



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente
Corso di Laurea Magistrale in Conservazione della Biodiversità,
Didattica e Comunicazione Scientifica - LM60

Paleoclimatologia: un approccio divulgativo per spiegare il cambiamento climatico

Relatrice: Prof.ssa Claudia Lupi

Correlatore: Prof. Roberto Seppi

Tesi di Laurea Magistrale in
Conservazione della Biodiversità,
Didattica e Comunicazione Scientifica
di Lorenzo Riccobono
matricola 538264
Anno Accademico 2024/25

“La vita può essere capita solo all'indietro, ma va vissuta in avanti”

Søren Kierkegaard

Indice

Indice.....	3
1. Introduzione: la comunicazione dell'emergenza climatica.....	5
1.1 Scienze in concerto: la paleoclimatologia, un'esperienza transdisciplinare nel tempo.....	5
1.2 Obiettivi della tesi.....	8
2. Materiali e metodi: le Connessioni Culturali.....	9
2.1.1 Nascita e obiettivi del progetto.....	9
2.1.2 Come funzionano.....	10
2.1.3 Vantaggi del progetto.....	11
2.2 Un progetto per parlare di clima.....	12
3. Risultati.....	17
3.1.1 Primo webinar: le basi del clima.....	17
3.1.2 Take home messages.....	30
3.1.3 Gancio.....	31
3.1.4 Riferimenti bibliografici.....	31
3.2.1 Secondo webinar: archivi paleoclimatici nei ghiacci.....	31
3.2.2 Take home messages.....	39
3.2.3 Gancio.....	39
3.2.4 Intervista al Prof. Roberto Seppi.....	40
3.2.5 Riferimenti bibliografici.....	42
3.3.1 Terzo webinar: segnali e previsioni di questo cambiamento.....	43
3.3.2 Take home messages.....	51
3.3.3 Messaggio di chiusura.....	51
3.3.4 Riferimenti bibliografici.....	52
4. Discussione e conclusioni.....	53
5. Note.....	57
6. Riferimenti bibliografici.....	58
7. Appendice A.....	62
A.1 Primo webinar: le basi del clima.....	
A.2 Secondo webinar: archivi paleoclimatici nei ghiacci.....	
A.3 Terzo webinar: segnali e previsioni di questo cambiamento.....	

1. Introduzione: la comunicazione dell'emergenza climatica

Il cambiamento climatico è un tema tanto popolare quanto abusato. Questo lavoro mira ad affrontarlo attraverso un approccio divulgativo e concreto. Per fare ciò, verrà in aiuto una disciplina meno conosciuta, ma dalle fondamenta robuste: la Paleoclimatologia.

Fino a qualche decennio fa, una delle tematiche ambientali meno note era la storia del clima e la sua evoluzione. Cosa esso sia, come si sia sviluppato e quali problemi possa creare è ai più ignoto. La trattazione del tema oggi, invece, avviene spesso in maniera strumentalizzata e fuorviante, tanto che nella farraginosità che ne deriva ci si limita a dire che il "tempo" è cambiato, che "il clima non è più quello di una volta", che "nella storia della Terra il clima è sempre variato".

1.1 Scienze in concerto: la paleoclimatologia, un'esperienza transdisciplinare nel tempo

Gli studi sul clima sono estremamente vasti. Questi variano a seconda della componente del sistema climatico presa in considerazione: cambiamenti nell'aria, nell'acqua, nella vegetazione, nelle superfici terrestri e nel ghiaccio hanno ripercussioni e generano risposte differenti. Variano anche nelle tecniche utilizzate, che includono misurazioni fisiche e chimiche e simulazioni al computer sulle proprietà dell'aria, dell'acqua e del ghiaccio, nonché delle forme di vita fossilizzate nelle rocce.

Questa enorme diversità di studi copre una vasta gamma di discipline scientifiche. Alcuni studi sono volti a migliorare la nostra comprensione del sistema climatico moderno, altri si concentrano sui cambiamenti climatici o sui fenomeni legati al clima nel passato recente o più remoto della Terra.

Disciplina	Oggetto di studi paleoclimatologici
Meteorologia	Studia la circolazione dell'atmosfera e la distribuzione dei fenomeni di accumulo e rilascio di energia
Oceanografia	Esplora la circolazione dell'oceano e la sua distribuzione di energia
Glaciologia	Misura e studia il comportamento dei ghiacci.
Ecologia	Analizza le forme di vita sulla terraferma o nell'acqua.
Geologia	Raccorda gli aspetti più ampi della storia della Terra.
Geofisica	Indaga i cambiamenti passati nella configurazione fisica della Terra (continenti, oceani e montagne).
Geochimica	Analizza i cambiamenti chimici passati nell'oceano, nell'aria o nelle rocce.
Paleoecologia	Studia i fossili per riconoscere il loro ambiente di vita e ricostruire gli ecosistemi presenti sulla Terra nel passato
Modellistica climatica (fisica, matematica ed informatica)	Valuta, tramite simulazioni, le possibili cause del cambiamento climatico e ne esegue delle proiezioni.
Storia del clima	Esplora archivi scritti per ricostruire i climi del passato.

Tabella 1 - Alcune delle scienze che descrivono la transdisciplinarietà della paleoclimatologia

Negli ultimi decenni, questi studi hanno spesso oltrepassato i tradizionali confini disciplinari per fondersi in un approccio transdisciplinare denominato "scienza del sistema Terra" (NASA, 1988). Questo metodo evidenzia che le numerose parti del

sistema climatico terrestre sono interconnesse e che i ricercatori climatici devono esaminarne tutte le parti per comprendere l'insieme.

La storia climatica della Terra si sviluppa attraverso rapporti causa-effetto, in un *continuum* che va dal lontano passato fino al presente (Fig. 1). Per questa ragione il lavoro di indagine è generalmente organizzato sulla base della scala temporale. Questo approccio si fonda sul principio dell'attualismo (James Hutton, 1795 ca.), secondo cui i processi naturali che osserviamo oggi sono gli stessi che hanno operato nel passato geologico. Le nozioni apprese su come il sistema climatico ha funzionato nel passato possono essere applicate alla nostra comprensione del presente e del futuro così come l'analisi del presente fornisce la chiave per decifrare il passato. Il termine generale "scienza del clima" si riferisce a questo vasto campo di ricerca inter- e transdisciplinare e al suo indissolubile collegamento tra passato, presente e futuro.

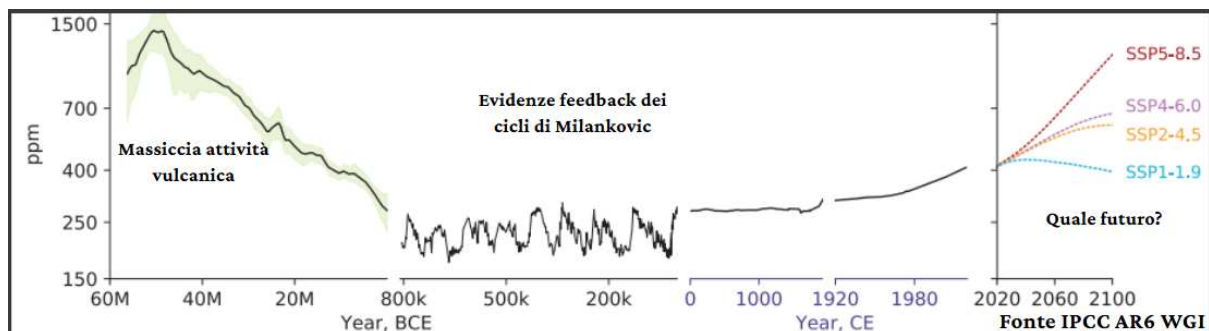


Figura 1 - La scala temporale a più risoluzioni per mostrare l'andamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera nel Cenozoico (Fonte IPCC Assessment Report 6, Working Group I)

1.2 Obiettivi della tesi

Il presente lavoro si prefigge l'obiettivo primario di rendere decifrabile e accessibile la complessità dell'attuale emergenza climatica a un pubblico adulto non specializzato, superando le semplificazioni mediatiche. Per fare ciò, si utilizza l'indagine paleoclimatologica come solida chiave di lettura, dimostrando come la comprensione del clima del passato sia lo strumento fondamentale per validare i modelli previsionali del nostro futuro climatico.

Per conseguire questo traguardo, l'approccio metodologico adottato si sviluppa attraverso tre fasi interconnesse. In primo luogo, un rigoroso studio della letteratura e delle fonti scientifiche, inclusi i testi universitari di riferimento e i più recenti rapporti internazionali (come l'IPCC Assessment Report 6), per garantire l'accuratezza dei contenuti. In secondo luogo, il dialogo con la ricerca attiva, concretizzato attraverso un'intervista mirata a un ricercatore esperto in glaciologia e geomorfologia, utile a calare i concetti teorici nella realtà dei nostri territori alpini. Infine, la progettazione divulgativa, ovvero la rielaborazione pratica e visiva di tutto il materiale raccolto nella strutturazione di un ciclo di tre seminari online per il format Connessioni Culturali, focalizzati rispettivamente sulle basi fisiche del clima, sull'esplorazione degli archivi glaciali e sulla comprensione degli scenari futuri.

2. Materiali e metodi: le Connessioni Culturali

La presente tesi utilizza come strumento tecnico e strategia comunicativa per la divulgazione della Paleoclimatologia e dell'emergenza climatica il progetto Connessioni Culturali.

Connessioni Culturali è un progetto di divulgazione sviluppato nel 2020 dal team di Arteitalia S.r.l., operatore culturale presso cui presto regolarmente servizio (e dove ho svolto il mio internato di tesi). Si tratta di incontri virtuali su *Zoom* che oltrepassano i confini spaziali e le distanze temporali permettendo la realizzazione di tour complessi in compagnia di guide abilitate, spaziando dall'arte alla scienza.

Qui, l'obiettivo è mostrare come concetti e dati scientifici complessi siano accessibili ad un pubblico eterogeneo se calati in un'esperienza visiva e narrativa, mantenendo il rigore accademico.



Figura 2 - Logo e "payoff" del progetto Connessioni Culturali

2.1.1 Nascita e obiettivi del progetto

Arteitalia S.r.l. organizza dal 2009 visite guidate a carattere storico, artistico e scientifico a Milano e Roma attraverso i brand Milanoguida e Romaguida. La versione virtuale, Connessioni Culturali, si presenta come un format di veri incontri di gruppo online: grazie a immagini, grafici e letture, i partecipanti possono interagire in tempo reale con la guida e gli altri ascoltatori, creando uno scambio di idee vivo e attivo.

Come è lecito pensare leggendo l'anno di avvio del formato, la pandemia da SARS-CoV-2 ha agito come un catalizzatore decisivo, costringendo un settore

tradizionalmente legato alla presenza fisica a innovare per far sopravvivere la divulgazione culturale. Con i *lockdown*, la digitalizzazione è diventata l'unica via per mantenere un legame con il pubblico e generare entrate. La riscossione di un immediato successo tramite recensioni positive (Fig.3) ha accelerato un processo già in atto, trasformando anni di pianificazione in pochi mesi di attuazione e perfezionamento. La crisi ha anche aperto gli occhi sull'opportunità di raggiungere un pubblico globale, dimostrando che il digitale non è una soluzione temporanea, ma un nuovo e sostenibile modello di *business* per il futuro della cultura. Questo progetto permette di approfondire diversi aspetti della storia, dell'arte, della scienza attraverso incontri online tenuti dagli stessi professionisti che operano durante le tradizionali visite guidate.

Elena



Sabato 2 maggio, connessione culturale ""Canova"". L'emergenza COVID-19 mi ha impedito di visitare la mostra a Gallerie d'Italia, la visita virtuale di oggi è stata un ottimo ripiego. Bravissima Chiara nel presentare scultore e sculture, un'ora passata velocemente e piacevolmente. Era la prima volta che partecipavo a questa iniziativa ben riuscita, sicuramente da ripetere. Grazie Milano Guida.



5y

Figura 3 - Una delle prime recensioni afferenti al progetto

2.1.2 Come funzionano

L'accesso ad una Connessione Culturale, possibile collegandosi al sito web www.connessioniculturali.com, può avvenire in due modi differenti: dalla pagina Catalogo (Fig. 4), selezionando il tema d'interesse, o dalla pagina Calendario, verificando le disponibilità e gli argomenti trattati nel giorno di interesse.

Può essere effettuata una scelta libera sul contributo di partecipazione, da 7 a 25 euro, in base alle proprie possibilità e alla volontà di sostenere il progetto.

Dal sito si può pagare con carta di credito o conto *Paypal*. In alternativa si può richiedere il pagamento via bonifico scrivendo via email al servizio clienti dedicato.

La durata di una Connessione Culturale può variare da 60 a 90 minuti, più il tempo per le domande e risposte finali, e si ha a disposizione un supporto tecnico per fruire al meglio del servizio.

Per collegarsi è sufficiente una connessione internet e un PC, un *tablet* o uno *smartphone*. Se si usa un PC è possibile anche non scaricare l'applicazione di Zoom ma semplicemente connettersi attraverso un *browser* come *Google Chrome*, *Apple Safari*, *Mozilla Firefox*, *Microsoft Edge*. Il giorno prima della Connessione Culturale viene inviata a tutti gli iscritti una mail con il *link* per collegarsi alla riunione Zoom.



The image shows a grid of three cultural connection cards. Each card features a top image, a title, a short description, a rating with stars and the number of reviews, and a 'Scopri di più' button with a price tag of 7€.

- Card 1:** Title: **Raffaello e Perugino, gli Sposalizi**. Description: "Stesso soggetto, diversa esecuzione: un confronto serrato tra due dei massimi capolavori dell'arte italiana per meglio comprendere gli ideali rinascimentali." Rating: 4.9 stars (10 recensioni). Category: **CAPOLAVORI**.
- Card 2:** Title: **La Basilica di Aquileia e i suoi celebri mosaici**. Description: "Un'antica basilica paleocristiana oggi Patrimonio UNESCO, scrigno di innumerevoli tesori: un viaggio tra straordinari mosaici pavimentali e cripte affrescate." Rating: 4.9 stars (41 recensioni). Category: **MONUMENTI LUOGHI DI CULTO**.
- Card 3:** Title: **La Parigi della Belle Époque tra can can, lampioni elettrici e seduzione**. Description: "Un tour impossibile a ritmo di can can nella scoppiettante Parigi di fine Ottocento, in compagnia di arte e letteratura, ma anche di cinema, moda e musica." Rating: 4.9 stars (37 recensioni). Category: **TOUR IMPOSSIBILI CITTÀ**.

Figura 4 - Un frammento del catalogo di Connessioni Culturali reperibile sul sito www.connessioniculturali.com

2.1.3 Vantaggi del progetto

I progetti come Connessioni Culturali rappresentano un'evoluzione cruciale e permanente della divulgazione culturale. Sebbene accelerati dal fenomeno della pandemia, rispondono ad una necessità preesistente. Questi hanno trasformato la fruizione della cultura da un'esperienza rigidamente fisica a un modello ibrido, più accessibile, personalizzato e interattivo.

Le visite guidate tradizionali sono delimitate da confini geografici, barriere fisiche e/o diverse tipologie di pubblico. Un modello virtuale, come Connessioni Culturali, ha la capacità di abbattere queste restrizioni, rendendo la cultura accessibile a chiunque, indipendentemente dalla propria posizione geografica, mobilità o budget. Le sessioni online, spesso programmate in orari serali, si adattano meglio alle esigenze di chi lavora, ampliando ulteriormente la fruibilità.

L'esperienza digitale non si limita a replicare un tour dal vivo, ma offre possibilità uniche. Si possono ricreare "tour impossibili" esplorando siti inaccessibili al pubblico o confrontando opere d'arte che si trovano in musei diversi. Infatti, il mezzo digitale permette di personalizzare l'esperienza, ad esempio ingrandendo dettagli di un grafico o mostrando elementi di un reperto invisibili a occhio nudo. La piattaforma Zoom facilita anche l'integrazione di materiali extra come audio, video e documenti, arricchendo l'apprendimento e trasformando la visita in un percorso continuo.

Lo stimolo alle domande a microfono aperto o via chat crea un ambiente meno intimidatorio rispetto a un tour di gruppo dal vivo, facilitando la partecipazione attiva e l'aggregazione di una comunità di appassionati. Si crea spazio per interagire e scambiarsi idee, per trasformare l'incontro anche in un'occasione di socializzazione.

Per risolvere eventuali problematiche di ricezione dei contenuti è stato pensato il supporto tecnico telefonico, che offre aiuto a chi è meno avvezzo alla tecnologia, senza distrarre la guida dal suo ruolo. Il supporto avviene da remoto, è ben collaudato e basato su tecniche di *troubleshooting*. Solitamente viene utilizzato *una tantum* da chi partecipa per la prima volta e nella maggior parte dei casi irrisolti si riscontrano limiti nei dispositivi *hardware* ad uso del partecipante.

La messa a disposizione di registrazioni e materiali post-evento aumenta il valore dell'esperienza.

2.2 Un progetto per parlare di clima

Per questo progetto di tesi ho pensato di rivolgermi al pubblico abituale di Connessioni Culturali cioè persone di ceto sociale e cultura medio alta, maggior parte pensionati ed *over 60*. In questi anni, il web è diventato uno strumento di comunicazione anche scientifica e le generazioni *Millennial*, *X* e *Z*, si sono rese

N° slide	Titolo	Note Relatore	Tempo
...			
8	Le basi chimiche di un illustre precursore	Fisico e chimico svedese (1859-1927), scrisse che al raddoppiare della concentrazione di CO ₂ le temperature sarebbero aumentate di 5-6°C, sottovalutato all'epoca (piena seconda rivoluzione industriale)	1 min
9	Evoluzione della concentrazione di CO ₂ in atmosfera	<p>a sx massiccia attività vulcanica dovuta alla formazione di dorsali oceaniche</p> <p>Il ruolo della CO₂ come amplificatore: quando i cicli di Milankovitch riducono l'insolazione estiva al nord (+ terre emerse), si innesca una glaciazione, gli oceani più freddi assorbono CO₂ dall'atmosfera, amplificando ulteriormente il raffreddamento.</p> <p>Con 1500ppm e 12 gradi di media in più vivevano i dinosauri caratteristiche anatomiche e fisiologiche molto differenti dalle nostre (mesotermi, a sangue più freddo)</p> <p>L'impennata odierna meglio descritta nella successiva</p>	3 min
10	La curva di Keeling: CO ₂ negli ultimi 60 anni	<p>Chimico statunitense (1928-2005)</p> <p>Andamento a mazza da hockey.</p> <p>Ingrandimento del ciclo annuale, curva a "dente di sega", picco di assorbimento nella primavera boreale. Perché?</p> <p>70% terre emerse è in emisfero nord (vegetazione in sviluppo)</p> <p>70% dei mari in emisfero sud, assorbono più CO₂ mentre si raffreddano perché la solubilità dei gas nei liquidi aumenta al diminuire della temperatura (la stessa ragione di amplificazione dei cicli di Milankovitch)</p> <p>(Domande?)</p>	2 (+2) minuti
...			

Tabella 2 - Esempio di schema di incasellamento in uso al relatore per l'esposizione dei contenuti suddivisi per slide

Nella progettazione dei materiali si è tenuto conto di precisi vincoli tecnici e comunicativi:

- Distribuzione degli argomenti: per strutturare il percorso di approfondimenti si è deciso di suddividere la proposta di questa tematica in un ciclo di tre incontri.
- Dimensioni e sostenibilità: ogni modulo comprende circa 30 slide. Ciò permette di coprire un'ora di esposizione garantendo un ritmo narrativo fluido ed evitando di sovraccaricare l'uditorio.
- Comunicazione non verbale: la mediazione dello schermo limita l'efficacia della mimica e della gestualità del relatore, elementi che solitamente supportano la comprensione durante la divulgazione in presenza. Per compensare questa distanza fisica il carico comunicativo è stato trasferito sulla qualità iconografica delle slide. Il materiale visivo funge da motore della spiegazione e sopperisce alla ridotta percezione del linguaggio corporeo.
- Sfondo scuro e testo chiaro: per ottimizzare la fruizione remota e ridurre l'affaticamento visivo durante l'ora di *webinar*, è stato adottato un *layout* a contrasto invertito. Questa scelta tecnica permette una migliore resa cromatica dei grafici e delle immagini fotografiche, minimizzando le interferenze luminose tipiche degli sfondi bianchi standard.
- Ottimizzazione per il *layout Zoom*: l'interfaccia di *streaming* mostra spesso il volto del relatore in un riquadro ridotto rispetto ai contenuti condivisi. Di conseguenza, si è scelto di privilegiare le immagini. Le slide presentano elementi visivi di grandi dimensioni, grafici ad alta risoluzione e testi sintetici, studiati per la consultazione anche su schermi di piccoli dispositivi come *tablet* o *smartphone*.
- RegISTRAZIONI: è previsto anche un sistema di registrazione con la possibilità di vedere le puntate in differita, attraverso un link a validità temporanea inviato via email, a tutti gli iscritti. In questo modo, il pubblico che, per mancanza di tempo, partecipa solo ad uno o due dei tre incontri, ha la garanzia di accesso ai contenuti.

Come detto, il percorso di approfondimenti parte da una presentazione generale del funzionamento del sistema climatico, trattato nel primo incontro.

