

Marmolada Glacier Melting Analysis

Geographical Information Systems - AA 2023/24

Mazza Dario

d.mazza6@studenti.unisa.it

Università degli Studi di Salerno
Fisciano (SA), Campania, Italy,

Morelli Luca

l.morelli6@studenti.unisa.it

Università degli Studi di Salerno
Fisciano (SA), Campania, Italy

Sommario—Analizzando le tendenze climatiche e ambientali che influenzano il ghiacciaio della Marmolada, questo report indaga la correlazione tra la riduzione delle emissioni di CO₂ italiane e l'aumento delle temperature regionali nell'arco di 35 anni. Nonostante un calo delle emissioni nazionali, si è osservato un incremento termico e una diminuzione della massa glaciale, evidenziando l'effetto ritardato del riscaldamento globale e l'importanza delle dinamiche climatiche globali sui fenomeni locali. Il lavoro enfatizza la necessità di un approccio integrato e multiscalare nella risposta al cambiamento climatico.

I. INTRODUZIONE

Il cambiamento climatico rappresenta una delle più pressanti sfide ambientali del nostro tempo, con effetti percepibili su scala globale che influenzano gli ecosistemi, le economie, e le società. Tra i segnali più evidenti di questo fenomeno, lo scioglimento dei ghiacciai occupa una posizione di rilievo, offrendo una testimonianza visiva e misurabile delle variazioni climatiche in atto. In particolare, il ghiacciaio della Marmolada, situato nelle Dolomiti italiane, emerge come un caso di studio significativo, come riportato da Santin *et al.* [6], essendo il più grande ghiacciaio delle Alpi orientali e un indicatore sensibile delle dinamiche climatiche regionali.

Per semplicità di analisi e limitando il problema ai ghiacciai è, inoltre, emerso come il riscaldamento globale possa auto alimentarsi: a causa del riscaldamento globale, il permafrost artico si sta inevitabilmente scongelando, rilasciando, al contempo, sia diossido di carbonio che metano, un gas serra circa 30 volte più potente della CO₂ su un periodo di 100 anni. Questo ciclo di auto-amplificazione accelera ulteriormente il riscaldamento globale, come riportato da Lenton *et al.* [3], dimostrando come gli effetti del cambiamento climatico siano interconnessi e globali, piuttosto che isolati.

Questo studio si propone di analizzare l'evoluzione dello scioglimento del ghiacciaio della Marmolada nell'arco temporale compreso tra il 1985 e il 2020, utilizzando tecniche avanzate di Geographical Information Systems (GIS) e remote sensing. Attraverso l'impiego di immagini satellitari acquisite dai satelliti Landsat 5, 7, ed 8 e al contempo l'analisi dell'indice di neve (NDSI), questo lavoro mira a quantificare le variazioni della copertura nevosa e glaciale nel tempo. Complementare a questa analisi, lo studio esamina anche le variazioni delle temperature medie annuali e della somma delle precipitazioni annuali, utilizzando il dataset ERA5¹.

per correlare le tendenze di scioglimento con i cambiamenti climatici osservati nella regione.

Le prospettive sul riscaldamento globale sono pessimistiche, suggerendo che il periodo per attuare azioni preventive si stia rapidamente avvicinando allo zero. Nel frattempo, le azioni correttive e reattive necessarie per raggiungere emissioni nette pari a zero potrebbero richiedere almeno 30 anni, come riportato da Rogelj *et al.* [5]. Queste prospettive sottolineano l'urgenza di comprendere e agire contro il cambiamento climatico, evidenziando la necessità di studi approfonditi, come il presente, per informare le politiche e le pratiche di mitigazione, come riportato da Zemp *et al.* [8].

