su tutte le zone le piovosità invernali (dic. 2024 - feb. 2025) e quelle estive siano risultate in linea con la climatologia, mentre la primavera è stata più piovosa. In autunno ci sono state piogge piuttosto abbondanti sulle zone orientali, specie in pianura, mentre sui monti e a ovest le pluviometrie sono risultate più ridotte.

A fronte di piogge annuali elevate, nel 2025 i cumulati di dicembre sono risultati molto bassi; mentre a marzo, maggio, settembre e ottobre le piogge sono risultate molto più alte rispetto alla climatologia di riferimento.

SI CONFERMA IL TREND DI DIMINUZIONE DELLE PIOGGE ESTIVE

Nel 2025, considerando 36 stazioni distribuite sulla pianura e sulla costa, la media delle piogge estive è stata di 329 mm. Nel trentennio 1961-1990 il cumulo pluviometrico estivo era pari a 360 mm, in quello successivo (1991-2020) era di 308 mm. Il dato del 2025, seppur leggermente più alto della media degli ultimi anni conferma il trend di diminuzione delle piogge estive.

SU PIANURA E COSTA LA TENDENZA È CHIARA: DAL 1961 A OGGI, LE PIOGGE ESTIVE SONO DIMINuite DI CIRCA 15 MM A DECENNIO

La tendenza è ormai chiara: l'analisi dei dati di pioggia estiva, mediata su queste 36 stazioni, dal 1961 a oggi, evidenzia una diminuzione delle pluviometrie di circa 15 mm a decennio. Seppure vi sia una marcata variabilità nei dati, il trend negativo individuato è statisticamente molto significativo.

Andrea Cicogna, Valentina Gallina, Federica Flapp
ARPA FVG

2025: ALCUNI EVENTI METEO DA RICORDARE

- **13 MARZO, UN INIZIO DELLA STAGIONE CONVETTIVA MOLTO PRECOCE** con grandinate e quattro supercelle
- **22 MAGGIO, TEMPORALI IN PIANURA** con piogge intense localizzate e alcune trombe d'aria
- **GIUGNO, CALDO INTENSO E TEMPORALI FORTI DEL 26 GIUGNO** con grandine di grosse dimensioni su tutta la pianura e vento forte
- **11 E 27 LUGLIO, TEMPORALI E GRANDINATE IN PIANURA**
- **29 AGOSTO E 2 SETTEMBRE, TEMPORALI STAZIONARI IN PROVINCIA DI TRIESTE** che hanno determinato in poche ore apporti pluviometrici compresi tra i 100 e i 200 mm, con allagamenti e danni
- **16 SETTEMBRE, SUPERCCELLA TEMPORALESCA** con forti raffiche di vento e grandinate di medie dimensioni che hanno causato notevoli danni da Udine a Trieste
- **24 OTTOBRE, TEMPORALE A TRIESTE** con precipitazioni e grandinate caratterizzate da numerosi chicchi di piccole dimensioni e accumuli al suolo di alcuni centimetri
- **16 E 17 NOVEMBRE, PIOGGE DA RECORD NEL BACINO DEL JUDRIO** causate da temporali stazionari e autorigeneranti, con la frana e i morti a Brazzano e l'alluvione a Versa in provincia di Gorizia



12 ORE DI PIOGGIA CONCENTRATA SUL BACINO DELLO JUDRIO: LA SPIEGAZIONE METEO DEGLI EVENTI DI VERSA E BRAZZANO DI CORMÒNS

Tra il 16 e il 17 novembre 2025 un temporale autorigenerante e stazionario ha colpito il Friuli Venezia Giulia sud-orientale, scaricando oltre 200 mm di pioggia in 12 ore e causando allagamenti diffusi, l'esondazione dello Judrio a Versa e una frana mortale a Brazzano.

L'evento, non previsto dai modelli meteorologici che stimavano piogge concentrate sulle Prealpi, ha battuto i record storici di accumulo a Cormòns.

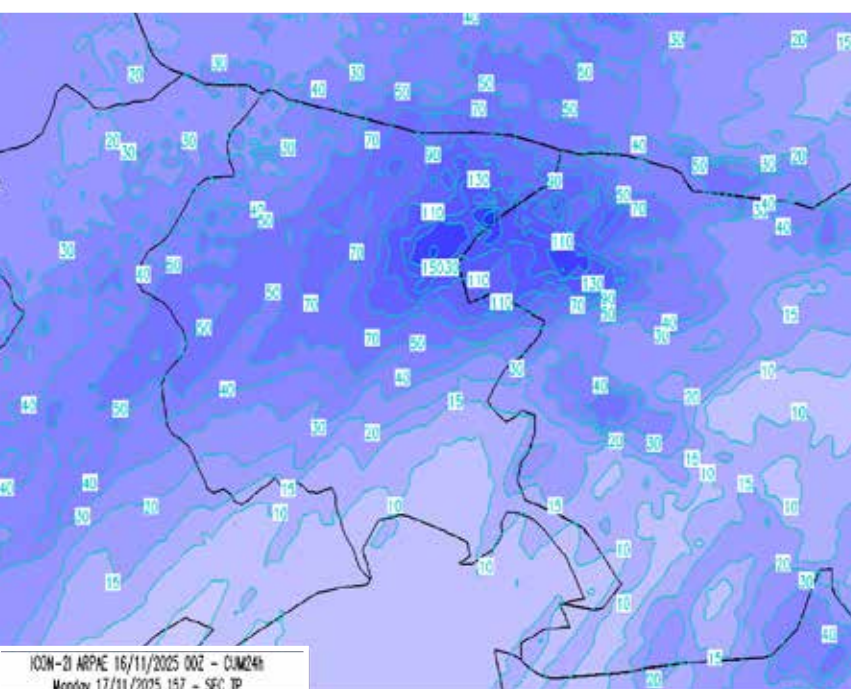
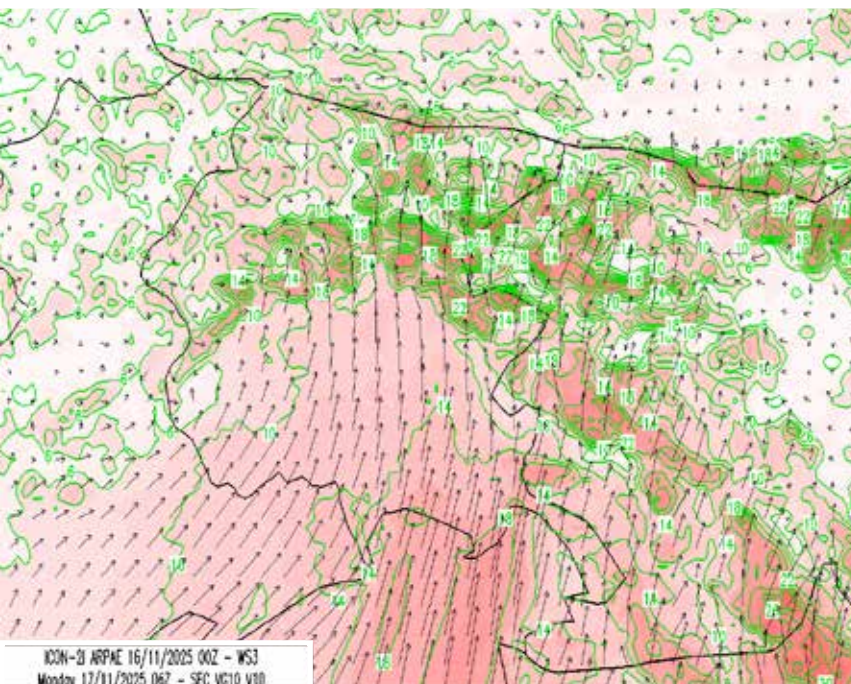
Si è trattato di un episodio eccezionale, legato a una sfortunata e imprevedibile combinazione di fattori locali.

Tra il 16 e il 17 novembre 2025 la parte sud-orientale del Friuli Venezia Giulia, a cavallo tra le province di Udine e Gorizia, è stata colpita da un evento meteorologico eccezionale e imprevisto. Un sistema convettivo autorigenerante è rimasto stazionario per quasi 12 ore interessando sempre la stessa area con piogge molto intense e persistenti superiori a 200 mm di accumulo.

Una tale quantità d'acqua caduta in un periodo di tempo così ristretto ha avuto pesanti conseguenze per il territorio: il torrente Judrio è esondato allagando per intero il paese di Versa con 1-2 m di acqua e fango e, poco più a nord, una collina è franata verso il centro di Brazzano di Cormòns causando due vittime e la distruzione di tre abitazioni; inoltre si sono avuti allagamenti diffusi sul Collio e nella campagna attorno a Palmanova.

Un evento di tale portata non accadeva nella regione dal 29 agosto 2003, giorno della catastrofica alluvione della Val Canale. Anche in quell'occasione la causa fu un temporale autorigenerante, a conferma che il territorio del FVG continua a rimanere molto vulnerabile a questo tipo di fenomeni meteorologici.

MAPPE DI PREVISIONE DI VENTO E PIOGGIA



Mappe del modello ICON-21 del run* delle ore 00 UTC del 16/11/2025. Nei modelli meteorologici, gli orari fanno riferimento al sistema UTC* (Tempo Coordinato Universale).

Sopra: la previsione del vento. Le frecce raffigurano direzione e intensità del vento al suolo; la scala cromatica dal rosso al bianco rappresenta la velocità della raffica massima tra le 6 e le 7 di mattina (ora locale) del 17/11/2025. Le linee verdi, chiamate "isotache", uniscono i punti con la stessa velocità del vento, espressa in m/s.

Sotto: le precipitazioni totali previste in 24 ore, dalle ore 16 del 16/11/2025 alle ore 16 (ora locale) del 17/11/2025. Le linee azzurre, chiamate "isioete", uniscono i punti con lo stesso accumulo di precipitazione, espresso in mm.

LA SITUAZIONE METEOROLOGICA GENERALE

Il 16 novembre la situazione sinottica, ossia lo stato dell'atmosfera su scala europea, era caratterizzata dalla presenza di una profonda saccatura* colma di aria fredda sulla Scandinavia e di una depressione atlantica in movimento dal golfo di Biscaglia verso l'Italia settentrionale.

QUELLA PRESENTE A GRANDE SCALA ERA UNA CONFIGURAZIONE METEOROLOGICA COMUNE NEI PEGGIORAMENTI DI STAMPO AUTUNNALE

Tra il pomeriggio di quel giorno e la notte seguente, tale configurazione ha determinato l'afflusso sull'Italia nord-orientale di correnti molto umide sud-occidentali in quota e di Scirocco nei bassi strati in risalita dall'Adriatico.

Nel primo mattino del 17 si è avuto il passaggio del fronte, accompagnato dalla formazione di una bassa pressione al suolo, di quasi 1000 hPa, sull'Alto Adriatico.

LE PREVISIONI DEI MODELLI METEOROLOGICI

La situazione meteorologica appena descritta non ha nulla di così speciale, anzi è comune nei peggioramenti di stampo autunnale. Nei giorni precedenti tutti i modelli meteorologici* erano concordi sulla dinamica dell'evento. Nelle mappe riportiamo come esempio il modello ICON-21, uno dei più utilizzati a livello italiano. Si

ERANO PREVISTE PIOGGE OROGRAFICHE, CON GLI ACCUMULI MAGGIORI SULLE PREALPI GIULIE

nota che lo Scirocco, contraddistinto dalle frecce orientate verso nord, soffia dalla costa adriatica fino alla fascia prealpina. In questi casi, la catena montuosa funge da sbarramento orografico e di conseguenza, con questa configurazione, erano attese piogge orografiche* con una distribuzione pluviometrica

classica, che ricalca la climatologia di questi luoghi: come si vede dalla mappa gli accumuli maggiori, superiori a 100 mm in 24 ore, vengono previsti sulle Prealpi Giulie, mentre scendendo verso la costa si ha un rapido calo dei quantitativi che in pianura faticano a superare i 30 mm.

L'EVOLUZIONE METEOROLOGICA OSSERVATA

Nella realtà l'evoluzione meteorologica effettiva è stata molto diversa. Lo Scirocco si è fermato ben prima delle Prealpi, sollevandosi già sulla bassa pianura sud-orientale. In questi casi, la giusta combinazione di fattori atmosferici,

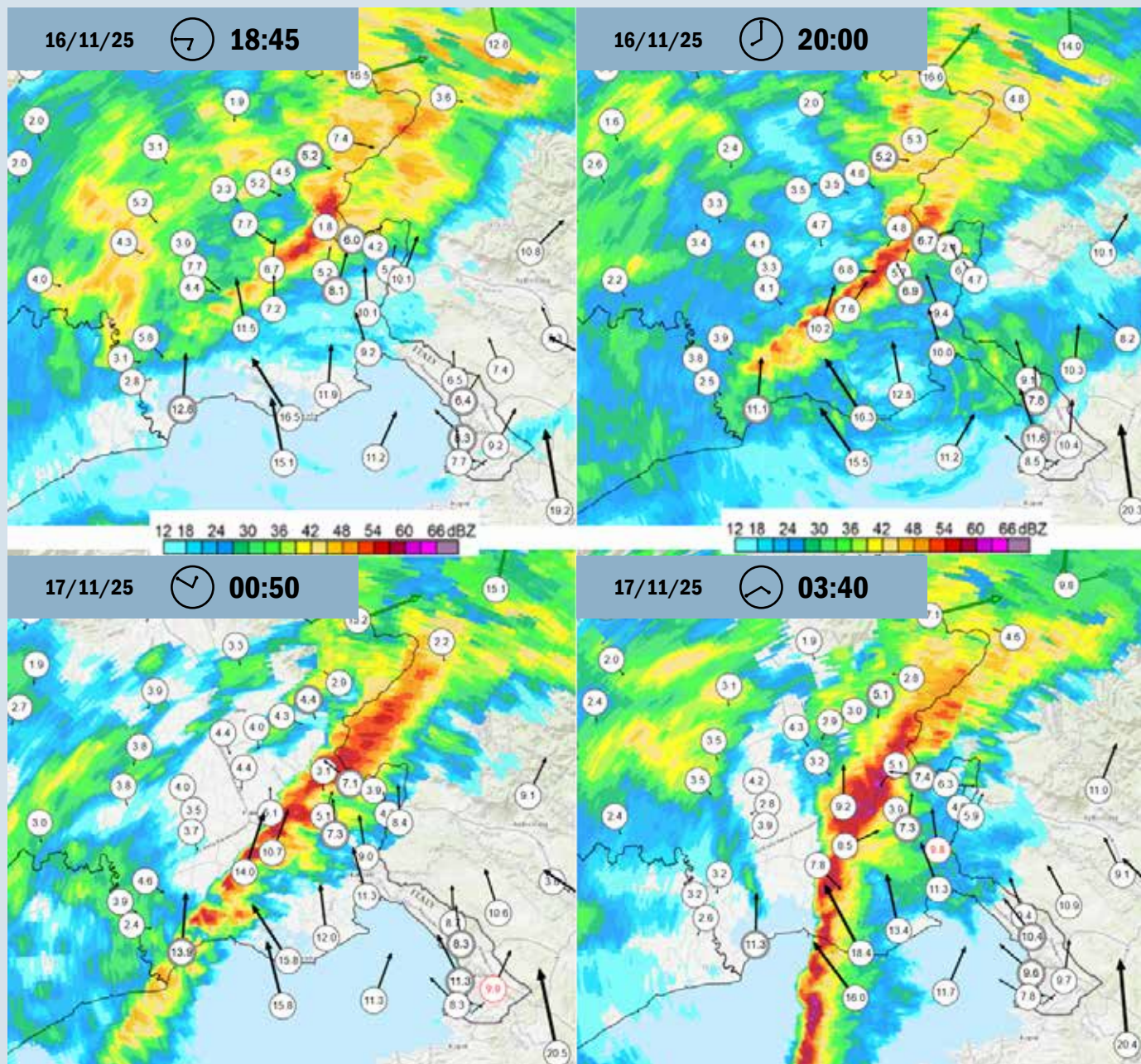
**LO SCIROCCO SI
È FERMATO BEN
PRIMA DELLE
PREALPI, CREANDO
LE CONDIZIONI
FAVOREVOLI
ALLO SVILUPPO
DI TEMPORALI
AUTORIGENERANTI**

può creare le condizioni favorevoli allo sviluppo di temporali autorigeneranti, capaci di scaricare enormi quantitativi di acqua sulle medesime zone. Ed è proprio quello che è accaduto: precipitazioni che avrebbero dovuto essere orografiche* sono state in prevalenza convettive* e stazionarie.

**PRECIPITAZIONI
CHE AVREBBERO
DOVUTO ESSERE
OROGRAFICHE SONO
STATE IN PREVALENZA
CONVETTIVE E
STAZIONARIE**



COS'È SUCCESSO FRA IL 16 E IL 17 NOVEMBRE?



MAPPE DEL RADAR METEOROLOGICO REGIONALE

Mappe di riflettività massima VMI (in dBZ) del radar di Fossalon di Grado e raffiche di vento massime nell'ora precedente (in m/s).

L'ANALISI DELL'EVENTO

Le mappe riportate nella pagina precedente catturano in quattro diversi momenti l'evoluzione del sistema convettivo tra il tardo pomeriggio del 16 e la notte del 17 novembre. Si possono notare alcuni elementi comuni: a sud-est del sistema, su costa e pianura isontina, stava soffiando vento di Scirocco moderato con raffiche tra 40 e 60 km/h, mentre dall'altro lato della linea, sulla pianura udinese e pordenonese, i venti erano molto deboli da nord o nord-ovest. Le stazioni in quota (freccie verdi) stavano rilevando vento moderato da sud-ovest con raffiche intorno a 60 km/h.

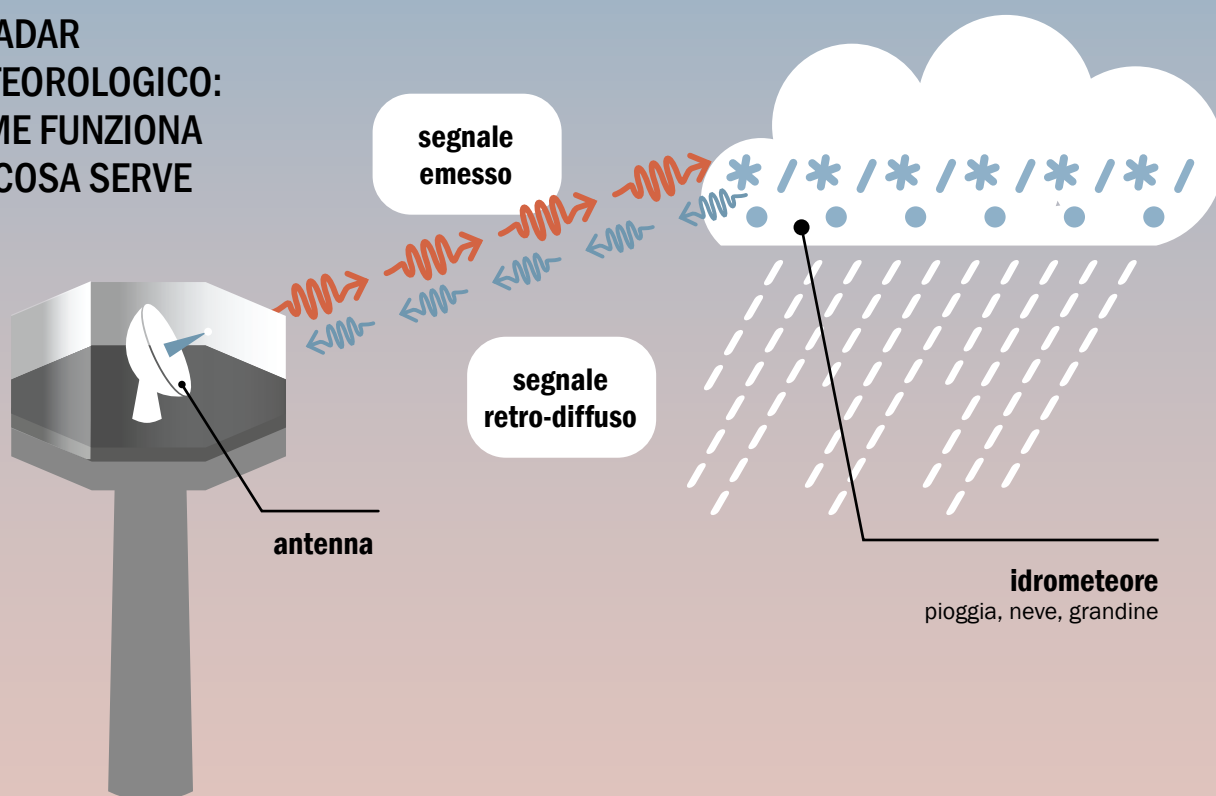
Queste considerazioni spiegano la dinamica alla base dell'evento. Lo Scirocco molto umido e mite in entrata da sud si è sollevato sulla bassa pianura, non quindi per un motivo orografico, ma per l'instabilità stessa della massa aria. Dalle ore 16, tra Palmanova e Cormòns ha iniziato a svilupparsi della convezione atmosferica, determinando i primi rovesci. Dalle ore 19 la convezione si è intensificata formando un sistema lineare composto da diverse celle convettive in movimento verso nord-est, trasportate dal flusso sud-occidentale in quota (in alto a dx). Esse sono state continuamente rimpiazzate da nuove celle innescate nello stesso luogo dalla convergenza del vento meridionale con l'*outflow*, ovvero con la massa d'aria fredda in uscita dalle celle precedenti. Se lo Scirocco fosse stato più forte si sarebbe spinto più all'interno della regione portando a precipitazioni orografiche concentrate sulle Prealpi. Al contrario uno Scirocco troppo debole non avrebbe consentito di alimentare con sufficiente aria mite e umida i rovesci e le correnti dell'*outflow* avrebbero prevalso spostando la linea di convergenza. Si è creato quindi

un delicato equilibrio di forze tra intensità dello Scirocco, venti da sud-ovest in quota e *outflow*, che ha permesso al sistema convettivo lineare di diventare autorigenerante con piogge stazionarie che hanno insistito per quasi 12 ore su una fascia di territorio dalla laguna fino all'alta valle dello Judrio al confine con la Slovenia.

Le osservazioni confermano la capacità del sistema convettivo di autosostenersi grazie a questo equilibrio: dopo le ore 23 le piogge sul resto della regione si sono attenuate, ma il sistema temporalesco in questione è rimasto attivo e anzi, nelle prime ore della notte, ha raggiunto la sua fase più intensa con fulminazioni e piogge fino a 60 mm/h (in basso a sx).

Solamente dalle ore 3 la situazione meteorologica ha iniziato a sbloccarsi con l'avvicinamento del fronte che ha rotto l'equilibrio appena descritto: sono tornate le piogge diffuse e il vento al suolo prima si è intensificato, fino a quasi 70 km/h a Grado, e dopo il passaggio del fronte è ruotato a Libeccio (in basso a dx). La linea temporalesca si è spostata verso est indebolendosi gradualmente e quando, tra le ore 5 e le 6, raggiunge il Triestino, il sistema ormai si è sfaldato.

IL RADAR METEOROLOGICO: COME FUNZIONA E A COSA SERVE



In generale un radar è uno strumento che serve per individuare degli oggetti a distanza. Il termine radar infatti viene dall'acronimo inglese di Radio Detection And Ranging, che in italiano sta per rilevamento e misurazione della distanza tramite onde radio. Nel caso meteorologico, il principio di funzionamento è lo stesso, ma cambia il "bersaglio", che non sono per esempio aerei o navi, ma idrometeore, come le gocce di pioggia, la neve e la grandine.

Un radar emette impulsi brevissimi di onde elettromagnetiche attraverso un'antenna parabolica. Le onde inviate da un radar di tipo meteorologico hanno un intervallo di lunghezza d'onda specifico, intorno a 5 cm, adatto per interagire con le idrometeore contenute nelle nubi. Quando le incontrano, una piccola parte viene riflessa in direzione del radar stesso e l'antenna capta questo debole eco di ritorno che viene analizzato misurando:

- Il tempo che intercorre tra l'invio del segnale e la ricezione in modo da determinare la distanza dal bersaglio
- La potenza del segnale del ritorno, che è legata alla quantità e alla dimensione delle gocce incontrate e quindi all'intensità della precipitazione. Da essa si ricava una grandezza chiamata riflettività, espressa in de-

cibel, ossia in dbZ. Più la riflettività è alta, maggiore è il segnale riflesso e più la precipitazione sarà intensa.

LE MAPPE DI RIFLETTIVITÀ

Ripetendo il processo con impulsi emessi a diverse inclinazioni e direzioni, il radar scandaglia l'atmosfera circostante fornendo una visione tridimensionale quasi istantanea dei fenomeni meteorologici in atto. Il prodotto finale consiste in mappe che riportano varie grandezze e una delle più comuni è la mappa della VMI (Vertical Maximum Intensity), che rappresenta il valore massimo di riflettività sulla verticale di ogni punto. Le mappe riportate nell'articolo utilizzano proprio questa grandezza e si possono indicativamente leggere in questo modo:

- Azzurro/blu (minore di 25 dbZ): nuvolosità densa o pioviggini;
- Verde (tra 25 e 40 dbZ): piogge deboli;
- Giallo/arancione (tra 40 e 50 dbZ): piogge da moderate a intense man mano che il colore diventa più scuro;
- Rosso/viola (maggiore di 50 dbZ): pioggia molto intensa, spesso associata a rovesci o temporali forti, con possibilità di grandinate.

IL PUNTO DI FORZA DEL RADAR

Il grande punto di forza del radar consiste nella capacità di monitorare, con un unico strumento, e in tempo reale, la situazione meteorologica su un ampio territorio, generalmente fino a un centinaio di chilometri di distanza. In particolare, si rivela essere uno strumento di fondamentale importanza per seguire l'evoluzione dei fenomeni meteo più intensi e localizzati, come i temporali forti, che possono svilupparsi nell'arco di poche decine di minuti e richiedono quindi una pronta reazione.

IL RADAR DELLA PROTEZIONE CIVILE FVG

La Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia dispone di un radar meteorologico a Fossalon (GO), località situata tra Grado e Monfalcone. Costruito nei primi anni '90 del secolo scorso, il radar è stato completamente ristrutturato nel 2021, diventando uno dei più performanti a livello italiano ed europeo. Il suo posizionamento permette di monitorare al massimo delle sue potenzialità e con un'ottima risoluzione la costa, la pianura e la fascia prealpina, mentre si ha un minor dettaglio sulla zona alpina più interna, a causa della maggiore distanza e dell'effetto ombra dovuto alla presenza della catena delle Prealpi.

L'intervallo delle scansioni radar varia in funzione delle condizioni meteo: ogni 30 minuti nei mesi invernali e in assenza di precipitazioni; ogni 10 minuti nel resto dell'anno e in caso di pioggia; ogni 5 minuti in presenza di temporali. Considerando gli intervalli di scansione e i tempi tecnici di elaborazione e trasmissione delle informazioni, le mappe radar sono disponibili con un "ritardo" di alcuni minuti. Le immagini si possono consultare ai seguenti link:

<https://www.meteo.fvg.it/radar.php?ln=>

<https://monitor.protezionecivile.fvg.it/radar>



Sopra: visualizzazione della mappa radar in condizioni di cielo sereno, con evidenziazione del raggio di azione del radar di Fossalon.

Sotto: Il radar della Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia a Fossalon di Grado. Foto: Federica Flapp



QUANTO E DOVE HA PIOVUTO

La mappa regionale con gli accumuli dell'evento mette in evidenza quanto le piogge siano state concentrate su una lunga e stretta fascia di territorio, larga circa 10 km. Complessivamente questo sistema temporalesco ha portato accumuli superiori a 150 mm in 6 ore e a 200 mm in 12 ore da Palmanova a Tolmino, in Slovenia nella valle dell'Isonzo. In particolare, i pluviometri di Palmanova, Cormòns, Prepotto, Dolegnano, Spessa di Cividale, Manzano e Tribil Inferiore hanno battuto diversi record assoluti di accumuli in 3, 6, 12 e 24 ore. Da notare che, eccetto Palmanova, le località sono tutte situate nel bacino dello Judrio, su cui è caduta la maggior parte delle piogge di questo fenomeno.

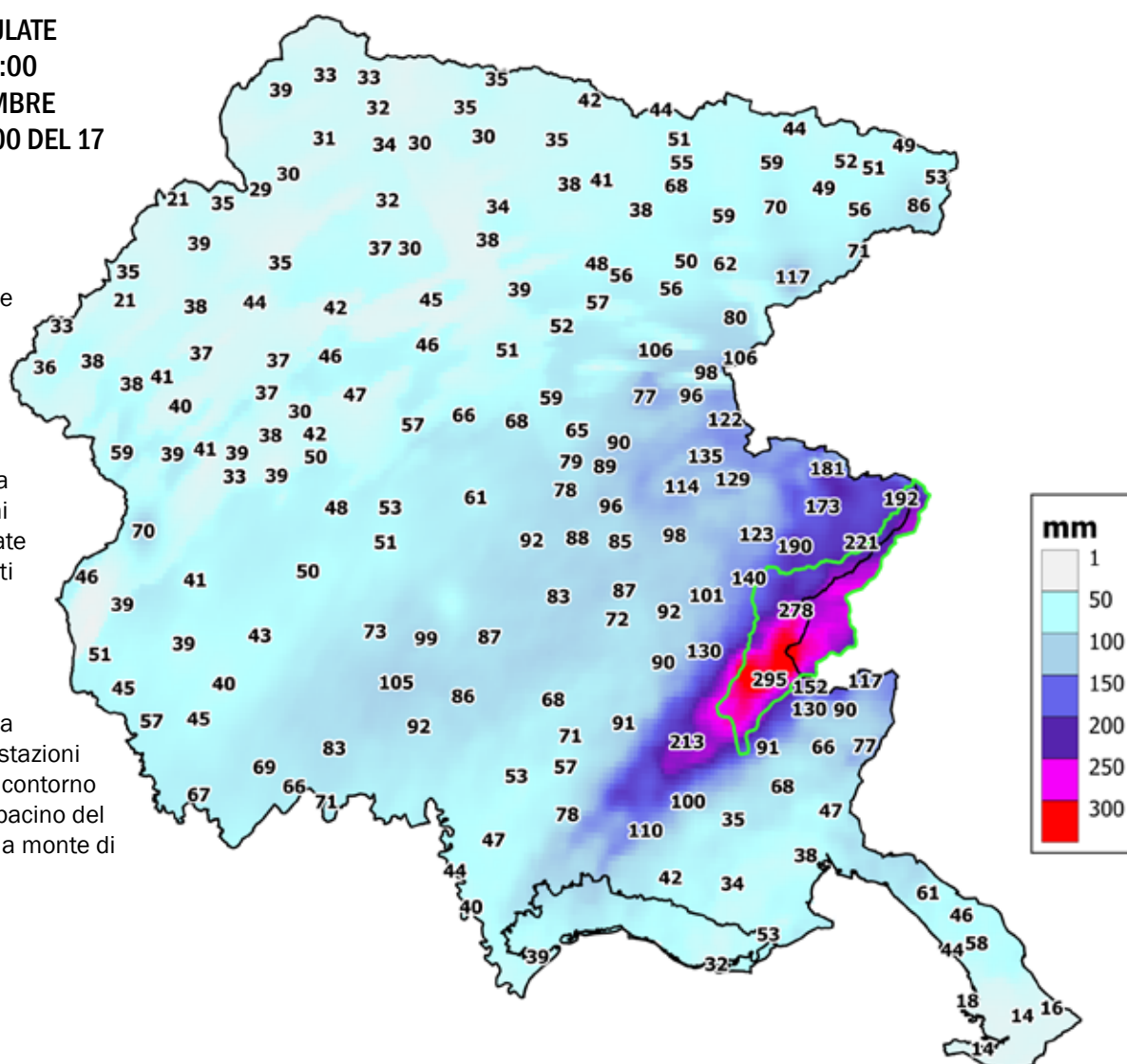
**LE PIOGGE
SI SONO
CONCENTRATE
SU UNA LUNGA
E STRETTA
FASCIA DI
TERRITORIO,
CON ACCUMULI
DA RECORD**

La precipitazione media caduta nell'intero bacino idrografico è stata di 204 mm, che sale a 233 mm se ci si limita a considerare la sezione del bacino a monte dell'abitato di Versa (contorno verde). L'evento è stato quindi amplificato dallo sfortunato posizionamento del temporale autorigenerante disposto lungo una linea da sud-ovest verso nord-est e quasi completamente sovrapposto al bacino dello Judrio. Se il temporale avesse avuto una disposizione diversa, ad esempio ovest-est, la stessa quantità di acqua si sarebbe distribuita su vari bacini idrografici determinando problemi idraulici minori.

**IL TEMPORALE
AUTORIGENERANTE
SI È DISPOSTO
LUNGO UNA LINEA
DA SUD-OVEST
VERSO NORD-EST,
SOVRAPPONENDOSI
AL BACINO DELLO
JUDRIO**

PIOGGE CUMULATE DALLE ORE 14:00 DEL 16 NOVEMBRE ALLE ORE 24:00 DEL 17

Totale delle precipitazioni cadute dalle ore 14:00 del 16 novembre alle ore 24:00 del 17 novembre. In scala cromatica le precipitazioni cumulate stimate da radar corretti con le misure delle stazioni. I numeri sulla mappa corrispondono a dati rilevati da stazioni nel territorio. Il contorno verde indica il bacino del torrente Judrio a monte di Versa.



I DATI DI CORMÒNS

Ora analizziamo i dati misurati da una singola stazione, prendendo Cormòns, che è la località che ha fatto registrare gli accumuli maggiori tra tutte.

L'andamento delle piogge orarie nella figura mostra che l'evento è durato circa 12 ore, con la fase più acuta dalla mezzanotte del 17 novembre, quando per diverse ore ha piovuto con intensità superiore a 30 mm/h fino a raggiungere picchi di oltre 50 mm/h. Queste intensità non sono di per sé insolite: molti temporali nel semestre caldo le raggiungono, ma con fenomeni di durata più breve. Questi valori diventano eccezionali se si considera che ci troviamo nella seconda decade di novembre e che ha persistito per mezza giornata.

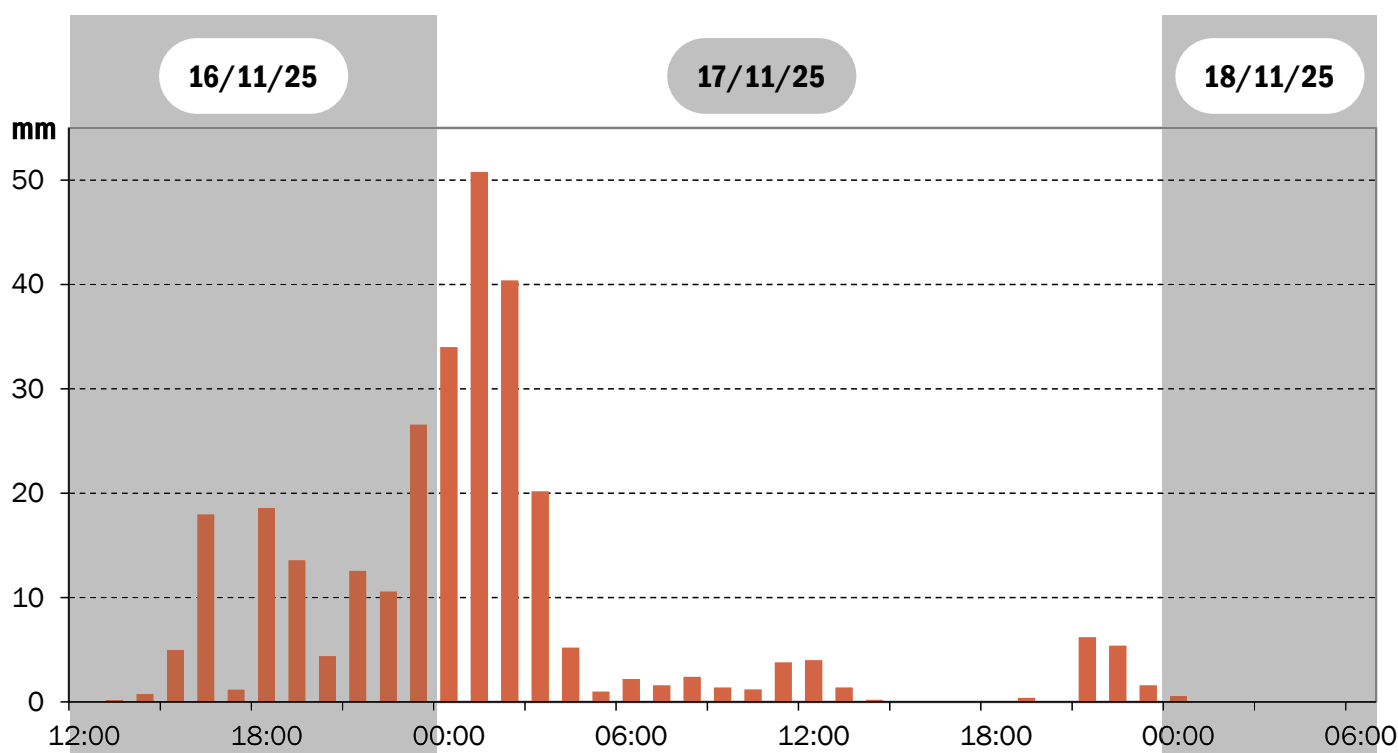
L'INTENSITÀ DELLA PIOGGIA È STATA ECCEZIONALE PER LA STAGIONE TARDO AUTUNNALE E PERCHÉ HA PERSISTITO PER MEZZA GIORNATA

L'andamento delle piogge orarie (figura sotto) mostra che l'evento è durato circa 12 ore, con la fase più acuta dalla mezzanotte del 17 novembre, quando per diverse ore ha piovuto con intensità superiore a 30 mm/h fino a raggiungere picchi di oltre 50 mm/h. La tabella seguente riporta nel dettaglio gli accumuli massimi registrati su diversi intervalli di tempo e i relativi tempi di ritorno*: risulta evidente che ci troviamo di fronte a un evento molto raro con accumuli che, su periodi oltre le 3 ore, possiamo attenderci una volta ogni 100 o più anni.

VALORI MASSIMI DI PIOGGIA CUMULATA A CORMÒNS NELL'EVENTO DEL 16-17 NOVEMBRE 2025 E RELATIVI TEMPI DI RITORNO

	pioggia cumulata mm	tempi di ritorno
1 ora	63	20 anni
3 ore	127	50 anni
6 ore	188	secolare
12 ore	254	secolare
24 ore	281	secolare
48 ore	296	secolare

PIOGGE ORARIE DI CORMÒNS

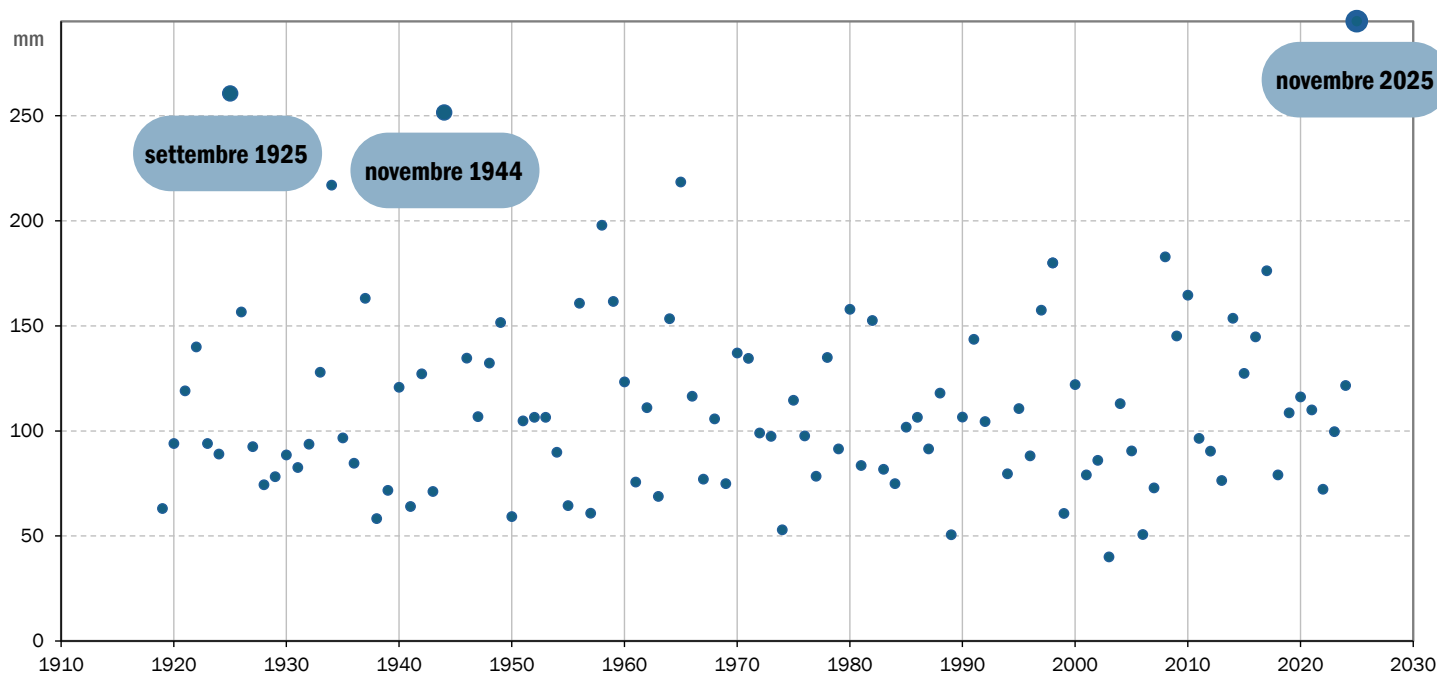


Infine, per poter confrontare e mettere in relazione il fenomeno con altri episodi, volgiamo lo sguardo al passato, riportando nel grafico le piogge massime annuali registrate in due giorni consecutivi, disponibili fin dal 1919.

È STATO UN EVENTO UNICO ED ECCEZIONALE, CHE NON HA PRECEDENTI NELLA SERIE STORICA DI CORMÒNS

Tutti i dati presentati confermano l'assoluta unicità ed eccezionalità dell'evento, che non ha precedenti nella serie storica di Cormòns: in 12 ore si sono avute un quinto delle precipitazioni medie annuali, pari a circa 1400 mm per quella zona.

PIOGGE MASSIME IN DUE GIORNI A CORMÒNS



Piogge massime annuali registrate in due giorni consecutivi dal 1919 a Cormòns.

Sono evidenziati i tre valori più elevati dell'intera serie storica, con il record dell'evento del 16-17 novembre 2025.

UN EVENTO ECCEZIONALE DOVUTO A UNA RARA COMBINAZIONE DI FATTORI

Non è al momento possibile definire se e in quale misura questo specifico evento, così localizzato, sia attribuibile al cambiamento climatico in atto. A livello globale, è ormai assodato che il riscaldamento globale causato dalle emissioni antropiche di gas serra sta incrementando la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi, ma le tendenze alla scala locale non sono altrettanto evidenti**.

Riepilogando, possiamo dire che i disastrosi effetti di questo evento meteorologico sono legati a una sfortunata combinazione di fattori unici:

- un temporale autorigenerante e stazionario durato quasi mezza giornata con accumuli pluviometrici da record
- maggior parte delle piogge concentrate nello stesso bacino idrografico, quello dello Judrio
- bassa predicibilità che lo ha reso del tutto inatteso e imprevedibile

Federico Bonaldo, Sofia Tuzzi, Valentina Gallina, Francesco Sioni
ARPA FVG



ISOTACHE

linee che uniscono i punti con la stessa velocità. Nel caso di mappe meteorologiche indicano una stessa velocità del vento.

MODELLO METEOROLOGICO rappresentazione matematica e numerica dell'atmosfera terrestre utilizzata per simulare l'evoluzione delle condizioni meteorologiche.

Costituiscono il punto di partenza per l'elaborazione delle previsioni del tempo.

PIOGGE OROGRAFICHE si formano quando una massa d'aria umida incontra un rilievo o una catena montuosa. L'aria viene costretta a salire, raffreddandosi e condensando il vapore acqueo generando così la pioggia.

PIOGGE CONVETTIVE si originano da moti verticali rapidi di aria calda e umida in atmosfera. Sono piogge intense, irregolari nello spazio e solitamente di breve durata che accompagnano i rovesci e i temporali.

OUTFLOW in ambito meteorologico è il flusso d'aria fredda in uscita da un sistema convettivo (ad esempio un temporale). È l'improvvisa folata di vento più fresco e intenso che si percepisce appena prima dell'arrivo di un temporale.

SACCATURA In meteorologia è una zona di bassa pressione che si allunga da un centro depressionario principale.

RUN in modellistica è una singola simulazione di un modello numerico effettuata a partire da un determinato istante iniziale.

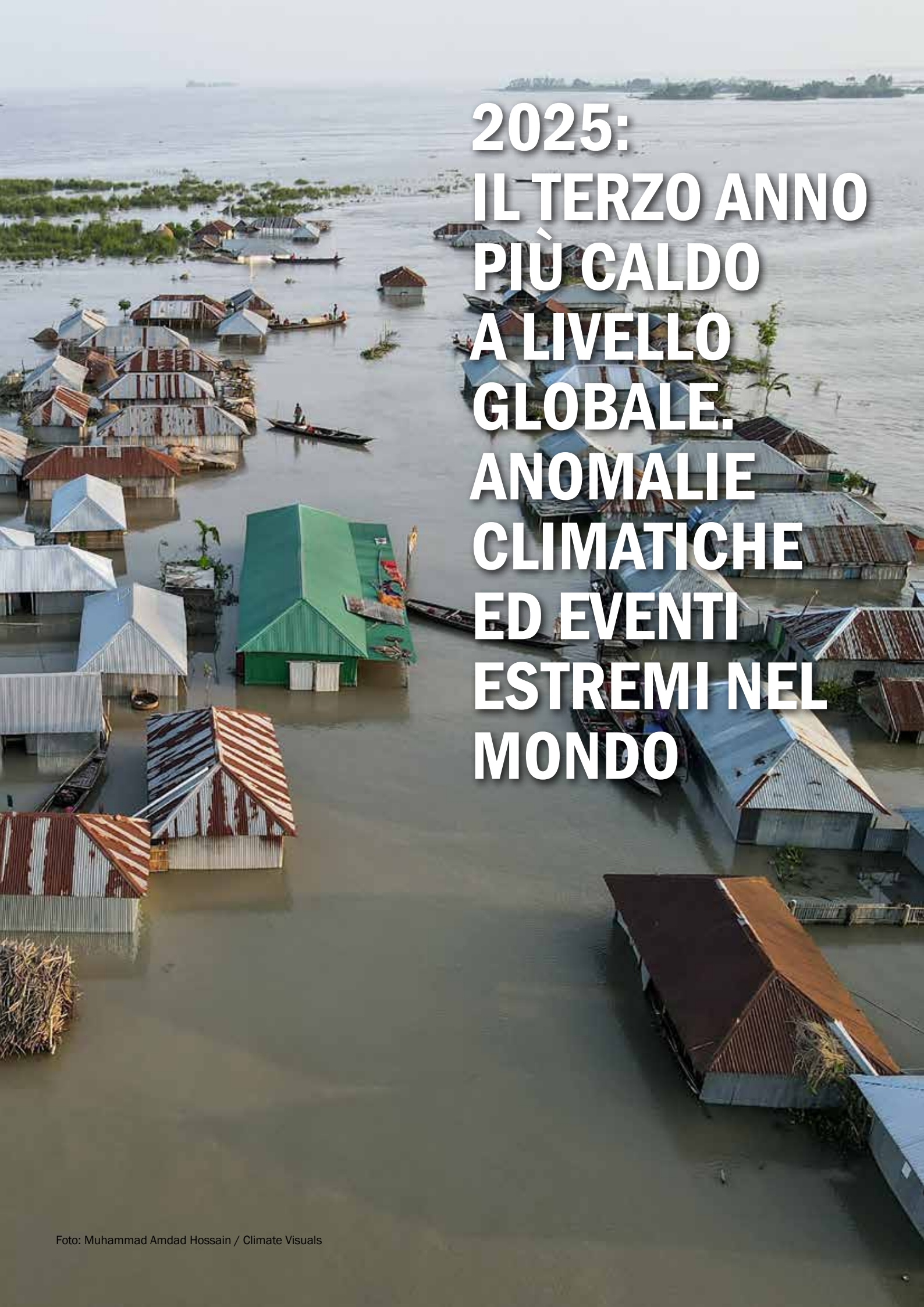
UTC (Tempo Coordinato Universale) è il fuso orario scelto come riferimento globale; per regolare orologi e tempo; centrato sul meridiano di Greenwich e determinato da orologi atomici, serve come base per il calcolo di tutti i fusi orari mondiali. Il fuso orario dell'Italia è UTC+1 durante l'inverno (ora solare, CET - *Central European Time*) e UTC+2 durante l'estate (ora legale, CEST - *Central European Summer Time*). L'Italia è quindi sempre un'ora o due ore avanti rispetto all'orario UTC.

TEMPO DI RITORNO in statistica è il tempo medio che intercorre tra due eventi successivi di entità uguale o superiore a quella intensità. Un tempo di ritorno più lungo indica quindi un evento più raro, meno probabile.

► A livello regionale, il tema degli eventi estremi e delle precipitazioni in FVG è stato trattato nei seguenti articoli:

[EVENTI ESTREMI: ALCUNI SEGNALI DI CAMBIAMENTO IN FRIULI VENEZIA GIULIA in Segnali dal clima in FVG 2024](#)

[LE PRECIPITAZIONI NEL CAMBIAMENTO CLIMATICO IN FRIULI VENEZIA GIULIA in Segnali dal clima in FVG 2025](#)

An aerial photograph showing a coastal village almost completely submerged in floodwater. Numerous houses with corrugated metal roofs are visible, some partially underwater. Several small boats are scattered throughout the flooded area. The background shows a wide expanse of water and distant land under a hazy sky.

**2025:
IL TERZO ANNO
PIÙ CALDO
A LIVELLO
GLOBALE.
ANOMALIE
CLIMATICHE
ED EVENTI
ESTREMI NEL
MONDO**

Il triennio 2023-2025 segna un punto di svolta critico: per la prima volta il riscaldamento medio globale ha superato la soglia di +1,5 °C fissata dall'Accordo di Parigi.

Nonostante il fenomeno raffreddante de La Niña, il 2025 si è confermato il terzo anno più caldo di sempre, con eventi estremi in tutto il mondo: cicloni tropicali e forti tempeste con conseguenti estese alluvioni, ghiacci polari ai minimi storici e ondate di calore marine e ter-estri senza precedenti, con incendi che hanno colpito duramente anche l'Europa.

A livello globale il 2025 è stato il terzo anno più caldo nel record storico, dopo il 2024 e il 2023, con una temperatura media globale (sui continenti e sugli oceani) maggiore di 1.47 °C rispetto ai valori pre-industriali, quasi alla pari con il 2023. Questo nonostante nel 2025 l'oscillazione ENSO (*El Nino Southern Oscillation*) fosse nella sua fase negativa La Nina, in cui le temperature superficiali nel Pacifico Equatoriale sono relativamente basse.

La media di temperatura globale sui continenti per il 2025 è stata la seconda più alta nel record storico (dopo il 2024), e in Europa il 2025 è stato il terzo anno più caldo (dopo il 2024 e il 2020).

UN TRIENNIO DA RECORD

Il riscaldamento globale superficiale per la media dei tre anni 2023-24-25 rispetto ai valori pre-industriali ha superato 1.5 °C, cioè la prima soglia indicata nell'Accordo di Parigi del 2015.

Durante gli ultimi tre anni tutti i record di temperature mensili globali sono stati superati.

ANOMALIE TERMICHE ENORMI E GHIACCI MARINI BEN AL DI SOTTO DELLA MEDIA

Le aree del mondo con una anomalia termica maggiore nel 2025 sono state le regioni tropicali delle Americhe, larghe porzioni di Africa, Europa e Asia extra-tropicale e la maggior parte di Groenlandia e Antartide. Sia in Artico che in Antartico l'estensione del ghiaccio marino è stata ben al di sotto della media per il 1991-2020.

GLI EVENTI ESTREMI: CICLONI E TEMPESTE

Per quanto riguarda gli eventi estremi, un gran numero di cicloni tropicali hanno prodotto estesi eventi alluvionali in aree delle Americhe, Australia e Asia.

Circa 40 forti tempeste hanno impattato l'Europa producendo in numerosi casi piogge intense ed eventi alluvionali, per esempio la tempesta Eowyn in Gran Bretagna, Amy in Europa Centrale e Settentrionale, Barbara in Romania e Grecia, Claudia ed Emilia in Europa Occidentale.

ONDATE DI CALORE TERRESTRI E MARINE, INCENDI, STRESS TERMICO

Come in anni precedenti su tutti i continenti ci sono state numerose ondate di calore con temperature record. In particolare, in Europa ondate di calore multiple si sono registrate fra aprile e settembre soprattutto in Italia, Spagna, Germania, Francia e gli UK.

Nelle acque del Mediterraneo si sono registrate diverse ondate di calore marine.

Le ondate di calore accompagnate da condizioni generalmente secche e in molti casi da forti venti hanno prodotto condizioni favorevoli per lo sviluppo di incendi, soprattutto in Europa e Nord-America. Gli incendi più gravi in Europa si sono registrati nella Penisola Iberica, la Scozia, il Mediterraneo Orientale e la regione dei Balcani.

Circa metà del globo ha avuto un maggior numero di giorni con un elevato stress termico rispetto alla media 1991-2020.



LE CAUSE DEL RISCALDAMENTO GLOBALE: IL PROBLEMA DELL' ATTRIBUZIONE E LE CONCLUSIONI DELLA COMUNITÀ SCIENTIFICA

Quali sono le cause del riscaldamento globale in atto dall'inizio del XX secolo?

Il con-fronto tra dati reali e simulazioni ottenute dai modelli climatici indica che i fattori naturali, come l'attività solare, non spiegano il trend degli ultimi 70 anni, che si può riprodurre solo includendo le attività antropiche.

La velocità del riscaldamento osservato non ha precedenti negli ultimi 11.300 anni, quindi non può essere attribuito ai cicli naturali: la causa principale sono le emissioni di gas serra dall'uso di combustibili fossili.

Il problema dell'attribuzione consiste nell'individuazione delle cause del riscaldamento globale in atto dall'inizio del ventesimo secolo.

In generale, la temperatura globale della Terra può variare per tre cause principali:

1. variazioni nei forzanti esterni antropici, cioè le emissioni di gas serra da attività umane, le emissioni di aerosol atmosferici e l'uso del territorio;
2. variazioni nei forzanti naturali esterni, cioè nella radiazione che ci proviene dal Sole e nell'attività vulcanica;
3. variabilità naturale multidecadale del clima.

Il processo di attribuzione consiste nel valutare quale di queste tre cause ha il maggior contributo nello spiegare il riscaldamento in atto.

I FORZANTI ESTERNI ANTROPICI E NATURALI

L'effetto relativo delle prime due cause viene valutato con l'uso dei modelli climatici.

CONFRONTANDO LE SIMULAZIONI DEL CLIMA STORICO CON IL SURRISCALDAMENTO OSSERVATO SI VALUTA QUALI FORZANTI LO CAUSANO

Sia i forzanti antropici che quelli naturali possono essere ricostruiti abbastanza accuratamente per il periodo storico, per esempio dal 1860 al presente, sulla base di misure dirette e di un numero di diversi indicatori.

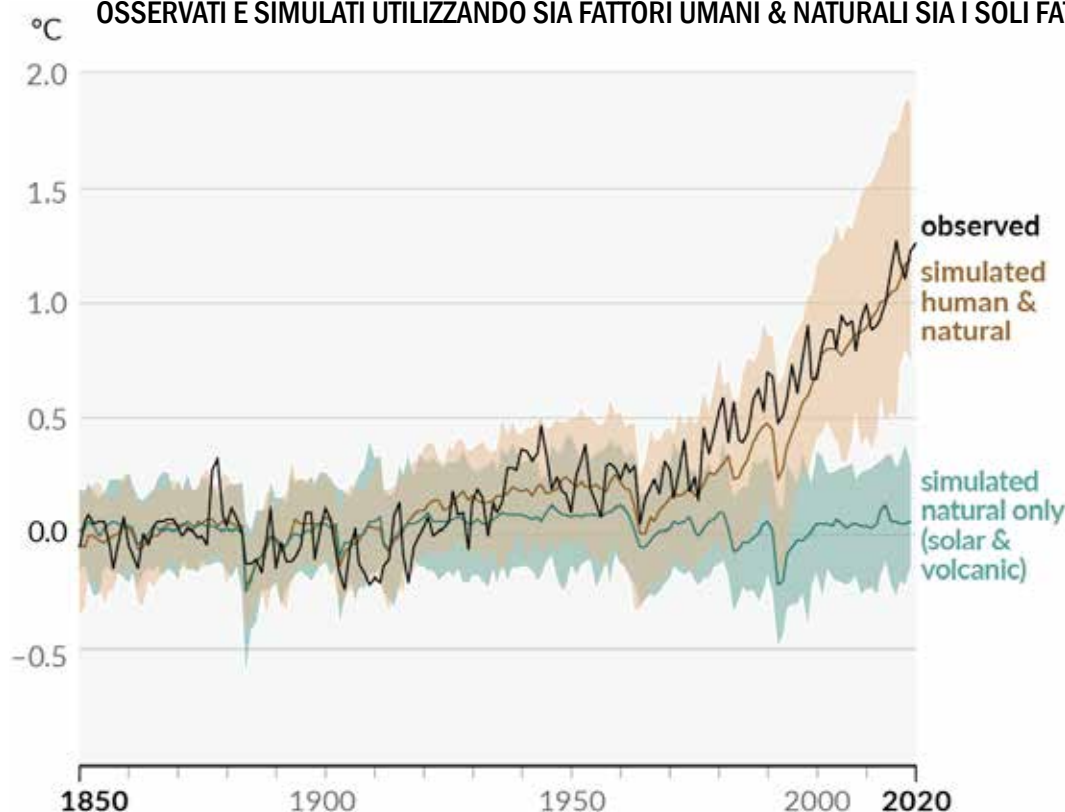
Questi forzanti vengono immessi nei modelli climatici per simulare il clima storico sia separatamente che insieme, e il confronto fra questi diversi set di simulazioni permette di valutare quale dei forzanti fa sì che i modelli riproducano il riscaldamento osservato.

I FORZANTI NATURALI NON SPIEGANO IL RISCALDAMENTO OSSERVATO

Questo esercizio è stato completato con più di 30 diversi modelli climatici globali e i risultati hanno mostrato che mentre fino alla metà del ventesimo secolo la curva del riscaldamento osservato è all'interno del ventaglio di andamenti prodotto dalle simulazioni anche solo con i forzanti naturali, il riscaldamento osservato dopo la metà del ventesimo secolo viene riprodotto dai modelli solo se si includono i forzanti antropici. Questo avviene sostanzialmente perché la radiazione solare, il principale forzante naturale con potenziale di riscaldamento, non ha mostrato trend marcati di crescita nelle ultime 5-6 decadi. In aggiunta, le eruzioni vulcaniche contribuiscono per lo più a raffreddare il clima per periodi di qualche anno a causa della riflessione della radiazione solare da parte del pulviscolo atmosferico.

LA RADIAZIONE SOLARE, IL PRINCIPALE FORZANTE NATURALE, NON HA MOSTRATO TREND MARCATI DI CRESCITA NELLE ULTIME 5-6 DECADI

**CAMBIAMENTI NELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE GLOBALE (MEDIA ANNUA, 1850-2020)
OSSERVATI E SIMULATI UTILIZZANDO SIA FATTORI UMANI & NATURALI SIA I SOLI FATTORI NATURALI**



Anomalie di temperatura globale osservate (linea nera) e prodotte da diversi ensembles (ossia gruppi) di modelli climatici. Per questi ultimi le linee continue (verde e marrone) indicano le medie sugli ensemble, mentre le aree sfumate le simulazioni dai diversi membri degli ensembles. Il grafico marrone include tutti i forzanti antropici e naturali e riesce a riprodurre l'andamento delle temperature effettivamente osservato; quello verde include solo i forzanti naturali e non riesce a riprodurre l'aumento delle temperature osservato nella realtà.

Figura tratta e tradotta dal 6° Rapporto di valutazione dell'IPCC (volume "Le basi fisico-scientifiche", WG1, 2021 - Figure SPM.1) e disponibile nel "Basic Slide Pack with Figures"

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WG1_SPM_Basic_Slide_Deck_Figures.pdf



Foto: Designed by Magnific

LA CAUSA È ANTROPICA

Sulla base di queste simulazioni la comunità scientifica ha concluso che il riscaldamento globale almeno dalla metà del ventesimo secolo non è causato da forzanti esterni naturali (e.g. variazioni nella radiazione solare). D'altro canto, invece, i forzanti antropici possono spiegare il riscaldamento osservato.

UN RISCALDAMENTO TROPPO VELOCE RISPETTO AI CICLI CLIMATICI DI LUNGO PERIODO

Esiste però ancora la possibilità della terza causa indicata sopra, cioè che stiamo assistendo a un fenomeno di variabilità naturale multidecadale, ossia quella collegata a fenomeni o cicli climatici che si estendono su un periodo di diversi decenni.

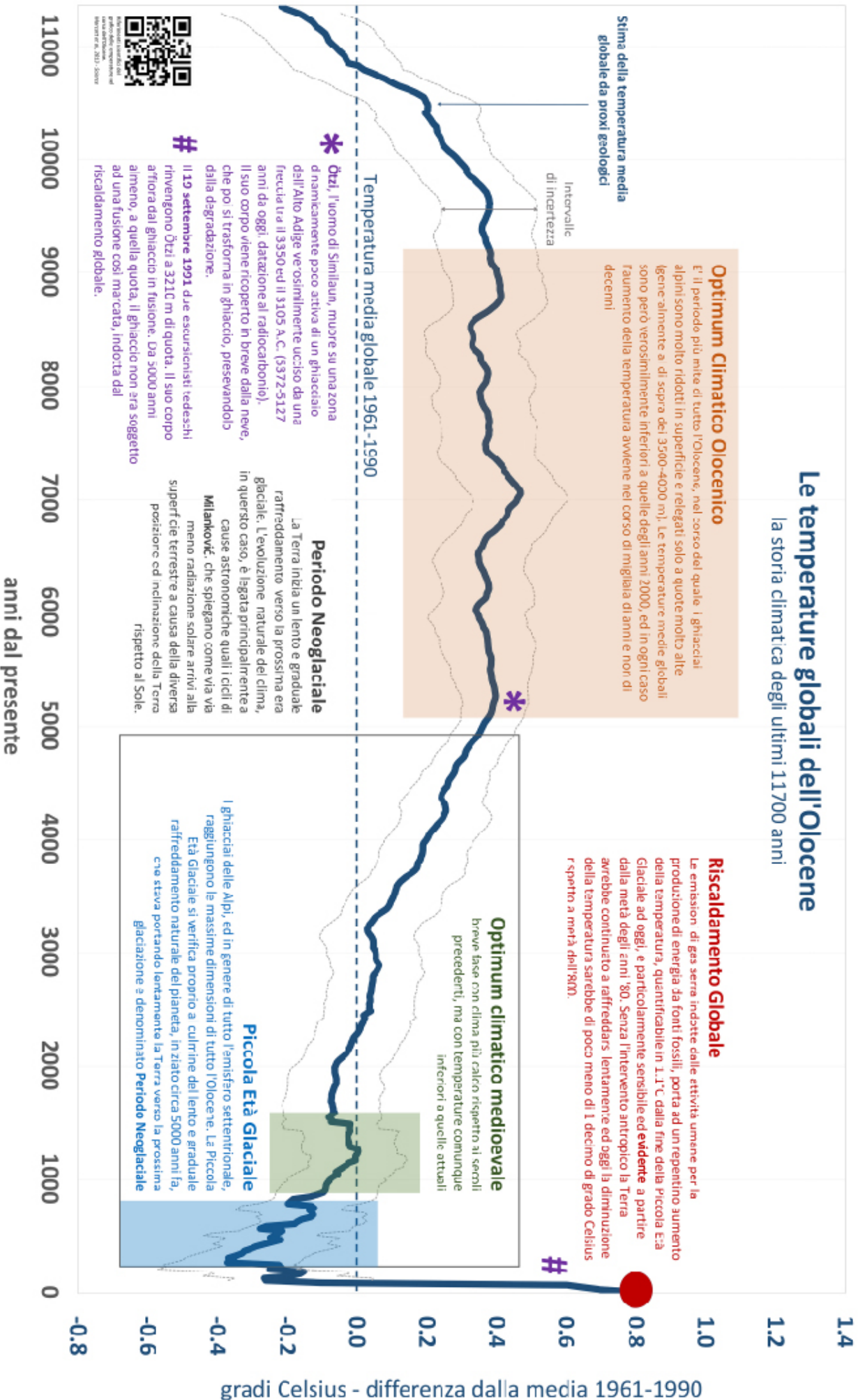
Già il fatto che nessuno dei modelli senza inclusione dei forzanti antropici simulati il riscaldamento osservato indica che questa causa è poco probabile, ma è possibile che i modelli in generale possano sottostimare la variabilità naturale multidecadale.

LA TEMPERATURA DELLA TERRA È AUMENTATA DI CIRCA 1.25 °C NEGLI ULTIMI 120 ANNI: UNA VELOCITÀ DI RISCALDAMENTO SENZA PRECEDENTI NEGLI ULTIMI 11.300 ANNI

Si può però paragonare il riscaldamento in atto con il comportamento delle temperature globali nel passato. La figura nella pagina seguente - ripresa dall'articolo di R.R. Colucci I GHIACCI RACCONTANO [...] pubblicato in Segnali dal clima in FVG 2024 - mostra una ricostruzione delle temperature globali durante l'Olocene (gli ultimi 11.300 anni) basate su una serie di indicatori (e.g. carotaggi di ghiaccio, diversi tipi di sedimenti etc.). È evidente che il riscaldamento osservato dall'inizio del ventesimo secolo, circa 1.25 °C in 120 anni è di gran lunga di una velocità senza precedenti nell'Olocene. Questo ci dice che la probabilità che stiamo assistendo a un fenomeno di variabilità naturale multidecadale è estremamente bassa.

Le temperature globali dell'Olocene

la storia climatica degli ultimi 11700 anni



Anomalie globali della temperatura media terrestre osservate nel corso dell'Olocene, rispetto ai valori normali del periodo 1961-1990 (rielaborazione effettuata su dati/sull'immagine originale da "A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years", Marcott S. A., [www.science.org/doi/10.1126/science.1228026](https://doi.org/10.1126/science.1228026)). La figura è stata realizzata per la mostra "Canin, memoria di climi antichi. Un viaggio sugli effetti del riscaldamento globale" www.aametsoc.org/post/canin-memoria-di-climi-antichi-un-viaggio-sugli-effetti-del-riscaldamento-globale.

La figura è stata ripresa dall'articolo di R.R. Colucci I GIACCI RACCONTANO: ESPLORE I CLIMI DEL PASSATO CON I METODI DELLA PALEOCLIMATOLOGIA, pubblicato in Segnali dal clima in FVG 2024 <https://www.ARPA.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/pubblicazioni/segnali-dal-clima-in-fvg-2024/>

UNA CONCLUSIONE CHIARA, SU CUI LA COMUNITÀ SCIENTIFICA È CONCORDE

L'analisi sintetizzata in questo breve articolo, peraltro basata sui risultati di una moltitudine di rigorosi studi di attribuzione, ha portato la comunità scientifica a concludere che il riscaldamento globale dall'inizio del ventesimo secolo è inequivocabile e che la maggior parte di questo riscaldamento, soprattutto dalla metà del ventesimo secolo in poi, è dovuto a cause antropiche, e principalmente alle emissioni di anidride carbonica dall'uso di combustibili fossili (IPCC Report, WGI, 2021).

**IL RISCALDAMENTO
GLOBALE
OSSERVATO,
SOPRATTUTTO
DALLA METÀ DEL
20° SECOLO,
È CAUSATO
PRINCIPALMENTE
DALLA CO₂ EMESSA
DALL'USO DI
COMBUSTIBILI
FOSSILI**

Filippo Giorgi, *Emeritus Scientist*
ICTP - Centro Internazionale di Fisica Teorica

LA COMUNITÀ SCIENTIFICA È CONCORDE: LA CAUSA ANTROPICA È INEQUIVOCABILE

Il consenso delle comunità scientifica sulle cause del riscaldamento globale è ormai così pieno che nel suo sesto rapporto di valutazione (AR6 - WG1, 2021), l'IPCC afferma in modo netto: “È indiscutibile che le attività umane stiano causando il cambiamento climatico, rendendo gli eventi climatici estremi — tra cui ondate di calore, forti precipitazioni e siccità — più frequenti e gravi.”

Le conclusioni principali del Rapporto di Sintesi AR6 sono disponibili in italiano sul sito del Focal Point IPCC per l'Italia: <https://ipcc-italia.cmcc.it/headline-statements-del-rapporto-di-sintesi-ar6/>

La documentazione integrale dell'IPCC Sixth Assessment Report - Working Group 1: The Physical Science Basis sono disponibili su: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

Le slides riassuntive e le risorse multimediali originali sono disponibili su: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/resources/presentations-and-multimedia/>



UN ANNO DI ATTIVITÀ DEL PROGETTO TRANSFRON- TALIERO *HEATISLANDS ADAPT* SULLE ISOLE DI CALORE URBANE

Lo studio delle isole di calore nelle zone di confine tra Italia e Slovenia è al centro del progetto *HeatIslands Adapt*.

L'integrazione di dati provenienti da diverse fonti consente di analizzare il fenomeno nel passato e nel presente, valutare lo stress termico sulla popolazione e individuare le aree più a rischio.

Su queste basi è possibile definire strategie di adattamento mirate per migliorare la resilienza urbana.

A un anno dall'avvio del progetto vengono presentati i primi risultati e le prossime sfide.

È entrato nel vivo il progetto *HeatIslands Adapt*, un progetto Interreg Italia-Slovenija avviato a giugno 2025, che affronta la sfida rappresentata dalle isole di calore urbane e dallo stress termico, nel contesto dei cambiamenti climatici. Il progetto mira a ridurre gli effetti delle isole di calore urbane e a individuare misure di adattamento per rafforzare la resilienza delle città e migliorare la qualità della vita, con particolare attenzione alle aree di confine.

Per far ciò la collaborazione transfrontaliera ha un ruolo fondamentale: lo scambio di conoscenze e buone pratiche aiuterà a realizzare analisi coordinate, omogeneizzare la comunicazione sulle ondate di calore e sui rischi legati al caldo, e definire piani di adattamento comuni. I partner del progetto sono 6, 3 sloveni e 3 italiani. ARPA FVG in particolare collabora con la controparte slovena, l'Agenzia per l'ambiente slovena ARSO.

Lo studio si focalizza sull'area transfrontaliera delle città di Gorizia e Nova Gorica, che funge da area pilota, con l'obiettivo di applicare in futuro anche ad altre aree le stesse metodologie utilizzate nel corso del progetto.

L'ISOLA DI CALORE URBANO

Il fenomeno “isola di calore urbana” (*urban heat island*) si verifica quando le temperature nelle aree urbane sono significativamente più elevate rispetto alle aree rurali circostanti. Ciò avviene principalmente a causa della presenza di infrastrutture, di materiali artificiali e di attività umane nelle città.

La vegetazione che ricopre le aree rurali contribuisce a raffreddare l'aria, mentre l'asfalto e il cemento, più presenti nelle aree urbane, assorbono e poi rilasciano il calore, causando un aumento della temperatura. Inoltre, edifici alti e strade strette possono bloccare i flussi d'aria, riducendo la ventilazione e intrappolando il calore. Anche attività umane come il traffico veicolare e il condizionamento degli edifici contribuiscono ad aumentare il calore nell'ambiente urbano.

UN FENOMENO CON CONSEGUENZE IMPORTANTI E CHE VA STUDIATO

L'effetto “isola di calore” è particolarmente evidente nella stagione estiva, specialmente nelle ore notturne, quando il calore trattenuto da strutture come strade ed edifici viene progressivamente rilasciato. Nelle città la temperatura tende a diminuire lentamente, mentre nelle aree rurali il calore si disperde molto più rapidamente.

**L'EFFETTO
“ISOLA DI CALORE
URBANA”,
PARTICOLARMENTE
EVIDENTE
IN ESTATE E DI
NOTTE, ACCRESCE
GLI IMPATTI DEL
CALDO SULLA
SALUTE UMANA**

Questo fenomeno aumenta il rischio di impatti sulla salute umana: dopo il caldo accumulato durante il giorno, il persistere di temperature elevate nelle ore notturne prolunga la sensazione di disagio termico e limita il necessario recupero fisico dell'organismo. Nell'ottica dei cambiamenti climatici, è fondamentale capire a fondo questo fenomeno per poter pianificare e realizzare misure di adattamento mirate, che possano ridurre lo stress termico nelle aree urbane.



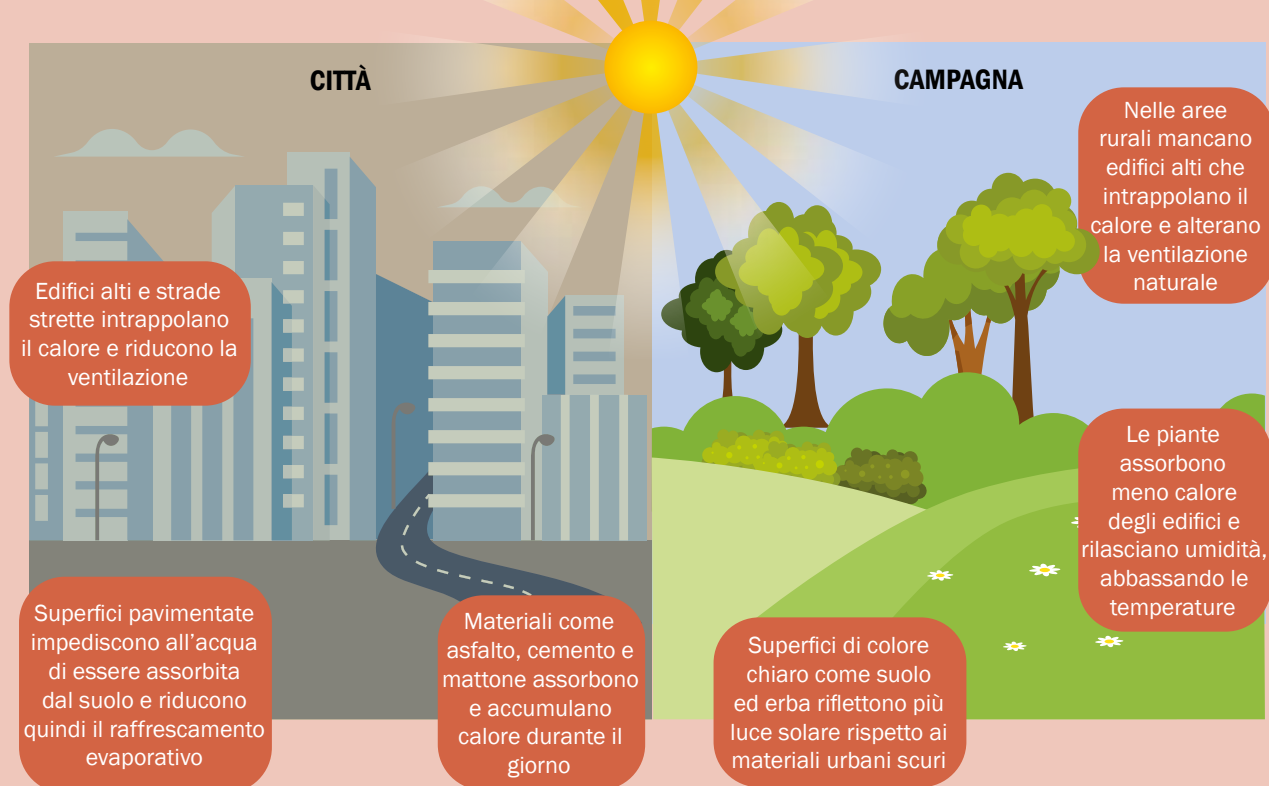
EFFETTO “ISOLA DI CALORE URBANA”



Schema generale dell'effetto “isola di calore urbana”

(rielaborato e tradotto da <https://community.wmo.int/en/activity-areas/urban/urban-heat-island>).

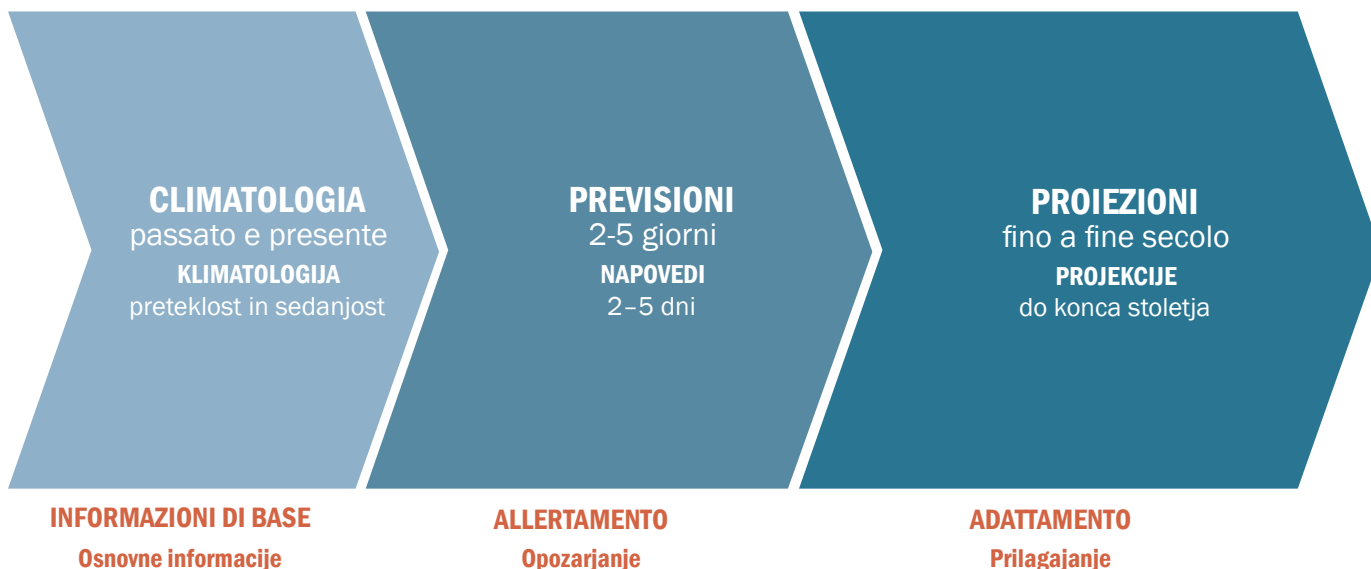
PRINCIPALI FATTORI CHE DETERMINANO L'EFFETTO ISOLA DI CALORE URBANO (UHI)



Le aree urbane intrappolano il calore grazie a edifici alti, superfici impermeabili e materiali che trattengono il calore, mentre le aree rurali rimangono più fresche grazie alla vegetazione, al rilascio di umidità e alle superfici riflettenti di colore chiaro.