Le due successive proposte invece interessano alcuni tra i metodi di ricerca in ambito paleoclimatologico e previsionale. Nonostante il progetto sia costruito a tappe, lo stile comunicativo adottato per ciascun appuntamento consente di fruirne appieno i contenuti senza necessariamente aver partecipato ai precedenti appuntamenti. Nel caso in cui ci fossero dei rimandi a trattazioni già effettuate, sono prontamente rielaborati nel contesto.

3. Risultati

Il pacchetto Connessioni Culturali “Paleoclima e cambiamento climatico globale” consta di tre *webinar* dal titolo:

- 1) le basi del Clima
- 2) archivi paleoclimatici nei ghiacci
- 3) segnali e previsioni di questo cambiamento

Per ciascuno di essi è stata costruita una presentazione *PowerPoint* riportata in Appendice A e un canovaccio per la guida, esposto in questo capitolo.

Ogni incontro è strutturato con una trama scritta sulla base di articoli scientifici e testi universitari che sono riportati per permettere alla guida la verifica delle fonti e per ogni incontro sono evidenziati dei “concetti chiave” che ci immaginiamo siano chiari ai partecipanti al termine dell’incontro e un “gancio” per lanciare l’appuntamento successivo e invogliare alla partecipazione.

3.1.1 Primo webinar: le basi del clima

Per il primo *webinar* ho realizzato una presentazione di 38 slide costituita da immagini e brevi testi (Appendice A.1). Il *leitmotiv* grafico proposto nella presentazione rappresenta le cinque componenti del clima come strumenti musicali di un’orchestra. Si propone cioè l’associazione con oggetti e riferimenti noti a chi ascolta oltre a proporre un gioco di parole facendo leva sulla duplice connotazione dell’aggettivo/sostantivo “complesso”. Per la guida ho approntato sia delle brevi note alle slides che un testo approfondito ideato per la preparazione dell’incontro.

Per decifrare la complessità del cambiamento climatico globale la trattazione inizia con una distinzione fondamentale, spesso trascurata nel dibattito pubblico: quella tra il tempo meteorologico e il clima.

Il “meteo” o tempo atmosferico è l’insieme di eventi che accadono ogni giorno nella nostra atmosfera, tra cui variazioni in temperatura, tipologia di precipitazioni e grado di umidità. Il meteo non è lo stesso ovunque. Se oggi nella nostra località è caldo, secco e soleggiato, in altre parti del mondo può essere nuvoloso, piovere o addirittura nevicare. Ogni giorno, milioni di dati che rispecchiano gli eventi meteorologici vengono registrati e previsti dai meteorologi di tutto il mondo.

Il clima è invece l'andamento meteorologico medio di un luogo nel corso di molti anni. Il clima dell'Antartide è piuttosto diverso dal clima di un'isola tropicale, quello della nostra zona del globo determina quindi il meteo ed è importante sottolineare che la variazione o cambiamento del clima è una tendenza a lungo termine che modifica la media e la distribuzione degli estremi dei valori tipici di una regione o del pianeta. Banalizzando si può dire che il clima è ciò che controlla il meteo in un dato luogo: il meteo riguarda lo stato dell'atmosfera osservato in un preciso momento, mentre il clima comprende sia lo stato medio dell'atmosfera in una determinata regione osservato su almeno un trentennio, come stabilito dalla *World Meteorological Organisation*, sia la distribuzione statistica dei fenomeni, inclusi quelli rari o estremi.

Calando queste affermazioni sulla nostra regione e sul nostro tempo possiamo affermare che il manifestarsi sempre più frequente di fenomeni estremi quali abbondanti piogge, alluvioni o siccità prolungate, sta determinando l'affermarsi di un clima nuovo, sempre più tropicalizzato (Mercalli, 2025). L'espressione di quest'ultimo concetto conduce alla percezione dei temi scientifici proposti come parte integrante della quotidianità dell'*audience*.

Confondere i due piani è uno degli errori che commette chi nega il riscaldamento globale davanti a una singola giornata di freddo intenso. Come nella musica, una nota fuori posto o un passaggio dissonante non cambiano l'andamento dell'intero brano, ciò che osserviamo oggi non è la scomparsa del freddo, ma una variazione della distribuzione statistica degli eventi.

Segue poi un approfondimento sul sistema climatico e le componenti che determinano il clima. Il modo che ho trovato più immediato ed efficace di interpretare il sistema climatico terrestre è quello di associarlo ad un'orchestra (Fig. 6), la cui esecuzione è affidata a cinque sezioni strumentali, o sottosistemi, interconnessi in un equilibrio dinamico dove la variazione di uno influenza inevitabilmente tutti gli altri.

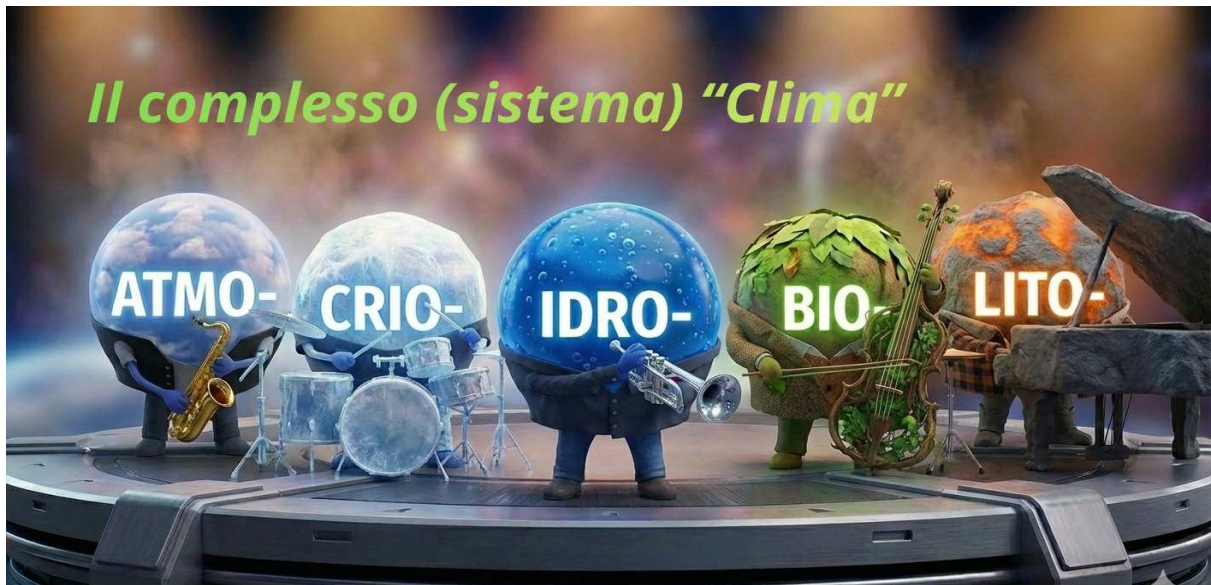


Figura 6 - Il leitmotiv grafico proposto nelle presentazioni del progetto abbraccia le cinque componenti del clima proponendo un gioco di parole musicale: la duplice connotazione dell'aggettivo/sostantivo complesso.

Si introduce dicendo che l'energia che anima questa orchestra proviene da un'unica fonte, il Sole, che investe il nostro pianeta con una potenza media di 1362 W/m^2 . Tuttavia, la Terra non è un disco piatto rivolto costantemente alla fonte, ma una sfera rotante, e la geometria ci suggerisce che l'energia intercettata deve distribuirsi su una superficie quattro volte superiore, riducendo l'input effettivo a circa $340,5 \text{ Watt}$ per metro quadro.

Di questa energia mediamente il 30% viene riflesso dalle superfici chiare, fenomeno noto come albedo planetario, il 26% viene ri-allontanato in atmosfera dalle nuvole, e il 47% colpisce la superficie della terra, che a sua volta ri-emette l'energia sotto forma di onde lunghe. Parte di queste onde rimesse vengono assorbite dai gas serra, il resto si disperde in varie forme. Questi dettagli sono propedeutici al terzo appuntamento dove si tratterà di previsioni climatiche sul medio lungo periodo, dipendenti dalla presenza di gas serra in atmosfera.

Le cinque componenti del complesso "Clima": atmosfera, biosfera, idrosfera, criosfera e litosfera.

La prima componente è l'**atmosfera**, il solista veloce, capace di rispondere agli stimoli in ore o settimane spostando rapidamente calore e umidità attraverso le celle

di circolazione planetaria. Questa è infatti la componente che risponde più velocemente alle variazioni di energia tra le aree del globo, mettendo in moto la circolazione oceanica.

È qui che entra in gioco quel meccanismo essenziale per la nostra esistenza e spesso frainteso che chiamiamo effetto serra. L'atmosfera non agisce come il vetro di una serra agricola che blocca il ricambio d'aria, ma piuttosto lavora per assorbimento selettivo di radiazione termica da parte delle molecole disperse in più strati di atmosfera, intrappolando il calore in uscita (sotto forma di onde lunghe) proprio come fanno i vestiti a contatto con la nostra pelle. Il 99% del gas presente in atmosfera non ha effetto serra e a determinare il ruolo di "coperta" per il pianeta sono gas presenti solo in traccia.

È interessante la similitudine, proposta nel saggio "Cambiamento Climatico" (Pasotti, 2021), con gli effetti generati da pillole di qualche grammo su un organismo di 70 kg. La figura retorica utilizzata mette a raffronto proprio le masse in gioco: gas presenti solo in minima percentuale (< 1%) nell'atmosfera possono generare effetti tangibili su larga scala, proprio come le minuscole quantità di principio attivo all'interno dei farmaci possono curare i pazienti.

È importante sottolineare ancora una volta che l'effetto serra ha un'accezione estremamente positiva: ha reso possibile l'origine della vita in acqua allo stato liquido e abitabile fin quasi dagli albori la Terra.

Qual è il gas con il maggior effetto serra? In questa fase della narrazione è importante creare l'inganno dell'aspettativa attraverso un'interazione che sfoci nello stupore dei partecipanti. Risposta: "il vapore [pausa] acqueo [in tono più grave]". Tuttavia, lo stupore lascia spazio alla complessità: sebbene il vapore acqueo sia il gas serra più potente in termini di volume, esso agisce solo come un amplificatore passivo, un *feedback* che risponde alla temperatura. L'aumento delle temperature innescato dall'uomo alza infatti la capacità dell'atmosfera di trattenere vapore acqueo, creando un *feedback* che alimenta il riscaldamento, nonostante il parziale contrappeso delle nuvole che, aumentando l'albedo, tentano di riflettere la radiazione solare.

La "manopola di controllo" che l'uomo è in grado di ruotare, è l'immissione di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera, poiché è il suo aumento a innalzare la

temperatura permettendo all'atmosfera di trattenere più vapore e innescando così una potente spirale di riscaldamento.

Il concetto di *feedback* sarà trattato più approfonditamente nel corso dell'incontro.

Alla prima componente citata risponde l'**idrosfera**, costituita principalmente dalle masse oceaniche, le cui acque superficiali sono caratterizzate da una circolazione guidata dal vento e hanno temperature maggiori rispetto a quelle profonde, con termoclino più ampio. Le acque profonde invece si spostano attraverso la circolazione termoalina, guidata dalla temperatura e dalla salinità. Il termoclino è una fascia intermedia tra acque superficiali rimescolate ed acque profonde e che mette in comunicazione le due masse. Alle alte latitudini il termoclino è molto ristretto e le masse sono più connesse. A livello del mare, dove avviene lo scambio di gas (e assorbimento di CO₂), atmosfera e oceano sono in perfetto equilibrio chimico e fisico.

L'idrosfera, come accennato, lavora su due livelli:

- in superficie le correnti sono guidate dai venti e determinano regimi climatici "*summer-like*" (umidi) o "*winter-like*" (secchi) in base all'evaporazione. Il primo è caratterizzato da una radiazione solare estiva forte, dal rapido riscaldamento delle terre emerse con risalita di massa acqua per evaporazione, richiamo di aria umida dagli oceani e precipitazione sulle terre emerse quindi si ha clima umido, mentre il "*winter like*", viceversa, prevede precipitazioni in oceano e clima secco su terre emerse l'accentuarsi di questa condizione porta a desertificazione.
- nelle profondità agisce il grande nastro trasportatore della circolazione termoalina. Questo meccanismo lento e profondo è azionato dalla densità dell'acqua: ai poli, quando l'acqua marina congela, espelle il sale nel liquido sottostante rendendolo più denso e facendolo sprofondare; questo inabissamento richiama acqua calda dalle latitudini tropicali, distribuendo energia in un sistema di trasporto globale che mediamente impiega secoli per completare un ciclo.

Accanto ai fluidi troviamo la **criosfera**, composta dai ghiacci marini, i ghiacciai continentali e il *permafrost*. È una componente il cui tempo di risposta alle variazioni di temperatura ha una taratura a medio termine, quindi ottimale per una scala di

analisi climatologica e che quindi restituisce una buona indicazione sulla velocità dell'attuale problema del riscaldamento globale, per questo motivo ne parleremo più approfonditamente nel nostro prossimo appuntamento.

La **litosfera** è la componente più abbondante del sistema Terra. Nell'analisi del cambiamento climatico, la litosfera viene spesso percepita erroneamente come un fondale statico su cui agiscono gli altri elementi. Al contrario, essa rappresenta una delle cinque componenti fondamentali del sistema climatico. Sebbene i suoi tempi di reazione siano estremamente lenti rispetto a quelli dell'atmosfera o dell'oceano, la litosfera esercita un controllo decisivo sui *trend* di variazione a lunghissimo termine (scale temporali che vanno dai centinaia di migliaia ai milioni di anni).

L'animazione proposta riassume in soli 5 secondi lo spostamento delle masse continentali avvenuto in 250 milioni di anni.

La loro disposizione, determinata dai movimenti litosferici, modella le correnti oceaniche e atmosferiche. Ad esempio, l'apertura del canale di Drake (che separa Sudamerica da Antartide) o la chiusura dell'istmo di Panama hanno drasticamente deviato il trasporto di calore globale, innescando ere glaciali o periodi caldi. La posizione dei continenti ai poli, inoltre, è una condizione necessaria per la crescita di grandi calotte glaciali, aumentando l'albedo terrestre e influenzando il bilancio energetico globale.

In relazione alle interazioni con l'atmosfera, la litosfera funge da principale serbatoio di carbonio del pianeta. Attraverso il processo di *weathering* (degradazione chimica delle rocce silicatiche esposte), la CO₂ atmosferica viene sottratta all'aria e fissata in sedimenti oceanici che poi, tramite la tettonica delle placche, ritornano nel mantello. Anche questo meccanismo agisce come un termostato naturale: quando la temperatura globale sale, l'erosione accelera, rimuovendo più CO₂.

Nel contesto climatico, la **biosfera**, ossia l'insieme di tutti gli organismi viventi, delle loro comunità e degli ecosistemi che essi formano, non è solo una spettatrice dei cambiamenti, ma una componente attiva capace di influenzare il clima sia direttamente che indirettamente attraverso i cicli biogeochimici.

Attraverso la fotosintesi clorofilliana, la vegetazione sulle terre emerse sequestra enormi quantità di CO₂ atmosferica, trasformandola in biomassa. La distribuzione della vegetazione influenza drasticamente l'albedo terrestre, ovvero la capacità della superficie di riflettere la radiazione solare. Una foresta fitta assorbe molta più energia rispetto a una distesa di ghiaccio o a un deserto sabbioso. Inoltre, la biosfera

partecipa al ciclo dell'acqua attraverso l'evapotraspirazione, influenzando la formazione delle nubi e, di conseguenza, le precipitazioni a livello regionale e globale. Negli oceani la produttività primaria dei microrganismi marini alimenta un processo che trasferisce il carbonio dalla superficie verso le profondità oceaniche, dove può rimanere stoccato per secoli o millenni.

Per comprendere appieno lo stato attuale del clima, dobbiamo considerare il fattore tempo, ovvero l'inerzia termica del sistema, data dall'interazione dei tempi di risposta delle singole componenti.

Ogni componente del sistema climatico terrestre ha un proprio tempo di risposta, concettualmente esemplificato dalla reazione di un *becker* riempito d'acqua sottoposto al riscaldamento da una fiammella di *bunsen* (Fig. 7). Proprio come l'acqua posta su un becco *bunsen* non raggiunge l'ebollizione nell'istante in cui accendiamo la fiamma, ma impiega un tempo di risposta fisico per accumulare energia, così il nostro pianeta sta ancora reagendo alle emissioni dei decenni passati. Il tempo di risposta è proprio il gradiente con cui l'acqua si riscalda fino a raggiungere una temperatura di equilibrio.

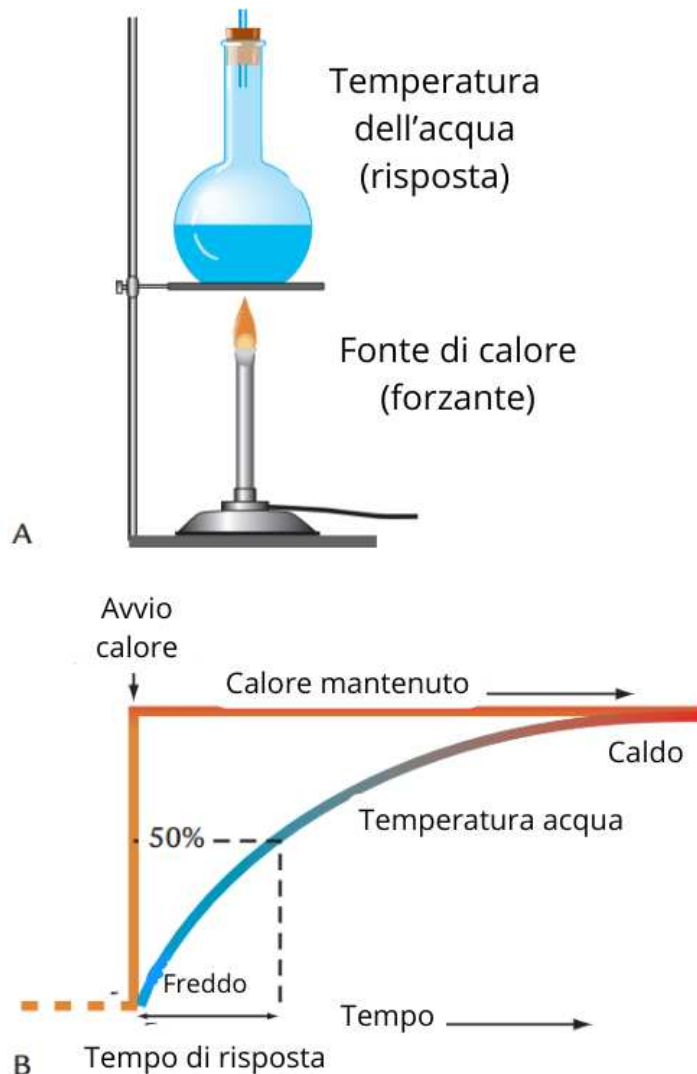


Figura 7 - con la metafora del bunsen viene semplificato l'accesso al concetto di tempo di risposta (Ruddiman, 2014)

Tempi dei meccanismi di risposta delle componenti:

- rapidi (giornalieri, settimanali): nuvole, vapore acqueo e ghiaccio marino
- lenti (anni, decenni, secoli): variazione della vegetazione superficiale delle terre emerse, della temperatura delle acque superficiali, della circolazione degli oceani, del ciclo del carbonio, del volume dei ghiacci. Immaginare che una goccia d'acqua che cade sull'oceano arriva sul fondo in circa 1000 anni.
- lentissimi: afferenti alla litosfera.

Tempi di risposta di varie componenti del sistema climatico Ruddiman, 2001		
Componente	Tempo di risposta	Esempio
Risposte rapide		
Atmosfera	Da ore a settimane	Escursione termica tra dì e notte Sviluppo di un'ondata di calore
Superficie terrestre	Da ore a mesi	Riscaldamento giornaliero delle masse continentali Congelamenti e scongelamenti invernali
Superficie oceani	Da giorni a mesi	Riscaldamento pomeridiano della superficie Accumulo di calore delle spiagge nel tardo-estivo
Vegetazione	Da ore a decenni/secoli	Perdita immediata fogliame per congelamento Lenta crescita degli alberi fino a maturazione
Ghiaccio marino	Da settimane ad anni	Massima estensione tardo-invernale Cambiamenti morfologici area Islanda
Risposte lente		
Ghiacci continentali	10-100 anni	Ritiro globale dei ghiacciai nel ventesimo secolo Tempo di sostituzione delle acque profonde Avanzamenti/ritiri dei margini delle calotte
Oceano profondo	100-1500 anni	
Calotte polari	100-10.000 anni	

*Figura 8 - Tabella riassuntiva dei tempi di risposta delle componenti del clima
(Ruddiman, 2014)*

Le componenti lente come gli oceani profondi e le grandi calotte polari stanno ancora assorbendo il calore in eccesso e continueranno a farlo per secoli, il che significa che parte del riscaldamento futuro è già inevitabilmente “*in progress*”.

In questo complesso dialogo, la dinamica di interconnessione tra le componenti ci permette di spiegare nel concreto il fenomeno dei *feedback*: le retroazioni che possono accelerare o frenare il cambiamento.