II. MATERIALI E METODI

A. Selezione dell'area di interesse

La scelta dell'area di interesse per il presente studio è ricaduta sulla Marmolada, un ghiacciaio di rilevanza sia nazionale che mondiale. Questa particolare località è stata selezionata per diverse ragioni, non ultima la disponibilità di un'ampia quantità di dati storici. Infatti, il ghiacciaio della Marmolada è oggetto di studi e rilevamenti che risalgono fino al diciannovesimo secolo, offrendo una preziosa cronologia delle sue variazioni nel tempo. Nonostante la ricchezza di questo archivio storico, un così lungo registro di misurazioni si è rivelato insufficiente a delineare un quadro dettagliato dell'effettiva evoluzione del ghiacciaio nel corso degli anni. Questa limitazione sottolinea la necessità di integrare i dati storici con tecniche di analisi moderna, come quelle fornite dai sistemi di informazione geografica (GIS) e dal remote sensing.

In aggiunta, la Marmolada ha guadagnato attenzione a livello internazionale non solo per il suo significato ambientale e climatico ma anche per la sua unica conformazione geografica. Situato su rocce carbonatiche permeabili, note come Calcare della Marmolada, il ghiacciaio presenta una morfologia carsica² che, come evidenziato da Santin *et al.* [6], potrebbe aver influenzato la sua frammentazione nel periodo 2004-2014 e, più in generale, negli ultimi decenni. Tale caratteristica geologica, unita alla sua storia di eventi significativi come la valanga del 2022, rende la Marmolada un sito di particolare interesse per studiare l'impatto dei cambiamenti climatici

¹Link al dataset ERA5
²La morfologia carsica si riferisce a paesaggi formati dalla dissoluzione di strati rocciosi solubili, come il calcare, caratterizzati da fenomeni come grotte, doline e fiumi sotterranei.

sui ghiacciai e le loro risposte dinamiche alle variazioni ambientali.

Tuttavia, l'effetto della morfologia carsica sulla dinamica del ghiacciaio e la sua risposta complessiva ai cambiamenti climatici rimane in gran parte un'ipotesi, con la piena comprensione dell'influenza geologica che richiede ulteriori indagini. Questa incertezza sottolinea l'importanza del presente studio, che mira a utilizzare tecniche avanzate di analisi per fornire nuove intuizioni sull'evoluzione del ghiacciaio della Marmolada e sulle interazioni tra la sua struttura geologica e il clima in cambiamento.

B. Descrizione degli Strumenti e delle Piattaforme di Analisi

1) Google Earth Engine: Google Earth Engine è una piattaforma di analisi geospaziale cloud-based che consente a ricercatori, scienziati, e sviluppatori di eseguire analisi di dati geospaziali su vasta scala. Questa piattaforma fornisce accesso a una vasta raccolta di dati satellitari e geospaziali, rendendola uno strumento prezioso per il monitoraggio, la misurazione e l'analisi dei cambiamenti ambientali sulla superficie terrestre utilizzando dati storici ed in tempo reale. Nel contesto di questo studio, Google Earth Engine è stato impiegato per accedere e analizzare le serie temporali delle immagini satellitari dei satelliti Landsat 5, 7, e 8, con l'obiettivo di calcolare l'Indice di Neve (NDSI) e monitorare l'evoluzione del ghiacciaio della Marmolada. In aggiunta all'analisi delle immagini, la piattaforma è stata utilizzata anche per estrarre dati cruciali sulle temperature medie annue e la somma delle precipitazioni annue per l'area di interesse utilizzando il dataset ERA5. Questa funzionalità ha permesso di correlare le variazioni fisiche osservate nel ghiacciaio con i dati climatici pertinenti, offrendo una comprensione più profonda delle forze che influenzano lo scioglimento dei ghiacciai. La capacità di Google Earth Engine di elaborare rapidamente grandi volumi di dati e generare mappe tematiche ha reso possibile una valutazione dettagliata e accurata delle condizioni climatiche e delle loro variazioni nel tempo.

2) QGIS: QGIS è un Sistema Informativo Geografico (GIS) open source che offre vasta gamma di funzionalità per la visualizzazione, l'elaborazione, e l'analisi di dati geospaziali. Supportando diversi formati di dati, QGIS fornisce strumenti avanzati per l'analisi spaziale, la creazione di mappe, e la gestione di database geospaziali. Per questo studio, QGIS è stato impiegato per integrare e analizzare i dati ottenuti da Google Earth Engine e altre fonti. È stato utilizzato per importare il Modello Digitale di Elevazione (DEM) della zona di interesse, calcolare le curve di livello, creare layer di ombreggiatura per evidenziare le caratteristiche topografiche del ghiacciaio, e sviluppare rappresentazioni 3D dell'area di interesse (Figura 5). QGIS ha inoltre facilitato la creazione di animazioni temporali che illustrano la regressione del ghiacciaio dal 1985 al 2020, fornendo una visualizzazione dinamica e intuitiva delle variazioni spaziali e temporali.