Testi e immagini tradotti e rielaborati da: <https://land.copernicus.eu/en/feature-articles/urban-heat-islands-measured-mapped-and-managed>

STUDIO DELL'ISOLA DI CALORE URBANA ATTRAVERSO 3 ORIZZONTI TEMPORALI



IL MODULO DI LAVORO CURATO DA ARPA FVG NEL PROGETTO *HEATISLANDS ADAPT*

**ARPA FVG E ARSO
STUDIANO L'ISOLA
DI CALORE URBANA
ATTRAVERSO
TRE ORIZZONTI
TEMPORALI:
STORICO, PREVISIONI
A BREVE TERMINE,
PROIEZIONI
CLIMATICHE**

ARPA FVG ha il ruolo di coordinatore del primo modulo di lavoro del progetto *Heatlands Adapt* (Work Package 1), dal titolo "Sfide climatiche e scenari futuri". Le attività, condivise con l'Agenzia per l'ambiente slovena (ARSO), sono strutturate in modo da studiare l'isola di calore urbana attraverso tre orizzonti temporali:

1. la **CLIMATOLOGIA**, che fornisce una conoscenza di base sull'area di studio tramite l'analisi delle condizioni climatiche negli ultimi decenni (dal 1981) e le loro variazioni;
2. la **PREVISIONE**, che guarda al breve termine con un orizzonte di 2-5 giorni ed è fondamentale per i sistemi di allertamento da caldo. Uno degli obiettivi del progetto è proprio quello armonizzare tali sistemi a livello transfrontaliero, rendendo più omogenea la comunicazione;
3. le **PROIEZIONI CLIMATICHE**, che forniscono indicazioni sulle condizioni future fino a fine secolo, considerando la possibilità di diversi scenari di emissioni di gas serra. Questi dati sono utili per definire un quadro dei rischi futuri e per la pianificazione di strategie di adattamento mirate e a lungo termine.

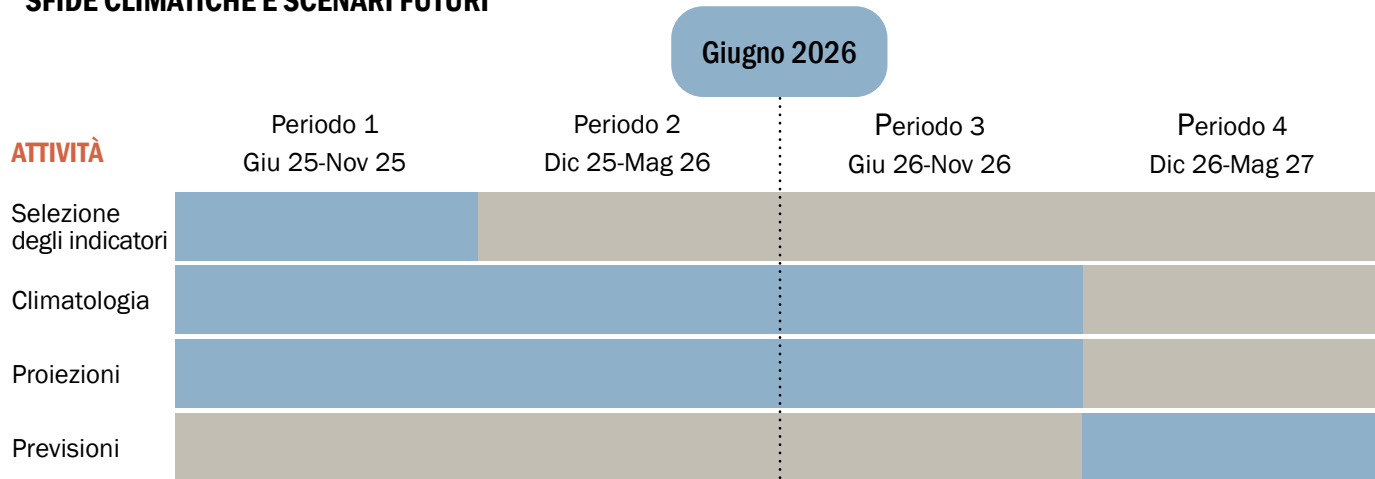
Nei primi mesi del progetto, per ciascuno di questi orizzonti temporali sono stati individuati specifici indicatori di calore, utili per sintetizzare le condizioni meteo-climatiche e consentire analisi e confronti nelle diverse località considerate.

LE ATTIVITÀ SVOLTE DA ARPA FVG NEL PRIMO ANNO DI PROGETTO

A un anno dall'avvio del progetto (giugno 2025) sono molte le analisi già svolte, grazie alla collaborazione tra i due partner ARPA FVG e ARSO. Le due agenzie si sono concentrate in particolare su:

- la selezione degli indicatori di caldo, attraverso un'analisi della letteratura e l'individuazione di quelli più adatti ai diversi scopi del progetto;
- lo studio della climatologia, basato principalmente sui dati misurati dalle stazioni meteorologiche e, per gli anni più recenti, anche sui dati satellitari
- le analisi dei modelli climatici, finalizzate a confrontare le proiezioni nell'area di studio secondo due scenari (RCP4.5 e RCP8.5) e a valutarne l'utilizzo per analizzare l'isola di calore urbana nel futuro.

TEMPISTICHE DEL MODULO DI LAVORO “SFIDE CLIMATICHE E SCENARI FUTURI”



LA SELEZIONE DEGLI INDICATORI DI CALDO

Le osservazioni effettuate dalle stazioni meteorologiche possono essere sintetizzate tramite appositi indicatori, adatti a esigenze e contesti diversi. Gli indicatori di calore permettono di descrivere le condizioni termiche, tramite l'integrazione di diverse variabili e con riferimento a specifiche soglie critiche.

Sulla base degli scopi del progetto, sono stati individuati alcuni indicatori più adatti per ognuno degli orizzonti temporali analizzati:

- il numero di notti tropicali, giorni estivi, giorni caldi e giorni molto caldi per lo studio della climatologia;
- due indicatori biometeorologici - l'indice di disagio (o indice di Thom) e l'UTCI - per la previsione a breve termine;
- il numero di notti tropicali per le proiezioni climatiche.

Per un approfondimento sul tema, il documento tecnico dell'attività, in italiano e sloveno, è disponibile sul sito del progetto: https://www.ita-slo.eu/sites/default/files/media/document/D1_1 - Heat indicators FINAL.pdf

PER CIASCUN ORIZZONTE TEMPORALE, SONO STATI INDIVIDUATI GLI INDICATORI DI CALDO PIÙ ADATTI, CHE DESCRIVONO LE CONDIZIONI TERMICHE INTEGRANDO DIVERSE VARIABILI E CON RIFERIMENTO A SPECIFICHE SOGLIE CRITICHE

GLI INDICATORI BIOMETEOROLOGICI: COSA SONO E A COSA SERVONO

Il caldo è spesso associato alla sola temperatura dell'aria, ma questa non è l'unica variabile che influenza la percezione del calore. A parità di temperatura, infatti, un'elevata umidità può aumentare la sensazione di disagio e affaticamento, mentre la presenza di vento può contribuire ad attenuare lo stress termico. Per questo motivo, per stimare la percezione del caldo da parte della popolazione e valutare il livello di stress termico, si utilizzano gli indicatori biometeorologici. Questi tengono conto non solo della temperatura, ma anche di altre variabili, come l'umidità, il vento e la radiazione solare.

La complessità di questi indicatori varia: si va da quelli più semplici, calcolati mediante formule empiriche, a quelli più avanzati, che si basano su modelli in grado di simulare il bilancio energetico del corpo umano. Esistono inoltre indicatori specifici anche per gli animali, in particolare per quelli da produzione.

A seconda del metodo con cui viene calcolato, ogni indicatore può essere particolarmente adatto a evidenziare determinati aspetti dello stress termico, che possono avere diversa rilevanza a seconda del contesto: è quindi importante selezionare gli indicatori più adeguati rispetto alle specifiche esigenze di analisi, gestione o pianificazione.

SCEGLIERE E CONFRONTARE GLI INDICATORI DI CALDO

Gli indicatori di calore rappresentano strumenti fondamentali per fornire una sintesi delle condizioni termiche, integrando diverse variabili e facendo riferimento a specifiche soglie critiche. A livello globale viene utilizzata un'ampia gamma di indicatori per valutare il disagio termico, adatti a esigenze e contesti diversi.

Nell'ambito del progetto, l'attenzione si è concentrata su tre categorie principali di indicatori.

INDICATORI METEO-CLIMATICI

Quantificano il numero di giorni annui in cui la temperatura supera determinate soglie.

Tra questi rientrano:

- **notte tropicali:** numero di giorni annui in cui la temperatura minima giornaliera è superiore ai 20 °C.
- **giorni estivi:** numero di giorni annui in cui la temperatura massima giornaliera supera i 25 °C;
- **giorni caldi:** numero di giorni annui in cui la temperatura massima giornaliera supera i 30 °C;
- **giorni molto caldi:** numero di giorni annui in cui la temperatura massima giornaliera supera i 35 °C;

Questi indicatori sono semplici da calcolare e forniscono un'informazione su base annua, che consente confronti immediati tra anni diversi. Risultano quindi adatti sia all'analisi del clima passato e presente, sia alle previsioni a breve termine e alle proiezioni climatiche.

INDICATORI BIOMETEOROLOGICI

Permettono di stimare il disagio termico integrando l'effetto della temperatura con quello dell'umidità relativa dell'aria e, in alcuni casi, considerano anche il vento e la radiazione solare.

Per ciascun indicatore sono definite delle soglie che identificano i diversi livelli di pericolo, ai quali vengono associati possibili effetti sulla salute.

Tra i numerosi indicatori disponibili, nell'ambito del progetto ci si è concentrati sull'**UTCI (Universal Thermal Climate Index)** e sull'**indice di disagio** (o **indice di Thom**). Questi strumenti sono particolarmente adatti per lo studio delle condizioni attuali e delle previsioni a breve termine.

INDICATORI LEGATI ALLE ONDATE DI CALORE

Sono utili per analizzare frequenza, durata e intensità di questi eventi.

Un'ondata di calore è generalmente definita come un periodo prolungato caratterizzato da temperature significativamente superiori alla norma. Non esiste tuttavia una definizione univoca: le soglie e i criteri variano in base alle condizioni geografiche e climatiche locali, motivo per cui esistono diversi indicatori di ondate di calore. Ad esempio, ARPA FVG utilizza la definizione di ondata di calore come un periodo di almeno cinque giorni consecutivi in cui la temperatura massima giornaliera supera di almeno 5 °C il valore climatologico di riferimento per quel giorno.

Sulla base di questa definizione viene utilizzato l'**HWDI (Heatwave Duration Index)**, che misura la durata massima, espressa in giorni, delle ondate di calore registrate in un anno.

LA CLIMATOLOGIA (PASSATA E PRESENTE)

Lo studio della climatologia si basa sulle serie storiche delle temperature giornaliere, derivate dai valori misurati nelle stazioni meteorologiche italiane e slovene di Gorizia, Nova Gorica e Bilje. Le analisi si focalizzano su due trentenni storici (1981-2010 e 1991-2020) e su gli ultimi 10 anni (2016-2025).

NEL TEMPO SONO AUMENTATE LE TEMPERATURE ESTIVE SIA MINIME CHE MASSIME E ANCHE I VALORI DEGLI INDICATORI DI CALDO

NELLE AREE URBANE DI GORIZIA E NOVA GORICA SI RISCOVRA TEMPERATURE PIÙ ELEVATE E UN MAGGIOR NUMERO DI SUPERAMENTI DI SOGLIE CRITICHE RISPETTO ALLA CAMPAGNA

Lo studio dei trend delle temperature estive nei due trentenni storici, ha evidenziato una crescita significativa, più rapida nel periodo più recente, sia delle temperature minime che massime. Questo si riflette nel confronto tra le medie trentennali: tra il 1981-2010 e il 1991-2020 si registra un aumento medio di 0,5 °C per la temperatura minima e di 0,8 °C per quella massima.

Per entrambi i trentenni sono stati calcolati anche i valori medi degli indicatori meteo-climatici (notti tropicali, giorni estivi, caldi e molto caldi), riscontrando che i valori annui dell'ultimo decennio sono generalmente più elevati rispetto al passato.

Il confronto tra le stazioni urbane (Gorizia e Nova Gorica) e quella rurale (Bilje) ha mostrato temperature più elevate e un maggior numero di superamenti di soglie critiche nelle aree urbane, evidenziando un primo segnale del fenomeno di isola di calore urbana.

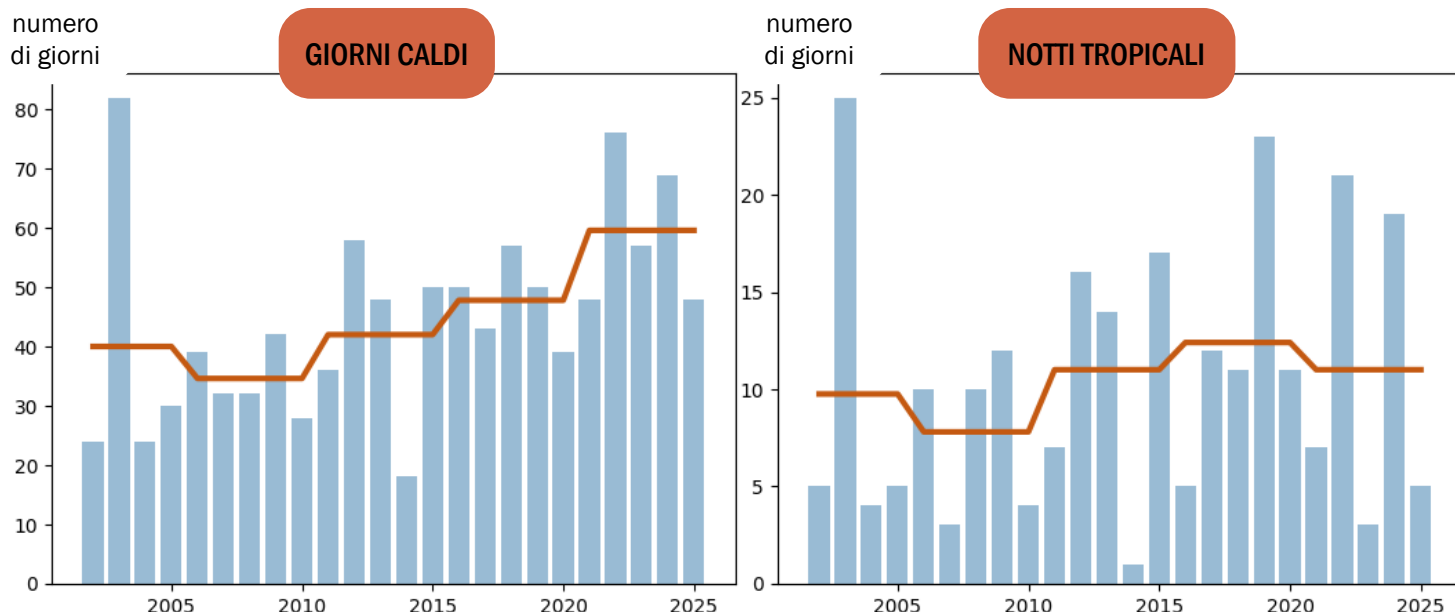
AUMENTANO I GIORNI CALDI E LE NOTTI TROPICALI A GORIZIA

Per Gorizia, particolare attenzione è stata dedicata ai dati della stazione installata presso l'aeroporto di Gorizia e attiva dal 2002.

L'analisi dei giorni caldi evidenzia una tendenza all'aumento: la media degli ultimi cinque anni è pari a 60 giorni caldi, contro i 35 giorni registrati nel quinquennio 2006-2010. L'analisi delle notti tropicali mostra una maggiore variabilità, ma comunque un aumento medio, sebbene meno evidente a causa dell'oscillazione dei valori e della minore frequenza dell'indicatore.

Osservando i singoli anni, emergono in particolare il 2003, anno eccezionalmente caldo, e, più recentemente, il 2022 e il 2024, mentre il 2014 registra i valori più bassi delle serie.

INDICATORI METEO-CLIMATICI LEGATI AL CALDO A GORIZIA (2002-2025)



A sinistra il numero di giorni caldi ($T_{max} > 30\text{ °C}$), a destra il numero di notti tropicali ($T_{min} > 20\text{ °C}$), entrambi misurati nella stazione meteorologica presso l'aeroporto di Gorizia (2002-2025)

I DATI SATELLITARI: PREZIOSI, MA DA INTERPRETARE CORRETTAMENTE

I dati satellitari possono dare un grande supporto nello studio delle condizioni termiche degli anni più recenti. Tra i vari prodotti disponibili, nell'ambito del progetto l'attenzione si concentra sui satelliti Landsat 8 e 9, e in particolar modo sui dati del sensore TIRS (*Thermal Infrared Sensors*) che permette di stimare la temperatura superficiale (*Land surface temperature*, abbreviata LST).

DAI DATI SATELLITARI SI È OTTENUTA UNA MAPPA DI TEMPERATURA SUPERFICIALE UTILE COME BASE DI PARTENZA PER LO STUDIO DELL'ISOLA DI CALORE URBANA

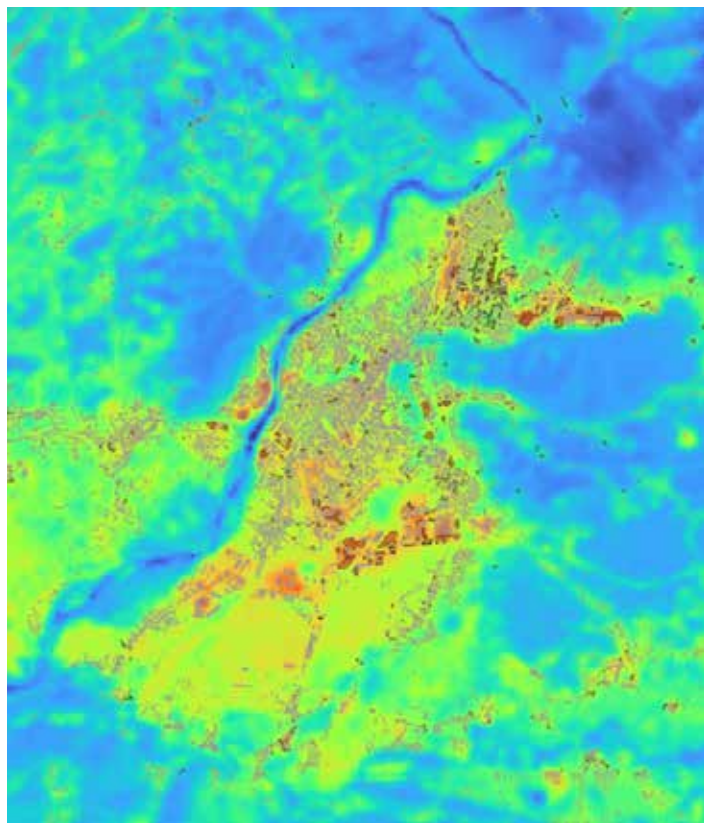
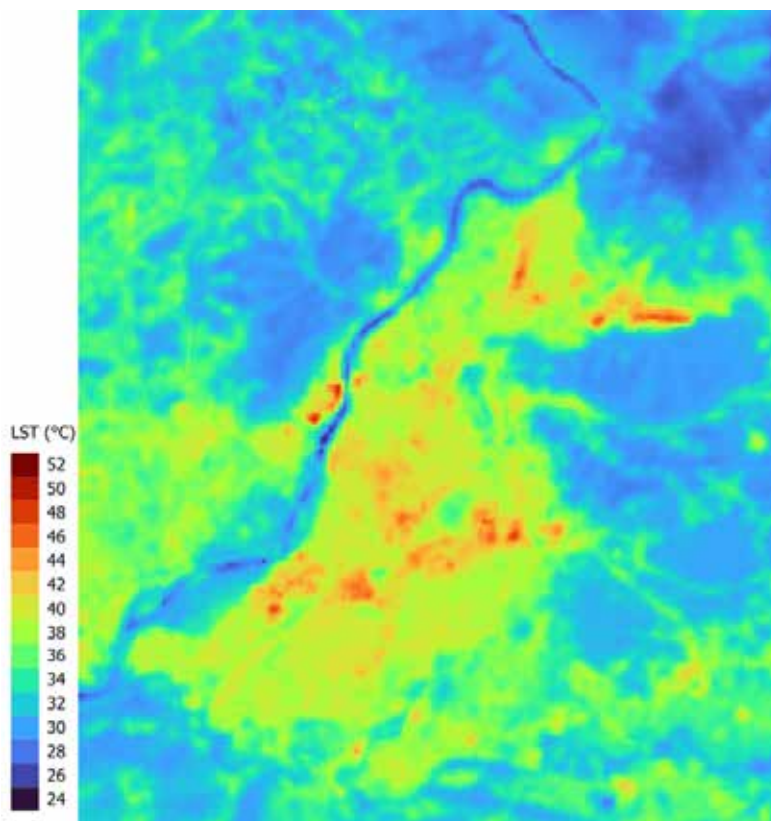
Considerando tutte le immagini nitide dei mesi caldi degli ultimi 5 anni è stato possibile ottenere una mappa di temperatura superficiale rappresentativa delle condizioni medie. Questo dato aiuta a identificare le zone dove l'effetto di isola di calore urbana potrebbe essere più intenso e il rischio per la popolazione più elevato.

IL DATO SATELLITARE PERÒ MOSTRA LA TEMPERATURA DELLE SUPERFICI (TETTI, VEGETAZIONE, STRADE) E NON SEMPRE RIFLETTE LE CONDIZIONI ALLE QUALI LE PERSONE SONO ESPOSTE

Bisogna però fare attenzione all'interpretazione del dato satellitare: esso mostra la temperatura delle superfici rilevate (tetti, vegetazione, strade) e non sempre riflette le condizioni alle quali le persone sono esposte. Infatti, la temperatura superficiale, soprattutto nei mesi estivi e durante le ore più calde, può essere anche di molto superiore alla temperatura dell'aria.

Per questo motivo, il dato satellitare non può essere utilizzato da solo per stimare l'effetto di isola di calore urbana e lo stress termico, ma va abbinato a misure della temperatura dell'aria. Se considerato singolarmente, può comunque essere utilizzato come indicatore proxy, ovvero come stima indicativa delle condizioni termiche di un'area: in questo caso si parla di isola di calore urbana superficiale (SUHI).

MAPPA DI TEMPERATURA SUPERFICIALE A GORIZIA E NOVA GORICA



In alto: mappa di temperatura superficiale derivata dal sensore di TIRS dei satelliti Landsat 8-9 (media di 30 immagini, maggio-settembre 2021-2025) per l'area di studio transfrontaliera. In basso: la stessa mappa con sovrapposto l'edificato urbano.

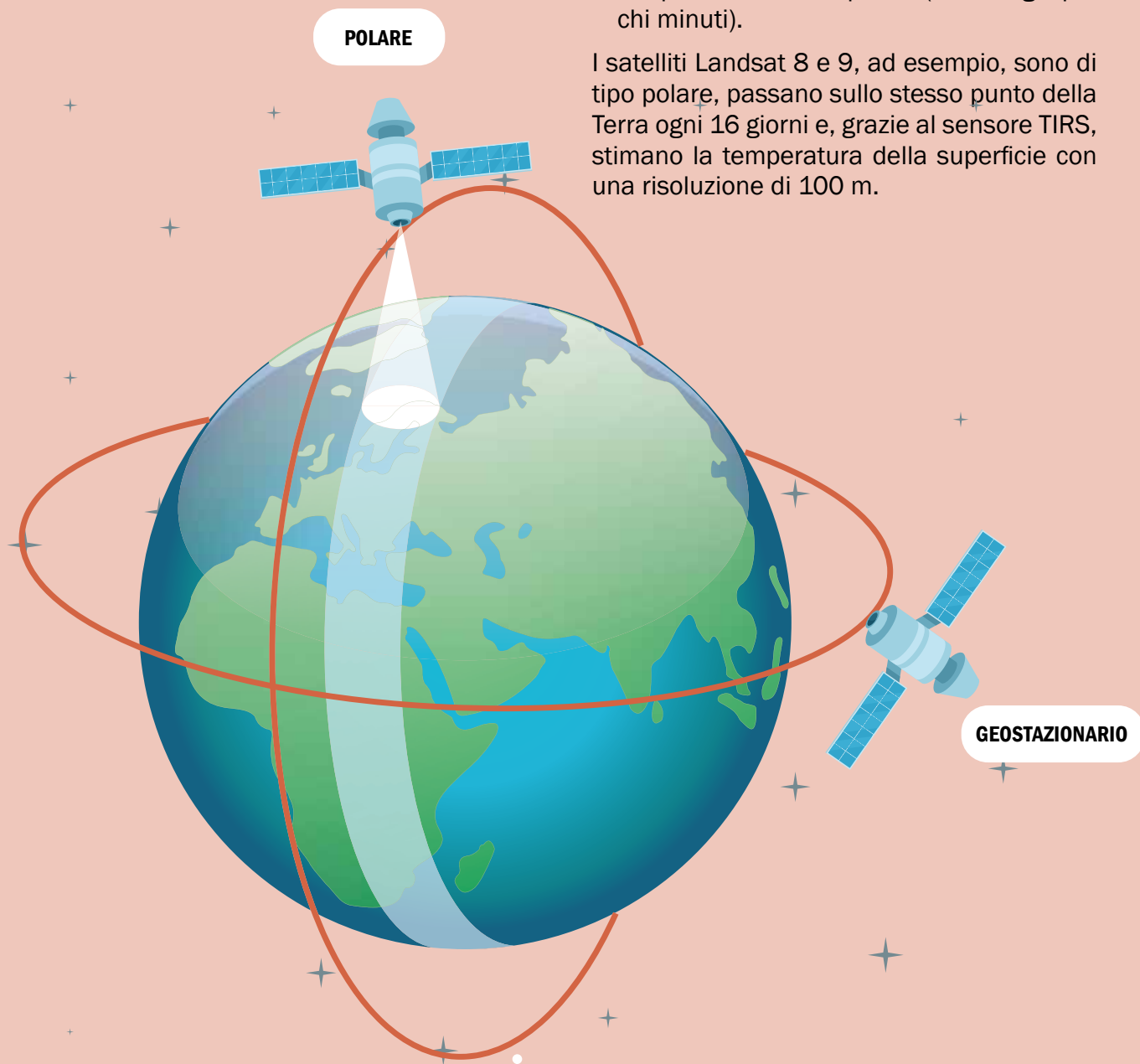
COSA SONO I DATI SATELLITARI E PERCHÉ SONO UTILI

Negli ultimi decenni si è assistito a un rapido sviluppo dei satelliti e delle loro applicazioni in ambito climatico e ambientale. Le immagini satellitari sono spesso gratuite e facilmente accessibili, permettono di osservare aree estese con buon livello di dettaglio. Sono ampiamente utilizzate, ad esempio, per il monitoraggio della qualità dell'aria, delle emissioni di gas serra, degli oceani e dell'uso del suolo.

I satelliti si distinguono principalmente in due tipologie:

- **POLARI**, che orbitano passando dai Poli e coprono l'intera superficie terrestre in un numero fisso di giorni. In questo caso, vi è un compromesso tra risoluzione spaziale e periodo di rivisitazione: maggiore è la risoluzione spaziale, più lungo sarà l'intervallo tra due passaggi consecutivi sullo stesso punto della Terra.
- **GEOSTAZIONARI**, che orbitano alla stessa velocità di rotazione della Terra e osservano continuamente la stessa porzione di territorio. Questi satelliti hanno solitamente una risoluzione spaziale inferiore rispetto ai satelliti polari, ma un aggiornamento temporale molto frequente (anche ogni pochi minuti).

I satelliti Landsat 8 e 9, ad esempio, sono di tipo polare, passano sullo stesso punto della Terra ogni 16 giorni e, grazie al sensore TIRS, stimano la temperatura della superficie con una risoluzione di 100 m.



I PROSSIMI PASSI: LA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO ESTATE 2026

Da maggio 2026, ARPA FVG ha avviato una campagna di monitoraggio delle temperature a Gorizia che prevede l'utilizzo di diversi strumenti:

- nuove **STAZIONI METEOROLOGICHE**, installate in aree di interesse, sia urbane che rurali e caratterizzate da specifici fattori di vulnerabilità, consentono un monitoraggio continuo.
- i rilievi con **SENSORI SU AUTOVETTURE** permettono di analizzare le condizioni a livello stradale, lungo vari percorsi e su aree più estese.
- l'utilizzo di **TERMOCAMERE** consente di misurare con elevato dettaglio la temperatura delle superfici e di confrontarla con i dati satellitari.

L'integrazione di diverse fonti di dati permette di ottenere informazioni più complete sulle condizioni termiche della città, per valutare come la conformazione urbana - in particolare edifici, pavimentazione e spazi verdi - influenzi la temperatura dell'aria e dunque lo stress termico percepito dalla popolazione. Inoltre, questi dati consentono di analizzare la relazione tra la temperatura dell'aria e la temperatura superficiale.

LA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO 2026 INCLUDE NUOVE STAZIONI METEOROLOGICHE, RILIEVI CON SENSORI SU AUTOVETTURE, L'UTILIZZO DI TERMOCAMERE

I PROSSIMI PASSI: PREVISIONI E PROIEZIONI

Lo studio degli orizzonti temporali futuri, previsioni e proiezioni, sarà approfondito nel secondo anno del progetto.

Per quanto riguarda le previsioni di ondate di calore e giorni con elevato stress termico, l'estate 2026 vedrà una collaborazione tra i gruppi previsionali di ARPA FVG e ARSO. In Friuli Venezia Giulia e in Slovenia verrà testata l'applicazione degli stessi indicatori biometeorologici (indice di Thom e UTCI) per stimare i livelli di caldo; i risultati saranno confrontati per valutare possibili miglioramenti dei sistemi di allerta in un'ottica di prevenzione transfrontaliera.

Proseguirà lo studio delle proiezioni climatiche per i periodi 2041-2070 e 2071-2100, confrontando lo scenario senza riduzione delle emissioni di gas serra (RCP8.5) con quello di riduzione intermedia (RCP4.5). Verranno considerati i risultati di più modelli, calcolandone una media (*ensemble*) e le medie trentennali di alcuni indicatori di caldo, con particolare attenzione alle notti tropicali. L'analisi includerà anche modelli con parametrizzazione urbana, che tengono conto dell'effetto delle città sulle temperature, per valutare come l'isola di calore potrebbe evolvere nel futuro.

ARPA FVG E ARSO COLLABORERANNO PER TESTARE L'APPLICAZIONE DEGLI INDICATORI BIOMETEOROLOGICI E PROSEGUIRÀ LO STUDIO DELLE PROIEZIONI CLIMATICHE

GLI STRUMENTI DI MONITORAGGIO A CONFRONTO

	SATELLITE	STAZIONE METEOROLOGICA	SENSORI MOBILI	TERMOCAMERE
Dove misura	Aree ampie	In punti fissi	Lungo strade e percorsi	Aree ridotte
Quando misura	Con frequenza fissa, che dipende dal satellite	In modo continuo	Solo durante le campagne di misura	Solo durante le campagne di misura
Cosa misura	Temperatura delle superfici (suolo, tetti, vegetazione)	Temperatura dell'aria a circa 2 metri da terra	Temperatura dell'aria a circa 2 metri da terra	Temperatura delle superfici (suolo, pareti)
Punti di forza	Ampie aree, buona risoluzione	Dati continui	Alto dettaglio locale	Alto dettaglio locale
Limiti	Non continua nel tempo, non misura la temperatura dell'aria	Copertura spaziale limitata	Dati limitati nel tempo e nello spazio	Dati limitati nel tempo e nello spazio, non misura la temperatura dell'aria

COME VERRANNO UTILIZZATI QUESTI RISULTATI

Le attività del primo modulo di lavoro (“Sfide climatiche e scenari futuri”) permetteranno di definire un quadro completo delle condizioni termiche e climatiche dell’area di studio e costituiranno la base per le attività degli altri moduli di lavoro (piano e azioni pilota per l’adattamento transfrontaliero).

I risultati forniranno informazioni sul pericolo legato al caldo e alle ondate di calore, che saranno integrate con l’identificazione delle aree più vulnerabili per l’elaborazione di una mappa del rischio. Tali analisi contribuiranno alla selezione delle soluzioni di adattamento più efficaci per le città di Gorizia e Nova Gorica, attingendo alla biblioteca digitale delle buone pratiche in fase di sviluppo da parte del terzo gruppo di lavoro. Saranno inoltre alla base delle attività di divulgazione, per informare e sensibilizzare cittadini e tecnici su queste tematiche.

UN PROCESSO PARTECIPATO

Il coinvolgimento di cittadini, professionisti, agenzie ed enti dei settori interessati rappresenta un valore aggiunto per il progetto. È importante per individuare in modo condiviso le aree più vulnerabili e le principali criticità del territorio, e per selezionare le soluzioni di adattamento più efficaci e applicabili, in linea con le esigenze locali. Inoltre, contribuisce alla diffusione dei risultati del progetto e alla sensibilizzazione sul tema delle isole di calore urbane e dei cambiamenti climatici.

**IL PROGETTO
COINVOLGE
CITTADINI,
PROFESSIONISTI,
AGENZIE ED ENTI
PER INDIVIDUARE
IN MODO
CONDIVISO
LE PRINCIPALI
CRITICITÀ E
SELEZIONARE
LE SOLUZIONI DI
ADATTAMENTO
PIÙ EFFICACI**

Ad aprile 2026 si sono tenuti, presso il Comune di Gorizia, due incontri: il primo dedicato ai tecnici comunali, il secondo rivolto a enti e associazioni attivi sul territorio. Sono inoltre previsti ulteriori eventi per presentare i risultati del progetto.

Per rimanere aggiornati sul progetto è possibile consultare le pagine dedicate al progetto sul sito di ARPA FVG <https://www.ARPA.fvg.it/temi/progetti/progetti-europei/heatisland-adapt/> e sul sito dei progetti Interreg Italia-Slovenija <https://www.ita-slo.eu/en/heatislands-adapt>.

Stefania Catano, Valentina Gallina, Federica Flapp, Furio Pieri
ARPA FVG



Questo articolo è disponibile anche in sloveno:

<https://www.ARPA.fvg.it/temi/progetti/progetti-europei/pubblicazioni/un-anno-di-attivit -del-progetto-transfrontaliero-heatislands-adapt-sulle-isole-di-calore-urbane>





SIMULARE L'ISOLA DI CALORE URBANA PER PROGETTARE EDIFICI TENENDO CONTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

L'effetto "isola di calore urbana" (UHI) aumenta le temperature in città rispetto alla campagna, incidendo su benessere e consumi energetici.

Uno studio su Trieste ha analizzato questo fenomeno unendo i dati meteo in campo libero, attuali e futuri, al software *Urban Weather Generator* per ricavare il microclima cittadino.

I dati mostrano un forte rialzo termico notturno, che peggiorerà in futuro.

Simulando un edificio con un modello biofisico, emerge che la combinazione di UHI e clima futuro accrescerà lo stress termico dei residenti.

L'Isola di calore urbana o *Urban Heat Island* (UHI), è un fenomeno che si verifica nelle zone urbane dove le temperature sono maggiori rispetto alle aree rurali circostanti: questo fenomeno influenza in maniera sostanziale le condizioni di benessere sia nell'ambiente esterno che all'interno degli edifici e altera anche i fabbisogni energetici.

Attualmente i sistemi di monitoraggio e previsione meteorologici permettono l'emissione di allerte per temperature elevate. Tuttavia, è importante anche poter identificare in maniera preventiva le condizioni che possono portare a potenziali situazioni di rischio per poter sviluppare opportune azioni di adattamento che lo riducano. È quindi necessario studiare come il caldo della città influisce sui consumi e sulla temperatura interna degli edifici: questo si ottiene, in termini tecnici, attraverso la combinazione della simulazione dinamica di edificio con modelli numerici capaci di valutare l'isola di calore, come è stato fatto in uno studio per la città di Trieste.

RICAVARE LE CONDIZIONI CLIMATICHE DELL'AREA URBANA CON UNO STRUMENTO MODELLISTICO

IL DATO CLIMATICO EXTRAURBANO NON BASTA: PER UNA PROGETTAZIONE EFFICACE DEGLI EDIFICI BISOGNA CONOSCERE LE CONDIZIONI CLIMATICHE DELL'AREA URBANA

La classica simulazione degli edifici, effettuata dagli esperti in progettazione termotecnica, richiede la conoscenza delle condizioni climatiche esterne: come riferimento si utilizza un “anno tipico” che rappresenta l'andamento medio della località ottenuto partendo da dati misurati in centraline meteorologiche.

Tuttavia, solitamente il dato climatico fa riferimento a dati rilevati all'esterno dei centri urbani e mal si presta a un utilizzo diretto in agglomerati urbani, ove si fa sentire maggiormente l'effetto dell'isola di calore.

L'*Urban Weather Generator* (UWG) – che potremmo tradurre con “generatore di condizioni meteorologiche urbane” – è uno strumento che consente di ricavare le condizioni climatiche all'interno della città utilizzando i dati climatici rilevati da stazioni meteorologiche collocate in un vicino ambito rurale e modificandoli in funzione della struttura dell'area urbana.

Un ulteriore fenomeno che influisce sulle condizioni di vivibilità delle aree urbane è il cambiamento climatico, che porta a un progressivo aumento delle temperature incrementando il disagio e i rischi per le persone.

L'URBAN WEATHER GENERATOR (UWG) RICAVA LE CONDIZIONI CLIMATICHE DELL'AREA URBANA UTILIZZANDO I DATI CLIMATICI RILEVATI DA STAZIONI METEO EXTRAURBANE

DATI SPAZIALI DIGITALI “OPEN” DELLA REGIONE FVG

I dati territoriali digitali utilizzati in questo studio sono disponibili con accesso libero (*open data*) su piattaforme informatiche, infrastrutture e strumenti Web GIS (*Geographic Information System*) implementati e gestiti dalla Regione Friuli Venezia Giulia.

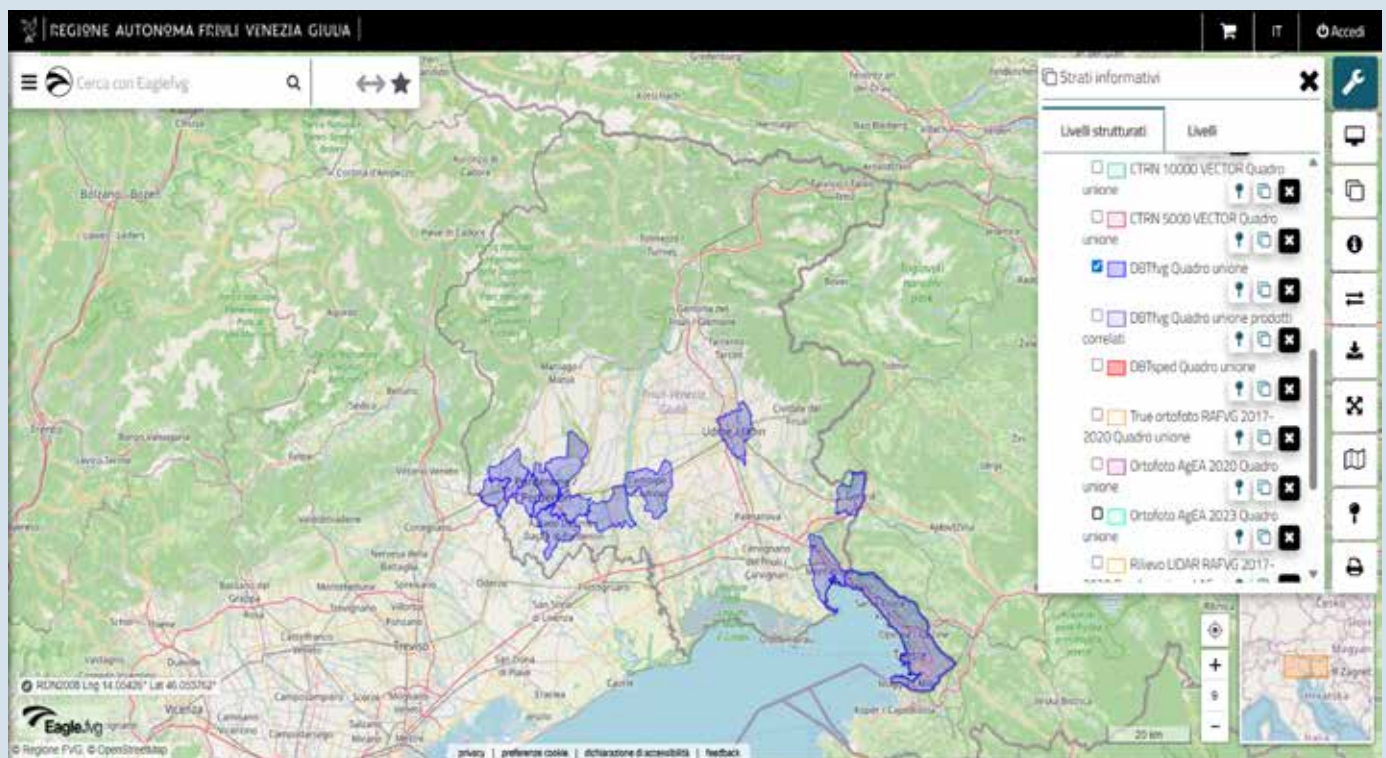
Il Catalogo dei Dati Ambientali e Territoriali

<https://irdat.regione.fvg.it/consultatore-dati-ambientali-territoriali/home?language=it>

nasce dall'esigenza di integrare, attraverso un'unica piattaforma informatica, l'accesso al patrimonio informativo di carattere ambientale e territoriale dell'Amministrazione regionale della Regione Friuli Venezia Giulia e fornisce un servizio a scala regionale, rivolto a tutti i soggetti che operano sul territorio (amministrazioni pubbliche, istituti per la ricerca e la formazione, operatori per i servizi pubblici, professionisti). Il Catalogo offre l'opportunità di pubblicare online anche le informazioni di riferimento (i cosiddetti metadati che contengono informazioni relative ai dati stessi, come il sistema di riferimento, l'ente che li ha prodotti e ne garantisce l'aggiornamento, la tipologia dei dati) relative alle banche dati georeferenziate di carattere ambientale e territoriale di propria competenza. Il termine georeferenziato (o georeferenziazione) indica il processo mediante il quale un elemento informativo o un dato spaziale (come immagini, mappe scansionate o rilievi) viene associato a un sistema di coordinate specifico. Questa operazione attribuisce una posizione univoca e misurabile sulla superficie terrestre, rendendo l'elemento compatibile con altri dati spaziali.

Il Catalogo dei Dati Ambientali e Territoriali fa parte del progetto generale per la realizzazione di un'**Infrastruttura Regionale di Dati Ambientali e Territoriali per il Friuli Venezia Giulia (IRDAT fvg)**, approvato dalla Regione nel 2006, con l'obiettivo di migliorare il livello di diffusione e di condivisione delle conoscenze e delle informazioni di carattere ambientale e territoriale, integrando dati informativi ambientali e territoriali esistenti all'interno dell'Amministrazione regionale con quelli di altri soggetti che operano sul territorio.

PIATTAFORMA WEB GIS EAGLE FVG DELLA REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA



Il motore di ricerca della piattaforma permette di individuare - tra i temi esistenti (dataset) - quelli di proprio interesse per specifiche categorie di dati e ne consente la visualizzazione tramite uno strumento di rappresentazione geografica WebGIS, la piattaforma Eaglefvg.

Il motore di ricerca della piattaforma consente la ricerca e lo scaricamento di numerosi elementi della cartografia numerica della Regione FVG. I dati possono essere scaricati in opportuni formati oppure utilizzati direttamente all'interno dei più diffusi software GIS, come ad esempio il software opensource QGIS, utilizzando un servizio accessibile via web.

Un'ulteriore possibile modalità di visualizzazione e di reperimento delle informazioni è la piattaforma WebGIS Eaglefvg.

La piattaforma Eaglefvg accessibile al link <https://eaglefvg.regione.fvg.it/eagle/main.aspx?configuration=guest>, è la piattaforma WebGIS della regione Friuli Venezia Giulia che permette di reperire, visualizzare e interrogare le informazioni geografiche provenienti da diverse fonti dati georeferenziate.

Eaglefvg utilizza un motore di ricerca e un linguaggio naturale con alto livello di interoperabilità. Il profilo di metadati che descrive i dati territoriali pubblicati attraverso il Catalogo si basa su uno standard, per la costruzione di repertori di dati territoriali con oltre 5000 termini per favorire le ricerche di temi di carattere ambientale.

Tramite il WebGIS Eaglefvg l'utente può selezionare la tipologia di mappa di sfondo per la visualizzazione e gli strati informativi di interesse, selezionando gli strumenti di ricerca e visualizzazione, come presentato nell'immagine, ove sono evidenziati alcuni comuni per i quali è stato implementato il nuovo DBTfvg (Data Base Territoriale della Regione FVG) ad alta risoluzione.

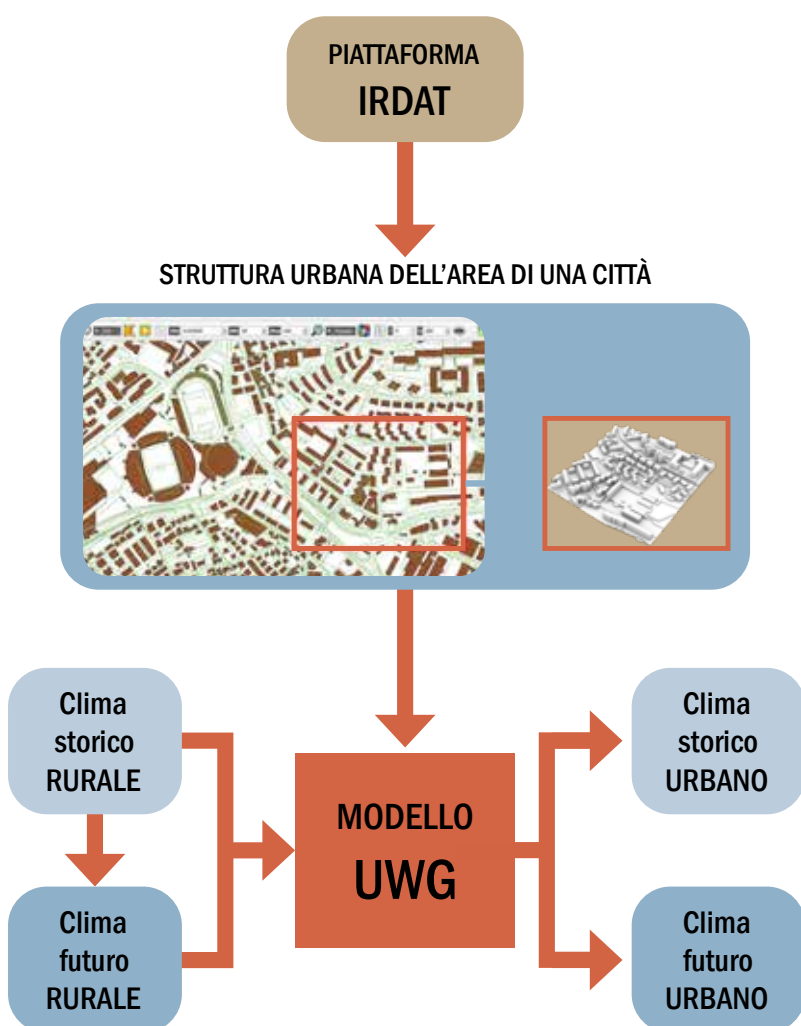
Una volta selezionati i livelli informativi di interesse (ad esempio i fogli della carta numerica in scala 1:5000, o le ortofoto digitali, oppure i modelli tridimensionali DTM a diverse risoluzioni, questi possono essere scaricati e importati all'interno dei software GIS per le successive elaborazioni e analisi spaziali.

DIVERSI DATI E STEP PER UN'ANALISI COMPLESSA

Questi due effetti – isola di calore urbana e cambiamenti climatici - sono stati analizzati su un'area urbana di Trieste seguendo una logica progressiva:



SCHEMA DI LAVORO ADOTTATO



La struttura urbana di un'area della città di Trieste è stata ottenuta dall'analisi cartografica utilizzando la piattaforma Irdat e ottenendo il modello UWG.

I dati climatici orari (temperatura, umidità relativa, radiazione globale, velocità e direzione del vento e radiazione infrarossa) in campo libero sono stati forniti da ARPA FVG e fanno riferimento alla stazione "Molo Bandiera", stazione di riferimento per Trieste.

Accanto ai dati climatici storici sono stati estratti quelli futuri, ottenuti da modelli climatici EURO-CORDEX: questi sono stati sottoposti a un processo di "correzione", confrontandoli con i dati storici del Molo Bandiera, per renderli più aderenti al contesto locale. Questi dati, sia storici che futuri, sono "in campo libero", ossia riferiti a un luogo aperto, pianeggiante e privo di edifici o altri ostacoli vicini. Grazie al software UWG sono stati elaborati quindi i file climatici attuali e futuri per l'ambiente urbano considerato.

I DATI CLIMATICI STORICI E FUTURI DI BASE SI RIFERISCONO A UN LUOGO APERTO SENZA EDIFICI: CON IL SOFTWARE UWG SI OTTIENE IL CLIMA URBANO STORICO E FUTURO



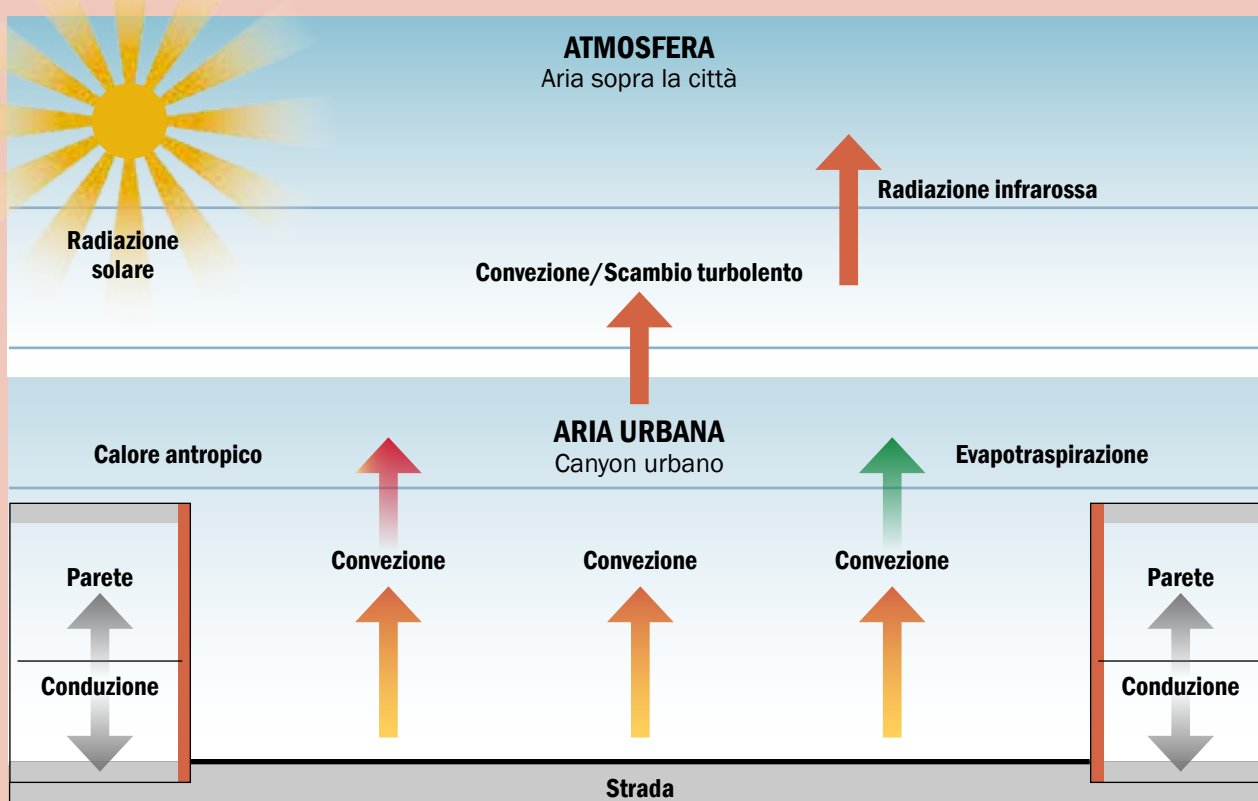
Foto: Scott Webb by Unsplash

URBAN WEATHER GENERATOR (UWG)

UWG è un software che permette di utilizzare i dati climatici registrati in ambiente rurale e modificarli per tener conto degli scambi termici che avvengono in ambiente urbano. La figura rappresenta in maniera semplificata gli scambi termici che vengono considerati in

un canyon urbano influenzato sia dalle condizioni climatiche che dagli scambi termici tra edifici, le diverse superfici e la vegetazione. Le condizioni climatiche, quali umidità e temperatura, che si ottengono sono differenti rispetto a quelle rurali, e maggiormente adatte a rappresentare l'ambiente urbano.

SCAMBI TERMICI NEL MODELLO UWG



DAI DATI L'EVIDENZA DELL'ISOLA DI CALORE URBANA

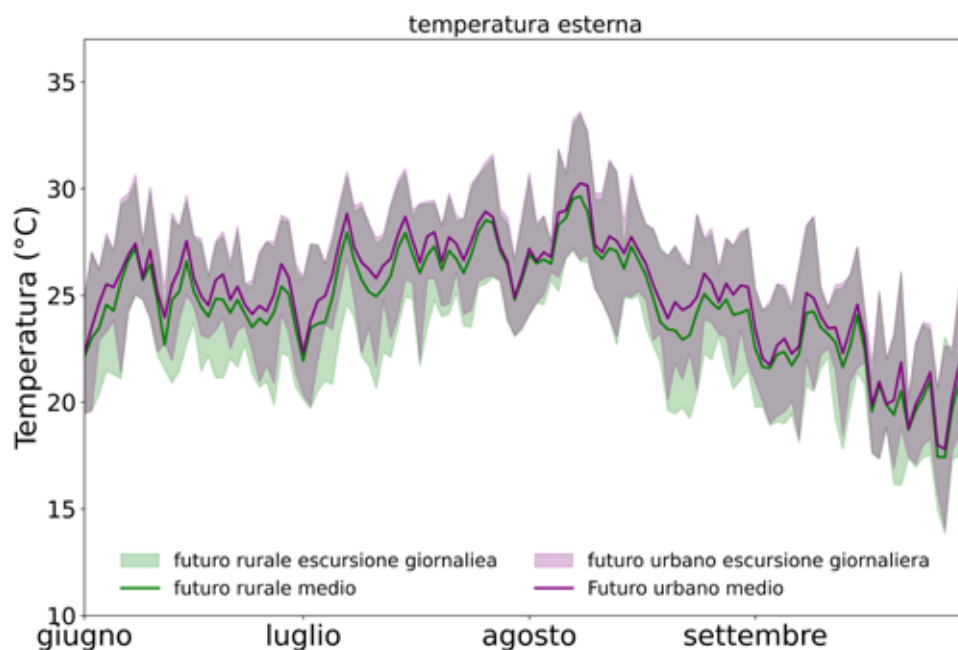
CONFRONTANDO I DATI CLIMATICI RURALI E URBANI SI EVIDENZIA L'EFFETTO ISOLA DI CALORE IN CITTÀ, PIÙ MARCATO DI NOTTE E DESTINATO AD ACCENTUARSI IN FUTURO

I file climatici ottenuti consentono un confronto tra la situazione urbana, con isola di calore, e le misure in campo libero o rurale.

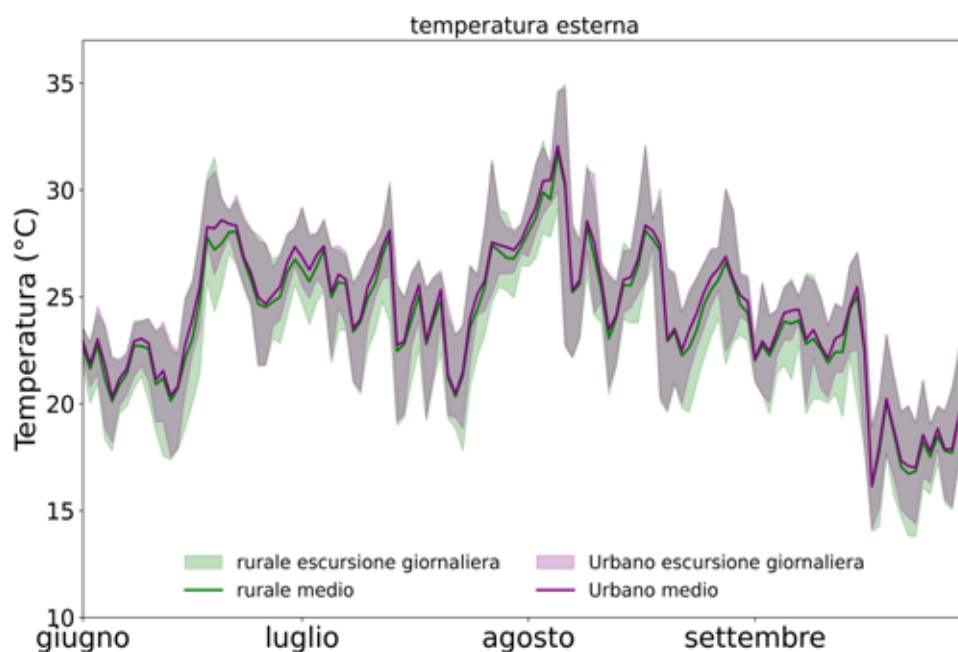
Il primo grafico qui a lato rappresenta il confronto per il periodo estivo dell'andamento della temperatura nelle due aree considerate.

Come si può notare, il valore minore dell'area violacea, rappresentativa dell'andamento urbano, è sensibilmente maggiore rispetto a quello verde relativo alle temperature rurali. Questo effetto è particolarmente importante per il benessere, infatti indica che l'isola di calore urbana influenza maggiormente il periodo notturno con l'innalzamento delle temperature, e questo può limitare l'efficacia della ventilazione che si ottiene tramite l'apertura delle finestre durante la notte. Purtroppo, l'aumento delle temperature si avvertirà ancora maggiormente nel futuro, con temperature ancora più elevate e con maggior differenza tra ambiente urbano e ambiente rurale, come si osserva nel secondo grafico.

EFFETTO DELL'ISOLA DI CALORE URBANA CON DATI CLIMATICI ATTUALI



EFFETTO DELL'ISOLA DI CALORE URBANA IN FUTURO (PERIODO 2040-2060)



La linea continua rappresenta la temperatura media, mentre l'area colorata rappresenta la variazione giornaliera tra la temperatura minima e massima. La linea verde e viola descrivono rispettivamente gli andamenti della temperatura media giornaliera in campo libero e con l'effetto dell'isola di calore; le aree colorate rappresentano l'estensione tra temperatura minima e massima giornaliera.

TMY - TYPICAL METEOROLOGICAL YEAR (ANNO METEOROLOGICO TIPO): I DATI CLIMATICI PER LA SIMULAZIONE DINAMICA ORARIA DEGLI EDIFICI

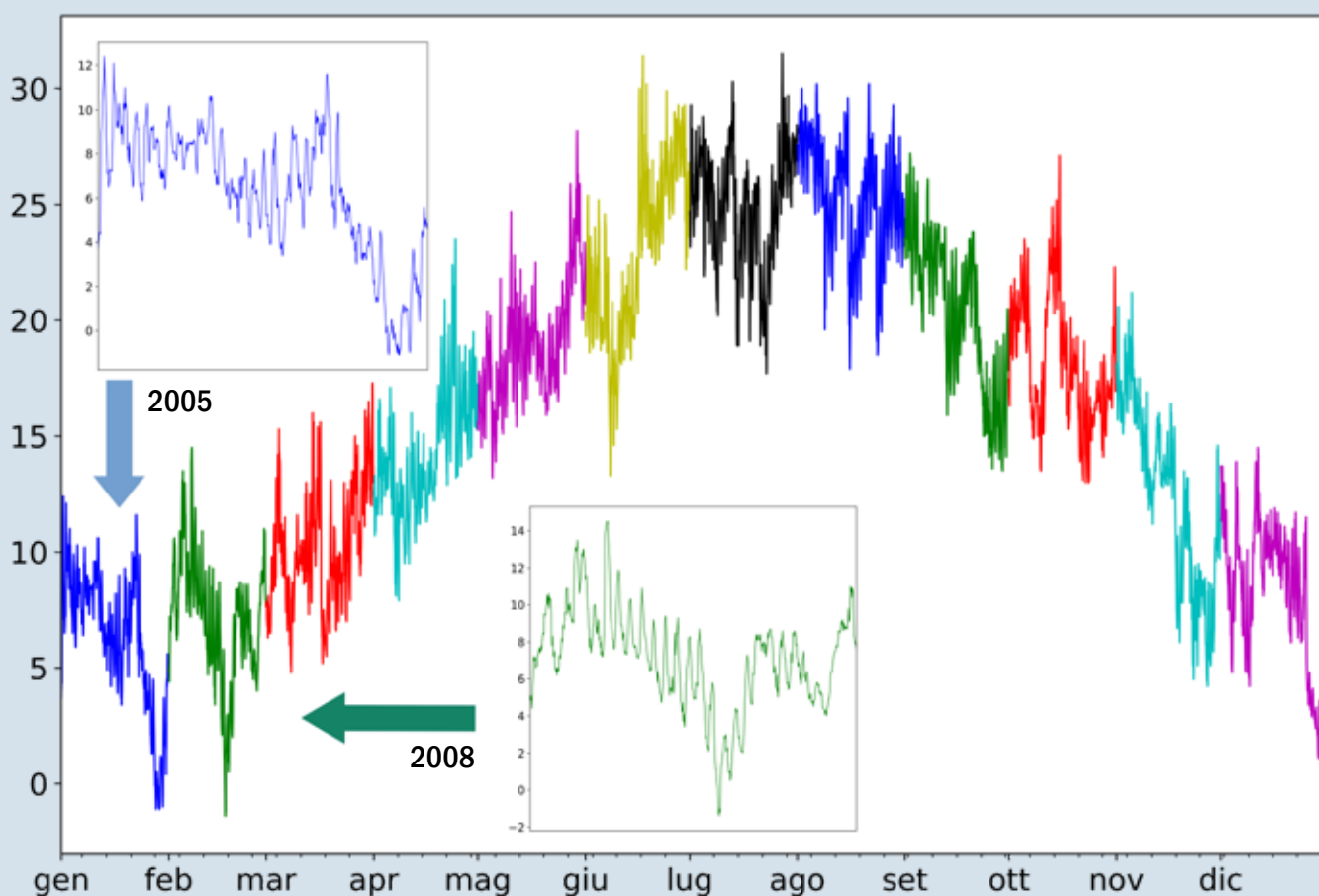
Nelle simulazioni energetiche dinamiche degli edifici è necessario ottenere una serie di dati orari che rappresentino l'andamento delle condizioni relative a diversi anni.

La serie di dati orari è ottenuta scegliendo con una procedura statistica i mesi che più

rappresentano l'andamento medio del clima nel periodo di osservazione storico considerato.

I dati sono quindi ottenuti scegliendo per ogni mese quello più "rappresentativo" del clima relativo alla serie di anni considerati. Collegando i dati climatici di mesi provenienti da anni diversi si ottiene un anno "artificiale" – l'ANNO METEOROLOGICO TIPO - che fornisce le condizioni climatiche da utilizzare nelle simulazioni.

DATO CLIMATICO ANNUALE PER LA TEMPERATURA A TRIESTE



Ogni mese è ottenuto scegliendo quello più rappresentativo dell'andamento medio nel periodo.

In questo caso gennaio è ottenuto dall'anno 2005 mentre febbraio utilizza i dati del 2008

L'EFFETTO DELL'ISOLA DI CALORE SULL'AMBIENTE INTERNO AGLI EDIFICI E SUL BENESSERE, OGGI E DOMANI

CON UN MODELLO BIOFISICO SI È VALUTATO L'EFFETTO DELL'ISOLA DI CALORE E DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO SUL BENESSERE DELLE PERSONE IN UN EDIFICIO RESIDENZIALE

Per valutare l'effetto dell'isola di calore e del cambiamento climatico sul benessere delle persone si è considerato un edificio di edilizia residenziale pubblica. La struttura si sviluppa su cinque piani fuori terra e un piano interrato, con un'elevata trasmittanza termica. Oltre alla scala che collega il piano interrato al quinto piano, il primo piano è suddiviso in due appartamenti e i piani dal secondo al quinto sono suddivisi in quattro appartamenti.

L'analisi è stata effettuata per valutare l'effetto dell'isola di calore sulle condizioni interne e sulle condizioni biofisiche delle persone utilizzando il modello biofisico di Gagge che fornisce, tra gli

altri dati, "w" la percentuale di superficie corporea ricoperta dal sudore, parametro spesso utilizzato per indicare condizione di stress termico quando il valore raggiunge il limite del 70 %. La situazione per l'edificio considerato è riportata nella figura seguente dove sono confrontate le situazioni rurali, urbane con clima attuale e clima futuro riferito al periodo 2040-2060. Appare evidente come l'isola di calore peggiori le condizioni, specialmente in una prospettiva futura. Una possibile mitigazione dello stress termico è rappresentata dall'utilizzo di ventilatori, che riducono il valore di "w". Osservando la figura si nota che, con il clima attuale, la situazione urbana risulta leggermente peggiorativa rispetto alla situazione rurale. Tuttavia, in prospettiva con il clima futuro la situazione va deteriorandosi, con un effetto dell'isola di calore più marcato.

L'EFFETTO ISOLA DI CALORE PEGGIORA GIÀ OGGI LE CONDIZIONI INTERNE ALLE ABITAZIONI E LO STRESS TERMICO DELLE PERSONE, E SI ACCENTUERÀ NEL CLIMA FUTURO

EFFETTO DELL'ISOLA DI CALORE SULLE CONDIZIONI INTERNE AGLI EDIFICI E BIOFISICHE DELLE PERSONE:

PERCENTUALE DI SUPERFICIE DEL CORPO RICOPERTA DAL SUDORE

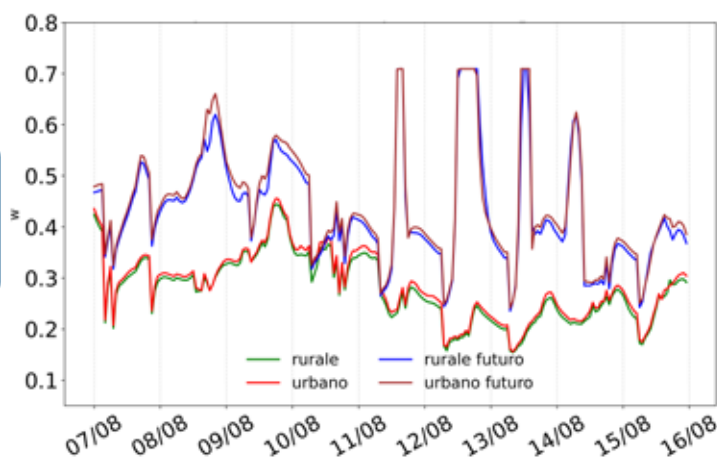
Percentuale di superficie corporea ricoperta dal sudore, che indica la condizione di stress termico quando raggiunge il limite del 70 %.

Ciascun grafico consente il confronto tra clima urbano e clima rurale e, per entrambi, tra clima attuali e clima futuro.

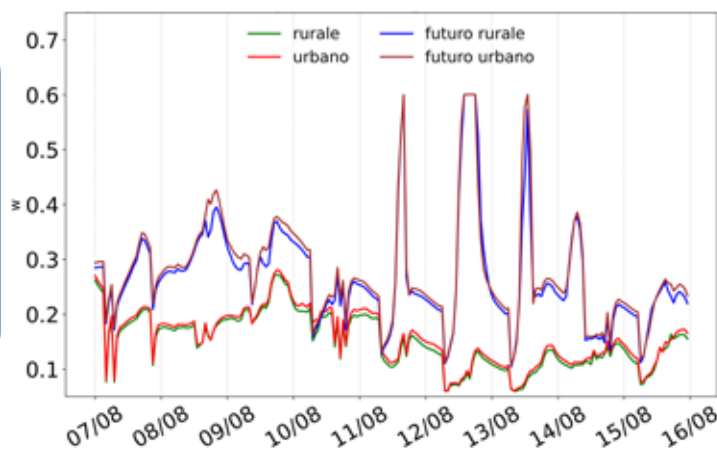
Il raffronto tra i due grafici consente di vedere come la % di superficie corporea coperta da sudore sia più bassa con l'utilizzo del ventilatore.

Studio condotto considerando un edificio residenziale con elevata trasmittanza termica.

Percentuale di superficie bagnata



Percentuale di superficie bagnata con l'utilizzo del ventilatore



CONCLUSIONI

Questo studio mette in evidenza come l'analisi del clima futuro sia ormai un fattore importante per le politiche urbane al fine di prevedere, e se possibile mitigare, situazioni che possono rivelarsi gravose per la salute. Inoltre lo strumento sviluppato può fornire importanti informazioni per intervenire nella salvaguardia di persone fragili che possono essere esposte ai pericoli delle elevate temperature.

**Marco Manzan, Raffaella Cefalo,
Atlas Ramezani**
Università degli Studi di Trieste
Li Quian
Yanshan University,
Qinhuangdao (Cina)







20 ANNI DI *METEO.FVG* *REPORT:* L'INFORMA- ZIONE METEO- CLIMATICA PER I CITTADINI DEL FVG

Dal 2006 l'Osservatorio meteorologico di ARPA FVG pubblica *meteo.FVG Report*, un bollettino mensile che documenta la meteorologia e la variabilità climatica regionale.

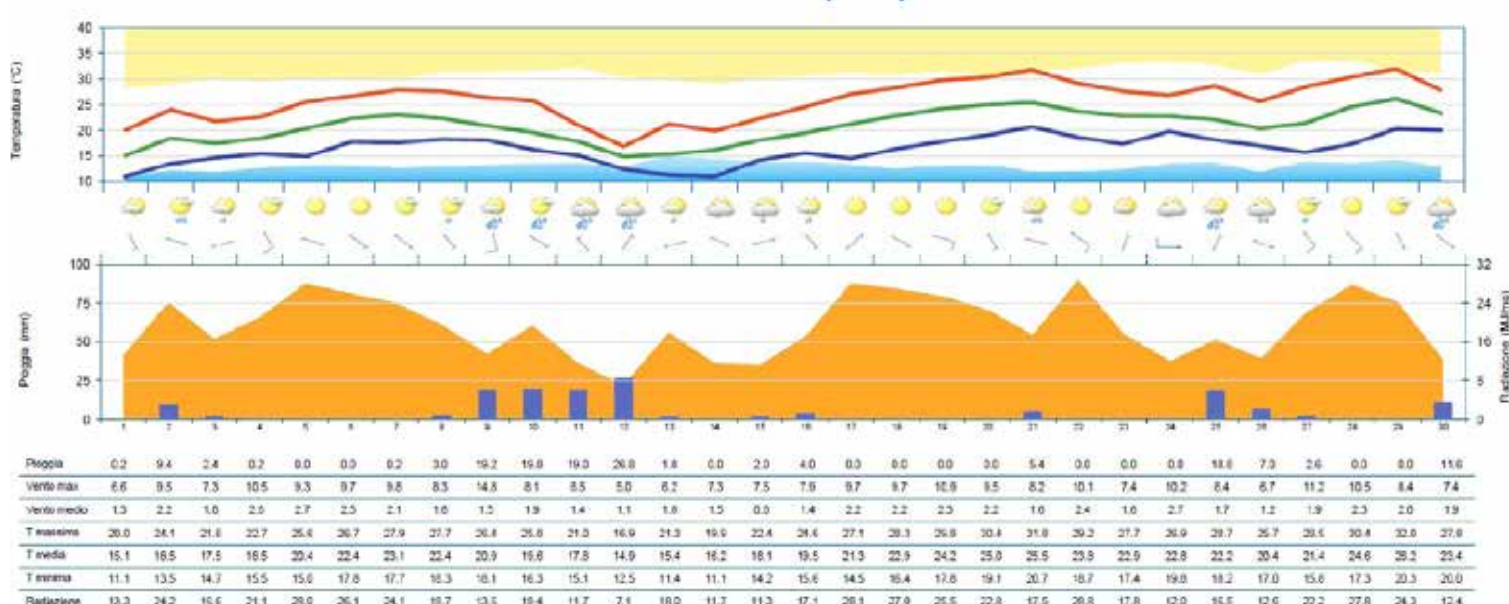
Il report offre un'analisi dettagliata di temperature, precipitazioni ed eventi estremi, combinando rigore scientifico e accessibilità divulgativa, grazie a grafici e tabelle di rapida consultazione.

Con oltre 260 numeri, l'archivio di *meteo.fvg* rappresenta la memoria storica delle condizioni atmosferiche sul FVG: una risorsa preziosa per ricercatori e cittadini.

Quanto ha piovuto nell'ultimo mese, qual è stata la temperatura media, quanto ha nevicato? Da 20 anni le risposte si trovano in *meteo.FVG Report* il bollettino mensile realizzato dall'Osservatorio meteorologico regionale di ARPA FVG.

È dal 2006, infatti, che l'Agenzia regionale per l'ambiente pubblica *meteo.FVG Report* il bollettino mensile che contiene tutte le informazioni del meteo e del clima della regione. Oltre ai 12 report mensili, viene pubblicato anche un tredicesimo numero con la sintesi annuale. In totale, dal primo numero a oggi, sono stati pubblicati più di 260 report: una quantità enorme di informazioni, ben strutturata e organizzata, che rappresenta una fonte di conoscenza essenziale per comprendere il meteo passato.

IL METEOGRAMMA



Esempio di meteogramma

Il meteogramma riassume in quattro distinti pannelli i principali dati meteorologici giornalieri.

Pannello 1 (superiore): è indicata la temperatura (°C) massima, media e minima a 1,8 m; le fasce gialle e blu indicano, rispettivamente, il 90° percentile della temperatura massima degli ultimi 10 anni e il 10° percentile della temperatura minima degli ultimi 10 anni.

Pannello 2: pittogrammi con le condizioni prevalenti del cielo e i fenomeni; le barbe indicano la direzione di provenienza del vento a 10 m e la relativa velocità massima giornaliera (5 m/s trattino corto; 10 m/s trattino lungo; 50 m/s triangolino).

Pannello 3: è indicata la pioggia (istogramma) in mm e la radiazione globale in MJ/m².

Pannello 4 (inferiore): tabella con i dati giornalieri.

DIVERSI LIVELLI DI LETTURA PER DIVERSE ESIGENZE

meteo.FVG Report è uno strumento modulare che consente una lettura a diversi livelli di approfondimento ed è rivolto sia a un pubblico esperto che generico, interessato ad approfondire le conoscenze

**GRAFICI E TABELLE
CONSENTONO
UNA RAPIDA
CONSULTAZIONE
DELLE
INFORMAZIONI SU
PIOGGIA, NEVE,
TEMPERATURA,
VENTO, RADIAZIONE
SOLARE**

sul tempo passato del FVG. Le informazioni sono organizzate per argomento; a prevalere sui testi sono i contenuti grafici o tabellari, che consentono una rapida consultazione delle informazioni “a colpo d’occhio” comparando situazioni e ambienti diversi.

I contenuti di *meteo.FVG Report* sono vari: dalla descrizione degli eventi meteorologici al caso del mese, dalle tabelle ai grafici di pioggia, neve, temperatura, vento, radiazione solare, per arrivare ai meteogrammi, una specie di caleidoscopio con informazioni giornaliere di dettaglio.

L'EVOLUZIONE DI METEO.FVG REPORT

2006



2011



2017



2024

arpa FVG

METEO FVG
REPORT

GIUGNO 2024



I diversi layout della prima pagina:
dal 1/1/2006 ad aprile 2011;
da maggio 2011 a maggio 2017;
da giugno 2017 a dicembre 2023;
da gennaio 2024 a oggi



La vecchia sede dell'OSMER a Visco: il lavoro di squadra dei previsori in sala meteo (2016). Foto: Federica Flapp

COME È NATO *METEO.FVG REPORT*

Visco, aula magna della ex scuola primaria, allora sede dell'Osservatorio meteorologico dell'ARPA FVG. Una grande vetrata con vista giardino, un grande tavolo riunione. È in questo ambiente che nel febbraio del 2006 iniziò a riunirsi un piccolo gruppetto di meteorologi per dare vita a quello che da lì a pochi mesi divenne *meteo.FVG Report*.

In quel momento l'Osservatorio meteorologico regionale di ARPA FVG era già completamente operativo e strutturato da più di un decennio, la rete di stazioni di monitoraggio era già stata completata e produceva un flusso dati stabile, le previsioni meteorologiche venivano fatte giornalmente, le collaborazioni con le regioni e i paesi contermini avviate Mancava però ancora un "qualcosa" che potesse "raccontare" la variabilità del tempo meteorologico del Friuli Venezia Giulia attraverso l'analisi dei "numeri" raccolti dalle stazioni, le mappe dei modelli previsionali, le osservazioni sul campo e non ultima l'esperienza dei previsori.

Come farlo? In partenza le idee erano ancora vaghe. Beh, gli esempi non mancavano, il grande tavolo di lavoro era pieno di riviste, pubblicazioni, report o bollettini editi dai "compagni di viaggio" di altre strutture regionali e statali. Ma si voleva realizzare qualcosa di originale... Iniziò così un lungo periodo di approfondimento, verifica e valutazione. Gli obiettivi erano molteplici: rappresentare la complessità degli eventi meteo in modo essenziale; realizzare un prodotto semplice, di

facile lettura e consultazione, di interesse sia per un pubblico esperto che non, purché interessato ad appassionarsi al complesso mondo della meteorologia e dei suoi fenomeni.

In altre parole ci si chiedeva "Come rappresentare il meteo di un mese senza perdere il dettaglio del singolo giorno?", oppure "Come descrivere il meteo di un anno senza perdere il dettaglio del mese o della singola stagione?"

Attorno a quel tavolo della biblioteca, nel febbraio del 2006, gli incontri del gruppo di lavoro si susseguirono con assiduità crescente a mano a mano che il nuovo rapporto prendeva forma e sostanza... Fu così che nel giugno del 2006 venne pubblicato il primo numero di *meteo.FVG Report*. Con l'uscita del primo numero venne anche presa la decisione di "ricostruire" a posteriori i report dei primi mesi del 2006 consentendo così d'avere intere annualità.

Da allora sono passati 20 anni per un totale di 260 report (ogni anno 13 numeri: 12 mensili e un riepilogo annuale): la veste grafica è stata più volte rinnovata, ma l'impianto originario è rimasto praticamente immutato. Una enorme quantità di informazioni, ben strutturata e organizzata. Una memoria del meteo passato accessibile e leggibile da tutti, in grado di rispondere, quanto meno per le principali località del FVG, alla domanda "com'era il tempo quel giorno?". Ed è facile rispondere, basta prendere il fascicolo di quel mese e con grande facilità si può dire se quel giorno c'era pioggia o vento, caldo o freddo o si è verificato qualche evento particolare.



UN PROGETTO CHE SI È EVOLUTO NEL TEMPO

In origine il progetto *meteo.FVG Report* era ancora più ampio in quanto prevedeva anche la produzione di un bollettino plurilingue: tedesco, friulano e sloveno, oltre all'italiano. Ciò è stato possibile solamente nel periodo da giugno 2006 a maggio 2007 grazie a dei finanziamenti dedicati alla tutela delle minoranze linguistiche storiche (L. 482/99).

LA VESTE GRAFICA È STATA PIÙ VOLTE RINNOVATA, MA GLI OBIETTIVI E L'IMPOSTAZIONE GENERALE DEL REPORT SONO RIMASTI QUELLI ORIGINALI

Nel corso degli anni, la veste grafica del report è stata più volte rinnovata, di pari passo con l'evolversi dell'immagine coordinata e degli stili di comunicazione adottati da ARPA FVG. Anche alcune modalità di rappresentazione dei dati sono state aggiornate, ma gli obiettivi e l'impostazione generale della pubblicazione sono rimasti coerenti con quelli originali.

Dopo 20 anni di pubblicazione *meteo.FVG Report* costituisce ancora un valido strumento di informazione meteo-climatica per la regione Friuli Venezia Giulia. Al pari delle serie storiche di dati, che per alcune località hanno superato i 100 anni, la raccolta dei bollettini *meteo.FVG Report* costituisce un elemento di fondamentale importanza, un lascito alle future generazioni di studiosi e ricercatori, ma anche a tutti coloro che vogliono conoscere il complesso mondo della meteorologia e dei suoi fenomeni.