Esistono *feedback* positivi pericolosi, come lo scioglimento dei ghiacci che scoprendo oceano scuro aumenta l'assorbimento di calore, o il disgelo del permafrost che rilascia in atmosfera antiche riserve di metano (altro potente gas serra); ma esistono anche *feedback* negativi stabilizzanti, come quello offerto dalle alghe unicellulari *Emiliania huxleyi* che, fiorendo in acque calde, non solo aumentano la riflessione superficiale attraverso l'albedo offerta dai coccoliti di carbonato di calcio, ma rilasciano dimetilsolfuro (DMS), un gas che funge da nucleo di condensazione per le nuvole, creando un parasole naturale che raffredda il pianeta.

La paleoclimatologia e i suoi strumenti: gli archivi paleoclimatici.

Per introdurre il concetto di archivio paleoclimatico presentiamo l'archivio della storica stazione meteorologica del Collegio Romano. Le immagini proposte rappresentano l'archivio nella sua concezione comune: decine di faldoni raccolti sugli scaffali contengono i milioni di dati registrati dalla stazione capitolina nel corso degli ultimi 150 anni. Le rilevazioni strumentali ed i registri storici sono solo il primo passo all'indietro nell'indagine paleoclimatologica, per volgere lo sguardo ad altri tipi di archivi: quelli del paleoclima. Qui occorre un iniziale sforzo di immaginazione per associare il concetto di archivio ad una concrezione calcarea rinvenuta in una grotta o alla carota di legno estratta dal tronco di un albero secolare.

La ricostruzione delle dinamiche climatiche del passato si basa infatti sull'analisi di archivi naturali che hanno la capacità di registrare e conservare segnali di una particolare condizione del clima nel tempo. Quando indagiamo nel passato siamo alla ricerca di perturbazioni, variazioni climatiche sufficientemente lunghe da essere registrate all'interno degli archivi analizzati e che ci sia una variazione significativa e tecnicamente misurabile nell'indicatore. Infatti il record paleoclimatico contenuto nell'archivio, con una propria finestra e risoluzione temporale, può essere o non essere sensibile al cambiamento climatico (Fig. 9). I ricercatori devono prima determinare il meccanismo attraverso cui il segnale climatico è registrato dall'indicatore, per usarlo nel decifrare i mutamenti climatici, a seconda che la componente indagata abbia un tempo di risposta veloce o meno.

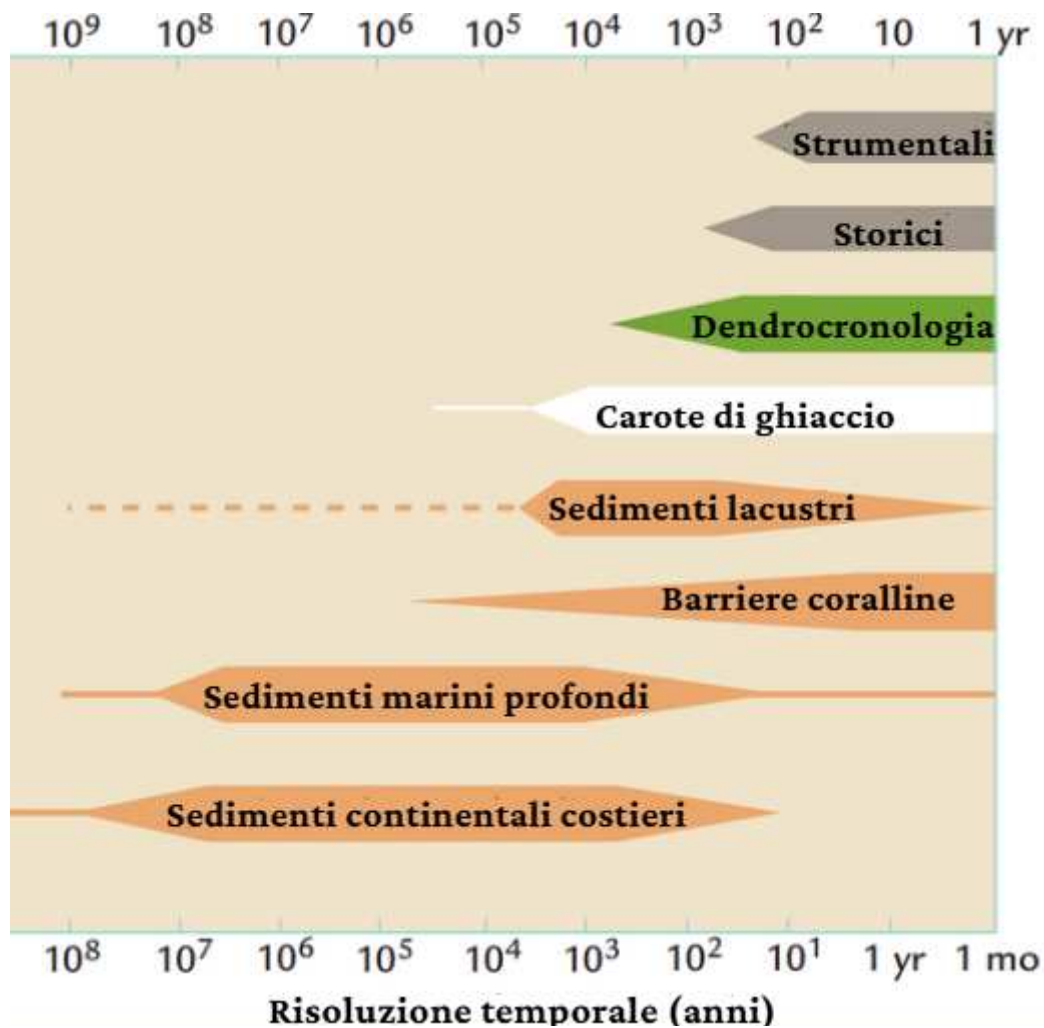


Figura 9 - L'immagine tradotta da Ruddiman, 2014 riporta in una scala temporale le varie finestre di indagine dei differenti archivi presentati.

Tra i registri continentali più significativi figurano gli **speleotemi**, depositi di carbonato di calcio, come stalattiti e stalagmiti che si formano nelle cavità carsiche. Il deposito di questi minerali di calcite dipende dall'evaporazione dell'acqua all'ingresso della grotta, oppure dalla fuoriuscita di CO_2 dalle gocce d'acqua che percolano all'interno della grotta. Quando queste grotte sono in prossimità del mare possono darci importanti indicazioni sulle variazioni del livello del mare perché gli speleotemi si formano soltanto in situazioni subaeree. Questi archivi sono particolarmente preziosi grazie alla loro eccezionale precisione cronologica, garantita dalla loro rapida - e spesso continua - crescita e dalle datazioni assolute tramite il metodo Uranio-Torio, che permette di spingersi fino a circa 600.000 anni fa. La loro forza sta nell'altissima risoluzione temporale, talvolta stagionale, che consente di identificare variazioni climatiche rapide attraverso l'analisi degli isotopi

stabili dell'ossigeno e del carbonio, o l'osservazione dello spessore delle lamelle di crescita, indicatori diretti della temperatura e soprattutto del regime delle precipitazioni dell'ultimo mezzo milione di anni.

Parallelamente, le **carote di ghiaccio** estratte dalle calotte polari **di alta latitudine**, come quelle della Groenlandia e dell'Antartide, costituiscono il riferimento d'elezione per lo studio della composizione atmosferica globale. Questi cilindri di ghiaccio possono coprire un arco temporale di oltre 850.000 anni, offrendo una risoluzione annuale negli strati più recenti. Le bolle d'aria intrappolate durante la compattazione della neve, conservano campioni reali dei gas serra del passato, permettendo un confronto diretto tra le concentrazioni attuali di anidride carbonica o metano e quelle delle ere glaciali. Fortunatamente il ghiaccio, crescendo strato su strato, ha intrappolato bolle d'aria che sono veri e propri campioni di "atmosfera fossile", ma anche altri elementi che contraddistinguono le condizioni biotiche e abiotiche della regione di indagine. Una delle informazioni più preziose deriva proprio dalla firma termica lasciata dall'acqua. Gli scienziati analizzano le quantità relative nel ghiaccio dell'isotopo più pesante dell'ossigeno, l' ^{18}O . Poiché gli isotopi più pesanti richiedono più energia per rimanere in sospensione e tendono a precipitare prima di quelli leggeri man mano che l'aria si raffredda, la neve caduta durante i periodi più caldi risulterà più ricca di ^{18}O rispetto a quella dei periodi glaciali. Per questa loro straordinaria capacità di riflettere le variazioni di temperatura, questi isotopi sono definiti dai climatologi come veri e propri "paleotermometri". Nel prossimo appuntamento vedremo come, attraverso lo studio delle carote di ghiaccio e degli elementi in traccia in esse contenuti possiamo leggere questo archivio naturale per capire il passato.

Su una scala spaziale differente, la **geomorfologia glaciale** fornisce un archivio di tipo fisico, fondamentale per ricostruire l'estensione dei ghiacci e l'evoluzione del paesaggio durante l'ultimo milione di anni. Attraverso lo studio delle morene, dei cunei di ghiaccio e della linea delle nevi perenni, i glaciologi possono mappare le risposte del territorio alle variazioni termiche. Sebbene questo archivio presenti una risoluzione temporale più bassa e discontinua rispetto ai precedenti, l'utilizzo di datazioni basate sui radionuclidi consente di stabilire con buona approssimazione i momenti di massima espansione glaciale e le successive fasi di ritiro.

Infine, per ottenere una prospettiva sui trend climatici a lunghissimo termine, la comunità scientifica si affida all'analisi dei **sedimenti marini profondi**. Questo archivio è il più continuo e duraturo a nostra disposizione, capace di coprire decine di milioni di anni di storia planetaria. I sedimenti oceanici, che ricoprono il 70% della superficie terrestre, costituiscono un archivio paleoclimatico fondamentale grazie all'accumulo annuale di miliardi di tonnellate di materiali, anche se la risoluzione temporale è generalmente millenaria a causa del lento accumulo sui fondali e del rimescolamento biologico.

La composizione di questi archivi si divide principalmente in frazioni biogeniche e terrigene. I materiali biogenici derivano dai resti di organismi planctonici (che vivono lungo la colonna d'acqua) e bentonici (che vivono sul fondale) che producono gusci che si accumulano sui fondali sotto forma di fanghi. A seconda della loro composizione minerale, si distinguono in organismi calcarei come i foraminiferi e i coccolitofori, i cui resti sono composti da carbonato di calcio (CaCO_3) oppure organismi silicei: come radiolari, diatomee e silicoflagellati, caratterizzati da strutture in silice (SiO_2). Attraverso l'analisi quantitativa delle associazioni di specie, lo studio delle variazioni morfologiche e l'analisi geochemica di questi fossili si estraggono dati paleoclimatici essenziali. In particolare, la composizione isotopica dell'ossigeno ($\delta^{18}\text{O}$) e il rapporto tra magnesio e calcio (Mg/Ca) nei gusci dei foraminiferi fungono da indicatori per determinare le temperature oceaniche del passato. I sedimenti terrigeni sono invece prodotti dall'erosione e dall'alterazione delle rocce continentali e vengono trasportati in mare dal vento, dai fiumi o dal ghiaccio. Questi materiali riflettono le condizioni climatiche delle terre emerse: ad esempio, minerali come l'illite indicano climi freddi o aridi dove prevale l'erosione fisica, mentre la caolinite segnala l'intensa alterazione chimica tipica delle zone tropicali con tasso di precipitazione elevato. Anche la granulometria e il flusso di polveri eoliche forniscono dati interessanti, rivelando periodi di forte vento o l'estensione delle glaciazioni attraverso il deposito di grandi detriti trasportati dagli iceberg che segnala i grandi eventi di instabilità delle calotte polari.

Il recupero e lo studio sistematico di questi archivi biogenici e terrigeni sono resi possibili da infrastrutture di ricerca avanzate, tra cui spicca la nave da perforazione oceanica JOIDES Resolution. Spina dorsale dell'*International Ocean Discovery Program* (IODP), questa nave operava fino al 2024 come un laboratorio galleggiante

multidisciplinare, capace di estrarre carote di sedimento da profondità abissali che superano i 5.000 metri.

L'apporto della JOIDES Resolution alla paleoclimatologia è fondamentale per diversi aspetti:

- Continuità delle serie temporali: la tecnologia di perforazione permette di prelevare sequenze stratigrafiche indisturbate che coprono milioni di anni.
- Analisi multiproxy immediata: a bordo della nave, i ricercatori possono effettuare scansioni fisiche, analisi magnetiche e osservazioni micropaleontologiche sui campioni appena estratti.
- Validazione dei modelli climatici: i dati estratti dalle perforazioni della JOIDES Resolution forniscono i "punti di controllo" necessari per verificare l'accuratezza delle simulazioni paleoclimatiche, permettendo di comprendere meglio come il sistema Terra risponda a variazioni nella concentrazione di gas serra o nei cicli orbitali.

Grazie alle sue spedizioni, è stato possibile documentare la storia termica degli oceani e i grandi eventi di instabilità delle calotte polari, trasformando i fanghi prelevati dai fondali in una cronaca dettagliata dell'evoluzione del clima terrestre.

La sfida che sta nell'integrazione di questi diversi archivi, ognuno con le proprie specificità temporali e indicatori caratteristici, mira oggi a delineare un quadro quanto più coerente e dettagliato del clima terrestre del passato, fornendo il contesto necessario per comprendere le anomalie termiche del presente.

3.1.2 Take home messages

- La differenza tra meteo (o tempo meteorologico) e clima
- Le 5 componenti del clima sono caratterizzate da specifici tempi di risposta e sono tra loro strettamente interconnesse
- Concetto di *feedback*
- Gli archivi paleoclimatici: corpi fisici che interpretati dai paleoclimatologi, restituiscono degli indicatori climatici

3.1.3 Gancio

Con una prima introduzione degli attori del sistema climatico inteso come sistema fisico, e indagando sulle dinamiche che interconnettono le sue componenti principali in relazione all'evoluzione nel tempo, possiamo permetterci di interpretare segnali lasciati dal clima del passato negli archivi naturali rappresentati dai ghiacciai temperati. Nel prossimo appuntamento sarà esposto il metodo applicato dagli studiosi per questo tipo d'indagine.

3.1.4 Riferimenti bibliografici

Per la realizzazione del testo per la guida ho attinto principalmente dal libro di testo utilizzato durante le lezioni del corso di Paleoclima e Cambiamento Climatico Globale, ossia la terza edizione di *Earth's Climate: Past and Future* di William Ruddiman (2014), oltre ad altri testi e materiali reperiti online specificati in bibliografia.

3.2.1 Secondo webinar: archivi paleoclimatici nei ghiacci

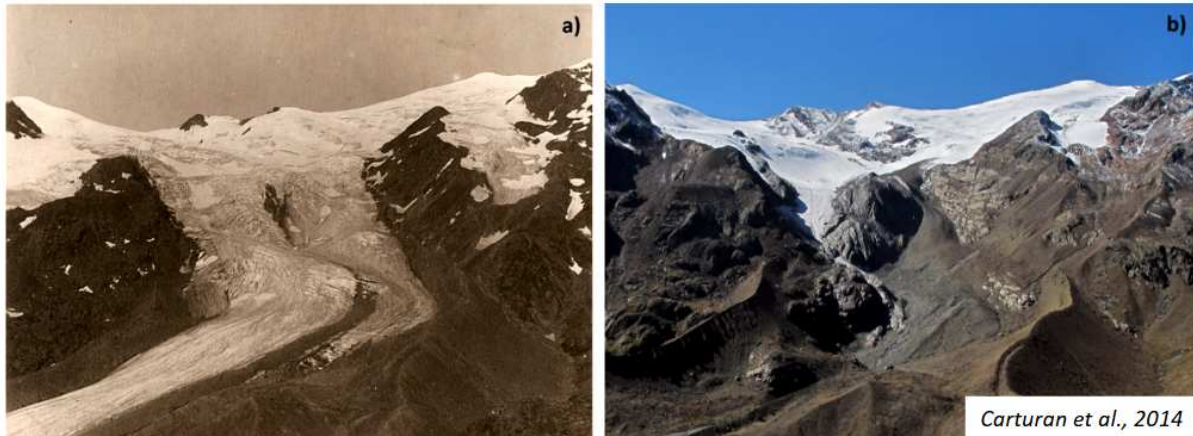
In continuità con le analisi sulla complessità del sistema climatico terrestre e sull'importanza degli archivi paleoclimatici, la seconda puntata di queste Connessioni Culturali, è composta da 29 slide ed una breve videointervista, e si concentra sull'indagine di uno degli archivi più vulnerabili e urgenti da studiare: l'archivio paleoclimatico dei ghiacciai alpini.

La crisi climatica globale impone all'intera comunità, scientifica e non solo, una riflessione immediata sul destino dei criosistemi continentali, e in questo contesto, l'analisi dei ghiacciai alpini è un imperativo metodologico, rafforzato dall'istituzione del 2025 come Anno Internazionale per la Conservazione dei Ghiacciai, da parte di UNESCO e World Meteorological Organization. Questo approfondimento si inserisce in tale sforzo globale di sensibilizzazione e ricerca, riconoscendo la vulnerabilità di queste masse glaciali e il valore inestimabile delle informazioni che custodiscono in quanto archivi paleoclimatici.

Solo accennata tra le componenti del sistema clima, nel precedente appuntamento, la criosfera è composta dai ghiacci marini, ghiacciai continentali e dal permafrost. È una componente il cui tempo di risposta alle variazioni di temperatura ha una taratura a medio termine, e che quindi restituisce una buona indicazione sulla velocità dell'attuale problema del riscaldamento globale, per questo motivo ne parleremo più ampiamente in questo appuntamento dedicato alle ricerche glaciologiche e di geomorfologia periglaciale.

La criosfera oltre a comprendere le immense calotte polari delle alte latitudini, è formata anche dai ghiacciai temperati alpini e quelli freddi, d'alta quota, delle Ande o dell'Himalaya.

Il monitoraggio della massa superficiale dei ghiacci (*Surface Mass Balance*) è il parametro principale per elaborare previsioni accurate sul sollevamento del livello marino globale. Questo parametro dipende strettamente dalla temperatura dell'aria, dai processi di sublimazione e dalla dinamica di flusso che caratterizza il movimento del ghiaccio dalle zone di accumulo verso quelle di ablazione. La fusione dei ghiacci continentali immette negli oceani masse d'acqua precedentemente stoccate sulle terre emerse. Al contrario, la fusione dei ghiacci marini, come la banchisa, non altera direttamente il livello del mare perché questi occupano già un volume nell'idrosfera. Oltre a essere un elemento fisico critico, la criosfera funge da archivio paleoclimatico insostituibile: le bolle d'aria intrappolate durante la trasformazione della neve in ghiaccio offrono una testimonianza diretta della composizione atmosferica del passato, rivelando che le attuali concentrazioni di gas serra superano qualsiasi livello registrato negli ultimi 800.000 anni (Lüthi et al., 2008; Loulergue et al., 2008).



1933 - A. Desio

2012 - R. Seppi

Figura 10 - Fotografie che ritraggono la stessa visione in prospettiva del Ghiacciaio del Careser, Gruppo Ortles Cevedale (Carturan et al, 2014)

Sebbene nell'immaginario comune il ritiro di un ghiacciaio sia associato esclusivamente all'arretramento del suo fronte (Fig. 10), la realtà fisica del sistema è più complessa. I glaciologi osservano spesso un significativo assottigliamento del corpo glaciale, un fenomeno che comporta una drastica variazione del volume complessivo senza che la geometria di espansione orizzontale subisca modifiche immediate. Questa dinamica è influenzata da tempi di risposta variabili: se i ghiacciai montani possono reagire ai cambiamenti climatici in pochi decenni, le calotte di Groenlandia e Antartide hanno un'inerzia tale da richiedere millenni per adattarsi a nuovi equilibri termici. La tabella riepilogativa dei tempi di risposta ci riepiloga soprattutto questo dato.

La motivazione più pressante per focalizzarsi sui ghiacciai alpini risiede nella perdita irreversibile dei segnali che essi contengono, la cui documentazione è una corsa contro il tempo. I ghiacciai alpini, come il Ghiacciaio dell'Adamello nelle Alpi Retiche, il più grande ghiacciaio italiano, sono fondamentali per comprendere l'interazione tra le condizioni meteorologiche locali e le forzanti climatiche regionali e globali che hanno inciso nel passato recente.

Per svelare il potenziale paleoclimatico dei ghiacciai temperati, analizzeremo due approcci complementari a scale diverse: l'analisi a macroscale dell'evoluzione geomorfologica del paesaggio (Seppi et al., 2025) e la successiva indagine a microscale delle particelle intrappolate nel ghiaccio (Mangili et al., 2025).

Geomorfologia glaciale e periglaciale (Seppi et al., 2025)

Il valore di questa ricerca è supportato dal lavoro dei ricercatori geomorfologi, il cui ruolo è fondamentale per documentare e gestire i rapidi cambiamenti delle aree glaciali e periglaciali, unito all'utilizzo di strumenti avanzati per la mappatura geomorfologica, indispensabile per la conservazione e la gestione territoriale. Ad esempio, il nuovo database geomorfologico dell' Adamello Brenta UNESCO Geopark è stato creato con la collaborazione del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia, utilizzando geodatabase integrati in ambiente GIS e dati di telerilevamento ad alta risoluzione, come i modelli di elevazione digitale. La mappatura, condotta a una scala di circa 1:10.000, ha lo scopo di fornire uno strumento per la promozione del patrimonio geologico, il supporto alla pianificazione territoriale e lo sviluppo di attività educative e turistiche.