C. Analisi dei Dati Satellitari

L'analisi dei dati satellitari ha rappresentato una componente cruciale di questo studio, mirando a monitorare l'evoluzione temporale del ghiacciaio della Marmolada e ad analizzare l'impatto del cambiamento climatico su questo importante ecosistema. L'approccio adottato ha sfruttato l'utilizzo sequenziale di immagini acquisite da diversi satelliti Landsat, selezionati per la loro copertura temporale estesa e la qualità dei dati forniti.

1) Selezione dei Satelliti e Estrazione dei Dati: Per il periodo che va dal 1985 al 2010, si è fatto affidamento sul satellite Landsat 5, la cui lunga durata operativa ha permesso di acquisire una serie storica di immagini dell'area di studio. Le immagini Landsat 5 sono state fondamentali per analizzare le variazioni del ghiacciaio in questo arco temporale, offrendo dati consistenti e affidabili.

Il passaggio al satellite Landsat 7 è avvenuto per il 2008 e il 2012. Tuttavia, è importante notare come le immagini acquisite da Landsat 7 in quegli anni siano state compromesse a causa dei noti problemi tecnici relativi al Scan Line Corrector (SLC-off), che ha portato a lacune nei dati e a una copertura inaffidabile delle immagini (Figura 1). Questa problematica ha limitato l'utilità delle immagini Landsat 7 per un'analisi dettagliata del ghiacciaio della Marmolada in quel periodo specifico.

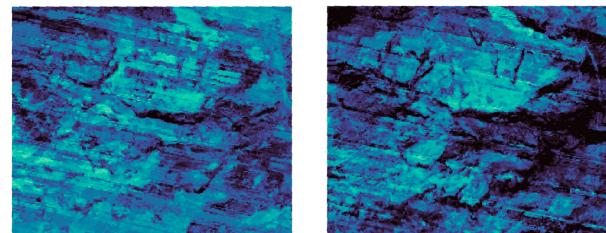


Figura 1: Dati Landsat 7 corrotti del 2008-2012, mostrando lacune visive dovute al guasto del SLC.

A partire dal 2013, lo studio si è avvalso delle immagini acquisite dal satellite Landsat 8, che ha introdotto miglioramenti significativi nella qualità e nella risoluzione delle immagini satellitari. Landsat 8 ha permesso di continuare il monitoraggio con dati ad alta definizione, supportando un'analisi accurata delle variazioni del ghiacciaio fino al 2020.

2) Calcolo del NDSI e Correlazione con Dati Climatici: Per ciascuna immagine selezionata dai satelliti Landsat, il calcolo dell'Indice di Neve (NDSI) è stato effettuato applicando la formula specifica che sfrutta la differenza normalizzata tra la riflettanza misurata nella banda visibile (verde) e quella nella banda infrarossa a onda corta (SWIR). Questo calcolo si basa sull'equazione:

$$NDSI = \frac{(\text{Banda Verde} - \text{Banda SWIR})}{(\text{Banda Verde} + \text{Banda SWIR})}$$

dove la Banda Verde è tipicamente la banda 2 per Landsat 5 e 7, e la banda 3 per Landsat 8; la Banda SWIR corrisponde alla banda 5 per Landsat 5 e 7, e alla banda 6 per Landsat 8 (Tabella 1). Questa metodologia ha permesso di identificare aree con presenza significativa di neve e ghiaccio, distinguendole efficacemente dal resto del paesaggio. Per ogni immagine, il calcolo è stato automatizzato attraverso script personalizzati su Google Earth Engine, consentendo l'elaborazione di un ampio set di dati in modo efficiente e la generazione di mappe tematiche annuali dell'NDSI.