È possibile consultare l'ultimo numero del bollettino e l'archivio completo in questa pagina

<https://www.ARPA.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/pubblicazioni/report-meteofvg/>

Marco Gani
ARPA FVG

I GHIACCI E LA MONTAGNA

La criosfera sotterranea e il dissesto idrogeologico nei piccoli bacini montani

Le terre alte sono tra gli ambienti più sensibili e reattivi alle sollecitazioni del riscaldamento globale, vere e proprie sentinelle in grado di mostrare in anticipo gli effetti visibili della crisi climatica. Questa sezione esplora la **vulnerabilità del territorio montano del Friuli Venezia Giulia** attraverso due prospettive complementari, mostrando come l'integrazione di diverse tecnologie e il contributo della citizen science siano elementi chiave della ricerca scientifica in FVG.

Il percorso di lettura si snoda tra profondità sotterranee e versanti montani:

- il primo articolo ci porta nel cuore delle grotte regionali, alla scoperta della **criosfera sotterranea**, con il progetto CryoKarst. Viene presentato un protocollo innovativo per monitorare i ghiacci sotterranei attraverso rilievi 3D ad alta risoluzione, unendo la ricerca d'avanguardia alla citizen science grazie al coinvolgimento attivo degli speleologi.
- Il secondo contributo sposta lo sguardo in superficie, **sui piccoli bacini montani** esposti a piogge intense e localizzate che generano fenomeni di dissesto idrogeologico rapidi e improvvisi. Qui si spiega come il telerilevamento tramite droni e laser permetta di mappare i fenomeni erosivi in zone inaccessibili, creando "gemelli digitali" (Digital Twins) del territorio per pianificare opere di difesa mirate.

Due contributi che dimostrano come l'innovazione tecnologica e il monitoraggio costante siano oggi gli strumenti indispensabili per leggere le trasformazioni della montagna e difenderne la stabilità.



LA CRIOSFERA SOTTERRANEA, NICCHIA DI STUDIO E SENTINELLA DEL CLIMA CHE CAMBIA

Con il progetto CryoKarst, nato dalla collaborazione tra Regione FVG e CNR-ISP, è stato definito il primo protocollo di rilevamento del ghiaccio di grotta: fondato su tecniche di rilievo innovative e su un approccio multidisciplinare, è applicabile dalla comunità speleologica in un'ottica di *citizen science*.

Grazie a CryoKarst è stato aggiornato il Catasto Speleologico Regionale e sono stati sperimentati rilievi 3D ad alta risoluzione per monitorare nel tempo la risposta del ghiaccio sotterraneo ai cambiamenti climatici.

La criosfera sotterranea, cioè l'insieme di depositi di neve, *firn* (neve parzialmente compattata e ricristallizzata) e ghiaccio presenti in cavità naturali come grotte e condotti lavici, costituisce una forma locale di permafrost riconosciuta a livello internazionale.

Il permafrost è definito come qualsiasi materiale con temperatura inferiore a 0°C per almeno due anni consecutivi, indipendentemente dal contenuto effettivo di ghiaccio. A seconda della sua estensione territoriale, viene classificato come continuo, discontinuo o sporadico.

La presenza di ghiaccio all'interno delle grotte rappresenta quindi un importante indicatore climatico, capace di testimoniare le relazioni tra microclima ipogeo e variazioni termiche esterne, in particolare di medio-lungo periodo.

IL GHIACCIO DI CAVITÀ NELLE NOSTRE AREE CARSICHE

Nelle aree carsiche al di fuori delle regioni polari, la formazione del ghiaccio di cavità non è generalmente legata alla presenza di permafrost diffuso e continuo, ma dipende essenzialmente dalle condizioni termiche locali della roccia, dalla morfologia dei condotti e dalla circolazione dell'aria, che possono generare localmente delle sacche di permafrost sporadico. Ciò nonostante, anche in presenza di permafrost continuo montano si possono rinvenire depositi di ghiaccio ipogeo.

GHIACCIO PERENNE E GHIACCIO EFFIMERO

IL GHIACCIO PERENNE, DI ALMENO 2 ANNI, APPARE MASSIVO E STRATIFICATO E INCLUDE BOLLE D'ARIA E IMPURITÀ. QUELLO EFFIMERO È PIÙ TRASPARENTE

È utile distinguere tra ghiaccio perenne, che persiste per almeno due anni e può essere considerato una forma di permafrost, e ghiaccio effimero, di durata stagionale o interannuale. Il termine "ghiaccio fossile", spesso usato in ambito speleologico, non trova invece riscontro nella letteratura scientifica.

Il ghiaccio perenne può originarsi secondo quattro principali processi:

- congelamento dell'acqua di percolazione
- trasformazione metamorfica della neve (simile a quanto avviene nei ghiacciai)
- accumulo e successiva sedimentazione
- sublimazione diretta.

Visivamente, il ghiaccio perenne appare massivo e stratificato, con bolle d'aria e inclusioni di impurità disposte in livelli sub-orizzontali. Al contrario, i depositi effimeri si riconoscono per la loro trasparenza e spesso per le tipiche strutture esagonali superficiali se il ghiaccio si rinviene sulle pareti. Esempi di queste formazioni sono le stalattiti e stalagmiti di ghiaccio o le sottili coltri stagionali che si formano agli ingressi delle grotte carsiche, come quelle rinvenibile anche in cavità di bassa quota del Carso triestino.

Il progetto CryoKarst si è concentrato in particolare sullo studio dei depositi di ghiaccio perenne, elaborando un protocollo operativo dedicato alla loro caratterizzazione.

IL PROGETTO CRYOKARST FVG

Il progetto "CryoKarst FVG (*Cryosphere in the Karstic Environments of Friuli Venezia Giulia*)" rappresenta una delle prime iniziative italiane dedicate allo studio sistematico della criosfera ipogea nelle aree carsiche. Avviato grazie alla collaborazione tra la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia e il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) attraverso l'Istituto di Scienze Polari (ISP-CNR), CryoKarst FVG ha avuto come obiettivo lo sviluppo di metodologie moderne per l'analisi, la documentazione e la tutela dei depositi di ghiaccio, *firn* e neve permanenti presenti nelle cavità della regione.

Il progetto ha portato alla definizione di un protocollo di rilevamento specifico, fondato su tecniche di rilievo innovative e su un approccio multidisciplinare che integra conoscenze di glaciologia, geomorfologia carsica e glaciale, fotogrammetria, Lidar, sistemi informativi geografici.

OBIETTIVI E COLLABORAZIONI

LA SINERGIA TRA DIVERSI ENTI HA PERMESSO DI UNIRE COMPETENZE SCIENTIFICHE, TECNICHE E DIVULGATIVE PER RAGGIUNGERE DIVERSI OBIETTIVI

CryoKarst FVG è stato realizzato grazie a una rete di collaborazioni che ha coinvolto diversi enti e istituzioni: la Società Meteorologica Alpino-Adriatica, il Parco Naturale delle Prealpi Giulie, il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università di Trieste e la società Divulgando s.r.l.

Questa sinergia ha permesso di unire competenze scientifiche, tecniche e divulgative, ponendo le basi per un lavoro di ampio respiro. Gli obiettivi principali comprendevano l'aggiornamento del Catasto Speleologico Regionale (CSR), l'introduzione di nuove tecniche di rilievo 3D, la definizione di un protocollo operativo standard, la formazione di speleologi locali e il monitoraggio delle interazioni clima-criosfera in cavità selezionate.

CRYOKARST FVG È UNA DELLE PRIME INIZIATIVE ITALIANE DEDICATE ALLO STUDIO SISTEMATICO DELLA CRIOSFERA IPOGEA NELLE AREE CARSICHE

LA REVISIONE DEL CATASTO SPELEOLOGICO REGIONALE (CSR)

Uno dei traguardi principali del progetto è stato l'aggiornamento del Catasto Speleologico Regionale, la banca dati che raccoglie le informazioni sulle cavità sotterranee del Friuli Venezia Giulia.

Prima di CryoKarst, le informazioni sulla criosfera ipogea erano frammentarie e non omogenee. La revisione è avvenuta in tre fasi.

**IL CATASTO
SPELEOLOGICO
REGIONALE È
STATO AGGIORNATO
CON I DATI SULLA
CRIOSFERA E CON
UN SISTEMA CHE
CONSENTE AGLI
SPELEOLOGI DI
CONTRIBUIRE
DIRETTAMENTE**

- La **fase esplorativa** per l'individuazione delle 177 grotte con ghiaccio e delle 666 con depositi di neve; 85 di queste sono state selezionate per lo studio approfondito dei depositi perenni, localizzate nei gruppi del Canin, dei Musi, di Piancavallo e del Resettum.
- Lo **sviluppo del database e interfaccia utente** sono state realizzate in collaborazione con Divulgando s.r.l.: il CSR è stato così ampliato per accogliere dati su ghiaccio, neve e *firn*, introducendo anche un sistema partecipativo di Citizen Science che consente agli speleologi di contribuire direttamente agli aggiornamenti.
- La **revisione finale** ha visto l'aggiornamento e validazione delle schede delle cavità nella nuova piattaforma digitale.



TECNICHE INNOVATIVE DI RILIEVO: SfM-MVS PER ELABORARE MODELLI 3D

Un'altra componente fondamentale del progetto è stata la sperimentazione di rilievi tridimensionali ad alta risoluzione per il monitoraggio del ghiaccio sotterraneo nel tempo. Tra le metodologie impiegate spicca la *Structure from Motion - Multi View Stereo* (SfM-MVS), che consente di ricostruire modelli 3D da serie fotografiche scattate da diverse posizioni.

**UN METODO,
ECONOMICO
E FACILMENTE
APPLICABILE IN
AMBIENTI REMOTI,
PER EFFETTUARE
RILIEVI
TRIDIMENSIONALI
AD ALTA RISOLUZIONE**

Il metodo, economico e facilmente applicabile in ambienti remoti, si basa sull'uso di fotocamere digitali e illuminazione artificiale. L'elaborazione dei dati richiede tuttavia risorse computazionali significative per ottenere modelli accurati.

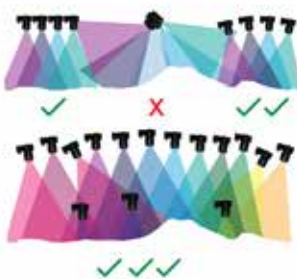
Durante le campagne 2022-2023 nel massiccio del Monte Canin, sono stati realizzati rilievi con tecniche SfM-MVS e LiDAR (*Light Detection and Ranging*) terrestre, che rimane sicuramente lo strumento più raffinato e di dettaglio per rilievi topografici tridimensionali, confrontando i risultati per valutare le differenze di dettaglio e precisione.

STRUCTURE FROM MOTION - MULTI VIEW STEREO (SfM-MVS)

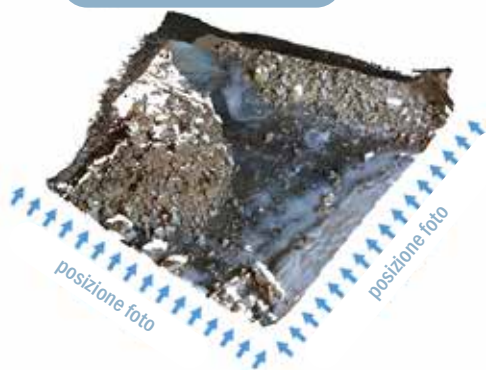
a) esempio di acquisizione



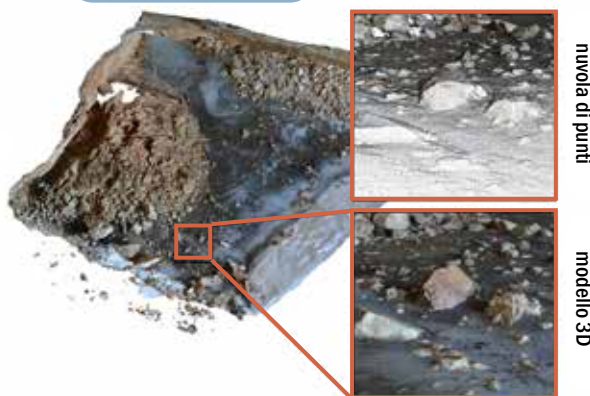
b) geometria di acquisizione



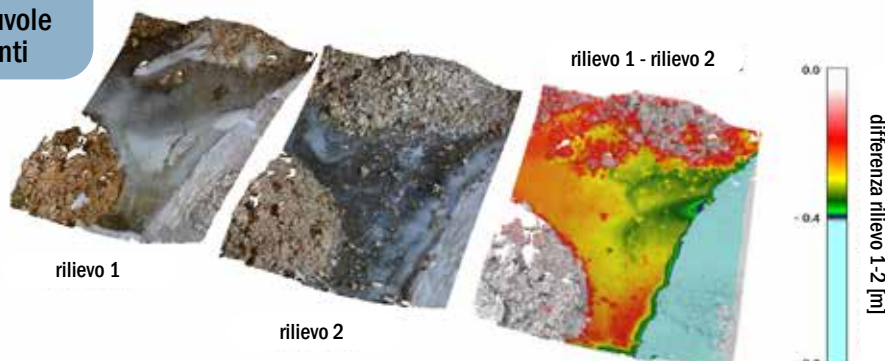
c) nuvola di punti



d) modello 3D



e) confronto fra nuvole di punti



a) Esempio di acquisizione *Structure from Motion* (SfM); b) geometria di acquisizione ideale. La fase di *processing* è costituita da: c) composizione della nuvola di punti; d) ricostruzione di un modello 3D della cavità; e) confronto tra nuvole di punti: differenze topografiche in millimetri di acqua equivalente calcolate a partire da due rilievi.



Foto: Renato R. Colucci

IL PROTOCOLLO DI RILEVAMENTO PER LA COMUNITÀ SPELEOLOGICA

Per rendere omogenei i rilievi e facilitarne la replicabilità, il team CryoKarst ha sviluppato un protocollo dedicato destinato alla comunità speleologica. Il documento fornisce istruzioni pratiche per la raccolta dei dati, linee guida per la caratterizzazione dei depositi e indicazioni sull'inserimento dei risultati nel CSR.

Il protocollo è stato pensato per essere utilizzabile con strumenti comuni quali fotocamere, distanziometri laser, app per smartphone e per promuovere la partecipazione diretta degli speleologi in un'ottica di *Citizen Science*. Accanto al protocollo è stato redatto anche un manuale di campagna in formato ridotto, utile per le attività sul campo. La struttura del protocollo comprende un'introduzione alle metodologie di rilevamento, istruzioni su come raccogliere dati nei siti glaciali sotterranei, linee guida per l'inserimento dei dati nel CSR e qualche informazione sulle tecniche di rilievo 3D con la *Structure from Motion*.

**UN PROTOCOLLO
UTILIZZABILE
CON STRUMENTI
COMUNI, PER
PROMUOVERE LA
PARTECIPAZIONE
DIRETTA DEGLI
SPELEOLOGI IN
UN'OTTICA DI
CITIZEN SCIENCE**

Il successo del progetto è dipeso in gran parte dal coinvolgimento attivo dei gruppi speleologici regionali.

Nel marzo 2023 si sono svolti due corsi formativi, a Trieste e Udine, con oltre 60 partecipanti, dedicati all'uso della nuova interfaccia CSR e al protocollo di rilevamento. Nel gennaio 2024, presso il Villaggio del Pescatore (Duino-Aurisina), si è tenuto un ulteriore incontro rivolto agli speleologi esperti in fotografia ipogea, focalizzato sulle tecniche 3D e sull'applicazione della SfM-MVS.

**CORSI FORMATIVI
SULLA NUOVA
INTERFACCIA
DEL CATASTO
SPELEOLOGICO,
SUL PROTOCOLLO
E SULLE NUOVE
TECNICHE PER I
RILIEVI**

**SONO STATE
STUDIATE LE
RELAZIONI FRA
LE TEMPERATURE
ESTERNE E IL
GHIACCIO IN GROTTA,
PER COMPRENDERE
COME ESSO STIA
RISPONDENDO
AI CAMBIAMENTI
CLIMATICI**

IL MONITORAGGIO CLIMA-CRIOSFERA

Una sezione del progetto ha affrontato lo studio delle relazioni tra clima e criosfera sotterranea, analizzando l'evoluzione del bilancio di massa dei depositi di ghiaccio in diverse grotte del Canin e confrontando i dati con le misure microclimatiche interne.

GHIACCIO DELLA PICCOLA ETÀ GLACIALE IN UNA GROTTA DEL CANIN

Uno studio internazionale pubblicato sulla rivista *Journal of Glaciology* (Cambridge University Press) ha da poco rivelato l'origine recente di un deposito di ghiaccio sotterraneo nel massiccio del Canin grazie a una nuova tecnica di datazione.

I depositi di ghiaccio sotterraneo rappresentano archivi naturali preziosi delle condizioni climatiche del passato. Tuttavia, per poter interpretare questi archivi è fondamentale disporre di una cronologia affidabile. Nel nuovo studio, i ricercatori hanno applicato per la prima volta a un ghiaccio di grotta la tecnica di datazione con argon-39, basata sull'*Argon Trap Trace Analysis*, sviluppata presso l'Università di Heidelberg in Germania.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con altri indicatori indipendenti quali l'analisi dei pollini intrappolati nel ghiaccio, la datazione U-Th (Uranio-Torio) di calcite criogenica presente nel deposito e la datazione radiocarbonica (^{14}C) della frazione organica insolubile contenuta nel ghiaccio.

Questo approccio multiproxy ha permesso di ricostruire con buona precisione l'età del deposito.

Le analisi indicano che il ghiaccio si è formato verosimilmente tra la metà del XIX secolo e l'inizio del XX secolo, cioè alla fine della Piccola Età Glaciale, una fase più fredda dell'Olocene che ha caratterizzato il clima europeo tra il 1260 e la metà dell'Ottocento.

Secondo i ricercatori, il risultato è legato all'evoluzione del permafrost nelle rocce del massiccio del Canin. Durante la fase più fredda della Piccola Età Glaciale, la roccia del sistema carsico era probabilmente perennemente congelata, impedendo la circolazione dell'acqua all'interno delle fratture e inibendo quindi lo stillicidio. Solo con l'inizio di un parziale scongelamento del permafrost la roccia ha iniziato a permettere la percolazione dell'acqua, che in un ambiente ancora freddo ha poi formato il deposito di ghiaccio

nella grotta. Oggi questo ghiaccio sotterraneo sta rapidamente scomparendo a causa del riscaldamento climatico. La perdita di questi depositi non rappresenta solo un fenomeno locale: significa anche la scomparsa di archivi paleoambientali unici, capaci di conservare informazioni sulle condizioni climatiche del passato.

La fusione del ghiaccio sotterraneo potrebbe inoltre avere implicazioni per la circolazione dell'acqua nei sistemi carsici alpini, con possibili effetti sulla disponibilità futura delle risorse idriche sotterranee.

La ricerca è stata realizzata nell'ambito del progetto C3 – *Caves, Cryosphere and Climate*, finanziato dalla Società Alpina delle Giulie - Sezione di Trieste del Club Alpino Italiano attraverso il proprio gruppo speleologico, la Commissione Grotte Eugenio Boegan, dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, dalla *Austrian Science Foundation*, dalla *German Science Foundation* e dalla Società Meteorologica Alpino-Adriatica.

Il progetto ha coinvolto numerosi istituti di ricerca internazionali, tra cui: *Heidelberg University* (Germania), *Paul Scherrer Institute* (Svizzera), *University of Innsbruck* (Austria), *Swiss Institute for Speleology and Karst Studies*, *Oeschger Centre for Climate Change Research*, *University of Bern*, l'Istituto di Scienze Polari del CNR, *Geosphere Austria*.

Il monitoraggio ha interessato anche cavità a cielo aperto, i cosiddetti “pozzi a neve” o *Schachtdolinen*, piccole depressioni verticali che presentano un’area pianeggiante al centro con accumuli di neve residua. Anche queste forme glacio-carsiche rappresentano ambienti chiave per comprendere come il ghiaccio ipogeo reagisca ai cambiamenti climatici. Lo studio di questi ambienti particolari e delle interazioni fra il ghiaccio in grotta e le temperature esterne sono fondamentali per comprendere come la criosfera sotterranea stia rispondendo all’evoluzione attuale del clima. Fino a ora la letteratura si è infatti principalmente concentrata sugli aspetti geomorfologici e geologici per quanto riguarda pozzi e doline, senza interessarsi della loro eventuale valenza glaciologica.

**I DEPOSITI NIVO-
GLACIALI NELLE
DEPRESSIONI
GLACIO-
CARSICHE
O “POZZI A
NEVE” HANNO
DIMOSTRATO
UNA CERTA
RESILIENZA FINO
AL 2018**

Grazie a rilievi LiDAR condotti tra il 2006 e il 2018 in 75 siti del massiccio del Canin (45 in Italia e 35 in Slovenia), è stato possibile quantificare le variazioni volumetriche di neve e ghiaccio, confrontandole con quelle osservate nei corpi glaciali esterni.

I risultati hanno evidenziato un’elevata variabilità tra i siti, ma nel complesso confermato, per il periodo in oggetto, incrementi di spessore coerenti con i trend positivi osservati sui corpi glaciali della zona. La loro persistenza, anche in una delle fasi più calde dell’Olocene, indica una notevole resilienza dei depositi nivoglaciali nelle depressioni glaciocarsiche, favorita dai particolari processi di accumulo e conservazione della neve e del ghiaccio in questi siti.

Ulteriori informazioni, il Protocollo e il Manuale di rilevamento dei depositi di ghiaccio e neve in grotta sono disponibili nella pagina web del Catasto Speleologico Regionale dedicata al progetto CryoKarst:

https://catastogrotte.regione.fvg.it/pagina/147/Progetto_CryoKarst

Renato R. Colucci
CNR – ISP







PICCOLI BACINI MONTANI, GRANDI FENOMENI DI DISSESTO: COME LA TECNOLOGIA AIUTA A LEGGERE GLI EFFETTI DEL CLIMA CHE CAMBIA

I piccoli bacini montani – vere sentinelle dei cambiamenti climatici – sono i più vulnerabili a piogge intense e localizzate, che generano fenomeni erosivi rapidi e imprevedibili, rendendo necessari monitoraggi tempestivi e frequenti. Il telerilevamento (con droni, sensori laser ecc.) consente di mappare i dissesti in zone poco accessibili, identificando le aree di erosione e deposito e creando “*Digital Twins*” del territorio che supportano la prioritizzazione, valutazione e progettazione delle opere di difesa.

Date le dimensioni e le caratteristiche morfologiche, i piccoli bacini montani risentono maggiormente delle precipitazioni intense e localizzate, che possono essere favorite, oggi e ancor più in futuro, dal cambiamento climatico. In questo contesto, gli intensi e frequenti eventi meteorici generano processi idro-erosivi molto rapidi e imprevedibili, caratterizzati da un'elevata connessione tra le aree sorgenti di sedimento, localizzate solitamente alla testata dei bacini e lungo i versanti, e la rete idrografica (figura nella pagina seguente). In questo modo si generano importanti fenomeni di trasporto solido torrentizio come correnti iper-concentrate e colate detritiche. La dinamica di questi processi è ormai talmente frequente e rapida che è necessario utilizzare tecniche di monitoraggio innovative e accessibili per riuscire a seguire i fenomeni al fine di attuare strategie di prevenzione correlate al rischio idro-geologico.

VERSANTI IN DISSESTO



Esempi di versanti in dissesto, caratterizzati da un'elevata connessione tra le aree sorgenti di sedimento e la rete idrografica: a) torrente Susaibes (Andreis); b) testata del Turriea (Paularo); c) torrente Moscardo (Paluzza); d) torrente Turriea (Paularo).

LE NUOVE TECNOLOGIE CHE AIUTANO A MONITORARE I FENOMENI DI DISSESTO: IL TELERILEVAMENTO

PER MONITORARE I PROCESSI IDRO-EROSIVI SERVONO RILIEVI SEMPRE PIÙ FREQUENTI, MA ANCHE ACCURATI E AD ALTA RISOLUZIONE

Per monitorare la dinamica dei processi idro-erosivi in ambiente montano è ormai necessario adottare tecniche e strumenti che permettono di eseguire rilievi sempre più frequenti, a basso costo, ma anche accurati e ad alta risoluzione, al fine di seguire e conoscere nel dettaglio l'evoluzione dei processi e migliorarne la prevenzione.

Il telerilevamento, o *Remote Sensing*, rappresenta un insieme di tecniche che consentono

di ottenere informazioni topografiche ad alta precisione sull'ambiente circostante in tempi rapidi, a distanza e senza contatto diretto, ripetute nel

tempo e con elevata copertura spaziale. Sfruttando piattaforme di acquisizione satellitari, aeree e, soprattutto, droni, che montano sensori come laser scanner, camere fotogrammetriche e multispettrali, il Remote Sensing sta rivoluzionando il modo in cui osserviamo e monitoriamo i fenomeni di dissesto in un ambiente montano, prima difficilmente accessibile. I dati topografici vengono acquisiti mediante rilievi ripetuti nel tempo, impiegando i droni di ultima generazione anche dopo ogni evento di piena. Nelle zone soggette a fenomeni di dissesto questo permette di ricavare continue e tempestive informazioni sui cambiamenti morfologici in atto e sui volumi di sedimento movimentati.

IL TELERILEVAMENTO STA RIVOLUZIONANDO I MONITORAGGI IN AMBIENTE MONTANO: SENSORI AVANZATI MONTATI SU DRONI FORNISCONO DATI TEMPESTIVI DOPO OGNI EVENTO DI PIENA

CHE COS'È UN PICCOLO BACINO IDROGRAFICO MONTANO?

Un piccolo bacino idrografico è una porzione limitata di territorio (indicativamente fino a 10 km²) dalla quale le acque di pioggia (o di fusione della neve) si raccolgono in uno stesso corso d'acqua. I piccoli bacini montani sono zone caratterizzati da versanti con pendenze elevate, in cui la morfologia e la gravità determinano risposte molto rapide alle piogge in-

tense, tali da innescare processi naturali con elevata magnitudo. Sulla base delle caratteristiche topografiche e morfologiche è possibile determinare il "tempo di risposta" di ciascun bacino, cioè il tempo che intercorre tra l'evento di precipitazione e il momento in cui si verifica la portata massima. Nei piccoli bacini montani i tempi di risposta sono molto brevi, da pochi minuti a un'ora; invece, nei grandi bacini aumentano fino all'ordine di grandezza di più giorni, ad esempio il tempo di risposta del Tagliamento si stima in 18-24 ore.



ESEMPI DI PIATTAFORME DI ACQUISIZIONE SATELLITARI, AEREE E DRONI PER IL MONITORAGGIO DI UN PICCOLO BACINO MONTANO

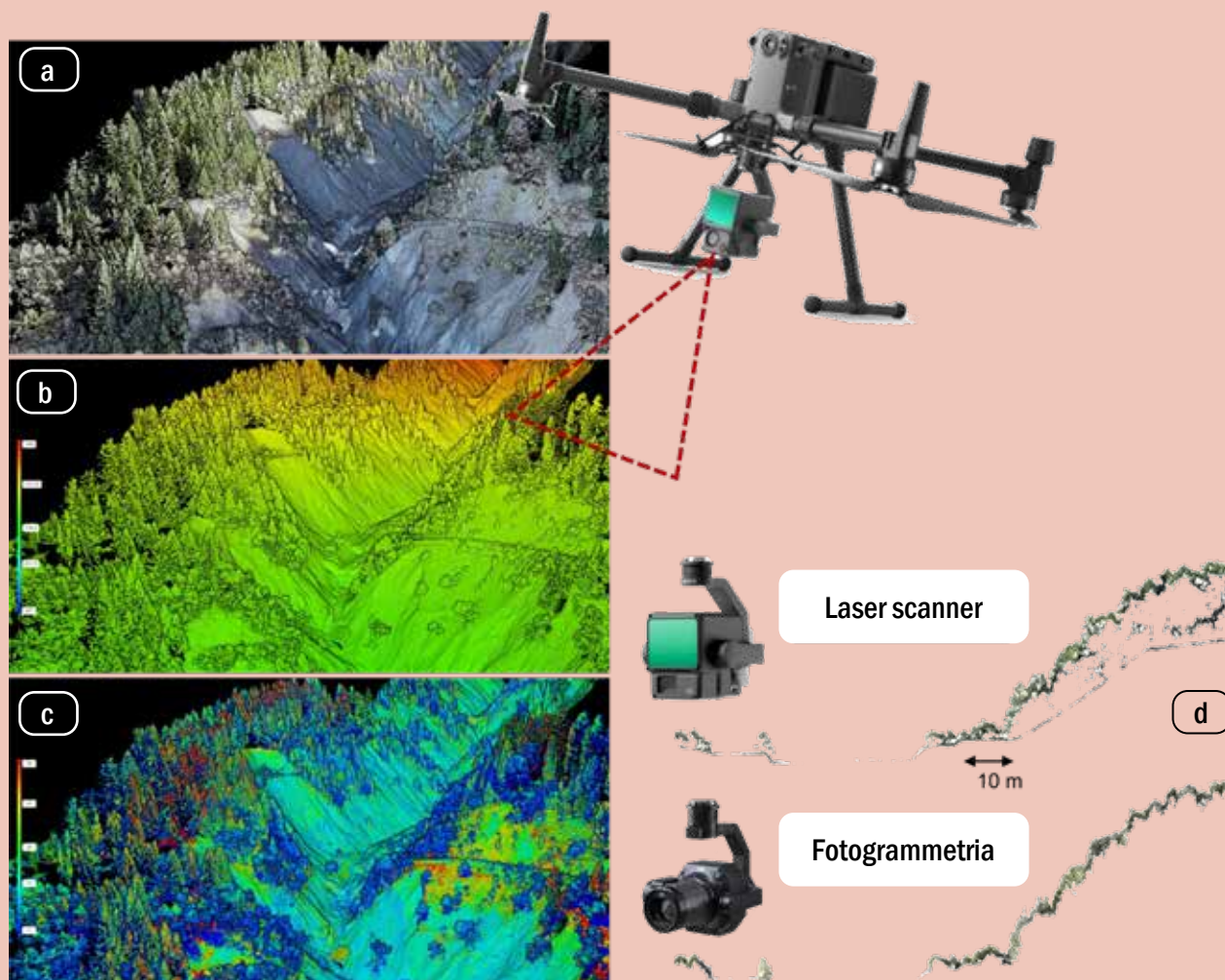


LASER SCANNER DA DRONE: COS'È E PERCHÉ È COSÌ UTILE?

La tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è una tecnica di rilievo che consente di determinare la forma e la posizione di un oggetto mediante la misura della distanza di un numero elevato di punti della sua superficie, tramite una sequenza di impulsi laser variamente orientati verso il suolo.

La distanza viene ricavata dal tempo impiegato dall'impulso per ritornare al sensore dopo essere stato riflesso da alberi, rocce o terreno, trasformando questi "rimbalzi" in una nuvola di punti molto dettagliata, che contiene le coordinate (X, Y, Z) dei punti misurati e l'intensità del segnale di ritorno in funzione delle caratteristiche fisiche dell'oggetto colpito (terreno, vegetazione, asfalto, tetto, acqua

etc.). La tecnologia LiDAR è estremamente utile nei rilievi topografici perché a differenza della classica tecnica fotogrammetrica, riesce a penetrare la vegetazione e a descrivere con precisione la morfologia del terreno anche sotto gli alberi. L'abbinamento di questa tecnologia con l'utilizzo dei droni ha rivoluzionato i rilievi topografici: i costi sono diminuiti rispetto ai rilievi tradizionali con elicottero o aereo; è possibile ottenere dati di elevata qualità acquisendo milioni di punti in pochi minuti anche in ambienti difficilmente accessibili come versanti instabili e alvei torrentizi (ambienti tipici dei piccoli bacini montani) evitando rischi per gli operatori; consente di realizzare rilievi più frequenti e campagne ripetute nel tempo per monitorare l'evoluzione dei fenomeni di dissesto e gli effetti del clima che cambia.



Esempi di nuvole di punti ottenute da un rilievo laser scanner di un tratto d'alveo di un piccolo bacino montano: a) nuvola di punti a colori; b) nuvola di punti classificata in base alla quota; c) nuvola di punti classificata in base all'intensità del segnale LiDAR di ritorno. d) Sulla destra è rappresentato un dettaglio di una sezione dell'alveo rilevata topograficamente mediante tecnica laser scanner e fotogrammetria per sottolineare come quest'ultima non restituisca le informazioni topografiche del terreno coperto dalla vegetazione.

MODELLI DIGITALI 3D PER MONITORARE LA DINAMICA DEL SEDIMENTO

Sfruttando le tecniche di *Remote sensing* è possibile realizzare i Modelli Digitali (*Digital Twins*) che permettono di quantificare i processi erosivi e di deposito, monitorare la dinamica del sedimento e identificare le aree più a rischio. Infatti, con l'utilizzo di Modelli Digitali (DTM) multi-temporali si possono quantificare i cambiamenti morfologici tra un rilievo e il successivo calcolando le differenze di quota, punto per punto (*DTM of Difference* – DoD).

**CON I MODELLI
DIGITALI SI
QUANTIFICANO
I PROCESSI DI
EROSIONE E DI
DEPOSITO DEI
SEDIMENTI E SI
IDENTIFICANO
LE AREE PIÙ A
RISCHIO**

In un DoD dove la differenza è positiva la quota della superficie è aumentata (i.e., deposizione di sedimenti), dove il valore è negativo la quota è diminuita (i.e., processo erosivo).

Il telerilevamento diventa così uno strumento fondamentale non solo per la ricerca, ma anche per la gestione del rischio, perché consente di prendere decisioni più tempestive e basate su dati oggettivi, supportare la pianificazione delle opere di controllo nei torrenti (e.g., briglie, soglie, opere spondali), e contribuire ad aumentare la sicurezza di comunità e infrastrutture in territori sempre più vulnerabili.

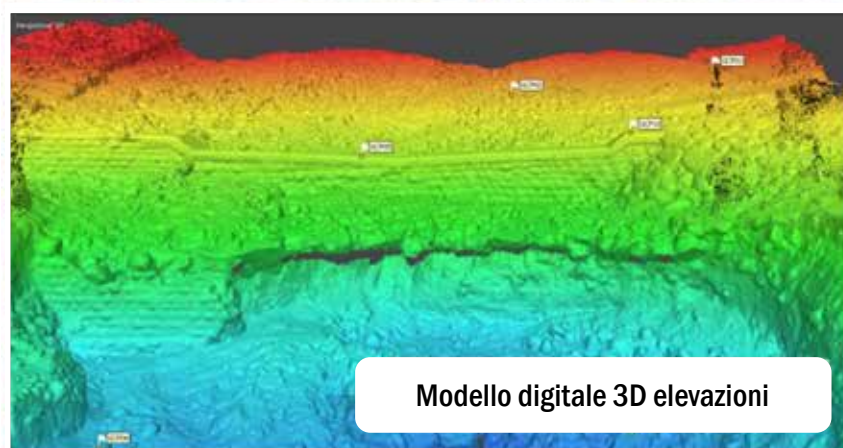
CONFRONTO TRA FOTOGRAFIE E RELATIVI MODELLI DIGITALI TRIDIMENSIONALI OTTENUTI MEDIANTE TECNICHE DI *REMOTE SENSING*

Esempio di rilievi fotogrammetrici effettuati in una sezione d'alveo di un piccolo bacino montano (torrente Moscardo, Paluzza)



CONFRONTO TRA FOTOGRAFIE E RELATIVI MODELLI DIGITALI TRIDIMENSIONALI OTTENUTI MEDIANTE TECNICHE DI *REMOTE SENSING*

Esempio di rilievi fotogrammetrici effettuati in una sezione d'alveo di un piccolo bacino montano (torrente Vegliato, Gemona)



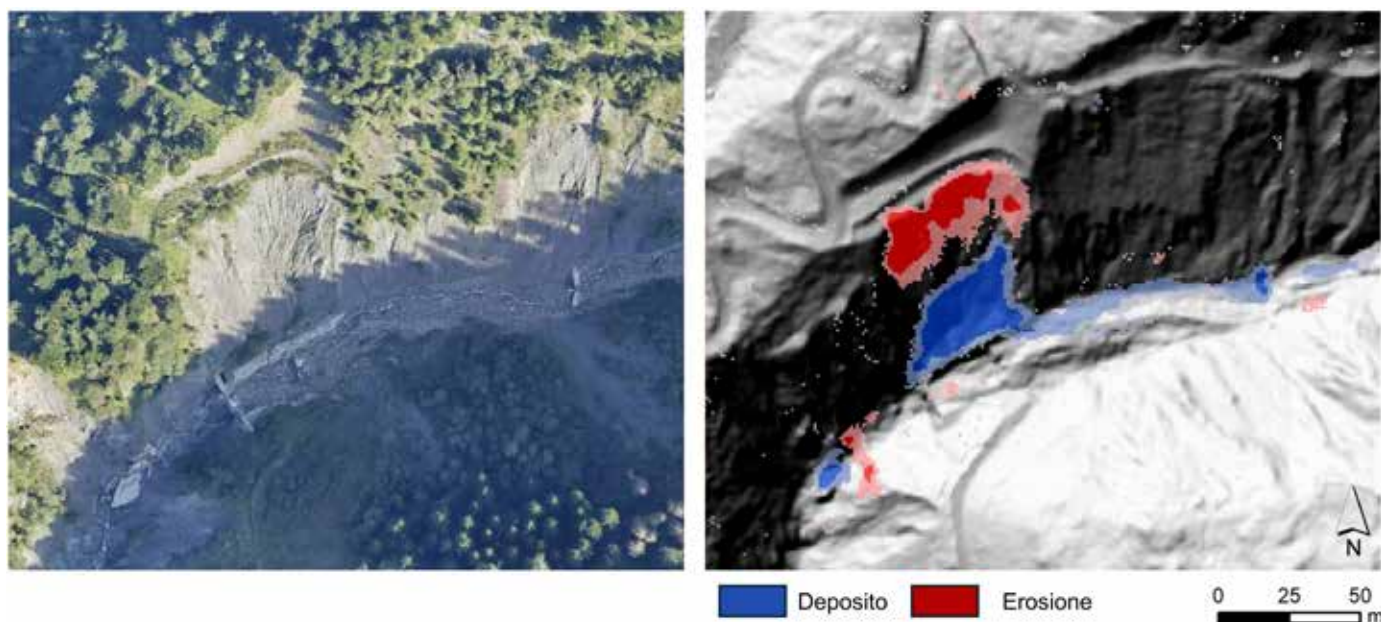
MONITORAGGIO CONTINUO E RICERCA DI SOLUZIONI PIU' EFFICACI PER LA PREVENZIONE DEL RISCHIO

I dati aggiornati sulla dinamica del sedimento nei bacini montani, ricavati sfruttando le tecniche di tele-rilevamento, abbinati a un costante monitoraggio dello stato e della funzionalità delle opere di controllo dei torrenti possono essere implementati all'interno di strumenti informatici di tipo GIS (Geographic Information System) che permettono di creare database e cartografie dedicate.

CARTOGRAFIE DIGITALI E INDICATORI SPECIFICI CONSENTONO DI INDIVIDUARE LE PRIORITÀ DEGLI INTERVENTI DI MANUTENZIONE, VALUTARNE L'EFFICACIA E MIGLIORARE LA PROGETTAZIONE FUTURA

Inoltre, queste informazioni possono essere sfruttate per sviluppare indicatori in grado di individuare le priorità d'intervento nella manutenzione delle strutture, per valutare l'efficacia degli interventi realizzati e migliorare la progettazione futura. Questo flusso di lavoro, arricchito da un'importante documentazione storica sui fenomeni avvenuti in passato, ha già permesso di ottenere ottimi risultati nell'identificazione delle priorità d'intervento all'interno alcuni bacini torrentizi delle montagne friulane (e.g., torrente Moscardo a Paluzza, torrente Miozza a Ovaro, torrente Ortegla a Paularo, torrenti Cella-Vuom a Camporosso) e di quelle slovene grazie al progetto "TORRENT - prAtiche cOmuni per la Riduzione del Rischio nella gestione dei bacini idrografici dei TorrENTi", co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia (www.ita-slo.eu/torrent).

MODELLO DIGITALE DELLE DIFFERENZE (DOD)



Estratto dell'ortofoto realizzata nel 2024 per un tratto d'alveo del torrente Moscardo, confrontata con un Modello Digitale delle Differenze (DoD) che evidenzia le aree in erosione e deposito nel periodo 2003-2009

CONOSCERE IL TERRITORIO

- IL MARE
- LE COSTE
- LE LAGUNE

DEL FVG

Per comprendere il modo in cui il nostro territorio risponde ai cambiamenti climatici è fondamentale conoscerne le caratteristiche.

Questo inserto è una sorta di “bussola” pensata per fornire a ogni lettore le informazioni essenziali sugli ambienti costieri, marini e lagunari del FVG.

Poche pagine introduttive per esplorare le forme e le dinamiche di questi delicati ecosistemi, prima di scoprire come si trasformano e come rispondono alla crisi climatica negli articoli delle successive sezioni di Segnali dal clima in FVG 26

I testi e le immagini sono tratti da due approfondimenti pubblicati sul sito web di ARPA FVG:

<https://www.arpa.fvg.it/temi/temi/acqua/ultimi-pubblicati/il-territorio-acque-marino-costiere/>

<https://www.arpa.fvg.it/temi/temi/acqua/ultimi-pubblicati/il-territorio-acque-di-transizione-complesso-lagunare-di-marano-e-grado/>

a cura degli esperti dell'ARPA FVG

IL MARE DEL FVG

IL GOLFO DI TRIESTE

Le acque marino costiere regionali comprendono il Golfo di Trieste e rappresentano la porzione più settentrionale del Mare Adriatico. Quest'area è caratterizzata da acque poco profonde, con una profondità massima di circa 25 m, ma anche da un'ampia escursione di marea, la quale può superare il metro e mezzo di ampiezza in prossimità delle bocche di porto lagunari.

**IL GOLFO
DI TRIESTE
SI CARATTERIZZA
PER LE ACQUE
POCO PROFONDE
E UN'AMPIA
ESCURSIONE
DI MAREA**

La Regione Friuli Venezia Giulia presenta un'orografia molto articolata che si riflette nella particolare morfologia della fascia costiera. Questa, infatti, può esser suddivisa in due sotto-aree, separate dalla foce del fiume Timavo: l'area occidentale e centrale, in corrispondenza della pianura friulana e l'area orientale segnata dall'altopiano carsico della Venezia Giulia.

- La costa dell'**area più occidentale e centrale** è bassa e con le spiagge sabbiose. Questo tratto di costa è delimitato a Ovest dalla foce del fiume Tagliamento che segna il confine con la regione Veneto, e a Est dalla foce del fiume Timavo. Tra le foci dei fiumi Tagliamento e Timavo si trova la foce del fiume Isonzo con l'omonima [Riserva Naturale \(ZSC\)](#), mentre tra le foci del Tagliamento e dell'Isonzo si sviluppa il vasto [sistema lagunare di Marano e di Grado](#), sito di importanza comunitaria, le cui acque vengono definite “acque di transizione”.

**LA COSTA PIÙ
OCCIDENTALE
E CENTRALE
È BASSA E
CON SPIAGGE
SABBIOSE**

- Il **tratto costiero orientale** a Ovest della foce del fiume Timavo è alto, roccioso e culmina con la [Riserva Naturale delle falesie di Duino](#). Qui l'altopiano carsico incontra il Mare Adriatico, fino al confine con la Slovenia. Sul limitare della provincia di Gorizia e tutta quella di Trieste vi è infatti una porzione dell'altopiano carsico caratterizzato da notevoli fenomeni geologici quali doline, grotte (ad es. Grotta Gigante e abisso di Trebiciano) e fiumi sotterranei come il Timavo.

**IL TRATTO
COSTIERO
ORIENTALE È
ALTO E ROCCIOSO**



Il Golfo di Trieste propriamente detto, si apre immediatamente a Est della fascia lagunare e si estende all'interno della linea congiungente Grado con Punta Salvore, nella regione Istriana appartenente alla Repubblica di Croazia.

Al suo interno si individuano le insenature minori del Golfo di Panzano, le baie di Sistiana e di Grignano, infine la Baia di Muggia, di Capodistria e di Pirano nella zona meridionale del golfo.

Lungo l'arco costiero regionale sono insediati i complessi urbani di Trieste, Muggia e di Monfalcone, con le rispettive aree industriali e portuali, e due importanti centri turistici, Grado e Lignano Sabbiadoro.

L'intero ambiente marino-costiero è sottoposto agli impatti di origine antropica, derivanti principalmente dal settore dei trasporti marittimi, dell'industria, della pesca e del turismo.

I FONDALI MARINI

I fondali dell'Alto Adriatico che caratterizzano il Golfo di Trieste, sono formati da un'ampia distesa piatta di sedimento sabbioso e fangoso intervallata da circa 250 affioramenti rocciosi fra p.ta Sdobba e p.ta Tagliamento a una distanza dalla linea di costa che varia fra i 2 e i 17 km e a una profondità variabile fra gli 8 e i 22 metri.

Queste aree, denominate localmente **trezze** o **grebeni** (tegnùe dai pescatori veneti), erano talvolta molto ricercate dai pescatori in quanto ricche di pesce pregiato.

Le dimensioni dei singoli affioramenti variano da uno a trecento metri, possono essere isolati o in gruppi frastagliati con altezza media fra 1 e 1.5 metri e un valore approssimativo di densità di circa 1 affioramento per ogni km² di fondale marino.



Foto: Lisa Faresi

La formazione di queste isole di substrato solido può essere ricondotta a diversi possibili fattori, quali la cementazione di depositi legati alla fuoriuscita di gas metano, la collocazione parallela alle attuali linee di costa, la cementazione nell'immediato sottofondo di vecchie praterie della fanerogama *Posidonia oceanica* ormai limitata in zone ristrette, o ancora, la trasformazione di rocce di natura calcarea formatesi attraverso complessi fenomeni geologici.

Le trezze o grébeni ospitano popolamenti bentonici riconosciuti con il termine di "coralligeno di piattaforma", organismi biocostruttori il cui scheletro calcareo stratificato può creare complessi di notevole spessore.

Queste formazioni rocciose rappresentano delle vere e proprie **oasi di ricchezza biologica**, creando un incremento di diversità in un ambiente apparentemente monotono, come quello sabbioso e fangoso. I grébeni, infatti, sono ricchi di anfratti e cavità rocciose più o meno strette che fungono da tana fornendo rifugio e protezione per numerose specie di crostacei, pesci e soprattutto specie ittiche giovanili.

IL BACINO ADRIATICO SETTENTRIONALE

Il Bacino Adriatico Settentrionale fa parte del mare Adriatico che nel suo complesso si estende per circa 800 km con una larghezza massima che varia dai 90 ai 120 km e una superficie complessiva di 138 000 km² e viene convenzionalmente suddiviso in tre bacini: meridionale, centrale e settentrionale caratterizzati da profondità decrescenti.

Il bacino adriatico settentrionale si sviluppa a nord della congiungente il Promontorio del Conero nella regione Marche, con il canale di Zara, presso Zadar sulla costa croata.

Le caratteristiche oceanografiche del bacino variano in funzione della fisiografia e della meteorologia dell'area che determinano la modificazione stagionale (estate - inverno) delle caratteristiche termoline delle masse d'acqua.

Da novembre a marzo la **miscelazione** delle masse d'acqua è pressoché completa mentre tra la fine di marzo/inizio aprile e ottobre si osserva una stratificazione termalina lungo la colonna d'acqua.

Tale **stratificazione** è determinata essenzialmente dall'effetto combinato di due fattori:

- l'aumento degli apporti di acque dolci dai fiumi che sfociano nell'Alto Adriatico in seguito allo scioglimento delle nevi (fiumi Po, Adige, Brenta, Piave, Livenza, Tagliamento e Isonzo, solo per citare i principali);
- la maggiore intensità di irraggiamento solare conseguente all'inversione del ciclo termico.

LE CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DEL GOLFO DI TRIESTE

Il Golfo di Trieste gioca un ruolo importante nell'evoluzione delle caratteristiche idrologiche e delle correnti dell'intero bacino Alto Adriatico, essendo uno dei siti di formazione di acqua particolarmente fredda.

L'elevata latitudine, la limitata profondità e la presenza di cospicue masse continentali determinano un'esaltazione del fenomeno di stratificazione termalina per le masse d'acqua del Golfo di Trieste.

IL GOLFO DI TRIESTE HA UN RUOLO IMPORTANTE PER LE CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DELLE CORRENTI DEL BACINO ALTO ADRIATICO

- In **estate** la presenza di acqua dolce riversata dai fiumi e il riscaldamento superficiale causano una netta stratificazione della colonna d'acqua. In superficie si trovano acque più calde e più diluite, mentre acque più dense e fredde rimangono confinate in profondità: gli scambi tra gli strati sovrapposti sono molto limitati.
- In **inverno** invece, a causa del minor irraggiamento termico e al rimescolamento determinato dal vento di Bora, i parametri chimico-fisici della colonna d'acqua risultano omogenei dalla superficie al fondo.

La circolazione delle masse d'acqua in profondità avviene quasi sempre in senso antiorario con velocità molto basse (2-3 cm/s), mentre in superficie le acque si muovono generalmente in senso orario.

Il movimento e la velocità dello strato superficiale risentono particolarmente dalle correnti di deriva, innescate dal regime di ventilazione: le correnti sono deboli al prevalere dei regimi di brezza e aumentano di velocità con venti più forti provenienti dai quadranti meridionali e dal vento di Bora che spira dal primo quadrante (Nord-Est, NE).

LE COSTE DEL FVG

ARCO COSTIERO DEL FRIULI VENEZIA GIULIA

Dal punto di vista morfologico il litorale della Regione Friuli Venezia Giulia è costituito, procedendo da Est verso Ovest, dalle coste rocciose caratteristiche della Penisola Istriana e delle falesie sottostanti l'altopiano carsico, fino alle coste basse e sabbiose del versante centro - occidentale, incise dalle foci dei fiumi Isonzo e Tagliamento.

In particolare, il **tratto di litorale compreso tra gli abitati dei Comuni di Muggia e Duino-Aurisina** (circa 23 km) è caratterizzato da coste alte e rocciose; le spiagge presenti, tutte di dimensioni ridottissime, sono riconducibili a terreni di abrasione di rocce affioranti.

Nel Vallone di Muggia sfocia il Rio Ospio che nasce in territorio sloveno e il cui percorso segna il confine geografico settentrionale dell'Istria.

Il profilo costiero da Muggia a Trieste, una volta caratterizzato dalla presenza delle saline, risulta completamente modificato a causa dell'inurbamento, dalla presenza della zona industriale e del porto di Trieste.

Procedendo dal capoluogo regionale verso occidente, il profilo costiero è caratterizzato dalla presenza del promontorio calcareo di Miramare che ospita l'omonima [Riserva Naturale Marina](#) e che delimita la baia di Grignano. Segue poi una sezione di coste alte e dalla struttura a pendio, coperte da rigogliosa vegetazione alternata dal-

la presenza di speroni calcarei, arrivando poi alla baia di Sistiana.

Tra la baia di Sistiana e la località di Duino si estende il parco delle falesie di Duino, fino ad arrivare nei pressi del Villaggio del pescatore dove si trovano le risorgive del fiume Timavo che qui vi sfocia e segnando così il passaggio dalla costa alta e rocciosa a quella bassa e sabbiosa.

Il **Golfo di Panzano**, fronte marittimo dell'Agro monfalconese, presenta coste basse e barenose; nei tre bacini artificiali di Panzano, a sud di Monfalcone, si trova il cantiere navale e vi sfocia il canale Valentinis con il Porto Ròsega.

Il **settore centro - occidentale dell'arco costiero** è caratterizzato da spiagge sabbiose, con discreta profondità, originatesi sia a seguito di deposizioni marine che di sedimenti fluviali.

- Le spiagge originatesi dal deposito di sedimenti marini si rinvencono principalmente nei cordoni litorali che separano dal mare la Laguna di Marano e Grado.
- Le spiagge generate dalla deposizione dei sedimenti fluviali, sabbioso - pelitici, sono localizzate dalla Punta Sdobba, dove l'Isonzo ha la sua foce, fino al confine occidentale della Regione, rappresentato dalla foce del Fiume Tagliamento.

Lungo il delta fluviale del Tagliamento si sviluppano due lidi sabbiosi: il lido di Lignano a Est, con un'estensione pari a circa 7 km, e il lido di Bibione a Ovest (già in Regione Veneto) con un'estensione prossima ai 9 km.





PRINCIPALI ATTIVITÀ ANTROPICHE NEL GOLFO DI TRIESTE

Nell'ambito costiero del Friuli Venezia Giulia sono localizzati due centri portuali marittimi di importanza nazionale ed internazionale: Trieste e Monfalcone. Monfalcone è nota anche per la **cantieristica** delle navi da crociera

MONFALCONE È NOTA, OLTRE CHE PER IL PORTO, PER I CANTIERI DI NAVI DA CROCIERA

AL PORTO DI TRIESTE VENGONO SCARICATE IN MEDIA OLTRE 40 MILIONI DI TONNELLATE DI GREGGIO ALL'ANNO

Nel 2022 lo scalo giuliano ha fatto registrare un volume record per lo **scalo merci**, superando i 57 milioni di tonnellate. Per quanto riguarda il traffico delle navi petroliere, nel terminal di Trieste vengono scaricate in media oltre 40 milioni di tonnellate di greggio all'anno.

Oltre alle aree portuali e cantieristiche vi è insediata anche tutta una serie di strutture industriali che nel complesso rappresentano una fonte di pressione nei confronti dell'ambiente marino.

L'attività di **pesca** e di **acquacoltura** rappresenta un segmento della produzione primaria regionale con una radicata tradizione culturale. Allo stato attuale le due più importanti marinerie di pesca sono rappresentate da Marano Lagunare e Grado, nelle quali sono attive imbarcazioni per la pesca a strascico oltre le 3 miglia nautiche dalla

costa, imbarcazioni operanti nella piccola pesca con attrezzi da posta, pescherecci dotati di draga idraulica per la raccolta dei molluschi bivalvi ed imbarcazioni impiegate per la pesca in ambiente lagunare con attrezzi da posta. Altre marinerie da pesca sono presenti ormai con poche imbarcazioni dal litorale della foce dell'Isonzo fino a Lazzaretto nel Comune di Muggia. Allo stato attuale l'acquacoltura in ambiente marino è perlopiù rappresentata dalla **mitilicoltura** dislocata lungo la costa della Provincia di Trieste, dove è attivo anche un impianto per la **pescicoltura** su gabbie galleggianti nell'area antistante il Comune di Duino-Aurisina.

MARANO LAGUNARE E GRADO SONO LE PIÙ IMPORTANTI MARINERIE DI PESCA REGIONALE

La fascia costiera della Regione, infine, è sottoposta a notevoli pressioni ambientali soprattutto durante il periodo estivo a causa del massiccio afflusso di **turisti** nei centri di villeggiatura balneare.

IL TURISMO BALNEARE COSTITUISCE UNA NOTEVOLE PRESSIONE AMBIENTALE PER LA COSTA IN ESTATE

Alla massiccia presenza di turisti, infatti, si associano i noti problemi dei centri rivieraschi legati allo smaltimento delle acque reflue, con elevate portate in ingresso ai depuratori.

LE LAGUNE DEL FVG

LA GEO-MORFOLOGIA DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO

La Laguna di Marano e Grado caratterizza il profilo costiero Alto Adriatico della regione Friuli Venezia Giulia in particolare.

È inserita nel complesso degli ambienti di transizione situato lungo il tratto più settentrionale del Mare Adriatico e dell'intero Mediterraneo, che si sviluppa dal delta del fiume Po agli stagni costieri della Slovenia. Questo complesso rappresenta l'unico caso italiano di vere lagune, intese come porzioni di mare semichiuse per la presenza di penisole o sistemi di isole barriera e regolate dal flusso e riflusso della marea attraverso una o più aperture di comunicazione con il mare, le bocche di porto.

ORIGINI

L'origine delle lagune nel Nord Adriatico viene fatta risalire a 6000-5000 anni fa, quando il mare ha inondato le vaste pianure alluvionali, genera-

do ampie baie confinate dai delta fluviali in rapida formazione.

Dai fiumi Isonzo e Tagliamento per la Laguna di Marano e Grado, e dai fiumi Piave e Adige per la Laguna di Venezia, i sedimenti sono stati progressivamente trasportati lungo riva, fino a distribuirsi sotto forma di lidi, separando dal mare quindi, le grandi baie e dando vita alle lagune.

La genesi della laguna nell'**area di Marano** risulta molto **più antica** (5500-4200 anni fa) rispetto a quella di Grado. Studi stratigrafici e cronologici eseguiti nella Laguna di Marano, documentano la sua presenza nell'attuale posizione da circa 5500 anni, quando il livello del mare era più basso di circa 5-6 m, e dimostrano che la sua configurazione, almeno nel suo settore meridionale, era molto simile all'attuale già circa 1600 anni fa.

La **Laguna di Grado** si è formata in **epoca post-romana** (IV-VI secolo d.C.) e ha subito profonde modificazioni soprattutto per la progressiva evoluzione del delta dell'Isonzo e del Natisone. Fino al V secolo, in quest'area prevaleva la terraferma, come testimoniato da numerosi ritrovamenti archeologici



tra i quali la via romana, ora interamente coperta dall'acqua, che collegava Aquileia al suo scalo di Grado. Complessivamente si ritiene che il settore orientale della Laguna di Grado sia di più recente formazione rispetto a quello occidentale.

IL PROFILO MORFOLOGICO ODIERNO

Dopo il 1800 le modifiche lagunari sono state causate principalmente dall'opera dell'uomo con la costruzione di argini e di difese litorali verso il mare. Gli antichi spazi lagunari sono stati parzialmente bonificati (circa il 30% dell'antico specchio lagunare) e alcune comunicazioni con il mare sbarrate. Le bocche sono state difese da lunghi moli guardiani, che impediscono il flusso sedimentario da est verso ovest.

Il profilo morfologico odierno è stato largamente influenzato dalle importanti attività di bonifica condotte all'inizio del 1900.

Delimitata dall'apparato deltizio del fiume Taglia-

mento a ovest e da quello del fiume Isonzo a est, l'area lagunare in questione si sviluppa lungo una progressione arcuata parallelamente alla linea di costa, estendendosi per circa 32 km in lunghezza, con una distanza media tra la linea di costa e le isole del cordone litorale di circa 5 km per una superficie totale di circa 160 km². Grazie a queste dimensioni è la seconda laguna per estensione in Italia ed una delle più estese tra le lagune mediterranee dell'Europa.

IL SISTEMA LAGUNARE È OGGI ESTESO PER CIRCA 160 KM² TRA TAGLIAMENTO E ISONZO E SUDDIVISO IN TRE FASCE AMBIENTALI IN BASE AL LIVELLO DELLE MAREE.

L'ambiente lagunare viene solitamente suddiviso in 3 zone, in relazione alla posizione rispetto al livello medio del mare:

- La **prima zona** comprende le morfologie ubicate al di sopra del livello medio delle alte maree, ossia le **barene**, i **cordoni litorali** e le **coste**. Le barene, in particolare, svolgono alcune funzioni fondamentali per l'equilibrio ambientale lagunare: da una parte frenano il moto ondoso e creano percorsi obbligati alle correnti d'acqua,



guidando il flusso delle maree in laguna e amplificando l'azione dei canali; dall'altra, attraverso la vegetazione alofita (cioè adattata a vivere in ambienti salmastri), hanno un effetto depurante sull'acqua e costituiscono aree di sosta e di riproduzione per l'avifauna. ARPA FVG con l'Università degli Studi di Trieste ha sostenuto degli studi di approfondimento sulle trasformazioni di questi particolari ambienti.

- La **seconda zona** comprende le aree poste tra i livelli medi delle alte e basse maree quali i canali secondari, larghi circa 8 m e profondi circa 1.5 m, defluenti nei **canali principali**. I **canali secondari** sono contraddistinti da un andamento meandriforme e attraversano le piane di marea o velme, comprese anch'esse in questa zona. Le **velme** rappresentano le entità più diffuse in laguna (circa il 60-80%): sono aree pianeggianti a debole pendenza, che si raccordano con le barene, caratterizzate da sedimenti fini (limo-argilla) e ospitanti una ricca associazione di vegetali e animali.
- Nella **terza zona**, infine, si trovano le aree sempre sommerse dall'acqua, poste al di sotto del livello medio delle basse maree: comprendono le **bocche lagunari**, i **canali principali** (naturali e non) e le **paludi**.

**A OGNI BOCCA
DI PORTO
CORRISPONDE
UN "BACINO"
CHE ACCOGLIE
E SCARICA LE
ACQUE DELLA
PROPRIA BOCCA
LAGUNARE**

LE BOCCHE DI PORTO

Il complesso lagunare di Marano e Grado comunica con il mare aperto tramite **6 bocche di porto** tidali lagunari:

- Le bocche di Lignano e di S. Andrea presenti nell'areale maranese
- Le bocche di Porto Buso, di Morgo, della Fosa di Grado e di Primero nell'areale gradese.

Le bocche tidali (tidale = relativo alle maree) sono aperture naturali scavate attraverso il cordone litorale, che pone in comunicazione un bacino lagunare con il mare aperto.

Esse fungono da regolatori idraulici per le correnti indotte dal moto ondoso e dai cicli mareali, definendo le direttrici di flusso perpendicolari alla linea di costa.

**LE BOCCHE
DI PORTO
FUNGONO DA
REGOLATORI
IDRAULICI PER
LE CORRENTI
DI MAREA**

Le bocche sono mantenute attive dalle correnti di marea il cui flusso e riflusso assumono la massima velocità in condizioni di sizigia (ossia in presenza di massima escursione di marea), raggiungendo anche valori ai superiori a 1 m/s.

Allo stato attuale tutte le bocche sono regimate da opere idrauliche a esclusione della bocca di Morgo in costante evoluzione.

Le sei bocche lagunari, oltre a essere le zone di massima profondità, come dimostrano i circa 13 metri di quella gradese e i 7 metri della bocca di Primero, presentano una portata massima complessiva -stimata negli anni '50 dall'Istituto Idrografico del Magistrato delle Acque- pari a 8.750 m³/sec in condizioni di massima marea (marea sizigiale).

In corrispondenza di ogni bocca si individua un'area lagunare che rappresenta il "bacino" che accoglie e scarica le acque provenienti dalla propria bocca lagunare. Ciascuna di esse fornisce il nome al corrispettivo bacino, suddividendo così l'area lagunare in "sei bacini".

Andando da est verso ovest, quindi, si incontrano:

- **bacino di Primero** (1 368 ha);
- **bacino di Grado** (3 314 ha);
- **bacino di Morgo** (297 ha), ora in fase di occlusione;
- **bacino di Porto Buso** (3 556 ha);
- **bacino di S. Andrea** (2 150 ha);
- **bacino di Lignano** (5 056 ha).

Dalle bocche lagunari prendono vita i **canali principali** dai quali si diramano quelli secondari che disperdono le acque all'interno del bacino lagunare e quelli di terzo ordine, che si esauriscono sulle piane di marea.

Il **cuneo salino** penetra i corsi d'acqua che sfociano in laguna per almeno altri 4-5 km dalla loro foce.

Il confine amministrativo, che divide il complesso lagunare nelle lagune di Marano e di Grado, va della foce del fiume Aussa-Corno alla Bocca di Porto Buso e fino al 1918 rappresentò il confine tra il Regno d'Italia e l'Impero Austro Ungarico.



IDROLOGIA DEL COMPLESSO LAGUNARE

NELLA LAGUNA DI MARANO IL CONTRIBUTO DELLE ACQUE DOLCI È MAGGIORE RISPETTO ALLA LAGUNA DI GRADO

L'apporto di acqua dolce e la batimetria sono i principali fattori che differenziano l'area lagunare di Marano da quella di Grado, imprimendo loro caratteristiche fisiche ambientali singolari che determinano l'esistenza degli ecosistemi che contraddistinguono questi ambienti straordinari.

Il contributo di **acqua dolce** proveniente dall'entroterra, per la parte maranese si deve principalmente ai fiumi Stella, Cormor, Zellina, Corno e Aussa, mentre per la parte gradese al solo il fiume Natissa.

L'apporto di acque dolci di morbida provenienti dai fiumi Tagliamento ed Isonzo nell'ambiente lagunare, attraverso i rispettivi canali di Bevazzana e Isonzato, è limitato solo alle fasi di marea crescente.

Il contributo delle acque dolci incide in modo significativo sull'idrologia della Laguna di Marano, mentre la Laguna di Grado ha caratteristiche significativamente più marine.

Per quanto riguarda la **batimetria**, da un punto di vista idromorfologico, anche a seguito dell'aggiornamento della "[Carta batimetrica della Laguna di Marano e Grado](#)", si evidenzia come la Laguna di Marano presenti profondità superiori rispetto a quella gradese, soprattutto in virtù di un maggiore idrodinamismo.

I **parametri idrologici** che maggiormente influenzano l'attività biogeochimica dell'ambiente lagunare sono temperatura, salinità, pH, ossigeno disciolto, clorofilla a e torbidità dell'acqua.

- La **temperatura** presenta una forte variabilità stagionale con massimi estivi superiori a 30 °C e minimi inferiori a 0 °C nei mesi invernali caratterizzati da lunghi periodi con vento da est nord-est (ENE) (Bora).
- La **salinità** presenta un gradiente positivo dall'area lagunare maranese a quella gradese oltre a un gradiente positivo dalla zona di "gronda" settentrionale, caratterizzata dagli apporti dei fiumi tributari in laguna alle bocche lagunari, dove si evidenziano masse d'acqua più prettamente marine.
- Il **pH** è legato alla salinità; generalmente, acque meno ricche in ioni quali cloruri hanno pH più bassi (ossia con un grado di acidità superiore). Complessivamente, quindi, con andamento parallelo alla salinità, nella Laguna di Marano si riscontrano valori di pH inferiori a quelli di Grado.
- L'**ossigeno disciolto** ha una distribuzione estremamente variegata con valori, soprattutto nel periodo estivo che possono, nell'arco di 24 ore, variare da situazione di sovrassaturazione a forte ipossia. Nel periodo invernale il parametro si attesta su valori in saturazione.
- La **clorofilla a** rappresenta una stima della biomassa fitoplanctonica, la cui concentrazione dipende da diversi elementi:

1. presenza nell'acqua dei sali nutritivi, soprattutto azoto e fosforo associati principalmente agli apporti fluviali;
2. un opportuno grado di salinità dell'acqua lagunare;
3. tempo di residenza delle masse d'acqua in ambito lagunare;
4. contributo energetico dato dall'irradianza solare;
5. presenza di predatori del fitoplancton come lo zooplancton.

Concentrazioni più alte del parametro si riscontrano nell'area maranese rispetto a quella gradese e, in particolare, le acque di "gronda" poste a settentrione di Aprilia Marittima presentano le maggiori concentrazioni che possono superare 30 µg/L.

- La **torbidità** delle acque lagunari è un ulteriore parametro importante per questo ambiente. Le forzanti che agiscono sulla torbidità possono avere sia origine ambientale che antropica e sono:

1. di **origine ambientale**, associate alle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche dell'area indagata, alla circolazione e persistenza delle masse d'acqua, all'azione degli agenti atmosferici in particolare del vento, all'elevata portata fluviale che incrementa il trasporto solido del particolato sospeso e alle fioriture fitoplanctoniche;
2. tra i **fattori antropici**, le attività di cabotaggio nei canali lagunari sembrano quelle che maggiormente influiscono sulla torbidità delle acque, in particolare la risospensione del sedimento per l'azione dell'erosione causata dal movimento delle eliche dei motori marini e dal moto ondoso prodotto, durante la navigazione, dai natanti.

Nel 2019 i dati acquisiti ARPA FVG per mezzo di due **sonde parametriche** poste rispettivamente nei pressi dell'Isola di Barbana (Laguna di Grado) e di Aprilia Marittima (Laguna di Marano) hanno evidenziato che la torbidità nella prima è maggiormente condizionata dall'attività antropica associata al transito delle imbarcazioni, la seconda da fattori ambientali come piogge e portate fluviali.

L'INFLUENZA DELLE PRESSIONI ANTROPICHE

L'assetto idrologico interno, per quanto sia caratterizzato dalla dominanza dell'ingresso marino, è sottoposto a continue pressioni antropiche che inducono un'evoluzione senza un preciso indirizzo strategico.

Nell'ultimo quarantennio sono state realizzate **numeroso opere** tra le quali spiccano:

- le dighe foranee di Porto Buso e di Grado
- la creazione del porto commerciale interno di Porto Nogaro, con il relativo approfondimento del canale di collegamento alla bocca di Porto Buso a - 7,50 m s.l.m.
- la diga interna di Porto Lignano
- la stabilizzazione dell'Isola di S. Andrea
- la realizzazione di numerosi porti turistici per circa 6000 ormeggi, con i relativi canali di collegamento al sistema navigabile interno costituito dalla "litoranea veneta".

L'IMPORTANZA NATURALISTICA

Nella Laguna di Marano e Grado, sono di rilevante interesse da un punto di vista naturalistico alcuni siti storici destinati alla **protezione della fauna selvatica migratoria** sottoposti alla Convenzione di Ramsar del 1971 (Valle Cavanata e Oasi Avifaunistica delle Foci del Fiume Stella).

Successivamente, a seguito dell'applicazione della [direttiva Habitat \(92/43/CEE\)](#) recepita in Italia dal D.P.R. 8 settembre 1997 n. 357 riguardante la tutela della **biodiversità**, l'intero perimetro lagunare è stato designato dal 2013 zona speciale di conservazione (ZSC).

NEGLI ULTIMI
DECENNI
NUMEROSE OPERE
UMANE HANNO
FORTEMENTE
MODIFICATO
IL SISTEMA
IDROLOGICO
DELLA LAGUNA



IL MARE

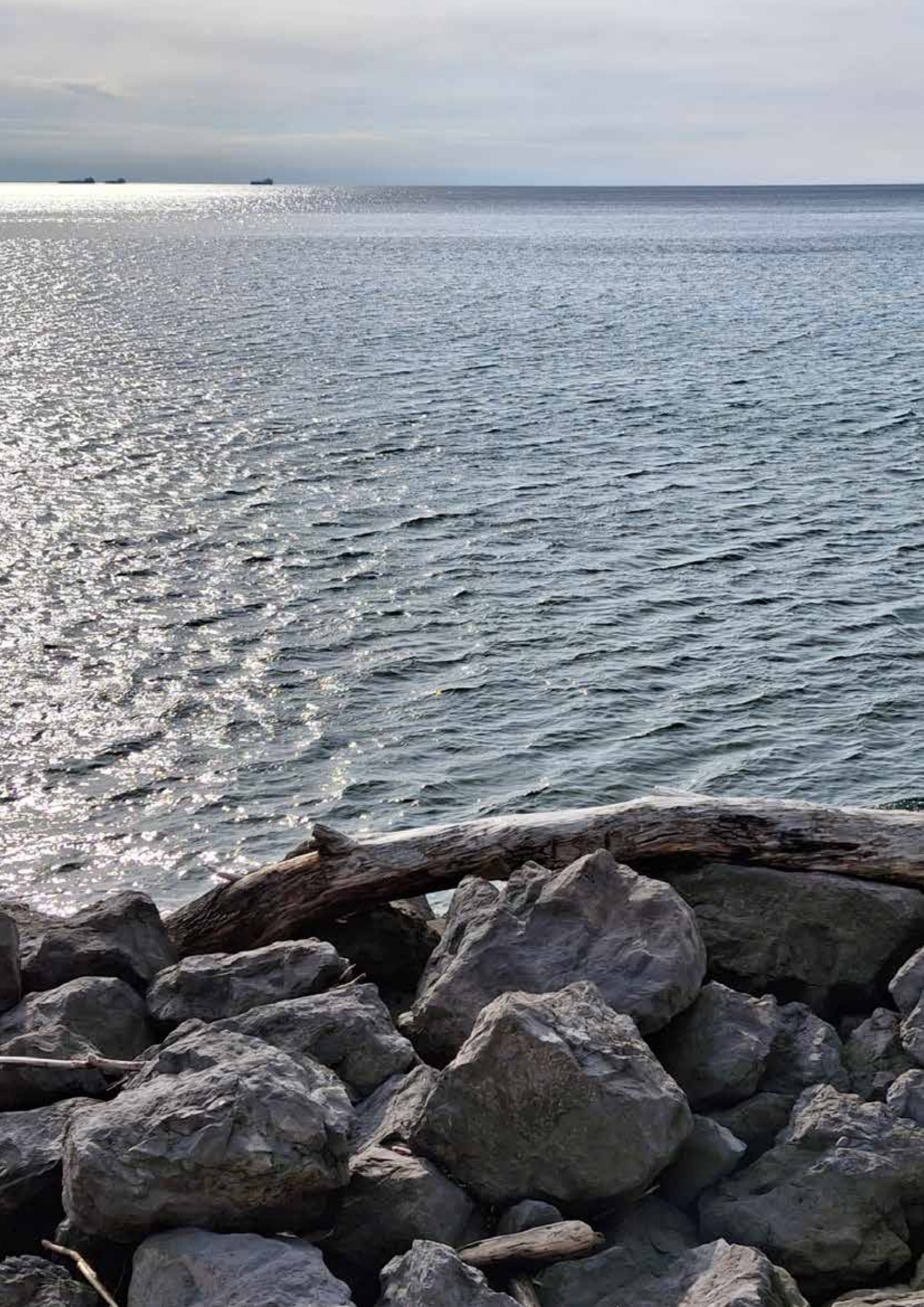
Il nostro mare: sempre più alto e sempre più caldo, anche in profondità.

Il bacino dell'Alto Adriatico è un ecosistema tanto unico quanto delicato, che sta reagendo in modo visibile e accelerato alle sollecitazioni del riscaldamento globale. Questa sezione raccoglie tre contributi fondamentali per comprendere **li cambiamenti del nostro mare**, analizzando attraverso i dati storici e le più moderne tecnologie di monitoraggio due parametri cruciali: l'innalzamento del livello delle acque e l'aumento delle temperature.

Il percorso di lettura si snoda attraverso l'analisi di tre fenomeni rilevanti:

- **Il trend del livello marino:** il primo articolo fotografa la situazione delle nostre coste, evidenziando come anche il 2025 abbia confermato livelli medi ben superiori alla media del secolo scorso, con un ritmo di crescita quasi raddoppiato negli ultimi trent'anni e proiezioni che richiedono grande attenzione per il futuro.
- **Le anomalie termiche nel Golfo di Trieste:** il secondo contributo si focalizza sulle temperature locali, rivelando che il 2025 ha fatto registrare la seconda media annua più alta di sempre per il Golfo, all'interno di un trend di riscaldamento che ha subito una netta impennata a partire dal 2000.
- **Le ondate di calore marine:** l'ultimo articolo approfondisce questo tema, spiegando come le ondate di calore marine non colpiscano più solo la superficie, ma si propaghino fino al fondale dell'Adriatico settentrionale. Misurare questi fenomeni attraverso diversi strumenti di osservazione e utilizzare complessi modelli numerici per simularli, consente di monitorare e prevedere gli effetti di questi estremi termici sugli ecosistemi sommersi.

Un quadro scientifico rigoroso che ci aiuta a decodificare le trasformazioni in atto in un ambiente vitale per la biodiversità e l'economia della nostra regione.





2025: ANCORA UN LIVELLO MEDIO DEL MARE TRA I PIÙ ALTI MAI REGISTRATI

Nel 2025 è proseguita la sequenza di livelli medi annui del mare superiori alla media del secolo scorso.

Dal 1993 la velocità di aumento del livello medio è 3.1 mm/anno, quasi doppia rispetto a quella stimata per il 20° secolo. Come nel 2024, a Trieste non sono state osservati episodi di tracimazione sopra il Molo Sartorio, ma la loro frequenza rimane mediamente in aumento e in futuro si incrementerà, soprattutto nello scenario climatico collegato a emissioni crescenti di gas serra

Il riscaldamento atmosferico globale in corso è responsabile dell'aumento del livello medio del mare attraverso due meccanismi, cioè l'aumento del volume dell'oceano per dilatazione termica e l'aumento della massa oceanica dovuto alla fusione dei ghiacci continentali. Durante il 20° 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.

I dati della stazione mareografica di Trieste Molo Sartorio, attiva da oltre 150 anni, la più antica dell'Adriatico, confermano un andamento del livello medio coerente con la media globale. In particolare dal 1993 l'aumento è avvenuto alla velocità di 3.1 mm/anno.

IL LIVELLO DEL MARE A TRIESTE NEL 2025

NEL 2025 IL LIVELLO MARINO È STATO SOPRA ALLA NORMA FINO A TUTTO OTTOBRE. IL LIVELLO MEDIO ANNUALE È STATO IL QUINTO PIÙ ALTO DAL 1869

Al Molo Sartorio il livello marino viene misurato rispetto allo “Zero Istituto Talassografico”, che si trova 166.2 cm sotto lo Zero altimetrico dell'Istituto Geografico Militare Italiano. Nel 2025 il livello è stato decisamente superiore alla norma fino a tutto ottobre. Il livello medio annuale è stato di 172.2 cm, cioè il quinto valore più alto dal 1869 dopo quelli del 2010, 2024, 2014 e 2023 (curva blu nella figura seguente).

Guardando la serie storica dei dati, si osserva che dal 2000 per ben 12 volte il livello medio del mare ha raggiunto valori mai registrati nel secolo scorso.

Come nel 2024 anche nel 2025 non sono state osservate tracimazioni sopra il Molo Sartorio, tuttavia è evidente che la loro frequenza sia mediamente in aumento (istogramma arancione nella figura). Negli ultimi 150 anni il lungomare di Trieste è stato allagato 79 volte, 53 delle quali fino al 2009, corrispondenti a una frequenza di 0.4 eventi all'anno, e 26 volte dal 2010, pari a 1.6 eventi all'anno.

LA FREQUENZA DELLE TRACIMAZIONI È MEDIAMENTE IN AUMENTO, ANCHE SE NEL 2025 NON SI SONO VERIFICATE

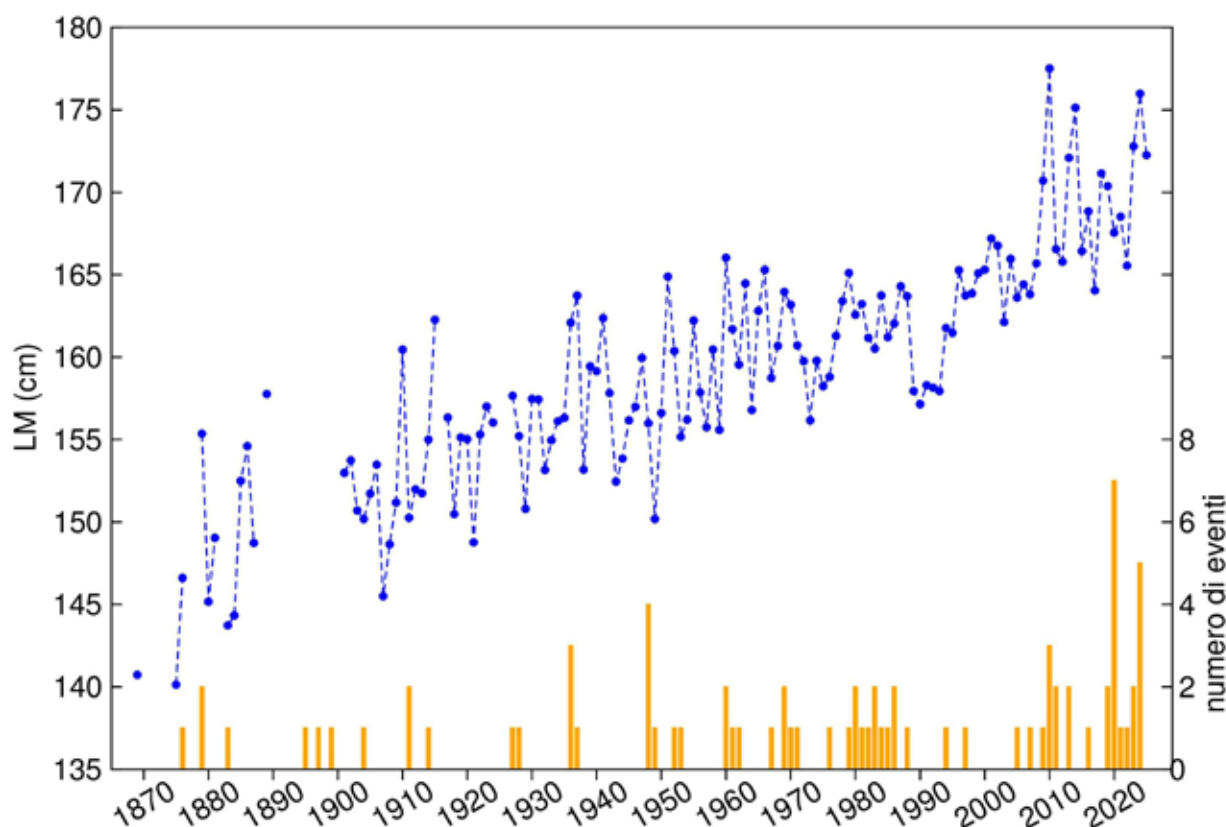
E IN FUTURO QUANTO FREQUENTI SARANNO LE TRACIMAZIONI?