In un ambiente alpino in rapido mutamento, i geomorfologi sono stati chiamati a monitorare i processi esogeni più significativi, tra cui spiccano i processi gravitazionali che, come evidenziato nel Geoparco Adamello Brenta, dominano il paesaggio, coprendo oltre il 40% dell'area studiata. Tra questi, le colate detritiche (debris flow) sono tra i fenomeni più rapidi distruttivi e spettacolari. Una colata detritica è una forma di movimento di massa veloce, in cui fango, detrito saturo d'acqua e blocchi si muovono lungo canali di drenaggio preesistenti. Nelle aree periglaciali, l'aumento della fusione del ghiaccio, unito alla disponibilità di sedimento instabile esposto dal ritiro glaciale (depositi sciolti), aumenta la frequenza e l'energia/portata di questi eventi.

La mappatura geomorfologica (Fig. 11) è lo strumento primario per l'identificazione e la mitigazione del rischio associato alle colate detritiche. Attraverso l'utilizzo di GIS, il team coordinato dal Prof. Seppi (UNIPV) ha delineato i canali di scorrimento e i conoidi di deiezione dei rock glacier, distinguendo tra forme attive e relitte per comprendere la storia degli eventi e fornire una base per stimare la probabilità di futuri eventi (si veda intervista Prof. Seppi 3.2.4). La distinzione tra le litologie dei massicci, come tra le rocce ignee di Adamello-Presanella e quelle sedimentarie di Brenta, è cruciale, poiché i tassi di erosione e la resistenza ai processi esogeni influenzano direttamente la disponibilità di detrito per innescare una colata. Il geodatabase, pertanto, non solo classifica la morfologia del terreno (ad esempio, il 36% dell'area è coperto da forme glaciali), ma serve anche come strumento di

prevenzione, poiché evidenzia i processi e le forme del paesaggio che sono attualmente attivi e che necessitano di una gestione territoriale prioritaria.

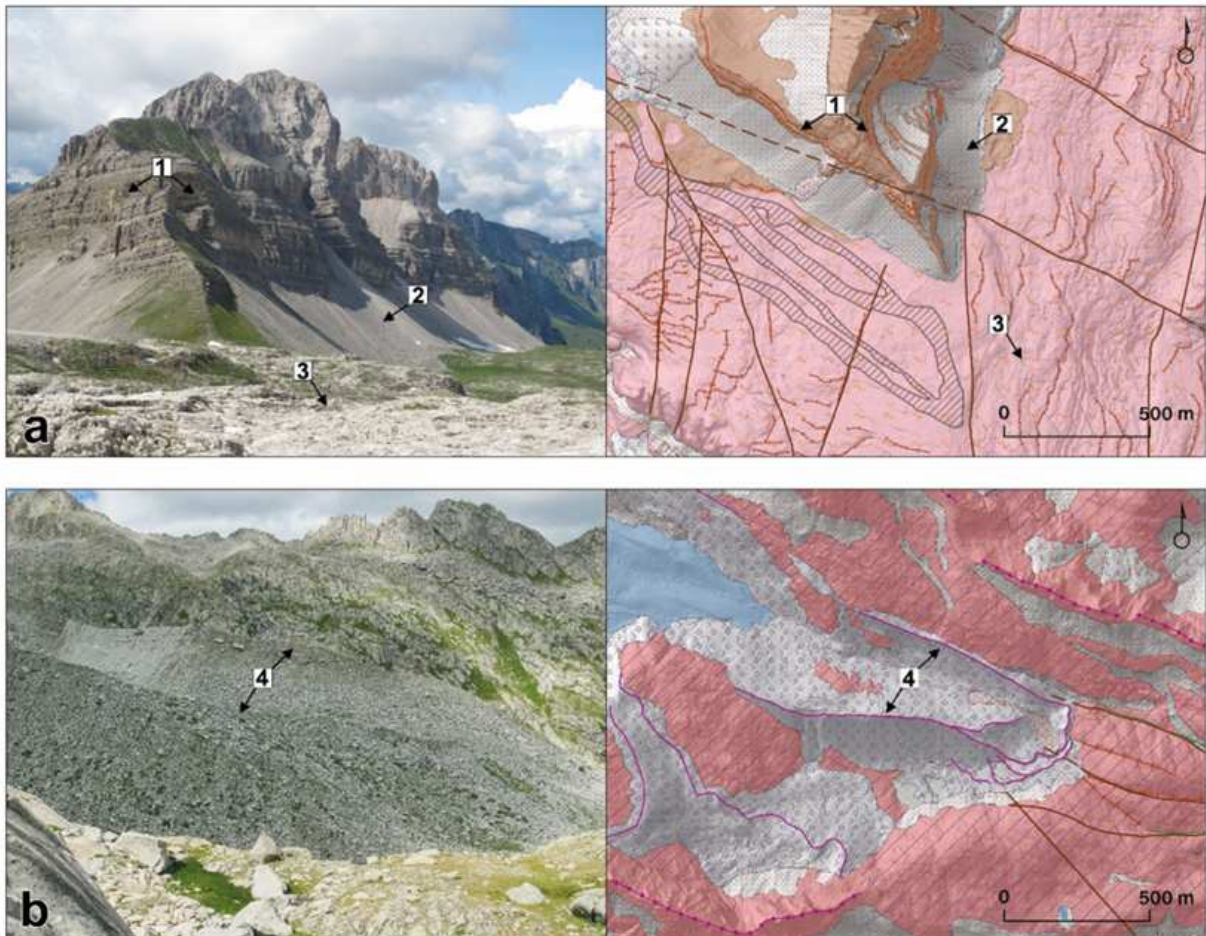


Figura 11 - Esempi che mostrano forme del rilievo rilevanti mappate nel Geoparco. a) falde di detrito e forme strutturali nelle Dolomiti di Brenta; (1) versante a gradoni, (2) falda di detrito, (3) superficie carsificata. b) morene della Piccola Era Glaciale in Val d'Amola; (4) creste moreniche.

Data la sua competenza nella mappatura geomorfologica delle aree alpine, in particolare dell'Adamello Brenta UNESCO Global Geopark, il Professor Seppi e il suo team possono offrire una prospettiva preziosa sul contributo dei geomorfologi agli studi paleoclimatici, anche non essendo direttamente paleoclimatologi.

Per questa ragione gli abbiamo posto qualche domanda in merito al lavoro conclusosi nel 2025. Per illustrare i temi dell'intervista, durante la presentazione viene riprodotto un breve estratto video realizzato con il Prof. Seppi, nel suo studio a Pavia (link alla [cartella_drive](#) in Appendice A). Nel montaggio abbiamo voluto

intervallare il dialogo in studio con immagini del Parco Naturale Adamello Brenta: si tratta di riprese spettacolari effettuate con droni, gentilmente messe a disposizione dal personale dell'area protetta per contestualizzare la ricerca sul campo.

Analisi multiproxy di ADA 270 (Mangili et al., 2025)

Tradizionalmente, la comunità scientifica del settore paleoclimatico ha privilegiato lo studio dei ghiacciai freddi, ossia quelli situati a latitudini elevate o a quote superiori ai 4000 m s.l.m. nelle Alpi, poiché le loro temperature costantemente negative garantiscono la conservazione intatta dei segnali chimici e isotopici primari nelle carote estratte (Oeschger, Langway 1989; Dansgaard 1964; Wagenbach 1989; Schwerzmann et al. 2006).

Al contrario, i ghiacciai temperati, come quello dell'Adamello nelle Alpi Retiche meridionali, sono stati storicamente considerati archivi inaffidabili. In questi apparati, la temperatura del ghiaccio prossima al punto di fusione favorisce la percolazione di acqua liquida, un processo che altera o cancella i marker geochimici solubili (es. ioni e isotopi stabili), compromettendo la continuità del record stratigrafico. Tuttavia, lo studio sul carotaggio profondo ADA270 (Mangili et al. 2025) dimostra come tale limitazione possa essere superata attraverso un cambio di prospettiva metodologica: lo spostamento del focus dai traccianti chimici solubili alle particelle insolubili. Queste ultime, intrappolate nella matrice di ghiaccio, mostrano resilienza ai processi di fusione, preservando intatta la stratigrafia originale e offrendo una nuova chiave di lettura per la storia ambientale degli ultimi millenni.

In questo caso, il valore dell'archivio ADA270 risiede nell'approccio "multiproxy" adottato per la sua decodifica. La ricerca si fonda sul conteggio simultaneo di otto distinte tipologie di particelle, sia biologiche che abiotiche, all'interno della medesima matrice di ghiaccio. Questo spettro include pollini, spore fungine, diatomee, fitoliti, spicole di spugna, microcarboni, tefra (cenere) vulcanica e polveri minerali (Fig. 12). A differenza degli ioni, che vengono dislocati dall'acqua di fusione, queste particelle possiedono dimensioni granulometriche, generalmente tra 2,5 e 350 μm , che ne impediscono il dilavamento attraverso i canali intergranulari del ghiaccio. L'analisi integrata di questi indicatori trasforma il ghiacciaio da semplice "termometro" fisico a complesso archivio ecologico, capace di restituire una narrazione dettagliata delle dinamiche ambientali, indipendentemente dalle alterazioni termiche subite dal corpo glaciale.

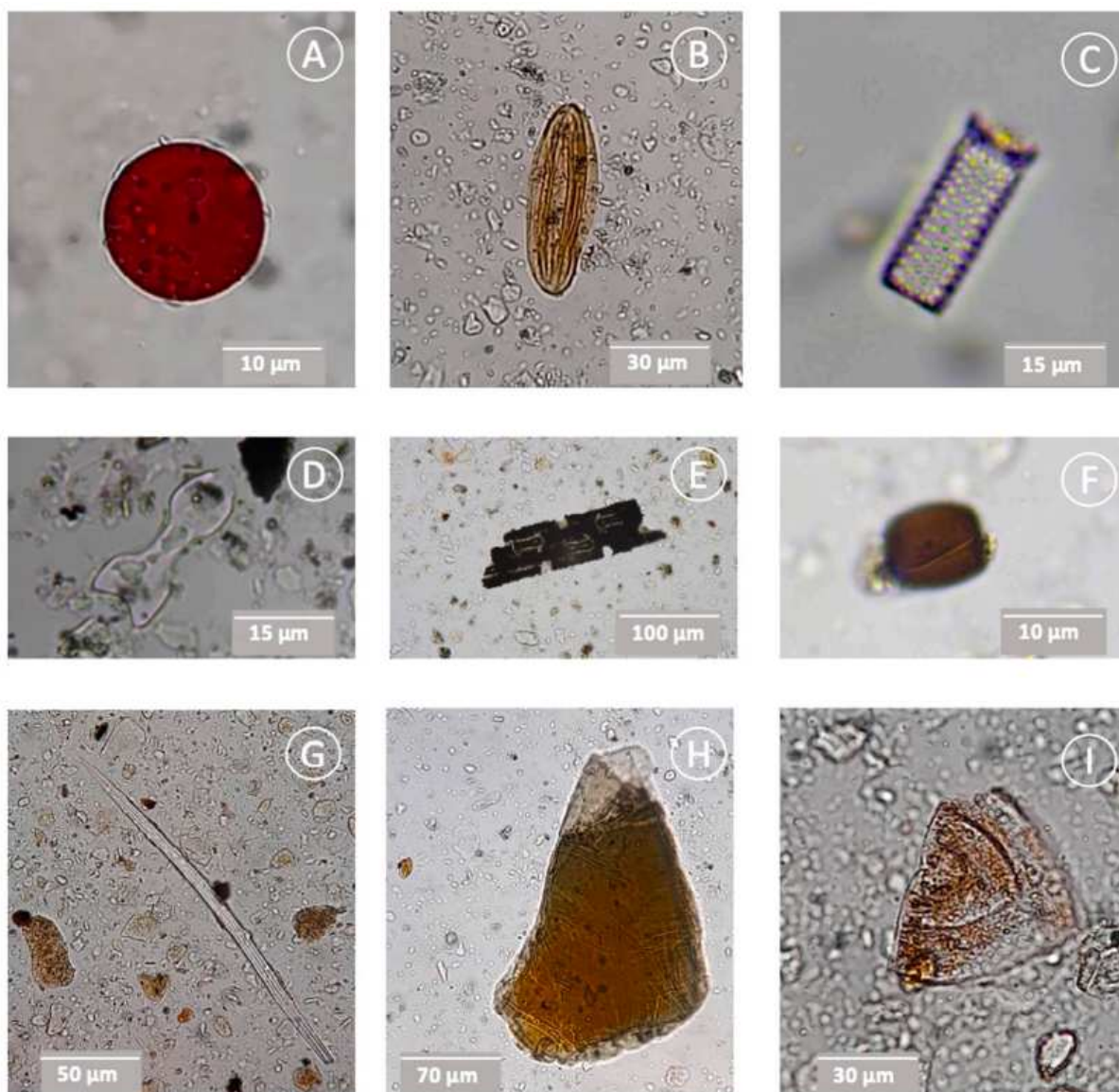


Figura 12 - Principali tipi di particelle rinvenute nella carota di ghiaccio ADA270.

- A. *Sanguina nivaloides*, un'alga nivale
- B. Polline di *Ephedra fragilis*
- C. Diatomea: *Aulacoseira granulata*
- D. Fitoliti
- E. Microcarbone
- F. Spore fungine: *Sporomiella* sp.
- G. Spicola spongina
- H. Particella minerale
- I. Foraminifero: *Frondicularia* sp.

Un aspetto che definisce la qualità di questo archivio del Ghiacciaio dell'Adamello è l'elevata risoluzione temporale, resa possibile da un tasso di accumulo eccezionalmente alto, stimato in circa 0,9 metri di ghiaccio equivalente all'anno. Questo fattore deposizionale permette di preservare un segnale stagionale distinto, leggibile attraverso l'alternanza di strati.

- Strati primaverili-estivi: sebbene rappresentino solo il 2-10% dello spessore annuale a causa della fusione estiva, questi orizzonti appaiono scuri e visibili a occhio nudo (specialmente nei primi 40 metri) a causa dell'altissima concentrazione di particelle accumulate per ablazione.
- Strati autunnali-invernali: costituiscono la maggior parte del volume di ghiaccio (fino al 90%) e si presentano otticamente puliti, con concentrazioni minime di particelle. Questa alternanza ritmica consente di costruire cronologie precise, discriminando gli eventi anno per anno anche in assenza di datazioni radiometriche continue.

L'analisi multiproxy della carota ADA270 rivela la capacità dei ghiacciai temperati di registrare informazioni su due diverse scale geografiche simultaneamente:

- il segnale locale e regionale: l'archivio documenta fedelmente le dinamiche della vegetazione alpina e le attività umane circostanti. I picchi di concentrazione di microcarboni e spore fungine specifiche (es. *Gelasinospora*, associata a substrati carbonizzati) segnalano il verificarsi di incendi boschivi (wildfires) sulle pendici dell'Adamello. Parallelamente, lo spettro pollinico, dominato da essenze come *Alnus*, *Picea* e *Pinus*, permette di ricostruire l'evoluzione della copertura forestale e della fenologia delle piante in risposta ai cambiamenti climatici locali.
- il segnale a lunga distanza: forse l'aspetto più sorprendente è la capacità del ghiacciaio di catturare eventi di trasporto eolico transcontinentale, in particolare dal deserto del Sahara. Questi eventi sono identificati dalla convergenza di più indizi esotici: la colorazione arancio-brunastra degli strati, la presenza di minerali argillosi come la caolinite e la paligorskite, e specifici marker biologici. Tra questi spiccano i pollini di *Ephedra fragilis type* (specie nordafricane), diatomee d'acqua dolce tipiche di paleo-laghi africani (es. *Aulacoseira granulata*) e spicole di spugna (*Spongilla*), tutti trasportati dai venti meridionali fino alle Alpi.

Questo studio su ADA270 ridefinisce il valore paleoclimatico degli archivi glaciali temperati. Nonostante la perdita delle informazioni geochimiche tradizionali, questi apparati si rivelano "biblioteche" storiche di inestimabile ricchezza. In un contesto climatico che vede la progressiva scomparsa dei ghiacciai freddi e la trasformazione in temperati di quelli polari, il protocollo sviluppato dal team guidato dalla Prof.ssa Mangili per ADA270 offre un modello replicabile per estrarre dati paleoambientali ad alta risoluzione, per comprendere le interconnessioni tra paleoclima, vegetazione e circolazione atmosferica globale.

3.2.2 Take home messages

- La criosfera, grazie ai suoi tempi di risposta "a medio termine", è archivio del clima passato e sentinella del presente
- I ghiacciai alpini temperati non sono solo ecosistemi a rischio, ma preziosi archivi da consultare con urgenza
- Le forme geomorfologiche testimoniano il clima del passato e spiegano anche l'attuale instabilità dei versanti alpini
- L'approccio "multiproxy", analizzando particelle insolubili (pollini, polveri, microcarboni), fa parlare anche il ghiaccio temperato

3.2.3 Gancio

Abbiamo visto come il ghiaccio conservi le memorie del passato e come, leggendo questi archivi, la comunità scientifica sia in grado di ricostruire i climi di migliaia di anni fa. Ma a cosa ci serve, all'atto pratico, questo sguardo all'indietro? Questi dati sono le fondamenta su cui poggiano i modelli previsionali di oggi: per sapere se un modello matematico è affidabile nel prevedere il futuro (validazione), gli scienziati lo "testano" chiedendogli di simulare il passato che già conosciamo grazie agli archivi paleoclimatici. Nel nostro prossimo e ultimo appuntamento scopriremo proprio come l'uso dei satelliti moderni e dei sofisticati modelli climatici si intrecci con questi antichi dati per mostrarci, con un grado di accuratezza e dettaglio sempre maggiore, quale strada stiamo percorrendo e quali possono essere le sue possibili biforcazioni future.

3.2.4 Intervista al Prof. Roberto Seppi

1) "Il vostro progetto ha prodotto, dietro alla massima tangibilità della mappa, un nuovo database geomorfologico del Geoparco UNESCO Adamello Brenta. Qual è l'obiettivo principale raggiunto e come si inserisce nel contesto della conservazione del patrimonio geologico alpino?"

"Il progetto appena concluso in realtà non ha prodotto una carta geomorfologica del Geoparco, ma ha realizzato uno strumento digitale (database geomorfologico) che contiene la mappatura e la caratterizzazione di tutte le forme del rilievo del territorio studiato. Il database mette a disposizione il materiale di base per realizzare cartografia geomorfologica (e in questo senso noi abbiamo prodotto alcuni stralci cartografici come test), ma questa richiede comunque un processo produttivo e un editing grafico che non era negli scopi del nostro progetto.

*Il principale obiettivo raggiunto è quello di **aver messo a disposizione del Geoparco un fondamentale strumento conoscitivo del proprio territorio**; la conoscenza delle forme del rilievo e dei processi che le hanno prodotte, attraverso l'uso di un database geomorfologico in continuo aggiornamento, sono elementi che possono **supportare il Geoparco nella conservazione del patrimonio geomorfologico, nella divulgazione scientifica, nella didattica e nella prevenzione dei rischi naturali**. Il Geoparco è un territorio di montagna caratterizzato da processi glaciali e periglaciali attuali e del passato e il database geomorfologico, includendo forme attuali e relitte, consente di analizzare gli eventi geomorfologici che si sono succeduti nel tempo, in relazione a come sono cambiate le condizioni climatiche."*

2) "Il Geoparco è diviso tra il massiccio igneo dell'Adamello-Presanella e le sequenze sedimentarie delle Dolomiti di Brenta. Questo crea una 'notevole ricchezza di forme del paesaggio'. Quanto è importante tenere in considerazione la diversa litologia nell'interpretazione delle forme glaciali e periglaciali, per evitare di attribuire al solo clima delle variazioni che sono invece influenzate dal substrato roccioso?"

*“La mappatura delle forme consente di evidenziare oggettivamente la "geodiversità" dei due settori del Geoparco, ma **non ha l'obiettivo di studiare in dettaglio quali sono i fattori che determinano tale diversità.** Si tratterebbe di fare uno studio dettagliato su quali sono i fattori che condizionano l'evoluzione geomorfologica del territorio, prendendo in considerazione la litologia del substrato, le sue condizioni strutturali, le differenti caratteristiche climatiche, l'intensità e le modalità con le quali agiscono (o hanno agito) i processi morfogenetici nei due diversi settori del Geoparco.*

***Certamente le condizioni litologiche e strutturali del substrato hanno condizionato l'azione morfogenetica dei ghiacciai del passato, ad esempio è sufficiente osservare l'orientazione delle principali valli del settore Adamello Presanella, che segue i principali lineamenti tettonici (faglie).** Tuttavia noi non abbiamo fatto analisi specifiche su questi aspetti, il database geomorfologico semplicemente mette in evidenza le (geo)diversità.”*

3) "Le osservazioni in campo sono state condotte in aree specifiche per verificare e raffinare la geometria delle forme. Potrebbe descrivere come si svolge concretamente un campionamento geomorfologico in ambiente alpino? Ad esempio, quali parametri o caratteristiche di una forma (come una frana o una morena) vengono misurati o valutati in loco per integrarsi poi con il dato da telerilevamento?"