Satellite	Banda Verde	Banda SWIR
Landsat 5	B2	B5
Landsat 7	B2	B5
Landsat 8	B3	B6

Tabella I: Bande Landsat per il calcolo dell'NDSI per i satelliti Landsat 5, 7 e 8.

Parallelamente, l'estrazione dei dati climatici relativi alle temperature medie annue e alla somma delle precipitazioni annue per l'area di interesse è stata realizzata tramite l'interfaccia di programmazione di Google Earth Engine, che ha consentito l'accesso diretto al dataset ERA5. Questo dataset fornisce misurazioni orarie su una griglia globale, da cui sono state estratte le medie annuali specifiche per la regione del ghiacciaio della Marmolada. Attraverso l'utilizzo di filtri spaziali e temporali, è stato possibile isolare i dati pertinenti all'area di studio per ogni anno dal 1985 al 2020. Le serie temporali di temperatura e precipitazioni sono state poi correlate con le variazioni dell'NDSI per identificare eventuali relazioni tra i cambiamenti climatici locali e le dinamiche di scioglimento del ghiacciaio.

D. Raccolta e Analisi dei Dati Climatici

Parallelamente all'analisi sull'NDSI, è stata condotta una raccolta e analisi dei dati climatici al fine di comprendere l'eventuale influenza di questi fattori sull'evoluzione del ghiacciaio della Marmolada. Utilizzando la piattaforma Google Earth Engine, abbiamo acceduto al dataset ERA5, che fornisce misurazioni orarie delle condizioni meteorologiche su scala globale. Per il nostro studio, ci siamo concentrati sull'estrazione delle temperature medie annue e della somma delle precipitazioni annue specifiche per la zona di interesse nel periodo dal 1985 al 2020.

L'analisi dei dati climatici ha comportato la mediazione dei valori orari al fine di ottenere medie annuali rappresentative. Queste medie sono state successivamente confrontate con le tendenze osservate nell'NDSI al fine di valutare l'impatto di temperature e precipitazioni sul bilancio di massa del ghiacciaio. Le tendenze termiche e le variazioni delle precipitazioni sono state visualizzate attraverso grafici e mappe tematiche, fornendo così una prospettiva più ampia sui potenziali legami tra le condizioni climatiche e le dinamiche di scioglimento osservate.

E. Metodologie di Analisi Spaziale

Le metodologie di analisi spaziale adottate in questo studio hanno sfruttato le capacità avanzate del software QGIS per elaborare e visualizzare i dati geospatiali. Abbiamo utilizzato il Modello Digitale di Elevazione (DEM) con una risoluzione di 10 metri per pixel, scaricato dal sito di INGV Sezione di Pisa³ (Tarquini *et al.* [7]), per generare mappe dettagliate del terreno. Utilizzando questo DEM (Figura 2), abbiamo creato curve di livello con una distanza di 100 metri per una chiara visualizzazione della morfologia del terreno circostante al ghiacciaio della Marmolada (Figura 3).

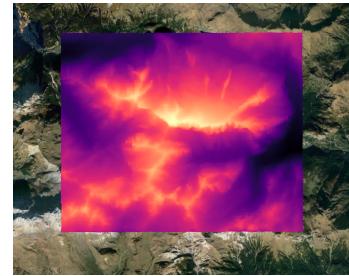


Figura 2: DEM a falso colore dell'area del ghiacciaio della Marmolada, con mappa di base per il contesto geografico

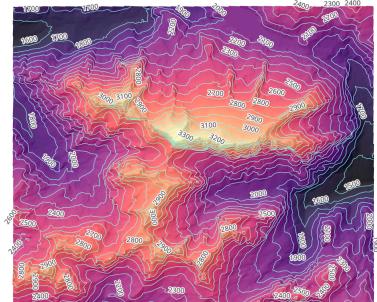


Figura 3: Mappa delle curve di livello con intervalli di 100 metri sovrapposta al DEM a falso colore, che evidenzia l'altitudine e la topografia del ghiacciaio della Marmolada

L'applicazione di una simbologia a banda a falso colore sul DEM ha consentito di distinguere le varie altitudini e di esaminare le caratteristiche morfologiche del ghiacciaio con maggiore chiarezza. La creazione di una serie temporale di mappe del ghiacciaio, basata sui valori di NDSI e sui dati climatici, ha permesso di visualizzare le modifiche nel tempo in modo intuitivo.