Le future variazioni della frequenza delle tracimazioni a Trieste è oggetto di un recente lavoro pubblicato nella rivista *Natural Hazards* (disponibile in <http://doi.org/10.1007/s11069-025-07879-9>). Sono presi in considerazione gli effetti collegati sia alle variazioni del forzante atmosferico sia all'aumento del livello medio del mare, nei due scenari climatici estremi SSP1-2.6 (più ottimistico) e SSP5-8.5 (più pessimistico), così come definiti nel sesto rapporto dell'IPCC (<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>). Come fa l'IPCC consideriamo come riferimento il periodo 1995-2014, nel quale si osserva in media poco più di una tracimazione all'anno.

Questi i risultati dello studio:

- nello scenario SSP1-2.6 si prevede che intorno al 2050 si verificheranno mediamente circa 10 tracimazioni all'anno e circa 16 nell'SSP5-8.5;
- intorno al 2090 il numero medio di tali eventi sarà circa 51 all'anno nello scenario più ottimistico e circa 200 all'anno in quello più pessimistico.

LIVELLO MEDIO ANNUALE DEL MARE ED EVENTI DI ACQUA ALTA A TRIESTE



Livello medio (LM) annuale dal 1869 al 2025 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 giallo). (Dati: CNR-ISMAR, Trieste.)

Le differenze sono motivate essenzialmente dall'aumento del livello medio, che a metà secolo è previsto essere di 19 cm nello scenario SSP1-2.6 e 23 cm nell'SSP5-8.5, e a fine secolo, rispettivamente, di 39 cm e 67 cm. Da notare che le proiezioni climatiche indicano una minore frequenza di condizioni meteorologiche favorevoli alle acque alte nel nord Adriatico, cioè bassa pressione atmosferica e venti meridionali, ma il forzante atmosferico risulta giocare un ruolo pressoché trascurabile rispetto a quello del livello medio.

Un'altra importante conseguenza del ruolo dominante dell'innalzamento del livello medio del mare è che si prevede che gli eventi di innalzamento del livello del mare diventeranno piuttosto frequenti anche nella stagione estiva, che, nel clima attuale, è quasi priva di inondazioni.

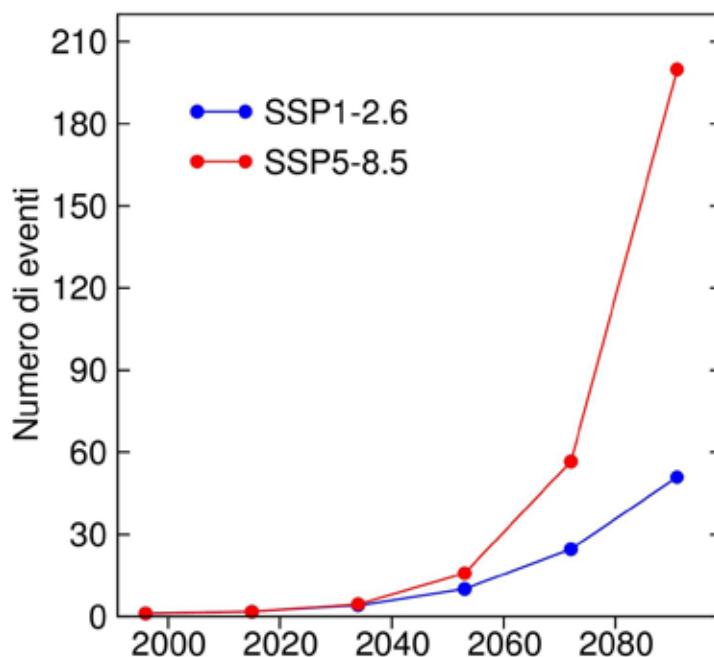
**GLI EVENTI DI
"ACQUA ALTA"
DIVENTERANNO
PIUTTOSTO
FREQUENTI
ANCHE NELLA
STAGIONE
ESTIVA**

diventeranno piuttosto frequenti anche nella stagione estiva, che, nel clima attuale, è quasi priva di inondazioni.

Bisogna comunque precisare che queste previsioni risentono di notevoli incertezze connesse con quelle delle proiezioni dell'andamento del livello medio.

**PER L'AUMENTO
DEL LIVELLO MEDIO
MARINO, INTORNO
AL 2090 CI SARANNO
MEDIAMENTE DA 51
A 200 TRACIMAZIONI
ALL'ANNO A
SECONDA DEGLI
SCENARI DI
EMISSIONE DI GAS
SERRA**

NUMERO DI EVENTI DI ACQUA ALTA A TRIESTE FINO AL 2100



Proiezioni del numero di giorni con superamento del piano del Molo Sartorio a Trieste (tracimazioni), negli scenari SSP1-2.6 (curva blu) e SSP5-8.5 (curva rossa).

CONSIDERAZIONI FINALI

Una considerazione per finire. Qui abbiamo trattato delle tracimazioni, che sono fenomeni evidenti, ma, tra gli impatti dell'aumento del livello marino nell'ambiente urbano, bisogna menzionare l'ostacolo posto al deflusso in mare delle acque meteoriche, che si verifica anche in occasione di eventi di minore entità.

Poiché, nonostante l'incertezza già sopra evidenziata, vi sono indicazioni di un aumento generale della frequenza degli eventi di acqua alta, che diventerà particolarmente rapido nella seconda metà del 21° secolo, risulta quindi evidente l'importanza di una risposta rapida per adattare l'ambiente urbano ai cambiamenti previsti. Senza un'azione immediata, un adattamento o una protezione efficaci potrebbero essere difficili da raggiungere in tempo.

Lorenzo Consorti
CNR-ISMAR
Fabio Raicich

SMA-A Società Meteorologica Alpino-Adriatica

A full-page background image showing a sunset over a body of water. The sun is a bright orange circle on the left, with its light reflecting as a vertical column of shimmering orange on the water's surface. The sky is a gradient of orange and yellow. In the lower right, a small, dark boat with two people is visible on the water.

NEL 2025 LA SECONDA PIÙ ALTA TEMPERATURA MEDIA ANNUA PER IL GOLFO DI TRIESTE

La temperatura del mare si è attestata sopra la norma climatologica anche nel 2025.

La temperatura media annua è stata leggermente inferiore al massimo storico del 2024, e rappresenta la seconda più alta dell'intera serie osservativa.

Tutti i mesi sono stati più caldi della norma.

Le osservazioni evidenziano un notevole riscaldamento del mare soprattutto dopo il 2000.

La temperatura del mare rappresenta uno degli indicatori dell'evoluzione del clima. Dal 1899, sebbene con interruzioni, nel porto di Trieste sono disponibili osservazioni di temperatura del mare in prossimità della superficie (2 m), il cui andamento è fortemente influenzato dagli scambi di calore con l'atmosfera, specialmente su scale temporali fino a qualche settimana.

LA TEMPERATURA DEL MARE NEL 2025

La temperatura media annua del 2025 è stata di 17.9 °C, che, dopo quella del 2024, è la seconda più alta dell'intera serie storica disponibile, di cui la figura riporta il periodo dal 1934. Tutti i mesi sono stati più caldi della norma, specialmente giugno e settembre. È interessante notare che, in un'estate complessivamente ben più calda della norma, agosto 2025 è invece risultato in linea. Questo a causa di temperature relativamente basse tra la fine di luglio e la metà di agosto in coincidenza con frequente vento di Bora.

UN RISCALDAMENTO MOLTO ACCENTUATO DOPO IL 2000

La figura mette in evidenza il notevole riscaldamento, avvenuto specialmente dopo il 2000. Per l'ottavo anno consecutivo, cioè dal 2018, la media annua è stata superiore a 17 °C, fatto verificatosi in precedenza solo nel 2014. Dal 2000 la temperatura è aumentata in media alla velocità di 0.7 °C per decennio, corrispondente a 1.7 °C in 25 anni.

Lorenzo Consorti

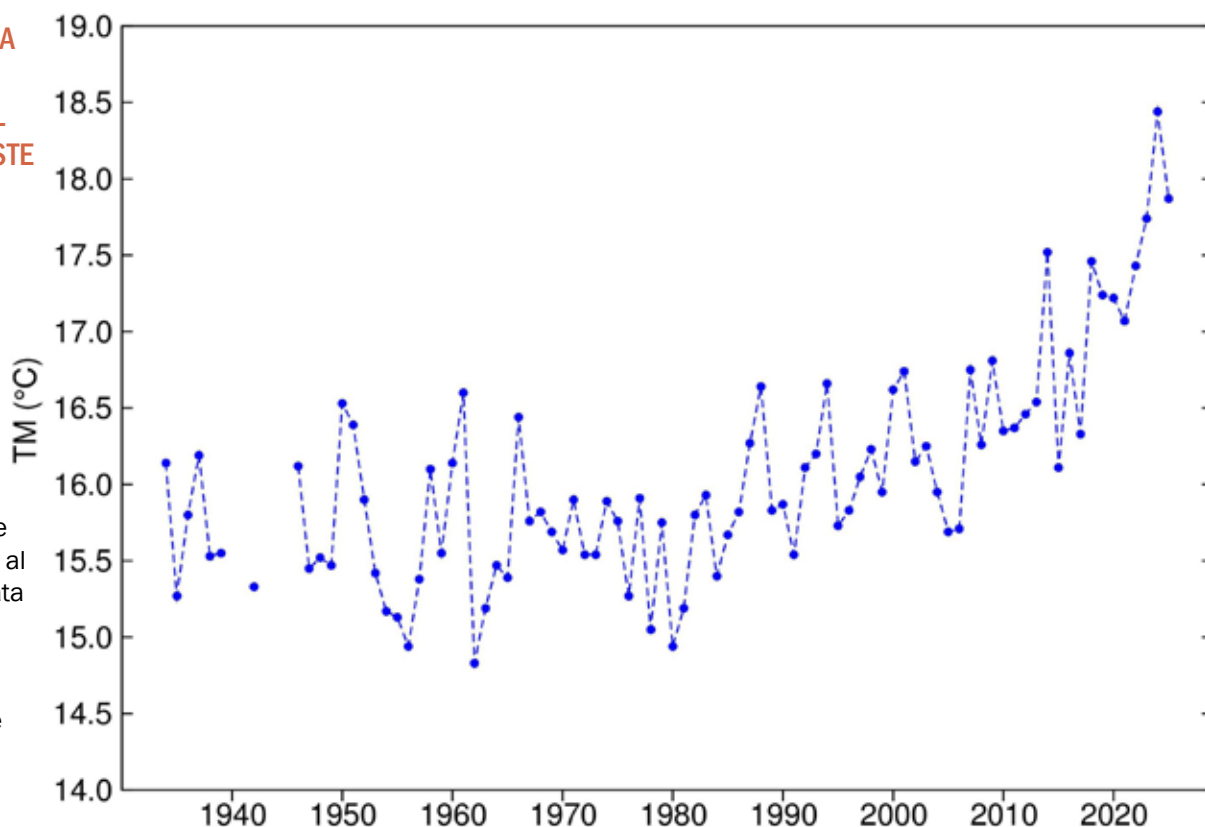
CNR-ISMAR

Fabio Raicich

SMA-A Società Meteorologica Alpino-Adriatica

TEMPERATURA MEDIA ANNUALE DEL MARE A TRIESTE 1934-2025

Temperatura media annuale (TM) dal 1934 al 2025, osservata a 2 m di profondità. (Dati: CNR-ISMAR, Trieste e ARPA FVG - RAFVG.)





UN MARE SEMPRE PIU' CALDO, IN SUPERFICIE E IN PROFONDITÀ

In 30 anni la temperatura superficiale del Mediterraneo è cresciuta di oltre 1 °C. Aumentano anche le ondate di calore marine, che nel Nord Adriatico si propagano fino al fondo, danneggiando gli ecosistemi.

Dati satellitari integrati con misure locali su tutta la colonna d'acqua monitorano questi eventi e la crescita del contenuto di calore degli oceani.

I modelli numerici evidenziano inoltre per le nostre coste un'ampia variabilità termica, che si accentuerà in futuro con eventi di caldo estremo sempre più marcati.

Negli ultimi decenni il cambiamento climatico di origine antropica sta modificando in modo profondo il funzionamento degli oceani e dei mari. Tra i segnali più evidenti di questo cambiamento c'è l'aumento della temperatura delle acque marine, che assorbono oltre il 90% del calore in eccesso accumulato nel sistema climatico. Questo riscaldamento non è uniforme, ma interessa in modo particolarmente marcato alcune regioni, tra cui il Mar Mediterraneo, che è considerato un vero e proprio "hotspot" climatico.

LA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL MARE

NEGLI ULTIMI 30 ANNI LA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL MEDITERRANEO, MISURATA DAI SATELLITI, È AUMENTATA DI OLTRE 1 °C

Uno degli indicatori più utilizzati per monitorare questi cambiamenti è la temperatura superficiale del mare, parametro spesso indicato anche con l'acronimo SST, dalla dizione inglese *Sea Surface Temperature*. Grazie ai satelliti, che misurano la radiazione infrarossa emessa dalla superficie marina, è oggi possibile osservare con grande continuità come la temperatura degli oceani stia evolvendo nel tempo. Le analisi condotte nell'ambi-

to del programma europeo Copernicus -cui anche OGS contribuisce in modo importante- mostrano che negli ultimi 30 anni la SST del Mediterraneo è aumentata di oltre 1 °C, in linea con il riscaldamento globale osservato a scala planetaria.

LE ONDATE DI CALORE MARINE E LE LORO CONSEGUENZE

Sia a livello planetario (IPCC, 2023), sia a livello Mediterraneo (MedECC, 2023) a questo incremento dei valori medi di temperatura si affianca anche un fenomeno sempre più rilevante: l'aumento degli eventi estremi. In particolare, le cosiddette ondate di calore marine (*Marine Heat*

LE ONDATE DI CALORE MARINE STANNO DIVENTANDO PIÙ FREQUENTI, PIÙ INTENSE E PIÙ DURATURE, MENTRE GLI EPISODI DI FREDDO ESTREMO TENDONO A DIMINUIRE

Waves) stanno diventando più frequenti, più intense e più durature, mentre gli episodi di freddo estremo (*Marine Cold Spells*) tendono a diminuire.

Un'ondata di calore marina è definita come un periodo prolungato in cui la temperatura del mare supera una soglia elevata rispetto alle condizioni tipiche di una determinata area e stagione. Negli ultimi anni, studi e rap-

porti internazionali hanno evidenziato come questi eventi stiano aumentando non solo in superficie, ma anche in profondità, amplificando i loro effetti sugli ecosistemi.

Le conseguenze per gli ambienti marini possono essere significative. Temperature anomale possono alterare i cicli vitali degli organismi, favorire la diffusione di specie invasive, causare mortalità di massa e modificare le reti alimentari. Inoltre, l'acqua più calda trattiene meno ossigeno, contribuendo a condizioni di ipossia che mettono ulteriormente sotto stress gli ecosistemi.

LE ONDATE DI CALORE MARINE STANNO AUMENTANDO ANCHE IN PROFONDITÀ, CON GRAVI EFFETTI SUGLI ECOSISTEMI



Nel caso del Nord Adriatico, questi fenomeni assumono caratteristiche particolarmente rilevanti. Si tratta infatti di un bacino poco profondo, con fondali generalmente compresi tra i 15 e i 50 metri, dove le anomalie di temperatura superficiale possono propagarsi rapidamente lungo tutta la colonna d'acqua. Questo significa che un'ondata di calore marina non resta confinata agli strati superficiali, ma può raggiungere il fondo, influenzando direttamente habitat bentonici e organismi che vivono a contatto con il sedimento.

**NEL NORD ADRIATICO,
POCO PROFONDO,
L'ANOMALIA DI
TEMPERATURA
SI PROPAGA
RAPIDAMENTE
FINO AL FONDALE,
INFLUENZANDONE
HABITAT E ORGANISMI**

STRUMENTAZIONI E DATI: SERVE UN APPROCCIO INTEGRATO

Per studiare questi fenomeni, le osservazioni satellitari rappresentano uno strumento fondamentale, ma non sufficiente. Esse forniscono infatti una visione bidimensionale (limitata alla sola superficie) degli eventi, senza informazioni dirette su ciò che accade in profondità. Per questo motivo, è necessario integrare i dati satellitari con misure raccolte direttamente in mare lungo la colonna d'acqua, utilizzando strumenti come boe, ormeggi fissi (*mooring*), *glider* e *float*. Diverse iniziative internazionali, tra cui le reti osservative nel Mediterraneo gestite da OGS e la rete degli ARGO float contribuiscono alla raccolta di questi dati.

IL CONTENUTO DI CALORE DEGLI OCEANI

Grazie a questi sistemi è stato possibile ricostruire anche l'andamento di un altro indicatore che fornisce un segnale chiarissimo di come il riscaldamento di mari e oceani abbia raggiunto valori senza precedenti: il contenuto di calore degli oceani (*Ocean Heat Content*, OHC). Secondo analisi recenti sintetizzate anche dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale, l'oceano globale ha registrato livelli record di OHC, confermando una tendenza in crescita continua.

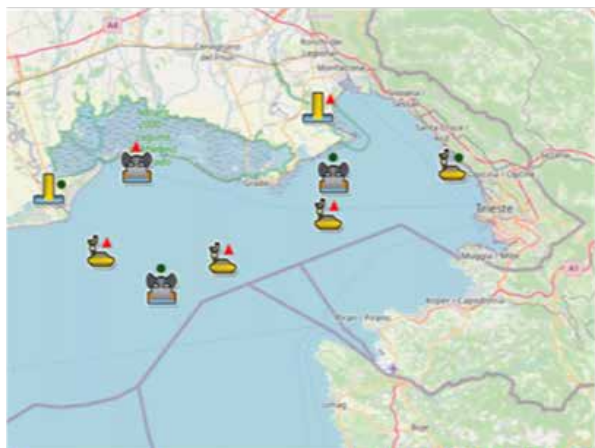
**IL CONTENUTO
DI CALORE
DEGLI OCEANI
HA RAGGIUNTO
VALORI
RECORD,
CONFERMANDO
UNA TENDENZA
IN CRESCITA
CONTINUA**

**L'ACCUMULO
DI CALORE
NEGLI OCEANI
CONTRIBUISCE A
ONDATE DI CALORE
MARINE SEMPRE
PIÙ INTENSE E
PERSISTENTI E
ALL'INNALZAMENTO
DEL LIVELLO DEL
MARE**

L'aumento dell'OHC rappresenta una stima particolarmente robusta del riscaldamento globale – meno soggetta a variabilità rispetto alla temperatura dell'aria – e aiuta a monitorare come fenomeni quali le ondate di calore marine stiano diventando sempre più intensi e persistenti. Inoltre, l'accumulo di calore negli strati più profondi contribuisce all'innalzamento del livello

del mare e amplifica gli effetti sugli ecosistemi marini, rendendo ancora più evidente la natura tridimensionale del riscaldamento oceanico.

SISTEMI DI MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA DEL MARE



Dall'alto in senso orario un aliante sottomarino (*glider*), un galleggiante trasportato dalla corrente per misure di profondità (ARGO *float*), una boa fissa. In basso a sinistra i punti fissi di misura del sistema osservativo nel Golfo di Trieste gestito da OGS in collaborazione con la Protezione Civile Regionale.

ESTREMI SEMPRE PIÙ FREQUENTI: COSA DICONO LE SIMULAZIONI

**GIÀ NEL CLIMA
ATTUALE LE AREE
COSTIERE DEL
NORD ADRIATICO
HANNO VARIAZIONI
TERMICHE PIÙ
AMPIE ED EVENTI
ESTREMI PIÙ INTENSI
RISPETTO A ZONE PIÙ
PROFONDE**

Accanto alle osservazioni, un ruolo sempre più importante è svolto dalla modellistica numerica. I modelli oceanografici permettono infatti di ricostruire la distribuzione tridimensionale della temperatura con elevato dettaglio spaziale e temporale, sia per il passato, sia per possibili scenari futuri legati alle emissioni di gas serra. In questo modo è possibile stimare come cambieranno gli estremi termici nel corso del XXI secolo.

► Gli indicatori utilizzati e i risultati delle simulazioni sono spiegati dettagliatamente nel box I **RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CLIMA ATTUALE E PER IL FUTURO**

In sintesi, già nel clima attuale, le aree costiere del Nord Adriatico tendono a subire variazioni termiche più ampie ed eventi estremi più intensi rispetto ad altre zone più profonde. Qui le temperature minime invernali sono più fredde e le massime estive sono più calde.

Questo fenomeno è dovuto a due fattori principali:

- **La scarsa profondità:** avendo meno volume d'acqua a parità di superficie, i mari poco profondi hanno una minore inerzia termica. Di conseguenza, le acque costiere si scaldano e si raffreddano molto più velocemente, seguendo da vicino l'andamento della temperatura dell'aria.
- **La posizione geografica:** il Nord Adriatico è il punto più settentrionale dell'intero Mediterraneo ed è quindi esposto a climi invernali più freddi, spesso caratterizzati da forti venti di Bora; lo scambio con altre masse d'acqua, che mitigherebbe le variazioni, è ridotto dalla conformazione geografica.

Per quanto riguarda il futuro, già entro la metà del secolo i giorni con temperature che oggi consideriamo 'freddo estremo' spariranno quasi del tutto, mentre le giornate di caldo estremo aumenteranno fino a diventare dieci volte più frequenti rispetto a oggi.

**IN FUTURO LE GIORNATE
DI FREDDO ESTREMO
TENDERANNO A
SCOMPARIRE,
MENTRE QUELLE DI
CALDO ESTREMO
AUMENTERANNO DI
MOLTO**

Guardando a fine secolo, nello scenario peggiore, le simulazioni indicano che per ben un terzo dell'anno potremmo riscontrare condizioni di caldo estremo rispetto ai valori odierni. Poiché il Nord Adriatico è un bacino poco profondo, questo riscaldamento interesserà non solo la superficie del mare, ma l'intera colonna d'acqua, fino al fondale.

IMPATTI E SFIDE FUTURE

L'aumento delle temperature nel Nord Adriatico potrebbe quindi avere effetti significativi: riduzione dell'ossigeno disciolto, alterazioni degli ecosistemi, aumento della frequenza di eventi estremi e impatti crescenti sulle attività umane, come pesca, acquacoltura e turismo. Comprendere e monitorare questi fenomeni è essenziale per sviluppare strategie di adattamento e gestione sostenibile di un ambiente tanto delicato quanto cruciale per le comunità costiere.

**Cosimo Solidoro, Dona Canu, Fabio Giordano,
Stefano Querin, Marco Reale, Stefano Salon**

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica
Sperimentale – OGS

Martin Vodopivec

National Institute of Biology, Marine Biology Station
Piran (Slovenia)

Matjaž Ličer

National Institute of Biology, Marine Biology Station
Piran e Slovenian Environment Agency (Slovenia)

ESTREMI TERMICI: I RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CLIMA ATTUALE E PER IL FUTURO

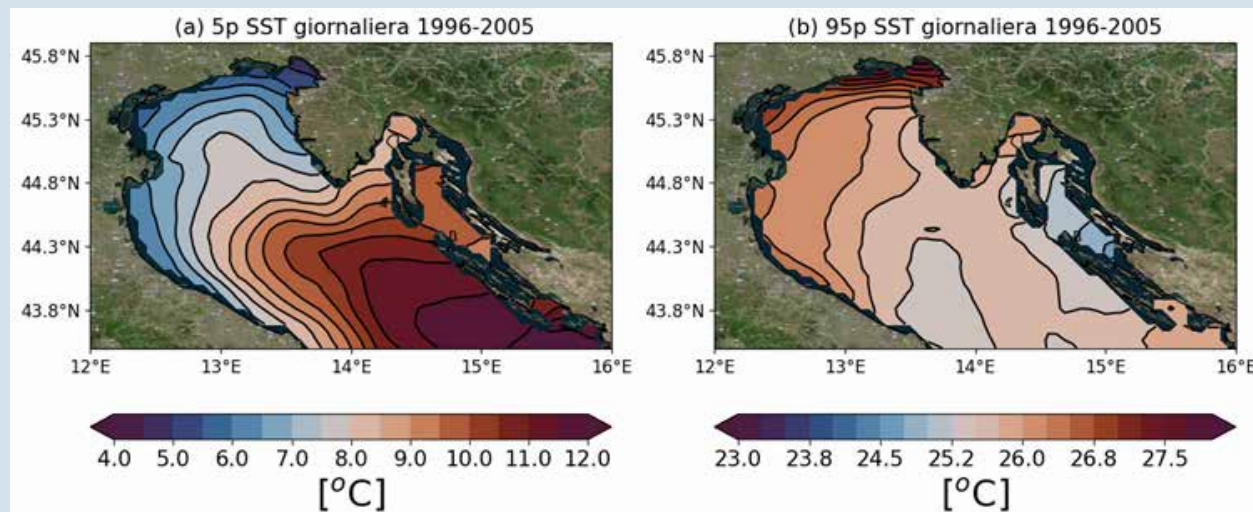
Le simulazioni modellistiche quindi permettono anche di quantificare come cambieranno gli estremi termici nel Nord Adriatico nei prossimi decenni.

Per descrivere questi cambiamenti in modo efficace spesso si utilizzano indicatori statistici come il 5° e il 95° percentile della temperatura. Il primo rappresenta la soglia di temperatura superata dal 95% delle osservazioni e quindi non superata solo dal 5% delle osservazioni più fredde: essa indica pertanto una soglia tipica degli eventi freddi estremi. La seconda, con ragionamento analogo ma opposto, identifica la soglia degli eventi caldi estremi, quella superata solo dal

5% dei casi. Queste soglie vengono calcolate per ogni punto dello spazio, sulla base della base degli andamenti storici degli ultimi 30 anni e variano nello spazio.

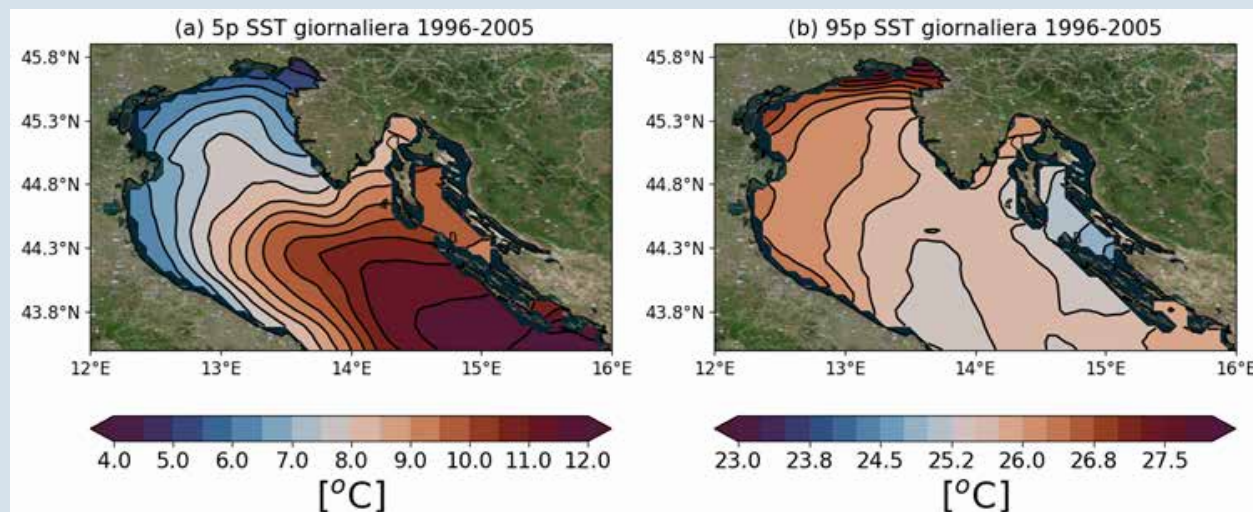
Le mappe seguenti illustrano appunto la distribuzione spaziale di queste soglie e indicano come già nel clima attuale le aree costiere del Nord Adriatico tendono ad avere variabilità più ampie ed eventi estremi più intensi rispetto alle zone più profonde del bacino, con soglie tipiche fredde più basse, e soglie tipiche calde più alte. È un effetto dovuto al fatto che le zone costiere e poco profonde, avendo meno acqua a parità di superficie e quindi meno inerzia termica, seguono maggiormente l'andamento della temperatura dell'aria. Inoltre, il Nord Adriatico è la zona più a nord del Mediterraneo: questo significa che le nostre zone costiere sono naturalmente più esposte a variazioni estreme.

SOGLIE TIPICHE DEGLI EVENTI ESTREMI IN SUPERFICIE



Distribuzione spaziale del 5° (a) e 95° (b) percentile nel periodo 1996-2005.

SOGLIE TIPICHE DEGLI EVENTI ESTREMI AL FONDO



Distribuzione spaziale del 5° (a) e 95° (b) percentile nel periodo 1996-2005.

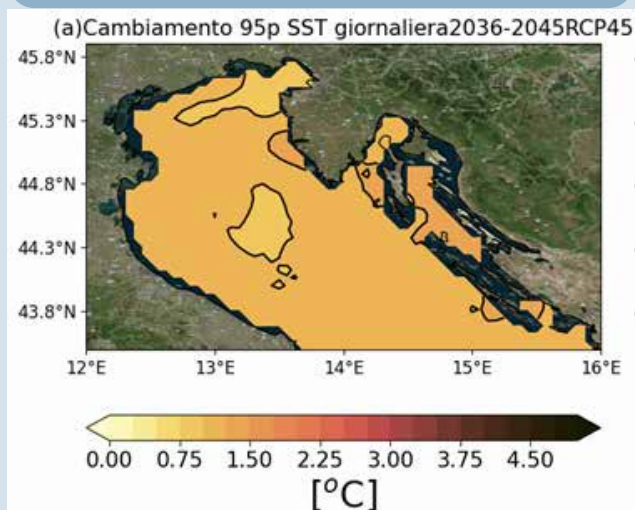
Quando si guarda al futuro, il quadro cambia in modo marcato. Le simulazioni basate su diversi scenari di emissione di gas serra indicano un aumento significativo delle temperature estreme, sia in superficie che sul fondo marino. Nello scenario intermedio (RCP4.5) l'aumento è già evidente entro la metà del secolo, mentre nello scenario ad alte emissioni

(RCP8.5) diventa molto più pronunciato, con incrementi che possono raggiungere diversi gradi, in particolare nelle aree costiere. Questo riscaldamento non riguarda solo i valori medi, ma anche – e soprattutto – le soglie estreme, che si spostano verso temperature sempre più elevate.

CAMBIAMENTO NELLE SOGLIE DI TEMPERATURA PIÙ ALTA (95° PERCENTILE DELLA SST) GIORNALIERA NEI PERIODI 2036-2045 E 2076-2085 RISPETTO AL PERIODO 1996-2005

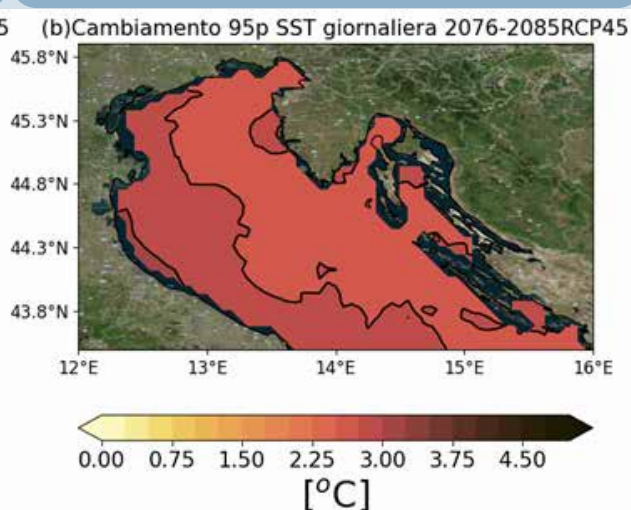
a) 2036-2045

RPC 4.5



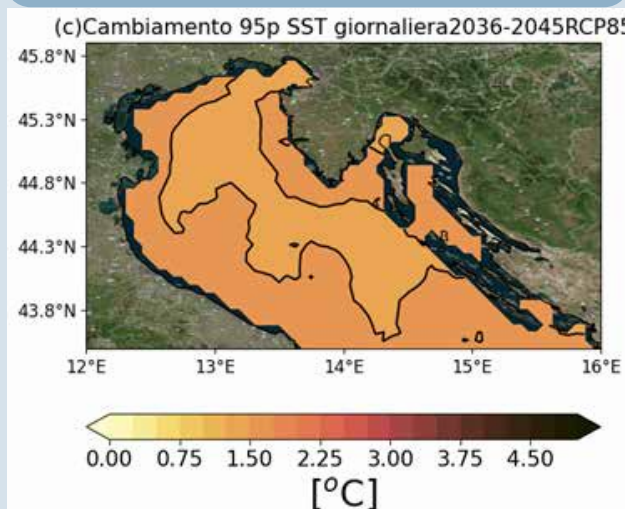
b) 2076-2085

RPC 4.5



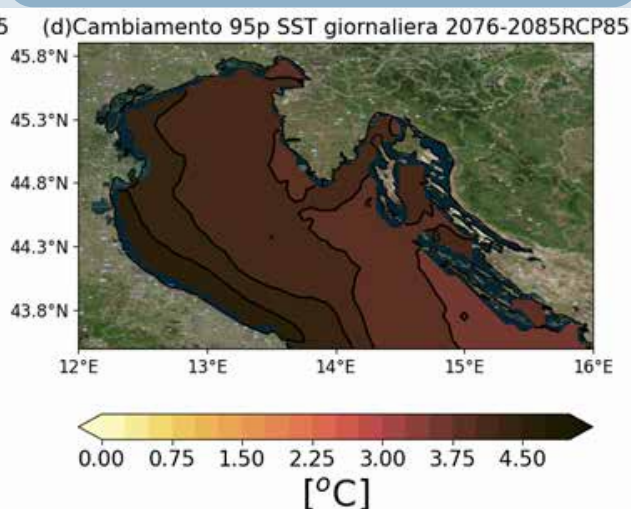
c) 2036-2045

RPC 8.5



d) 2076-2085

RPC 8.5



Proiezioni per uno scenario più conservativo (RCP4.5: a,b) e per uno a più alto tasso di emissioni (RCP8.5: c,d)

Un risultato particolarmente rilevante riguarda la frequenza di questi eventi. Contando il numero di giorni in cui la temperatura supera il 95° percentile del periodo attuale (eventi

**GIÀ ENTRO LA METÀ
DEL SECOLO LE
GIORNATE DI FREDDO
ESTREMO TENDONO
A SCOMPARIRE,
QUELLE DI CALDO
ESTREMO DIVENTANO
DIECI VOLTE PIÙ
FREQUENTI**

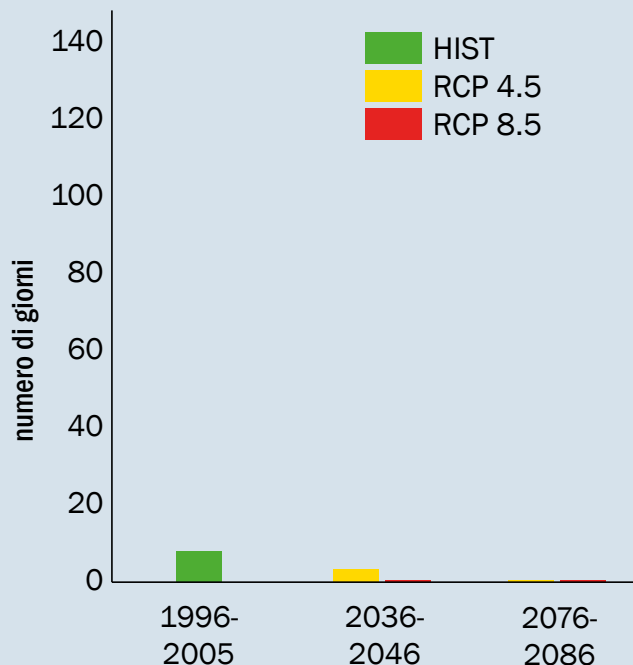
più caldi della temperatura ora considerata eccezionale) o scende sotto il 5° percentile (eventi più freddi) rispetto al clima attuale, emerge un cambiamento drastico. Già entro la metà del secolo, le giornate caratterizzate da freddo estremo tendono a scomparire quasi

completamente, mentre quelle di caldo estremo aumentano di circa un ordine di grandezza, diventando fino a dieci volte più frequenti.

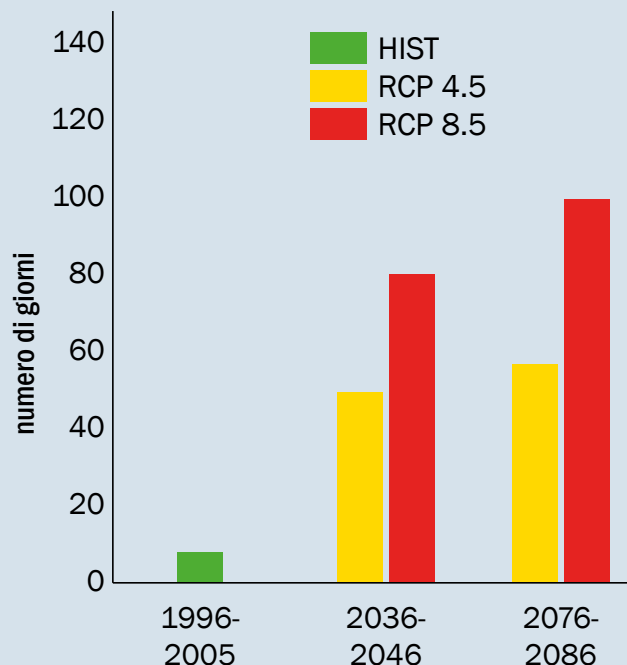
Verso la fine del secolo, nello scenario più pessimistico, le simulazioni indicano che fino a un terzo dell'anno potrebbe essere caratterizzato da condizioni di caldo estremo rispetto ai valori odierni. Ancora una volta, questo segnale è evidente non solo in superficie, ma anche sul fondo, confermando come, in un bacino poco profondo come il Nord Adriatico, l'intera colonna d'acqua sia interessata da questi cambiamenti.

**VERSO LA FINE
DEL SECOLO,
FINO A UN TERZO
DELL'ANNO
POTREBBE
ESSERE
CARATTERIZZATO
DA CONDIZIONI
DI CALDO
ESTREMO
RISPETTO AI
VALORI ODIERNI**

NUMERO GIORNI SST INFERIORE AL 5° PERCENTILE



NUMERO GIORNI SST SUPERIORE AL 95° PERCENTILE



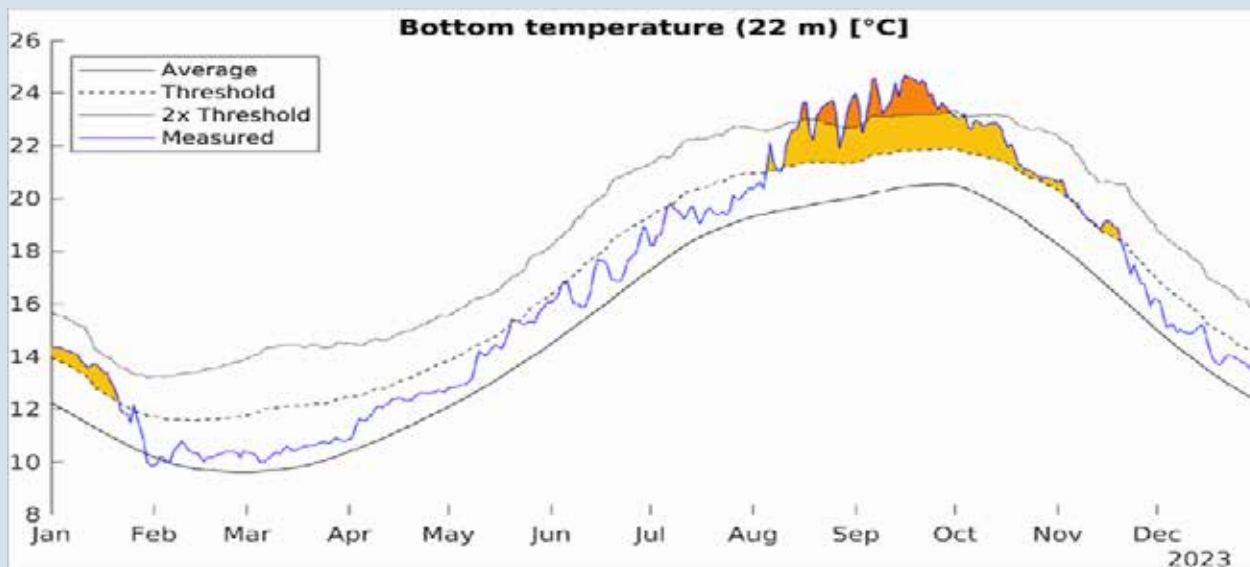
Numero medio di giorni nel Nord Adriatico con la SST minore del 5° percentile (pannello a sinistra) e superiore al 95° percentile (pannello a destra) nel periodo 1996-2005 (verde) e nei periodi 2036-2045 e 2076-2085 nello scenario di emissione RCP4.5 (giallo) e RCP8.5 (rosso)

UN'ONDA DI CALORE NON VISIBILE DALLA SUPERFICIE

Nell'estate e nell'autunno del 2023, un termometro installato a 22 m di profondità al di sotto della boa Vida nel Golfo di Trieste ha registrato temperature insolitamente elevate.

L'ondata di calore è iniziata nei primi giorni di agosto ed è durata 108 giorni. Al suo apice, la temperatura del fondo ha raggiunto 4,3 °C al di sopra della media ventennale e 1,2 °C al di sopra della temperatura giornaliera massima registrata dal termometro dal suo posizionamento nel 2002.

TEMPERATURA AL FONDO BOA VIDA

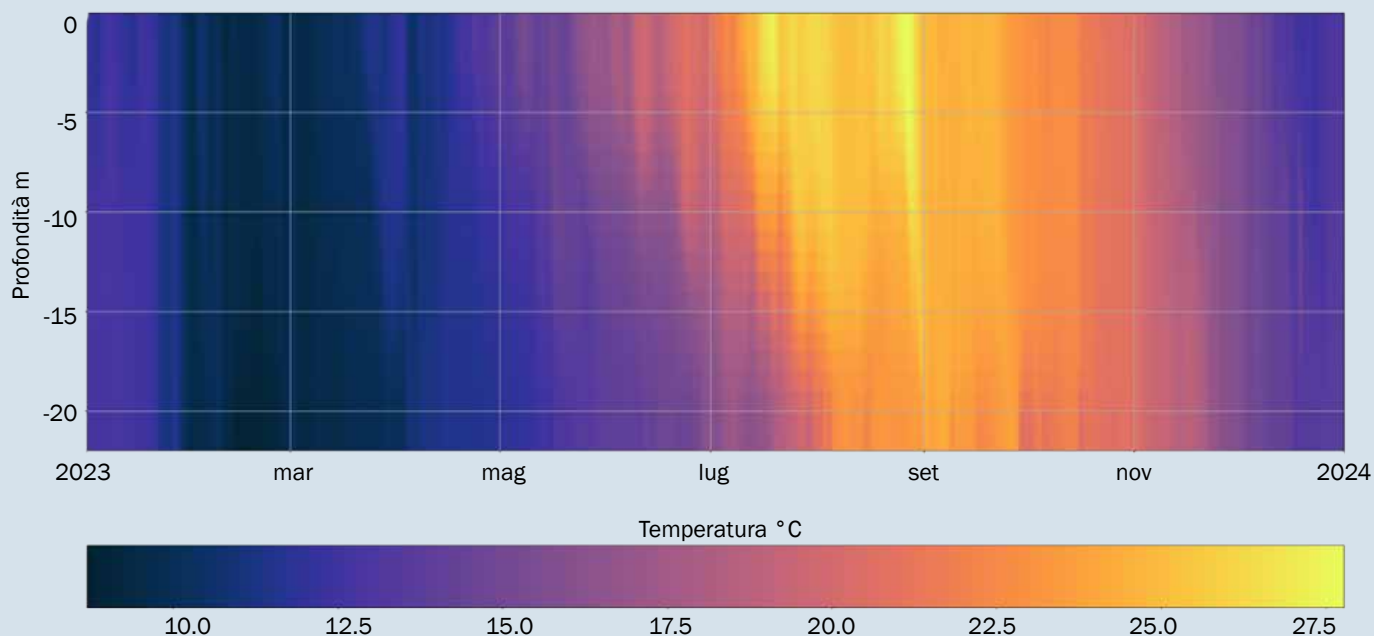


Temperatura al fondo misurata (linea blu) in corrispondenza della boa Vida. La linea nera continua rappresenta una media a lungo termine, la linea nera tratteggiata rappresenta il 90° percentile e la linea nera sottile rappresenta il doppio della differenza tra la media e il 90° percentile. Queste ultime due costituiscono le soglie che definiscono le ondate di calore rispettivamente di categoria I e di categoria II (Hobday et al., 2018).

Un evento di questo tipo rappresenta uno stress termico senza precedenti per le specie bentoniche e demersali (ossia quelle che vivono nei pressi del fondale), che non sono adattate a forti variazioni di temperatura e non possono migrare verso acque più fredde.

È interessante notare che l'ondata di calore marina in superficie è iniziata più di un mese dopo quella di fondo. A quel punto, la colonna d'acqua era già ben mescolata e la temperatura superficiale corrispondeva alla temperatura record misurata in profondità.

CICLO STAGIONALE DEL PROFILO VERTICALE DI TEMPERATURA DEL MARE NEL GOLFO DI TRIESTE NEL 2023



Le osservazioni e i risultati delle simulazioni modellistiche hanno mostrato che l'ondata di calore al fondo è stata preceduta dalla siccità del 2022, protrattasi fino alla primavera e all'estate del 2023. Il mancato apporto di acqua dolce ha comportato un'elevata salinità superficiale e una ridotta stratificazione della colonna d'acqua, permettendo un rimescolamento molto più efficace del solito in quel periodo dell'anno, rimescolamento che ha raggiunto il fondo del Golfo di Trieste. Sebbene il 2023 sia stato un anno caldo, il calore è stato assorbito da uno strato d'acqua molto più spesso del normale. Ciò ha comportato solo un moderato aumento della SST (temperatura superficiale del mare), mentre le temperature a 20 metri di profondità hanno raggiunto livelli senza precedenti, causando un'ondata di calore al fondo di lunga durata. A causa del limitato riscaldamento degli strati superficiali, non vi è stato alcun segnale del riscaldamento estremo al fondo che potesse essere rilevato dai satelliti o da termometri in superficie, quindi il fenomeno è stato osservato solo dai termometri installati in profondità e analizzato poi dai modelli numerici. Tali eventi possono quindi passare inosservati pur esercitando uno stress estremo sull'ecosistema marino. Poiché si prevede che in futuro i periodi di siccità diventeranno più frequenti, è probabile che tali eventi si verifichino con maggiore frequenza.

MedECC: l'IPCC DEL MEDITERRANEO

Il Mediterranean Experts on Climate and environmental Change (MedECC) è una rete internazionale indipendente di scienziati, fondata nel 2015, che fornisce conoscenze scientifiche aggiornate sui cambiamenti climatici e ambientali nel Mediterraneo. In modo analogo all'IPCC su scala globale, il MedECC non svolge ricerca originale né produce nuovi dati, ma raccoglie, valuta e integra criticamente la letteratura scientifica esistente per fornire un quadro autorevole, aggiornato e comprensibile ai decisori politici, agli stakeholder e al pubblico, attraverso la preparazione di report di valutazione (*assessment*) sullo stato della regione e sui rischi associati.

Il **Primo Rapporto di Valutazione del Mediterraneo (MAR1)**, pubblicato nel 2020, rappresenta la prima sintesi completa delle conoscenze sui cambiamenti climatici e ambientali nel bacino mediterraneo. Il report è stato redatto da circa 190 scienziati di 25 Paesi e include un *Summary for Policymakers* che riassume i principali messaggi chiave.

I risultati del MAR1 evidenziano che il Mediterraneo è una delle regioni più vulnerabili al cambiamento climatico globale. Le temperature sono già aumentate di circa 1,5°C rispetto all'epoca preindustriale, con un riscaldamento superiore alla media globale. Le proiezioni indicano un ulteriore aumento fino a 3,8–6,5 °C entro il 2100 negli scenari ad alte emissioni. Si prevede inoltre una riduzione delle precipitazioni estive (fino al 30% in alcune aree), un aumento delle ondate di calore, dell'aridità e della scarsità idrica. Il livello del mare è già in aumento e potrebbe crescere fino a quasi un metro entro fine secolo. Gli impatti sono amplificati da pressioni antropiche come urbanizzazione, inquinamento, uso non sostenibile delle risorse e introduzione di specie non indigene. Questi cambiamenti influenzano ecosistemi, biodiversità, agricoltura, pesca, salute umana ed economia, rendendo necessari interventi urgenti di adattamento e mitigazione.

Il **Secondo Rapporto di Valutazione (MAR2)** è attualmente in fase di sviluppo e rappresenterà un aggiornamento delle conoscenze scientifiche più recenti. Il processo è iniziato nel 2025 con il primo incontro degli autori e prevede diverse fasi di redazione e revisione scientifica, interna ed esterna, nel corso del 2026–2027. La pubblicazione finale è prevista per il 2028. Con il MAR2 si intende aggiornare e fornire una base scientifica solida, condivisa e policy-relevant per affrontare in modo più efficace le sfide climatiche e ambientali del Mediterraneo.



SPECIALE LA COSTA E LA LAGUNA



SPECIALE

LE COSTE E LA LAGUNA

La fascia costiera e lagunare del Friuli Venezia Giulia rappresenta un sistema di transizione unico, dove le dinamiche terrestri e marine si fondono in un equilibrio delicato. All'interno di *Segnali dal clima in FVG 2026*, abbiamo scelto di riunire in questo "speciale" quattro ambiti di ricerca specifici per offrire una visione d'insieme su come il litorale regionale stia rispondendo alle sollecitazioni del riscaldamento globale.

L'innalzamento del livello del mare e l'aumento delle temperature non sono infatti fenomeni isolati, ma fattori che intervengono contemporaneamente sulla geologia, sulla biologia e sul tessuto antropico della costa. Il percorso di questo focus è strutturato per descrivere tali interazioni attraverso quattro sezioni complementari:

- **LE COSTE ROCCIOSE:** l'analisi parte dalla struttura fisica del Golfo di Trieste, dove le falesie calcaree e a flysch conservano le tracce delle variazioni marine del passato e oggi affrontano un'accelerazione dell'innalzamento del mare, che agisce sulle formazioni rocciose e altera i peculiari ecosistemi di scogliera.
- **LE DUNE E LE ISOLE BARRIERA:** lo sguardo si sposta sui sistemi sabbiosi delle lagune di Marano e Grado. Questi ambienti, se correttamente gestiti, mostrano una naturale dinamicità e capacità di adattamento all'innalzamento del mare, offrendo spunti importanti per strategie di ripristino basate sulla natura.

- **SCENARI FUTURI PER CITTÀ COSTIERE E BENI CULTURALI:** la terza sezione illustra come attraverso analisi attuali, proiezioni future e strumenti modellistici si possano valutare i rischi collegati all'innalzamento marino che interessano i centri urbani costieri e le aree archeologiche retrostanti, delineando possibili scenari futuri basati su diversi livelli di riscaldamento globale.
- **LA VITA VEGETALE NELLA LAGUNA E SUI FONDALI:** il focus biologico esplora lo stato di salute della flora sommersa e costiera, dalle praterie marine ai canneti lagunari. Si tratta di ecosistemi essenziali per la biodiversità e per il sequestro del carbonio, la cui distribuzione sta cambiando a causa della progressiva salinizzazione della laguna e del riscaldamento delle acque marine, che si sommano ad altre pressioni antropiche.

Raggruppare questi contributi in un unico speciale consente di osservare la costa e la laguna della nostra regione non come una serie di elementi separati, ma come un sistema integrato. La comprensione di queste connessioni è il presupposto necessario per supportare le scelte di gestione e pianificazione adattativa che attendono il nostro territorio nei prossimi anni, ma anche per promuovere scelte e comportamenti consapevoli da parte della cittadinanza.

147 LE COSTE ROCCIOSE

149 LE COSTE ROCCIOSE DEL FVG, TESTIMONI RESISTENTI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

165 VIAGGIO NEL TEMPO: IL LIVELLO DEL MARE ADRIATICO DALLA PREISTORIA A OGGI

169 LA “CASA DELLA MAREA”: VITA E STATO DELL’AMBIENTE SULLE NOSTRE SCOGLIERE

181 LE DUNE E LE ISOLE BARRIERA

183 UNA RISPOSTA NATURALE ALL’INNALZAMENTO DEL MARE: L’EVOLUZIONE DELLE ISOLE BARRIERA

195 DIFENDERE LE NOSTRE COSTE CON SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA: IL RIPRISTINO DELLE DUNE COSTIERE

205 UN OCCHIO (SATELLITARE) DI RIGUARDO PER I NIDI DI BECCACCIA, FRATINO E ALTRI UCCELLI SULLE DUNE COSTIERE

213 SCENARI FUTURI PER CITTÀ COSTIERE E BENI CULTURALI

215 SALE IL LIVELLO DEL MARE: LE ANALISI DI ARPA FVG SUI POSSIBILI IMPATTI PER COSTE E LAGUNE DEL FVG

225 GRADO: SCENARI FUTURI DI ALLAGAMENTO COSTIERO SECONDO I LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE

231 INNALZAMENTO DEL MARE, DELLE FALDE ACQUIFERE DEL FIUME: SCENARI FUTURI PER AQUILEIA

243 LA VITA VEGETALE NELLA LAGUNA E SUI FONDALI

245 IL DESTINO DEI CANNETI ALLA FOCE DELLO STELLA IN UNA LAGUNA SEMPRE PIÙ MARINIZZATA

253 L’ESPANSIONE DELLE FANEROGAME MARINE NELLA LAGUNA DI GRADO-MARANO: DALLO SPAZIO I SEGNALI DI UNA LAGUNA CHE CAMBIA

261 A BORDO DEL PROGETTO BRIGANTINE: UN CONCENTRATO DI TECNOLOGIA PER UN MONITORAGGIO COSTIERO SOSTENIBILE

267 BLUE CARBON: IL RUOLO NASCOSTO DEGLI ECOSISTEMI MARINI NELLA LOTTA AL CAMBIAMENTO CLIMATICO

SPECIALE

LE COSTE E LA LAGUNA

LE COSTE ROCCIOSE

Dalle testimonianze del passato ai cambiamenti di oggi

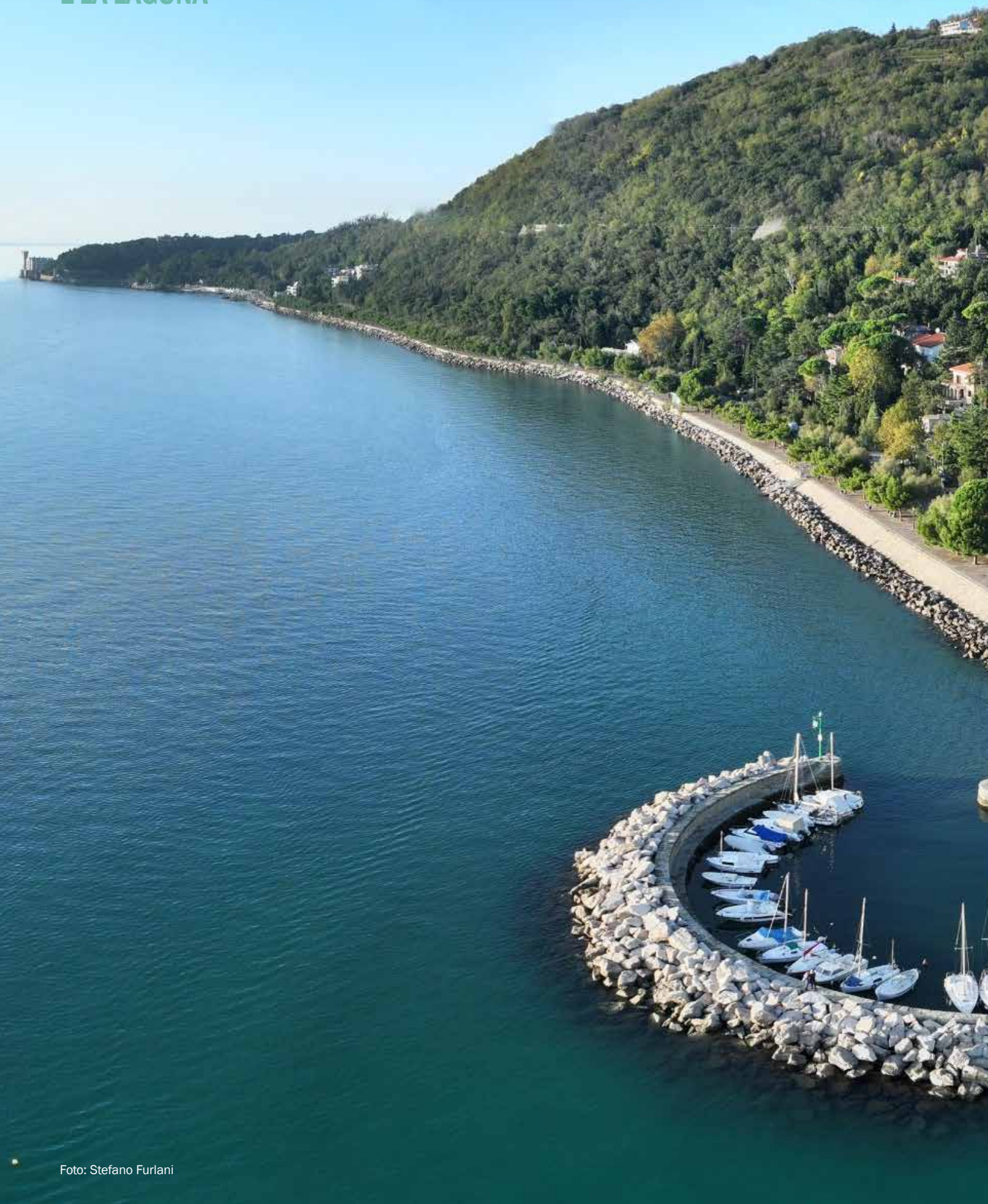
Il litorale roccioso del Friuli Venezia Giulia è **un eccezionale archivio naturale**: un complesso susseguirsi di diverse strutture, dalle falesie alle piattaforme costiere, che custodisce la memoria geologica e storica del nostro mare. Questa sezione invita a esplorare i bastioni del Golfo di Trieste attraverso tre prospettive complementari, che collegano i mutamenti del passato alle sfide ecologiche e strutturali del presente.

Il percorso di lettura ci accompagna nell'esplorazione di tre aspetti della costa rocciosa tra Muggia e Duino:

- Il primo articolo analizza la geomorfologia della costa, dai **versanti a flysch** alle **falesie calcaree**, spiegando come queste forme, apparentemente resistenti, siano anch'esse vulnerabili agli effetti dell'innalzamento del livello marino, che oggi sta accelerando i processi erosivi, con conseguenti rischi per infrastrutture e biodiversità.
- Il secondo contributo ricostruisce le spettacolari **variazioni dell'Adriatico dall'era glaciale a oggi**. Attraverso reperti archeologici e sedimenti, si scopre come l'antico golfo si sia trasformato nel tempo, offrendo un prezioso contesto storico per comprendere la risalita attuale delle acque.
- L'ultimo studio sposta il focus sulla biologia marina, esaminando lo stato ecologico degli organismi che popolano le scogliere triestine, nella **"casa della marea"**. Sebbene il quadro generale sia buono, emergono importanti segnali d'allarme, come la scomparsa di specie chiave legata al riscaldamento delle acque.

Tre sguardi complementari che rivelano la complessa interazione tra geologia, storia e biologia in una delle fasce più affascinanti e minacciate del nostro territorio.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA





LE COSTE ROCCIOSE DEL FVG, TESTIMONI RESISTENTI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

Le coste rocciose del Golfo di Trieste sono archivi naturali che conservano tracce di antichi livelli marini, come i solchi sommersi e i resti archeologici.

Il litorale varia dalle formazioni a Flysch con piattaforme costiere di Muggia alle falesie calcaree di Duino.

Ciascun tratto è modellato da diversi agenti: onde, frane, organismi, acque dolci.

L'innalzamento del mare accelera l'erosione di questi "bastioni", aumentando il rischio di crolli improvvisi, con impatti significativi su ecosistemi e infrastrutture costiere.

Le coste rocciose sono considerate possenti bastioni naturali, quasi immuni ai processi di erosione. Si tratta di ambienti conservativi, in quanto sono in grado di preservare agevolmente forme e depositi a testimonianza degli antichi livelli del mare. La loro natura, rigida e resistente, conserva le forme che vennero scolpite nella roccia quando il mare si trovava in una posizione diversa da quella attuale. Queste forme particolari sono i solchi marini, che nel Golfo di Trieste si trovano sott'acqua e ci dicono che il mare era più basso rispetto all'attuale e scavava incessantemente la roccia proprio a quella profondità a cui lo possiamo osservare immergendoci.

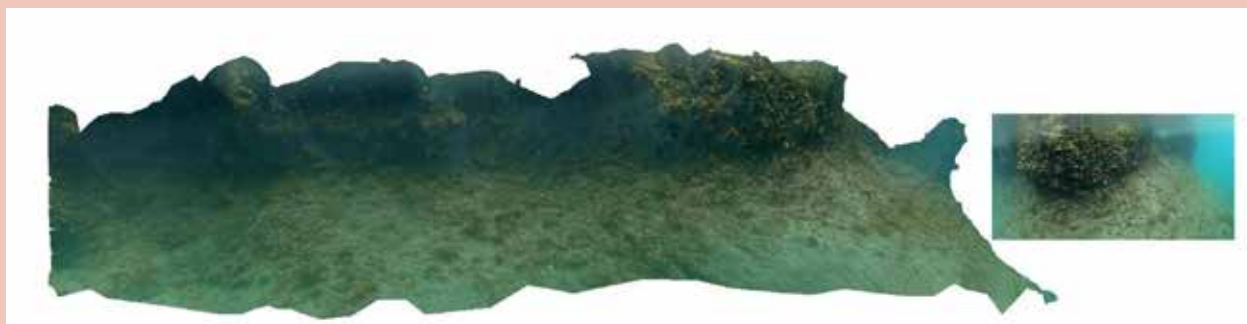
Nel Golfo di Trieste i solchi non sono l'unica testimonianza del livello del mare nel passato: una pletora di resti archeologici sommersi sono stati misurati e studiati in tutto l'Adriatico settentrionale e dimostrano che, solo negli ultimi duemila anni, il mare e la costa si sono mossi l'uno rispetto all'altro in maniera piuttosto significativa, con il risultato che ampi tratti di costa sono sommersi.

COME SI STUDIANO LE COSTE ROCCIOSE: A NUOTO PER OSSERVARLE MEGLIO

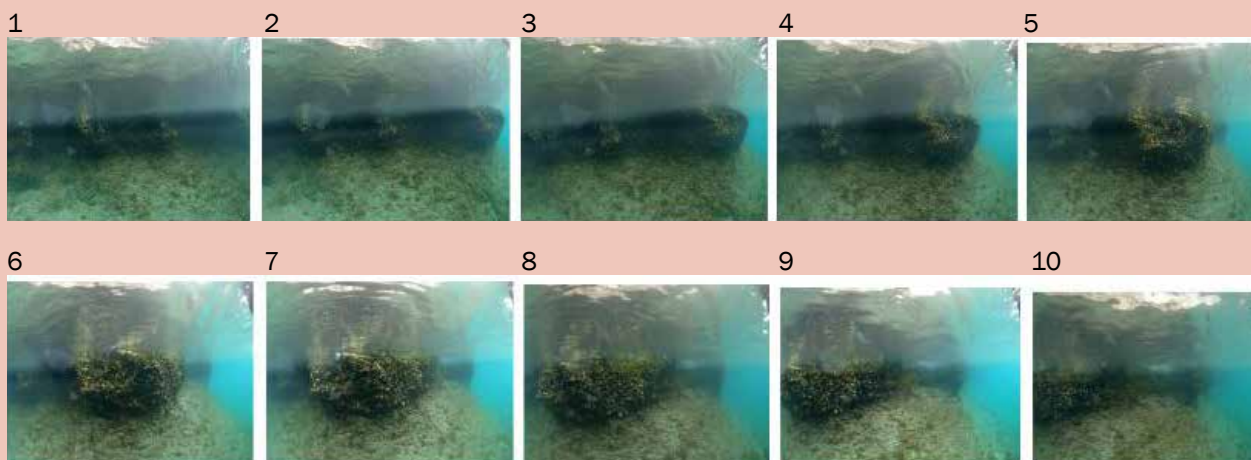
Le coste rocciose rappresentano degli ambienti il cui studio è estremamente complesso, principalmente a causa della loro natura impervia che impedisce un accesso semplice da terra; questo ha limitato per lungo tempo la raccolta di dati e osservazioni. Recentemente è stato messo a punto un approccio di rilevamento dal mare, in cui l'acquisizione dei dati viene condotta a nuoto. In questo modo il dato raccolto è associato a una verifica diretta lungo la costa. Questo approccio coniu-

ga il rilevamento di campagna, come quello del geologo in montagna, con l'acquisizione automatica di dati strumentali, come immagini, video, dati chimico/fisici, dati batimetrici, ecc.

Le strategie messe a punto per rilevare le coste rocciose sono confluite in un programma di ricerca, denominato Geoswim, iniziato nel 2012 con una spedizione durata un mese, in cui sono state rilevate tutte le coste dell'Istria meridionale e occidentale, da Medulino a Trieste. Il programma è poi proseguito negli anni successivi, tanto che attualmente sono stati rilevati oltre 600 km di coste nel Mediterraneo centrale e orientale.



La sequenza di immagini in basso è stata acquisita in sequenza, o *time-lapse*, lungo il litorale sommerso di Duino. Sopra il modello tridimensionale del solco tidale che si snoda sotto la parete dell'omonimo castello. In alto a destra un'immagine del solco sommerso. Durante l'acquisizione, la visibilità in superficie non era perfetta, come succede spesso lungo questo litorale a causa dei sedimenti portati dall'Isonzo e dal Timavo.

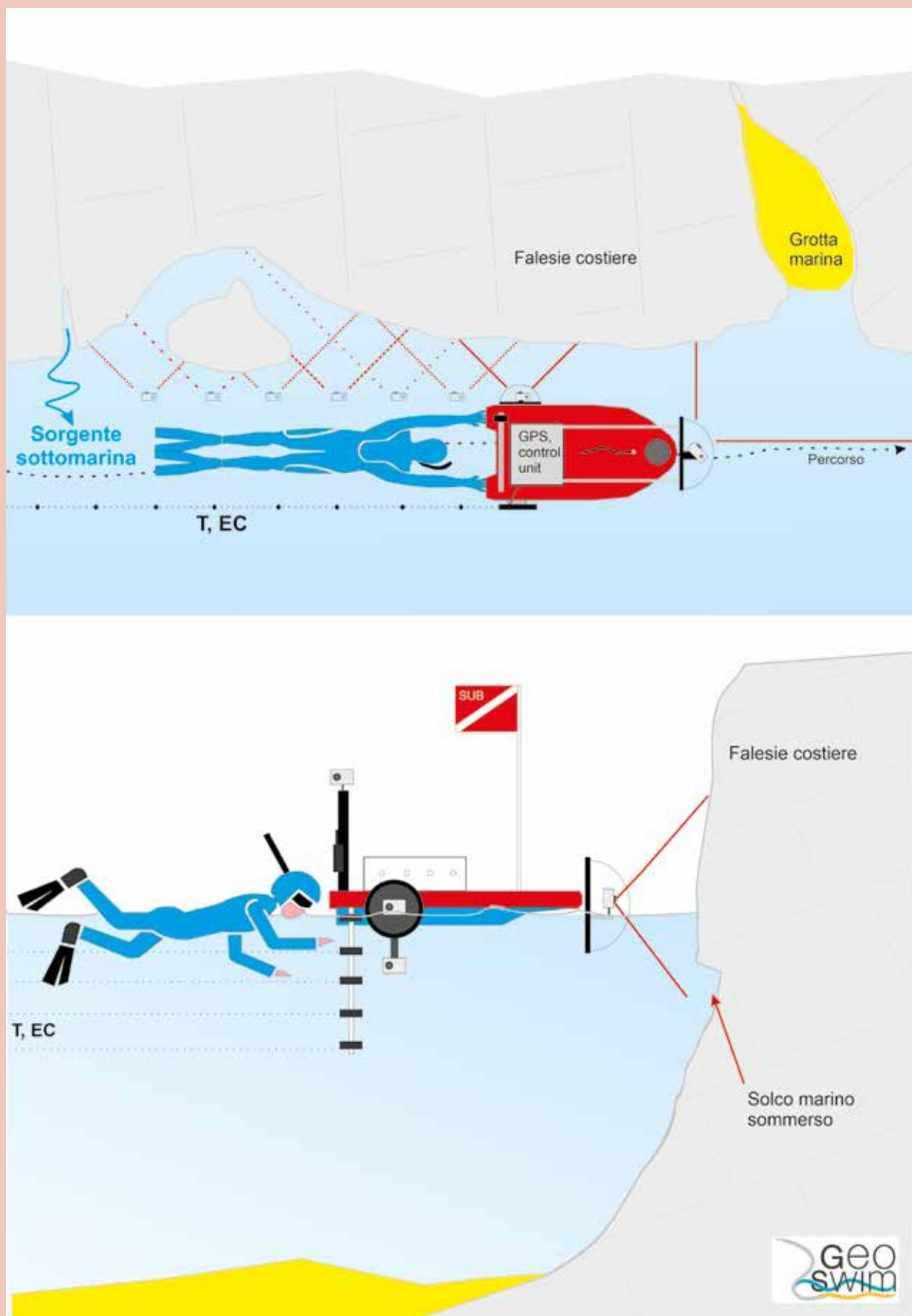




Rilievi a nuoto a Miramare



Il solco sommerso (*submerged notch*) è un indentazione della costa che si forma sul livello del mare a causa dell'intensa azione erosiva del mare. Sulla costa orientale dell'Adriatico, fino a Trieste, il solco si trova sott'acqua e testimonia la posizione del livello del mare in epoca post-romana.



Schema delle modalità di rilevamento dei dati fotografici e chimico/fisici che vengono eseguiti nell'ambito del programma Geoswim (elaborazione grafica: Stefano Furlani).

Oggi il livello del mare sta aumentando costantemente e, nel futuro, potrà determinare un significativo impatto sulle coste, anche su quelle rocciose. Questo significa che il paesaggio costiero si modificherà in maniera più o meno pesante a seconda della zona, degli interventi che verranno eseguiti e della presenza di manufatti antropici.

I TRE SETTORI DELLE COSTE ROCCIOSE IN FVG

Le coste rocciose del Friuli Venezia Giulia possono essere suddivise in tre settori.

- Il primo è quello che va dalla **penisola di Muggia a Barcola**. Questi tratti sono oggi quasi interamente antropizzati e la linea di costa è stata, nel tempo, spostata verso mare dagli ampi interrimenti delle zone industriali e del porto commerciale. Qui l'aspetto originario della costa, dominata da alti versanti, detti *falesie** dai geomorfologi, è completamente alterata dai manufatti e dall'ampiamiento delle strutture portuali. Un tempo, alla base delle falesie, che digradavano con decisione verso mare, si trovavano stretti litorali ghiaiosi.
- Il tratto **da Barcola a Sistiana** è invece interessato dai possenti bastioni calcarei del Carso che incombono sulle rocce sottostanti, costituite dalla formazione del cosiddetto *Flysch** di Trieste. Il contatto tra i calcari e il *Flysch* e la natura impermeabile di quest'ultimo ha permesso la fuoriuscita di acqua dolce sul livello del mare. Proseguendo verso nord, l'abbassamento topografico del contatto tra le due rocce fa sì che le sorgenti siano addirittura sotto il livello del mare.
- Il tratto **da Sistiana a Duino e al Villaggio del Pescatore** è dominato invece da alte pareti di calcare a picco sul mare. Alla loro base, la profondità varia da poco più di un metro a oltre sette metri in corrispondenza dei promontori che si spingono verso mare.



Il confine orientale del Golfo di Trieste è costituito interamente da coste rocciose, anche se oggi è quasi interamente antropizzata, da Punta Sottile verso Aurisina.

Solo il settore settentrionale presenta ancora i suoi tratti originari, con le falesie a picco tra Sistiana e Duino e alti versanti scoscesi tra Grignano e Sistiana.

Anche in questo settore comunque la costa è puntellata da muri di sostegno e piccoli porticcioli per l'accesso al mare.

PAESAGGI MODELLATI DA ONDE, SORGENTI SOTTOMARINE E VITA COSTIERA

Onde, sorgenti di acqua dolce e organismi marini hanno modellato e continuano a modellare questi litorali, contribuendo a definire un paesaggio unico nel suo sviluppo e vario dal punto di vista degli ambienti morfologici.

Il Golfo di Trieste, dal punto di vista idrodinamico, è un bacino piuttosto protetto, con rari eventi di mareggiate intense. Queste ultime, anche se rare contribuiscono all'evoluzione rapida dei litorali rocciosi del golfo, possono avere effetti devastanti sui manufatti dell'uomo.

I versanti in Flysch, quelli che si trovano lungo la costiera muggesana e tra Barcola e Sistiana, si evolvono principalmente a causa delle frane che,

**I DIVERSI TRATTI
DELLA COSTA
ROCCIOSA SONO
MODELLATI DA
DIVERSI EVENTI E
AGENTI: FRANE NEI
VERSANTI A FLYSCH,
ORGANISMI E
ACQUE DOLCI SULLE
COSTE CALCAREE**

nel tempo, portano al loro lento ma continuo arretramento.

I versanti calcarei invece sono bastioni molto resistenti al modellamento marino. Sul livello del mare, però, gli organismi che vivono in questa zona alternativamente sommersa ed emersa producono forme molto particolari di degradazione ed erosione della roccia.

Nel golfo di Trieste, anche l'enorme quantità di acqua dolce convogliata in mare dai corsi d'acqua, come l'Isonzo, ma anche dalle risorgenze del Timavo sotterraneo a San Giovanni in Tuba, sono in grado di contribuire alla corrosione chimica delle rocce carbonatiche lungo le coste. Il deflusso di queste acque rimane infatti spesso confinato a ridosso della costa e, assieme alle acque che si riversano in mare dalle numerose sorgenti sottomarine presenti da Santa Croce al Villaggio del Pescatore, incrementano i tassi di dissoluzione dei calcari costieri.



Piccola frane a ridosso della riva sul litorale a nord di Grignano. Pur essendo protetto da muretti di sostegno in arenaria, in alcuni punti i versanti cedono riversando il materiale sulle spiagge sottostanti.



Le rocce che affiorano lungo la costa sono modellate dagli organismi che vivono nella zona di marea. Alcuni di questi, come le patelle, i datteri (*Lithophaga lithophaga*) e i ricci di mare scavano nicchie contribuendo attivamente all'erosione costiera.

DALLA PENISOLA MUGGESANA A TRIESTE: DAL BASSO VERSO L'ALTO

Il perimetro costiero della penisola muggesana inizia nella baia di Capodistria, alla foce del fiume Risano, e arriva alla foce del Rio Ospo, nella baia di Muggia. Il suo settore meridionale, dal porticciolo di Santa Caterina ad Ancarano fino a Punta Grossa è ancora quasi interamente naturale. Qui le alte falesie modellate sul Flysch*, composto da un'alternanza di arenarie e marne, si tuffano

nel mare. Alla loro base, sul livello del mare, si sviluppano le piattaforme costiere*, o shore platforms. Si tratta di ampie spianate rocciose che si estendono attorno al livello medio del mare, e si mostrano in tutta la loro estensione durante le più basse maree invernali.

**ALTE FALESIE
DI FLYSCH
SI TUFFANO
NEL MARE E
ALLA LORO BASE
SI SVILUPPANO
AMPIE PIATTAFORME
COSTIERE, LIVELLATE
DALLE ONDE**



Il litorale di Punta Sottile, poco oltre Muggia. Sono visibili sott'acqua i resti in ferro di un piccolo molo dove un tempo attraccava un traghetto che trasportava i bagnanti a Punta Sottile e, sulla destra, i resti di un molo romano

LE TESTIMONIANZE DEL PASSATO



La piattaforma sommersa a Punta Grossa, poco oltre il confine di Lazzaretto. I blocchi di arenaria che costellano i bassi fondali della baia di San Bartolomeo sono stati più volte scambiati per resti archeologici. Forma, dimensione e posizione però tradiscono la loro origine naturale.

PIATTAFORME COSTIERE E RESTI ARCHEOLOGICI

Le piattaforme costiere sono livellate dalle onde che spianano gli strati di roccia: particolarmente estesa proprio a Punta Grossa, dove la piattaforma si estende verso il largo per oltre 300 m. In alcuni casi, quando gli strati di roccia sono orizzontali o poco inclinati e i blocchi hanno forme regolari, assomigliano a dei veri e propri lastricati, tanto che, nel passato, la piattaforma sommersa a Punta Sottile è stata scambiata, dagli appassionati locali, per una pavimentazione romana.

Anche se queste rocce non sono resti archeologici, quelli veri di certo non mancano da queste parti: moli, banchine, scivoli per calare piccole imbarcazioni, peschiere, ecc. sono stati scoperti e documentati a partire dagli anni '80 del secolo

**SI TROVANO QUI
MOLTI RESTI
ARCHEOLOGICI –
MOLI, BANCHINE,
SCIVOLI PER
IMBARCAZIONI
– A POCO PIÙ
DI UN METRO
E MEZZO DI
PROFONDITÀ**

scorso e si rinvenivano tutti a profondità che superano di poco il metro e mezzo. Le piattaforme invece si spingono ben più in profondità dei resti archeologici, a causa dell'antico innalzamento marino, tradendo quindi la loro origine naturale. Grazie alle caratteristiche idrodinamiche favorevoli del Golfo di Trieste, che ha permesso fin dai tempi antichi una consistente attività di navigazione, l'archivio dei resti archeologici lungo la costiera triestina è davvero molto nutrito e ha permesso di ricostruire il livello del mare romano in maniera molto definita in tutto il settore meridionale del Golfo fino a Trieste.

La spiegazione della sua struttura e di come consente di ricostruire il livello del mare in epoca romana è riportata nell'articolo **VIAGGIO NEL TEMPO: IL LIVELLO DEL MARE ADRIATICO DALLA PREISTORIA A OGGI.**



Il molo romano sommerso di Punta Sottile a Muggia.