*“A causa della vastità e complessità del territorio da mappare (circa 1100 km²) e il tempo limitato a disposizione (3 anni), i sopralluoghi sul terreno sono stati necessariamente "mirati" su zone specifiche o particolarmente critiche, allo scopo di verificare visivamente quanto era stato mappato da remoto. In realtà, le misure morfometriche e la caratterizzazione topografica delle forme del rilievo (per lo meno alla scala utilizzata per il nostro database) si fanno **direttamente da remoto usando il GIS**; intendo misure come dimensioni delle forme, pendenza, esposizione, curvatura della superficie, ecc. **Direttamente sul terreno, ad esempio su una morena, si possono fare campionamenti e misure specifiche, come ad esempio campionamenti e descrizione di suoli, grado di alterazione del materiale, osservazioni sulla colonizzazione vegetale, campionamenti per datazioni***

radiometriche. Sui rock glacier vengono effettuate misure di spostamento con stazione totale o GNSS, misure geofisiche, misure di temperatura della superficie del suolo. Tutti questi dati possono essere facilmente integrati nel database e vanno a popolare le caratteristiche descrittive delle forme.”

4) "L'analisi dello stato di attività (attivo o relitto) di forme come i rock glacier, anche in un'area alpina che sta subendo rapidi cambiamenti dovuti al riscaldamento climatico può fornire informazioni sui cambiamenti di temperatura e permafrost in passato?"

“I rock glacier sono tra le più diffuse forme degli ambienti periglaciali alpini e sono manifestazioni della presenza di permafrost discontinuo. L'elevata instabilità dei versanti analizzati (41% dell'area) è l'esito di una complessa interazione tra l'eredità del tardo Pleistocene e il riscaldamento attuale. I rock glacier fungono anche da indicatori paleoclimatici: la presenza di forme relitte a quote basse (1800-2000 m) testimonia che 15-12.000 anni fa il permafrost stabilizzava aree oggi a rischio. Se il clima passato ha dunque predisposto il territorio accumulando grandi volumi di detrito e ghiaccio (di origine glaciale o da aggradazione in situ), è l'attuale innalzamento termico a fungere da innesco per il dissesto. Il degrado del permafrost, non più protetto efficacemente dalla copertura di blocchi grossolani che funge da isolante termico, espone queste forme a lenta evoluzione periglaciale a colate od eventi più parossistici come frane e crolli. L'instabilità odierna è quindi la risposta rapida e gravitazionale di un paesaggio fossile che sta perdendo il suo antico equilibrio termico.”

3.2.5 Riferimenti bibliografici

Per la realizzazione del canovaccio per la guida ho attinto le informazioni sostanzialmente dai lavori dei team già citati: Mangili et al., 2025; Seppi et al., 2025; oltre ad altri testi e materiali reperiti online specificati in bibliografia.

3.3.1 Terzo webinar: segnali e previsioni di questo cambiamento

Dopo una riassuntiva carrellata delle variabili afferenti alle componenti del sistema climatico, nella quale non mancano i richiami al *leitmotiv* del *complesso* sistema "Clima", si esplora la complessità del sistema climatico e la difficoltà di redigere proiezioni sul clima del futuro. Nel terzo appuntamento il sistema climatico viene definito caotico e si approfondisce come la sua comprensione e previsione richiedano un approccio combinato **deterministico** e **probabilistico**.

Per elaborare proiezioni future affidabili, la scienza del clima deve tradurre i complessi meccanismi terrestri in linguaggi matematici. Il sistema climatico è infatti regolato da una serie di variabili interconnesse che definiscono lo stato dell'atmosfera, degli oceani e della criosfera.

Come esposto durante il primo incontro, in atmosfera, parametri come temperatura, pressione, velocità del vento, densità e umidità non sono semplici dati meteorologici, ma i fattori che influenzano direttamente il bilancio radiativo della Terra. Attraverso la modulazione dell'effetto serra e dell'albedo (la capacità di riflettere la radiazione solare), queste variabili determinano se il pianeta trattiene o espelle calore. L'umidità regola la distribuzione delle risorse idriche influenzando la formazione delle nubi e degli aerosol, che a loro volta definiscono lo stato termodinamico dell'aria.

Negli oceani, la dinamica è governata da temperatura, pressione e salinità. Questi tre fattori determinano la densità dell'acqua, attivando la circolazione termoalina: un enorme "nastro trasportatore" oceanico essenziale per la distribuzione del calore dai tropici ai poli. Comprendere questa circolazione è vitale per la modellistica, poiché piccole variazioni di salinità possono innescare cambiamenti climatici bruschi, simili a quelli osservati nei record paleoclimatologici (come gli eventi di Heinrich o i cicli di Dansgaard Oeschger).

Infine, la criosfera con estensione e spessore dei ghiacci agisce come volano termico e termostato del pianeta, influenzando sia l'albedo globale che il volume degli oceani.

Dalla teoria alle misurazioni.

Per nutrire i modelli previsionali con dati precisi su queste variabili, ci affidiamo alla flotta satellitare Copernicus. Se la paleoclimatologia ci insegna come queste variabili hanno interagito in passato, i satelliti ci dicono come si stanno muovendo oggi, permettendo ai modelli di "calibrare" le previsioni per i prossimi tempi. Durante la presentazione un breve video illustra i principali satelliti coinvolti nelle misurazioni.

Variabile climatica	Missione satellitare	Ruolo nella modellistica previsionale
Gas serra (CO ₂ , CH ₄)	CO ₂ M / Sentinel-5P	Definisce il forzante radiativo e l'intensità dell'effetto serra nel modello.
Spessore ghiacci	CRISTAL	Determina la velocità di variazione dell'albedo e l'apporto di acqua dolce agli oceani.
Salinità e temperatura oceanica	CIMR / Sentinel-3	Parametri chiave per prevedere il rallentamento o l'accelerazione delle correnti oceaniche.
Umidità e aerosol	Sentinel-5P	Essenziali per modellare il ciclo idrologico e la riflettività delle nubi.
Livello oceani	Sentinel-6	È la variabile di controllo per validare l'output del modello dell'espansione termica.

Tabella 3 - i principali satelliti forniti al progetto Copernicus da Thales Alenia

Quarant'anni fa, quando la potenza dei computer era di circa un milione di volte inferiore a quella di oggi, le equazioni che potevano essere risolte erano più semplici: ad esempio includevano solo una descrizione semplificata dei processi umidi e non una parametrizzazione del suolo profondo e la loro rappresentazione dell'interazione tra le nubi e la radiazione a onda corta (solare) e a onda lunga era semplificata, inoltre la risoluzione spaziale della griglia tridimensionale su cui

venivano risolte le equazioni aveva un punto della griglia ogni 250 - 500 km e l'estensione verticale dell'atmosfera simulata era limitata e comprendeva meno di 10 livelli verticali.

Oggi i modelli di previsione meteo e del clima all'avanguardia includono anche una rappresentazione dinamica sia delle correnti profonde dell'oceano, sia delle onde della superficie, del ghiaccio marino e della vegetazione, e gli schemi che simulano la formazione delle nubi comprendono vari tipi di microparticelle e di meteore che interagiscono in maniera diversa con la radiazione. Nel prossimo futuro ci si aspetta di introdurre l'impatto di una simulazione dinamica del ciclo del carbonio sulla concentrazione di gas serra nell'atmosfera libera o dell'interazione dinamica tra gli aerosol, la radiazione e le nubi (Buizza, 2025).

La consapevolezza che la composizione chimica dell'atmosfera regoli la temperatura terrestre non deriva da un'intuizione recente. Già alla fine del XIX secolo, il chimico svedese Svante Arrhenius formulò una legge pionieristica che legava la concentrazione di anidride carbonica al riscaldamento globale:

"Se la quantità di 'acido carbonico' CO₂ aumenta in progressione geometrica, l'aumento della temperatura aumenterà quasi in progressione aritmetica." (Arrhenius, 1896)

Questa intuizione anticipava il concetto di sensibilità climatica logaritmica: ogni raddoppio della concentrazione di CO₂ produce un incremento di temperatura costante. In termini moderni, ciò significa che l'impatto dei gas serra è cumulativo e persistente, un concetto che trova conferma empirica analizzando l'evoluzione dei gas climalteranti su scale temporali geologiche.

Se osserviamo l'evoluzione della CO₂ nel Cenozoico (gli ultimi 66 milioni di anni), notiamo una discesa graduale da valori superiori a 1000 ppm (parti per milione) fino ai livelli pre-industriali di circa 280 ppm. Tuttavia, la risoluzione dei dati moderni rivela un'anomalia senza precedenti nella velocità di risalita attuale.

Il punto di svolta nelle osservazioni sistematiche è rappresentato dalla Curva di Keeling. Iniziata nel 1958 presso l'osservatorio di Mauna Loa, questa serie storica mostra un andamento a "dente di sega" sovrapposto a una crescita inesorabile. Questa oscillazione stagionale rappresenta il respiro del pianeta: durante la primavera e l'estate dell'emisfero boreale, la vasta superficie delle terre emerse (molto maggiore rispetto all'emisfero australe) permette alla vegetazione di assorbire massicce dosi di CO₂ tramite la fotosintesi, facendone calare la concentrazione atmosferica, per poi rilasciarla in autunno e inverno. Anche le acque più fredde dell'inverno australe hanno una maggior capacità di assorbimento di anidride carbonica.

Tuttavia, il trend di fondo disegna quella che gli scienziati chiamano la "mazza da hockey": una linea quasi piatta per millenni che subisce un'impennata verticale nell'ultimo secolo, segnando il passaggio inequivocabile all'Antropocene.

Per quantificare l'impatto di queste variazioni, la scienza del clima utilizza il concetto di forzante radiativo (W/m²). Esso misura lo squilibrio tra l'energia solare che entra nell'atmosfera e l'energia infrarossa che ne esce. Un forzante positivo indica un riscaldamento.

Le cause che inficiano questo andamento sono molteplici e di diversa natura:

- Gas serra antropici: CO₂, metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O) sono i principali responsabili del forzante positivo.
- Cause naturali: le eruzioni vulcaniche, ad esempio quella del Tambora del 1815 (evidenziata dal cerchio rosso nel grafico), immettono aerosol nella stratosfera che riflettono la luce solare, generando un forzante negativo temporaneo (raffreddamento).
- Altre attività umane: l'emissione di aerosol industriali e i cambiamenti nello sfruttamento del suolo (deforestazione) alterano l'albedo superficiale, modificando ulteriormente la quota di energia trattenuta dal sistema.

L'alterazione del bilancio radiativo produce segnali macroscopici, di cui lo scioglimento dei ghiacci è il più evidente. Monitorando l'estensione dei ghiacci artici tra il 1980 e il 2018, si nota una contrazione drammatica sia nei massimi invernali (fotografie di marzo) che, soprattutto, nei minimi estivi (fotografie di settembre). Il 2012 resta l'anno del record negativo assoluto, un picco minimo che ha allarmato la comunità scientifica per la velocità di degradazione della banchisa.

Questa fusione dei ghiacci continentali (Groenlandia e Antartide), unita all'espansione termica delle acque (l'acqua calda occupa più volume), sta accelerando l'innalzamento del livello dei mari. I dati mostrano un'accelerazione preoccupante del tasso di crescita:

- 1.7 mm/anno nel periodo 1901-2010.
- 2.0 mm/anno restringendo il campo al 1971-2010.
- 3.2 mm/anno nell'ultimo ventennio analizzato (1993-2010).

Questi numeri confermano che il cambiamento climatico non è un processo lineare, ma un fenomeno che sta guadagnando inerzia, rendendo la precisione dei modelli digitali e delle osservazioni satellitari Copernicus strumenti indispensabili per la nostra conoscenza.

Dopo una sessione piena di dati e grafici da interpretare, quindi impegnativa per l'uditorio, il relatore invita il pubblico a rilassarsi e sfidarlo nell'indovinare i titoli e gli autori di alcune opere d'arte, tra le quali si nasconde un'interessante opera grafica di divulgazione scientifica: *Warming Stripes*.

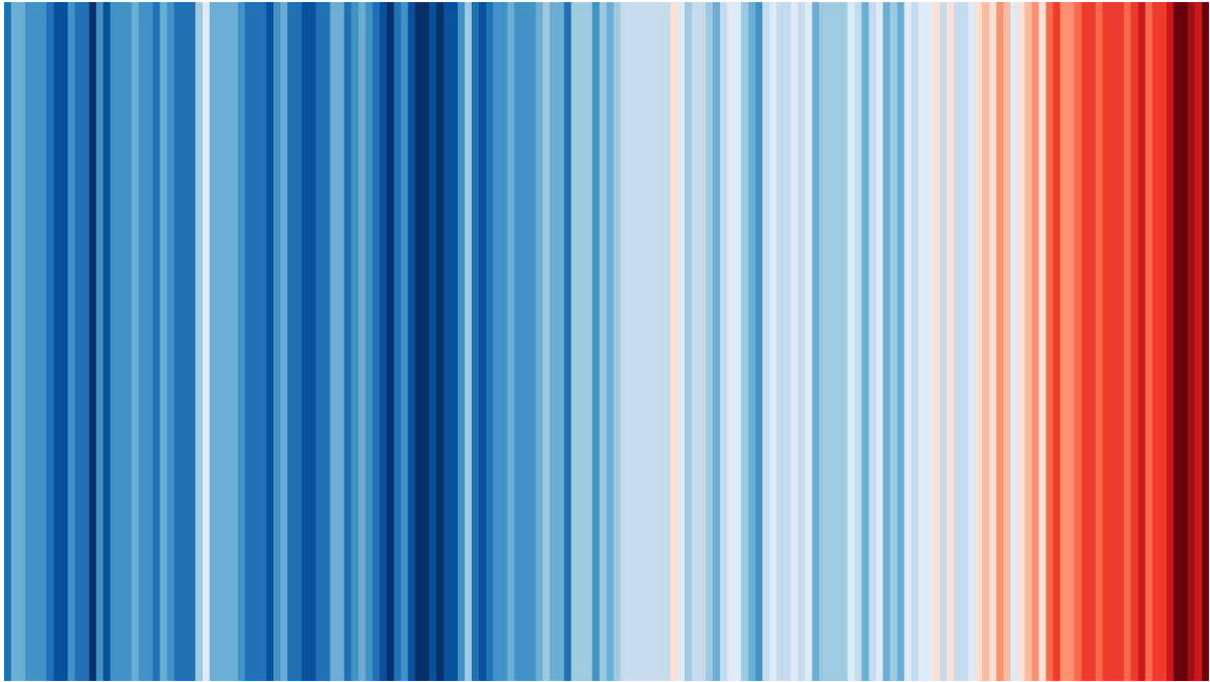


Figura 13 - Warming Stripes: "No words. No numbers. No graphs. Just a series of vertical coloured bars, showing the progressive heating of our planet in a single, striking image." - Ed Hawkins

Ogni striscia rappresenta la temperatura media per un singolo anno, relativa alla temperatura media nel periodo dal 1961 al 2018. Le sfumature di blu indicano anni più freddi della media, mentre il rosso mostra anni che sono stati più caldi della media. La netta banda di strisce rosso scuro sul lato destro della grafica mostra il rapido riscaldamento del nostro pianeta negli ultimi decenni.

La forza comunicativa delle *Warming Stripes* non è un semplice esercizio di estetica, ma scaturisce direttamente dall'esperienza di Ed Hawkins come scienziato di punta nel panorama climatologico internazionale. Hawkins è infatti una figura centrale all'interno del Working Group I dell'Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, l'organismo delle Nazioni Unite incaricato di fornire una sintesi rigorosa e oggettiva della conoscenza scientifica sul clima futuro.

L'IPCC ha la sua sede ufficiale a Ginevra e la sua fondazione risale al 1988, un anno cruciale in cui la consapevolezza scientifica sul riscaldamento globale iniziò a richiedere una risposta politica coordinata a livello globale. L'istituzione fu il risultato di una collaborazione tra l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e il Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP). L'obiettivo era creare

un'autorità scientifica *super partes* che potesse fornire ai governi del mondo valutazioni periodiche e rigorose sullo stato del clima, basate non su opinioni politiche, ma sulla revisione sistematica della letteratura scientifica prodotta a livello globale.

La struttura dell'IPCC è concepita per garantire l'eccellenza e l'imparzialità attraverso la suddivisione in tre Working Groups. Il Working Group I (WGI), si concentra sulle basi fisiche del cambiamento climatico. Il Working Group II (WGII) esamina invece gli impatti del riscaldamento globale, l'adattamento delle società e la vulnerabilità degli ecosistemi. Infine, il Working Group III (WGIII) esplora le strategie di mitigazione, ovvero le azioni concrete per ridurre le emissioni di gas serra. Questa tripartizione assicura che ogni rapporto di valutazione (come l'attuale AR6) copra l'intero spettro della crisi climatica.

Nello specifico, il WGI, pur non conducendo ricerche originali, è colonna portante dei rapporti di valutazione, poiché si occupa di esaminare le basi fisiche del sistema climatico, di analizzare e sintetizzare i dati di migliaia di studi scientifici e le proiezioni future, permettendo all'IPCC di fornire ai decisori politici una visione oggettiva e condivisa.

L'integrazione degli *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) all'interno del sesto rapporto di valutazione dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2021) rappresenta una svolta di metodo che definisce la moderna climatologia come una scienza intrinsecamente transdisciplinare (O'Neil et al., 2014). Se in passato i modelli si concentravano prevalentemente sulla risposta fisica del sistema Terra alle concentrazioni di gas serra, con l'avvento degli SSP il focus si è spostato sulle dinamiche umane, quelle paradossalmente meno prevedibili, unendo in un unico scenario coerente la demografia, l'economia, la sociologia e la geopolitica. Questo lavoro permette di comprendere che il riscaldamento globale non è un fenomeno isolato, ma l'esito di precise traiettorie di sviluppo della società civile.

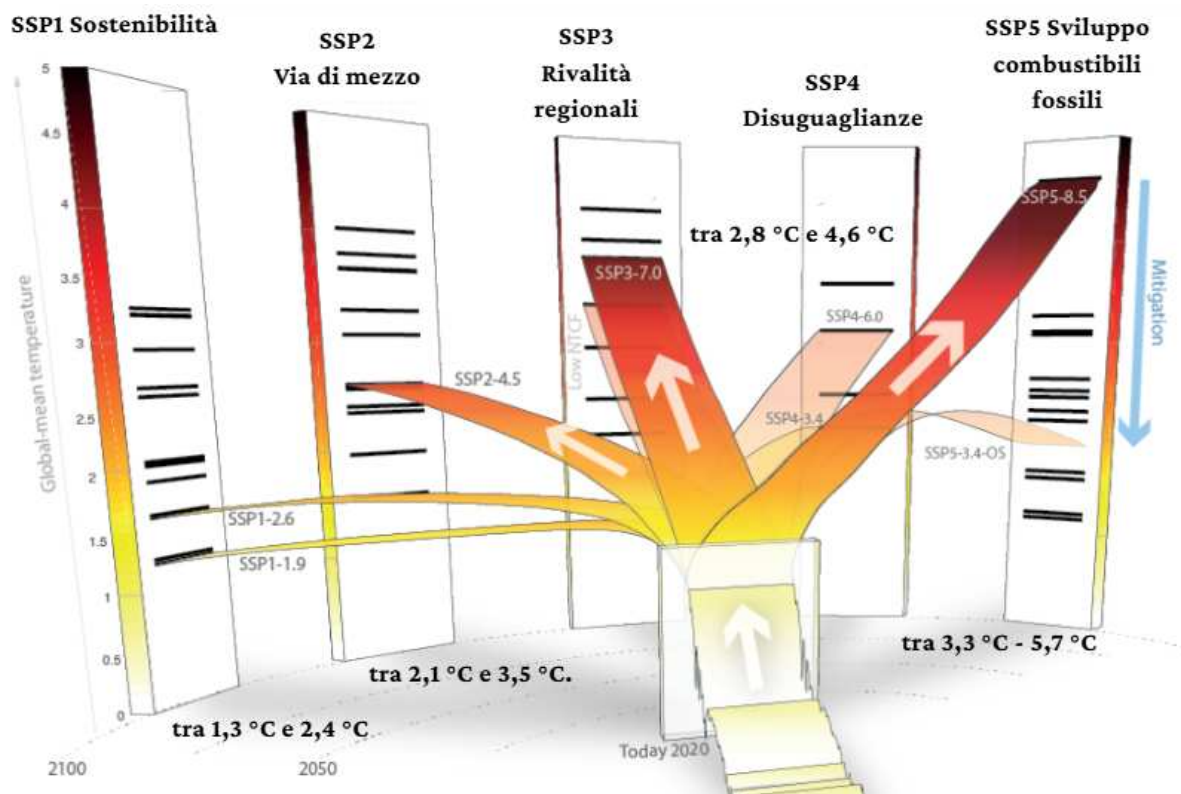


Figura 14 - Shared Socio-economic Pathways: le 5 strade che si dipanano per il nostro futuro. Modificato da Meinshausen et al. (2020)

In particolare, lo scenario SSP2-4.5, denominato "Middle of the Road" (via di mezzo), funge da termine di paragone critico per valutare l'efficacia delle attuali politiche globali. Esso descrive un mondo in cui il progresso tecnologico e sociale prosegue lungo binari storici, senza strappi radicali ma anche senza la necessaria accelerazione verso la sostenibilità. Dal punto di vista della fisica del clima, questo percorso proietta il pianeta verso un aumento termico di circa 2,7°C entro la fine del secolo, un valore che, confrontato con i dati millenari estratti dalle carote di ghiaccio analizzate nei capitoli precedenti, evidenzia una rottura drastica con la stabilità dell'Olocene, tanto da spingere la comunità scientifica a battezzare l'Antropocene. Le carote di ghiaccio analizzate nel modulo 2 ci hanno mostrato la stabilità del sistema climatico pre-industriale, l'integrazione degli scenari SSP2-4.5 nel Modello Climatico Globale rivela che l'inversione di tendenza del modello socio-economico attuale è ancora troppo lenta rispetto alla risposta del sistema Terra.