Inoltre, abbiamo utilizzato tecniche di ombreggiatura per migliorare la visualizzazione del modello di elevazione digitale e l'integrazione di altri layer spaziali ha fornito contesto geografico aggiuntivo (Figura 4). Queste metodologie hanno permesso non solo di identificare le aree di ritiro del ghiacciaio, ma anche di interpretare le possibili cause legate alle variazioni climatiche e topografiche in modo più approfondito

³[Link al download del DEM](#)

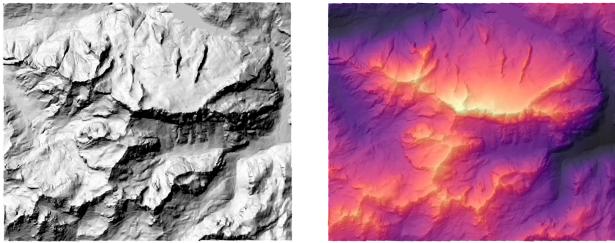


Figura 4: A sinistra, il layer di ombreggiatura del DEM; a destra, il DEM con sovrapposizione del layer a falso colore per l'accentuazione dell'altitudine.



Figura 5: Rappresentazione 3D del ghiacciaio della Marmolada da diverse angolazioni

III. ANALISI & RISULTATI

A. Cambiamenti Morfologici e Scioglimento del Ghiacciaio (2004-2014)

Il periodo tra il 2004 e il 2014 ha rappresentato una fase critica per il ghiacciaio della Marmolada, segnata da significativi cambiamenti morfologici e da uno scioglimento massiccio. Il ghiacciaio si è frammentato in tre parti distinte, modificando profondamente sia la sua morfologia sia i pattern di accumulo della neve, come riportato da Santin *et al.* [6]. Nonostante un trend generale di riduzione dello spessore e dell'estensione del ghiaccio, si è osservato un fenomeno di accumulo di neve nei settori medio e superiore del ghiacciaio, evidenziato nelle Figure 6 e 7. Tale fenomeno è stato analogamente riscontrato nelle Alpi Giulie, dove, nonostante l'aumento delle temperature, si sono verificati accumuli di ghiaccio a medie e alte altitudini. Questi eventi, principalmente dovuti a valanghe e al trasporto di neve da parte del vento, hanno sostenuto il bilancio di massa di piccoli corpi di ghiaccio.

La topografia irregolare e la presenza di formazioni carsiche hanno potenziato questi accumuli locali di neve, giocando un ruolo cruciale nella preservazione di queste masse di ghiaccio contro il riscaldamento climatico. Inoltre, le strutture geomorfologiche come creste moreniche e terrazzamenti pronivali hanno agito da barriere naturali, contribuendo alla resilienza di questi ghiacciai. Questa dinamica si è riflessa anche nella Marmolada, dove la morfologia particolare del ghiacciaio e la presenza di strutture simili hanno permesso, nonostante le temperature crescenti, un sorprendente accumulo di neve in certe zone, come riportato da Colucci [2].

Ciononostante il calo dello spessore medio del ghiaccio da 18,0 metri nel 2004 a 12,9 metri nel 2014 e la riduzione del volume complessivo del ghiacciaio del 30% e dell'area coperta

dal ghiaccio del 22%, sottolinea la gravità dello scioglimento in atto.

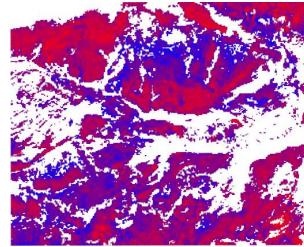


Figura 6: Marmolada, differenza NDSI (2004 & 2014). In rosso le zone dove il ghiaccio è diminuito nel 2014 rispetto al 2004; in blu dove è aumentato.