Il litorale a nord di Grignano è dominato dalle alte e pendenti falesie che scendono al mare creando una modesta spiaggetta. Quasi tutta la costa in questo tratto è rinforzata da muri e bastioni, a causa dell'incessante azione del mare.

DA GRIGNANO A SISTIANA: UN CONTATTO IMPORTANTE

**I VERSANTI
IN FLYSCH
SOVRASTATI
DA IMPONENTI
PERETI CALCAREE,
SONO MESSI A
DURA PROVA DA
PRECIPITAZIONI
INTENSE E
MAREGGIATE**

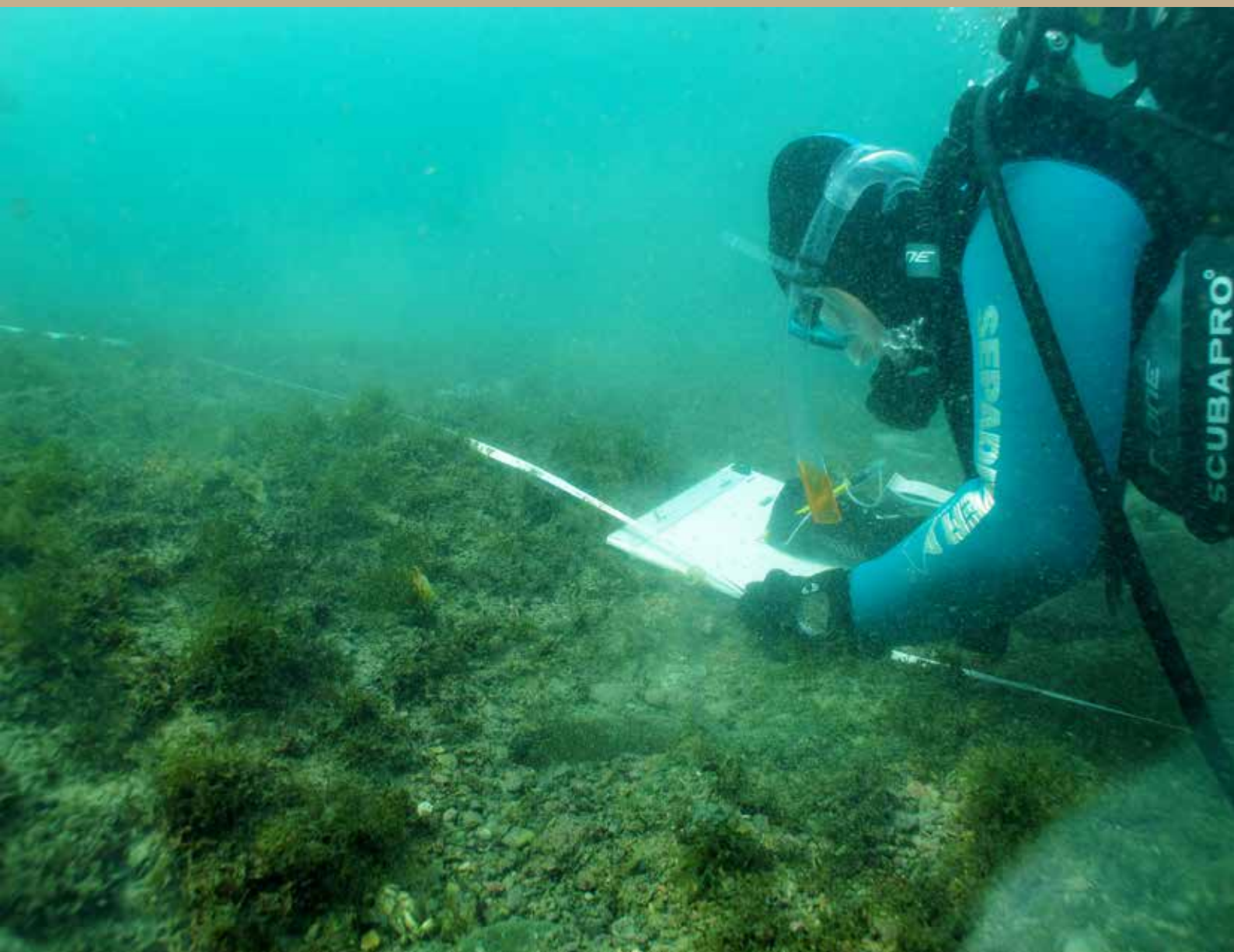
Da Barcola a Sistiana, la costa è dominata da versanti in Flysch, sovrastati, sempre più verso nord, dalle imponenti pareti biancastre di calcare. Un bellissimo paesaggio costiero, impervio, dall'aspetto selvaggio, che nasconde però l'antico utilizzo: sotto la folta vegetazione, tra le numerose villette che puntellano la costiera triestina, si snodano centinaia di antichi terrazzi agricoli, che un tempo servivano alla coltivazione della vite e di altre colture locali. Versanti costieri che lasciano il visitatore senza fiato, ma la cui stabilità è sovente messa a dura prova, a esempio durante i periodi in cui le precipitazioni sono più abbondanti.

Nel novembre 2023, questo tratto di costa ha subito ingenti danni in seguito alla forte mareggiata e le intense precipitazioni, che hanno messo a dura prova tutto ciò che gravita sulla costa.

Proseguendo verso nord, verso il porticciolo di Sistiana, il contatto tra i calcari e il Flysch, che a Trieste si trova a quote di oltre 200 m, si abbassa fino ad arrivare al mare e, nel tratto successivo, verso Duino, scende sott'acqua.

Sistiana è una piccola ansa naturale che, nel corso del secolo scorso, è stato ampliato e protetto con i moli esterni, fino ad assumere l'aspetto attuale, in cui le attività sono principalmente legate al turismo. Anche le vecchie cave, situate poco prima del porto, sono state recentemente riconvertite fino a trasformarsi nel complesso di Portopiccolo.

LE TESTIMONIANZE DEL PASSATO



Misure sulla *beachrock* sommersa lungo la costa dei Barbari. I grossi blocchi che costituiscono la *beachrock* si sono formati quando il mare era più basso per cementazione di quella che un tempo era un'antica spiaggia.

“SPIAGGE DI ROCCIA” E ANTICHE FRANE

In questo tratto, sott'acqua si trovano, si possono osservare antiche linee di costa, marcate da una serie di affioramenti rocciosi che si sono generati qualche migliaio di anni fa, quando il mare era più basso e l'acqua dolce fuoriusciva sui ciottoli dell'antica spiaggia, cementandoli. Queste vengono chiamate con il termine anglo-

**QUI, SOTT'ACQUA,
LE “SPIAGGE DI
ROCCIA” GENERATE
QUALCHE MIGLIAIO
DI ANNI FA MARCANO
LE ANTICHE LINEE DI
COSTA FINO A CIRCA
5 M DI PROFONDITÀ**

sassone “*beachrock*”, spiagge di roccia, proprio per evidenziare il processo che ha indurito le antiche spiagge fino a trasformarle in roccia. A Canovella e lungo la costa dei Barbari si rinvencono molti lembi fino a una profondità di circa 5 metri.

Interessanti anche i blocchi di roccia, allineati sulla riva, nel porticciolo di Canovella: questi sono invece depositi di antiche frane, il cui materiale deriva dal disfacimento delle sovrastanti pareti calcaree.

LE FALESIE A PICCO DI DUINO: MISTERIOSI PAESAGGI DI SCIENZA E POESIA

**LE BIANCHE
PARETI A PICCO,
CHE ISPIRARONO
I POETI, HANNO
UNA COMPLESSA
STORIA
GEOLOGICA E
GEOMORFOLOGICA**

Due chilometri di bianche pareti a picco, tormentate da zampate di roccia che si tuffano ribaltandosi o scivolando violentemente verso mare: queste sono le falesie di Duino, ai piedi del sentiero Rilke, dedicato all'omonimo poeta a ricordo del soggiorno nel vicino castello. Un paesaggio aspro e complesso come le Elegie Duinesi del triste poeta boemo. E sembra che queste pareti abbiano ospitato

anche il sommo poeta Dante che forse ha dedicato una terzina della Divina Commedia a questi ameni luoghi "Io venni in luogo d'ogni luce muto che mugghia come fa mar per tempesta se da contrari venti è combattuto".

Complessa è anche la storia geologica e geomorfologica di queste imponenti falesie costiere perché, se il mare le ha manipolate per migliaia di anni, poco sappiamo della loro storia nel tempo geologico, quando, per lungo tempo, il mare non si trovava da queste parti, ma era localizzato molto più a sud, dalle parti di Ancona. Quando poi, dopo la fine dell'ultima glaciazione (circa 12.000 anni fa), il mare è risalito lungo le coste dell'Adriatico fino al golfo di Trieste, esso ha iniziato a modellare i litorali duinesi, lentamente ma con costanza.

Le falesie a picco sul mare di Duino. Qui le falesie scendono direttamente fino al fondo in profondità.



LE TESTIMONIANZE DEL PASSATO

IL SOLCO MARINO SOMMERSO

Notevole è la presenza di un solco marino, scoperto nei primi anni duemila da Fabrizio

**DA SISTIANA A
DUINO, LUNGO
TUTTO IL LITORALE
A PROFONDITÀ
CRESCENTE, SI TROVA
UN SOLCO MARINO
SOMMERSO, SCAVATO
DAL MARE UN MIGLIAIO
DI ANNI FA**

Antonioli.. Si tratta di un incavo presente lungo tutto il litorale tra Sistiana e Duino, scavato dal mare un migliaio di anni fa. Misure accurate sulla quota di questa intrigante forma hanno rivelato che si abbassa lentamente tra Sistiana e il ca-

stello di Duino, da un metro e mezzo fino a quasi due metri e mezzo di profondità, evidenziando come porzioni diverse della costa si abbassino in maniera differenziata. Si tratta di un testimone silenzioso del livello del mare nel passato. E a ogni modo, solo pochi millenni or sono, gli abitanti di queste zone vedevano un paesaggio molto diverso da quello attuale. Sotto il sentiero Rilke si trovava infatti il Flysch, oggi presente sott'acqua in qualche piccolo lembo. Il paesaggio assomigliava a quello che vediamo tra Aurisina e la costa dei Barbari. Poi il mare è salito ulteriormente e ha cancellato il Flysch e quanto rimaneva dell'antico paesaggio. Anche qui, essendoci il contatto tra queste due rocce, si trovano numerose sorgenti sottomarine di acqua dolce. La più grande si trova a Sistiana, sotto la grande parete che ospita il bunker della base dei sommergibili, utilizzata durante la seconda guerra mondiale.

**POCHI MILLENNI
FA, GLI ABITANTI
DI QUESTE ZONE
VEDEVANO UN
PAESAGGIO
MOLTO DIVERSO
DALL'ATTUALE, CON
LEMBI DI FLYSCH
POI ASPORTATO
DAL MARE CHE
SALIVA**

I diversi indicatori (solco marino, resti archeologici di epoca romana, beach rocks) che testimoniano l'evoluzione del livello marino relativo negli ultimi millenni sono riepilogati nell'articolo **VIAGGIO NEL TEMPO: IL LIVELLO DEL MARE ADRIATICO DALLA PREISTORIA A OGGI**

CON IL MARE CHE SALE, QUALI CAMBIAMENTI CI POSSIAMO ASPETTARE?

A questo punto, alcune domande sorgono spontanee: come legare il passato al futuro? E il presente quanto conta nella dinamica costiera?

IL MARE SEMPRE PIÙ ALTO NON SOLO INVADE LE COSTE BASSE E SABBIOSE, MA MODIFICA PROFONDAMENTE ANCHE LE COSTE ROCCIOSE, MODELLANDO LE GRADUALMENTE

Dobbiamo spaventarci o essere proattivi? Cosa succederà con il mare che sale a questo ritmo e forse anche di più? Se nella storia geologica della Terra, variazioni del livello del mare sono state eventi del tutto normali, non dobbiamo dimenticare che oggi molti tratti costieri sono antropizzati, modificati dall'uomo e utilizzati per le sue attività, quindi queste domande diventano ancora più importanti.

Quando si parla di innalzamento del livello del mare, l'immagine più immediata è quella delle spiagge che scompaiono sotto un mare che sale. Ma nei dintorni di Trieste, dove dominano le coste rocciose, gli effetti saranno diversi: meno evidenti a prima vista, ma altrettanto profondi. Qui il mare non si limita a "invadere" la terra: la modella lentamente, lavorando la roccia giorno dopo giorno. Con l'aumento del livello medio del mare, anche di pochi millimetri all'anno, le onde raggiungono porzioni di costa prima raramente bagnate. La fascia esposta all'erosione si sposta così verso l'alto. Anche se può sembrare un cambiamento minimo, è proprio questo spostamento graduale a innescare trasformazioni importanti.

LA COSTA ROCCIOSA ARRETRA "A SCATTI"

Le falesie triestine, spettacolari e spesso a picco sul mare, sono il risultato di un equilibrio delicato. Quando il mare si alza, le onde colpiscono più frequentemente la base delle falesie, indebolendo la roccia e favorendo distacchi e crolli. Nel tempo, questo processo porta a un lento ma continuo arretramento della linea di costa: porzioni di roccia cedono e il profilo costiero si sposta verso l'interno. A differenza delle spiagge sabbiose, che arretrano in modo progressi-

CON UN LIVELLO MEDIO DEL MARE PIÙ ALTO, LE ONDE COLPISCONO PIÙ SPESSO LA BASE DELLE FALESIE, INDEBOLENDO E FAVORENDO DISTACCHI E CROLLI

vo, le coste rocciose arretrano "a scatti". Un versante può crollare all'improvviso, una piccolainsenatura può ampliarsi, una parete può perdere interi blocchi.

CON UN MARE PIÙ ALTO, MAREGGIATE PIÙ INCISIVE

Nel Golfo di Trieste, inoltre, le mareggiate possono già oggi innalzare temporaneamente il livello del mare in modo significativo, come abbiamo visto nel novembre 2023, soprattutto con vento di scirocco e particolari condizioni atmosferiche. Se il livello medio del mare cresce, questi eventi diventano più incisivi: le onde raggiungono quote più elevate, sentieri costieri e infrastrutture che risultano più esposte. Non sono necessari grandi aumenti per osservare effetti concreti: bastano pochi centimetri in più per amplificare fenomeni già in atto.

BASTANO POCHI CENTIMETRI DI LIVELLO MARINO IN PIÙ PER AMPLIFICARE GLI EFFETTI DELLE MAREGGIATE SU AMBIENTI E INFRASTRUTTURE COSTIERE

GLI EFFETTI SUGLI ECOSISTEMI E ATTIVITÀ UMANE

Le coste rocciose ospitano inoltre ecosistemi molto specifici, organizzati in fasce ben definite:

IL CAMBIAMENTO PROGRESSIVO DELLE NOSTRE COSTE RICHIEDE DI ADATTARE LE INFRASTRUTTURE E PIANIFICARE CON ATTENZIONE L'USO DEL TERRITORIO

alghe, molluschi e piccoli animali occupano ciascuno una precisa posizione rispetto al livello del mare. Con il mare che sale, queste fasce si sposterebbero verso l'alto. È un cambiamento silenzioso, ma cruciale per l'equilibrio dell'intero ambiente costiero.

I cambiamenti in atto negli ecosistemi di scogliera sono descritti nell'articolo **LA "CASA**

DELLA MAREA": VITA E STATO DELL'AMBIENTE SULLE NOSTRE SCOGLIERE.

Anche le attività umane non sono immuni. Porti, strade costiere, percorsi naturalistici e aree turistiche potranno risentire di un'erosione più rapida, di una maggiore instabilità dei versanti e di eventi estremi più frequenti. Diventerà quindi sempre più importante adattare le infrastrutture e pianificare con attenzione l'uso del territorio.

UN CAMBIAMENTO LENTO, MA INESORABILE

Quello in atto è un cambiamento lento, ma ineluttabile. Le trasformazioni delle coste rocciose non avvengono da un giorno all'altro: sono progressive, spesso quasi impercettibili nel breve periodo. Ma su scala di decenni diventano evidenti. Nel

Golfo di Trieste il mare non cancellerà improvvisamente la costa: continuerà a scolpirla, modificandola poco a poco. Ed è proprio questa lentezza a renderlo un fenomeno tanto affascinante quanto difficile da cogliere, almeno finché i suoi effetti non diventano impossibili da ignorare.

Stefano Furlani

Università degli Studi di Trieste

MARE SOPRA: QUALE FUTURO PER LE COSTE DEL FRIULI VENEZIA GIULIA?

Nei prossimi decenni il livello del mare salirà drammaticamente, modificando la geografia delle nostre coste e danneggiando le strutture sul litorale. Dal 1880 è già salito di oltre 20 centimetri e si prevede che possa raggiungere i 30 cm entro il 2050. Avvisaglie di quella che potrà essere la situazione ne abbiamo già avute: l'ultima è la forte mareggiata che nel novembre 2023 ha colpito il litorale orientale del Golfo di Trieste, da Muggia a Lignano, provocando ingenti danni alle infrastrutture costiere. La concomitanza tra il livello alto del mare e i venti provenienti dai quadranti meridionali ha accumulato acqua nel Golfo, determinando una situazione esplosiva, che in futuro potrebbe ripetersi con più intensità e frequenza. A questo proposito, è da poco

terminato il progetto di divulgazione "MARE SOPRA", ideato dall'Università degli Studi di Trieste e realizzato, con la collaborazione di diversi partner, grazie al contributo della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, con l'obiettivo di sensibilizzare la cittadinanza, in particolare i più giovani, sull'aumento del livello del mare causato dal riscaldamento globale e sulle conseguenze già visibili sulle nostre coste.

MARE SOPRA si è mosso in questa direzione, proponendo incontri con esperti, proiezioni di documentari, esperienze pratiche con studenti e cittadini e la creazione di un virtual tour disponibile in rete alla pagina: <https://www.maresopra.it/>. Uno strumento coinvolgente e accessibile per esplorare luoghi e ambienti in modo realistico e dettagliato, quasi come se si fosse sul posto".





FALESIA

La falesia (*cliffs*) è una scarpata molto ripida formatasi per l'intensa azione erosiva del mare sulla costa rocciosa e, in genere, soggetta a un continuo arretramento. Se la falesia s'immerge direttamente nel mare, fino a profondità maggiori rispetto alla minima bassa marea, si parla di falesie a picco (*plunging cliffs*).

FLYSCH

con questo termine vengono indicati sedimenti terrigeni, costituiti da alternanze pelitico-arenacee e arenaceo-pelitiche, pelitico-calcareo-arenacee e pelitico-arenaceo-conglomeratiche, messi in posto mediante colate e correnti di torbida in una situazione paleoambientale sottomarina. La formazione del Flysch, a Trieste e nei dintorni, è caratterizzata da alternanze di arenarie (masegni) e marne (tasel) sulle quali è costruita la città.

PIATTAFORME COSTIERE O SHORE PLATFORMS

forme costiere che risultano dall'arretramento delle falesie costiere; queste unità morfologiche, a seguito dei cambiamenti relativi del livello marino, possono emergere o restare sommerse e dare quindi luogo a ripiani e scarpate che, posti a diverse altezze e profondità, formano i terrazzi marini.

BEACHROCK

roccia sedimentaria costiera formata dalla cementazione naturale di sabbia, ghiaia e detriti organici sulla riva. Si presenta generalmente come lastroni inclinati verso il mare, spesso fratturati, che testimoniano antiche linee di costa.

SOLCO MARINO (*marine notch*)

è un incavo orizzontale, una sorta di nicchia o scanalatura, che si forma sul livello medio del mare o alla base delle falesie o delle coste scoscese. Nel golfo di Trieste e in Istria, il solco marino si trova sott'acqua, a testimonianza del complesso meccanismo di risalita del livello del mare, che dall'epoca romana a oggi è il risultato dell'aumento del livello del mare e del contemporaneo abbassamento della costa.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



VIAGGIO NEL TEMPO: IL LIVELLO DEL MARE ADRIATICO DALLA PREISTORIA A OGGI



Dall'ultimo massimo glaciale a oggi, le variazioni del livello marino hanno ridisegnato l'Adriatico.

Circa 20.000 anni fa, con il mare più basso di 120 metri, la parte settentrionale era una pianura emersa.

La successiva fusione dei ghiacci provocò una rapida risalita delle acque verso nord.

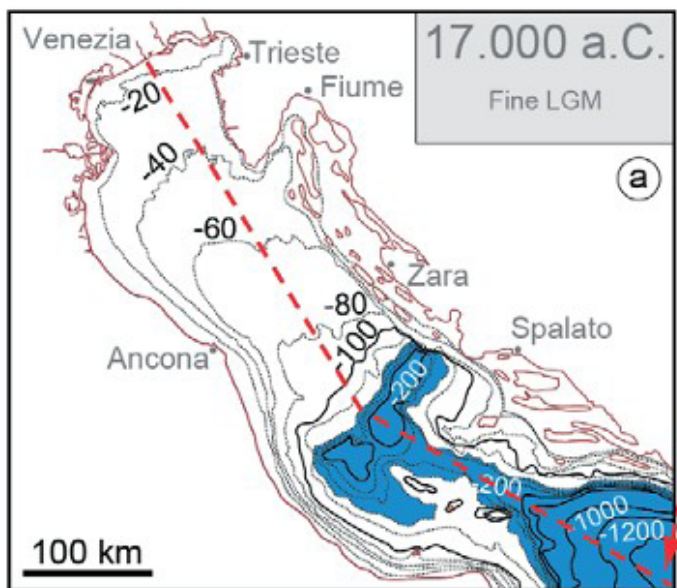
Negli ultimi millenni il fenomeno è proseguito più lentamente. 2000 anni fa il livello del mare era più basso di 160 cm.

Testimonianze archeologiche e sedimenti permettono di ricostruire questa evoluzione nel Golfo di Trieste.

Le variazioni del livello marino nell'Adriatico dall'ultimo massimo glaciale a oggi rappresentano uno dei processi più evidenti nella trasformazione geografica del Mediterraneo.

Durante l'Ultimo massimo Glaciale, circa 20.000 anni fa, gran parte dell'acqua terrestre era intrappolata nelle grandi calotte glaciali che ricoprivano vaste aree dell'Europa settentrionale e del Nord America. Di conseguenza, il livello medio globale del mare era molto più basso rispetto a quello attuale, con una differenza stimata di circa 120 metri. In queste condizioni, l'Adriatico settentrionale appariva profondamente diverso: vaste porzioni dell'attuale piattaforma continentale erano emerse e costituivano una pianura attraversata dai paleoalvei dei corsi d'acqua principali, come il Po, l'Adige, il Piave e il Tagliamento. La linea di costa si trovava quindi molto più a sud dell'attuale e il mare occupava soltanto la parte meridionale del bacino.

IL LIVELLO DEL MARE ADRIATICO DURANTE L'ULTIMA GLACIAZIONE



Durante l'Ultimo Massimo Glaciale la costa Adriatica era spostata verso sud e gran parte del bacino era privo di acqua marina. Il livello del mare era più basso di oltre 120 m. Elaborazione mappa: Stefano Furlani da base Google Earth.

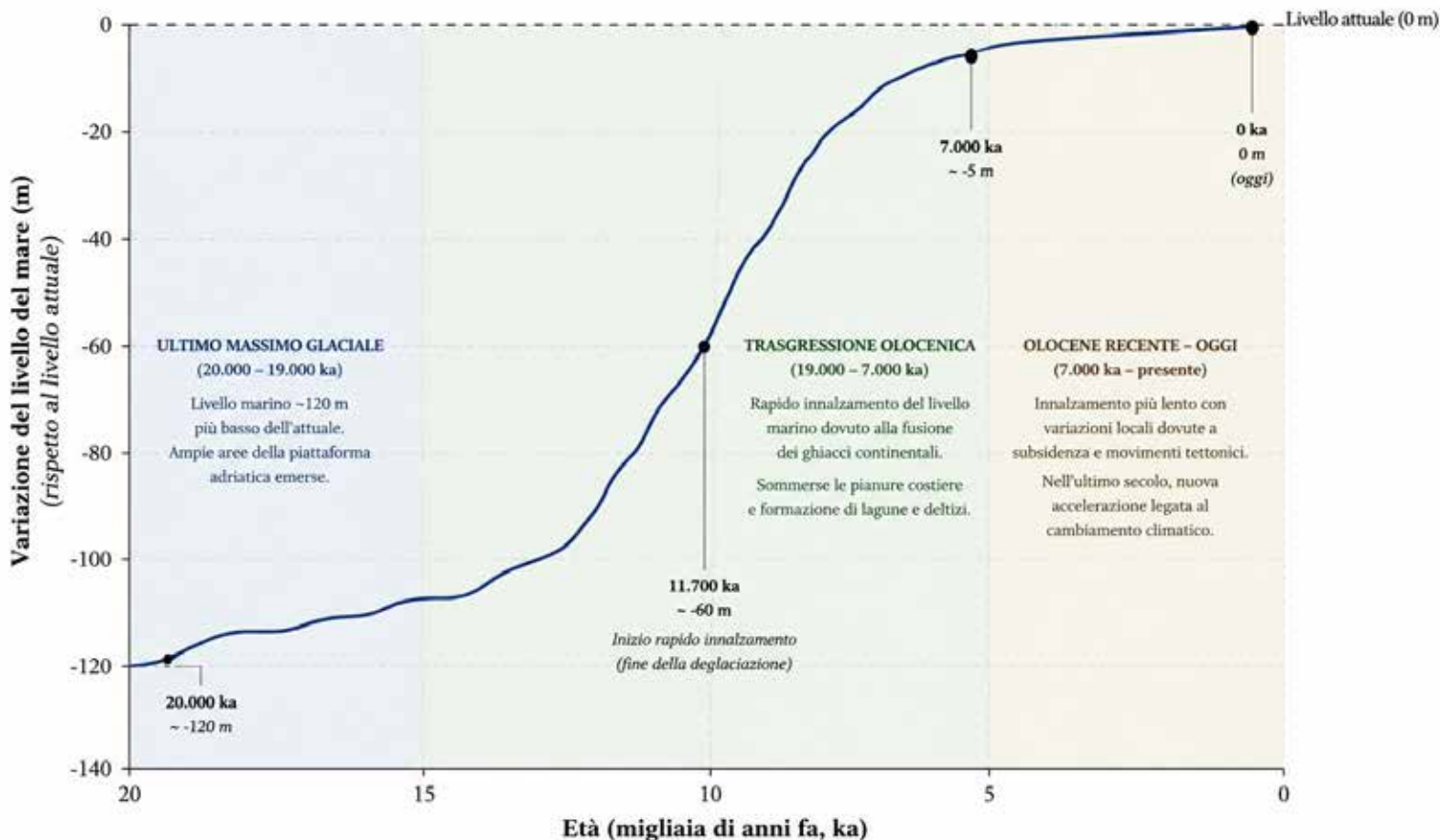
LA RISALITA DEL LIVELLO MARINO DOPO LA FINE DELL'ULTIMA GLACIAZIONE

Con la fine della glaciazione, il progressivo aumento delle temperature provocò la fusione dei ghiacci continentali. Questo fenomeno provocò una rapida risalita del livello marino, anche nota come Trasgressione olocenica. Nell'Adriatico il mare avanzò gradualmente verso nord sommergendo le antiche pianure costiere e modificando profondamente il paesaggio. A partire da circa 7.000 anni fa iniziarono a formarsi le lagune, a causa della grande quantità di sedimenti trasportati dai fiumi verso le nuove linee di costa. La nascita della laguna di Venezia e delle altre lagune dell'alto Adriatico è strettamente legata a questi processi di sommersione e sedimentazione.

20.000 ANNI FA IL MARE ERA PIÙ BASSO DI 120 METRI E L'ALTO ADRIATICO ERA UNA VASTA PIANURA EMERSA

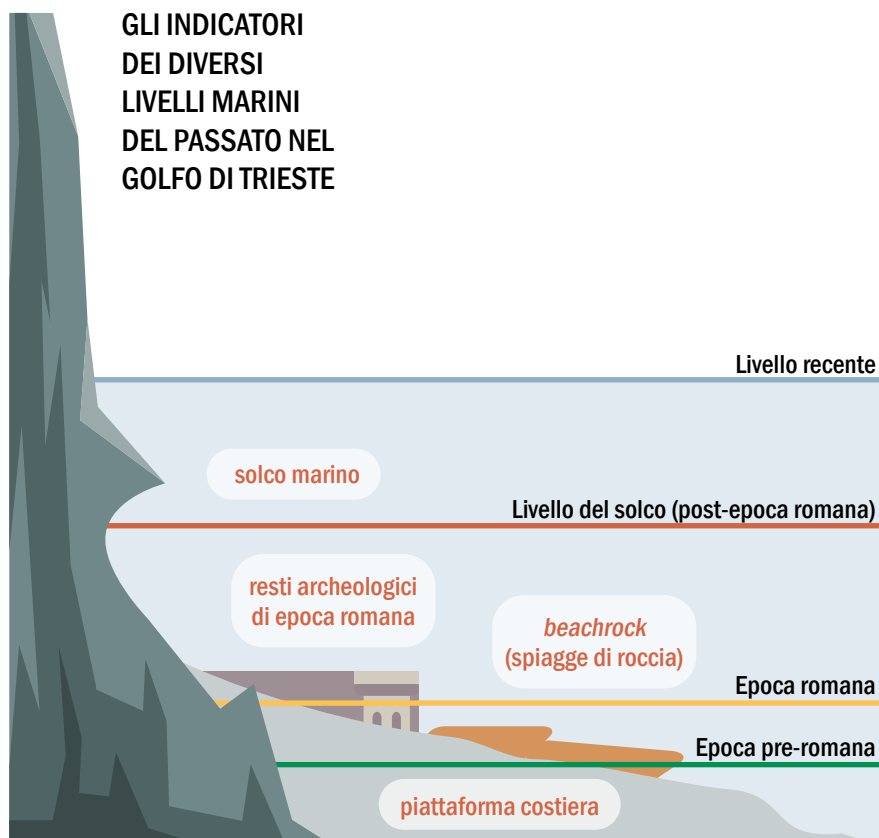
LA FINE DELL'ULTIMA GLACIAZIONE PROVOCÒ UNA RAPIDA RISALITA DEL LIVELLO DEL MARE, CHE AVANZÒ VERSO NORD

VARIAZIONE DEL LIVELLO DEL MARE DA 20.000 ANNI FA A OGGI



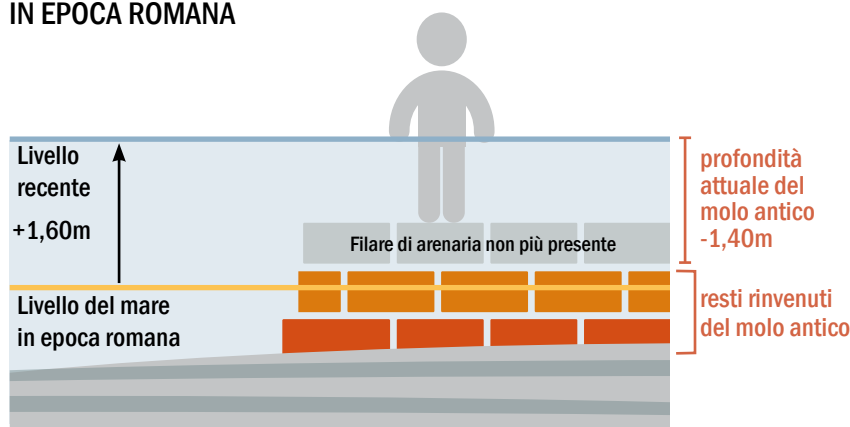
Il grafico illustra la variazione del livello medio del mare da 20.000 anni fa a oggi, prendendo come riferimento il livello medio marino attuale (che corrisponde alla quota zero).

GLI INDICATORI DEI DIVERSI LIVELLI MARINI DEL PASSATO NEL GOLFO DI TRIESTE



Schema della costa di Trieste (non in scala) che riassume l'evoluzione del livello marino relativo, testimoniata dai diversi elementi (solco marino, resti archeologici di epoca romana, beach rocks) che nella realtà si rinvencono non in una stessa zona, ma in porzioni diverse della costa, dalla penisola muggesana alle falesie di Duino.

IL LIVELLO DEL MARE IN EPOCA ROMANA



Il disegno illustra la differenza tra il livello medio marino attuale e quello dell'epoca romana, circa 2000 anni fa, attestata dai resti archeologici del molo rinvenuto presso Punta Sottile (Muggia).

Del molo rimangono visibili due strati della struttura (rappresentati in arancione e in giallo), la cui superficie si trova attualmente a -1,40 m sotto al livello marino attuale.

A questi era sovrapposto uno strato di blocchi in arenaria, ora non più presente, che costituiva il vero e proprio piano di calpestio del molo.

IL LIVELLO DEL MARE NEGLI ULTIMI MILLENNI

Negli ultimi millenni l'innalzamento del livello marino è proseguito più lentamente, alternandosi a variazioni locali dovute ai movimenti tettonici e alla subsidenza delle coste. In alcune aree dell'Adriatico settentrionale, come a Venezia, l'abbassamento del suolo ha accentuato gli effetti della risalita marina, aumentando i rischi associati, come l'erosione costiera e l'ingressione delle acque salate.

Testimonianze archeologiche sommerse, sedimenti marini e altri indicatori ci consentono di ricostruire le variazioni locali del livello del mare nel Golfo di Trieste dall'epoca pre-romana.

I diversi indicatori dei livelli marini passati sono descritti, più nel dettaglio, nell'articolo **LE COSTE ROCCIOSE DEL FVG, TESTIMONI RESISTENTI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO.**

In particolare, è possibile ricostruire il livello del mare in epoca romana grazie alle informazioni desunte dalle strutture archeologiche sommerse, tra cui il molo di Punta Sottile, scoperto negli anni ottanta dal muggesano Antonio Gobet e che è stato datato a 1950 anni fa (con una possibile incertezza di +/- 50 anni).

**RESTI
ARCHEOLOGICI
E ALTRI INDICATORI
TESTIMONIANO
L'INNALZAMENTO
GRADUALE
DEL LIVELLO
MARINO NEGLI
ULTIMI MILLENNI.
UN FENOMENO
CHE ORA STA
ACCELERANDO**

Stefano Furlani

Università degli Studi di Trieste

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



LA “CASA DELLA MAREA”: VITA E STATO DELL'AMBIENTE SULLE NOSTRE SCOGLIERE

L'habitat costiero del Golfo di Trieste, tipico per l'ampia escursione di marea, si articola in tre piani.

Recenti studi (progetto CASCADE) evidenziano che lo stato ecologico della fauna sulle scogliere del litorale triestino è buono.

Tuttavia emergono anche segnali d'allarme come la scomparsa dell'alga *Fucus virsoides* e l'impoverimento della comunità algale che influenza quella animale.

Oggi le minacce per questo habitat sono: la modificazione della fascia costiera, il riscaldamento delle acque e l'innalzamento del mare.

Gli ambienti di marea, o zone intertidali*, sono habitat marino costieri caratterizzati dall'alternanza delle fasi di immersione ed emersione dovuta al ciclo della marea. L'ampiezza di questi ambienti dipende dall'escursione della marea, che nel nostro golfo può arrivare talvolta a 160 cm di escursione verticale massima sulle bocche di porto* della Laguna di Marano e Grado. Infatti il Golfo di Trieste rappresenta la seconda area nel Mar Mediterraneo con la maggiore escursione di marea, dopo il Golfo di Gabes in Tunisia (circa 200 cm).

In generale il Mediterraneo è un bacino a marea molto limitata (microtidale) con un'escursione media di circa 20-30 cm e per questo motivo gli ambienti di marea del Nord Adriatico rappresentano delle zone da tutelare con particolare attenzione, poiché costituiscono una vera e propria casa della marea in cui vivono numerose specie animali e vegetali. Queste specie caratteristiche dell'habitat intertidale svolgono un ruolo da veri e propri ingegneri ecosistemici, fondamentali per la resilienza costiera e la protezione del litorale dai processi di erosione.

I PIANI DEL LITORALE

Uno dei temi fondamentali nei corsi introduttivi di biologia marina è proprio la classificazione del litorale a partire dal piano di marea e la relativa zonazione degli organismi. Nello studio di questo particolare habitat marino è necessario saper distinguere tre piani, riconoscibili in base alla presenza di organismi caratteristici di ognuno.

**IL LITORALE SI
SUDDIVIDE IN TRE
PIANI DISTINTI
IN BASE ALLA
PRESENZA DEGLI
ORGANISMI E AI
LIVELLI DELLE
MAREE**

- **Il piano sopralitorale**, o piano di umettazione, situato al di sopra del livello medio dell'alta marea, non viene sommerso dalle maree ordinarie e i suoi organismi vengono raggiunti dagli spruzzi e dagli aerosol causati dal moto ondoso.
- **Il piano mesolitorale**, o piano di marea in senso stretto, presenta due limiti, superiore e inferiore, che coincidono con i livelli medi di alta e bassa marea e i suoi organismi sono soggetti a immersione ed emersione periodica.
- **Il piano infralitorale** è quello situato al di sotto del livello medio della bassa marea, quindi nelle condizioni di marea ordinaria risulta sempre immerso, mentre in profondità si estende fino al limite inferiore di presenza delle fanerogame marine o delle alghe fotofile (nel Golfo di Trieste attorno ai 7 m di profondità).

Poi scendendo sempre più in profondità ci sono rispettivamente i piani circalitorale, batiale, abissale e adale. Ovviamente nel Golfo di Trieste non si va oltre al piano circalitorale (o piano delle alghe sciafile), avendo una profondità massima di circa 25 m.

GLI INVERTEBRATI CHE POPOLANO I TRE PIANI DI MAREA

Ligia italica



Crostaceo isopode noto comunemente come **porcellino degli scogli**; vive sulla roccia sopralitorale e si ciba principalmente di detrito vegetale, può nuotare ma non sopporta immersioni prolungate.

Ligia italica
o porcellino
degli scogli
sulla roccia
sopralitorale nel
Golfo di Trieste.

Melarhappe neritoides



Mollusco gasteropode comunemente noto come **littorina o chiocciolina**; specie tipica della roccia sopralitorale, presenta dimensioni di pochi millimetri e può vivere anche parecchi metri al di sopra del livello dell'alta marea nelle zone raggiunte dagli spruzzi e dall'aerosol durante le mareggiate.

*Melarhappe
neritoides*
o littorina
annidata
nella roccia
sopralitorale del
Golfo di Trieste

Cirripedi



Sottoclasse di crostacei marini sessili, conosciuti volgarmente come **denti di cane**, sono noti per vivere cementati alle rocce, agli scafi delle imbarcazioni, oppure su animali marini come cetacei e tartarughe. Sono caratterizzati da un nicchio* (involucro) calcareo che contiene all'interno l'animale, il quale possiede le zampe a forma di cirri, utili per la filtrazione del cibo.

La forma tipica del nicchio* a tronco di cono chiuso verso l'alto da due coppie di placche mobili consente la loro sopravvivenza anche per lunghi periodi fuori dall'acqua. Sulle rocce dei piani di marea nel Golfo di Trieste possiamo trovare normalmente 4 specie: sul piano sopralitorale è caratteristica la specie *Microeuraphia depressa* di forma più appiattita, sul mesolitorale superiore è abbondante *Chthamalus montagui* talvolta con *Chthamalus stellatus*, mentre all'interfaccia tra il mesolitorale inferiore e l'infralitorale superiore è presente di solito il balano *Perforatus perforatus* (ex *Balanus perforatus*) di dimensioni nettamente maggiori e con la sua forma tipica a "vulcano".

Cirripedi della specie *Chthamalus montagui* sulla roccia mesolitorale superiore



Cirripede della specie *Perforatus perforatus* sulla roccia mesolitorale inferiore del Golfo di Trieste



Cirripede della specie *Microeuraphia depressa* sulla roccia sopralitorale del Golfo di Trieste

Pachygrapsus marmoratus



Pachygrapsus marmoratus o granchio corridore

Crostaceo decapode meglio noto come **granchio corridore** a causa della sua velocità di movimento; può rimanere per lunghi periodi fuori dall'acqua, si nutre di piccoli invertebrati in particolare è in grado di rompere il guscio dei cirripedi del genere *Chthamalus* e nutrirsi del crostaceo al suo interno.

Patella caerulea



Costiera triestina: roccia mesolitorale ricoperta da patelle

Mollusco gasteropode caratteristico per la sua conchiglia conica; vive tenacemente attaccato sulla roccia mesolitorale grazie al suo piede muscolare ampio e arrotondato che permette all'animale di spostarsi e che agisce anche come una potente ventosa resistendo alle forti mareggiate; si nutre raschiando alghe microscopiche dalla superficie degli scogli grazie alla sua lingua a raschietto nota come radula.

Patella caerulea vista ventralmente: al centro è evidente il suo piede muscolare che agisce da ventosa, mentre a destra il capo è caratterizzato dall'apertura boccale da cui sporge la radula



Foto: L.P. Castelletto

Actinia equina

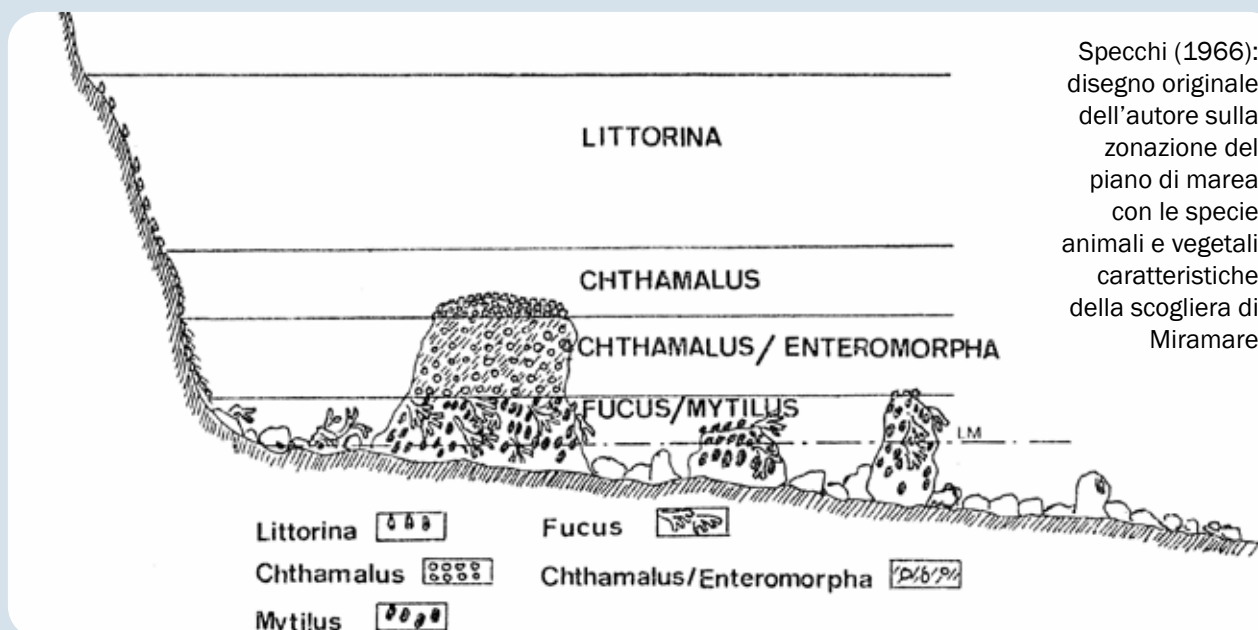


Appartiene al gruppo degli cnidari ed è conosciuto come pomodoro di mare per il suo colore rosso vivo; vive adeso sulla roccia mesolitorale inferiore mantenendo comunque la possibilità di compiere piccoli e lenti movimenti; è un organismo carnivoro che cattura le sue piccole prede grazie alla sua corona di tentacoli urticanti. Al calar della marea rimane spesso fuori dall'acqua racchiudendo i suoi tentacoli e assumendo una forma a palla.

Il pomodoro di mare (*Actinia equina*) è una specie caratteristica del mesolitorale inferiore: a sinistra nella forma richiusa durante l'emersione, a destra nella forma aperta con i tentacoli all'esterno durante l'immersione

Foto: L. Faresi

UN RIFERIMENTO FONDAMENTALE: GLI STUDI ECOLOGICI DELLE SCOGLIERE DI MIRAMARE E MUGGIA NEGLI ANNI 60'



Specchi (1966): disegno originale dell'autore sulla zonazione del piano di marea con le specie animali e vegetali caratteristiche della scogliera di Miramare

1966: I POPOLAMENTI DELLE SCOGLIERE DI MIRAMARE

Nel 1966 il prof. Mario Specchi, fu docente di zoologia presso l'ateneo triestino, pubblicò il primo lavoro riguardante gli aspetti naturalistici ed ecologici dei popolamenti della scogliera di Miramare, quando non era ancora una riserva naturale marina. Questo lavoro definì la zonazione dei piani di marea sulla base delle specie caratteristiche degli ambienti rocciosi. In particolare riportava la presenza della chiocciolina o littorina *Melarhaphes neritoides* sulla roccia sopralitorale, dei cirripedi del genere *Chthamalus* (*C. montagui* e *C. stellatus*) sulla roccia mesolitorale superiore, dei mitili (*Mytilus galloprovincialis*) e dell'alga bruna *Fucus virsoides* assieme alla patella (*Patella caerulea*) che formavano un'estesa cintura caratteristica della roccia mesolitorale inferiore. Infine, il limite superiore del piano infralitorale era caratterizzato dalla presenza dei cirripedi del genere *Balanus* (i cosiddetti denti di cane) e con tutto un tappeto algale rappresentato soprattutto dalle alghe rosse dei generi *Gelidium* e *Porphyra* e dalle alghe verdi del genere *Bryopsis*.

1968: I POPOLAMENTI DELLE SCOGLIERE DELLA BAI DI MUGGIA

Un paio d'anni più tardi, nel 1968, M. Specchi e il prof. Giuliano Orel descrissero i popolamenti delle scogliere della Baia di Muggia. In tale contesto furono osservati anche gli effetti dell'inquinamento e della modificazione morfologica del litorale sulla comunità del mesolitorale roccioso. Sulle pareti interne delle dighe foranee del porto e su tutti i moli della costa Nord della baia sparirono quasi completamente gli organismi caratteristici del piano sopralitorale, mentre quelli del sottostante mesolitorale si presentavano in stato di sofferenza. Gli autori imputarono questa condizione di stress all'azione tossica esercitata dalla fascia di nafta che costantemente imbrattava questi livelli, avendo osservato che i nicchi* (ossia i gusci calcarei protettivi) del cirripede *Chthamalus* sul lato interno delle dighe erano in gran parte vuoti.

UNA TESTIMONIANZA STORICA FONDAMENTALE

Questi due lavori ci forniscono una testimonianza storica fondamentale in merito allo stato ecologico sulle scogliere e ai principali fattori inquinanti che ne alteravano lo stato di salute, e comunque all'epoca non si parlava ancora apertamente di cambiamenti climatici, sebbene alcuni timidi segnali cominciavano già a manifestarsi.

I RECENTI STUDI SULLE SCOGLIERE PER IL PROGETTO CASCADE

Nel 2021, grazie al progetto CASCADE Interreg Italia-Croazia (acronimo di: *CoAStal and marine waters integrated monitoring systems for ecosystems protection And managemEnt*), è stato condotto uno studio sullo stato ecologico della fauna insediata sulle scogliere a livello del piano di marea, lungo la fascia costiera dei Comuni di Duino-Aurisina, Trieste e Muggia.

In particolare sono state selezionate 15 stazioni di campionamento: dal Villaggio del Pescatore (stazione CAS1), alla Riserva Naturale delle Faleisie di Duino (CAS3), una all'interno della Riserva Marina di Miramare (CAS10), fino al Lazzaretto di Muggia (CAS15).

GRADO DI NATURALITÀ, RILIEVI FOTOGRAFICI, CAMPIONAMENTI

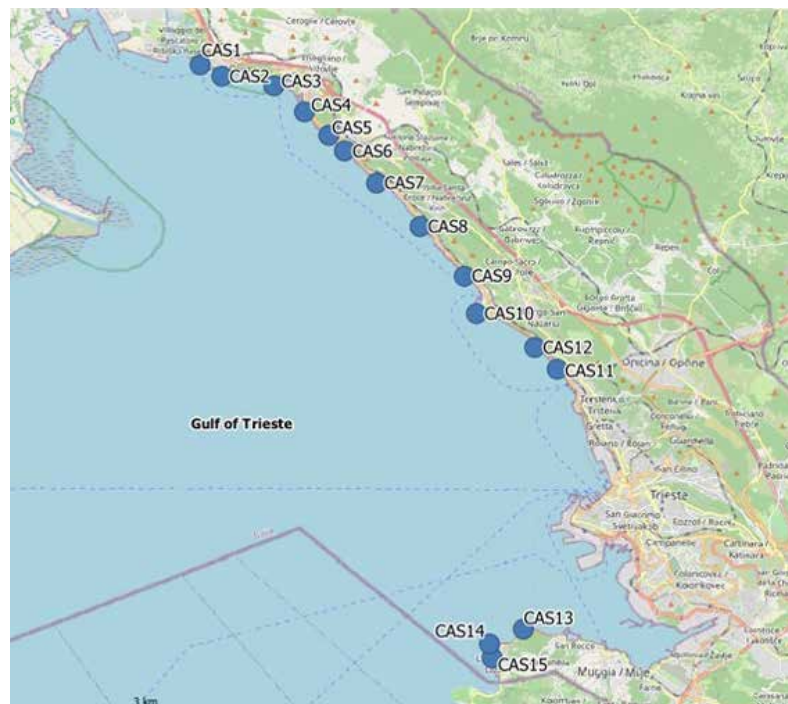
In ogni stazione è stato calcolato l'indice di degradazione idromorfologica elaborato *ad hoc* nel 2008 dai biologi della Stazione di biologia marina di Pirano, per stimare il grado di naturalità/artificialità della scogliera sui tre piani della marea: il mesolitorale superiore (UML), il mesolitorale inferiore (LML) e l'infralitorale superiore (UIL). Questo indice è composto da 7 parametri ai quali viene assegnato un punteggio che va da 0 (condizione naturale) a 2 (condizione alterata):

- 4 parametri sono inerenti la struttura, la tessitura, il materiale della roccia e l'estensione orizzontale del piano mesolitorale,
- 2 parametri riguardano la trasparenza dell'acqua e l'esposizione al moto ondoso,
- il settimo infine riguarda il grado di accessibilità da parte dei bagnanti (più l'habitat è inaccessibile ai bagnanti, minore è lo stress da calpestio per gli organismi abitanti la roccia).

Successivamente sono stati eseguiti i rilievi fotografici e il campionamento degli organismi con il metodo del grattaggio* all'interno di una superficie quadrata avente 20 cm di lato.

**È STATO CALCOLATO
L'INDICE DI
DEGRADAZIONE
IDROMORFOLOGICA
PER STIMARE
IL GRADO DI
NATURALITÀ/
ARTIFICIALITÀ DELLA
SCOGLIERA**

**SONO STATI
ESEGUITI I RILIEVI
FOTOGRAFICI E IL
CAMPIONAMENTO
DEGLI
ORGANISMI,
IDENTIFICANDO
275 GRUPPI
TASSONOMICI**



Progetto CASCADE: area di studio con le stazioni di campionamento (CAS1-15) sul litorale roccioso della provincia di Trieste

L'IDENTIFICAZIONE DEI GRUPPI DI ORGANISMI E DELLE SPECIE

Il campionamento degli organismi invertebrati ha permesso di identificare 275 gruppi tassonomici o taxa, dei quali 197 sono stati riconosciuti a livello di specie, grazie al conteggio e l'identificazione di 54.717 organismi. I gruppi tassonomici più abbondanti come numero di individui sono stati i crostacei (50%), seguiti dai molluschi gasteropodi e bivalvi (47%) e gli anellidi policheti (2,7%); con un minor numero di individui sono stati trovati anche echinodermi, spugne o poriferi, cnidari, briozoi, tunicati e platelminti.

Trattandosi di un ambiente periodicamente esposto all'aria, gli organismi che lo popolano devono essere tolleranti all'emersione, all'azione degli agenti atmosferici come il vento, le escursioni di temperatura e l'irraggiamento solare, specialmente sugli habitat rocciosi dove gli organismi non hanno la possibilità di infossarsi all'interno dei sedimenti sabbiosi o fangosi. Pertanto, è risultato evidente l'incremento del numero dei taxa dal mesolitorale superiore con 19 taxa, passando per il mesolitorale inferiore con 121 taxa e fino all'infralitorale superiore con 252 taxa.

**LA VARIETÀ DEGLI
ORGANISMI
AUMENTA
PASSANDO DAL
PIANO LITORALE
SUPERIORE,
ESPOSTO A FORTI
VARIAZIONI
AMBIENTALI, A
QUELLI INFERIORI**

SUDDIVISIONE DEL LITORALE IN BASE AI PIANI DI MAREA

Punta Sottile (Muggia)
durante la bassa marea



UML - mesolitorale superiore



LML - mesolitorale inferiore



UIL - infralitorale superiore



Barcola-Cedas:
campionamento degli
organismi sulla roccia
mediolitorale superiore, più
in basso è visibile la cintura
a mitili caratteristica del
mesolitorale inferiore



Costiera triestina: rilievi
fotografici sul piano
mesolitorale inferiore



DUE INDICI ECOLOGICI PER STIMARE LO STATO AMBIENTALE DELL'HABITAT INTERTIDALE

Al di là della caratterizzazione faunistica sulle scogliere intertidali della provincia di Trieste, questo studio ha permesso l'applicazione di due indici ecologici per stimare lo stato ambientale di questo habitat:

- il primo, già descritto sopra, è l'**indice di degradazione idromorfologica** della roccia (HM);
- il secondo invece è l'**indice AMBI**, normalmente applicato per i macroinvertebrati bentonici* dei fondali sabbiosi e fangosi, il quale definisce lo stato di **qualità ecologica** in base all'abbondanza relativa delle specie sensibili o tolleranti all'inquinamento organico.

Nella tabella di sintesi degli indici ecologici è possibile osservare che, dal punto di vista della degradazione idromorfologica, l'habitat è risultato in uno

DAL PUNTO DI VISTA DELLA DEGRADAZIONE IDROMORFOLOGICA, LO STATO DELL'HABITAT VARIA MOLTO NEI DIVERSI TRATTI DELLA COSTA

stato originario dalla stazione di campionamento del Villaggio del Pescatore fino a quella di Canovella degli zoppoli e nella stazione di Miramare. Nelle altre stazioni della costiera triestina, fino a Barcola, e in quelle del litorale muggesano l'habitat è stato classificato tra il leggermente e il moderatamente alterato.

Infine, lo stato ecologico degli organismi secondo l'indice AMBI ha fatto rilevare una situazione variabile tra l'indisturbato e il leggermente disturbato. Tale differenza è risultata dipendente dalla maggiore o minore dominanza dei mitili insediati sulle rocce, poiché la specie *Mytilus galloprovincialis* viene considerata dal punto di vista ecologico come una specie tollerante l'arricchimento organico e indicatrice di ambienti leggermente sbilanciati, condizione che nel Golfo di Trieste rappresenta la norma, vista anche la vocazione di quest'area per il suo allevamento.

LO STATO ECOLOGICO DEGLI ORGANISMI VARIA TRA L'INDISTURBATO E IL LEGGERMENTE DISTURBATO, DOVE È MAGGIORE LA DOMINANZA DEI MITILI

STAZIONE	NOME	STATO IDROMORFOLOGICO (HM)	STATO ECOLOGICO (AMBI)
CAS1	Villaggio del pescatore	originario	leggermente disturbato
CAS2	Scoglio di Dante	originario	leggermente disturbato
CAS3	Sentiero Rilke	originario	leggermente disturbato
CAS4	Costa dei barbari	originario	indisturbato
CAS5	Canovella	originario	leggermente disturbato
CAS6	Galleria naturale	leggermente alterato	indisturbato
CAS7	Moli tra Aurisina e Santa Croce	leggermente alterato	indisturbato
CAS8	Santa Croce squero	leggermente alterato	indisturbato
CAS9	Albero caduto	moderatamente alterato	indisturbato
CAS10	Bagno ducale di Miramare	originario	indisturbato
CAS11	Cedas Barcola	moderatamente alterato	leggermente disturbato
CAS12	Saturnia e Nettunia	moderatamente alterato	indisturbato
CAS13	Punta Olmi	moderatamente alterato	indisturbato
CAS14	Punta Sottile	leggermente alterato	leggermente disturbato
CAS15	Lazzaretto	leggermente alterato	leggermente disturbato

Stato di degradazione idromorfologica (HM) e stato ecologico della comunità animale (AMBI) dell'habitat intertidale roccioso della provincia di Trieste.

LA COZZA: NOSTRANA, MA INVASIVA

Tra l'altro è bene ribadire che il comune mitilo o cozza per sua natura è un mollusco caratteristico del piano mesolitorale, quindi si tratta di un organismo estremamente adattabile in ogni contesto ambientale. Non a caso è stato classificato dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (IUCN) tra le 100 specie più invasive al mondo. Questo deve farci meditare sul fatto che, quando sentiamo parlare di specie aliene, pensiamo erroneamente solo agli arrivi e quasi mai alle partenze da casa nostra.

L'ALGA BRUNA CON LE VESCICOLE: UN RELITTO ORMAI QUASI ESTINTO

Per quanto riguarda invece l'alga bruna *Fucus virsoides*, la quale assieme al mitilo rappresenta un tratto caratteristico del piano mesolitorale inferiore del Golfo di Trieste, essa è quasi completamente scomparsa lungo tutto il litorale dalla costiera triestina fino a punta Salvore e lungo la costa occidentale dell'Istria, salvo qualche rara località in cui sono ancora rinvenibili alcuni talli*. Questa macroalga è importante perché si tratta di una specie endemica del Mare Adriatico ed è considerata un relitto rimastoci dall'ultima glaciazione.

**L'ATTUALE
SITUAZIONE
CLIMATICA
NON SEMBRA
FAVOREVOLE ALLA
"QUERCIA MARINA",
SPECIE DI INDOLE
NORDICA**

Per chi ha una certa età, il *Fucus virsoides* - noto anche come quercia marina - rievoca anche ricordi d'infanzia legati alle giornate trascorse al mare, in cui ci si dilettava a far "scoppiare" le vescicole piene d'aria presenti sul tallo* dell'alga, che le permettono di galleggiare e respirare durante l'alta marea e che emettono un caratteristico rumore di scoppiettio se schiacciate.

Nel 2009 era ancora presente nel golfo in maniera più o meno continua, mentre negli anni successivi ci fu un netto declino fino alla quasi totale scomparsa. Durante i campionamenti del 2021, in occasione del presente studio, non è stato ritrovato nemmeno un tallo di quest'alga. I motivi della sua scomparsa non sono tuttora chiari e numerose ipotesi sono al vaglio, ciononostante l'attuale situazione climatica non sembra favorevole a questa specie di indole nordica. In ogni caso l'intera comunità macroalgale del meso e infralitorale roccioso esprime profonde modificazioni che possono essere il risultato di una complessa interazione tra cambiamenti climatici, inquinamento, artificializzazione costiera e altri fattori di disturbo ambientale.

**L'INTERAZIONE
TRA CAMBIAMENTI
CLIMATICI,
INQUINAMENTO,
ARTIFICIALIZZAZIONE
COSTIERA E ALTRI
FATTORI DI DISTURBO
HA MODIFICATO
L'INTERA COMUNITÀ
MACROALGALE**

Saline di Sicciole (Pirano), 2009:
Fucus virsoides sulla roccia mesolitorale

Foto: M. Orlando-Bonaca





IL RAPPORTO TRA ALGHE E MACROINVERTEBRATI DELLA COSTA ROCCIOSA

Questo studio ha preso in considerazione esclusivamente l'aspetto faunistico dell'ambiente roccioso di

**LA COMUNITÀ
ALGALE
RAPPRESENTA
UNA FONTE DI
NUTRIMENTO
E DI
PROTEZIONE
PER GLI
ANIMALI**

marea, attraverso l'analisi dei macroinvertebrati, che nella provincia di Trieste non era stato più trattato in maniera esaustiva da oltre 50 anni. Ciononostante la comu-

nità algale rappresenta una fonte di nutrimento e di protezione dal disseccamento durante la bassa marea, condizionando in maniera significativa la struttura della comunità animale. Sebbene da questo studio sia emerso un quadro ecologico sinteticamente classificabi-

**OGGI
PREVALGONO
GLI ANIMALI
FILTRATORI
RISPETTO
A QUELLI
BRUCATORI:
PROBABILE
SEGNALE DI
UN RECENTE
IMPOVERIMENTO
DELLA COMUNITÀ
VEGETALE**

le come buono, è stata rilevata però una netta prevalenza degli animali filtratori rispetto a quelli brucatori, se confrontato con quello condotto nel 2008 lungo il litorale sloveno del golfo. Questa differenza potrebbe essere interpreta-

bile come probabile segnale di impoverimento della comunità vegetale durante l'ultimo decennio.

LE NUOVE MINACCE: CAMBIAMENTO CLIMATICO E INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE

Rispetto ai primi studi condotti alla fine degli anni '60 è senz'altro possibile affermare che le diffuse fasce di nafta in superficie che imbrattavano il litorale non sono più presenti e almeno in questo senso la qualità delle acque è notevolmente migliorata. Al giorno d'oggi, inoltre, la qualità delle acque marine viene costantemente monitorata per soddisfare degli standard specifici di qualità definiti a livello comunitario e soprattutto è operativo un sistema di allerta e di intervento nel caso dello sversamento in mare degli idrocarburi o di altre sostanze nocive.

Quello che invece può rappresentare la maggiore minaccia per la sopravvivenza degli habitat litorali è proprio il cambiamento climatico, che a causa dell'aumento delle temperature e la maggiore frequenza e intensità delle ondate di calore può incrementare notevolmente il grado di stress per questi organismi animali e vegetali che popolano il piano di marea.

Infine, l'aumento del livello medio del mare rappresenta la minaccia più pericolosa nel lungo periodo. Vista l'accelerazione che sta avendo questo fenomeno, c'è il concreto rischio della perdita definitiva delle comunità sopra e mesolitorali, soprattutto dove le aree retrostanti sono già state completamente modificate. Un monito e un invito anche per i frequentatori estivi del nostro litorale per imparare a osservare la casa della marea con la sua ricchezza di vita.

DA FINE ANNI '60, LA QUALITÀ DELLE ACQUE È MIGLIORATA. È COSTANTEMENTE MONITORATA E PROTETTA ANCHE DA UN SISTEMA DI ALLERTA E INTERVENTO

OGGI LA MAGGIORE MINACCIA PER GLI HABITAT LITORALI È IL CAMBIAMENTO CLIMATICO E, NEL LUNGO PERIODO, L'INNALZAMENTO DEL MARE

ZONA INTERTIDALE

la fascia costiera compresa tra i livelli di alta e bassa marea, soggetta a emersione e immersione periodica. In generale il termine tidale, deriva dall'inglese *tide*, che significa appunto marea.

BOCCA DI PORTO

passaggio naturale o artificiale che permette lo scambio d'acqua tra il mare aperto e la laguna.

GRATTAGGIO

tecnica di campionamento utilizzata per prelevare organismi animali e vegetali che vivono su substrati duri, sia naturali che artificiali. Come strumenti si utilizzano raschietti o scalpelli per staccare gli organismi all'interno di una cornice di superficie standard, a esempio 20x20 cm.

MACROINVERTEBRATI BENTONICI

invertebrati acquatici di dimensioni superiori 0,5-1 mm che vivono sul fondale di mari, laghi e fiumi. Trattandosi di organismi poco mobili e sensibili all'inquinamento sono usati come bioindicatori fondamentali per valutare la qualità dell'habitat.

NICCHIO

involucro protettivo che riveste il corpo di alcuni invertebrati. Nel caso dei cirripedi è costituito da piastre calcaree.

TALLO ALGALE

corpo vegetativo delle macroalghe.

Nicola Bettoso e Lisa Faresi
ARPA FVG

Lorenzo Peter Castelletto
Area Marina Protetta di Miramare

SPECIALE

LE COSTE E LA LAGUNA

LE DUNE E LE ISOLE BARRIERA

Sistemi dinamici da tutelare per proteggere le nostre coste

Le forme della costa occidentale del Friuli Venezia Giulia, bassa e sabbiosa, includono ecosistemi straordinariamente dinamici come le **isole barriera** che delimitano le lagune di Marano e Grado e gli ultimi lembi rimanenti delle **dune costiere**. Questa sezione ci porta alla scoperta di questi veri e propri baluardi naturali, capaci di adattarsi e proteggere l'entroterra dagli effetti dell'innalzamento del mare, a patto che ne vengano salvaguardati i delicati equilibri.

Il percorso si sviluppa attraverso tre analisi incentrate sulla resilienza della costa:

- **La migrazione naturale delle isole:** il primo articolo analizza l'evoluzione delle isole barriera nell'arco di 130 anni. Lo studio rivela una sorprendente capacità di risposta all'innalzamento del mare: questi sistemi rispondono spostandosi spontaneamente verso terra e rimodellando le proprie superfici, un meccanismo vitale che richiede una gestione del territorio flessibile e attenta.
- **La ricostruzione delle dune:** il secondo contributo si focalizza sulle soluzioni basate sulla natura (Nature-based Solutions) studiate in un progetto per Lignano Sabbiadoro. Sfruttando le potenzialità del vento di Bora e attraverso l'uso strategico, di barriere frangivento e di piante pioniere, il progetto mostra come sia possibile far rinascere le avandune, ripristinando una difesa naturale efficace contro le mareggiate.
- **La tutela della biodiversità dallo spazio:** l'ultimo studio unisce il monitoraggio sul campo alla tecnologia satellitare. Le Università di Trieste e di Udine illustrano come il **telerilevamento** aiuti a mappare la **vegetazione dunale** per monitorare e proteggere i **siti di nidificazione** di specie tipiche e vulnerabili, come il Fratino e la Beccaccia di mare.

Tre contributi che mettono in luce la necessità di un approccio flessibile e adattativo nella gestione, conservazione e ripristino di questi habitat costieri: solo così questi fragili ambienti sabbiosi potranno continuare a rivelarsi alleati efficaci contro gli impatti climatici futuri.

An aerial photograph of a coastal lagoon. A long, narrow, light-colored sandy spit extends from the left towards the right, separating a large, calm body of water on the left from a smaller, more turbulent body of water on the right. The water on the left is a deep, dark green, while the water on the right is a lighter, turquoise blue. The spit itself is mostly bare sand, with some sparse, low-lying vegetation visible near its tip. A small, dark boat is visible in the water near the tip of the spit. The sky above is a pale blue with some light, wispy clouds. The overall scene is a natural, coastal landscape.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



UNA RISPOSTA NATURALE ALL'INNALZAMENTO DEL MARE: L'EVOLUZIONE DELLE ISOLE BARRIERA

Le isole barriera della laguna di Marano e Grado sono sistemi dinamici che reagiscono all'innalzamento del mare.

Uno studio su 130 anni analizza gli spostamenti della linea di costa e le variazioni delle superfici emerse nei diversi periodi e tratti del litorale, rilevando anche l'effetto di opere artificiali sul trasporto dei sedimenti.

Le isole rispondono all'attuale innalzamento marino migrando verso terra e aumentando la loro superficie emersa.

Questo equilibrio richiede una gestione flessibile che tuteli i processi naturali.

Le isole barriera sono isole di sabbia o ghiaia che separano le lagune dal mare. Hanno valori ambientali, socioeconomici e culturali unici, ma sono estremamente sensibili ai rischi costieri, primo fra tutti l'innalzamento del livello del mare al quale rispondono in maniera molto diversificata da sito a sito. Se nella maggior parte dei casi l'innalzamento del livello del mare provoca processi di erosione, frammentazione e sommersione, in alcuni casi queste barriere sopravvivono e, pur migrando verso terra, possono mantenere o addirittura espandere la loro superficie.

Essendo siti molto ambiti dall'uomo, la maggior parte delle isole barriera presenti nel mondo sono completamente stabilizzate e artificializzate a causa dell'urbanizzazione e della costruzione di opere di difesa costiera, limitando così fortemente la loro risposta naturale ai cambiamenti del livello del mare.

LE ISOLE BARRIERA DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO: UN LABORATORIO A CIELO APERTO

La laguna di Marano e Grado, come quella di Venezia, presenta una buona estensione di isole barriera. Nel caso della laguna di Venezia esse sono interamente artificializzate e difese da opere costiere, mentre in quella di Marano e Grado presentano ancora elevati gradi di libertà, con molti tratti che si modificano rapidamente e liberamente in risposta alle forzanti meteomarine. Possono così rappresentare casi studio di grande interesse, un laboratorio a cielo aperto per osservare come si evolvono questi sistemi costieri in risposta all'innalzamenti del livello del mare.

LE ISOLE PIÙ DINAMICHE SONO QUELLE DI POCO EMERSE: I "BANCHI SABBIOSI" CHE CAMBIANO VELOCEMENTE FORMA E DIMENSIONE

A partire dal 2010, l'Università degli Studi di Trieste, in collaborazione con la Regione Friuli Venezia Giulia, ha realizzato una serie di studi per comprendere le dinamiche e le modifiche delle isole barriera della laguna di Marano e Grado, focalizzandosi particolarmente sulle isole maggiormente dinamiche comprese tra la bocca di Grado e Porto Buso, conosciute come "banchi sabbiosi" di Anfora, Orio e Tratauri. I banchi sabbiosi sono isole di poco emerse che cambiano forma e dimensione a velocità sorprendente; sono separate tra loro da aperture (bocche) che cambiano anch'esse dimensione e posizione, cosicché nel corso degli anni è quasi impossibile identificare un banco rispetto a un altro.

LA LAGUNA DI MARANO E GRADO PRESENTA ESTESE ISOLE BARRIERA CHE SI EVOLVONO LIBERAMENTE IN RISPOSTA ALL'INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE



RICOSTRUIRE 130 ANNI DI EVOLUZIONE DELLE ISOLE BARRIERA: LE FONTI E LO STUDIO

Grazie all'esistenza di cartografia storica e di foto aeree è stato possibile realizzare un'analisi quantitativa dell'evoluzione dei banchi di sabbia a partire da oltre 130 anni fa. La linea di riva del passato è stata infatti ricavata da diverse fonti:

- cartogr- (dal 1954 al 2014)

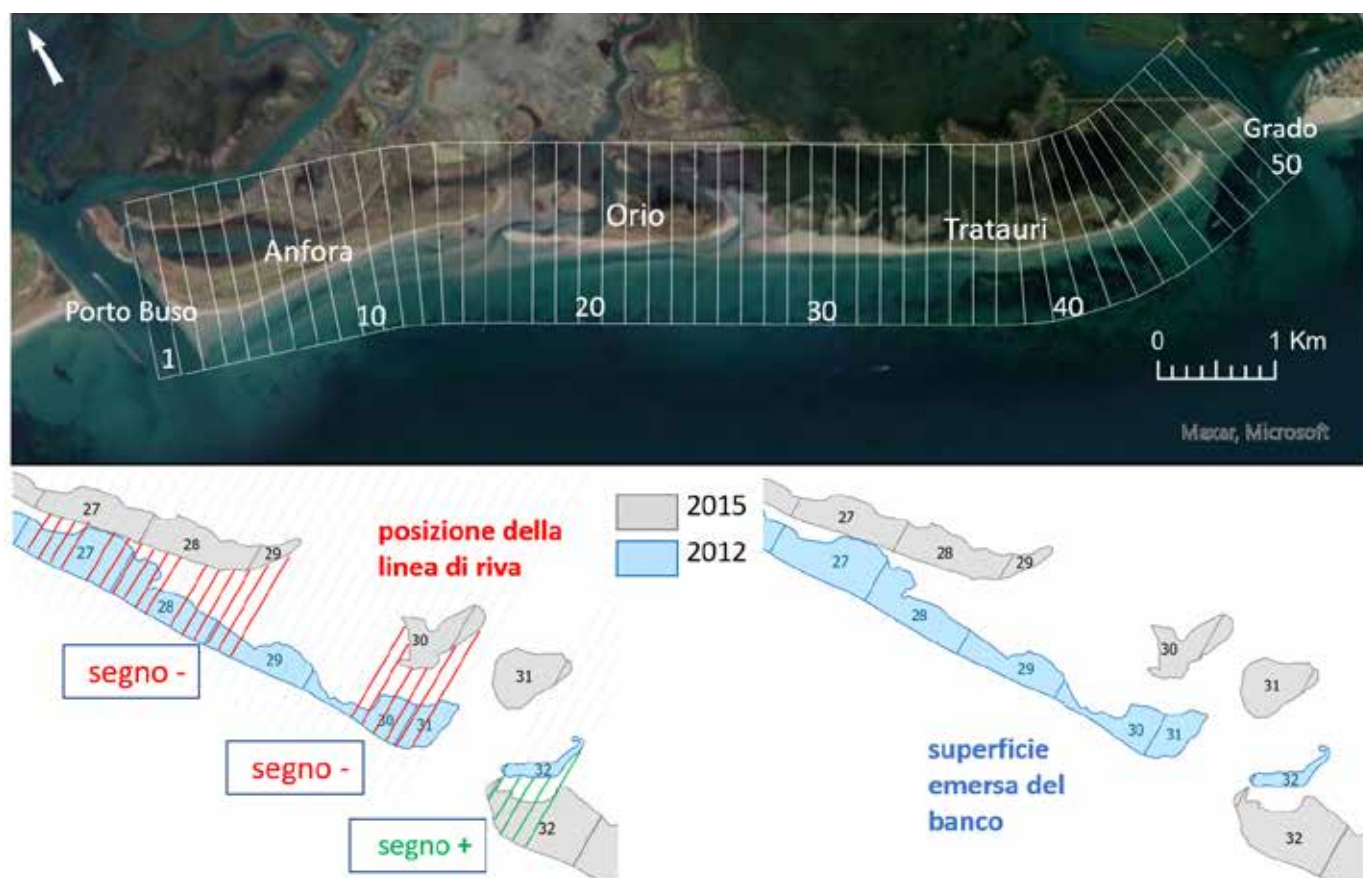
A partire dal 2015 il Coastal Group dell'Università degli Studi di Trieste ha iniziato una serie di campagne di rilievo topografico dedicate ogni due anni, che hanno permesso di ottenere la posizione della linea di riva con maggiore precisione.

SONO STATI MISURATI DUE PARAMETRI PRINCIPALI: LA POSIZIONE DELLA LINEA DI RIVA E L'ESTENSIONE DELLA SUPERFICIE EMERSA DEL BANCO

Per analizzare i cambiamenti in modo sistematico, la fascia costiera occupata dai banchi è stata suddivisa in 50 celle larghe 200 m ciascuna. In ogni cella sono stati misurati due parametri principali: la posizione della linea di riva e la superficie emersa del banco. Gli spostamenti della linea di riva verso mare (progradazione) o verso terra (arretramento), insieme all'aumento o alla diminuzione della superficie di spiaggia emersa, sono tra i primi indicatori che possiamo usare per descrivere la risposta che il sistema costiero dà quando cambiano le forzanti in gioco: il moto ondoso incidente sulla costa, l'innalzamento del livello del mare e gli apporti di sedimenti.

SONO INDICATORI DI COME IL SISTEMA COSTIERO RISPONDE AI CAMBIAMENTI DI MOTO ONDOSO, LIVELLO DEL MARE E APPORTO DI SEDIMENTI

ANALISI QUANTITATIVA DELL'EVOLUZIONE DEI BANCHI



Analisi quantitativa eseguita sul sistema dei banchi della Laguna di Grado: i 10 km di fascia costiera sono stati suddivisi in 50 celle (immagine in alto) sulle quali, per ogni annata disponibile, sono stati misurati lo spostamento della posizione della linea di riva (in basso a sinistra) e la variazione della superficie emersa del banco (in basso a destra). A uno spostamento della linea di riva verso terra (arretramento) indicato da linee rosse corrispondono valori negativi, mentre a uno spostamento verso mare (avanzamento) indicato da linee verdi corrispondono valori positivi.

LA FORMAZIONE DEI BANCHI

La prima fase di formazione dei banchi sabbiosi può essere osservata nell'intervallo di tempo compreso tra il 1938 e il 1978 grazie a una limitata disponibilità di materiale cartografico e di foto aeree. In questa fase si sono formati estesi banchi di sabbia in un'area di bassi fondali tra Porto Buso e Grado in posizione avanzata verso mare rispetto alle isole barriera preesistenti (come illustrato nel box "LE PECULIARITÀ DEL SISTEMA DI ISOLE BARRIERA DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO").

TRA IL 1938 E IL 1978 SI SONO FORMATI ESTESI BANCHI DI SABBIA TRA PORTO BUSO E GRADO, PIÙ AL LARGO RISPETTO ALLE ISOLE BARRIERA PREESISTENTI

ALCUNE OPERE ARTIFICIALI (DIGA FORANEA DI GRADO, MOLI GUARDIANI DI PORTO BUSO) HANNO ALTERATO IL TRASPORTO NATURALE DEI SEDIMENTI LUNGO LA COSTA

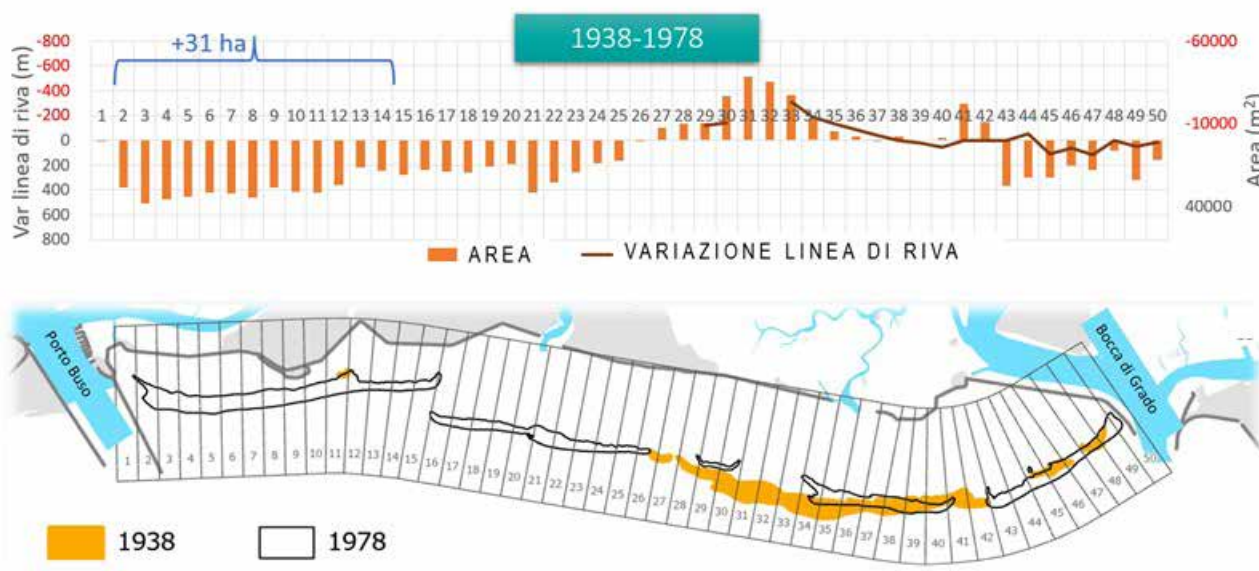
In questa fase alcune opere artificiali hanno avuto un ruolo importante nel modificare il trasporto naturale dei sedimenti lungo la costa. In particolare, la

costruzione di una diga foranea lungo il lato occidentale della bocca di Grado (1928-1934) e di due moli guardiani per fissare l'ingresso di Porto Buso (1960-1964) hanno alterato il cosiddetto "trasporto lungo riva", cioè il movimento dei sedimenti trasportati parallelamente alla costa dalle correnti e dalle onde. In alcune zone ciò ha favorito l'accumulo di sabbia e la nascita di nuovi banchi come il banco Anfora nelle celle 1-15, con un accumulo di ben 31 ettari. In altre zone invece si sono manifestati deficit sedimentari ed erosione.