La forza divulgativa di questo nuovo metodo risiede nella sua capacità di mostrare come le sfide alla mitigazione e all'adattamento siano legate a variabili non

climatiche: in un mondo caratterizzato da una crescita economica lenta, da forti disuguaglianze e conflitti, la capacità della società di rispondere ai segnali d'allarme della natura diminuisce drasticamente. La transdisciplinarietà degli SSP ci insegna dunque che la soluzione alla crisi climatica è soggetta alla complessa interazione tra le scelte politiche, l'equità sociale e la gestione delle risorse tecnologiche. Il clima smette di essere solo una variabile ambientale per diventare il riflesso diretto della resilienza e della cooperazione umana su scala globale.

In questa cornice la comunicazione della scienza non è solo traduzione di contenuti complessi in un linguaggio semplice, ma una negoziazione continua tra mondi diversi (scienza, politica, media, cittadini,...) (Bucchi, 2002).

3.3.2 Take home messages

- I modelli confermano: l'unione tra dati satellitari e archivi storici prova un'impennata di CO₂ senza precedenti.
- La forza dell'immagine: grafiche come le *Warming Stripes* sintetizzano abilmente un tema critico su cui gli scienziati lavorano da anni.
- Il futuro è una scelta: gli scenari IPCC (SSP) dimostrano che il clima di domani dipende dalle nostre azioni socio-politiche di oggi.

3.3.3 Messaggio di chiusura

La lettura del sistema climatico, paragonato ad un'orchestra, attraverso la paleoclimatologia, ci ha permesso di decifrare lo spartito del passato per comprendere le dissonanze del presente. Le proiezioni dell'IPCC ci pongono ora davanti a una responsabilità ineludibile: il sistema climatico non è più solo un'orchestra che suona guidata esclusivamente dalle forze della natura, ma un *ensemble* in cui l'umanità ha prepotentemente e rapidamente preso il ruolo di direttore. La scienza ci ha fornito gli strumenti per leggere la musica e prevedere le prossime battute; la vera sfida non è più puramente accademica ma diventa profondamente civica e sociale.

3.3.4 Riferimenti bibliografici

Per la realizzazione del testo per la guida ho attinto principalmente da *Il meteo e il clima* del Prof. Roberto Buizza, consigliato durante le lezioni del corso di Paleoclima e Cambiamento Climatico Globale, oltre ad altri testi e materiali reperiti online specificati in bibliografia.

4. Discussione e conclusioni

Il modello di Connessioni Culturali si prefigura efficace nella divulgazione scientifica, specialmente per temi complessi come la paleoclimatologia. Esso, unito ad un'adeguata tecnica narrativa, permette di superare la difficoltà nella visualizzazione del tempo profondo e di rendere tangibili concetti astratti.

In fase di sperimentazione ho trovato utile un possibile riarrangiamento della proiezione delle slide; in quanto con il setting tradizionale, tradotto nella grafica *picture in picture* (Fig.15), viene limitata l'efficacia della gestualità del corpo del relatore. Potrebbe essere interessante il test di uno dei tre appuntamenti con il relatore in piedi, più distante dalla telecamera, con una lavagna multimediale sulla quale sono proiettate le presentazioni (Fig.16). In tal modo il linguaggio del corpo potrebbe supportare ulteriormente la trasmissione dei concetti all'*audience*.

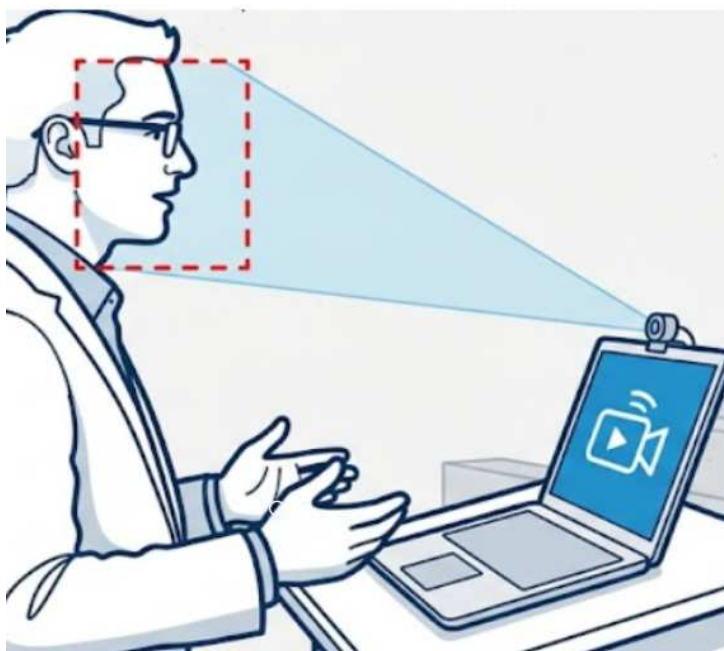


Figura 15 - Setting tradizionale: il cono di ripresa del webinar si limita al solo volto del relatore, trascurando il linguaggio del corpo

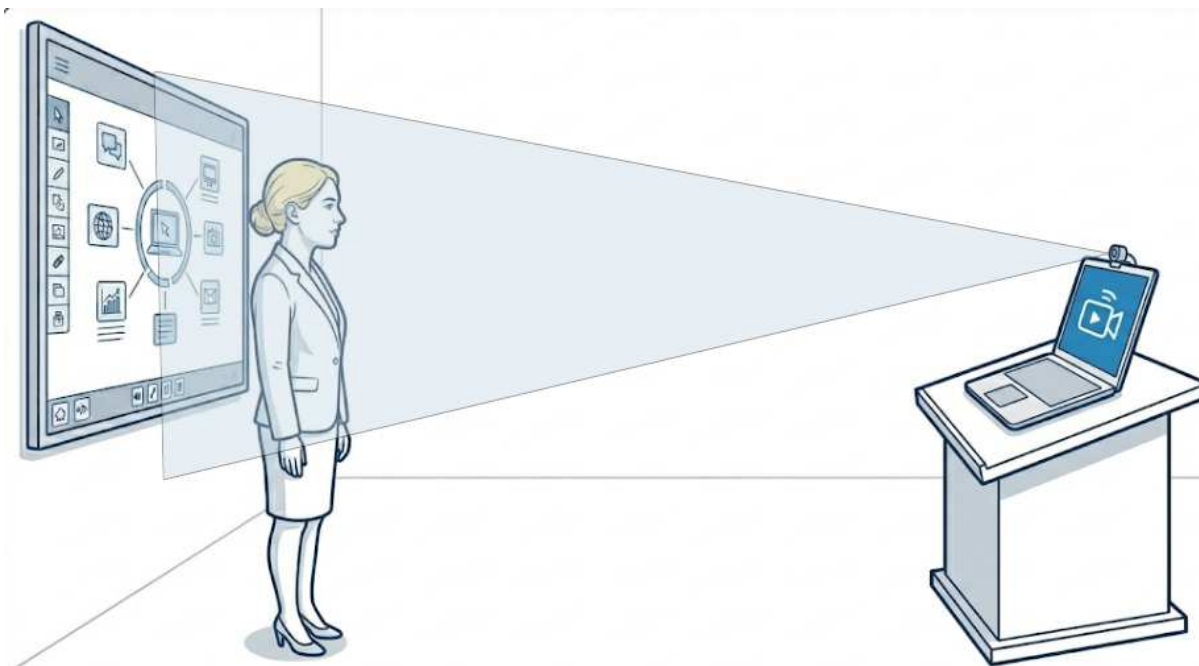


Figura 16: La lavagna interattiva multimediale consente al relatore di utilizzare il linguaggio del corpo in stretta relazione alle immagini presentate

Attraverso questi tour virtuali, un pubblico vasto può quindi visitare luoghi di ricerca normalmente inaccessibili, come il ghiacciaio dell'Adamello per l'estrazione di carote di ghiaccio, o analizzare in dettaglio microfossili o tracce di polline. Questo aiuta a rendere l'evidenza scientifica meno astratta e più convincente, mostrandone le prove dirette e a contrastare la disinformazione.

Passando alle tematiche trattate nel cappello finale del terzo *webinar* e confrontando grafici storici con l'impennata verticale della CO₂ negli ultimi decenni, insieme al parere degli esperti climatologi, si chiarisce che il problema non è il cambiamento climatico in sé, ma la sua velocità e la sua origine antropica. Gli schemi narrativi del secondo e terzo incontro trasformano un argomento complesso e spesso percepito come "politico" in un'esperienza di contatto con la comunità scientifica, più coinvolgente e accessibile. Tuttavia, l'analisi dei dati paleoclimatici e il confronto con gli scenari futuri dell'IPCC portano inevitabilmente a una riflessione che risiede al di fuori della pura ricerca scientifica. La divulgazione di questi temi non avviene in un ambiente sterile, ma si scontra con la complessità del tessuto sociale e psicologico dell'interlocutore. Durante il lavoro di esposizione dei dati, potrebbe emergere come

la reazione del pubblico non sia quasi mai puramente razionale. Esiste una profonda barriera ideologica che spesso precede la comprensione scientifica (Bucchi, 2002): la posizione politica e il background culturale dei cittadini agiscono come filtri che possono distorcere o respingere l'evidenza delle carote di ghiaccio o delle proiezioni SSP.

Questa difficoltà di ricezione è alimentata dalla natura stessa del fenomeno: il cambiamento climatico non è un evento circoscritto, non è uno tsunami o una pandemia, ma un aumento statistico di eventi, risulta quindi estremamente complesso chiedere sforzi collettivi per cambiamenti che i media e gli scienziati proiettano in un orizzonte lontano, verso il 2050 o il 2100, percependoli come distaccati dal presente. Questa sfasatura temporale incide profondamente sulla nostra sensibilità: le evidenze ambientali del riscaldamento globale, pur essendo facilmente tracciabili, faticano a essere interiorizzate. (Pasotti, 2021)

Elisa Palazzi, climatologa all'Università di Torino, presentando un libro per adolescenti: "pensare alla fusione dei ghiacciai o all'innalzamento del livello dei mari non restituisce un'idea immediata di rapidità, poiché per la nostra percezione del tempo non sono eventi di cui ci accorgiamo da un giorno all'altro. La cronaca si accende solo davanti all'alluvione intensa o al crollo improvviso di un ghiacciaio (...). Purtroppo, solo quando avviene la catastrofe si parla di cambiamento climatico, mentre la tendenza a lungo termine - il cuore del problema (*nda*) - finisce per non sembrare rilevante nel quotidiano del cittadino" (Palazzi & Taddia, 2023).

In questo contesto, la ricerca di uno stimolo culturale diventa fondamentale per elevare il dibattito oltre l'emotività dei singoli disastri. Le indagini serali proposte nelle Connessioni Culturali offrono una "distrazione piacevole" che unisce il rigore scientifico alla bellezza della scoperta, permettendo di intercettare la sfera personale attraverso il fascino della storia planetaria. Tuttavia, trovo opportuno citare anche il rischio che la crisi climatica possa essere ridotta a mero oggetto di "sfoggio culturale", un tema intellettuale che non si traduce in impegno nelle scelte quotidiane, incluse quelle politiche.

La discussione deve invece approdare a una matura consapevolezza come cittadini, riconoscendo il peso della storia e dell'equità globale. Storicamente sono i paesi occidentali i primi massicci emettitori di CO₂ e ancora oggi i paesi con il più alto tasso

di emissioni pro capite. È dunque nostra responsabilità etica e politica dimostrare che è possibile un disaccoppiamento tra la crescita economica e del benessere e la crescita delle emissioni (Buizza, 2025).

La sfida della divulgazione scientifica transdisciplinare sul cambiamento climatico sta proprio qui: trasformare la fascinazione per la ricerca e il dato scientifico in una responsabilità civile attiva, per provare a colmare il divario tra la percezione individuale e l'urgenza climatica globale.

5. Note

Il lavoro di raccolta dati e stesura è ufficialmente iniziato il 1 settembre 2025 e si è necessariamente concluso il 13 aprile 2026.

Nel corpo del testo, al termine “relatore”, è da considerarsi strettamente associato il termine “relatrice”, così come per il caso di scienziate, ricercatrici, studiose, ecc...

Ringrazio sentitamente Claudia Lupi (UniPV) per avermi trasmesso l'interesse, la preparazione e la tecnica comunicativa per i temi trattati, Roberto Seppi (UniPV), Marco Gaetani (IUSS Pavia), Gabriella Ragozzino (Arteitalia), Michele Zeni (Parco Naturale Adamello Brenta), Roberto Sacchi (UniPV), per la loro disponibilità e fiducia nel progetto e Ilaria per l'amicizia e il supporto pratico ed emotivo.

6. Riferimenti bibliografici

Acta Plantarum. (2007-presente). *Alnus alnobetula* (Ehrh.) K.Koch - Scheda IPFI. https://www.actaplantarum.org/flora/flora_info.php?id=500249 (Consultato il 07/03/2026).

Arrhenius, S. (1896). "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground". The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(251), 237-276. DOI: 10.1080/14786449608620846.

Baroni, C. (2004). Geomorfologia glaciale e variazioni climatiche. In *Il Progetto Strategico del CNR: Variazioni climatiche e impatto sull'ambiente e sulla salute*. Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Belknap, D. F. (2024). *Ice core*. In Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/ice-core>

Bucchi, M. (2002). *Scienza e società*. Il Mulino.

Buizza, R. (2025). *Il meteo e il clima*. Carocci Editore.

Carturan, L., Baroni, C., Becker, M., Bellin, A., Cainelli, O., Carton, A., Casarotto, C., Dalla Fontana, G., Godio, A., Martinelli, T., Salvatore, M. C., and Seppi, R.: Decay of a long-term monitored glacier: Careser Glacier (Ortles-Cevedale, European Alps), *The Cryosphere*, 7, 1819–1838, <https://doi.org/10.5194/tc-7-1819-2013>, 2013.

Chaplin, C. (Regista). (1936). *Modern Times*. United Artists.

Corradini, C. (2016). *Foraminiferi planctonici e radiolari*. Università degli Studi di Trieste. <https://moodle2.units.it/>

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436–468.

Frauenfelder, R., & Käab, A. (2000). Towards a palaeoclimatic model of rock-glacier formation in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 31, 281–286.

Frauenfelder, R., Haeberli, W., Hoelzle, M., & Maisch, M. (2001). Using relict rockglaciers in GIS-based modelling to reconstruct Younger Dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alps. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 55, 195–202.

Hawkins, E. (2018). *Warming stripes*. Climate Lab Book. Disponibile su: <https://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/warming-stripes/>

Il Dolomiti. (2021). *Incendio nel bosco tra Levico e Vetriolo*. <https://www.ildolomiti.it/>

Imbrie, J. (1985). A theoretical framework for the ice ages. *Journal of the Geological Society*, 142(3), 417–432.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press.

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 105(6), 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>

Loulergue, L., Schilt, A., Spahni, R., et al. (2008). Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years. *Nature*, 453(7193), 383–386.

Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., et al. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379–382.

Mangili, C., & Maggi, V. (2025). *Multiproxy reconstruction of the annual signal in a temperate glacier: The Adamello ADA270 ice core*.

Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K., and

Wang, R. H. J.: *The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500*, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>, 2020.

Mercalli, L. (2025). *Breve storia del clima in Italia*. Einaudi.

NASA Advisory Council. (1988). *Earth System Science: A program for global change*. National Aeronautics and Space Administration.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., et al. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122, 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

Oeschger, H., & Langway, C. C. (1989). *The environmental record in glaciers and ice sheets*. John Wiley & Sons.

Palazzi E., Taddia F. (2023). *Bello Mondo. Clima, attivismo e futuri possibili: un libro per capire quello che gli altri non vogliono capire*, Mondadori.

Pasotti, J. (2020). *Cambiamento climatico*. Scienza Express.

Piombino, A. (2016, 21 settembre). *L'influenza delle condizioni climatiche nel popolamento dell'Europa prima e durante la glaciazione wurmiana*. Scienzaedintorni. <https://scienzaedintorni.blogspot.com/>

Ruddiman, W. F. (2014). *Earth's Climate: Past and Future* (3rd ed.). W.H. Freeman and Company

Schwerzmann, A., et al. (2006). Glaciological characteristics of a high-alpine firn saddle (Colle Gnifetti, 4450 m a.s.l.). *Journal of Glaciology*, 52(176).

Seppi, R., et al. (2010). *Rock glacier relitti e antica distribuzione del permafrost nel Gruppo Adamello Presanella (Alpi Centrali)*.

Seppi, R., et al. (2025). Geomorphological mapping for geoh heritage protection and valorisation: The digital database of the Adamello Brenta UNESCO Global Geopark (European Alps).

Smith, B., et al. (2020). Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes. *Science*, 368(6496), 1239–1242.

<https://doi.org/10.1126/science.aaz5845>

Wagenbach, D. (1989). Environmental records from Alpine glaciers. In H. Oeschger & C. C. Langway (A cura di), *The environmental record in glaciers and ice sheets*. John Wiley & Sons.

Wolfe, J. A. (1978). A paleobotanical interpretation of Tertiary climates in the Northern Hemisphere. *American Scientist*, 66(6), 694–703.

7. Appendice A

A.1 Primo webinar: le basi del clima

A.2 Secondo webinar: archivi paleoclimatici nei ghiacci

A.3 Terzo webinar: segnali e previsioni di questo cambiamento

Link alla cartella Drive con la video intervista:

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1SA-Qwj7rHr6cKhX9r0dt3xR-tA-zMK4Z>

APPENDICE A.1



I viaggi virtuali che **illuminano** la mente

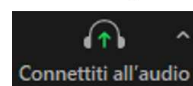
Paleoclima e cambiamento

climatico globale:

1- Le basi del Clima

Se non senti
l'audio cerca
questa icona
e clicca sul
messaggio
che compare

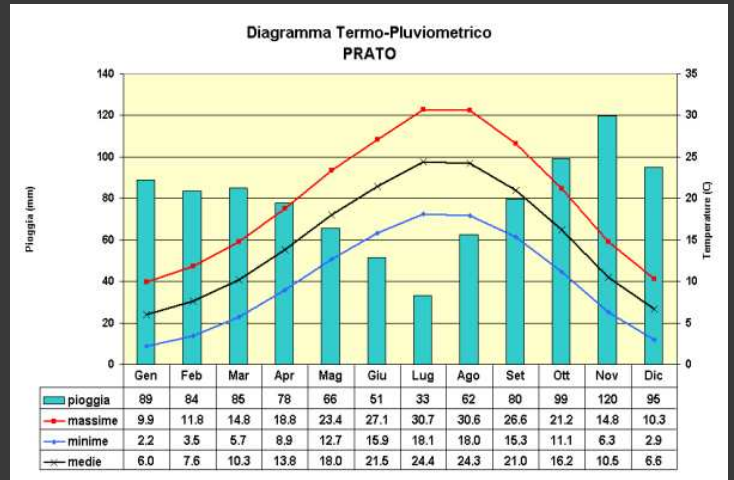
Supporto Tecnico:
02 3598 1534



Differenze tra meteo e clima



Sinottico: IlMeteo



Termopluviogramma della città di Prato

Grafico: consorzio LaMMA

La fonte energetica del sistema: i raggi solari

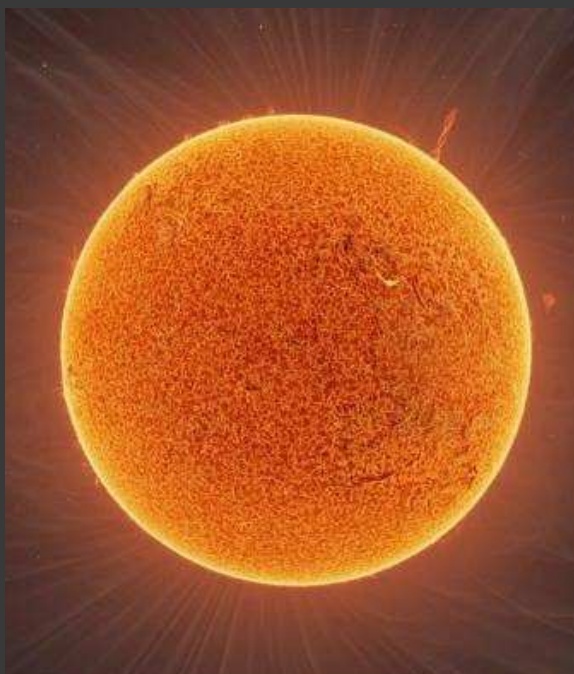
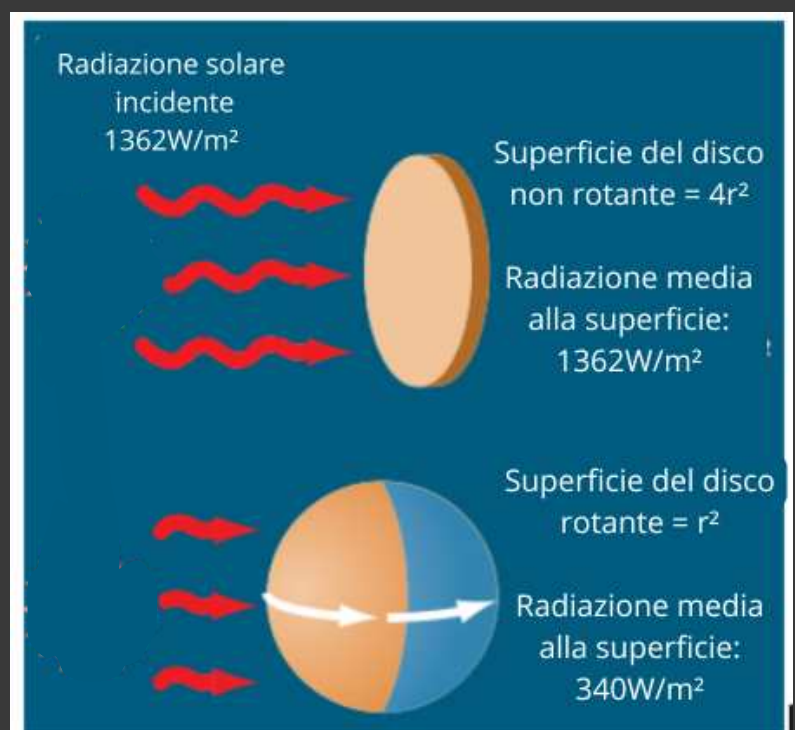