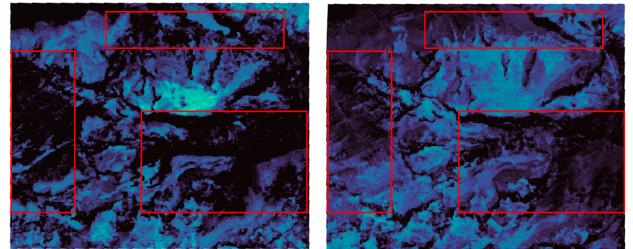


Figura 7: Immagine di sinistra: Ghiacciaio della Marmolada nel 2004. Immagine di destra: Ghiacciaio nel 2014. Le zone evidenziate indicano l'accumulo di neve e ghiaccio nel 2014 rispetto al 2004

B. Evoluzione del Ghiacciaio (2014-2020)

Nel lasso di tempo che va dal 2014 al 2020, il ghiacciaio della Marmolada ha continuato a subire un processo di scioglimento, benché a un ritmo decelerato. L'analisi comparativa dell'NDSI tra questi anni mostra una persistente riduzione della copertura nevosa e glaciale. Le aree marcate in rosso rivelano dove il ghiacciaio ha subito il maggiore scioglimento nel 2020 rispetto al 2014. In modo particolare, queste zone mostrano una tonalità più vicina al viola piuttosto che al rosso puro nelle località che erano state identificate come aree di accumulo locale, indicando che la perdita di neve e ghiaccio in questi settori è stata relativamente minore, come dimostrato dalla figura 9 e come anticipato da Santin *et al.* [6].

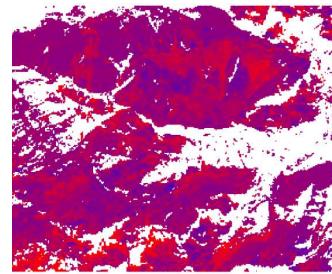


Figura 8: Marmolada, differenza NDSI (2014 vs 2020)

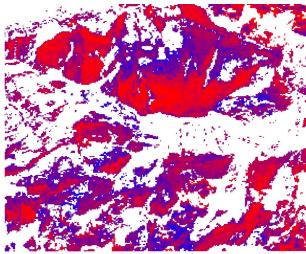


Figura 9: Marmolada, differenza NDSI (1985 vs 2020)

Questa tendenza di scioglimento differenziato conferma l'esistenza condizioni locali che possono attenuare l'effetto dello scioglimento in determinate parti del ghiacciaio. Questa situazione riflette la complessa interazione tra la morfologia unica del ghiacciaio e i diversi fattori climatici che influenzano il bilancio di massa del ghiaccio.

Le proiezioni di Santin *et al.* [6] indicavano che, se lo scioglimento fosse proseguito senza sosta, il ghiacciaio della Marmolada avrebbe potuto sparire entro il 2050. I dati raccolti fino al 2020 sembrano avvalorare questa previsione, sottolineando l'importanza di agire prontamente per contrastare le cause sottostanti del cambiamento climatico e per adottare misure efficaci per la conservazione dei ghiacciai.

La frammentazione che si è manifestata nella Marmolada è un chiaro segno di come il riscaldamento globale stia impattando i ghiacciai di medie e grandi dimensioni, frantumandoli in entità più ridotte e incrementando il rischio che essi possano estinguersi nel lungo periodo.

C. Variazioni Climatiche: Temperature e Precipitazioni

L'analisi delle temperature medie annuali nell'area della Marmolada ha confermato un trend generale di riscaldamento, in linea con le osservazioni globali sul cambiamento climatico. Sebbene il 2020 abbia registrato un calo delle temperature, la tendenza decennale mostra un aumento consistente (Figura 10) che corrisponde ai periodi di maggiore ritiro del ghiacciaio. Questa correlazione sottolinea come le temperature crescenti possano accelerare il processo di fusione del ghiaccio, compromettendo la stabilità e l'integrità del ghiacciaio stesso, confermando di fatto quanto detto da Colucci [2].