Nel 1978, il sistema di banchi appare completamente sviluppato sull'intero settore costiero, ma al contempo sono evidenti fenomeni di rottura e frammentazione dei cordoni sabbiosi, con la creazione di aperture temporanee o permanenti (brecce o rotte) che modificano l'assetto costiero e la circolazione delle acque nelle aree lagunari retrostanti.

NEL 1978 IL SISTEMA DI BANCHI COSTIERI È COMPLETAMENTE SVILUPPATO, MA CON EVIDENTI FENOMENI DI ROTTURA E FRAMMENTAZIONE

PRIMA FASE DI FORMAZIONE DEI BANCHI SABBIOSI TRA IL 1938 E IL 1978



La prima fase di formazione dei banchi sabbiosi (tra il 1938 e il 1978) può essere osservata grazie alla quantificazione dei due indicatori (area e variazione della linea di riva) nel grafico in alto: valori positivi delle barre arancione indicano un guadagno di superficie che può essere accompagnato o meno da uno spostamento verso mare della linea di riva (valori positivi della linea marrone).

La mappa in basso, dove sono riportati i poligoni che rappresentano l'estensione dei banchi nelle due annate, consente una visione più realistica del fenomeno rendendo evidente il grande cambiamento avvenuto in 40 anni.

FENOMENO DI BRECCIATURA DEI BANCHI

Nella foto aerea del 1978 (volo CGR Compagnia Generale Riprese aeree per conto del CNR) è evidente come, in un tratto dei banchi, si siano verificati fenomeni di rottura e frammentazione, con la creazione di aperture temporanee (breccie). Queste breccie possono divenire permanenti o semipermanenti grazie all'azione delle correnti dovute a flusso e riflusso della marea tra il mare aperto e gli specchi acquei retrostanti, collegati a loro volta con la laguna stessa.



LE PECULIARITÀ DEL SISTEMA DI ISOLE BARRIERA DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO

Nella laguna di Marano e Grado il sistema di isole barriera, che normalmente separa le lagune dal mare aperto, assume caratteristiche del tutto peculiari.

La parte occidentale, compresa tra Porto Buso e la bocca di Lignano, è costituita dalle isole barriera di Martignano e Sant'Andrea separate tra loro dalla bocca di Sant'Andrea. Sono state profondamente modificate dall'uomo ma conservano un sistema di spiaggia che continua a evolversi naturalmente sotto l'azione del moto ondoso e della marea.

La porzione centro-orientale, da Porto Buso alla bocca di Grado, è invece caratterizzata da un peculiare doppio sistema. Verso l'interno si trovano antiche isole barriera ormai lontane dall'azione diretta del mare e in parte trasformate dall'uomo o irrigidite da argini. Verso mare, si estendono per circa 10 km una serie di banchi sabbiosi, non modificati dall'uomo e di poco elevati sul livello del mare. Proprio questi banchi, modellati continuamente dall'azione combinata delle onde, delle correnti e delle maree, rappresentano uno degli ambienti costieri più dinamici dell'Adriatico.



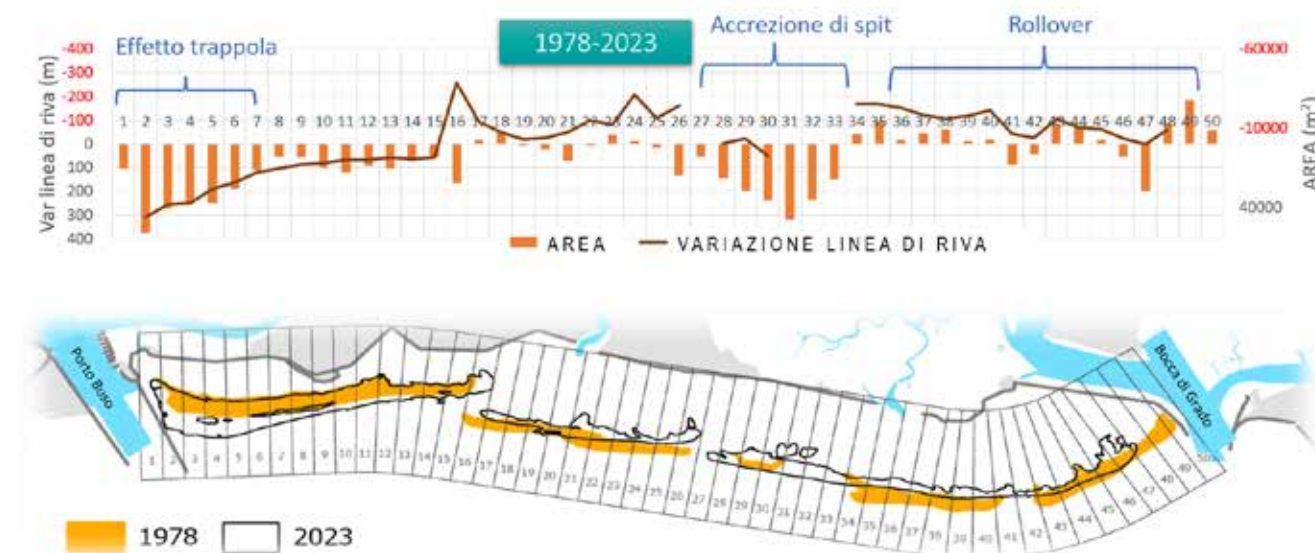
L'EVOLUZIONE DEI BANCHI NEGLI ULTIMI 50 ANNI

Nella seconda fase di tempo studiata (dal 1978 al 2023) la maggiore disponibilità di dati ci permette di osservare l'evoluzione dei banchi con maggiore precisione e su diverse scale temporali.

Considerando un intervallo di medio termine (45 anni), un aumento della superficie emersa è il modello più diffuso lungo le 50 celle del banco, mentre la posizione della linea di costa mostra una variabilità rilevante.

**DAL 1978 AL 2023
LA SUPERFICIE
EMERSA È IN GENERE
AUMENTATA, CON LA
CHIUSURA DI ALCUNE
BRECCE, MENTRE LA
POSIZIONE DELLA
LINEA DI COSTA
MOSTRA GRANDE
VARIABILITÀ**

SECONDA FASE DI EVOLUZIONE DEI BANCHI SABBIOSI TRA IL 1978 E IL 2023



La seconda fase di evoluzione dei banchi (dal 1978 al 2023) rappresenta con le stesse modalità della figura “SERVE UNA GESTIONE ADATTATIVA, CHE CONSERVI I PROCESSI NATURALI CHE MODELLANO IL TERRITORIO PIÙ CHE LE SINGOLE FORME IN SÉ” a pagina 193”. Questa fase consente di osservare fenomeni evolutivi differenti per i diversi settori dei banchi.

L'effetto trappola del molo di Porto Buso rispetto alle sabbie che transitano lungo riva verso ovest è ancora attestato dal settore occidentale (celle 1-15) con valori positivi sia dell'indicatore di superficie che di quello della posizione della linea di riva. Nel settore centrale (celle 26-34) si verificano notevoli aumenti di superficie con la formazione di un lungo banco allungato (*spit*) laddove prima erano presenti estese brecce a separare piccole porzioni di banchi. Infine, il settore orientale (celle 35-50) mostra una migrazione del banco verso l'entroterra, registrato da significativi arretramenti della linea di riva, per un processo comune a molte isole barriera nel mondo (noto come *rollover*).

I CAMBIAMENTI PIÙ RECENTI ANALIZZATI SU PERIODI BREVI

Sono state effettuate anche analisi di dettaglio di queste dinamiche su periodi più brevi. I dati nel periodo 2008–2012, ad esempio, mostrano chiaramente variazioni lungo la costa dovute a un processo tipico chiamato “cannibalizzazione”

in cui alcune parti della costa perdono sedimenti a favore di altre. I tre banchi analizzati, infatti mostrano un comportamento “rotazionale”: questo si vede dalla forte relazione tra due indicatori. In pratica, in alcune zone la costa avanza e la superficie aumenta, mentre in altre arretra e perde superficie.

I DIVERSI PROCESSI DI ARRETRAMENTO DEI BANCHI

Uno degli aspetti centrali dello studio riguarda i processi attraverso cui i banchi riescono ad adattarsi all'innalzamento del livello del mare.

Tra i processi di arretramento della costa, il più semplice si riconosce quando entrambi gli indicatori sono negativi: l'erosione fa arretrare la linea di costa e assottiglia la barriera, causando una perdita di superficie. I due indicatori risultano entrambi negativi anche quando, durante le mareggiate, le onde superano la barriera, rompendo l'isola e trasportando sedimenti verso l'interno, a creare un deposito a forma di ventaglio (ventaglio di rotta) che può essere sommerso. Quando questo deposito risulta invece emerso rispetto al livello del mare, la linea di riva mostra un arretramento, ma

**QUANDO LA SABBIA
EROSA SUL LATO
A MARE VIENE
TRASFERITA VERSO
IL RETRO DELLA
BARRIERA, L'ISOLA
PUÒ "MIGRARE"
LENTAMENTE VERSO
L'INTERNO SENZA
SCOMPARIRE**

la superficie dell'isola si amplia verso la laguna e quindi si ha un guadagno di area emersa. Questo processo, se si ripete nel

tempo, porta a un graduale spostamento delle isole verso terra.

In pratica, la sabbia erosa sul lato esposto al mare viene trasferita verso il retro della barriera, consentendo all'isola di "migrare" lentamente verso l'interno senza scomparire. È un processo fondamentale perché permette alle isole barriera di sopravvivere anche in condizioni di aumento del livello del mare, purché vi sia sufficiente disponibilità di sedimenti e spazio per la migrazione naturale verso l'entroterra.

**COSÌ I BANCHI
RIESCONO AD
ADATTARSI
ALL'INNALZAMENTO
DEL LIVELLO DEL
MARE, PURCHÉ
SIANO DISPONIBILI
SEDIMENTI E SPAZIO
PER LA MIGRAZIONE
NATURALE VERSO
L'ENTROTERRA**

VENTAGLIO DI ROTTA SOMMERSO SUI BANCHI DELLA LAGUNA DI GRADO



Esempio di ventaglio di rotta sommerso (*submerged washover fan*) sui banchi della Laguna di Grado. Formatosi in seguito a un evento di tempesta che "rompe" la continuità del banco, questo tipo di processo è rappresentato da un valore negativo di entrambi gli indicatori di variazione evolutiva, sia della posizione della linea di riva che della superficie emersa del banco.

VENTAGLIO DI ROTTA EMERSO SUI BANCHI DELLA LAGUNA DI GRADO



Esempio di ventaglio di rotta emerso (*washover fan*) sui banchi della Laguna di Grado. Formatosi in seguito a un evento di tempesta che “rompe” la continuità del banco, questo tipo di processo è rappresentato da valori opposti degli indicatori di variazione evolutiva, negativo per la posizione della linea di riva, ma positivo per il guadagno di superficie emersa del banco.

I FENOMENI CHE PORTANO ALL'AVANZAMENTO DELLA COSTA

In altri settori, invece, prevalgono processi progradanti, cioè di avanzamento della costa verso il mare. Possono essere fenomeni di accrescimento delle estremità sabbiose (accrezione di *spit*) o

la saldatura di barre sommerse, che contribuiscono entrambi ad ampliare la superficie emersa di banchi. Le depressioni tra le nuove barre emerse possono trasformarsi in piccoli avvallamenti paralleli o in specchi acqueei dalla forma caratteristica (detta a “occhio di gatto”).

ZONA DI ACCRESCIMENTO DELL'ESTREMITÀ OCCIDENTALE DEL BANCO



Grazie al trasporto lungo riva delle sabbie, una nuova superficie di sabbia si è formata in poco tempo e non è ancora stata coperta dalla vegetazione (qualche decina di mesi).

BARRE SABBIOSE PARALLELE



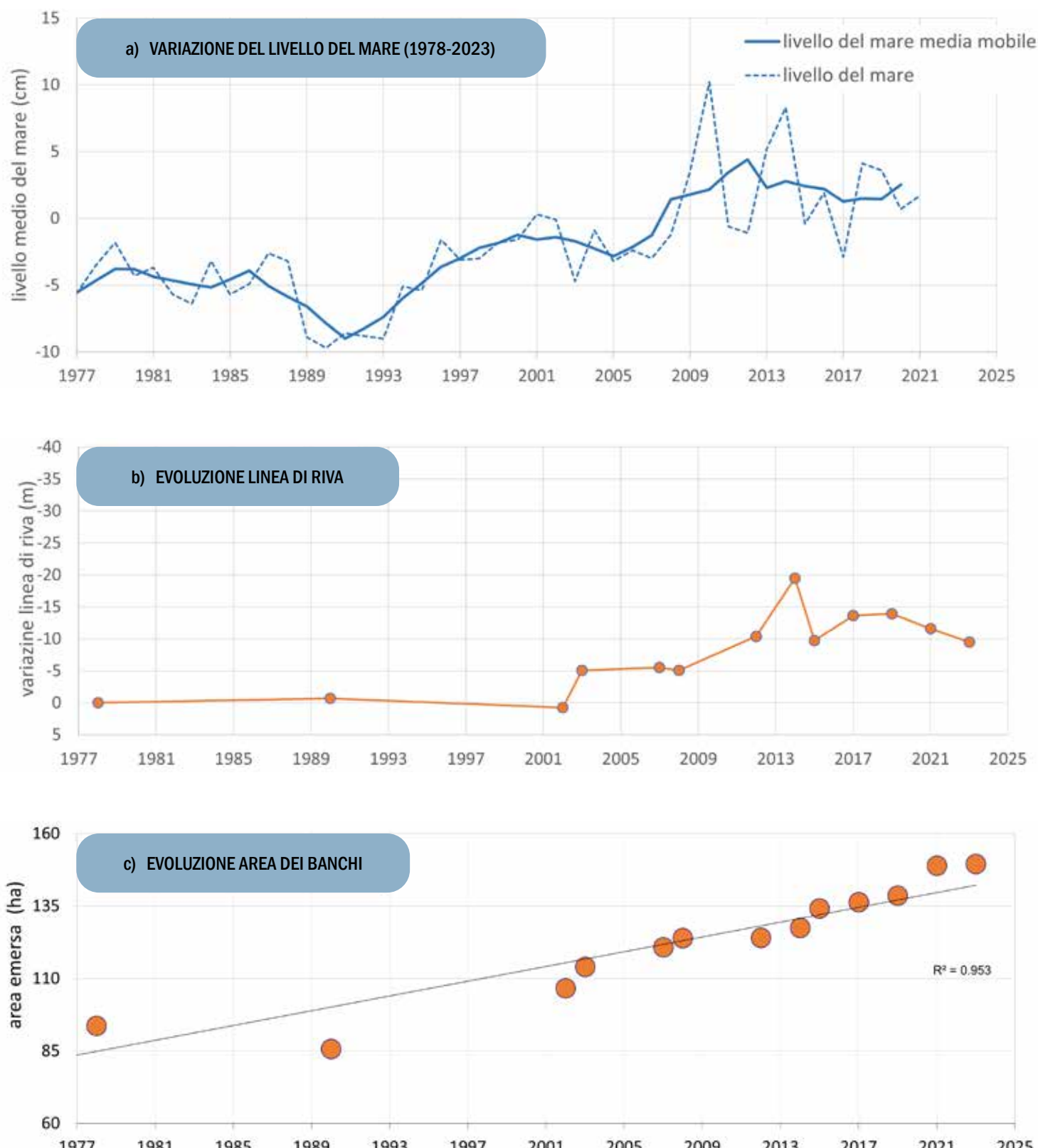
In alcuni tratti del banco si formano delle barre sabbiose parallele che, dapprima sommerse, tendono ad aumentare di quota e si rinsaldano al banco stesso aumentandone la superficie emersa.

SPECCHIO D'ACQUA A "OCCHIO DI GATTO" (CAT EYE POND)



Questa curiosa forma costiera si è originata all'estremità in accrescimento del banco d'Orio, dove l'accumulo di sedimenti trasportati dalle onde lungo costa e rimaneggiati dalle correnti di marea ha progressivamente isolato una depressione, dando origine a un piccolo bacino d'acqua dalla caratteristica forma ellittica.

EVOLUZIONE COMPLESSIVA DEL SISTEMA DEI BANCHI SABBIOSI DI GRADO IN RELAZIONE ALLE VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE



Evolutione complessiva del sistema dei banchi sabbiosi di Grado (valori medi delle 50 celle analizzate) in relazione alle variazioni del livello del mare dal 1978 al 2023. I dati del livello del mare sono ricavati dai valori medi annuali registrati dalla stazione mareografica di Trieste-Molo Sartorio ([SEANOE, https://doi.org/10.17882/62758](https://doi.org/10.17882/62758)). Il pannello (a) mostra l'andamento del livello medio del mare e della relativa media mobile (di ordine 5); il pannello (b) l'evoluzione della posizione media della linea di riva, con valori negativi indicanti arretramento verso terra; il pannello (c) la variazione della superficie emersa complessiva dei banchi sabbiosi. Nel complesso, l'aumento del livello del mare si accompagna a un progressivo arretramento della linea di costa, mentre la superficie emersa dei banchi mostra una tendenza generale all'aumento.

IL SEGNALE A LUNGO TERMINE

Infine, possiamo osservare l'andamento generale dell'evoluzione dei banchi e verificare se esiste una relazione con l'andamento del livello del mare registrato dal mareografo di Trieste, presso il Molo Sartorio. I dati mostrano che il tasso medio di innalzamento del livello del mare è aumentato significativamente negli ultimi decenni: da circa 1.4 millimetri all'anno nel lungo periodo storico a circa 3.5 millimetri all'anno dopo il 1989. Questo incremento è coerente con le tendenze osservate a livello globale e viene attribuito principalmente al riscaldamento climatico.

L'ARRETRAMENTO DELLA LINEA DI RIVA SEMBRA STRETTAMENTE COLLEGATO ALL'AUMENTO DEL LIVELLO MARINO, ANCHE SE LA RISPOSTA DEL SISTEMA NON È IMMEDIATA

L'arretramento della linea di riva sembra strettamente collegato a queste oscillazioni del livello marino, anche se la risposta del sistema non è immediata: tra l'aumento del livello del mare e l'effettiva riorganizzazione della costa trascorrono mediamente circa quattro anni. Questo ritardo suggerisce che il sistema abbia una certa capaci-

tà di adattamento naturale, ma anche che esistano limiti oltre i quali tale resilienza potrebbe non essere più sufficiente.

Infine, un aspetto particolarmente interessante riguarda la superficie complessiva delle isole: nonostante l'erosione osservata in molti tratti, nel lungo periodo emerge una tendenza generale all'aumento delle aree emerse. Ciò indica che il sistema lagunare riesce ancora, almeno in parte, a compensare le perdite attraverso il continuo ridistribuirsi dei sedimenti. Questo equilibrio dinamico dipende però dalla presenza di adeguate fonti sedimentarie e dalla possibilità per i processi naturali di continuare ad agire senza eccessive interferenze.

SERVE UNA GESTIONE ADATTATIVA, CHE CONSERVI I PROCESSI NATURALI CHE MODELLANO IL TERRITORIO PIÙ CHE LE SINGOLE FORME IN SÉ

In questo contesto, la gestione dovrebbe basarsi su un approccio adattivo, cioè capace di cambiare nel tempo in base alle condizioni, e concentrarsi soprattutto sulla conservazione dei sistemi morfodinamici (cioè dei processi naturali che modellano il territorio), più che delle singole forme in sé.

NEL LUNGO PERIODO, LA SUPERFICIE COMPLESSIVA DELLE ISOLE TENDE AD AUMENTARE: IL RIDISTRIBUIRSI DEI SEDIMENTI COMPENSA ANCORA, ALMENO IN PARTE, LE PERDITE

Annelore Bezzi, Giulia Casagrande, Saverio Fracaros, Simone Pillon, Davide Martinucci, Chiara Popesso, Sebastian Spadotto, Stefano Sponza, Giorgio Fontolan

Università degli Studi di Trieste

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata da NextGeneration EU, Progetto "Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem iNEST" (CUP J43C22000320006) e dal Servizio Biodiversità della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA





DIFENDERE LE NOSTRE COSTE CON SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA: IL RIPRISTINO DELLE DUNE COSTIERE

Le pressioni antropiche hanno deteriorato e ridotto a pochi lembi le dune costiere, baluardo naturale per la difesa di coste e spiagge del Friuli Venezia Giulia.

Per contrastare l'innalzamento del mare, si punta oggi su soluzioni basate sulla natura, ricreando questi habitat costieri che forniscono molti benefici.

Sfruttando la Bora, a Lignano Sabbiadoro un progetto mira a favorire la nascita spontanea di nuove avandune tramite barriere frangivento, piante pioniere e una gestione sostenibile della fruizione turistica della spiaggia.

Le pressioni di origine naturale e antropica hanno contribuito a un peggioramento della qualità delle aree costiere sia dal punto di vista fisico e geologico che da quello degli ecosistemi e del paesaggio. Come risultato di una pressione antropica fortissima e indiscriminata le nostre coste hanno subito la progressiva banalizzazione del paesaggio, l'intensificazione dei fenomeni erosivi e la perdita di morfologie, prime fra tutte le dune costiere. Al contempo, il cambiamento climatico in atto sta accelerando la necessità di sviluppare diverse e nuove soluzioni per la difesa e la resilienza della costa nei confronti dell'innalzamento del livello del mare.

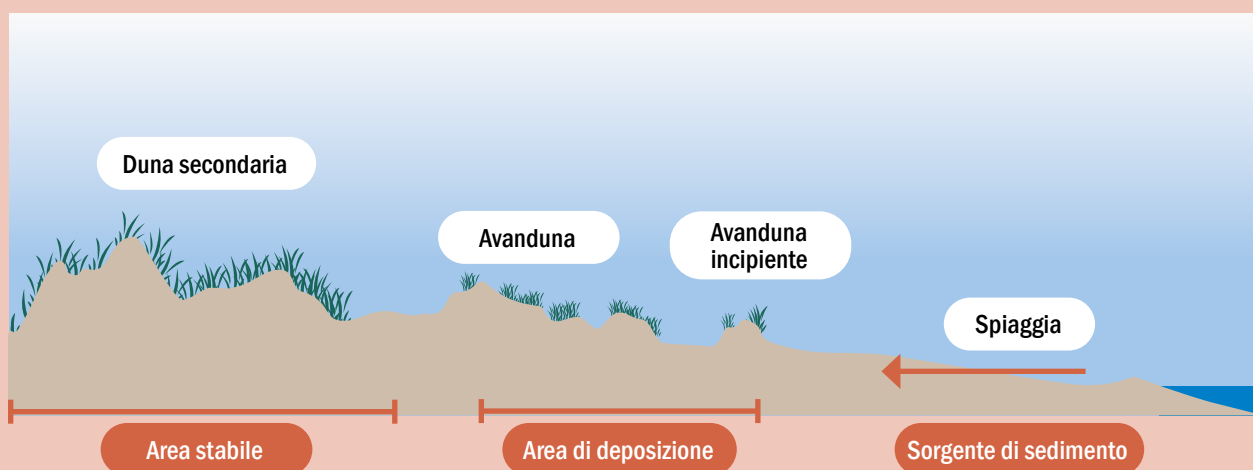
LA “VERA” DUNA COSTIERA E LO SCAMBIO SEDIMENTARIO SPIAGGIA - DUNA

La duna costiera vera e propria, chiamata dai geologi avanduna o duna frontale (*foredune*), è un rilievo sabbioso formato dal vento e stabilizzato dalla vegetazione. Si sviluppa parallelamente alla linea di costa e occupa una posizione molto vicina al mare.

Spiaggia e duna costituiscono un unico sistema dinamico che risponde alle variazioni

di energia dovute ai processi costieri (vento, onde, correnti), con un continuo interscambio di sedimenti (sabbia).

La vegetazione svolge un ruolo fondamentale in questo equilibrio. Le piante pioniere rallentano il vento e favoriscono l'accumulo della sabbia attorno ai loro fusti. Man mano che i sedimenti si accumulano, i rizomi (fusti sotterranei) e le radici si sviluppano e formano una fitta rete che consolida la duna, rendendola più resistente all'erosione.



LE DUNE COME RISORSA NATURALE PER IL CONTRASTO ALL'INNALZAMENTO DEL MARE

LE OPERE DI DIFESA COSTIERA RIGIDE SONO ANCORA NECESSARIE IN CERTE SITUAZIONI, MA OVE POSSIBILE SI PREFERISCONO OGGI LE SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA

Nonostante la necessità di adottare difese rigide (frangiflutti, muri paraonde) per la difesa costiera rimanga irrinunciabile in certe situazioni, vi è una forte spinta, a livello internazionale, verso l'utilizzo delle cosiddette *nature-based solutions* (soluzioni basate sulla natura). Queste soluzioni seguono il principio di ricreare habitat costieri, quali dune e barene (*saltmarshes*), che abbiano una molteplice funzione: la difesa della costa, la tutela della biodiversità e il sequestro di carbonio dall'atmosfera.

Le dune costiere, infatti, rappresentano una zona di raccordo e, insieme, di separazione tra la spiaggia e l'entroterra, una barriera fisica di difesa dalle onde e dalla penetrazione di spray marino e acque salate, e una fonte di ricarica di sabbia per la spiaggia durante le fasi erosive. Esse rappresentano, inoltre, habitat naturali di estrema rilevanza e una risorsa paesaggistica e di attrattività turistica.

Dal punto di vista sia della ricerca che della gestione richiedono un approccio multidisciplinare che metta in sinergia varie competenze, soprattutto geologiche e biologiche.

RICREARE HABITAT COSTIERI QUALI DUNE E BARENE GENERA PIÙ BENEFICI: DIFESA DELLA COSTA, TUTELA DELLA BIODIVERSITÀ E SEQUESTRO DI CARBONIO DALL'ATMOSFERA

CARTOGRAFIA STORICA DEL LITORALE DI LIGNANO



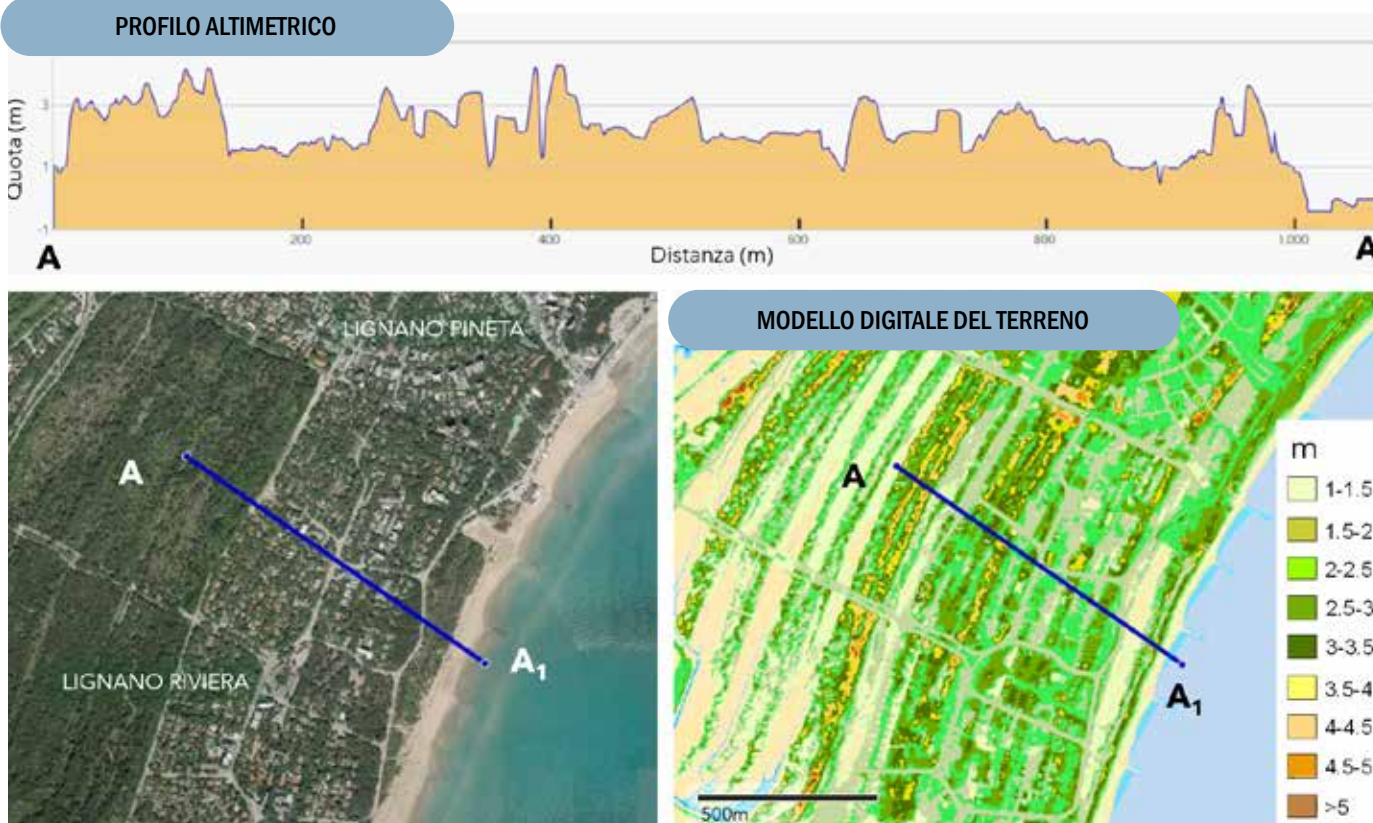
Nella carta del litorale di Lignano dell'Istituto Geografico Militare del 1891 si vedono estesi cordoni di dune (indicati con il termine di "Motte") intervallati da zone depresse (indicate con il termine di "Lame").

CARTOGRAFIA STORICA DEL LITORALE DI GRADO



Si vedono gli estesi cordoni di dune nel tratto tra la cittadina di Grado e la bocca di Primiero (Carta corografica del Catasto Franceschino (*Franziszische Landesaufnahme*), del 1830, presente presso Archivio di Stato di Trieste e consultabile sul sito MAPIRE The Historical Map Portal (<http://mapire.eu>) e da Timar et al. (2006).

MODELLO DIGITALE DEL TERRENO DI LIGNANO



Grazie al *Digital Terrain Model* (modello digitale del terreno) possiamo vedere come nel tessuto urbano di Lignano siano ancora riconoscibili gli antichi cordoni dunali. Il profilo altimetrico in alto riporta le quote del terreno lungo un transetto (segmento blu A-A1) riportato nella fotografia aerea e nella mappa sottostanti. Nella mappa a destra, la scala di colori indica le diverse quote del terreno, via via più elevate progredendo dal verde chiaro, al verde scuro, al giallo acceso e all'arancione.

LE DUNE IN FVG... COSÌ UN TEMPO

Il litorale del Friuli Venezia Giulia rappresenta un sistema costiero di grande interesse, sia dal punto di vista geomorfologico sia ecologico. In passato, questo territorio era caratterizzato da un'estesa presenza di dune sabbiose, come testimoniano documenti storici e cartografie risalenti anche al XIX secolo. Questi ambienti costituivano elementi fondamentali del paesaggio costiero, svolgendo funzioni di protezione naturale e ospitando habitat di elevato valore.

In particolare, sul litorale di Lignano, grazie alle fotografie aeree della metà del Novecento, sono evidenti le molteplici serie di cordoni di dune (tra dieci e venti) che, dall'interno fino alla linea di riva, testimoniano le fasi di accrescimento del delta del Tagliamento secondo una dinamica naturale tipica dei delta con l'alternanza di dune sabbiose e zone più depresse.

IN PASSATO IL LITORALE DEL FRIULI VENEZIA GIULIA ERA CARATTERIZZATO DA UN'ESTESA PRESENZA DI DUNE SABBIOSE

LE DUNE IN FVG (OGGI)

Nel corso del tempo, a causa dello sfruttamento antropico, le dune hanno subito una progressiva riduzione, fino a scomparire quasi completamente in molte aree. Oggi, in Friuli Venezia Giulia, ciò che resta del sistema dunale è frammentato e limitato. Le superfici residue si distribuiscono tra località come Lignano, le isole di Martignano e Sant'Andrea, Grado e Fossalon. In molte zone le dune sono completamente assenti, mentre in altre sopravvivono piccoli lembi, spesso isolati e vulnerabili. Le dune costiere (*foredune*) più estese si trovano a Lignano nella zona centrale del litorale: estese per circa 1 km raggiungono quote fino agli 8 m e presentano alcune criticità, quali vegetazione "anomala", varchi, fianchi ripidi ed erosi, presenza di sedimenti estranei, mancanza di una fascia di avandune incipienti di raccordo naturale con la spiaggia.

NEL TEMPO LO SFRUTTAMENTO ANTROPICO HA RIDOTTO E FRAMMENTATO IL SISTEMA DUNALE, DI CUI RESTANO PICCOLI LEMBI. LE DUNE PIÙ ESTESE SI TROVANO A LIGNANO



ESTENSIONE DELLE DUNE COSTIERE E DELLE SPIAGGE ATTUALI SULLE COSTE DEL FVG



Da notare, che in un tratto costiero dove sia presente un sistema spiaggia - duna “sano”, la spiaggia occupa una superficie molto minore rispetto alla duna perché quest’ultima si forma naturalmente a poche decine di metri dalla linea di riva e la spiaggia rappresenta soltanto una sottile fascia di sabbia nuda.

POTENZIALITÀ EOLICA CALCOLATA PER LE COSTE DEL FVG



LE POTENZIALITÀ E GLI OSTACOLI ALLA FORMAZIONE DI NUOVE DUNE

IL TERRITORIO CONSERVA ANCORA IMPORTANTI POTENZIALITÀ, LEGATE AL VENTO DI BORA CHE HA UNA SIGNIFICATIVA CAPACITÀ DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI

Nonostante la situazione appena descritta, il territorio conserva ancora importanti potenzialità. Uno degli elementi chiave è rappresentato dal vento (la Bora in particolare), che lungo la costa del Friuli Venezia Giulia ha una significativa capacità di trasporto dei sedimenti. Località come Lignano, Grado (in alcuni tratti) o Fossalon mostrano condizioni favorevoli ai processi eolici che, in presenza di condizioni adeguate, potrebbero contribuire alla formazione e alla crescita di nuove dune.

Queste potenzialità sono oggi limitate da diversi fattori. Tra i principali ostacoli si possono individuare le attività di gestione delle spiagge, come lo

spianamento e la cosiddetta “pulizia meccanica”, che rimuovono non solo i detriti e il legname ma anche le piante pioniere, fondamentali per l’accumulo della sabbia. A ciò si aggiungono le opere di difesa costiera che rendono “rigido” e innaturale il sistema spiaggia, l’intensa pressione del turismo balneare, l’urbanizzazione e, in alcuni casi, interventi di piantumazione non sempre coerenti con le dinamiche naturali. Le spiagge, rese artificialmente uniformi, diventano così superfici su cui il vento agisce senza ostacoli, generando fenomeni di trasporto della sabbia che spesso vengono percepiti come un disagio, invece che come un processo naturale potenzialmente utile alla ricostruzione del sistema dunale.

QUESTE POTENZIALITÀ SONO LIMITATE DA PRATICHE DI GESTIONE DELLE SPIAGGE, OPERE DI DIFESA COSTIERA RIGIDE, PRESSIONE DEL TURISMO BALNEARE, URBANIZZAZIONE



UNA PROPOSTA DI RIPRISTINO A LIGNANO SABBIAORO

In questo contesto si inserisce una proposta di ripristino delle dune sul litorale di Lignano Sabbiaoro. Il progetto prevede di ripristinare una fascia ad avandune sulla spiaggia antistante all'attuale cordone di dune presente per 1 km e si basa su alcuni principi fondamentali.

**A LIGNANO
UN PROGETTO
PREVEDE DI
RIPRISTINARE
UNA FASCIA
AD AVANDUNE
SULLA SPIAGGIA,
RICONOSCENDO
CHE LA DUNA
È UN SISTEMA
DINAMICO**

ma favorirne la formazione spontanea. Per questo motivo, uno degli strumenti principali è l'utilizzo di ostacoli, le cosiddette *sand fences* (barriere frangivento), che rallentano il vento e favoriscono l'accumulo naturale della sabbia. Queste strutture, una volta posizionate sulla spiaggia, permettono di avviare processi di formazione dunale in modo graduale e sostenibile.

**È FONDAMENTALE
PROTEGGERE
LE DUNE DAL
CALPESTIO DA
PARTE DELL'UOMO
ATTRAVERSO UNA
GESTIONE DEGLI
ACCESSI ALLA
SPIAGGIA CHE
CONCILI TUTELA E
FRUIZIONE**

Innanzitutto, si riconosce che la duna è un sistema dinamico, che deve essere lasciato libero di evolvere nel tempo, senza interventi troppo rigidi o artificiali. L'obiettivo non è "costruire" dune,

**L'OBIETTIVO NON È
"COSTRUIRE" DUNE,
MA FAVORIRNE
LA FORMAZIONE
SPONTANEA
UTILIZZANDO
BARRIERE
FRANGIVENTO
E PIANTE CHE
CONSOLIDANO I
SEDIMENTI**

Un altro elemento chiave è la vegetazione. Le piante tipiche delle dune hanno una grande capacità di diffusione e svolgono un ruolo essenziale nel consolidamento dei sedimenti. Favorire la loro presenza significa rafforzare la stabilità delle dune e accelerarne lo sviluppo naturale.

Allo stesso tempo, è fondamentale proteggere le dune

dal calpestio da parte dell'uomo, che rappresenta una delle principali cause di degrado. Per questo si prevede di realizzare percorsi di accesso al mare ben definiti, che consentano la fruizione della spiaggia senza compromettere gli equilibri ambientali. La gestione degli accessi alla spiaggia diventa quindi un elemento centrale, capace di conciliare tutela e utilizzo.

UN PROGETTO DAI MOLTEPLICI VANTAGGI CHE INTEGRA LE ATTIVITÀ UMANE

Questo progetto, infatti, non mira a escludere le attività umane, ma a integrarle in modo più sostenibile. Vengono perciò mantenuti ampi spazi dedicati alla fruizione, al gioco e allo sport, oltre alla creazione di punti di osservazione sulle dune, che possono diventare anche strumenti di educazione ambientale e valorizzazione del paesaggio in luoghi molto frequentati da turismo balneare.

Le ricadute di un intervento di questo tipo sarebbero molteplici. In primo luogo, si avrebbe un aumento significativo dell'ecosistema dunale, stimato in circa 47 000 metri quadrati (pari a 4.7 ettari), offrendo nuove opportunità per molte specie vegetali e animali, alcune delle quali a rischio, che trovano in questi habitat condizioni ideali per vivere e riprodursi. Le dune svolgerebbero inoltre una funzione di protezione naturale contro le mareggiate, contribuendo a ridurre l'impatto degli eventi estremi sulle aree retrostanti.

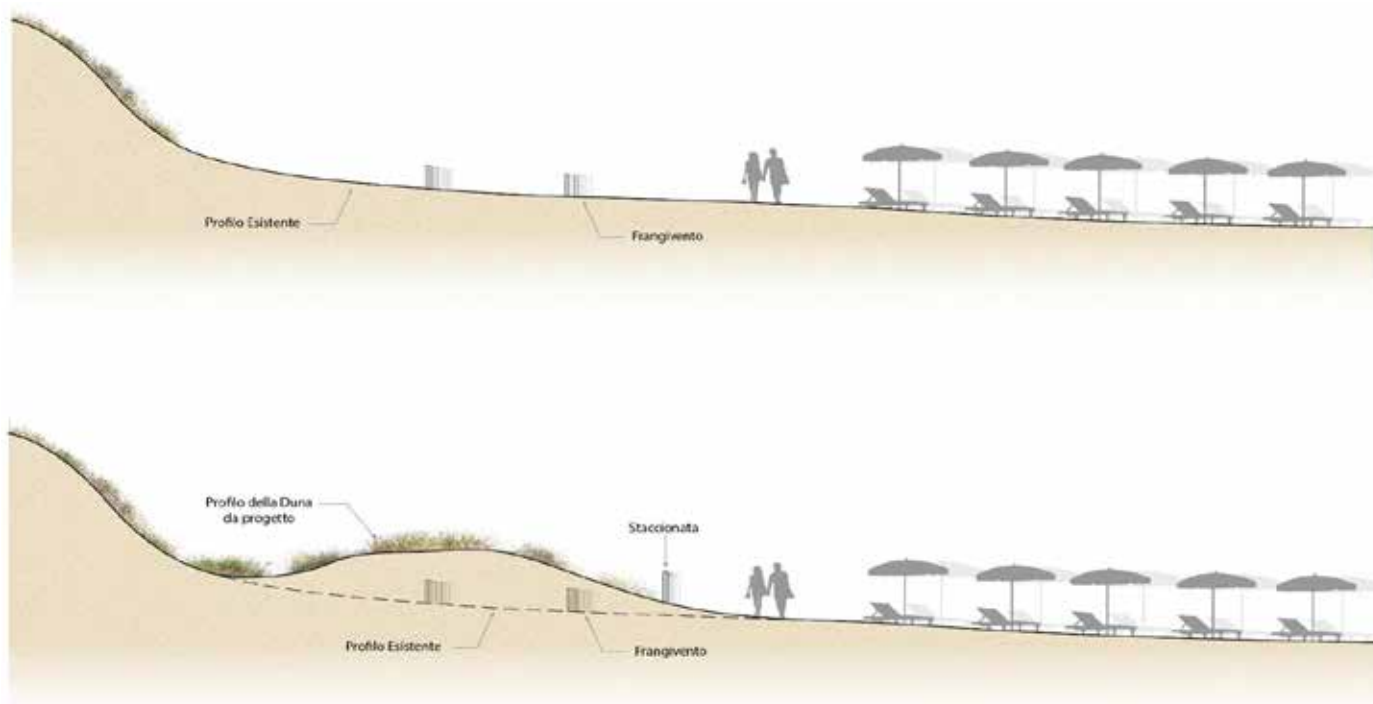
Dal punto di vista paesaggistico, il ripristino delle dune porterebbe a un miglioramento evidente, restituendo alla costa un aspetto più naturale e diversificato. Ma forse l'aspetto più interessante riguarda la possibilità di sperimentare un nuovo modello di gestione balneare, meno invasivo e più attento agli equilibri ambientali.

**TRA LE RICADUTE:
AUMENTO
DELL'ECOSISTEMA
DUNALE,
PROTEZIONE DALLE
MAREGGIATE,
MIGLIORAMENTO
PAESAGGISTICO, UN
NUOVO MODELLO DI
GESTIONE BALNEARE**

PROPOSTA DI RIPRISTINO DELLA *FOREDUNE* SUL LITORALE DI LIGNANO SABBIAORO



In alto la situazione attuale, in basso la proposta di ripristino, che prevede di favorire la formazione di una nuova foredune nella parte alta della spiaggia, grazie al posizionamento di frangivento (elaborazione dei rendering Studio Visuali)



Profilo spiaggia - duna a Lignano: in alto la situazione attuale, in basso la proposta di ripristino (elaborazione dei rendering Studio Visuali)

BUONE PRATICHE PER UNA GESTIONE DI UNA SPIAGGIA “AMICA DELLE DUNE”

Accade molto di frequente che, per soddisfare le esigenze del turismo balneare, la superficie di spiaggia venga tenuta completamente spianata e ripulita con mezzi meccanici pesanti, che rimescolano e spianano gli strati superficiali di sabbia. Questa pratica (nota come pulizia meccanica della spiaggia) vuole garantire un ambiente sicuro e pulito per i bagnanti, ma è uno dei principali “nemici” delle dune costiere e dei relativi habitat. L'azione dei mezzi impedisce l'attecchimento della vegetazione pioniera fondamentale per la formazione delle dune embrionali.

Inoltre, la rimozione del materiale organico spiaggiato (alghe, detriti vegetali, piante marine) priva gli ecosistemi costieri di una fonte di cibo e rifugio con un grave danno per la biodiversità.

Un ulteriore impatto è dato dall'asportazione, assieme ai materiali rimossi, di significative quantità di sabbia, influenzando negativamente sul bilancio di spiaggia. La sabbia rimasta, inoltre, risulta meno compatta e meno resistente alle onde, rendendo la spiaggia più vulnerabile alle mareggiate.

In molte parti del mondo si adottano pratiche meno impattanti, ad esempio con pulizie selettive, utilizzo di mezzi a minor pressione, gestione differenziata a seconda del grado di utilizzo turistico, mantenendo delle zone “di rifugio” ecologico.



Foto: David Carrer

CONCLUSIONI

In conclusione, il caso del Friuli Venezia Giulia mostra come, anche in contesti fortemente trasformati dall'uomo, sia possibile formulare proposte concrete e realizzabili per il recupero dei processi naturali e ricostruire ecosistemi funzionali. Questo richiede però un cambiamento di approccio: dalla gestione statica e artificiale delle spiagge a una visione dinamica, capace di valorizzare le forze naturali e di integrarle con le esigenze della società.

**È NECESSARIO
CAMBIARE
APPROCCIO: DALLA
GESTIONE STATICA
E ARTIFICIALE
DELLE SPIAGGE
A UNA VISIONE
DINAMICA CHE
INTEGRI NATURA E
SOCIETÀ**

Ringraziamenti:

si ringraziano lo Studio Visuali di Alessio Alessandro per la realizzazione dei rendering delle figure della pagina precedente; David Carrer per la foto del box “Buone pratiche” e Brian Carlet per il suo contributo durante il lavoro di tesi.

Questa ricerca è stata finanziata da NextGeneration EU, Progetto “Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem iNEST” (CUP J43C22000320006)

Annelore Bezzi, Saverio Fracaros, Cinzia Leccardi

Università degli Studi di Trieste

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



UN OCCHIO (SATELLITARE) DI RIGUARDO PER I NIDI DI BECCACCIA, FRATINO E ALTRI UCCELLI SULLE DUNE COSTIERE

Le dune e i banchi sabbiosi della laguna di Marano e Grado sono ambienti fragili e dinamici che ospitano specie di grande interesse conservazionistico, come Beccaccia di mare e Fratino.

Grazie ai monitoraggi sul campo e all'analisi di immagini satellitari, le Università di Trieste e di Udine hanno studiato come la vegetazione influenzi la scelta dei siti di nidificazione e come il telerilevamento possa contribuire alla conoscenza e alla tutela degli habitat costieri, particolarmente vulnerabili ai cambiamenti climatici.

La laguna di Marano e Grado è separata dal mare da un sistema di isole barriera, cordoni litoranei e banchi sabbiosi (isole di Martignano e Sant'Andrea e banchi sabbiosi di Anfora, Orio e Tratauri) che costituisce un ambiente unico e fragile, continuamente rimodellato dall'azione combinata di vento, onde, maree e sedimenti. Rappresenta un sistema dinamico che cambia forma nel tempo, che si erode e si ricostruisce. Al suo interno si susseguono spiagge, avandune e creste dunali, mentre la vegetazione si dispone in fasce ben riconoscibili, in risposta alla salinità, all'esposizione al vento, alla granulometria dei sedimenti e alla morfologia della duna. Questa organizzazione contribuisce a trattenere i sedimenti e a rendere questi sistemi più resistenti all'erosione.

Banchi sabbiosi di neoformazione nella laguna di Grado
Foto: Coastal Group-Units

CORDONI LITORANEI E ISOLE BARRIERA: PAESAGGI IN MOVIMENTO, CHE OSPITANO LA BIODIVERSITÀ

Proprio per la loro eterogeneità e dinamicità, dune e isole barriera ospitano numerose nicchie ecologiche e offrono spazio a una grande varietà di organismi, diventando anche luoghi particolarmente favorevoli per la sosta, l'alimentazione e la nidificazione di molte specie di uccelli costieri.

**DUNE E ISOLE
BARRIERA, AMBIENTI
MUTEVOLI ED
ETEROGENEI, SONO
IDEALI PER LA SOSTA,
L'ALIMENTAZIONE E
LA NIDIFICAZIONE
DI MOLTE SPECIE DI
UCCELLI COSTIERI**

Per molti uccelli costieri che nidificano al suolo, gli ambienti dunali e i banchi sabbiosi rappresentano ambienti particolarmente favorevoli alla riproduzione. Infatti, offrono superfici aperte, substrati sabbiosi e una vegetazione rada, elementi che possono favorire il mimetismo del nido e al tempo stesso garantire una buona visibilità dell'area circostante.

UNA SCELTA CRUCIALE: IL SITO DI NIDIFICAZIONE

La scelta del sito di nidificazione è una fase cruciale, perché deve garantire condizioni adatte non solo alla deposizione delle uova, ma anche alla loro incubazione e all'allevamento della prole. In questi contesti,

**LA SCELTA DEL SITO
DI NIDIFICAZIONE
DIPENDE DA
SUBSTRATO,
COPERTURA
VEGETALE, DISTANZA
DALL'ACQUA E
VISIBILITÀ DELL'AREA
CIRCOSTANTE**

la selezione del nido dipende da fattori molto locali: caratteristiche del substrato, copertura vegetale, distanza dall'acqua e visibilità dell'area circostante.

Molte specie privilegiano superfici pianeggianti, sabbiose o ghiaiose, con vegetazione bassa o assente, in quanto permettono agli adulti in cova di individuare precocemente potenziali predatori. Allo stesso tempo, una vegetazione rada può favorire il mimetismo del nido senza compromettere troppo il campo visivo.

**QUESTO MOSAICO
DI SPIAGGE, DUNE
E BASSI FONDALI
OFFRE HABITAT
ADATTI A SPECIE DI
GRANDE INTERESSE
CONSERVAZIONISTICO
COME LA BECCACCIA
DI MARE E IL FRATINO**

Anche la vicinanza all'acqua è un fattore importante: da un lato facilita l'accesso alle aree di alimentazione, dall'altro può aumentare il rischio di sommersione durante mareggiate o eventi estremi.

Il sito di nidificazione dipende quindi da un delicato equilibrio tra sicurezza, accesso alle risorse e condizioni micro-ambientali favorevoli. In questo mosaico di spiagge, dune e bassi fondali trovano habitat adatti specie di grande interesse conservazionistico come la Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*, Linnaeus, 1758) e il Fratino (*Charadrius alexandrinus*, sin.: *Anarhynchus alexandrinus*, Linnaeus, 1758).

Nido di Beccaccia di mare



DUE SPECIE TIPICHE: LA BECCACCIA DI MARE E IL FRATINO

Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*)

Specie costiera a distribuzione eurasiatica, in Italia è migratrice regolare, nidificante e parzialmente svernante, con aree riproduttive concentrate soprattutto lungo la fascia adriatica. Frequenta lagune, spiagge, cordoni sabbiosi e aree fangose, dove si alimenta di molluschi, anellidi e crostacei. Nidifica al suolo, in zone aperte e scarsamente vegetate, deponendo le uova in una semplice depressione del terreno, talvolta rivestita con conchiglie, piccoli ciottoli o resti vegetali. Nella laguna di Marano e Grado, la specie ha mostrato un forte incremento negli anni sia sul litorale esterno che nella laguna interna, passando dalle 28-38 coppie nidificanti nel 2013, alle 123-151 coppie nel 2025.



Beccaccia di mare

Fratino (*Charadrius alexandrinus*, sin.: *Anarhynchus alexandrinus*)

Specie a distribuzione sub-cosmopolita, in Italia è nidificante, migratrice regolare e svernante, con popolazioni riproduttive concentrate soprattutto lungo le coste. Frequenta litorali sabbiosi, lagune salmastre, saline e altre zone umide costiere, dove si alimenta di piccoli molluschi, crostacei, vermi e insetti. Anche il Frattino nidifica al suolo. Il nido è una semplice depressione nel substrato sabbioso, collocata in ambienti aperti e con vegetazione molto rada o assente. Specie a forte rischio, tanto che quest'anno è partito un progetto europeo "Life Alexandro" a livello nazionale proprio per fermare il rapido declino della specie. Nell'area di studio la specie ha mostrato un andamento irregolare, con forti oscillazioni interannuali. Dal 2013, il picco di presenze sulle isole barriera della laguna è stato registrato nel 2022 con 13-16 coppie nidificanti, per poi diminuire drasticamente negli ultimi anni a non più di 3-6 coppie presenti nel 2025 e un solo nido certo rilevato e senza l'evidenza di un vero successo riproduttivo.



Fratino con pullo



Foto: Coastal Group – Units

Pullover di Beccaccia di mare

HABITAT E NIDI ESPOSTI A NUMEROSE PRESSIONI

In questi ambienti così dinamici agiscono oggi pressioni sempre più intense, sia naturali che antropiche, spesso collegate agli effetti dei cambiamenti climatici. Tra le più evidenti ci sono il disturbo legato alla frequentazione turistica lungo spiagge e banchi sabbiosi, soprattutto nei mesi primaverili ed estivi che sono i più sensibili per la riproduzione. A questo si aggiunge la diffusione di specie vegetali aliene invasive, favorita anche dalla presenza umana, che può modificare profondamente la composizione e la struttura della vegetazione dunale, alterando habitat che dipendono da equilibri molto delicati.

Su questo quadro già fragile si innestano poi gli effetti dei cambiamenti climatici. L'aumento degli eventi estremi, l'intensificarsi delle mareggiate, l'erosione costiera e l'innalzamento del livello del

**PRESSIONI
CRESCENTI E
CAMBIAMENTI
CLIMATICI
TRASFORMANO
L'HABITAT,
COMPROMETTENDO
LA RIPRODUZIONE
DEGLI UCCELLI CHE
NIDIFICANO SULLE
ISOLE BARRIERA**

mare possono rimodellare rapidamente dune e banchi sabbiosi, sommergere i nidi e ridurre gli spazi disponibili per la nidificazione. Il risultato è una trasformazione dell'habitat che può compromettere il successo riproduttivo degli uccelli legati a superfici aperte, poco vegetate e dinamiche come quelle delle isole barriera.

VEGETAZIONE E NIDIFICAZIONE: COSA OSSERVANO I SATELLITI

Poiché la vegetazione è uno degli elementi che più influenzano la scelta del sito di nidificazione, il telerilevamento satellitare può diventare uno strumento utile anche per studiare l'ecologia dell'avifauna costiera. I monitoraggi sul campo dell'avifauna nidificante, attivi nella laguna di Marano e Grado dal 2013 e condotti dall'Università degli Studi di Trieste, insieme a una ricerca sviluppata con l'Università degli Studi di Udine che ha

**ABBINANDO
MONITORAGGI
SU CAMPO E
TELERILEVAMENTO
SI MAPPANO LE
CARATTERISTICHE
DELL'HABITAT
RILEVANTI PER LA
SCELTA DEL SITO DI
NIDIFICAZIONE**

integrato l'analisi delle immagini satellitari, hanno permesso di descrivere nel tempo alcune caratteristiche chiave dell'habitat attraverso l'uso di indici di vegetazione, cioè valori numerici ricavati dalle immagini che consentono di stimare la copertura vegetale, la presenza di suolo nudo e l'eterogeneità del paesaggio.

I risultati mostrano che entrambe le specie, Beccaccia di mare e Fratino, evitano i siti con copertura vegetale elevata, ma emerge anche come il Fratino sia più sensibile all'aumento della vegetazione, risultando strettamente associato ad ambienti aperti e poco vegetati. La Beccaccia di mare, invece, appare più tollerante verso habitat eterogenei e strutturalmente complessi.

IL MICROHABITAT È DECISIVO PER LA SCELTA DEL SITO RIPRODUTTIVO, MA ANCHE IL CONTESTO AMBIENTALE GENERALE È IMPORTANTE

Lo studio ha evidenziato, inoltre, il ruolo decisivo del microhabitat nella scelta del sito riproduttivo, che si basa soprattutto sulle caratteristiche della porzione di habitat più vicina al nido.

A una scala più ampia entrano in gioco anche altre caratteristiche, come l'estensione complessiva delle isole barriera, il grado di copertura vegetale e la variabilità del substrato, che contribuiscono a definire l'idoneità generale dell'habitat.

CHE COS'È UN INDICE DI VEGETAZIONE?

Un indice di vegetazione è un valore numerico ricavato dalle immagini satellitari che permette di descrivere in modo sintetico la presenza e lo sviluppo della copertura vegetale. Si basa sul fatto che la vegetazione riflette la radiazione in modo diverso rispetto ad acqua, sabbia o suolo nudo.

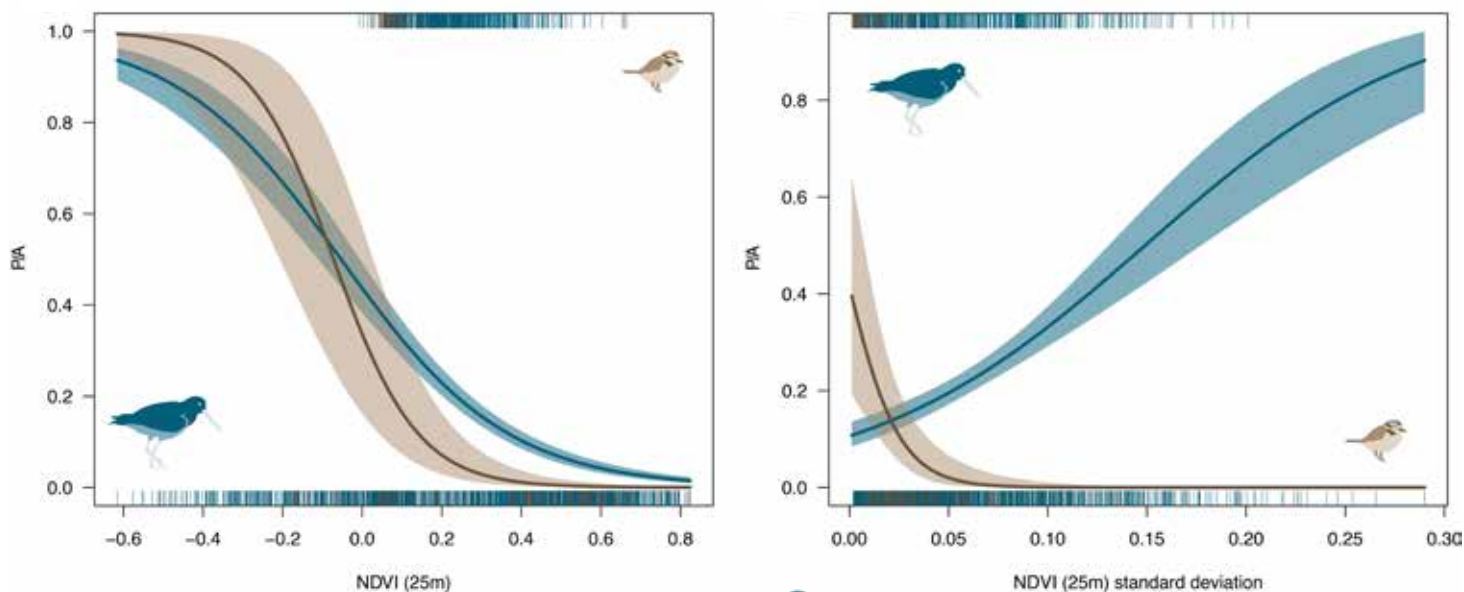
Tra gli indici più utilizzati c'è l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, cioè indice di vegetazione a differenza normalizzata), che fornisce un'indicazione del vigore della vegetazione: in genere, valori più elevati corrispondono a una copertura vegetale più sviluppata.



Foto: Coastal Group – Units

Nido di Fratino

PROBABILITÀ DI PRESENZA DEI NIDI DI BECCACCIA DI MARE E FRATINO IN RELAZIONE AD ALCUNE CARATTERISTICHE DELLA VEGETAZIONE STIMATE DA IMMAGINI SATELLITARI



All'aumentare dell'indice NDVI medio, e quindi della copertura vegetale, la probabilità di presenza si riduce per entrambe le specie, ma molto più rapidamente per il Frattino.



La deviazione standard dell'NDVI descrive la variabilità dell'habitat nei dintorni del nido: in ambienti più eterogenei aumenta la probabilità di presenza della Beccaccia di mare, mentre diminuisce quella del Frattino.

SEGUIRE LE TRASFORMAZIONI PER SUPPORTARE LA CONSERVAZIONE DI HABITAT E SPECIE

Emerge così una chiara differenza ecologica tra le due specie: il Frattino appare più specializzato e dipendente da superfici sabbiose aperte e uniformi, mentre la Beccaccia di mare mostra una maggiore plasticità. In questo senso, il telerilevamento non serve solo a descrivere la vegetazione, ma diventa uno strumento utile per riconoscere gli habitat più adatti alla nidificazione, seguire nel tempo le trasformazioni delle isole barriera e supportare le strategie di conservazione in ambienti costieri sempre più esposti a rapidi cambiamenti.

**EMERGE UNA
CHIARA DIFFERENZA
ECOLOGICA TRA
LE DUE SPECIE:
RILEVARLA E
SEGUIRE LE
TRASFORMAZIONI
DEGLI HABITAT È
FONDAMENTALE
PER LA LORO
CONSERVAZIONE**

Paolo Cingano

Università degli studi di Trieste
e Università degli studi di Udine

Stefano Sponza

Università degli studi di Trieste
Albero Targhetta e Francesco Boscutti
Università degli studi di Udine

VADEMECUM PER TURISTI E DIPIORTISTI PER UNA FRUIZIONE CONSAPEVOLE E RISPETTOSA DEI BANCHI SABBIOSI E DELLE ISOLE BARRIERA

Le isole barriera e i banchi sabbiosi della laguna mostrano il volto più naturale delle nostre spiagge litorali: ambienti aperti, dinamici e poco alterati, e, proprio per questo, particolarmente attrattivi. Sono però habitat fragili, già sottoposti a erosione, mareggiate, sommersione, diffusione di specie aliene e forte pressione antropica. Durante la primavera e l'estate, inoltre, ospitano la nidificazione di specie protette come la Beccaccia di mare, il Frattino e Fraticello (*Sternula albifrons*, Pallas, 1764). La fruizione di questi ambienti richiede quindi particolare attenzione e rispetto.

Alcune regole essenziali

- Rispettare sempre cartelli, delimitazioni e aree interdette.
- Evitare di accedere e sostare nelle zone sensibili durante il periodo riproduttivo.
- Non camminare nelle aree con vegetazione rada delle prime dune, dove i nidi possono essere presenti ma praticamente invisibili a occhi inesperti.
- Tenere i cani sempre al guinzaglio ed evitare che si muovano liberamente sulla spiaggia.
- In barca, non attraccare nelle aree interdette e mantenere un comportamento prudente in prossimità dei banchi sabbiosi.
- Se un uccello si alza dal suolo, lancia richiami insistenti o finge di allontanarsi dal nido, è probabile che tu sia troppo vicino: allontanati subito con calma.

Nella laguna di Marano e Grado, alcune aree particolarmente sensibili, come il tratto iniziale - orientale dell'Isola di Sant'Andrea, il tratto finale - occidentale del Banco dei Tratauri e quello iniziale - orientale del Banco d'Orio, sono soggette a divieto di accesso e di attracco dal 1° maggio al 31 luglio, proprio per tutelare e favorire la nidificazione delle specie di uccelli acquatici di interesse comunitario. Il divieto è segnalato in loco da apposita cartellonistica.



Cartello di divieto di accesso alle aree di nidificazione tutela dal Servizio Biodiversità della Regione Friuli Venezia Giulia - Link al Decreto (a pagina 78) <https://bur.regione.fvg.it/newbur/visionaBUR?b-num=2026/04/15/15>

► Due altri articoli di Segnali dal clima in FVG 2026 sono dedicati alle dune e ai cordoni litoranei e a come questi ambienti rispondono ai cambiamenti climatici:

UNA RISPOSTA NATURALE ALL'INNALZAMENTO DEL MARE: L'EVOLUZIONE DELLE ISOLE BARRIERA

DIFENDERE LE NOSTRE COSTE CON SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA: IL RIPRISTINO DELLE DUNE COSTIERE

SPECIALE

LE COSTE E LA LAGUNA

SCENARI FUTURI PER CITTÀ COSTIERE E BENI CULTURALI

Le proiezioni del livello del mare e i possibili impatti

L'innalzamento del livello dei mari non è un'ipotesi lontana, ma una realtà in evoluzione che richiede modelli predittivi accurati per proteggere le nostre comunità e la nostra storia. Partendo dalle analisi attuali, questa sezione ci proietta nel futuro del litorale del Friuli Venezia Giulia, mostrando come la ricerca scientifica riesca oggi a stimare l'impatto del riscaldamento globale sulle **aree urbane più esposte** e sui **tesori archeologici** unici al mondo che sorgono a ridosso delle nostre coste.

Il percorso di lettura si snoda attraverso un inquadramento iniziale e due studi di scenario curati da ARPA FVG:

- Il primo contributo offre uno sguardo d'insieme sugli **impatti attesi lungo le coste e le lagune** regionali. Basandosi sulle elaborazioni effettuate in due progetti europei, l'articolo illustra come l'innalzamento del livello del mare stia producendo già oggi effetti sugli ambienti costieri, sia naturali che antropizzati, e quali sono i possibili scenari futuri.
- Il secondo articolo stringe l'obiettivo sulla città di **Grado**, una realtà strutturalmente vulnerabile agli allagamenti costieri. Lo studio, condotto all'interno del progetto MedSeaRise, esplora come cambieranno la frequenza e l'estensione degli allagamenti in base ai diversi scenari di aumento delle temperature globali.
- L'ultimo approfondimento ci porta nell'entroterra della laguna, dove il patrimonio del sito UNESCO di **Aquileia** è insidiato da una complessa interazione tra i livelli del mare, del fiume Natissa e della falda acquifera. Fenomeni che è necessario analizzare e comprendere, nella loro evoluzione attuale e futura, per fronteggiare i rischi per area archeologica.

Tre contributi che dimostrano come la pianificazione e la salvaguardia del territorio debbano necessariamente basarsi su scenari scientifici rigorosi per difendere le città e l'identità culturale della regione.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA





SALE IL LIVELLO DEL MARE: LE ANALISI DI ARPA FVG SUI POSSIBILI IMPATTI PER COSTE E LAGUNE DEL FVG

Una delle conseguenze del riscaldamento globale è l'aumento del volume dell'acqua degli oceani e di conseguenza l'innalzamento del livello marino.

Questo fenomeno è destinato a causare notevoli impatti sia su beni antropici che ecosistemici, facendo arretrare le linee di costa e stravolgendo gli habitat che le popolano.

ARPA FVG con diversi progetti europei si è occupata di questi temi indagando quali potrebbero essere gli impatti causati dall'innalzamento del livello marino su coste e lagune del FVG.

In un pianeta che progressivamente si va riscaldando, non è solo l'atmosfera a essere più calda, bensì lo sono anche gli oceani e le aree che ospitano i ghiacci permanenti. Conseguentemente, la densità dell'acqua liquida diminuisce e i ghiacci perenni fondono, contribuendo ad aumentare i volumi degli oceani, quindi il livello medio marino.

Con un livello di riscaldamento globale pari a 4 °C, mediamente 200 km² delle aree costiere della regione potrebbero trovarsi al di sotto del livello medio del mare. Di questa superficie, già oggi ben 155 km² si trovano in questa situazione e sono mantenute fruibili grazie a opere di difesa e di gestione idraulica, come argini e idrovore. Con l'incremento del livello marino, queste difese potrebbero richiedere sempre più energia o dover essere ingrandite o potenziate per evitare l'ingressione marina.

QUALI SONO LE CAUSE DELL'INNALZAMENTO DEI MARI?

Una delle conseguenze che l'aumento della temperatura globale e in generale i cambiamenti climatici portano con sé è la variazione del livello dei mari. L'intensità di questa alterazione è l'esito, come sovente accade in natura, di un complesso gioco le cui regole sono determinate dalle leggi della chimica e della fisica. I giocatori sono rappresentati da tutti i processi che agiscono in modo più o meno diretto sulla distribuzione delle acque nel globo: le calotte polari e i ghiacciai continentali possono contenere enormi masse d'acqua in forma solida, i cicli idrogeologici determinano quanta acqua viene trattenuta dai continenti prima di ritornare agli oceani, la diversa salinità e temperatura delle acque marine ne determinano la densità e conseguentemente le correnti.

I gas climalteranti che l'uomo insiste a immettere in atmosfera trattengono molta più energia nel sistema terrestre rispetto al passato; ciò stravolge le condizioni di gioco, inducendo i processi climatici e geochimici – i giocatori – a dovervisi adattare con ritmo forsennato e talvolta caotico.

Uno degli esiti di questa corsa alle nuove condizioni di equilibrio – che sono l'obiettivo della partita - è

l'innalzamento del livello dei mari. Le masse glaciali fondono e apportano ulteriore acqua negli oceani, inoltre l'alterazione del ciclo idrologico comporta che le falde e le reti idriche non trattengano acqua quanto in passato, rilasciandola in mare. Ne consegue che la densità delle masse d'acqua varia, portando a un cambio di rotta delle correnti e distribuendo in modo inedito tali masse e l'energia termica che trasportano.

Con il riscaldamento del pianeta, anche la temperatura dell'acqua marina aumenta, incrementando il proprio volume e lo spazio occupato, contribuendo all'aumento del livello medio marino.

A questo scenario, vanno sommati gli effetti dei movimenti verticali del suolo, in particolare il fenomeno della subsidenza, ossia il graduale sprofondamento delle terre emerse. Quest'ultimo è dovuto ai processi geofisici e al consumo delle risorse sotterranee, che determinano il graduale cedimento del terreno, portando con sé tutto quello che si trova in superficie.

La combinazione della subsidenza con l'aumento del volume del mare provoca il complessivo innalzamento del livello marino rispetto alle linee di costa.

A questo aumento del livello medio del mare si aggiungono poi, localmente, i livelli estremi raggiunti quando si verificano particolari condizioni e fenomeni meteo-marini (maree, sovralti meteorologici, onde).

CONTRIBUTI ALL'INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEI MARI

AI LIVELLI MARINI ESTREMI

LOCALI AL LIVELLO DEL MARE

GLOBALI AL LIVELLO DEL MARE

CONTRIBUTI AI LIVELLI MARINI ESTREMI

-  Marea astronomica
-  Surge o storm surge (sovralti meteorologico o da tempesta)
-  Onde

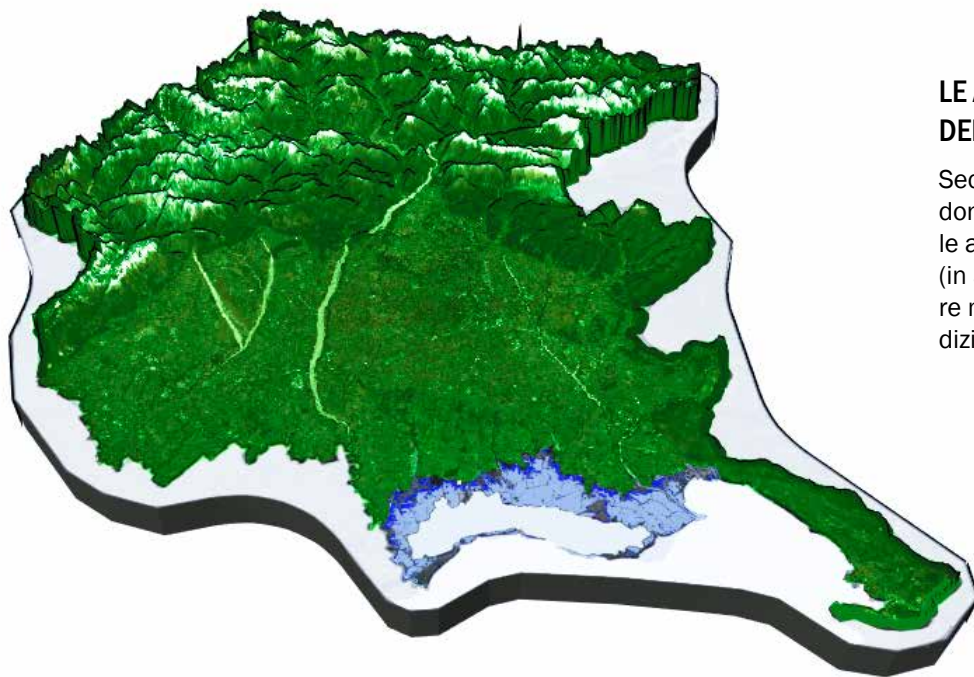
CONTRIBUTI LOCALI AL LIVELLO DEL MARE

-  Variazioni della densità delle masse d'acqua e mutamento delle correnti
-  Effetti gravitazionali, rotazionali e deformativi
-  Subsidenza e movimento verticale della crosta terrestre

CONTRIBUTI GLOBALI AL LIVELLO DEL MARE

-  Espansione termica
-  Fusione delle calotte polari
-  Fusione dei ghiacciai continentali
-  Variazioni del ciclo idrologico e stoccaggio d'acqua nelle terre emerse

Alcuni fattori agiscono su scala globale, come lo scioglimento delle calotte artiche, mentre altri concorrono a determinare il livello medio marino a seconda della località, come i fenomeni di subsidenza.



LE AREE DEL FVG AL DI SOTTO DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE

Secondo gli scenari climatici che prevedono un riscaldamento globale di 4 °C, le aree al di sotto del livello medio marino (in azzurro) sono destinate a incrementare mediamente del 29% rispetto alle condizioni attuali (aree in blu nell'immagine)



LE CONSEGUENZE DELL'INNALZAMENTO MARINO

La trasgressione marina*, ossia l'arretramento della linea di costa causata dall'incremento del livello marino, porta a numerose problematiche. Oltre alla perdita di territorio - abitato, agricolo o di uso turistico - aumenta la frequenza e l'intensità degli eventi di allagamento delle aree costiere. L'elevazione del livello marino potrebbe comportare a sua volta una variazione del livello idrico lungo i tratti finali dei fiumi, che è legato al regime di marea (regime tidale), contribuendo ai fenomeni di esondazione.

**L'INGRESSIONE
MARINA SOTTRA E
TERRITORIO,
ACCRESCE GLI
ALLAGAMENTI
COSTIERI, ALTERA
LA QUALITÀ DELLE
ACQUE LAGUNARI**

Questi fenomeni a loro volta possono generare impatti rilevanti sugli insediamenti umani e sui beni culturali delle aree interessate. Ma non solo gli ambienti antropici sono destinati a subire le conseguenze del mare che si alza: questo fenomeno porterà a una sempre più aggressiva intrusione delle acque marine nella laguna, la quale potrebbe trasformarsi radicalmente in termini

di qualità chimico-fisica dell'acqua, portando a uno stravolgimento degli habitat che osserviamo oggi.

GLI IMPATTI SUGLI ECOSISTEMI

Con il progressivo mutamento delle caratteristiche salmastre delle acque lagunari verso condizioni analoghe a quelle marine, gli organismi degli ecosistemi legati ai fragili equilibri tra apporti di acque dolci e marine potrebbero essere gradualmente sostituiti da specie meglio adatte a sopravvivere in condizioni di mare aperto (specie alofile*). In generale, gli ecosistemi costieri esposti all'innalzamento del livello marino potrebbero essere persi o subire significative alterazioni.

**LA SALINITÀ
AUMENTA:
SPECIE MARINE
SOSTITUISCONO
QUELLE LAGUNARI**

**ALTE MAREE
SEMPRE PIÙ ALTE:
AUMENTA LO
STRESS DA
SOMMERSIONE
PER LE PIANTE**

L'aumento del livello del mare non influenza gli ambienti naturali solo quando questi vengono perennemente sommersi: a piccoli accrescimenti del volume marino corrisponde un incremento del livello

altimetrico che le alte maree possono raggiungere e si modifica quindi la frequenza a cui tali habitat sono esposti alle acque di mare, incrementando, ad esempio per le specie vegetali, lo stress dovuto alla salinità (stress alino*) e lo stress da sommersione*.

Lungo le aste fluviali, l'innalzamento del livello marino e la variazione dei regimi pluviali potrebbero causare una risalita a monte sempre più profonda del cuneo salino*, alterando le caratteristiche dei tratti fluviali e di conseguenza degli habitat che li popolano.

**IL CUNEO
SALINO
RISALE E
ALTERA GLI
ECOSISTEMI
FLUVIALI**



PROGETTI EUROPEI

AdriaClimPlus

è un'iniziativa dell'area di cooperazione Interreg Italia-Croazia a cui ARPA FVG partecipa condividendo con gli altri partner le sue competenze di modellistica ambientale e la sua capacità di calcolo ad alte performance. L'obiettivo principale del progetto è quello di far avanzare la conoscenza sul clima che cambia e proporre soluzioni ottimali per l'adattamento al cambiamento climatico nel bacino adriatico e nelle sue aree costiere. Le attività progettuali sono pensate e sono sviluppate a scala del bacino Adriatico, con dei focus su sette aree pilota di cui una è composta dal golfo di Trieste e dalla laguna di Grado e Marano.

MedSeaRise

è frutto della collaborazione di sei partner europei che operano sull'intero Mediterraneo nell'ambito dell'area di cooperazione Euro-MED. L'obiettivo del progetto è quello di definire e promuovere una metodologia che contribuisca alla valutazione dei rischi derivanti dall'aumento del livello medio marino, come è attualmente previsto dagli scenari di cambiamento climatico. Al progetto, ARPA FVG contribuisce con la consolidata esperienza nello sviluppo, l'implementazione di modelli numerici ambientali e la valutazione della loro qualità. Inoltre, sarà condivisa con i partner progettuali la capacità dell'Agenzia di elaborare grandi volumi di dati derivanti dalle simulazioni climatiche, di documentarli e archivarli secondo gli standard scientifici internazionali.

IL CATALOGO DEI DATI GENERATI DA ARPA FVG NEI PROGETTI

Tutte le informazioni generate nell'ambito dei progetti europei sul clima a cui ARPA FVG partecipa sono accessibili per mezzo dei servizi di messa a disposizione dei dati dell'Agenzia.

La ricerca può essere eseguita tramite parole chiave a partire dall'insieme dei metadati disponibili in rete al Catalogo dei dati e dei

documenti dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia (<https://fenice.ARPA.fvg.it/geonetwork>).

Sono disponibili basi dati e documenti di sintesi delle attività svolte e dei risultati acquisiti.

Il Catalogo è un servizio accessibile a tutti, ma indirizzato in particolare a utenti esperti per un utilizzo di tipo tecnico-scientifico.



GLI STUDI DI ARPA FVG ATTRAVERSO I PROGETTI EUROPEI

La comprensione delle conseguenze dei cambiamenti climatici richiede uno sforzo continuo da parte degli enti preposti agli studi sull'evoluzione dell'ambiente. ARPA FVG, in aggiunta alle attività istituzionali esplora aspetti ancora poco conosciuti del clima futuro in regione e dei potenziali impatti. Per perseguire tali obiettivi, l'Agenzia acquisisce risorse aggiuntive e partecipa alla costruzione di sinergie con altri enti e competenze, questo avviene con il supporto di progetti e finanziamenti europei come AdriaClimPlus e MedSea-Rise.

CONSIDERARE L'INCERTEZZA

Nell'esplorazione dello stato futuro del clima, in particolare alla scala locale, è necessario prendere in considerazione l'incertezza con la quale l'informazione scientifica viene generata attraverso l'utilizzo dei modelli climatici. Tale incertezza si propaga anche alla valutazione delle conseguenze dell'evoluzione climatica, in particolare degli impatti che ne derivano. ARPA FVG affronta questo tema di estrema importanza per mezzo di un gran numero di simulazioni numeriche*, che riproducono i processi ambientali tenendo conto anche delle potenziali fluttuazioni.

MODELLO CLIMATICO

Immaginate una palla immobile a terra. Quando viene calciata, questa subirà una forza che la proietterà in aria, e poi, secondo forze fisiche come la gravità e l'attrito dell'aria, la palla ripiomberà a terra, rimbalzando e rotolando fino a fermarsi, raggiungendo nuovamente una situazione di equilibrio.