Foto: Andrew McCarthy e Jason Guenzel



Uno sguardo ai nostri vicini di casa

Pianeta	Atmosfera	Albedo	Temperatura
Venere	Molto densa	0.70 - 0.76	470°C
Terra	“ottimale”	0.30 - 0.35	16°C
Marte	Rarefatta	0.15 - 0.25	-63°C



Venere

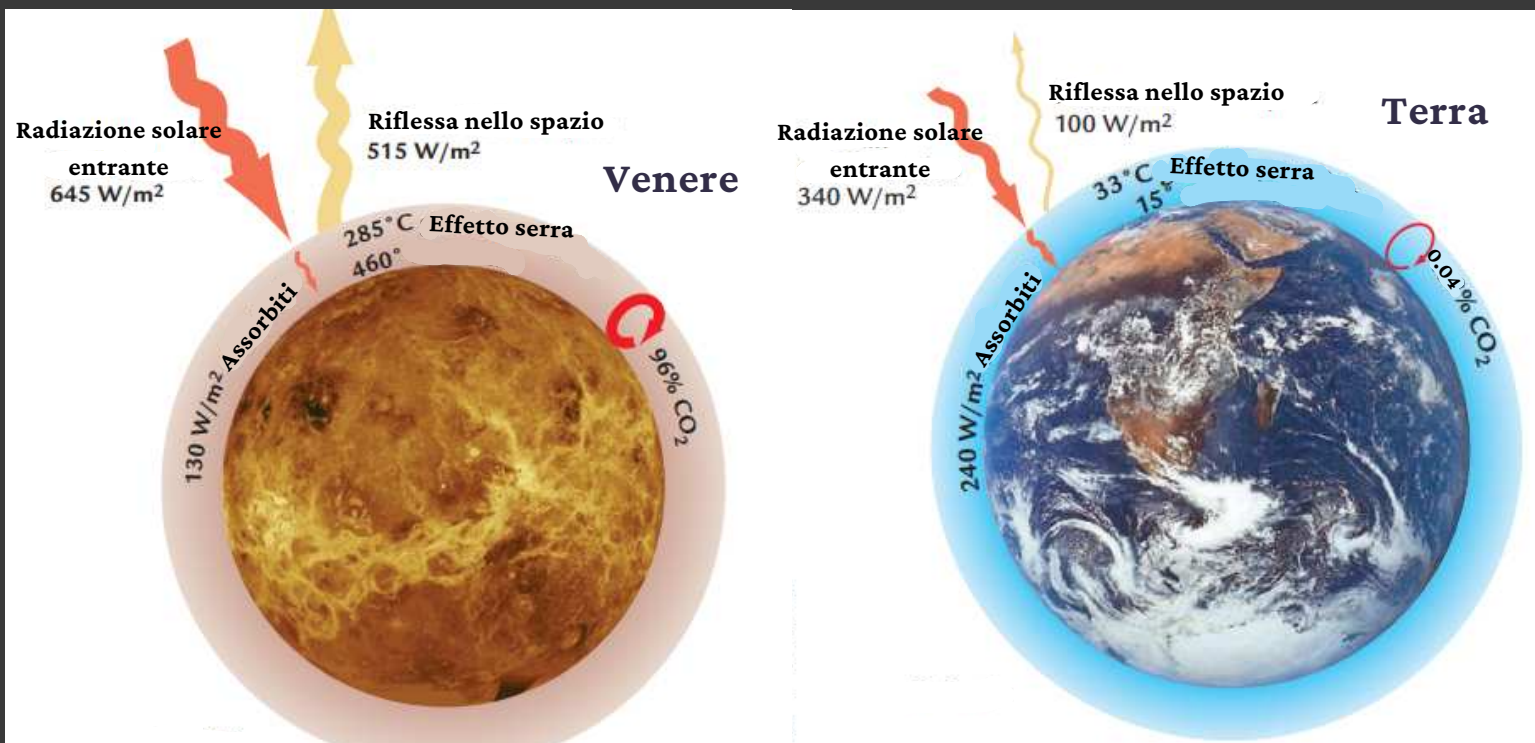


Terra

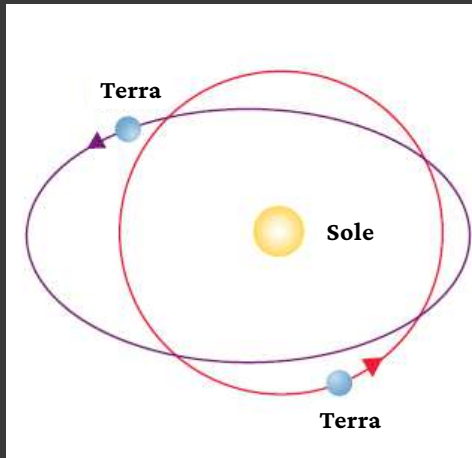


Marte

Un confronto tra due pianeti “simili”

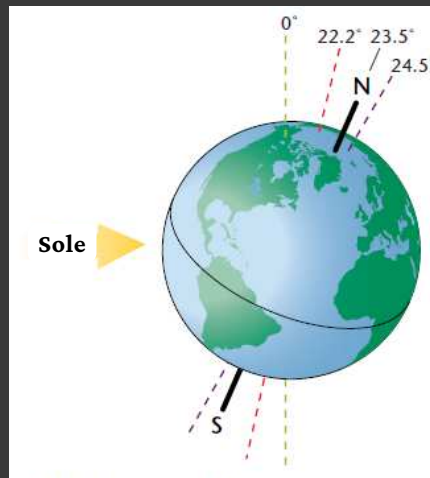


Terra: variazioni dell'irraggiamento solare



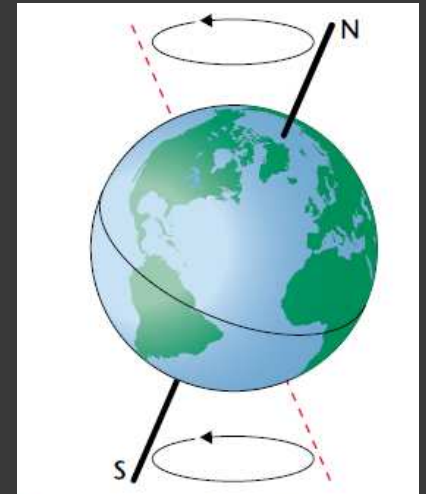
**Eccentricità
dell'orbita**

circa 100.000 anni



**Inclinazione
dell'asse terrestre**

circa 41.000 anni

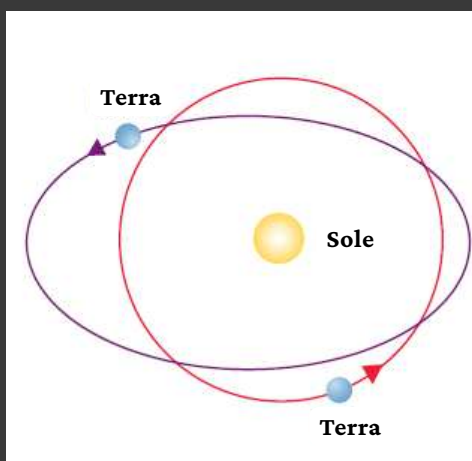


**Precessione degli
equinozi**

circa 26.000 anni

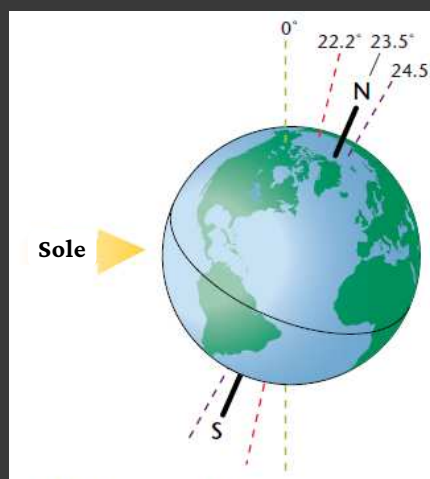
Immagini: Zanichelli

Terra: variazioni dell'irraggiamento solare



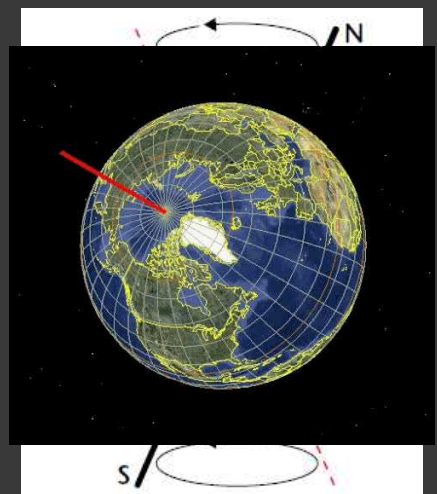
**Eccentricità
dell'orbita**

circa 100.000 anni



**Inclinazione
dell'asse terrestre**

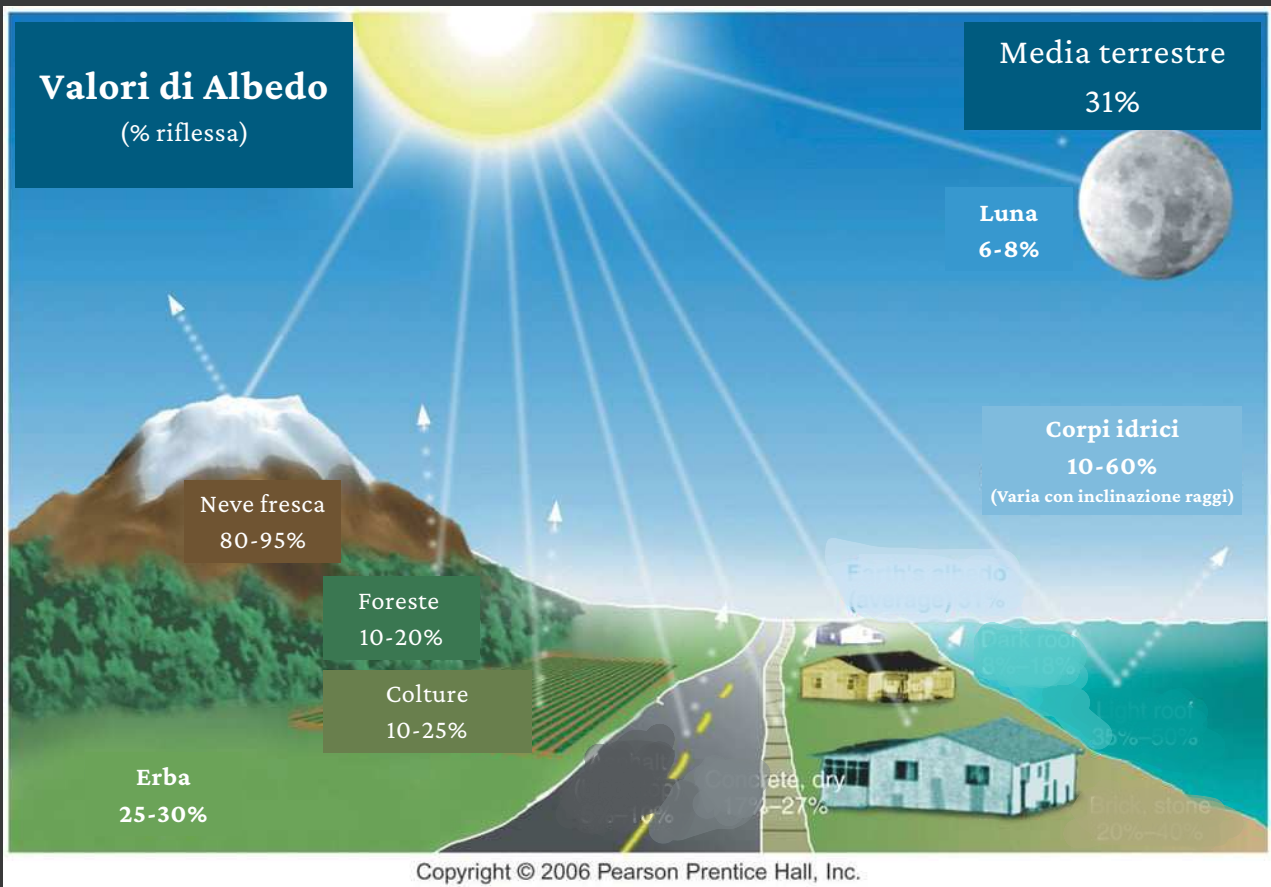
circa 41.000 anni



**Precessione degli
equinozi**

circa 26.000 anni

Immagini: Zanichelli



Le cinque componenti del sistema climatico

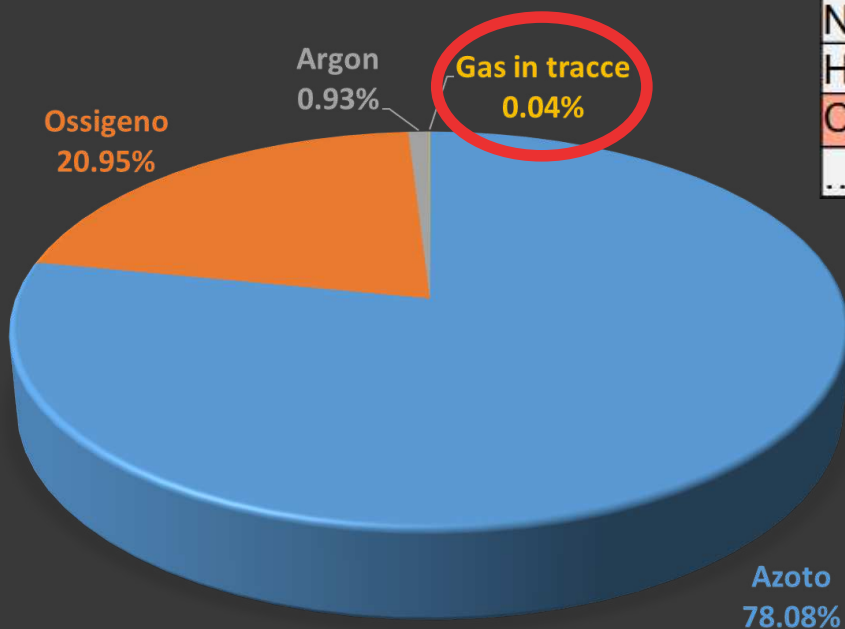


L'atmosfera terrestre: circolazione



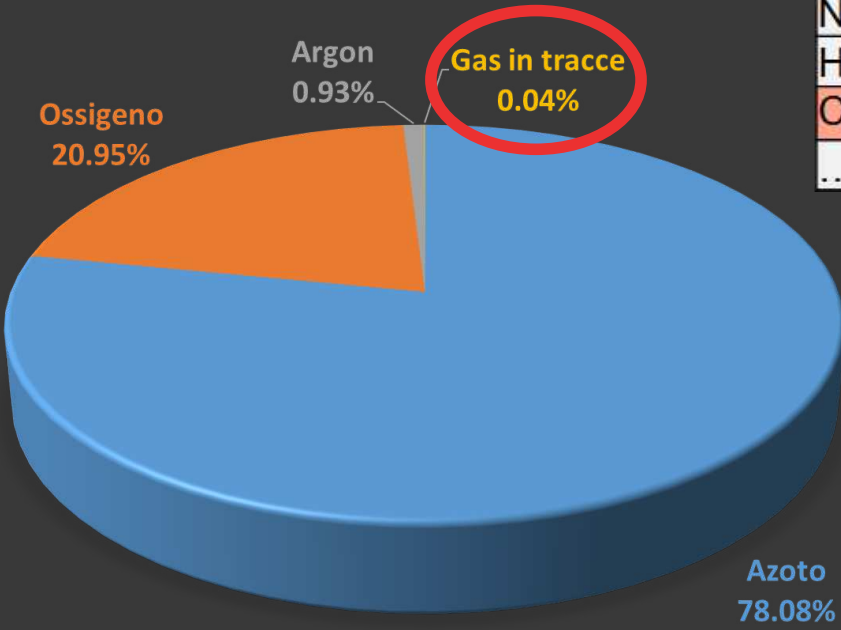
Immagine NOAA

L'atmosfera terrestre: pochi gas ma importantissimi

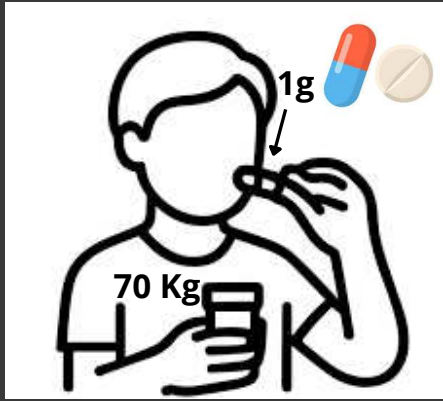


CO ₂	0.0425%
Ne	0.0018%
He	0.0005%
CH ₄	0.0002%
...	

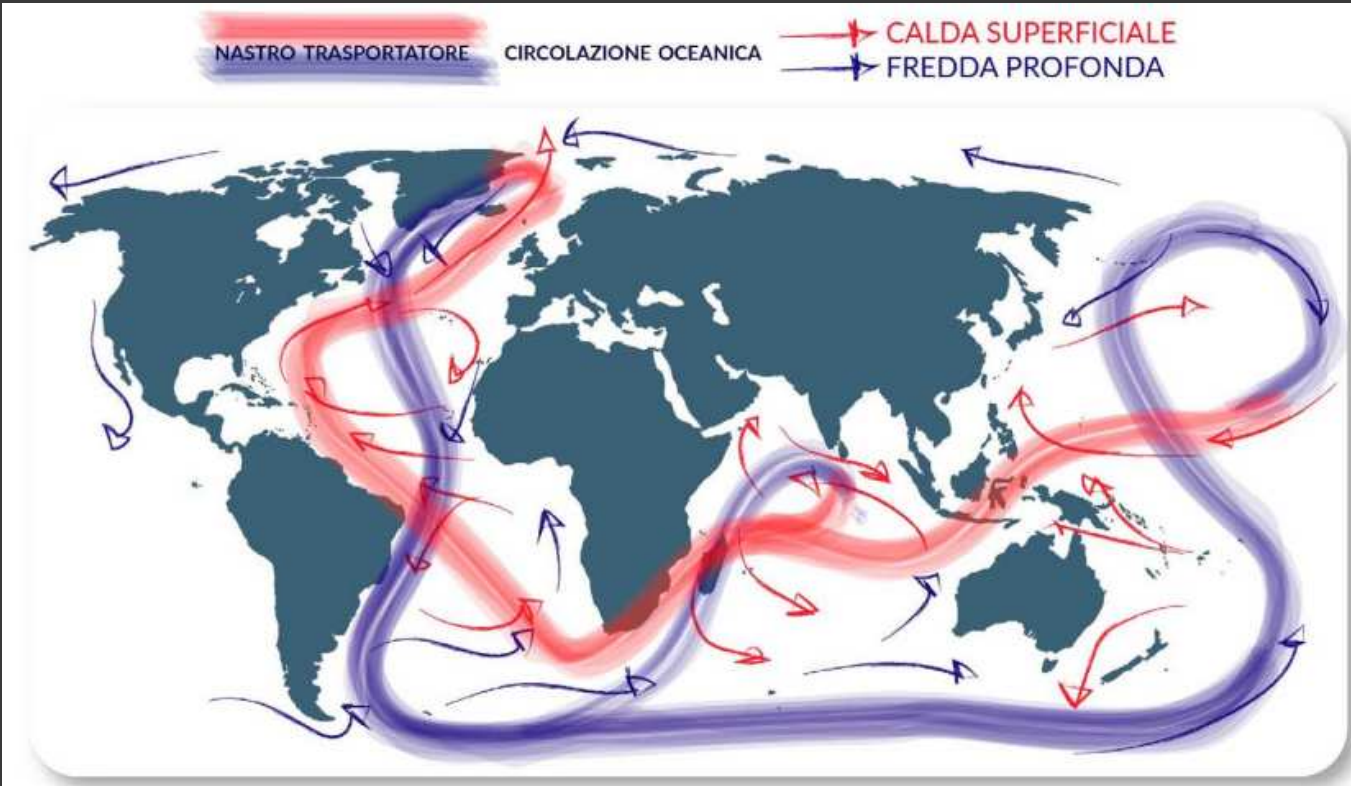
L'atmosfera terrestre: pochi gas ma importantissimi