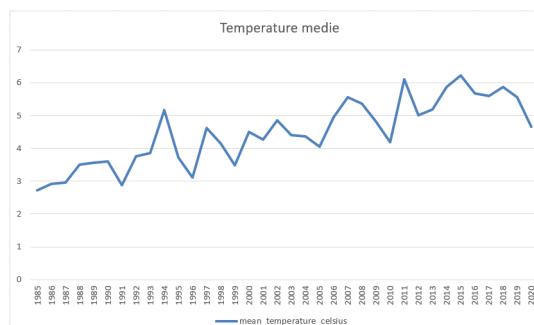


Figura 10: Media temperatura annua registrata nell'area di interesse

Riguardo alle precipitazioni, l'analisi non ha evidenziato un pattern definito nel corso del periodo esaminato. Nonostante ciò, abbiamo deciso di includere questi dati nel nostro studio, consapevoli dell'importante impatto che le precipitazioni hanno sulla formazione e sul mantenimento dei ghiacciai. La mancanza di un trend chiaro (Figura 11) potrebbe essere attribuita alla variabilità intrinseca del clima o alla limitazione degli strumenti e dei metodi utilizzati nella nostra analisi.

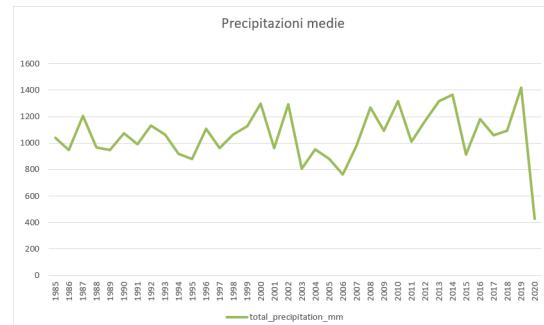


Figura 11: Somma delle precipitazioni annue registrate nell'area di interesse

Le precipitazioni sotto forma di neve sono fondamentali per la crescita dei ghiacciai, poiché contribuiscono all'accumulo annuale che nel migliore dei casi bilancia o supera la fusione estiva. Anni con scarso accumulo di neve, soprattutto se consecutivi, possono quindi avere un effetto negativo sul bilancio di massa dei ghiacciai, accelerando il loro declino.

Sebbene i nostri strumenti non abbiano permesso di identificare una correlazione diretta e significativa tra precipitazioni e variazioni del ghiacciaio della Marmolada, la letteratura scientifica supporta la rilevanza di questo fattore [1], [4]. Per questo motivo, abbiamo incluso le precipitazioni come variabile nel nostro studio, riconoscendo che eventi futuri di precipitazioni al di sotto della media, soprattutto in combinazione con temperature più elevate dovute al cambiamento climatico, potrebbero intensificare ulteriormente il ritiro dei ghiacciai.

D. Impatto delle Emissioni di CO₂

La contrazione del ghiacciaio della Marmolada persiste nonostante la tendenza nazionale italiana alla riduzione delle emissioni di CO₂ (Figura 12), mettendo in luce la portata globale del cambiamento climatico e l'influenza di fattori che eccedono le emissioni di un singolo paese. È rilevante notare che la risposta dei ghiacciai alle emissioni di CO₂ non è immediata ma è il risultato di effetti cumulativi nel tempo. L'accumulo di gas serra nell'atmosfera crea un impatto duraturo, poiché questi gas possono persistere nell'atmosfera per decenni o secoli, contribuendo all'effetto serra per lungo tempo. Pertanto, anche con un'immediata riduzione delle emissioni, gli effetti pregressi continuano a influenzare il clima attuale e futuro.

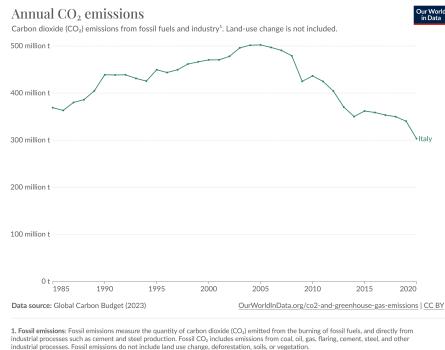


Figura 12: Emissioni CO₂ Annue italiane dal 1985 al 2020

A livello mondiale, le emissioni di CO₂ continuano ad aumentare, intensificando l'innalzamento delle temperature su scala globale (Figura 13). La condizione del ghiacciaio della Marmolada è quindi un esempio emblematico e un campanello d'allarme che riafferma la necessità di un impegno internazionale concertato per la riduzione delle emissioni di gas serra. Solo attraverso una strategia di mitigazione globale sarà possibile affrontare efficacemente il cambiamento climatico e mitigare il suo impatto sui ghiacciai e altri sistemi ecologici critici.