I modelli climatici simulano l'alterazione del sistema atmosferico terrestre, causata da

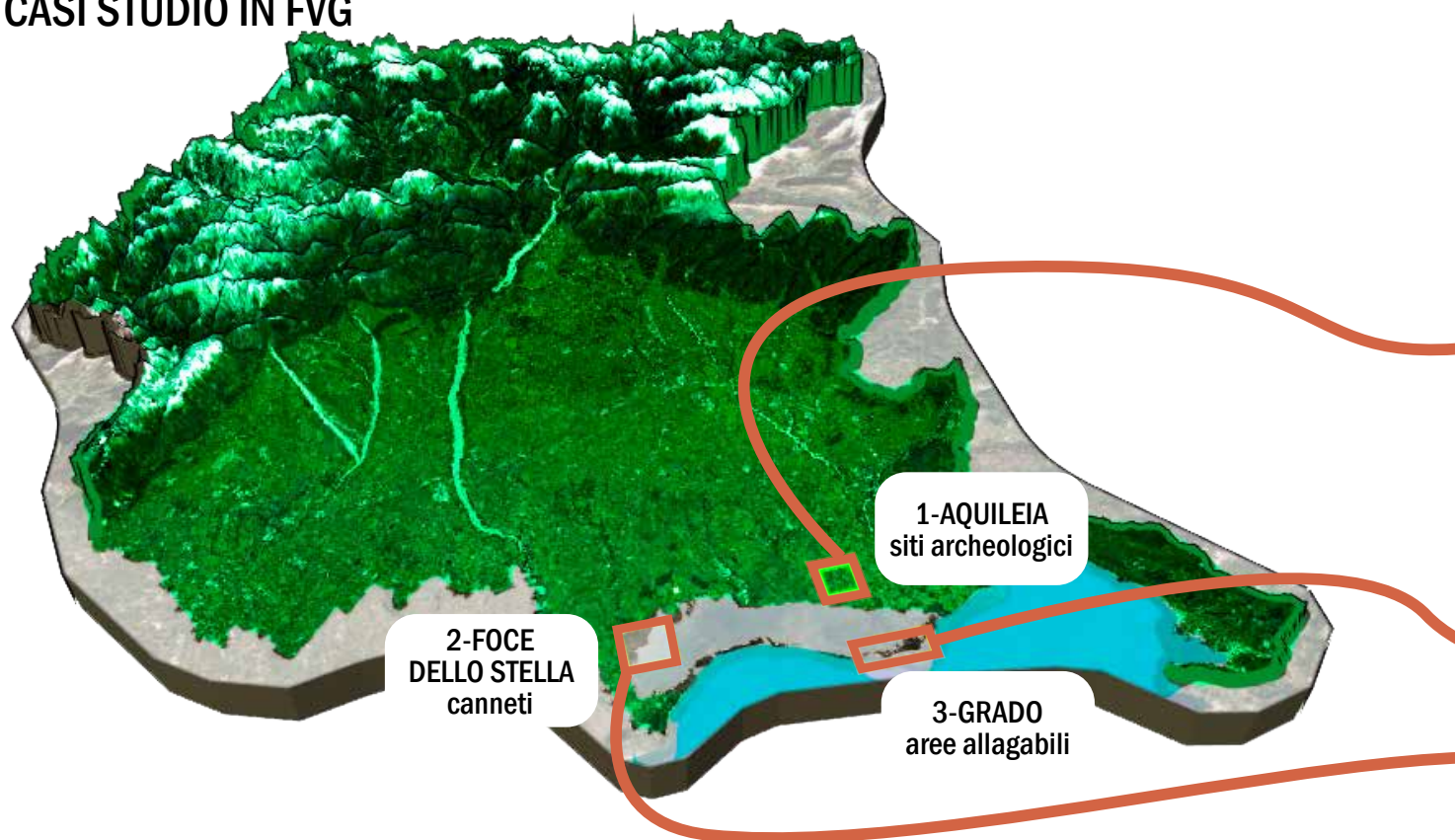
una perturbazione o forzante (la forza trasmessa alla palla quando viene calciata), che in questo caso è rappresentata dalla maggior energia trattenuta dalle crescenti concentrazioni di gas serra. I modelli utilizzano le equazioni che descrivono le leggi fisiche, calcolando l'evoluzione del sistema perturbato nel tempo, mentre cerca di raggiungere una nuova condizione di equilibrio.

MedSeaRise

I CASI STUDIO IN FVG



MedSeaRise

Interreg
Euro-MEDCo-funded by
the European Union

I CASI STUDIO SULLE CONSEGUENZE DELL'INNALZAMENTO DEL MARE IN FVG

Nell'ambito del progetto Interreg Euro-MED Med-SeaRise, ARPA FVG ha sviluppato diversi casi studio, di natura sia antropica che ecosistemica. Per ciascuno di essi, sono stati individuati ed esaminati gli impatti che l'innalzamento del mare potrebbe comportare, secondo i diversi scenari di gravità di questo fenomeno.

I casi studio hanno investigato due beni di natura antropica: il primo riguarda il patrimonio culturale e archeologico di Aquileia e della sua Basilica. Il sito UNESCO di Aquileia dista solo qualche chilometro dalla costa, e l'aumento del livello marino potrebbe influenzare l'innalzamento della falda acquifera superficiale. Questo fenomeno potrebbe portare a un aumento della frequenza degli episodi di allagamento dei reperti archeologici e degradare quelli ancora inesplorati. Anche la relazione tra livello del mare e il fiume Natissa è stata indagata, individuando la risposta delle altezze idriche al variare del livello marino, la possibilità di intrusione di acque saline e le possibili conseguenze sui beni archeologici.

Come secondo caso studio di natura antropica, la città di Grado è stata suddivisa in sottozone ai sensi della pianificazione comunale, e per ciascuna di esse è stata calcolata l'area potenzialmente allagabile secondo i diversi scenari climatici.

Il caso studio di natura ecosistemica ha approfondito la possibile evoluzione dei canneti nella foce dello Stella. In questo ambito è stata studiata la possibile perdita di habitat dovuta dall'esposizione della canna comune *Phragmites australis* alle acque salmastre della laguna, anch'esse destinate a risalire la costa a causa dell'innalzamento marino.

Questi casi studio sono descritti più dettagliatamente nei successivi articoli:

GRADO: SCENARI FUTURI DI ALLAGAMENTO COSTIERO SECONDO I LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE

INNALZAMENTO DEL MARE, DELLE FALDE ACQUIFERE DEL FIUME: SCENARI FUTURI PER AQUILEIA

IL DESTINO DEI CANNETI ALLA FOCE DELLO STELLA IN UNA LAGUNA SEMPRE PIÙ MARINIZZATA

**IL MARE CHE SALE
MINACCIA AREE
URBANE, BENI
CULTURALI E
BIODIVERSITÀ:
3 CASI
ANALIZZATI
DA ARPA FVG**

1



L'INFLUENZA DEL MARE SULLA BASILICA E I SITI ARCHEOLOGICI DI AQUILEIA

L'innalzamento del livello marino potrebbe comportare il sollevamento della falda superficiale e l'intrusione di acque saline lungo il fiume Natissa, degradando sia i reperti archeologici attualmente conosciuti che quelli ancora da esplorare.

2

IL DESTINO DEI CANNETI DELLA FOCE DELLO STELLA

La canna comune *Phragmites australis* forma un importante habitat all'interno della Riserva Naturale delle Foci dello Stella.



Una prolungata esposizione ad acque salate risulta fatale per questa specie: il caso studio evidenzia la sensibilità dei canneti all'incremento del livello marino e la possibile perdita dell'habitat.

3



LE AREE POTENZIALMENTE ALLAGABILI DELLA CITTÀ DI GRADO

Il progressivo innalzamento del livello marino è destinato a incrementare la frequenza e l'intensità degli eventi di allagamento della città di Grado.

È stata studiata la superficie potenzialmente allagabile secondo i diversi scenari di riscaldamento globale.

GLOBAL WARMING LEVELS E SCENARI SOCIOECONOMICI: COME LEGGERE LE PROIEZIONI CLIMATICHE?

Le proiezioni climatiche vengono generalmente elaborate in funzione di un **Representative Concentration Pathway (RCP)**. Gli RCP sono scenari ipotetici di immissione di gas a effetto serra in atmosfera e ne descrivono l'andamento delle concentrazioni fino al 2100. Ciascuno scenario è associato a determinati livelli di efficacia delle politiche di mitigazione adottate per ridurre le emissioni dei gas serra.

REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAY (RCP)

scenari climatici
futuri basati su
diverse politiche di
mitigazione delle
emissioni di gas
serra

Concentrazioni via via più elevate di gas climalteranti determinano un incremento della temperatura globale, conseguenza della maggiore energia trattenuta dal pianeta per il ben noto "effetto serra".

Per questo motivo a ciascun RCP è associato un valore che indica l'incremento dell'energia trattenuta al 2100 a causa delle maggiori concentrazioni di gas serra, rispetto al periodo preindustriale, ed è denominato **Forzante Radiativo** (espresso in W/m^2).

Un RCP secondo il quale l'umanità ridurrà subito e drasticamente le emissioni, avrà una ridotta concentrazione di gas a effetto serra in atmosfera nel 2100, e dunque un forzante radiativo contenuto; al contrario, un RCP che ipotizza l'assenza di politiche di mitigazione e con massicce emissioni in atmosfera durante tutto il secolo, si tradurrà in altissime concentrazioni di gas a effetto serra e un altrettanto elevato forzante radiativo.

Nel Sesto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR6), gli scenari RCP sono integrati con gli **Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)**, che legano le traiettorie emissive a condizioni socio-economiche globali.

SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS (SSPs)

integrano gli
scenari RCP con
le condizioni
socioeconomiche
globali

In questo quadro, le emissioni future diventano funzione non solo delle politiche climatiche, ma anche di fattori quali i modelli di sviluppo delle società e delle economie, le dinamiche demografiche e le tecnologie adottate per la produzione di energia.

Gli scenari emissivi forniscono la perturbazione al sistema climatico, detto **forzante**, secondo il quale i **modelli climatici** simulano l'evoluzione del sistema nel tempo, come l'aumento delle temperature globali, la variazione della distribuzione delle precipitazioni e l'innalzamento del livello del mare.

Sebbene RCP e SSP siano strumenti utili per confrontare diverse possibili evoluzioni del clima in funzione delle strategie di mitigazione, risultano meno affidabili nel comunicare **quando** un determinato stato climatico potrebbe verificarsi.

Il complesso e instabile contesto geopolitico attuale rende difficile prevedere quale traiettoria emissiva l'umanità seguirà. Di conseguenza, le proiezioni climatiche basate su scenari socio-economici risultano poco efficaci nel determinare quando specifiche anomalie climatiche si manifesteranno.

Dal punto di vista di un decisore che volesse programmare azioni di adattamento al cambiamento climatico, costui dovrebbe individuare la reale proiezione tra quelle disponibili, auspicando di indovinare quale sarà lo sviluppo della società umana.

Le anomalie climatiche, oltre che a essere legate allo scenario emissivo, vengono anche associate a un indicatore misurabile, espresso come il livello di riscaldamento globale, o **Global Warming Level (GWL)**.

A differenza di RCP e SSP, che associano precise condizioni socio-economiche alla manifestazione di una definita anomalia climatica, i GWL indicano le condizioni termiche nelle quali la medesima anomalia si presenta.

Per fare un esempio: nel peggior scenario RCP/SSP, il quale presuppone l'assenza totale di politiche di mitigazione, l'incremento di un metro del livello del mare si verificherebbe nel 2100. Con una prospettiva basata sui GWL, invece, è sufficiente sapere che un tale innalzamento è fisicamente plausibile solo al raggiungimento di un riscaldamento globale di circa $4^\circ C$, indipendentemente dal momento in cui sarà raggiunto e dalle condizioni socio-economiche che lo causano.

Le reti di monitoraggio climatico, presenti a livello globale, permettono aggiornamenti frequenti e costanti sul tasso di aumento della temperatura planetaria, fornendo accurate informazioni sulla progressione del GWL.

Ciò consente al decisore di programmare e progettare azioni di adattamento e protezione dal cambiamento climatico in funzione delle condizioni ambientali future, seguendo l'evoluzione del riscaldamento globale e confrontandolo con gli scenari disponibili.

GWL LIVELLO DI RISCALDAMENTO GLOBALE (Global Warming Level)

indica a quale
temperatura una certa
anomalia climatica si
può manifestare



SIMULAZIONI NUMERICHE

sono rappresentazioni virtuali della realtà e della sua evoluzione nel tempo, basate su relazioni fisico-matematiche, che sono realizzate per mezzo di calcolatori elettronici. Nel caso di scenari climatici futuri, le simulazioni richiedono l'impiego di potenti mezzi di calcolo data la complessità della realtà che si intende riprodurre numericamente.

TRASGRESSIONE (O INGRESSIONE) MARINA

è il fenomeno geologico per cui il livello del mare si innalza relativamente rispetto alla terraferma, sommergendo aree precedentemente emerse. Questo processo, opposto alla regressione, provoca lo spostamento della linea di costa verso l'entroterra e spesso provoca la deposizione di sedimenti marini sopra terreni continentali.

CUNEO SALINO

Il cuneo salino è l'intrusione di acqua di mare all'interno delle falde acquifere costiere o nei letti dei fiumi. L'acqua marina (con densità maggiore) si insinua al di sotto dell'acqua dolce (meno densa) quando gli apporti idrici da monte si indeboliscono (durante i periodi di siccità o per l'eccessivo prelievo idrico), oppure con l'innalzamento del livello marino.

SPECIE ALOFILE

termine utilizzato per indicare organismi i cui ambienti ottimali di vita sono caratterizzati da salinità elevata.

STRESS ALINO

si riferisce alla pressione fisiologica esercitata su un organismo a causa di variazioni nei livelli di salinità dell'ambiente circostante. Quando la concentrazione di salinità raggiunge livelli maggiori rispetto a quelli con cui l'organismo si è evoluto, quest'ultimo dovrà spendere maggiori dosi di energia per regolare i processi fisiologici intaccati dalla eccessiva salinità, a discapito di altre funzioni. Prendendo d'esempio una pianta, quando la salinità aumenta, gli apparati radicali avranno bisogno di più energia del solito per riuscire a regolare o espellere i sali in eccesso. Gli extra crediti energetici spesi verso le funzioni radicali saranno sottratti ad altre funzioni fondamentali del vegetale, come ad esempio l'accrescimento fogliare.

STRESS DA SOMMERSIONE

per le specie vegetali, condizione di stress abiotico derivante dalla saturazione d'acqua del terreno per tempi prolungati; comporta una diffusione limitata dell'ossigeno nell'ambiente radicale, causando danni fisiologici e morfologici nelle piante.

Alessandro Minigher, Dario Giaiotti, Elena Ganesini, Federico Pittaro, Moira Pittis
ARPA FVG

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA





GRADO: SCENARI FUTURI DI ALLAGAMENTO COSTIERO SECONDO I LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE

La città di Grado è particolarmente esposta agli episodi di allagamento dovuti a innalzamenti locali del livello del mare, specialmente con la manifestazione di eventi atmosferici intensi. Nell'ambito del progetto MedSeaRise, ARPA FVG ha studiato come l'innalzamento del livello marino incrementerà le superfici potenzialmente allagabili e la frequenza di tali episodi, anche con eventi atmosferici meno intensi, in diversi scenari di riscaldamento globale.

Nel progetto Interreg Euro-MED MedSeaRise è stata investigata, grazie alla collaborazione tra ARPA FVG, la Protezione Civile e il Comune di Grado, la vulnerabilità della cittadina ai possibili impatti che potrebbero essere generati dall'innalzamento del livello marino.

Grado in passato ha già subito episodi di allagamento, dovuti a una combinazione di eventi atmosferici e picchi di marea astronomica. La città risulta essere particolarmente vulnerabile non solo per la sua bassa elevazione rispetto al livello del mare attuale, ma anche per la sua localizzazione. La porzione settentrionale del mar Adriatico presenta infatti la maggior escursione di marea dell'intero bacino mediterraneo, poiché le condizioni astronomiche e la geografia del bacino producono differenze del livello marino di oltre un metro tra i momenti di bassa e alta marea.

OLTRE ALLA MAREA: L'EFFETTO DI PRESSIONE E SCIROCCO

Oltre alla marea astronomica, anche la conformazione del mar Adriatico e le modalità con cui gli eventi atmosferici vi interagiscono influenzano il livello del mare. Quando fronti di alta pressione scorrono in alcuni lembi dell'Adriatico, questi provocano notevoli pressioni sul mare, dando vita

ANCHE LA PRESSIONE ATMOSFERICA E I VENTI MERIDIONALI INFLUENZANO IL LIVELLO MARINO NEL NORD ADRIATICO

a uno spostamento della massa d'acqua che a sua volta origina correnti che si propagano lungo tutto il bacino, raggiungendo anche Grado: questo è il fenomeno delle sesse. Anche i venti possono contribuire a generare temporanei incrementi del livello marino locale, specialmente se si considera un sistema semichiuso come quel-

lo della laguna. Il vento di Scirocco, che spira da sud-est verso nord-ovest, trasmette energia alla massa d'acqua superficiale, che viene trascinata nella medesima direzione, ossia verso le aree di costa settentrionali.

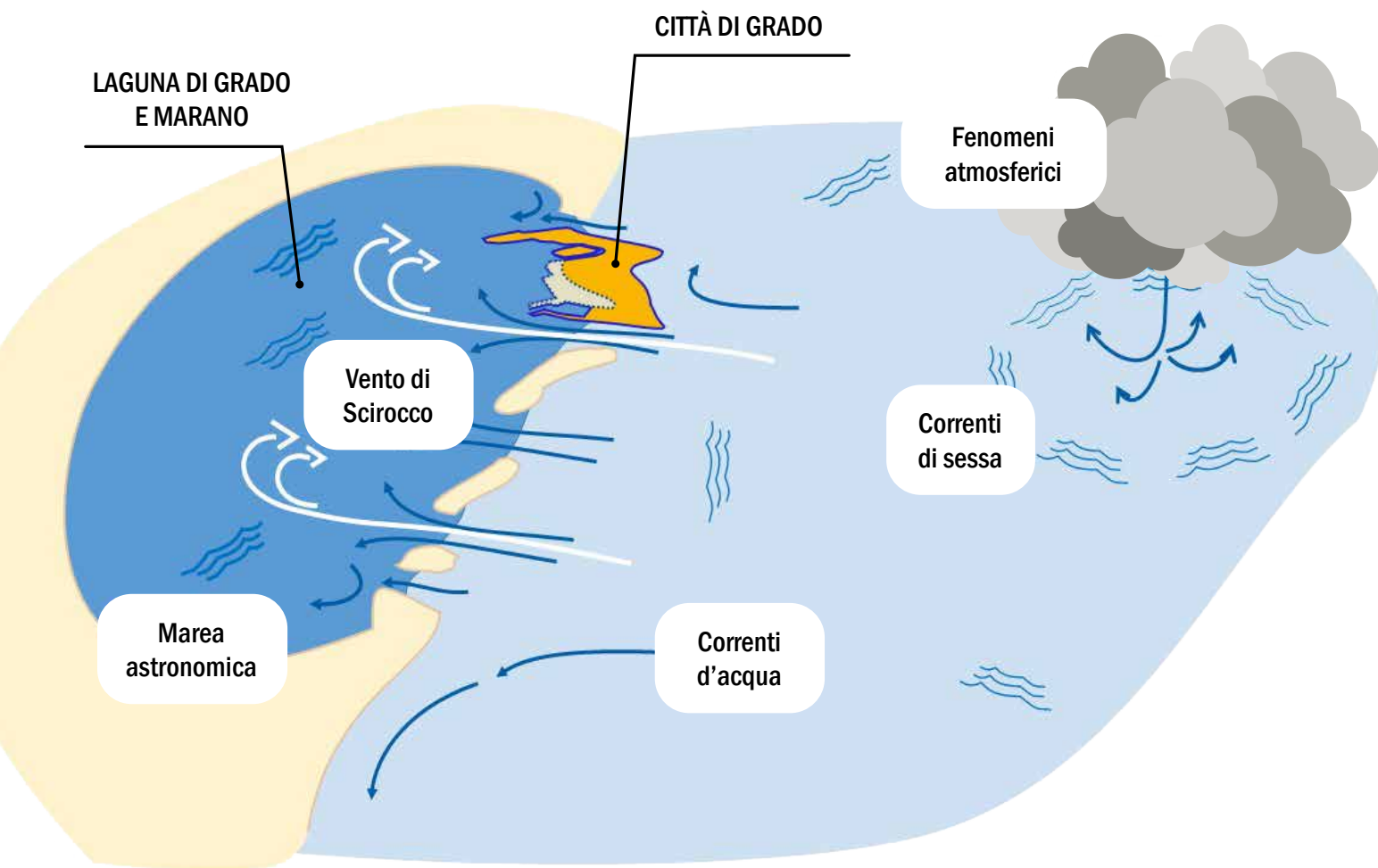
In queste condizioni l'acqua rimonta verso nord,

MAGGIORI VOLUMI D'ACQUA RAGGIUNGONO L'INTERNO DELLA LAGUNA, SOMMERGENDO AREE NORMALMENTE NON RAGGIUNTE DALL'ALTA MAREA

ma allo stesso tempo non riesce a fuoriuscire e ridistribuirsi dalle bocche di porto della laguna, continuando ad accumularsi all'interno del bacino costiero. Man mano che maggiori volumi d'acqua raggiungono l'interno della laguna, il livello marino locale si sviluppa in altezza, sommergendo progressivamente aree terrestri che tipicamente non sono raggiunte dal regime di marea.

I CONTRIBUTI AL LIVELLO MARINO LOCALE

Schema illustrativo dei diversi fattori che contribuiscono al livello marino locale.



PIÙ ALLAGAMENTI ANCHE CON FENOMENI METEO MENO INTENSI

Gli episodi di allagamento che oggi si verificano quando si combinano multipli eventi estremi, con l'innalzamento del livello medio marino potranno in futuro essere innescati da fenomeni meno intensi. Inoltre, mentre i fenomeni atmosferici estremi, come gravi tempeste e venti eccezionalmente forti si manifestano raramente, fenomeni di minore entità si presentano con maggiore frequenza.

**L'INNALZAMENTO
LE LIVELLO
MEDIO DEL MARE
PROVOCHERÀ
EPISODI DI
ALLAGAMENTO
ANCHE
CON EVENTI
ATMOSFERICI
MENO INTENSI**

Considerando questa relazione, e che l'innalzamento del mare provocherà episodi di allagamento con eventi atmosferici sempre meno intensi, ne consegue che anche la frequenza degli episodi di "acqua alta" è destinata ad aumentare.

Facendo un esempio: se in passato gravi allagamenti a Grado si sono verificati in condizioni di picchi di alta marea astronomica, contemporaneamente a venti di Scirocco protratti per lungo tempo e fenomeni atmosferici estremi, in futuro i medesimi eventi potrebbero essere provocati da fenomeni meno intensi e con maggior frequenza.

GLI SCENARI FUTURI ELABORATI IN MedSeaRise

Questa è la relazione studiata dal progetto: tramite l'utilizzo della serie storica del livello marino, fornita dal mareografo di Grado gestito da ISPRA, è stato possibile estrapolare i contributi degli eventi atmosferici di diversa intensità al livello marino locale di Grado.

Inoltre, il consorzio di MedSeaRise ha raccolto le migliori informazioni disponibili riguardo le proiezioni del futuro livello medio marino globale, per ogni scenario emissivo. A questo dataset sono state aggiunte le proiezioni degli incrementi del livello marino locale, calcolato dal consorzio per ogni regione dei partner progettuali.

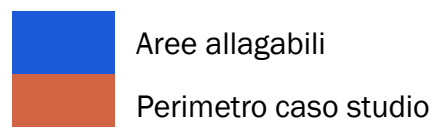
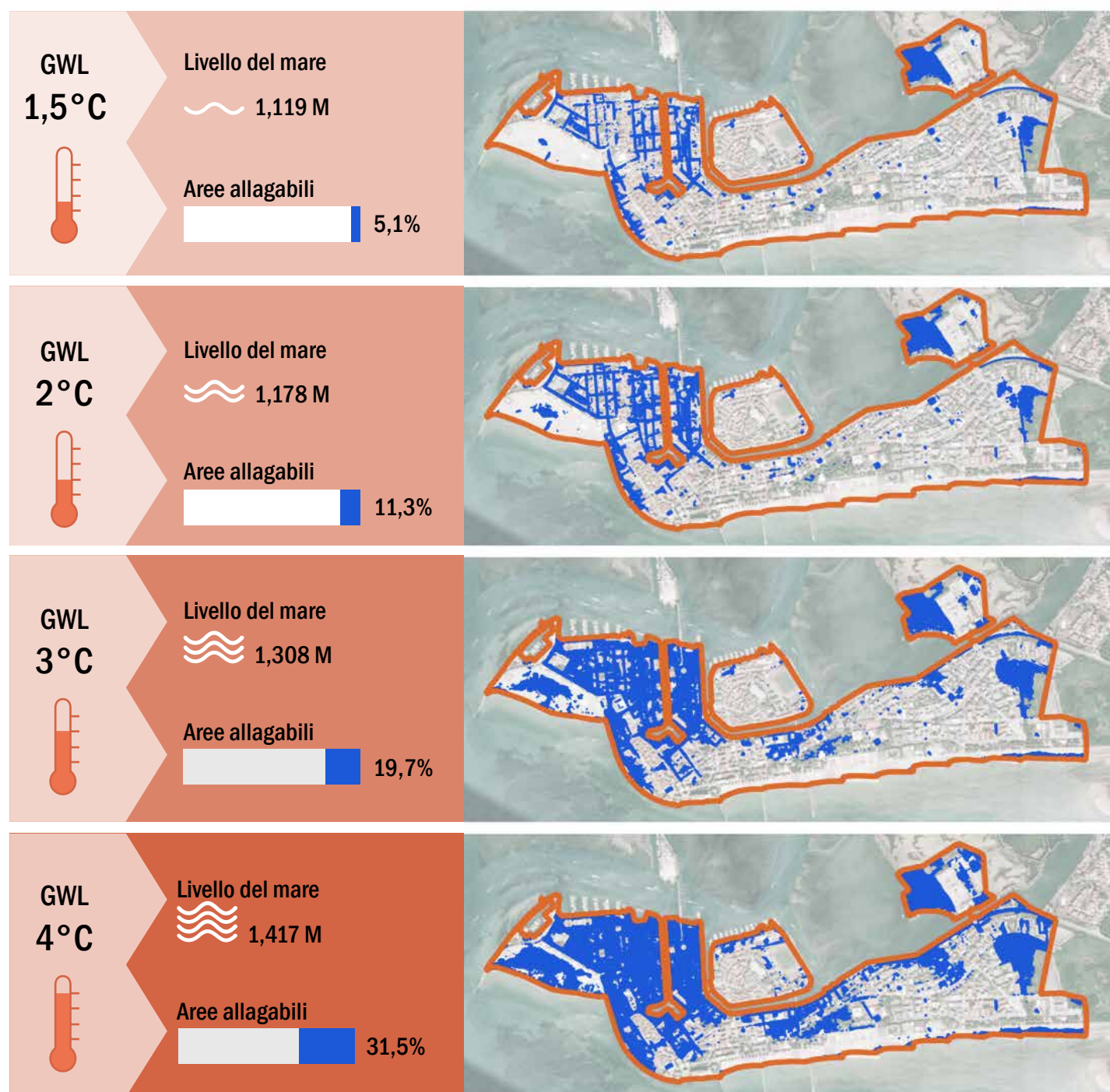
**ALLE PROIEZIONI
DEL FUTURO
LIVELLO MEDIO
MARINO GLOBALE
SONO STATE
AGGIUNTE QUELLE
DEGLI INCREMENTI
DEL LIVELLO
MARINO LOCALE**



AREE ALLAGABILI A GRADO PER DIVERSI LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE (GWL)

Aree della città di Grado al di sotto del livello marino, durante eventi atmosferici intensi e secondo i diversi scenari di riscaldamento globale (secondo i valori medi delle proiezioni climatiche e di fenomeni atmosferici intensi). Il livello del mare è espresso rispetto alla rete altimetrica nazionale (IGM 42).

SE LA TEMPERATURA AUMENTA, CRESCONO IL LIVELLO DEL MARE E LA PERCENTUALE DELLE AREE ALLAGABILI



LE SIMULAZIONI DELLE AREE ALLAGABILI A GRADO

La serie di dati ottenuta combinando i fattori che concorrono all'incremento del livello marino, prevede più di 350 possibili scenari. Per ciascuno di essi è stata eseguita una simulazione basata sul Modello Digitale del Terreno (DTM) di Grado, fornito dalla Regione FVG. Un DTM è una rappresentazione digitale della topografia di una certa area, grazie al quale possono essere individuate le superfici che cadono al di sotto del livello marino proiettato, di conseguenza considerate aree allagabili.

Al fine di esplorare le aree allagabili in maggior dettaglio, l'area investigata della città è stata suddivisa in sottozone, usando come riferimento le destinazioni d'uso vigenti ai sensi della pianificazione Comunale. Sono inoltre stati selezionati elementi urbani che ospitano funzioni essenziali o critiche per la comunità, come zone produttive, ospedali o scuole.

Elaborando gli esiti delle simulazioni, ottenute considerando tutti gli scenari emissivi, emerge che mediamente, in condizioni di eventi atmosferici intensi e con un riscaldamento globale pari a 1,5°C, il 5% della città di Grado potrebbe essere ricoperta dalle acque. Le aree allagabili crescono a più del 10% con 2°C di aumento della temperatura planetaria, al 19,7% con 3°C e infine, nel caso peggiore con 4°C, più di un terzo dell'area studiata risulta essere esposta alle acque marine durante la manifestazione di eventi atmosferici intensi.

UNO STRUMENTO INTERATTIVO PER APPROFONDIRE

Ulteriori dettagli per ciascuna delle aree della città di Grado sono accessibili per mezzo dello strumento interattivo disponibile in rete 'Il caso studio della città di Grado' (<https://public.tableau.com/app/profile/interregithr.ARPafvg/viz/Med-SeaRise-Sealevelriseimpact-GRADO/MSRSealevelriseimpactGRADO>)

Alessandro Minigher, Dario Gaiotti,
Elena Ganesini, Federico Pittaro, Moira Pittis
ARPA FVG

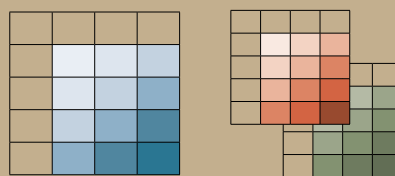
PER PIÙ DI
350 POSSIBILI
SCENARI SONO
STATE ESEGUITE
LE SIMULAZIONI
DELLE AREE
ALLAGABILI A
GRADO

IL CALCOLO DELLE AREE ALLAGABILI

MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (DTM) DI GRADO



PROIEZIONI DELL'INNALZAMENTO DEL LIVELLO MARINO



MAPPA DEI BENI PER DESTINAZIONE D'USO



387

simulazioni
delle aree
allagabili a
Grado

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



INNALZAMENTO DEL MARE, DELLE FALDE ACQUIFERE DEL FIUME: SCENARI FUTURI PER AQUILEIA

Ad Aquileia ARPA FVG ha indagato l'innalzamento del livello marino e la sua possibile influenza sull'altezza delle falde superficiali, la cui risalita induce saturazione dei terreni, allagamenti e degrado dei reperti archeologici.

Per diversi scenari climatici si è calcolato come aumenteranno in futuro le aree al di sotto del livello del mare.

È stata inoltre esplorata la relazione tra le esondazioni del fiume Natissa, il regime di marea e l'esposizione dei siti archeologici alle acque fluviali.

Tra le attività che ARPA FVG ha condotto con gli enti del territorio nell'ambito del progetto MedSeaRise, vi è anche quella svolta con la Fondazione Aquileia e con la Fondazione della Basilica di Aquileia. Questa città, nei tempi antichi una delle principali dell'Impero Romano, era molto legata all'acqua e al mare, dotata di un porto fluviale che si raggiungeva risalendo il fiume Natissa.

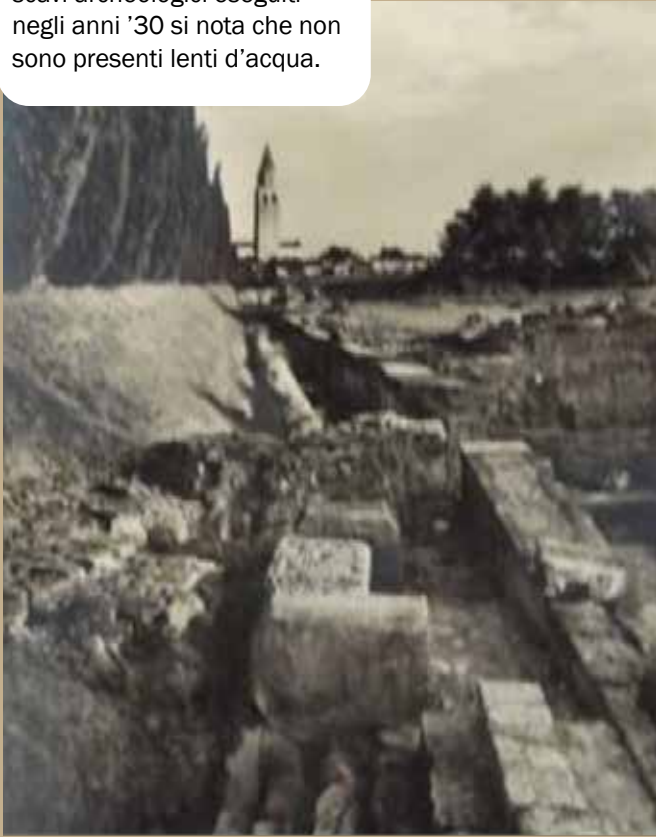
Durante la riscoperta delle rovine romane nella prima metà dello scorso secolo, sono state documentate le caratteristiche dei terreni interessati dagli scavi, che vengono riportate come prive d'acqua, in condizioni 'asciutte'. Oggi invece, alcune delle stesse aree che un tempo non venivano raggiunte dalle acque sotterranee sono quasi perennemente sature.

Mosaico di Giona

Foto: Mattia Vecchi - Fondazione "Società per la Conservazione della Basilica di Aquileia"

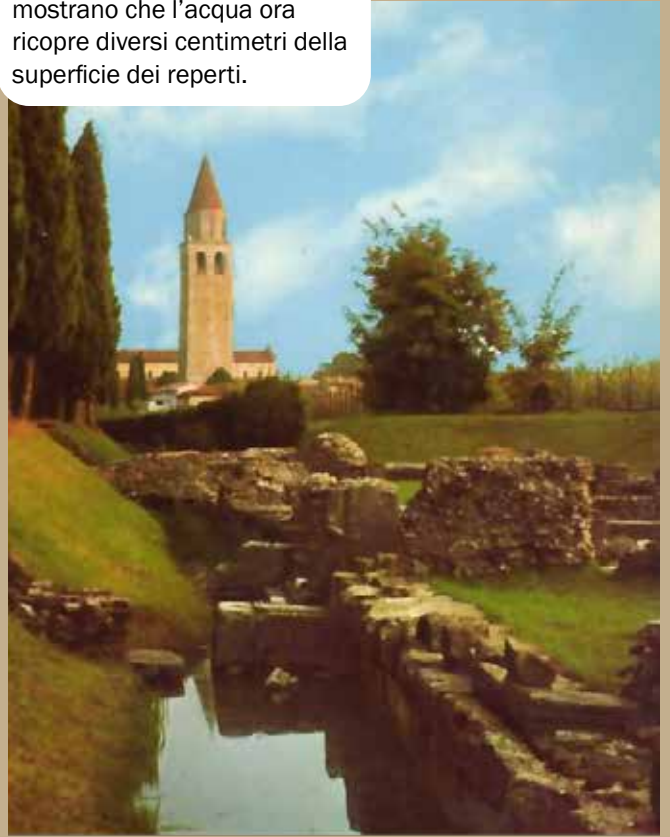
ANNI '30

Osservando le fotografie degli scavi archeologici eseguiti negli anni '30 si nota che non sono presenti lenti d'acqua.



OGGI

Al contrario, le immagini degli stessi siti in tempi recenti mostrano che l'acqua ora ricopre diversi centimetri della superficie dei reperti.



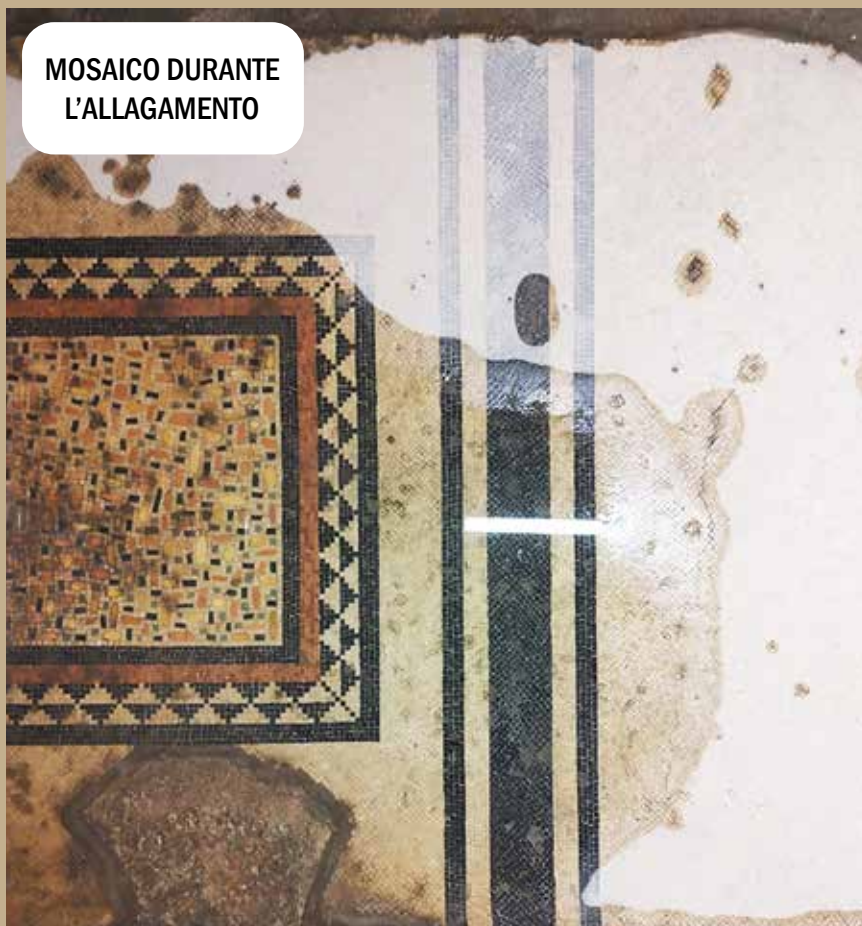
Fonte: Fondazione Aquileia, "Interventi di valorizzazione e musealizzazione del fondo Cossar, progetto definitivo – Relazione Geologica", 2014

I RISCHI PER IL PATRIMONIO CULTURALE

Questo fenomeno comporta l'eventuale degradazione dei reperti e un aumento degli sforzi per la manutenzione e la pulizia degli stessi. Anche all'interno della Basilica di Aquileia sono stati riportati alcuni episodi

LA RISALITA DELLA
FALDA DEGRADA
I REPERTI E
COMPORTA
MAGGIORI AZIONI
DI MANUTENZIONE

di allagamento delle cripte, oltre ai quali sono state segnalate incrostazioni saline al di sopra dei mosaici che drappeggiano i pavimenti. Gli impatti di questi fenomeni causano un incremento delle azioni per la preservazione e, nei casi più gravi, il danneggiamento del bene.

MOSAICO DURANTE
L'ALLAGAMENTOEFFETTI
DELL'ALLAGAMENTO
SUL MOSAICO

GLI SFORZI PER MANTENERE ASCIUTTO IL TERRITORIO E I RISCHI FUTURI

Già oggi il territorio a sud di Aquileia si trova al di sotto del livello medio marino ed è mantenuto fruibile grazie alle opere di difesa costiera e ai servizi di bonifica, come gli argini e l'azione delle idrovore. L'innalzamento del livello marino potrebbe esasperare i processi già osservati, come l'innalzamento del fronte saturo sotterraneo, e rendere necessario incrementare gli sforzi per la bonifica delle aree al di sotto del livello del medio mare.

**IL MARE CHE
SALE IMPONE
MAGGIORI
SFORZI DI
BONIFICA E
MINACCIA
I REPERTI
INESPLORATI**

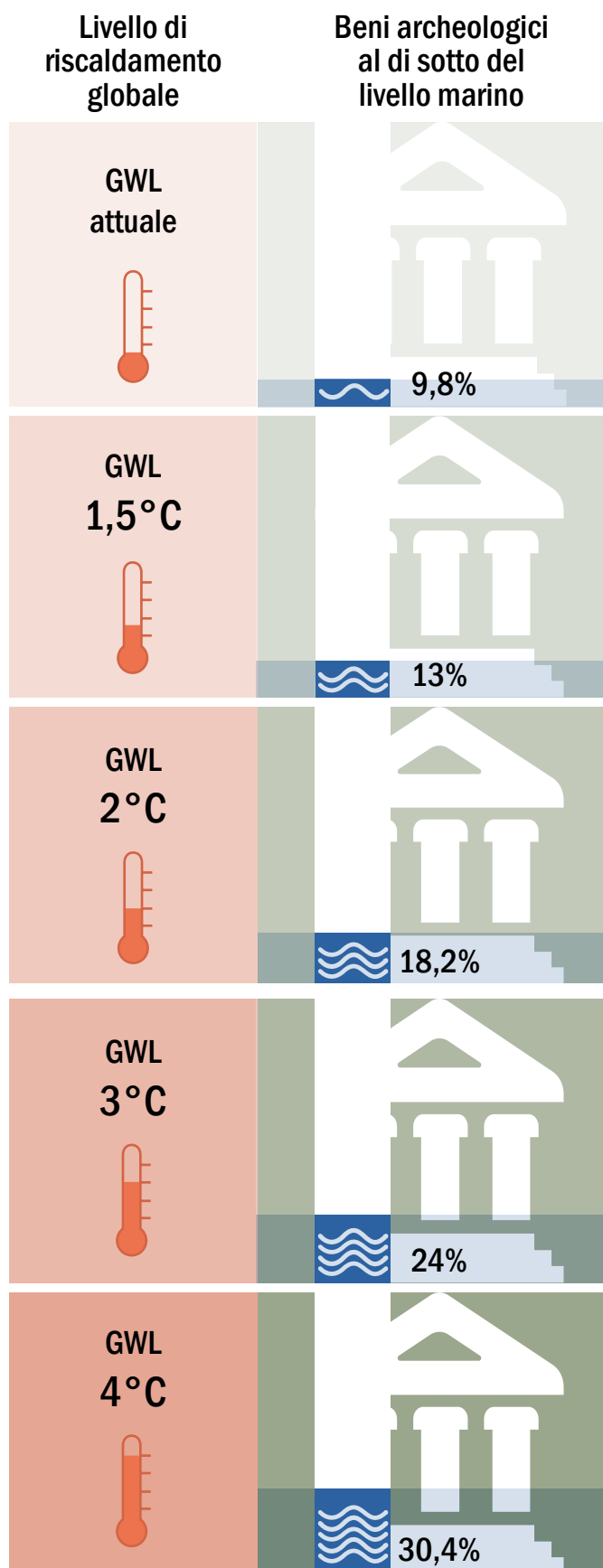
Inoltre, i reperti archeologici che non sono ancora stati esplorati potrebbero essere raggiunti dall'acqua che risale dal basso, degradandoli oppure rendendo le attività di recupero irrealizzabili dal punto di vista tecnico ed economico.

Un mosaico nella cripta della Basilica di Aquileia durante un evento di allagamento (sopra) e le conseguenti deposizioni che si formano sullo stesso (sotto).

Maggiori eventi di questo genere comporteranno sforzi più frequenti di pulizia e manutenzione dei mosaici esposti alle acque.

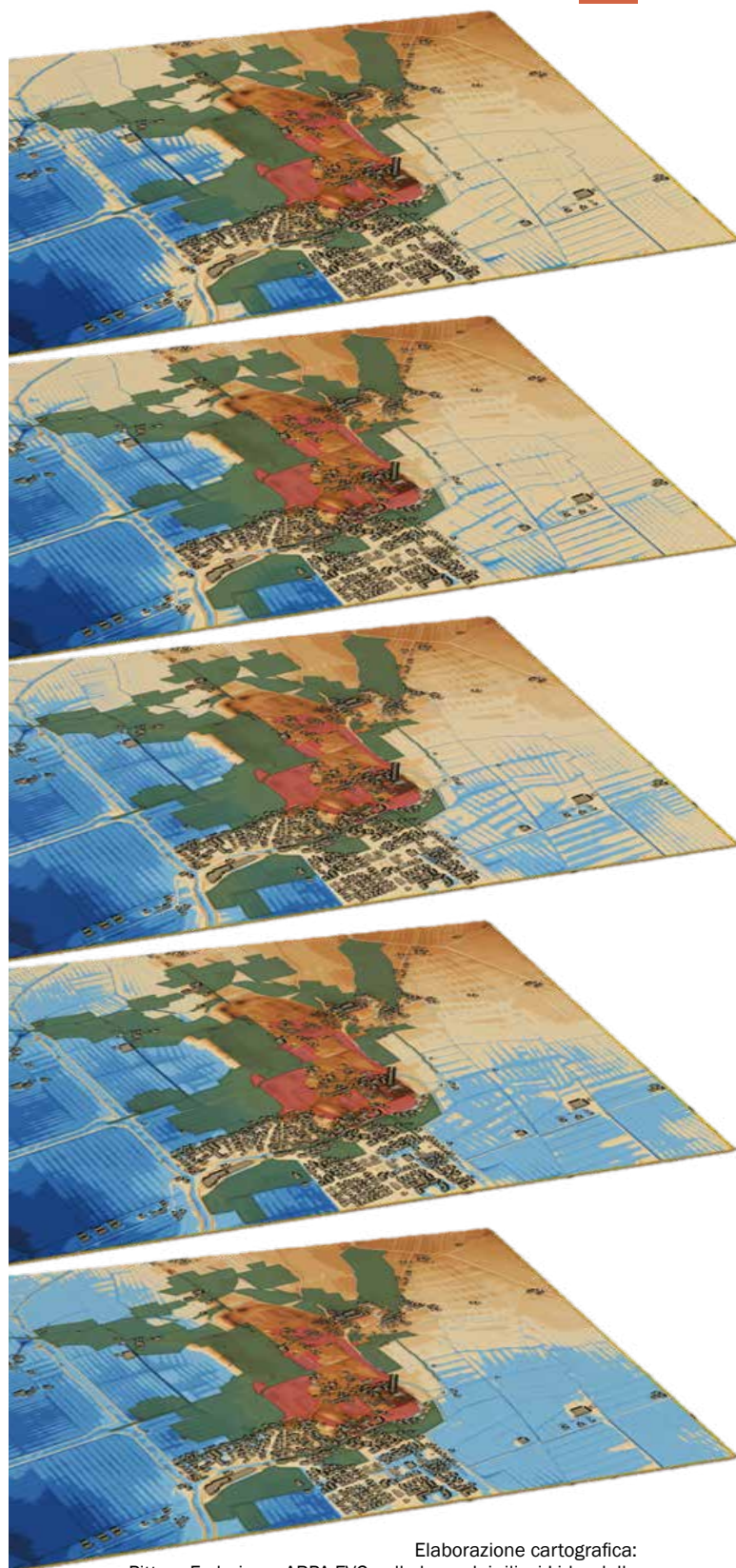
Foto: Federico Pittaro

PERCENTUALE BENI ARCHEOLOGICI AL DI SOTTO DEL LIVELLO MARINO A SECONDA DEI LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE (GWL)



Gli impatti (ampliamento delle aree che verranno a trovarsi al di sotto del livello del mare) sono illustrati in relazione ai diversi GWL (livelli di riscaldamento globale) e al livello medio marino previsto secondo i valori mediani delle proiezioni climatiche.

Aree con potenziale archeologico
Siti archeologici UNESCO



Elaborazione cartografica:
Pittaro Federico – ARPA FVG sulla base dei rilievi Lidar della Regione FVG, delle proiezioni del livello marino del consorzio progettuale MedSeaRise e censimento dei fondi UNESCO e al potenziale archeologico forniti dalla Fondazione Aquileia.

SCENARI DI AMPLIAMENTO DELLE AREE AL DI SOTTO DEL LIVELLO MARINO

Avvalendosi degli scenari climatici predisposti dal consorzio progettuale di MedSeaRise, ARPA FVG ha calcolato, per ogni fondo archeologico all'interno del sito UNESCO e per le aree con potenziale archeologico, la superficie al di sotto del livello marino secondo ogni scenario, utilizzando un totale di 128 simulazioni.

Con l'aumento dei livelli di riscaldamento globale (GWL) a 1,5 °C, 2,0 °C, 3,0 °C e 4,0 °C, le

proiezioni indicano un incremento progressivo del patrimonio archeologico che si troverà al di sotto del livello del mare. Secondo le simulazioni eseguite con un GWL di 1,5 °C, mediamente il 13% delle aree di interesse archeologico si troverà al di sotto del livello marino. Questo valore sale al 18% con un aumento di 2,0 °C, raggiunge il 24% a 3,0 °C e arriva fino al 29,7% con un riscaldamento globale di 4,0 °C.

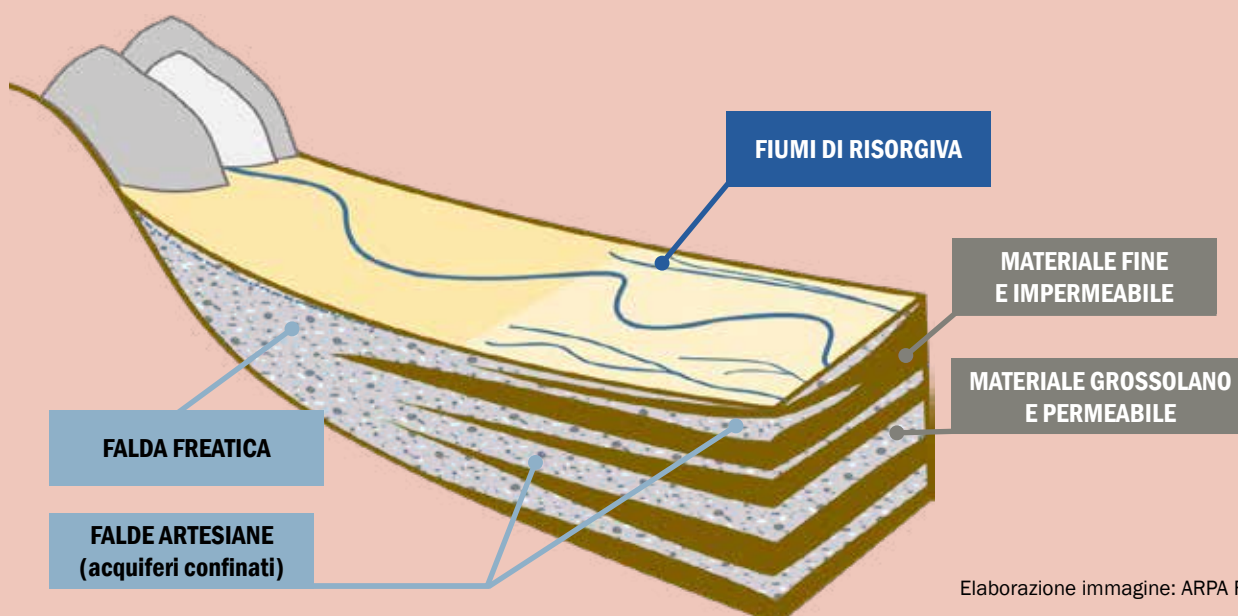
**CON CRESCENTI
LIVELLI DI
RISCALDAMENTO
GLOBALE,
AUMENTA
IL PATRIMONIO
ARCHEOLOGICO
A RISCHIO**

LA COMPLESSA IDROLOGIA SOTTERRANEA DELLA BASSA PIANURA

La relazione tra l'acqua marina e quella sotterranea della bassa pianura friulana dipende molto dall'idrogeologia di quest'ultima. La storia geologica della Regione è molto complessa: i depositi e i materiali che costituiscono gli acquiferi sono il prodotto della deposizione di sedimenti avvenuta sicuramente durante tutto il Quaternario (epoca geologica iniziata 2,5 milioni di anni fa e ancora in corso) e probabilmente anche in un periodo antecedente a esso. L'azione fluviale e le alluvioni avvenute nel Quaternario hanno comportato il trasporto e la deposizione di materiali grossolani, come ghiaie e sabbie in quella che è oggi l'alta pianura friulana, e di elementi di granulometria più fine nella porzione meridionale della Regione.

STRATI DI SEDIMENTI E FALDE ACQUIFERE NELLA BASSA PIANURA FRIULANA

A sud delle risorgive la stratigrafia si è evoluta anche secondo i periodi di avanzamento e regressione del mare. Durante i periodi geologici di trasgressione marina (l'azione del mare di sollevarsi e avanzare verso costa), le deposizioni che si sono accumulate sul fondale sono molto più minute (argille, limi, materiale organico), tali da costruire strati pressoché impermeabili. Nelle epoche di arretramento marino invece, nelle zone un tempo sommerse dal mare agiscono i processi di deposizione fluviale, che apportano materiali più grossolani. L'alternanza di questi diversi meccanismi di deposizione ha creato una stratigrafia in cui lenti impermeabili (ossia accumuli di sedimenti molto fini) sono alternate a cumuli di materiale più grossolano. Mentre le prime lenti non possono essere attraversate dall'acqua sotterranea, la seconda tipologia di materiale è abbastanza porosa per consentire all'acqua di fluire. Questo assortimento definisce una complicata rete idrica sotterranea, composta da diverse falde confinate o semiconfinate lungo il profilo del terreno della bassa pianura friulana.



Elaborazione immagine: ARPA FVG



Attività di monitoraggio del livello idrico sotterraneo presso il pozzo romano situato alle fondamenta della Basilica di Aquileia.

Foto: ARPA FVG

UN ANTICO POZZO PER INDAGARE LA RELAZIONE TRA LIVELLO DEL MARE E FALDE ACQUIFERE

L'innalzamento del livello medio del mare potrà influenzare anche il livello della falda acquifera superficiale, inducendo l'incremento di potenziali danni al patrimonio culturale e delle difficoltà per la loro conservazione e gestione.

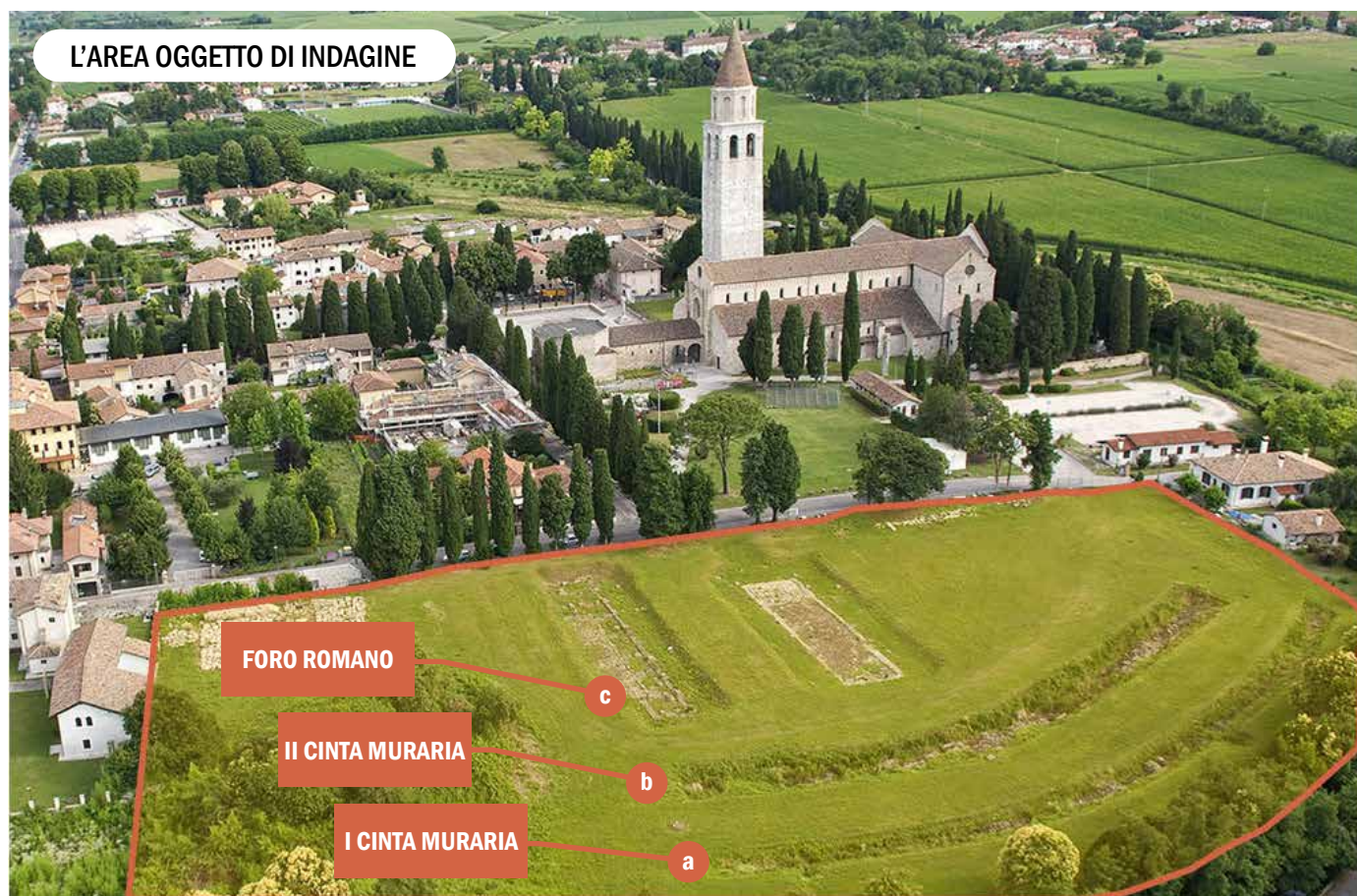
Considerando la complessa struttura idrogeologica dell'area studiata, per verificare l'eventuale relazione dell'acqua marina con i corpi idrici sotterranei (acquiferi), ARPA FVG ha condotto un monitoraggio della prima lente d'acqua sotterranea, sfruttando il pozzo di un'antica villa romana risalente al I° secolo d.C., che giace alle fondamenta della Basilica di Aquileia.

Le attività hanno previsto il controllo del profilo di salinità lungo la colonna d'acqua del pozzo e la misurazione dell'altezza del livello dell'acqua. Secondo i dati ottenuti fin ora, la salinità all'interno del pozzo rimane costante, assicurando i portatori di interesse riguardo eventuali fenomeni di intrusione salina lungo i profili di falda.

Le indagini riguardo la relazione tra l'altezza dell'acqua nella cripta della Basilica e le dinamiche del livello marino sono invece ancora in corso, in quanto è necessario ottenere una rilevante e adeguata serie di dati.

**LA SALINITÀ
FINORA È
COSTANTE**

**IL LIVELLO
DELLA FALDA
VA MONITORATO
A LUNGO**



IL LIVELLO DEL MARE, DEL FIUME NATISSA E DEGLI SCAVI ARCHEOLOGICI

In condizioni di alta e bassa marea è stato monitorato anche il livello idrometrico del fiume Natissa, in corrispondenza dell'antico foro romano denominato fondo Ex-Pasqualis. Questo sito archeologico costeggia le sponde del fiume e, al manifestarsi di eventi atmosferici eccezionali, subisce episodi di allagamento, già occorsi in passato. I dati acquisiti suggeriscono un forte legame tra il livello dell'acqua nel fiume e le condizioni tidal (ossia della marea), come illustrato nel box dedicato.

Confrontando il profilo dell'alveo del fiume Natissa e le quote altimetriche degli scavi presenti nel fondo Ex Pasqualis con il livello idrico del fiume durante alte maree tipiche, si nota come già oggi le acque del fiume raggiungono livelli tali da ricoprire le parti di fondo scavo del sito archeologico. Inoltre, a causa della presenza di una condotta che rende direttamente comunicanti la sponda del fiume e gli scavi, l'acqua sommerge la parte più depressa delle trincee senza incontrare nessun tipo di ostacolo.

**CON LE ALTE
MAREE SALE
IL LIVELLO
DEL NATISSA
E SI ALLAGANO
GLI SCAVI
DEL FONDO EX-
PASQUALIS**



L'area del fondo Ex Pasqualis: in alto una veduta aerea.

Foto: Società per la Conservazione della Basilica di Aquileia; in basso, posizione del fondo nel territorio e rispetto al fiume Natissa (da ortofoto della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia)



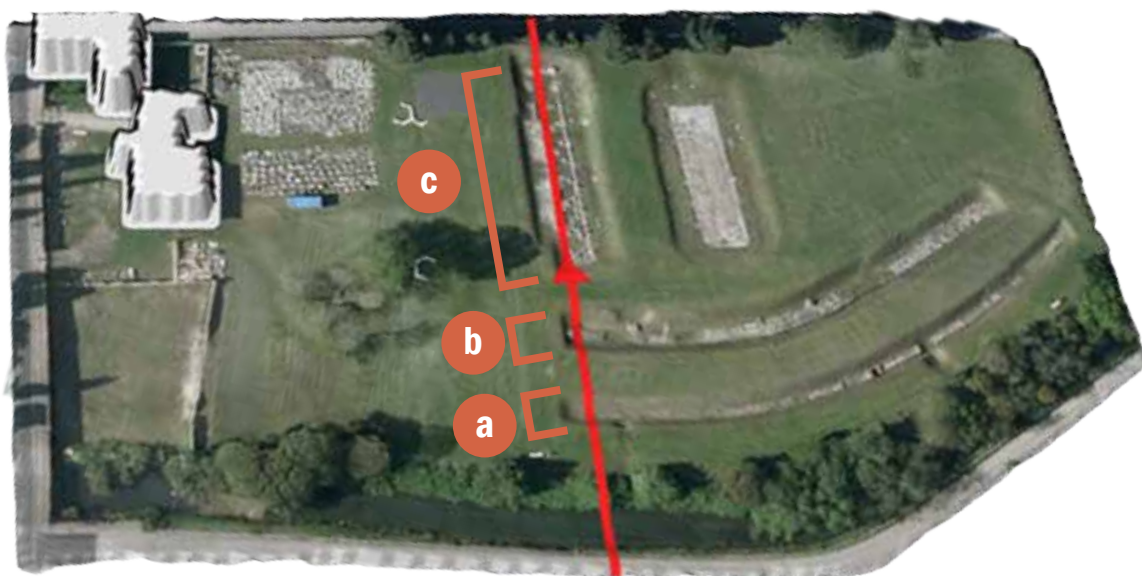
GLI ALLAGAMENTI NEGLI SCAVI ARCHEOLOGICI VICINI AL FIUME

Le trincee a) e b) esplorano le antiche mura della città, mentre gli scavi illustrati nel punto c) rappresentano il foro romano. La prima cinta muraria (a), viene raggiunta dalle acque del fiume Natissa – alla sua sinistra- durante eventi di marea particolarmente alta. Siccome sono presenti dei collegamenti di scolo tra le trincee e le sponde del fiume, quando l'acqua si innalza raggiunge facilmente le prime due trincee, per poi lambire gli scavi del foro romano e risalire per capillarità gli strati più elevati del terreno.

LA QUOTA DEL FIUME E DEGLI SCAVI

Elevazioni del terreno lungo un transetto (in rosso) posto lungo il fondo Ex Pasqualis.

Elaborazione grafica: Federico Pittaro, ARPA FVG su rilievi Lidar e ortofoto della Regione FVG.



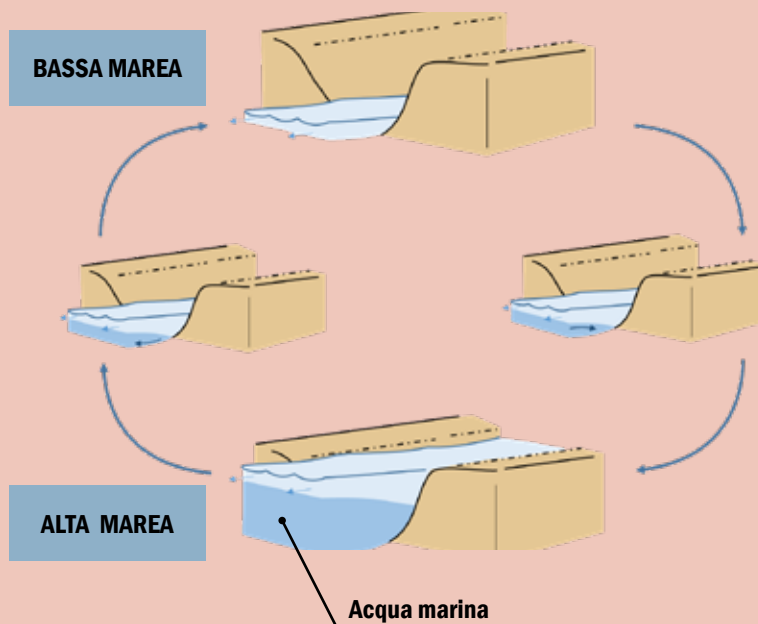
ALTEZZA FIUME NATISSA DURANTE ALTA MAREA TIPICA



TOPOGRAFIA DEL TERRENO LUNGO IL TRANSETTO

L'EFFETTO DELLE MAREE SUL LIVELLO DEL FIUME NATISSA

Durante l'alta marea, l'incremento del livello marino favorisce l'ingresso dell'acqua di laguna lungo l'asta fluviale, giungendo fino alla città, nei pressi della marina di Aquileia. In queste condizioni, l'acqua dolce del fiume si accumula nell'alveo, finché non raggiunge la stessa altezza del livello marino, per poi riversarsi in laguna quando la marea si abbassa.



Il livello idrico del fiume Natissa varia notevolmente durante la bassa marea (a sinistra) e l'alta marea (a destra).

Foto: Federico Pittaro

SCENARI FUTURI PER GLI ALLAGAMENTI DEGLI SCAVI VICINI AL FIUME

L'incremento del volume degli oceani – con il conseguente innalzamento del livello marino – esaspererà questo fenomeno, portando le acque del fiume sempre più in alto durante le fasi di alta marea e, verosimilmente, provocando allagamenti sempre più frequenti dei beni archeologici. Inoltre anche il cuneo salino raggiungerà punti sempre più a monte, comportando possibili impatti sui reperti archeologici situati in prossimità delle sponde.

**CON L'INNALZAMENTO
DEL MARE,
AUMENTERANNO
GLI ALLAGAMENTI
E ANCHE I RISCHI
COLLEGATI
AL CUNEO SALINO**

Grazie ai dati raccolti e al calcolo della relazione tra regime di marea e livello idrico del Natissa, è stato possibile studiare quali altezze raggiungerà il fiume secondo i diversi scenari di innalzamento del livello marino.

Le trincee degli scavi archeologici più vicine alla sponda del Natissa sono raggiunte dalle acque fluviali già ai primi livelli di riscaldamento globale. Con l'incremento della temperatura planetaria e di conseguenza l'innalzamento del livello marino, le acque del fiume saranno destinate a occupare un'area sempre più ampia dell'area archeologica.

AREE ALLAGABILI DEL FONDO EX PASQUALIS (SCENARI FUTURI)



Sono illustrate le aree al di sotto del livello idrico del fiume Natissa, calcolato in condizioni di alta marea tipica e secondo l'innalzamento marino degli scenari climatici. Gli impatti sono illustrati in relazione ai diversi livelli di riscaldamento globale (GWL.).

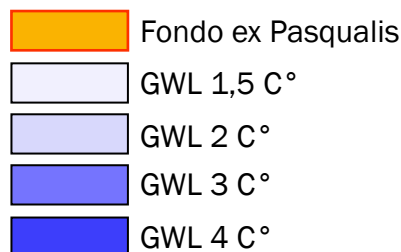




Foto: Fondazione Aquileia, Decumano di Aratria Galla 1_ ©N. Oleotto

BENI ANTICHI, SCENARI FUTURI, SCELTE DI OGGI

L'entità degli impatti futuri dei cambiamenti climatici sullo straordinario patrimonio culturale del sito UNESCO di Aquileia dipende quindi dalle scelte che facciamo oggi per la riduzione delle emissioni climalteranti. Dalla concentrazione dei gas serra in atmosfera dipendono i livelli di riscaldamento globale e la velocità con cui lo raggiungeremo: e da questi, l'innalzamento del livello del mare e i rischi conseguenti per gli scavi archeologici, i mosaici e l'intera area di Aquileia.

**Alessandro Minigher, Dario Giaioti,
Elena Giancesini, Federico Pittaro, Moira Pittis**
ARPA FVG

Si ringraziano la Fondazione Aquileia e la Fondazione Società per la conservazione della Basilica di Aquileia per la preziosa collaborazione allo sviluppo del caso studio illustrato nell'articolo, nell'ambito del progetto MedSeaRise

SPECIALE

LE COSTE E LA LAGUNA

LA VITA VEGETALE NELLA LAGUNA E SUI FONDALI

Canneti, praterie marine, foreste algali: ecosistemi vulnerabili e alleati preziosi per contrastare il cambiamento climatico

Sotto la superficie dell'acqua e lungo i margini costieri e lagunari si sviluppano ecosistemi preziosi del nostro litorale: canneti, praterie marine e foreste algali che regolano l'**equilibrio biologico della laguna di Marano e Grado e del Nord Adriatico**. Questa sezione esplora lo stato di salute di questi ambienti vegetati marini e costieri, svelando come i cambiamenti climatici stiano ridisegnando la distribuzione delle specie e come la tecnologia ci aiuti a monitorare trasformazioni spesso invisibili a occhio nudo.

Gli esperti ci accompagnano alla scoperta di alcuni ecosistemi particolari e delle metodologie di ricerca con cui vengono studiati:

- **La sofferenza dei canneti costieri:** il primo articolo analizza il fenomeno della “marinizzazione” della laguna, causato anche dall’innalzamento del mare. Lo studio si concentra sulla foce dello Stella, dove l’aumento della salinità sta mettendo a rischio la sopravvivenza dei canneti, un habitat fondamentale per la biodiversità delle acque di transizione.
- **L’espansione delle praterie sommerse** osservata col telerilevamento: il secondo contributo sfrutta gli occhi dei satelliti per ricostruire vent’anni di evoluzione delle **fanerogame** marine. L’analisi rivela un’espansione di ben 14 km² di queste praterie: un dato apparentemente positivo che nasconde, tuttavia, una progressiva semplificazione dell’intero ecosistema.
- **Tecnologia autonoma per il monitoraggio:** il terzo intervento ci porta a bordo del **progetto BRIGANTINE**, un catamarano autonomo hi-tech sviluppato dall’Università di Udine. Grazie a sensori e camere multispettrali, questo strumento innovativo permette di mappare i fondali e valutare lo stato di salute delle praterie sommerse in modo non invasivo.
- **Il valore del Blue Carbon:** l’ultimo approfondimento mette in luce il ruolo cruciale di questi habitat nella lotta al riscaldamento globale come “serbatoi di carbonio” naturali. L’articolo evidenzia l’urgenza di proteggere e ripristinare la vegetazione sommersa, doppiamente preziosa sia per la tutela della biodiversità sia per la sua capacità di mitigare le emissioni di gas serra.

Quattro sguardi approfonditi che ci ricordano come la tutela degli ecosistemi e il contenimento del riscaldamento globale passino inevitabilmente dalla protezione del patrimonio vegetale “nascosto” nei nostri mari e nelle nostre lagune.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA





IL DESTINO DEI CANNETI ALLA FOCE DELLO STELLA IN UNA LAGUNA SEMPRE PIÙ MARINIZZATA

La laguna di Grado e Marano sta subendo un processo di marinizzazione, dovuto anche all'innalzamento del livello del mare.

La variazione delle caratteristiche delle acque lagunari altera l'equilibrio ecologico all'interno del bacino e lungo le sue coste.

Specie tipiche di questi ambienti, come la canna comune (*Phragmites australis*), soffrono l'alta salinità e le lunghe sommersioni, che ne riducono crescita e riproduzione.

L'esame della potenziale perdita di habitat causata dall'innalzamento del livello marino è oggetto di studio.

La Laguna di Grado e Marano sta subendo un processo chiamato marinizzazione: con questo termine si indica la trasformazione della laguna in un ambiente sempre più simile al mare aperto. La causa principale è l'aumento del livello marino, che comporta un maggiore ingresso di acqua salata all'interno del bacino costiero e ne modifica la circolazione interna. In questo modo si altera l'equilibrio tra gli apporti fluviali di acqua dolce e le acque marine, il cui ingresso nel bacino è dovuto ai moti di marea e da agenti atmosferici come il vento.

Uno degli aspetti più delicati del cambiamento climatico riguarda gli impatti sulla biodiversità: l'aumento della salinità e della temperatura delle acque sta infatti alterando l'equilibrio naturale degli ecosistemi che occupano l'ambito lagunare.

SPECIE FAVORITE E SPECIE SFAVORITE DALLA MARINIZZAZIONE

LE SPECIE CHE VIVONO BENE IN CONDIZIONI MARINE SARANNO SEMPRE PIÙ COMPETITIVE, MENTRE QUELLE TIPICHE DELLA LAGUNA SONO SEMPRE PIÙ IN DIFFICOLTÀ

Con il progredire della marinizzazione, le specie che vivono bene in condizioni marine saranno sempre più competitive, a discapito degli abitanti originari del bacino costiero. Di conseguenza, alcune specie che un tempo prosperavano nella laguna oggi si trovano in difficoltà, rischiando di essere sostituite e di scomparire a causa dei cambiamenti delle caratteristiche dell'acqua e della progressiva riduzione degli spazi idonei alla loro permanenza e riorganizzazione, di conseguenza, per la maggiore competizione con organismi più adatti

alle nuove condizioni.

LA "COMPRESSIONE COSTIERA"

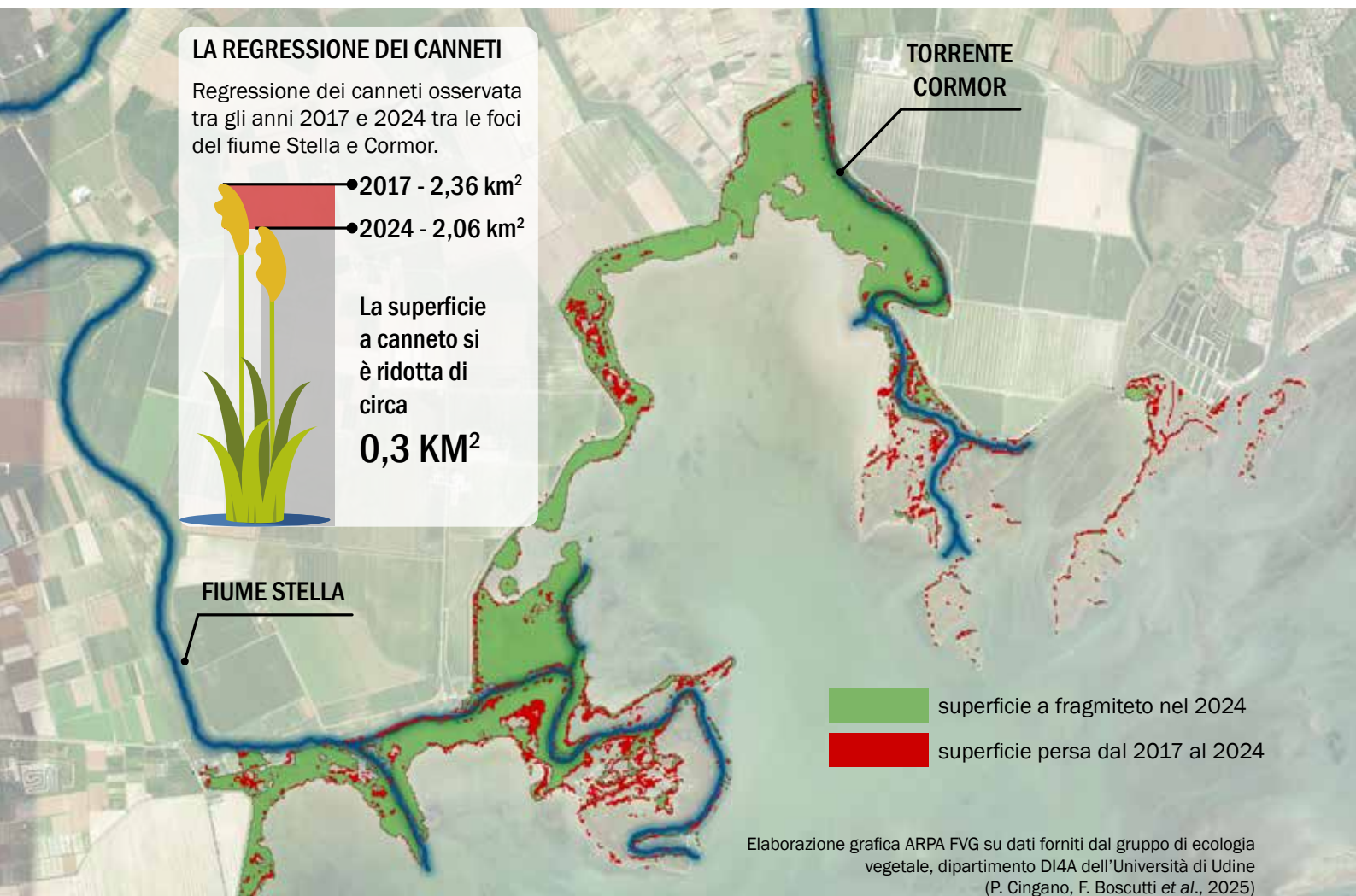
Un esempio significativo dell'effetto dell'innalzamento del livello del mare in laguna è quello che determina la regressione delle popolazioni di canna comune (*Phragmites australis*), una pianta che

forma estese e fitte popolazioni lungo le rive più naturali e meglio conservate del territorio della Regione Friuli Venezia Giulia.

Questo fenomeno ha già attirato l'attenzione delle università locali, poiché la marinizzazione sta progressivamente modificando e impoverendo questi preziosi habitat naturali i quali, durante la loro regressione (ossia l'arretramento dalle zone alterate e non più idonee alla loro vita), si trovano spesso a incontrare barriere di natura antropica, come argini e altre opere artificiali che impediscono la loro naturale migrazione verso l'entroterra.

I FRAGMITETI ARRETRANO, MA INCONTRANO BARRIERE ARTIFICIALI CHE IMPEDISCONO LA LORO NATURALE MIGRAZIONE VERSO L'ENTROTERRA

Si determina così un fenomeno noto in letteratura come "compressione costiera" (coastal squeeze), che ostacola ulteriormente la possibilità di risposta dell'habitat all'innalzamento del livello marino ed enfatizza ancora di più i processi di competizione con specie maggiormente adattate alle nuove condizioni ambientali.





I canneti alla foce dello Stella. Foto: Eric Cingano

PHRAGMITES AUSTRALIS: UNA CANNA “COMUNE” CHE SVOLGE FUNZIONI PREZIOSE

Phragmites australis, o canna comune, è una specie molto produttiva e diffusa in gran parte del mondo (per questo definita “cosmopolita”). Domina numerosi ecosistemi di estuari, lagune e zone umide costiere, dove forma estesi canneti, anche di grande importanza ecologica. Proprio tra le foci dei fiumi Stella e Cormor si sviluppa uno dei più grandi canneti del Nord Adriatico.

Le formazioni vegetali costituite da *Phragmites australis*, o “fragmiteti”, svolgono diverse funzioni di grande importanza, tra le quali fungere da vero e proprio filtro naturale, trattenendo sostanze inquinanti, microrganismi dannosi e nutrienti in

eccesso. In questo modo i fragmiteti contribuiscono a contrastare il degrado delle acque e l'eutrofizzazione, cioè l'eccessivo arricchimento di nutrienti che può causare la proliferazione incontrollata di alghe e il

conseguente impoverimento di ossigeno nell'acqua. Grazie a queste proprietà, questa pianta è utilizzata anche nella fitodepurazione e nel trattamento delle acque reflue.

Inoltre, sebbene i canneti non ospitino un numero elevatissimo di specie vegetali, sono comunque ambienti preziosi per la conservazione della biodiversità: offrono infatti rifugio, aree

di riproduzione e veri e propri “asili naturali” per molte specie di fauna d'acqua dolce, salmastra e marina.

**I FRAGMITETI
FUNGONO DA
FILTRO NATURALE
E OFFRONO
RIFUGIO, AREE DI
RIPRODUZIONE E
VERI E PROPRI “ASILI
NATURALI” PER
MOLTI ANIMALI**

I FRAGMITETI: ECOSISTEMI SENTINELLA

Grazie alla collaborazione con i ricercatori di ecologia vegetale del Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali ed Animali (DI4A) dell'Università di Udine, sono state approfondite le pressioni ambientali che hanno un impatto diretto su una specie vegetale che abita la laguna: *Phragmites australis*, o canna comune.

**L'ESPOSIZIONE
ALL'ACQUA
SALATA È UNO
DEI PRINCIPALI
FATTORI
DI STRESS
AMBIENTALE
PER LA CANNA
COMUNE**

Phragmites australis è una pseudofita alofila (o pseudohalofita), ossia tollera ambienti che vanno dall'acqua dolce a condizioni moderatamente salmastre. Tuttavia, ha bisogno di un apporto costante di acqua dolce per contrastare l'incremento di salinità dovuto alle maree nelle aree popolate da questa specie. Questo aiuta a capire perché il grande canneto si trovi proprio tra le foci dei fiumi Stella e

Cormor: insieme, essi rappresentano la principale fonte di acqua dolce che arriva all'interno della laguna.

L'esposizione all'acqua salata rappresenta per questa specie uno dei principali fattori di stress ambientale: può ridurne la crescita, ostacolarne la

fotosintesi e diminuirne la biomassa. Per questo motivo i canneti dominati da *Phragmites australis* sono considerati veri e propri ecosistemi sentinella. Osservando il loro stato di salute, si può comprendere come l'intrusione di acqua salata e l'aumento del periodo di sommersione influenzino la struttura e il funzionamento delle zone umide costiere.

IL CASO STUDIO SUI FRAGMITETI NEL PROGETTO MedSeaRise

Nel caso di questo studio, sono stati utilizzati dati disponibili pubblicamente, come i modelli digitali del terreno e della carta batimetrica lagunare, informazioni sulla specie fornite dai ricercatori dell'Università di Udine e dati raccolti durante una campagna di monitoraggio condotta dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG).

**SI È INDAGATO
IL LEGAME TRA
L'INNALZAMENTO
DEL LIVELLO
DEL MARE,
L'INTRUSIONE DI
ACQUA SALATA
E I POSSIBILI
IMPATTI FUTURI
SUI CANNETI**

L'obiettivo è stato quello di indagare il legame tra l'innalzamento del livello del mare, l'intrusione di acqua salata nelle prossimità dei canneti e i possibili impatti futuri

su questi ambienti in scenari di crescente riscaldamento globale.

Per condurre le indagini sono state confrontate l'area di distribuzione di *Phragmites australis*, la serie storica dei livelli marini registrati dalla stazione mareografica di Grado e la carta topobatimetrica dell'area di studio (la mappa che descrive sia le quote del terreno che le profondità dei fondali).

Per prima cosa, la topobatimetria dell'area di studio è stata investigata ponendo particolare attenzione alle aree occupate da *Phragmites australis*. Indagando le quote del terreno in cui la specie è presente, è stato osservato che il canneto si sviluppa solo al di sopra di una certa quota del terreno, mentre si fa molto più rado o è completamente assente al di sotto di questa soglia.

RELAZIONE TRA L'ALTA MAREA E LA DISTRIBUZIONE DEL CANNETO

La mappa illustra la distribuzione dei fragmiteti rispetto alla quota altimetrica raggiunta tipicamente dall'alta marea. Gran parte delle superfici che non sono tipicamente raggiunte dall'alta marea sono abitate da *Phragmites australis*.

UN FATTORE CRUCIALE: LA QUOTA DELL'ALTA MAREA

Ma perché proprio a partire da quella quota la specie comincia a essere presente mentre al di sotto di essa non sembra essere capace di sopravvivere? Esaminando la serie storica della stazione mareografica di Grado, che dal 1990 misura l'altezza del mare, è stata calcolata la quota dell'altezza tipica dell'alta marea, che risulta quasi coincidente con la soglia altimetrica oltre la quale il canneto prospera. Confrontando questi risultati con la distribuzione della specie e l'idroperiodo – la permanenza in sommersione del terreno determinata dal regime di marea –, è emerso che oltre l'85% del canneto popola zone che non vengono mai sommerse oltre il 20% del tempo.

**IL CANNETO
PROSPERA
SOPRA LA QUOTA
DELL'ALTEZZA
TIPICA DELL'ALTA
MAREA**

**SUPERFICIE
RICOPERTA DA
*PHRAGMITES
AUSTRALIS***

**AREE AL
DI SOTTO
DELL'ALTA
MAREA MEDIA**



**CON
L'INNALZAMENTO
DEL LIVELLO MEDIO
MARINO SALIRÀ
ANCHE LA QUOTA
DELLE ALTE MAREE,
RIDUCENDO
L'HABITAT
FAVOREVOLE PER
PHRAGMITES
AUSTRALIS**

Con l'innalzamento del livello marino, le alte maree raggiungeranno quote sempre più elevate, aumentando gradualmente il tempo di sommersione dei terreni che in precedenza venivano raggiunti dall'acqua solo in occasione di eventi eccezionali. Di conseguenza, la quota minima oltre la quale la pianta riesce a sopravvivere tenderà a spostarsi sempre più in alto, comportando la contrazione dell'habitat favorevole alla vita di *Phragmites australis*.

SCENARI FUTURI DI PERDITA DELL'HABITAT

Avvalendosi di 128 simulazioni, ciascuna per ogni scenario climatico futuro, è stata calcolata la superficie di habitat che si prevede di perdere con l'aumentare del riscaldamento globale e il conseguente innalzamento dei mari.

- **Con un aumento della temperatura globale di 1,5 °C**, la quota minima compatibile con la sopravvivenza del canneto si innalza provocando una perdita di habitat stimata del 47% (circa 0,349

**È STATA CALCOLATA
LA SUPERFICIE DI
HABITAT CHE SI PERDERÀ
CON L'AUMENTARE
DEL RISCALDAMENTO
GLOBALE E IL
CONSEQUENTE
INNALZAMENTO DEI MARI**

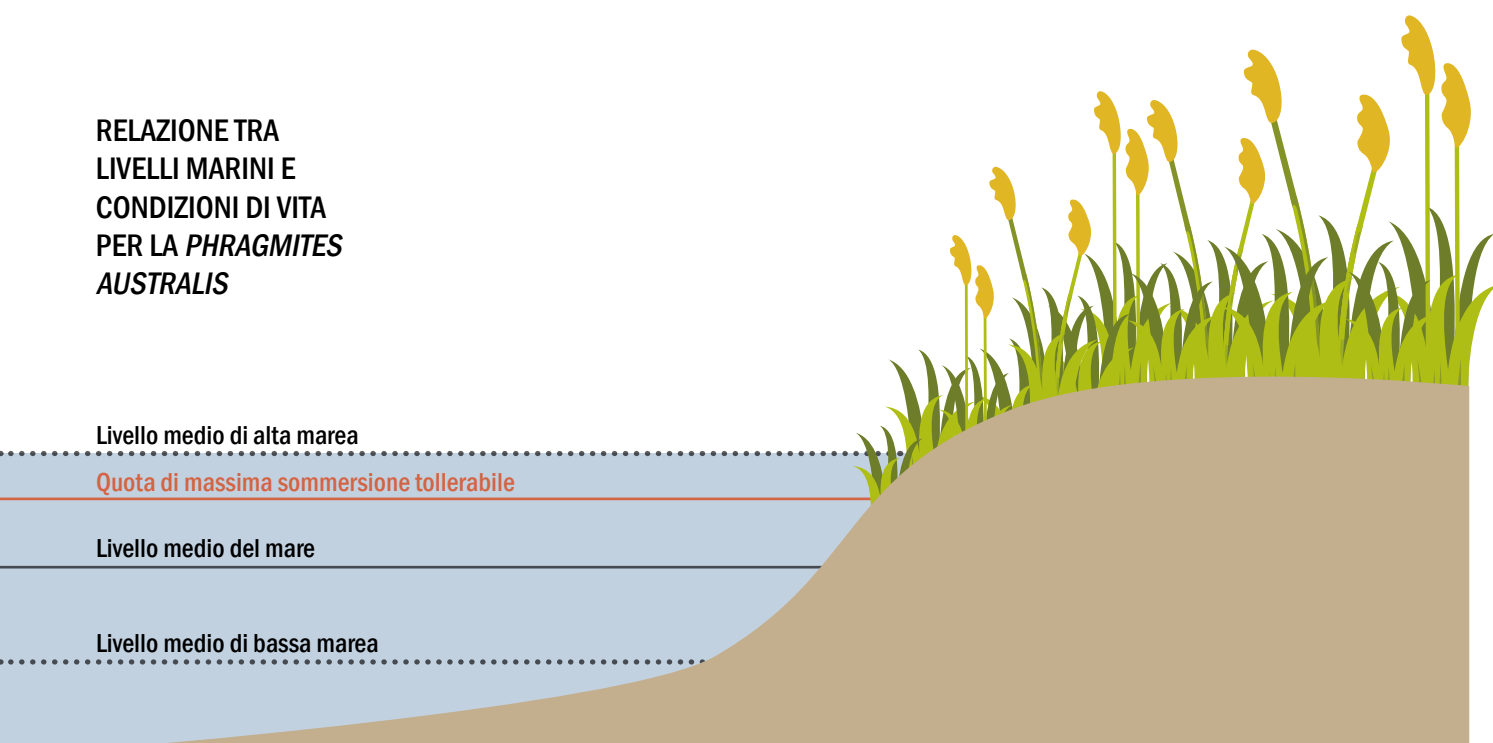
km²). Questo dato evidenzia quanto l'ecosistema sia sensibile anche a cambiamenti climatici non estremi.

- **Quando il riscaldamento globale arriva a 2,0 °C**, la quota di massima sommersione tollerabile sale ulteriormente di circa 20 cm, e la perdita prevista di habitat aumenta drasticamente, fino al 96,7% rispetto al presente (circa 0,722 km²). Per questo motivo, la soglia dei 2 °C sembra rappresentare un punto critico per la sopravvivenza di questi ecosistemi.
- **Con un aumento di 3,0 °C**, la quota di massima sommersione tollerabile incrementa di ulteriori 20 cm e la perdita di habitat raggiunge il 99,5% (circa 0,742 km²).
- In termini pratici, la quasi totalità delle aree adatte alla crescita del canneto scompaiono e vengono completamente perse **con 4,0°C di riscaldamento globale**.

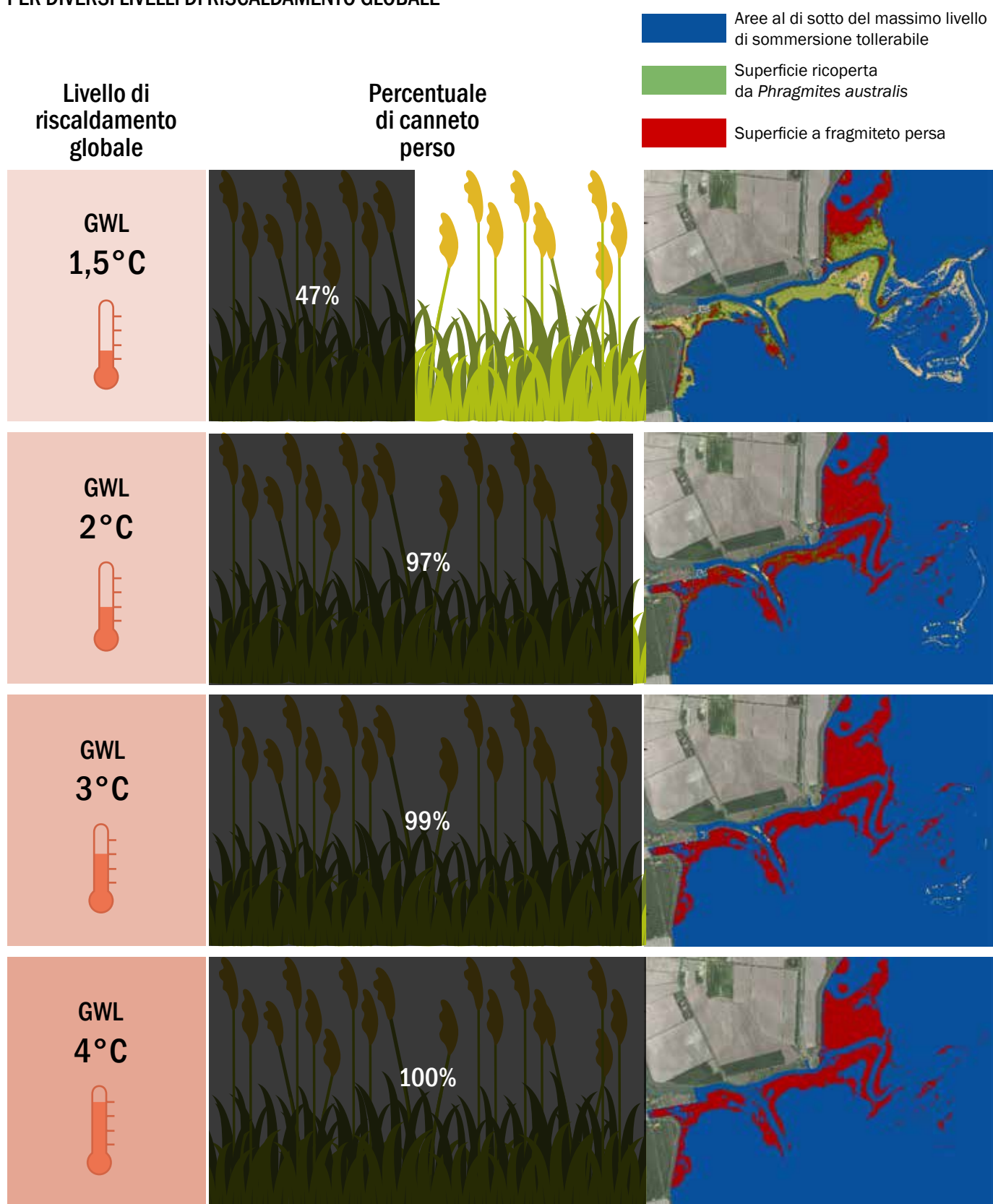
Nel complesso, le proiezioni mostrano una risposta non lineare: anche un aumento relativamente modesto della temperatura planetaria può provocare un innalzamento del mare sufficiente a causare un rapido declino dell'habitat. Questo significa che le popolazioni di *Phragmites australis* risultano altamente vulnerabili, persino negli scenari di riscaldamento globale più contenuti.

**LE POPOLAZIONI
DI PHRAGMITES
AUSTRALIS
RISULTANO
ALTAMENTE
VULNERABILI GIÀ
NEGLI SCENARI
PIÙ MODERATI**

RELAZIONE TRA LIVELLI MARINI E CONDIZIONI DI VITA PER LA PHRAGMITES AUSTRALIS



**PERDITA DEI CANNETI ALLA FOCE DELLO STELLA
PER DIVERSI LIVELLI DI RISCALDAMENTO GLOBALE**



**Alessandro Minigher, Dario Giaiotti,
Elena Giancesini, Federico Pittaro, Moira Pittis**
ARPA FVG

Francesco Boscutti, Paolo Cingano
Università degli Studi di Udine

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



L'ESPANSIONE DELLE FANEROGAME MARINE NELLA LAGUNA DI GRADO- MARANO: DALLO SPAZIO I SEGNALI DI UNA LAGUNA CHE CAMBIA

Popolamento di *Nanozostera noltei*.

Si possono notare le bolle di ossigeno formate dalla fotosintesi subacquea. Il ruolo di ossigenazione delle acque delle fanerogame marine è di vitale importanza per numerosi organismi animali.

Le praterie di fanerogame marine sono tra gli habitat più preziosi della laguna di Marano e Grado: ospitano biodiversità, ossigenano le acque e stabilizzano i fondali.

Grazie al telerilevamento satellitare, uno studio delle Università di Udine e Trieste ha ricostruito vent'anni di cambiamenti, mostrando un'espansione di circa 14 km².

Un segnale solo positivo?

Non del tutto: questa crescita potrebbe riflettere anche le trasformazioni in atto e una progressiva semplificazione del sistema lagunare costiero.

Navigando nella laguna di Marano e Grado, appena al di fuori dei canali principali, è facile individuare sott'acqua lunghe foglie nastro-formi mosse dalle correnti. Dopo pochi istanti, ci si ritrova immersi in un vero e proprio prato sommerso, dominato dalle fanerogame marine.

Questi organismi sono piante che, originariamente evolute sulla terraferma, nel corso dell'evoluzione si sono adattate all'ambiente marino. Il termine "fanerogama" deriva dal greco "*phaneros*" (visibile) e "*gamos*" (unione), indicando piante che possiedono organi riproduttivi visibili, come fiori e frutti. Si sviluppano formando vaste praterie sommerse, di fondamentale importanza per l'ecosistema lagunare. A differenza delle alghe, le fanerogame sono piante vascolari, con un robusto apparato radicale, foglie, fiori e frutti.

SEMBRANO TUTTE UGUALI... MA NON LO SONO

LE DIVERSE SPECIE PRESENTI NELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO

Sebbene a un primo sguardo possano sembrare molto simili, le fanerogame marine presenti in laguna non sono tutte uguali. Distinguere le diverse specie è importante, perché ciascuna occupa ambienti diversi e risponde in modo proprio a fattori come salinità, profondità, tipo di fondale e influenza del mare. Osservarne la distribuzione aiuta quindi a leggere meglio anche i cambiamenti dell'ambiente lagunare.

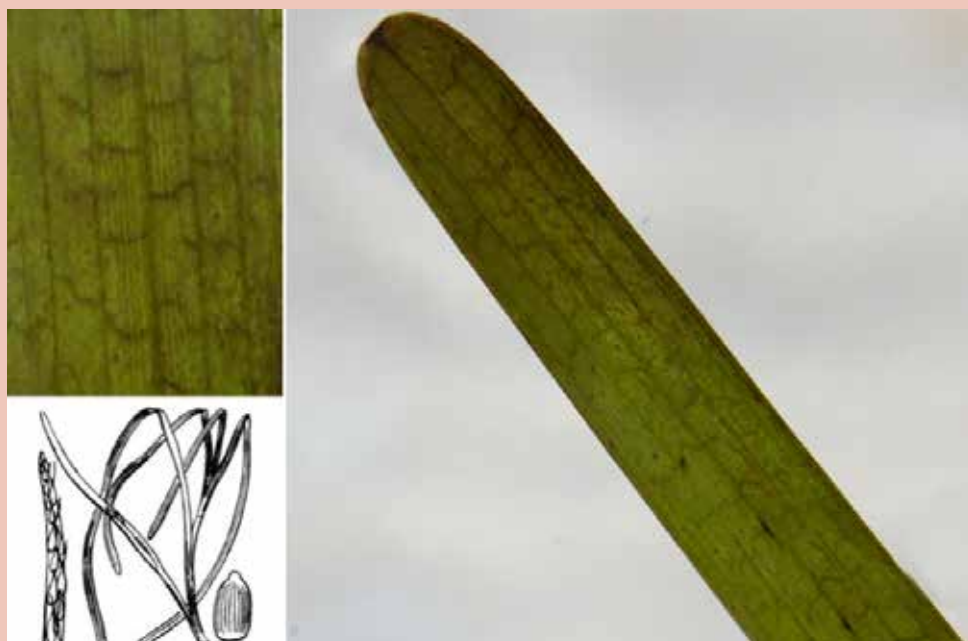
Cymodocea nodosa (Ucria) Asch.

Specie tipica di ambienti mediterranei e temperato-caldi, è diffusa nel Mediterraneo e lungo parte delle coste nordafricane. Vive su fondali sabbiosi o fangosi, sia in mare aperto sia in laguna, ed è nota per la sua elevata plasticità ecologica: tollera bene condizioni ambientali anche molto variabili. Per questo è una presenza importante nei sistemi di transizione come Marano e Grado.



Zostera marina L.

Specie tipica degli ambienti temperati dell'emisfero nord, nel Mediterraneo si trova soprattutto nelle lagune e negli estuari delle coste settentrionali. Cresce in ambienti riparati, su fondali molli o sabbiosi, e l'estensione delle sue praterie può cambiare nel tempo in risposta a correnti, moto ondoso, trasporto dei sedimenti e dispersione dei semi.



***Nanozostera noltei* (Hornem.) Toml. & Posl.**

Diffusa lungo le coste europee e nordafricane, in laguna occupa soprattutto acque basse, riparate e con fondali fangosi. È una specie capace di acclimatarsi a condizioni ambientali diverse e, proprio per questa flessibilità, può mostrare dinamiche molto rapide di espansione o contrazione.



***Ruppia* sp. pl.**

Il genere *Ruppia* è costituito da specie di piante acquatiche legate soprattutto agli ambienti salmastri di transizione, come lagune costiere e barene. È una presenza interessante perché occupa spesso le zone intermedie tra acque dolci e acque marine, mostrando una notevole tolleranza alle variazioni di salinità.



Alcune forme sono anche capaci di completare il loro ciclo vitale in pochi mesi, caratteristica che le rende particolarmente adatte ad ambienti temporanei o molto variabili.

immagini nel box: © Dipartimento di Scienze della Vita,
Università di Trieste
Andrea Moro
Distributed under CC BY-SA 4.0 license.

LE PRATERIE SOTTOMARINE E LE LORO PREZIOSE FUNZIONI

LE FANEROGAME SONO PIANTE VASCOLARI CHE STABILIZZANO I FONDALI E PROTEGGONO LA BIODIVERSITÀ DELLA LAGUNA FORMANDO PRATERIE SOMMERSE

Le foglie lunghe e nastriformi delle fanerogame marine contribuiscono a creare una struttura fitta e articolata nell'ambiente acquatico. Si vengono così a formare veri e propri prati sottomarini in grado di fornire rifugio, nutrimento e siti di riproduzione per una grande varietà di specie marine, tra cui pesci, crostacei e molluschi. Inoltre, questi ecosistemi svolgono un ruolo essenziale nella regolazione dei nutrienti, nell'ossigenazione delle acque e dei sedimenti. Grazie ai potenti sistemi radicali riducono l'erosione del sedimento, consolidano i fondali marini, rallentando la perdita di habitat e contribuendo alla stabilizzazione delle coste.

TELERILEVAMENTO

Il telerilevamento è l'insieme delle tecniche che permettono di raccogliere dati su un ambiente a distanza, senza misurarlo direttamente sul posto. Per farlo si usano strumenti montati su satelliti, aerei o droni, capaci di acquisire immagini e dati osservando la superficie dall'alto.

Queste immagini non sono semplici fotografie: contengono infatti anche informazioni quantitative sulla radiazione riflessa dalle superfici osservate. Ogni materiale, come acqua, suolo, vegetazione o aree urbanizzate, riflette l'energia in modo diverso. Questo comportamento caratteristico prende il nome di **firma spettrale** e rappresenta una sorta di "impronta" che consente di distinguere i diversi elementi presenti nel paesaggio. Grazie al telerilevamento è quindi possibile riconoscere elementi diversi del paesaggio, monitorarne l'evoluzione nel tempo e interpretare i processi di trasformazione che interessano l'ambiente.

I SENSORI SATELLITARI PER IL MONITORAGGIO DELLE FANEROGAME

Sempre più spesso il telerilevamento da satellite viene impiegato per osservare e monitorare gli ecosistemi costieri. I satelliti raccolgono immagini in modo regolare su aree molto estese, offrendo una grande quantità di informazioni utili per seguire nel tempo ambienti difficili da studiare in modo continuo soltanto con il lavoro sul campo. Uno dei principali vantaggi di questo approccio è la disponibilità di archivi storici: grazie a immagini raccolte per decenni, è possibile ricostruire come un habitat è cambiato anno dopo anno.

UNO STUDIO CHE TIENE CONTO ANCHE DELLE STAGIONI

In questa prospettiva si inserisce anche un recente studio condotto dall'Università di Udine e dall'Università di Trieste sulla laguna di Marano e Grado, che ha utilizzato immagini satellitari raccolte nell'arco di vent'anni per seguire nel tempo la distribuzione delle praterie sommerse.

UTILIZZANDO 20 ANNI DI IMMAGINI SATELLITARI, LE UNIVERSITÀ DI UDINE E TRIESTE STUDIANO L'EVOLUZIONE DELLE PRATERIE SOMMERSE

LA SFIDA È DISTINGUERE LE DIVERSE SPECIE PERCHÉ IL SEGNALE VIENE MODIFICATO DALLE CONDIZIONI AMBIENTALI DELLA LAGUNA

La sfida più complessa non è solo riconoscere la presenza delle praterie, ma distinguere anche le diverse specie, grazie alla loro firma spettrale (vedi box). Negli ambienti acquatici, però, questo riconoscimento è più difficile, perché il segnale viene modificato dall'acqua e dalle continue fluttuazioni ambientali tipiche della laguna, come le maree e i picchi di torbidità.

Per migliorare la distinzione tra le specie è quindi utile considerare anche la loro fenologia, cioè il ritmo stagionale di crescita e di perdita delle foglie. È un fenomeno che tutti, in qualche modo, conosciamo già: le foglie che troviamo spiaggiate lungo la riva sono proprio quelle che le praterie perdono naturalmente in alcuni momenti dell'anno, un po' come fosse "fieno di mare".

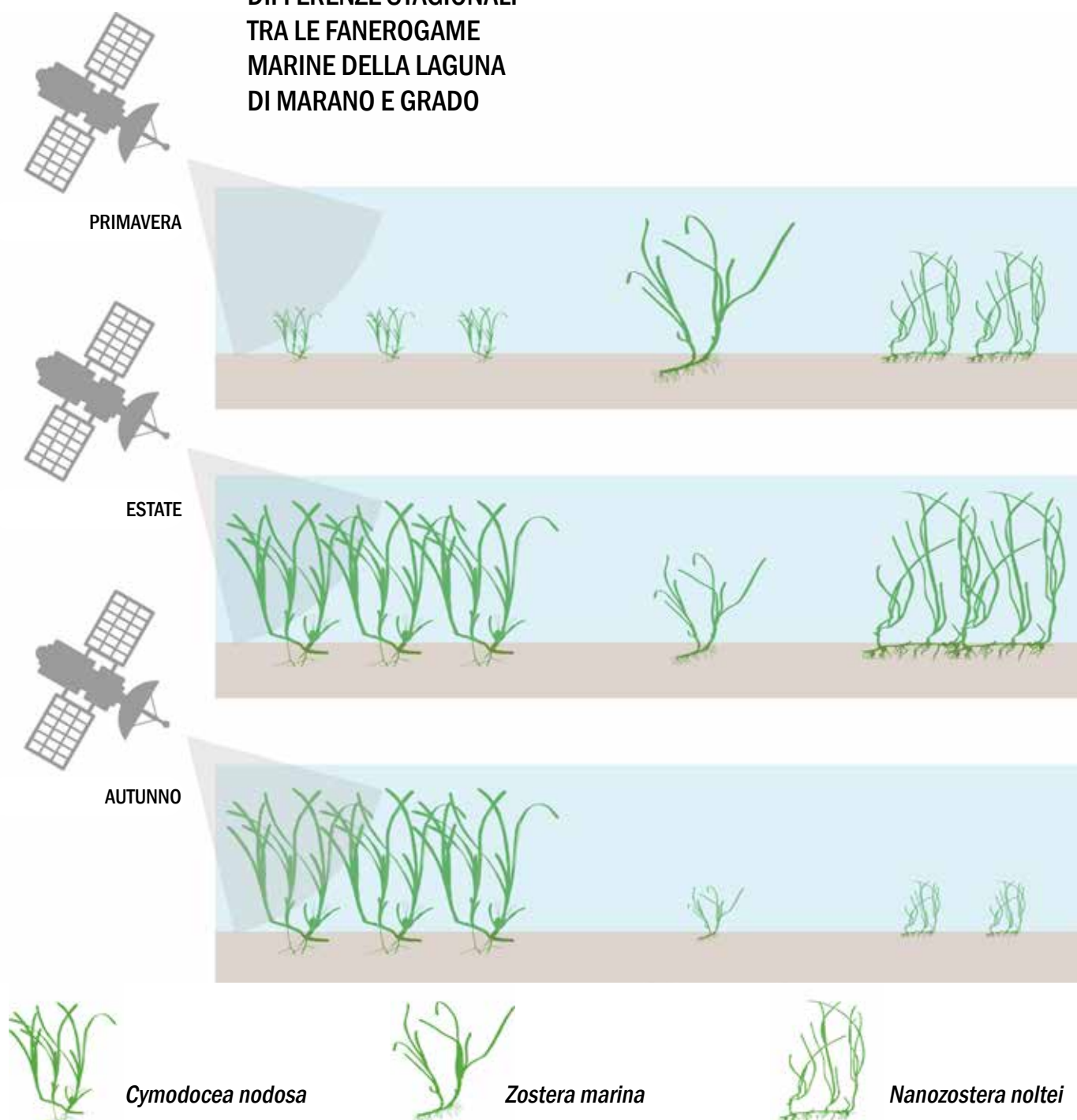
PER MIGLIORARE LA DISTINZIONE TRA LE SPECIE È UTILE CONSIDERARE IL RITMO STAGIONALE DI CRESCITA E DI PERDITA DELLE FOGLIE

Poiché ogni specie segue tempi diversi, osservare le praterie in stagioni differenti aiuta a discriminare con maggiore precisione le diverse specie.

Per questo nello studio non è stata usata una sola immagine satellitare, ma una serie di immagini raccolte in diversi momenti dell'anno.

In questo modo il modello ha potuto combinare le differenze nelle firme spettrali con quelle legate alla fenologia delle specie, migliorando la capacità di riconoscere non solo le praterie nel loro insieme, ma anche le diverse fanerogame che le compongono.

DIFFERENZE STAGIONALI TRA LE FANEROGAME MARINE DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO



Schema semplificato delle differenze stagionali tra le principali fanerogame marine della laguna di Marano e Grado. Le tre specie modificano in modo diverso la propria struttura vegetativa tra primavera, estate e autunno; queste differenze fenologiche, osservate dai satelliti in momenti diversi dell'anno, aiutano a distinguerle con maggiore accuratezza.

LA DINAMICA DELLE FANEROGAME NELLO SPAZIO E NEL TEMPO: DAI SATELLITI I SEGNALI DI UNA LAGUNA CHE CAMBIA

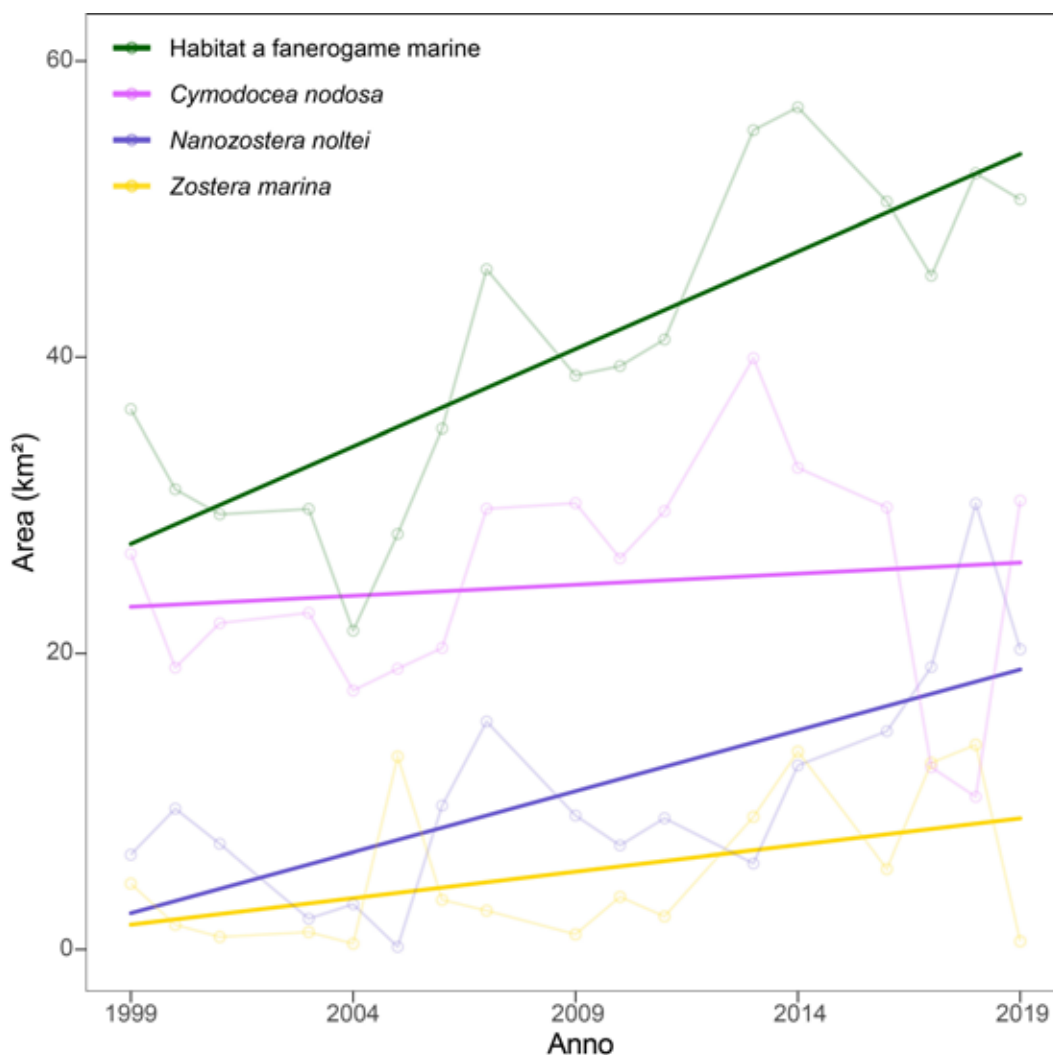
TRA IL 1999 E IL 2019 LE PRATERIE DI FANEROGAME MARINE DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO SONO AUMENTATE GLOBALMENTE DI CIRCA 14 KM², MA CON IMPORTANTI VARIAZIONI LOCALI

Le immagini satellitari analizzate nello studio mostrano che, tra il 1999 e il 2019, le praterie di fanerogame marine della laguna di Marano e Grado sono aumentate nel complesso di circa 14 chilometri quadrati, con una crescita media di 1,59 km² all'anno. Negli anni più recenti la superficie stimata ha superato i 50 km², circa un terzo dell'intera laguna.

L'aumento complessivo delle superfici coperte da praterie, però, nasconde dinamiche eterogenee. In alcune aree le praterie si sono espanse verso l'interno, mentre in altre sono arretrate fino a scomparire localmente, come nel bacino occidentale della laguna di Marano. Osservando le singole specie, l'incremento più marcato riguarda *Nanozostera noltei*, mentre *Cymodocea nodosa* e *Zostera marina* hanno mostrato ampie oscillazioni, ma senza una tendenza statisticamente significativa lungo l'intero periodo analizzato.

Questo andamento positivo potrebbe riflettere un miglioramento delle condizioni ambientali e gli effetti delle misure di tutela, fattori che spesso favoriscono il ritorno e l'espansione delle fanerogame marine.

PRATERIE DI FANEROGAME MARINE NELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO TRA IL 1999 E IL 2019



Andamento della superficie complessiva delle praterie di fanerogame marine e delle tre principali specie presenti nella laguna di Marano e Grado tra il 1999 e il 2019. I punti rappresentano le stime annuali ottenute da immagini satellitari, mentre le linee evidenziano la tendenza generale. Nel complesso l'habitat mostra un'espansione, trainata soprattutto dall'aumento di *Nanozostera noltei*, mentre *Cymodocea nodosa* e *Zostera marina* mostrano fluttuazioni più marcate.

In vent'anni le praterie sono aumentate di circa 14 chilometri quadrati e tuttavia questa espansione potrebbe riflettere anche una trasformazione profonda della laguna di Marano e Grado: la conseguenza di una crescente influenza dell'acqua marina, associata alla riduzione dell'apporto di acqua dolce e all'innalzamento del livello del mare. Potrebbe essere

**QUESTA ESPANSIONE
POTREBBE ESSERE
IL SEGNALE DI UNA
PROGRESSIVA
MARINIZZAZIONE
DEL SISTEMA
LAGUNARE, CHE PERDE
GRADUALMENTE
ALCUNE DELLE SUE
FORME TIPICHE**

il segnale di una progressiva marinizzazione del sistema lagunare, cioè di un processo in cui questo ambiente di transizione perde gradualmente alcune delle sue forme tipiche e tende a somigliare sempre di più a un sistema marino aperto. Con il tempo, questa trasformazione porta a una laguna morfologicamente più

semplice, con erosione delle barene e approfondimento dei bassi fondali e delle piane di marea. In questa prospettiva assume particolare rilievo il fatto che la specie con l'aumento più marcato sia *Nanozostera noltei*, già indicata da studi precedenti come tra le più favorite da condizioni più marine e da una maggiore salinità. In futuro, una laguna più marina e morfologicamente più semplice potrebbe restringere rapidamente le aree più adatte ad alcune specie, rendendo gli habitat meno diversi e meno complessi e riducendo così la ricchezza delle comunità che oggi trovano spazio in questo mosaico lagunare. Per questo le praterie sommerse non sono soltanto habitat di grande valore ecologico, ma anche indicatori sensibili delle trasformazioni in atto negli ecosistemi lagunari.

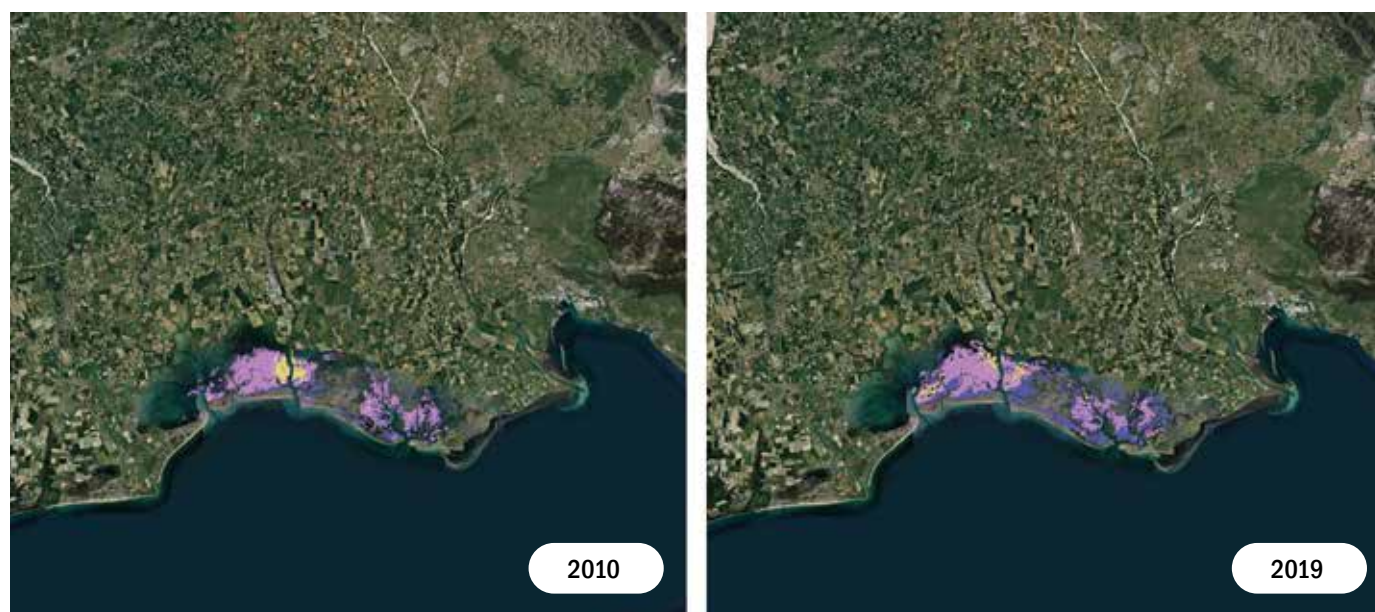
Paolo Cingano, Francesco Boscutti

Università degli Studi di Udine

Giovanni Bacaro

Università degli Studi di Trieste

MAPPE DI DISTRIBUZIONE DELLE TRE SPECIE PRINCIPALI NELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO ANNI 2010 E 2019



Cymodocea nodosa

Zostera marina

Nanozostera noltei

Tali mappe sono ricavate con le analisi di immagini satellitari, evidenziando un'espansione e uno spostamento delle comunità negli ultimi decenni. Le tre specie sono evidenziate con colori diversi. In basso a destra è riportata la legenda per la corrispondenza della specie.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA



A BORDO DEL PROGETTO BRIGANTINE: UN CONCENTRATO DI TECNOLOGIA PER UN MONITORAGGIO COSTIERO SOSTENIBILE

Il progetto di ricerca BRIGANTINE, coordinato dall'Università di Udine, sviluppa un catamarano autonomo equipaggiato con sensori chimico-fisici e camere multispettrali per il monitoraggio dell'Alto Adriatico.

Questa nuova tecnologia sostenibile può contribuire alla salvaguardia e alla conservazione della biodiversità delle aree costiere valutando lo stato di salute degli ecosistemi sommersi, come foreste algali e praterie di fanerogame marine, sempre più minacciati da attività umane e cambiamenti climatici.

Le aree costiere ospitano alcuni degli ecosistemi naturali più minacciati al mondo. Gli interventi antropici, l'inquinamento e i cambiamenti climatici, stanno modificando profondamente questi ambienti, riducendo i servizi ecologici che sono in grado di fornire.

Tra gli ecosistemi costieri più importanti troviamo le foreste algali e le praterie di fanerogame marine: essi forniscono cibo e rifugio a numerose specie, favoriscono il riciclo dei nutrienti e proteggono le coste dall'erosione.

Il progetto BRIGANTINE nasce dall'esigenza di monitorare lo stato di salute degli ecosistemi sommersi e, più in generale, favorire la conservazione e la tutela della biodiversità nel mare Adriatico. Si tratta di un progetto altamente multidisciplinare, che integra competenze di vari settori di ricerca quali l'ingegneria, l'informatica, la botanica e la chimica, per il raggiungimento di un obiettivo comune: sviluppare un drone galleggiante, che ci informi sullo stato di salute del nostro mare.

A BORDO DEL DRONE GALLEGGIANTE: PIÙ SENSORI PER DIVERSE MISURAZIONI

**MISURARE
TEMPERATURA,
SALINITÀ,
OSSIGENO DISCIOLTO
CONSENTE DI
STUDIARE GLI EFFETTI
DEI CAMBIAMENTI
CLIMATICI SUGLI
ECOSISTEMI
COSTIERI
E LAGUNARI**

A bordo del drone sono installati sensori che misurano parametri chimico-fisici dell'acqua, come temperatura, salinità, pH e ossigeno disciolto. Queste informazioni sono particolarmente utili anche per studiare gli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi costieri e lagunari.

L'aumento della temperatura dell'acqua, ad esempio, permette di individuare fenomeni come

le ondate di calore marine, sempre più frequenti e intense, che possono causare condizioni di stress per molte specie vegetali e animali.

Le variazioni di salinità possono invece fornire indicazioni sui processi di marinizzazione e sull'avanzamento del cuneo salino nelle aree costiere, fenomeni legati all'innalzamento del livello del mare e alla riduzione della disponibilità di acqua dolce.

Anche la concentrazione di ossigeno disciolto rappresenta un indicatore importante: temperature elevate e ristagno delle acque possono infatti ridurre l'ossigenazione, favorendo condizioni di ipossia che compromettono la salute degli habitat acquatici.



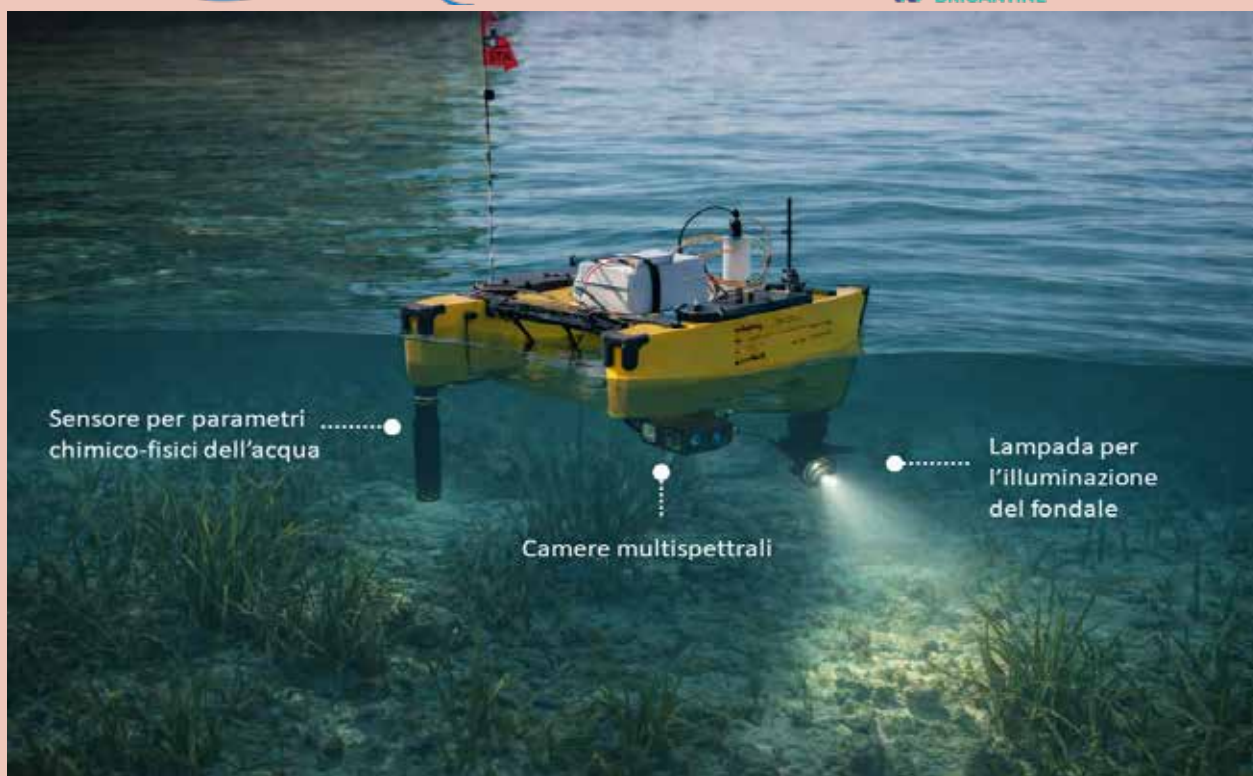
Interreg



Co-funded by
the European Union

Italy - Croatia

BRIGANTINE



IL PROGETTO BRIGANTINE

Avviato nell'estate 2024, il progetto coinvolge diverse istituzioni di ricerca di Italia e Croazia: l'Università di Udine in qualità di capofila, l'Università Politecnica delle Marche, il Consorzio CORILA per lo studio della laguna di Venezia, l'Istituto Ruđer Bošković di Rovigno e l'Università di Zagabria.

L'iniziativa è cofinanziata dall'Unione Europea attraverso il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) e il programma di cooperazione transfrontaliera Interreg Italia-Croazia.

Prototipo di drone galleggiante sviluppato durante il progetto BRIGANTINE. Le componenti principali del drone sono: **sensore** multi parametrico in grado di rilevare parametri chimico-fisici della colonna d'acqua, **camere multispettrali** per acquisire immagini del fondale a determinate lunghezze dello spettro elettromagnetico e **lampada** per illuminare il fondale e contrastare l'assorbimento dell'acqua di alcune lunghezze d'onda.

FOTOGRAFARE L'INVISIBILE CON LE CAMERE MULTISPETTRALI

Le camere multispettrali rappresentano la seconda componente innovativa dello strumento. Sono in grado di scattare immagini del fondale marino utilizzando diverse bande

**ANALIZZANDO LE
IMMAGINI OTTENUTE
IN DIVERSE BANDE
DI LUCE, TRAMITE
SPECIFICI INDICATORI,
SI VALUTA LO STATO
DI SALUTE DELLA
VEGETAZIONE
ACQUATICA**

dello spettro elettromagnetico, cioè “tipi” diversi di luce non sempre visibili all’occhio umano. Le immagini delle aree in cui crescono alghe o piante marine vengono poi analizzate attraverso specifici indicatori, chiamati indici vegetazionali. Si tratta di parametri che, combinando le informazioni provenienti dalle

diverse bande di luce, permettono di valutare lo stato di salute della vegetazione, ad esempio individuando segnali di stress o degrado.

La tecnologia multispettrale è utile per rilevare le variazioni biologiche causate dai cambiamenti climatici stessi. Lo stato di salute della pianta è strettamente connesso al mantenimento di processi basilari, tra i più importanti la fotosintesi. Proprio per questo le camere multispettrali risultano particolarmente efficaci:

la fotosintesi è infatti legata alla presenza di pigmenti come la clorofilla, che assorbe selettivamente alcune lunghezze d’onda della luce (in particolare nel blu e nel rosso) e riflette maggiormente il verde e parte del vicino infrarosso. Quando le fanerogame marine sono sottoposte a condizioni di stress ambientale,

come l’aumento della temperatura delle acque, l’acidificazione degli oceani, la maggiore torbidità dovuta a eventi meteorologici estremi o ancora scarsità di ossigeno, la loro capacità fotosintetica tende a ridursi. Questo si traduce in una variazione misurabile nei segnali spettrali registrati dalle camere, che può essere interpretata attraverso indici legati alla “biomassa verde” e al contenuto di clorofilla. In questo modo è possibile non solo mappare la distribuzione delle praterie sommerse, ma anche monitorarne nel tempo la vitalità e intercettare precocemente segnali di regressione legati ai cambiamenti climatici.

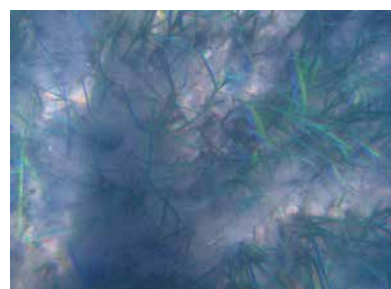
**LA TECNOLOGIA
MULTISPETTRALE
MONITORA
LA CAPACITÀ
FOTOSINTETICA DELLE
PIANTE, CHE CALA
PER GLI STRESS
AMBIENTALI COLLEGATI
AI CAMBIAMENTI
CLIMATICI**

PROCESSO DI ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI ACQUISITE DALLE CAMERE MULTISPETTRALI

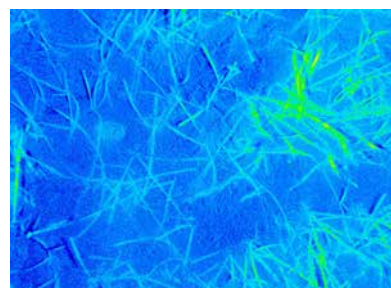
IMMAGINE MULTISPETTRALE



IMMAGINE A COLORI REALI



INDICE VEGETAZIONALE



Le immagini scattate a lunghezza d’onde specifiche dello spettro elettromagnetico possono essere utilizzate per comporre un’immagine a colori reali, così come le vedrebbe il nostro occhio umano, oppure possono essere selezionate e combinate per il calcolo di un indice vegetazionale. La scala di valori dell’indice fornisce un’indicazione sullo stato di salute della pianta.



UN SISTEMA DI MONITORAGGIO NON INVASIVO, IN FASE DI “COLLAUDO”

In ambienti in cui gli effetti dei cambiamenti climatici si sommano alle diverse pressioni che le attività umane esercitano sull'ambiente, ridurre gli impatti, seppur limitati, delle tecniche di monitoraggio rappresenta un'azione virtuosa e innovativa. Lo sviluppo di questo nuovo metodo di monitoraggio degli ecosistemi sommersi potrebbe, in futuro, ridurre il ricorso a tecniche tradizionali invasive, basate sulla raccolta di campioni e su lunghe analisi di laboratorio. In questa fase iniziale, però, questi metodi restano fondamentali per verificare l'affidabilità della nuova tecnologia.

Nell'estate 2025 sono stati raccolti campioni di *Cymodocea nodosa* in tre aree dell'Alto Adriatico: la laguna di Grado e Marano, la laguna di Šćuza

in Croazia e la riviera del Conero nelle Marche. I risultati ottenuti in laboratorio verranno confrontati con quelli derivati dall'analisi delle immagini multispettrali per valutare la precisione del nuovo sistema di monitoraggio.

UN PROGETTO CON DIVERSI OBIETTIVI

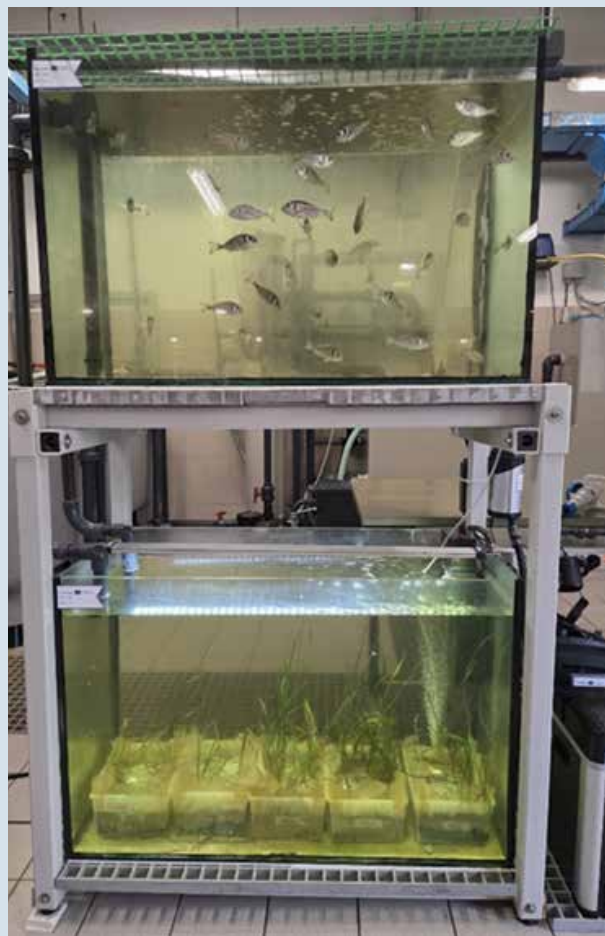
Oltre allo sviluppo di uno strumento utile a semplificare le attività di controllo ambientale da parte degli enti locali, il progetto si propone anche altri obiettivi: realizzare mappe dettagliate della distribuzione delle piante marine e delle foreste algali nell'Alto Adriatico tramite tecniche di tele-rilevamento e studiare l'impatto delle attività di acquacoltura su questi ecosistemi.

**Azzurra Di Bonaventura, Paolo Cingano, Sabina Susmel,
Francesco Trevisan, Ivan Scagnetto, Francesco Boscutti**
Università degli studi di Udine

SIMULARE IL MARE: EFFETTI DELL'ACQUACOLTURA SUGLI ECOSISTEMI SOMMERSI

L'acquacoltura è oggi considerata una strategia promettente per soddisfare la crescente domanda globale di proteine animali. Tuttavia, è spesso associata a criticità ambientali, legate in particolare al rilascio di rifiuti organici, mangimi non consumati e prodotti del metabolismo negli ecosistemi costieri circostanti. Questi apporti possono alterare la composizione dei sedimenti, la dinamica dei nutrienti e la struttura delle comunità bentoniche, con possibili effetti su habitat sensibili come le praterie di fanerogame marine, che già risentono degli effetti dei cambiamenti climatici.

Per comprendere meglio questi processi è stato realizzato un esperimento in “mesocosmo”, cioè in un sistema controllato che simula condizioni naturali. Il sistema, composto da vasche tra loro collegate, ha permesso di riprodurre in modo semplificato ciò che avviene sotto gli impianti di acquacoltura. L'obiettivo è capire se i reflui organici e gli scarti di mangime prodotti dagli allevamenti possano influenzare le comunità vegetali che vivono sui fondali. Allo stesso tempo, lo studio ha indagato se la tipologia di mangime somministrato ai pesci possa determinare effetti diversi sulla salute di questi ecosistemi sommersi.



Parte del sistema sperimentale allestito nell' Azienda agraria "A. Servadei" presso Pagnacco (Udine). La vasca superiore è occupata da esemplari di *Spaurus aurata*, mentre nella vasca sottostante è disposta una specie di fanerogama marina, *Cymodocea nodosa*. Il ricircolo dell'acqua tra le due vasche consente l'indirizzamento dei reflui organici dei pesci verso le piante.

SPECIALE
LE COSTE
E LA LAGUNA





BLUE CARBON: IL RUOLO NASCOSTO DEGLI ECOSISTEMI MARINI NELLA LOTTA AL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Dalle praterie di fanerogame marine del Mediterraneo alle lagune del Nord Adriatico, gli ecosistemi costieri giocano un ruolo cruciale nel sequestro del carbonio: un servizio naturale ancora poco valorizzato, ma fondamentale nella lotta al cambiamento climatico.

Praterie di fanerogame marine e foreste macroalgali ne subiscono però gli effetti, sommati a quelli di altre pressioni antropiche.

Conservare e ripristinare gli ecosistemi costieri è cruciale per tutelarne la biodiversità e la loro funzione di serbatoi di carbonio.

L'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera rappresenta uno dei principali problemi ambientali del nostro tempo, poiché contribuisce in modo determinante al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici. Le emissioni derivanti da attività umane – come l'uso di combustibili fossili, la deforestazione e alcuni processi industriali – hanno alterato l'equilibrio preindustriale del ciclo del carbonio. Oltre a ridurre le emissioni, è quindi particolarmente importante comprendere i processi attraverso i quali l'anidride carbonica viene rimossa dall'atmosfera e immagazzinata a lungo termine in serbatoi naturali, al fine di preservarne la funzionalità e la capacità di regolazione climatica.

MARI, OCEANI E IL SEQUESTRO DI CARBONIO

Il sequestro del carbonio può avvenire in diversi modi: nelle foreste terrestri, nei suoli agricoli, attraverso tecnologie industriali di cattura e stoccaggio (*Carbon Capture and Storage*, CCS), le quali presentano tuttavia importanti limitazioni e incertezze, oppure negli ecosistemi marini e costieri. In quest'ultimo contesto si inserisce il concetto di *blue carbon* (carbonio blu), che indica il carbonio catturato e immagazzinato dagli ecosistemi costieri e marini vegetati, come mangrovie, praterie di fanerogame marine (ad esempio *Posidonia oceanica*) e paludi salmastre.

IL BLUE CARBON È IL CARBONIO CATTURATO E IMMAGAZZINATO DAGLI ECOSISTEMI COSTIERI E MARINI VEGETATI, COME MANGROVIE, PRATERIE DI FANEROGAME MARINE E PALUDI SALMASTRE

GLI ECOSISTEMI MARINI E COSTIERI HANNO UNA CAPACITÀ DI SEQUESTRO ESTREMAMENTE ELEVATA PER UNITÀ DI AREA

Il *blue carbon* è particolarmente importante perché questi ecosistemi, pur occupando una superficie relativamente limitata a livello globale, hanno una capacità di sequestro estremamente elevata per unità di area.

Le praterie marine e le mangrovie, ad esempio, grazie ai loro sistemi radicali ben sviluppati, intrappolano e stabilizzano carbonio e materia organica nei sedimenti per tempi molto lunghi, fino a scale tem-

porali millenarie, risultando in alcuni casi più efficienti - a parità di area considerata - persino delle foreste terrestri.

Anche le macroalghe partecipano a questo processo, sebbene il loro contributo sia più incerto, perché non possiedono veri apparati radicali (ma strutture di ancoraggio) e l'efficacia del sequestro dipende dal destino della biomassa prodotta; il carbonio può essere sequestrato solo se i frammenti algali vengono esportati e successivamente intrappolati in sedimenti costieri o trasferiti verso ambienti profondi.

PRATERIE MARINE E MANGROVIE INTRAPPOLANO IL CARBONIO NEI SEDIMENTI PER TEMPI MOLTO LUNGI. LE MACROALGHE CONTRIBUISCONO, MA IN MODO PIÙ INCERTO

IL VALORE DEL BLUE CARBON

QUESTO SERVIZIO ECOSISTEMICO PUÒ VALERE GLOBALMENTE DIVERSI MILIARDI DI EURO ALL'ANNO, SENZA CONTARE GLI ULTERIORI BENEFICI

Dal punto di vista economico, il valore del *blue carbon* è oggetto di crescente attenzione. Se si considera un prezzo del carbonio compreso tra 30 e 100 euro per tonnellata di CO₂, il servizio ecosistemico fornito da questi ambienti può valere diversi miliardi di euro all'anno a livello globale. Inoltre, la conservazione e

il ripristino degli ecosistemi costieri comportano benefici aggiuntivi, come la protezione delle coste dall'erosione, il sostegno alla biodiversità e la tutela delle attività di pesca.

STIMARE IL CARBONIO SEQUESTRATO DAGLI ECOSISTEMI MARINI E COSTIERI

Effettuare delle stime quantitative dell'importanza di questi processi di sequestro del carbonio da parte degli ecosistemi marini e costieri a livello globale comporta inevitabili incertezze, poiché richiede l'estrapolazione di misurazioni effettuate in contesti locali e su scale spaziali e temporali limitate: le stime possono quindi variare anche significativamente. Gli studi esistenti indicano che gli ecosistemi coinvolti nel *blue carbon* contribuiscono a sequestrare ogni anno circa 0,2

e 0,4 gigatonnellate di carbonio (GtC), una quota quindi non trascurabile rispetto alle emissioni globali, attualmente stimate in circa 9-10 GtC/anno dall'IPCC nel suo Sesto Rapporto di Valutazione del 2021.

A titolo di confronto, gli stessi studi stimavano per le foreste terrestri un assorbimento globale annuo dello stesso ordine di grandezza; tuttavia valutazioni più recenti indicano che gli ecosistemi terrestri assorbono complessivamente circa 3 GtC (IPCC, 2021), mentre le stime relative al *blue carbon* rimangono ancora soggette a maggiore incertezza e non sono state aggiornate con la stessa risoluzione.

ANCHE IL PLANCTON CONTRIBUISCE

GLI OCEANI
ASSORBONO
CIRCA IL
30% DELLE
EMISSIONI
GLOBALI DI
CO₂

Alcuni ricercatori sostengono che anche il plancton debba essere considerato nel quadro del sequestro del carbonio marino. Attraverso la fotosintesi, il fitoplancton assorbe CO₂ e contribuisce alla cosiddetta “pompa biologica del carbonio”, un processo che trasferisce il carbonio dalla superficie oceanica alle profondità. Una parte di questo carbonio può essere immagazzinata negli oceani profondi

per tempi molto lunghi, ma questo processo è più difficile da quantificare.

► Vedi l'approfondimento nel box **IL PLANCTON E LE “POMPE DI CARBONIO”**

Secondo il *Global Carbon Budget 2025*, l'assorbimento di carbonio da parte degli oceani negli ultimi 10 anni (2015–2024) è stato in media di $3,2 \pm 0,4$ GtC anno⁻¹ (giga tonnellate all'anno), pari a circa il 30% delle emissioni antropogeniche globali di CO₂. Secondo lo stesso studio, nel 2024 l'assorbimento è stato di $3,4 \pm 0,4$ GtC/ anno.

IL PLANCTON E LE “POMPE DI CARBONIO”

Negli oceani, lo scambio di CO₂ tra atmosfera e mare è regolato da un equilibrio dinamico: l'anidride carbonica atmosferica si dissolve nello strato superficiale dell'acqua fino a raggiungere una condizione di saturazione, nelle quali il flusso netto fra aria e acqua tende a ridursi o annullarsi.

Questo equilibrio, tuttavia, può essere continuamente alterato. Infatti, se intervengono processi fisici o biologici che trasferiscono parte della CO₂ disciolta dagli strati superficiali verso le acque profonde, la superficie oceanica torna a essere “sottosatura” rispetto all'atmosfera. In altre parole, può assorbire nuova CO₂. Viceversa, quando le acque superficiali sono troppo ricche di CO₂ rispetto alla saturazione si determina la situazione opposta e un rilascio di carbonio dal mare all'atmosfera.

Per questo motivo, i processi che trasferiscono carbonio dalla superficie verso il fondo della colonna d'acqua sono doppiamente importanti: da un lato rimuovono la CO₂ dal contatto diretto con l'atmosfera, impedendone la riemissione; dall'altro permettono all'oceano di continuare ad assorbire nuova CO₂ atmosferica. Si stima che questo servizio ecosistemico svolto dall'oceano contribuisca in modo sostanziale alla regolazione del clima globale, attenuando il tasso di accumulo di CO₂ in atmosfera e, di conseguenza, il riscaldamento climatico.

Questi meccanismi di trasferimento verticale sono spesso indicati come “pompe di carbonio” e possono essere di natura diversa. La

cosiddetta **pompa fisica** è legata ai movimenti verticali delle masse d'acqua, come la circolazione termoalina, il rimescolamento e i fenomeni di *downwelling*, che trasportano il carbonio disciolto verso gli strati profondi.

Accanto a questa, un ruolo cruciale è svolto dalla **pompa biologica**, mediata dal plancton. Il fitoplancton, attraverso la fotosintesi, assorbe la CO₂ disciolta in acqua trasformandola in materia organica. Quando gli organismi muoiono, parte di questa materia organica si aggrega in particelle che sedimentano verso il fondo, dove il carbonio può rimanere isolato dall'atmosfera per tempi molto lunghi, da decenni a secoli o più.

La lunghezza di questi tempi dipende dalla profondità raggiunta dal trasferimento verticale del particolato organico, ma anche dalle correnti laterali nelle quali esso viene a trovarsi, e che possono portarlo ancora più in profondità - come avviene nell'Adriatico con le correnti che seguono la piattaforma continentale adriatica- o anche di nuovo verso l'alto. Essa dipende inoltre dalla velocità con la quale il particolato si decompone, rilasciando carbonio alla fase disciolta, e dal successivo trasporto di tale carbonio disciolto con le correnti marine.

A livello globale, la pompa biologica del carbonio è un processo di enorme rilevanza. Si è stimato che il fitoplancton oceanico fissi ogni anno attraverso la fotosintesi una quantità paragonabile a quella della vegetazione terrestre e anche se soltanto una frazione di questo carbonio viene effettivamente esportata in profondità tali da poter essere considerata sequestrata su tempi lunghi, il contributo del plancton risulta fondamentale.



Foto di Benjamin L. Jones su Unsplash

IL BLUE CARBON NEL MEDITERRANEO

Nel contesto mediterraneo, il tema del *blue carbon* assume caratteristiche specifiche. Il Mar Mediterraneo non ospita mangrovie, ma è ricco di praterie di fanerogame marine (tra cui *Posidonia oceanica* e *Cymodocea nodosa*) e di foreste di macroalghe del complesso *Cystoseira sensu lato* (s.l.) che svolgono un ruolo cruciale nel sequestro del carbonio. Questi ecosistemi coprono vaste aree dei fondali costieri e sono in grado di immagazzinare grandi quantità di carbonio sia nella biomassa vivente sia nei sedimenti associati.

Diversi progetti di ricerca e iniziative di monitoraggio stanno cercando di quantificare il contributo delle praterie di fanerogame al bilancio del carbonio e di integrarle nelle politiche climatiche e di conservazione. In questo contesto, *Posidonia oceanica* rappresenta uno degli esempi più rilevanti nel Mediterraneo: la fissazione totale media del carbonio, considerando foglie, guaine e rizomi, varia da 33,5 a 426,6 g C m⁻² anno⁻¹ (grammi di carbonio per metro quadrato all'anno), mentre il sequestro medio di carbonio a lungo termine all'interno della matte varia da 7,7 a 84,4 g C m⁻² anno⁻¹.

IL BLUE CARBON NEL NORD ADRIATICO

Nel contesto del Nord Adriatico, e in particolare lungo le coste del Friuli Venezia Giulia, gli ecosistemi che contribuiscono al *blue carbon* sono rappresentati principalmente da fanerogame marine, da macroalghe bentoniche e ambienti lagunari vegetati. Tra le macroalghe è presente *Fucus virsoides*, relitto glaciale endemico dell'Adriatico, e alcune specie di *Cystoseira* s.l. Tra le fanerogame presenti nella laguna di Grado e Marano e nelle aree costiere del Golfo, troviamo *Cymodocea nodosa*, la specie più abbondante in mare, *Zostera marina* e *Nanozostera noltei*.

In alcune aree più meridionali dell'Adriatico è presente anche *Posidonia oceanica*, che nel Nord Adriatico è limitata a piccole aree al largo di Grado, protette da un sito Natura 2000, e tra Isola e Capodistria, rappresentando il limite settentrionale distribuzione della specie.

Le evidenze disponibili indicano un progressivo deterioramento dello stato di conservazione di questi habitat nel Nord Adriatico.

**LUNGO LE
COSTE DEL FVG
CONTRIBUISCONO
AL BLUE CARBON
SOPRATTUTTO
FANEROGAME
MARINE,
MACROALGHE
BENTONICHE
E AMBIENTI
LAGUNARI
VEGETATI**

**PRESENZA DI ECOSISTEMI *BLUE CARBON* IN
LAGUNA DI GRADO E MARANO E NELLE ACQUE
COSTIERE DEL FRIULI VENEZIA GIULIA E SLOVENE**



- *Cymodocea nodosa*
- *Posidonia oceanica*
- *Zostera noltei*
- *Zostera marina*
- ▲ *Fucus virsoides*

Fonti:

Curiel et al., 2021, Ivajnšič et al., 2022, Cingano et al., 2024, Descourvières et al., 2024, Gianni et al., 2025.

IL DECLINO DELLE “FORESTE SOMMERSE” DI MACROALGHE

LE MACROALGHE CHE FORMANO FORESTE SOMMERSE STANNO REGREDENDO A CAUSA DELLE PRESSIONI ANTROPICHE AGGRAVATE DAL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Nel Golfo di Trieste, in particolare, è stato documentato un forte declino delle macroalghe che formano foreste sommerse. *Fucus virsoides* è considerato estinto a livello locale lungo la costa slovena, mentre in Italia sopravvive solo con popolazioni residue a Marina Julia (Monfalcone). Parallelamente *Gongolaria barbata* e *Cystoseira barbata* risultano oggi frammentate e fortemente ridotte. Tale

regressione è attribuibile a una combinazione di

pressioni antropiche locali come l'urbanizzazione costiera e l'inquinamento, aggravate dal cambiamento climatico. L'aumento delle temperature marine può alterare la fenologia riproduttiva delle specie, ridurre la sopravvivenza degli stadi embrionali e compromettere il successo del reclutamento. Inoltre, condizioni di oligotrofia, in particolare carenze di fosforo, possono limitare ulteriormente la crescita e resilienza di queste specie. Un ulteriore fattore di pressione è rappresentato dal pascolo intenso da parte di erbivori, in particolare di *SARPA salpa* (la salpa), che può ostacolare il recupero delle popolazioni.

L'AUMENTO DELLE TEMPERATURE MARINE PUÒ ALTERARE I TEMPI E IL SUCCESSO DELLA RIPRODUZIONE DELLE SPECIE



FANEROGAME MARINE IN SOFFERENZA

Anche le fanerogame marine hanno mostrato segnali di forte sofferenza nelle acque costiere del Nord Adriatico, in particolare tra il 2014 e il 2018, secondo uno studio condotto da OGS, Università di Trieste, AMP di Miramare, Istituto Nazionale di Biologia di Slovenia e Università di Maribor. *Cymodocea nodosa*, la specie dominante, è ancora abbondante lungo le coste settentrionali del Golfo, ma ha subito riduzioni fino all'90% nell'area di Trieste e del 30% lungo la costa slovena. *Zostera marina* è stata recentemente osservata esclusivamente nella baia di Panzano, mentre *Nanozostera noltei* è presente tra il Canale Primero e la stessa baia, nella zona intertidale, con distribuzione frammentata presso Villaggio del Pescatore, a Miramare, la baia di San Bartolomeo (Muggia) e nei pressi di Capodistria.

Tale regressione è attribuibile a una combinazione di pressioni locali e driver globali, tra cui l'inquinamento, l'urbanizzazione costiera e le alterazioni dei carichi di nutrienti, oltre all'aumento della temperatura dell'acqua. Questi fattori agiscono sinergicamente, riducendo la trasparenza della colonna d'acqua e limitando la disponibilità di luce, elemento chiave per la fotosintesi delle fanerogame marine. Le fanerogame marine sono infatti particolarmente sensibili al degrado ambientale e possono ridursi rapidamente in risposta a cambiamenti nelle condizioni chimico-fisiche delle acque. Non va inoltre trascurato l'impatto degli ancoraggi delle imbarcazioni, anche da diporto, che possono causare danni diretti alle praterie attraverso l'eradicazione dei rizomi e la frammentazione degli habitat.

**LA PRESENZA DI
VARIE SPECIE SI È
RIDOTTA PER UNA
COMBINAZIONE DI
FATTORI TRA CUI
INQUINAMENTO,
URBANIZZAZIONE
COSTIERA E
AUMENTO DELLA
TEMPERATURA
DELL'ACQUA**

**LE FANEROGAME
MARINE SONO
PARTICOLARMENTE
SENSIBILI AL
DEGRADO
AMBIENTALE.**

**ANCHE GLI
ANCORAGGI DELLE
IMBARCAZIONI
POSSONO CAUSARE
DANNI DIRETTI ALLE
PRATERIE.**

QUALE FUTURO ?

Guardando al futuro, è prevedibile che questi ecosistemi siano soggetti a ulteriori cambiamenti sia nel breve sia nel medio-lungo termine, in risposta alle diverse pressioni ambientali. L'aumento della temperatura dell'acqua rappresenta uno dei principali driver di cambiamento ed è stato identificato come fattore chiave nella regressione delle praterie di fanerogame sia a scala di Mediterraneo

sia a scala locale. Anche le foreste macroalgali risultano altamente sensibili al riscaldamento marino, con effetti diretti sulla ecofisiologia degli organismi e indiretti sugli equilibri ecologici delle comunità. Inoltre, fenomeni come l'innalzamento del livello del mare, l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi e la diffusione di specie aliene possono alterare ulteriormente la distribuzione e la composizione delle comunità bentoniche. Questi fattori, agendo in modo sinergico, possono determinare cambiamenti di stato (*regime shifts*) e perdita di habitat strutturati complessi.

Nel lungo periodo, la frammentazione degli habitat e la conseguente perdita di connettività potrebbero ridurre la biodiversità e la resilienza complessiva del sistema. In questo contesto, la conservazione e il ripristino degli ecosistemi costieri del Friuli Venezia Giulia rappresentano una sfida cruciale, non solo per la tutela della biodiversità, ma anche per il mantenimento della loro funzione come serbatoi di carbonio.

**LA FRAMMENTAZIONE
DEGLI HABITAT
E LA PERDITA DI
CONNETTIVITÀ
POTREBBERO RIDURRE
LA BIODIVERSITÀ
E LA RESILIENZA
COMPLESSIVA DEL
SISTEMA**

RIPRISTINARE GLI ECOSISTEMI COSTIERI CON IL “RESTAURO ECOLOGICO”

**CONSERVARE E
RIPRISTINARE
GLI ECOSISTEMI
COSTIERI DEL
FVG È CRUCIALE
PER TUTELARE LA
BIODIVERSITÀ E LA
LORO FUNZIONE
DI SERBATOI DI
CARBONIO**

Un aspetto cruciale riguarda le strategie di restauro ecologico, che mirano a recuperare praterie di fanerogame e foreste macroalgali degradate o scomparse. Nel caso delle fanerogame marine, il ripristino può avvenire tramite il trapianto di talee o zolle di piante in aree idonee, la riduzione delle pressioni antropiche e il miglioramento della qualità delle acque.

Per le macroalghe, gli approcci più efficaci si basano sulla coltivazione di plantule in condizioni controllate e il successivo trapianto in mare. Queste tecniche, spesso basate su sistemi di nursery e su supporti artificiali, consentono di aumentare la sopravvivenza nelle fasi più vulnerabili del ciclo vitale.

Questi interventi, sebbene in alcuni casi complessi e costosi, possono contribuire a ristabilire nel tempo la capacità di sequestro del carbonio degli ecosistemi, oltre a favorire il recupero della complessità tridimensionale degli habitat marini, elemento fondamentale per la resilienza degli ecosistemi.

**CON IL TRAPIANTO
DI TALEE O ZOLLE
DI FANEROGAME
E DI PLANTULE
COLTIVATE DI
MACROALGHE
SI POSSONO
RECUPERARE
PRATERIE
E FORESTE
SOMMERSE
DEGRADATE**

**Cosimo Solidoro, Damiano Baldan, Vinko Bandelj, Donata Canu,
Fabrizio Gianni, Serena Zunino**
Istituto Nazionale di Oceanografia e di geofisica
Sperimentale OGS

Annalisa Falace
Istituto Nazionale di Oceanografia e di geofisica
Sperimentale OGS e Università degli Studi di Trieste



I PROGETTI SPERIMENTALI DI RESTAURO ECOLOGICO PER PRATERIE E FORESTE MARINE

In Mediterraneo sono stati avviati diversi progetti sperimentali di restauro di fanerogame o *Cystoseira* s.l. con risultati variabili ma promettenti, soprattutto quando gli interventi sono accompagnati da misure di tutela a lungo termine. Anche nel Golfo di Trieste sono stati effettuati trapianti di *Cymodocea nodosa* usando zolle, con tassi di successo compresi tra l'80-95%, nonché tramite l'impiego di talee. Il progetto Replant, promosso da Marevivo con l'Università di Trieste ha portato al trapiantato di circa 2000 talee su una superficie di 100 m². Si inseriscono in questo contesto anche le attività del progetto BiopressAdria, finalizzate alla protezione delle fanerogame nelle spiagge di Monfalcone e Staranzano.

Per contrastare la regressione delle macroalghe, nell'ambito del progetto ROC-POP Life dell'Università di Trieste in Slovenia e nell'Area Marina di Miramare sono stati sviluppati interventi di ripristino di *Gongolaria barbata*. La tecnica prevede la raccolta di apici fertili, la coltivazione di embrioni in mesocosmi e il loro successivo trapianto in mare. Il successo del trapianto varia in funzione delle condizioni ambientali, ma nei casi più favorevoli i talli hanno sviluppato strutture fertili entro un anno, indicando il potenziale sviluppo di popolazioni stabili e in grado di sostenere il reclutamento naturale. In modo analogo, tentativi di reintroduzione di *Fucus virsoides* lungo la costa istriana, basati su protocolli analoghi, hanno evidenziato un'elevata capacità di adattamento e una rapida crescita in condizioni naturali. Gli individui hanno raggiunto la fertilità in soli nove mesi. In questi contesti, l'impiego di gabbie anti-pascolo è determinante per garantire il successo del restauro, limitando l'impatto degli erbivori.

Questi interventi, sebbene in alcuni casi complessi e costosi, possono contribuire a ristabilire nel tempo la capacità di sequestro del carbonio degli ecosistemi, oltre a favorire il recupero della complessità tridimensionale degli habitat marini, elemento fondamentale per la resilienza degli ecosistemi.

Segnali dal clima in FVG 2026 e le precedenti edizioni sono disponibili online su

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



Un ringraziamento a tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione dei “Segnali dal Clima in FVG”, sia con i loro testi, dati e immagini, sia con le loro riflessioni, osservazioni e disponibilità a condividere idee e conoscenze.