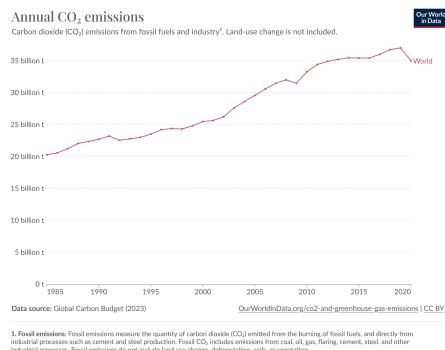


Figura 13: Emissioni CO₂ Annue globali dal 1985 al 2020

IV. CONCLUSIONI

Il nostro studio ha evidenziato l'impatto significativo del cambiamento climatico sul ghiacciaio della Marmolada dal 2004 al 2020, dimostrando un continuo ritiro del ghiacciaio nonostante episodi isolati di accumulo di neve. Questa tendenza sottolinea l'importanza critica di monitorare le variabili climatiche, come temperature e precipitazioni, per comprendere le dinamiche dei ghiacciai alpini nel contesto del riscaldamento globale.

Sebbene le azioni locali per la riduzione delle emissioni di CO₂ siano importanti, i nostri risultati confermano che il problema del cambiamento climatico richiede una risposta globale. L'urgenza di adottare strategie efficaci per la mitigazione del cambiamento climatico e per la conservazione dei ghiacciai emerge chiaramente dai nostri dati. Solo con un'azione coordinata sarà possibile affrontare questa sfida ambientale e proteggere i ghiacciai per le future generazioni.

I codici, i dataset e i materiali supplementari utilizzati in questo studio sono disponibili in una repository GitHub, accessibile al seguente link: <https://github.com/LucoMoro/Marmolada-Glacier-Melting-Analysis>

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Renato Colucci and Mauro Guglielmin. Precipitation–temperature changes and evolution of a small glacier in the southeastern european alps during the last 90 years. *International Journal of Climatology*, 35:2783–2797, 09 2015.
- [2] Renato R Colucci. Geomorphic influence on small glacier response to post-little ice age climate warming: Julian alps, europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(9):1227–1240, 2016.
- [3] Timothy M Lenton, Johan Rockström, Owen Gaffney, Stefan Rahmstorf, Katherine Richardson, Will Steffen, and Hans Joachim Schellnhuber. Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature*, 575(7784):592–595, 2019.
- [4] Thomas Mölg, Fabien Maussion, and Dieter Scherer. Mid-latitude westerlies as a driver of glacier variability in monsoonal high asia. *Nature Climate Change*, 4:68–73, 01 2014.
- [5] Joeri Rogelj, Michiel Schaeffer, Malte Meinshausen, Reto Knutti, Joseph Alcamo, Keywan Riahi, and William Hare. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. *Environmental Research Letters*, 10(10):105007, 2015.
- [6] Ilaria Santin, Renato R Colucci, M Žebre, Mauro Pavan, Anselmo Cagnati, and Emanuele Forte. Recent evolution of marmolada glacier (dolomites, italy) by means of ground and airborne gpr surveys. *Remote Sensing of Environment*, 235:111442, 2019.
- [7] Simone Tarquini, Stefano Vinci, Massimiliano Favalli, Fawzi Doumaz, Alessandro Fornaciai, and Luca Nannipieri. Release of a 10-m-resolution dem for the italian territory: Comparison with global-coverage dems and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers & Geosciences*, 38(1):168–170, 2012.
- [8] Michael Zemp. *Global glacier changes: facts and figures*. UNEP/Earthprint, 2008.