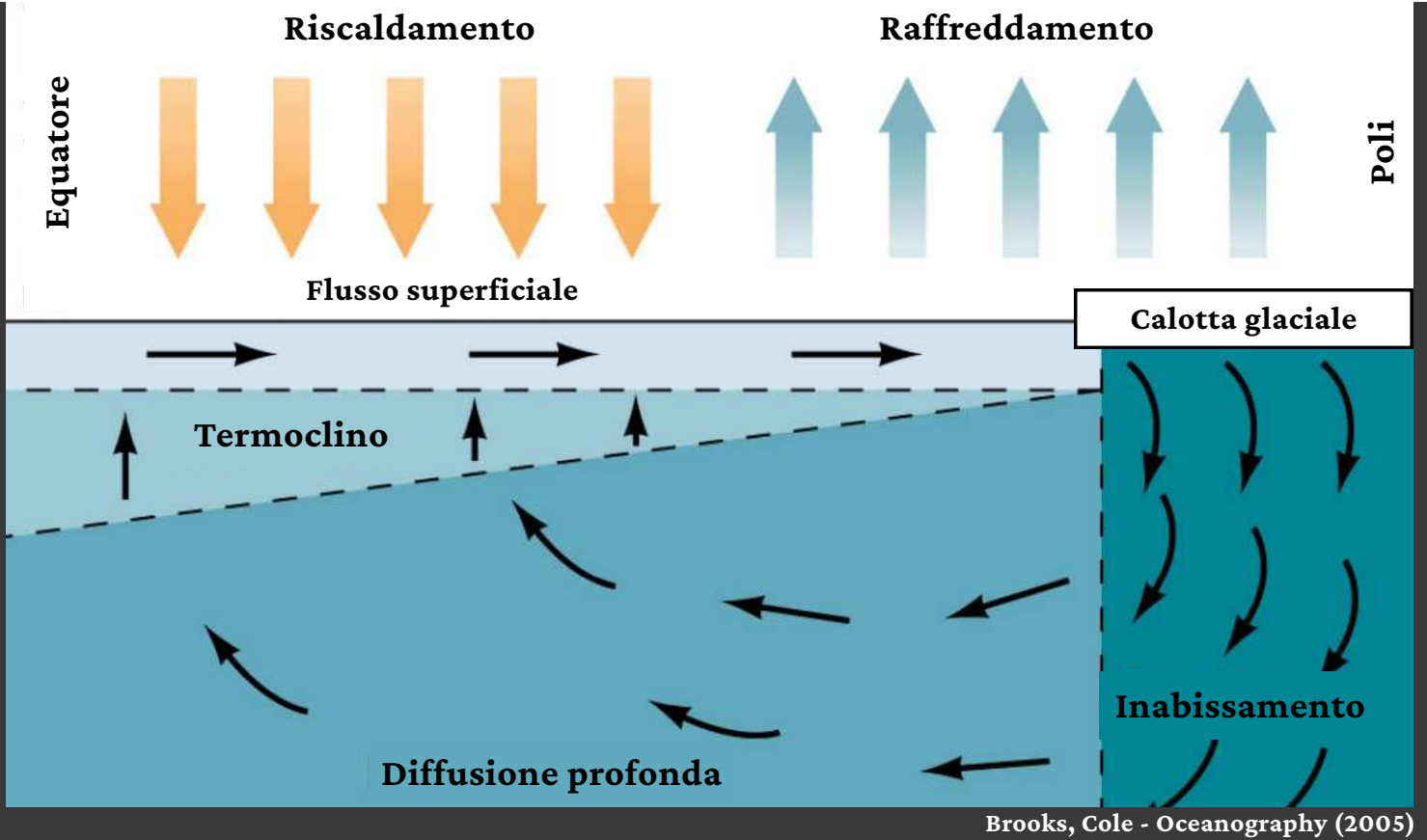
CO ₂	0.0425%
Ne	0.0018%
He	0.0005%
CH ₄	0.0002%
...	



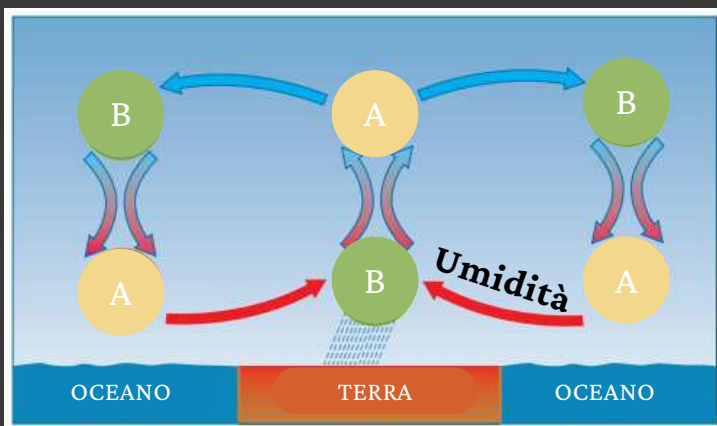
L'idrosfera e la sua circolazione



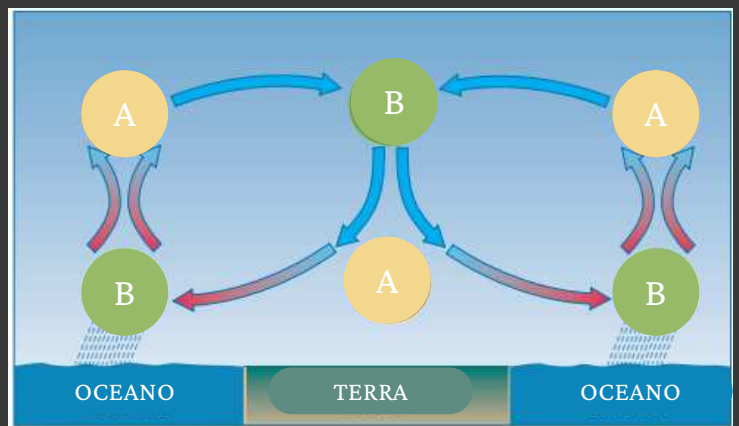
Fonte: INGV



L'idrosfera e la sua evaporazione: summer e winter like



Fase estiva:
continenti più CALDI
rispetto agli oceani



Fase invernale:
continenti più FREDDI
rispetto agli oceani

La litosfera

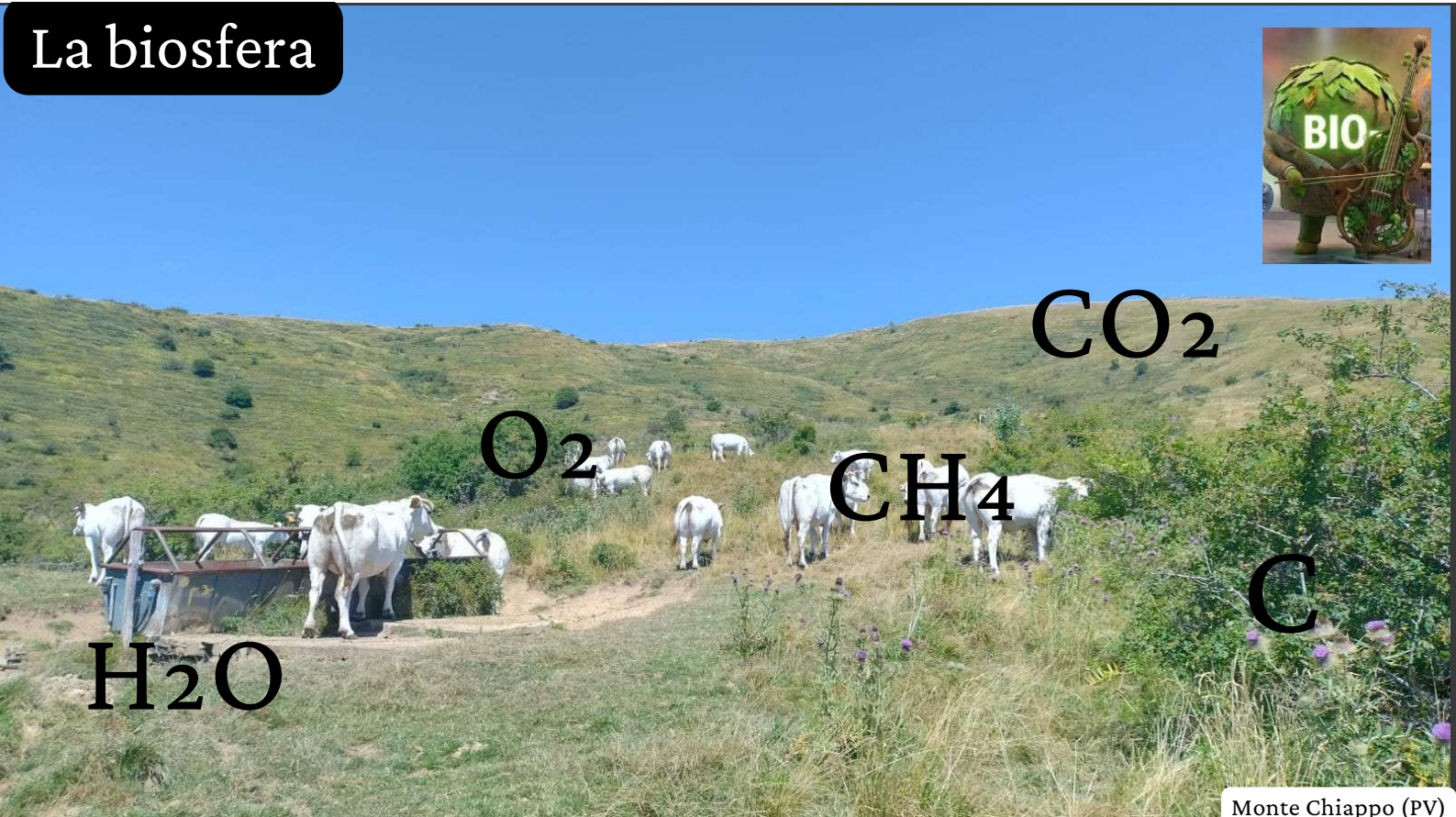
La crosta terrestre e il mantello superiore formano la litosfera rigida più esterna, spessa circa 50-100 km, in lento ma costante movimento

...grande stoccaggio di carbonio



250milioni di anni fa - oggi
1s = 50milioni di anni

La biosfera



Monte Chiappo (PV)

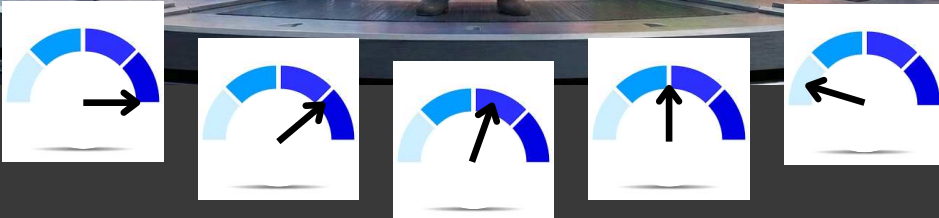
La criosfera



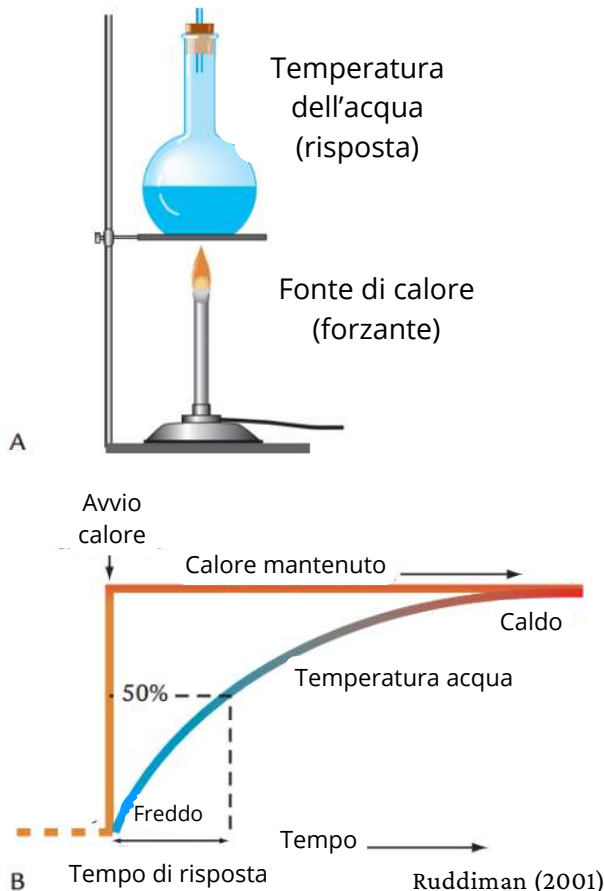
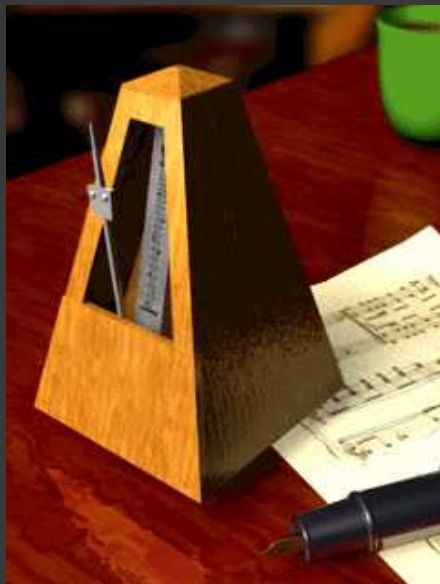
Il ghiacciaio del Mandron. Fonte: Parco Naturale Adamello Brenta

A ritmo di musica: i tempi di risposta

Il complesso (sistema) "Clima"



Tempi di risposta: l'esempio del bunsen



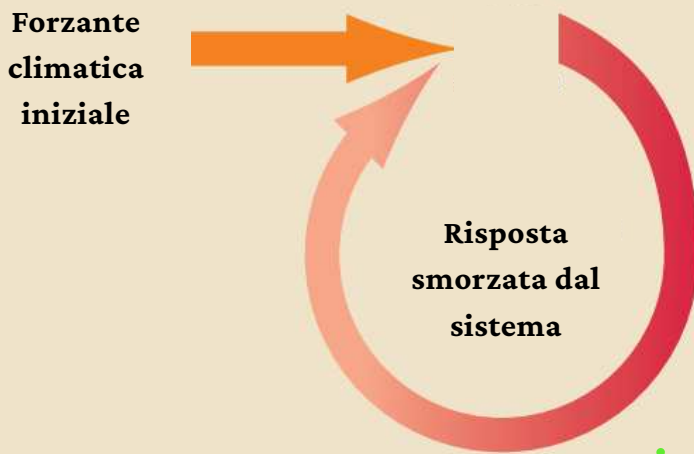
Tempi di risposta di varie componenti del sistema climatico Ruddiman, 2001

Componente	Tempo di risposta	Esempio
Risposte rapide		
Atmosfera	Da ore a settimane	Escursione termica tra dì e notte Sviluppo di un'ondata di calore
Superficie terrestre	Da ore a mesi	Riscaldamento giornaliero delle masse continentali Congelamenti e scongelamenti invernali
Superficie oceani	Da giorni a mesi	Riscaldamento pomeridiano della superficie Accumulo di calore delle spiagge nel tardo-estivo
Vegetazione	Da ore a decenni/secoli	Perdita immediata fogliame per congelamento Lenta crescita degli alberi fino a maturazione
Ghiaccio marino	Da settimane ad anni	Massima estensione tardo-invernale Cambiamenti morfologici area Islanda
Risposte lente		
Ghiacci continentali	10-100 anni	Ritiro globale dei ghiacciai nel ventesimo secolo
Oceano profondo	100-1500 anni	Tempo di sostituzione delle acque profonde
Calotte polari	100-10.000 anni	Avanzamenti/ritiri dei margini delle calotte

Fenomeni di retroazione: Feedback



Feedback positivo :-)



Feedback negativo :-)
EFFETTO STABILIZZANTE

Esempio di feedback positivo



17 August 2011

Un termostato esemplare: la fioritura dei coccolitofori

Esempio di feedback negativo

Capo Nord (Norvegia)

Fotografia satellitare del Mare di Barents il 17 agosto 2011 (Fonte: NASA/Goddard Space Flight Center)

17 August 2011

Un termostato esemplare: la fioritura dei coccolitofori

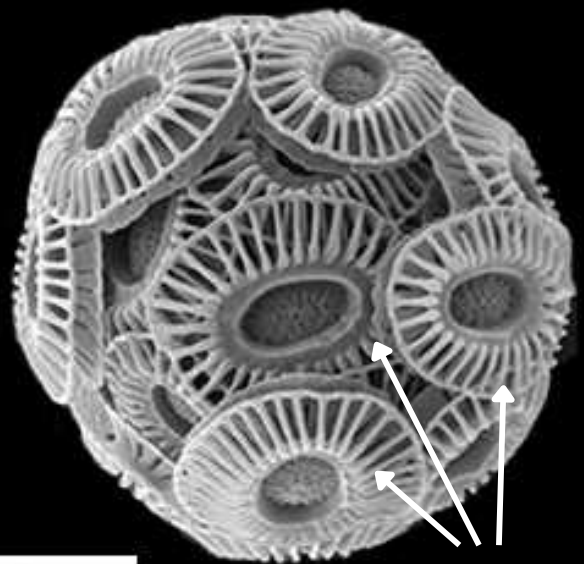
Esempio di feedback negativo

EFFETTO STABILIZZANTE

Capo Nord (Norvegia)

Fotografia satellitare del Mare di Barents il 17 agosto 2011 (Fonte: NASA/Goddard Space Flight Center)

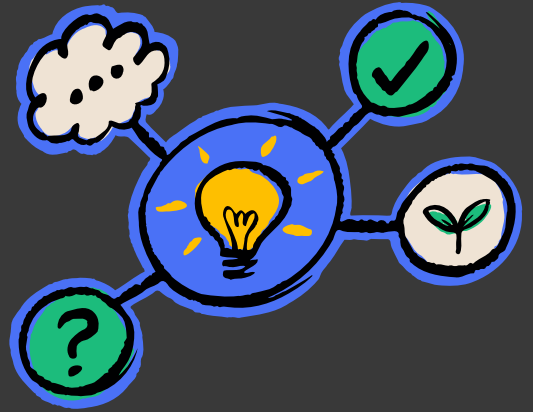
Gephyrocapsa huxleyi



2 μ m

Coccoliti (CaCO₃)

PALEOclima: perché parlare di passato?



Gli archivi:

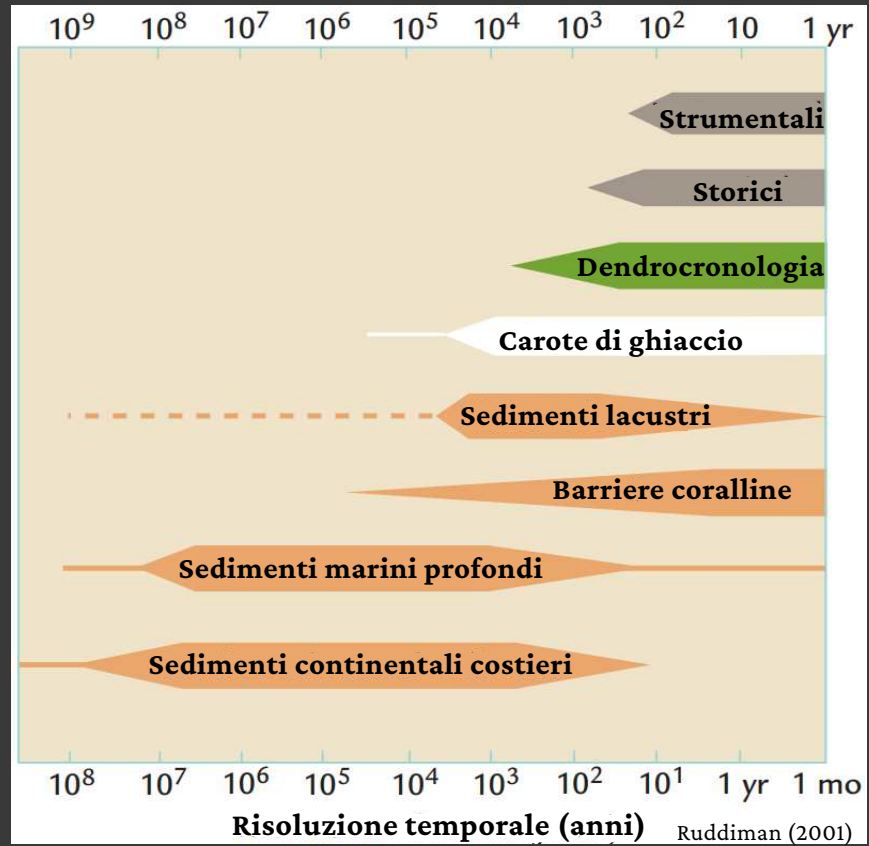
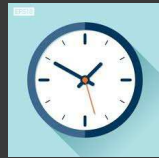


Foto: Vincenzo Livieri, LaPresse

L'archivio meteorologico storico del Collegio Romano contiene 3300 faldoni che documentano 40 milioni di misurazioni fatte, dal 1876, sul meteo di tutta Italia (ex colonie incluse)

Gli archivi paleoclimatici:

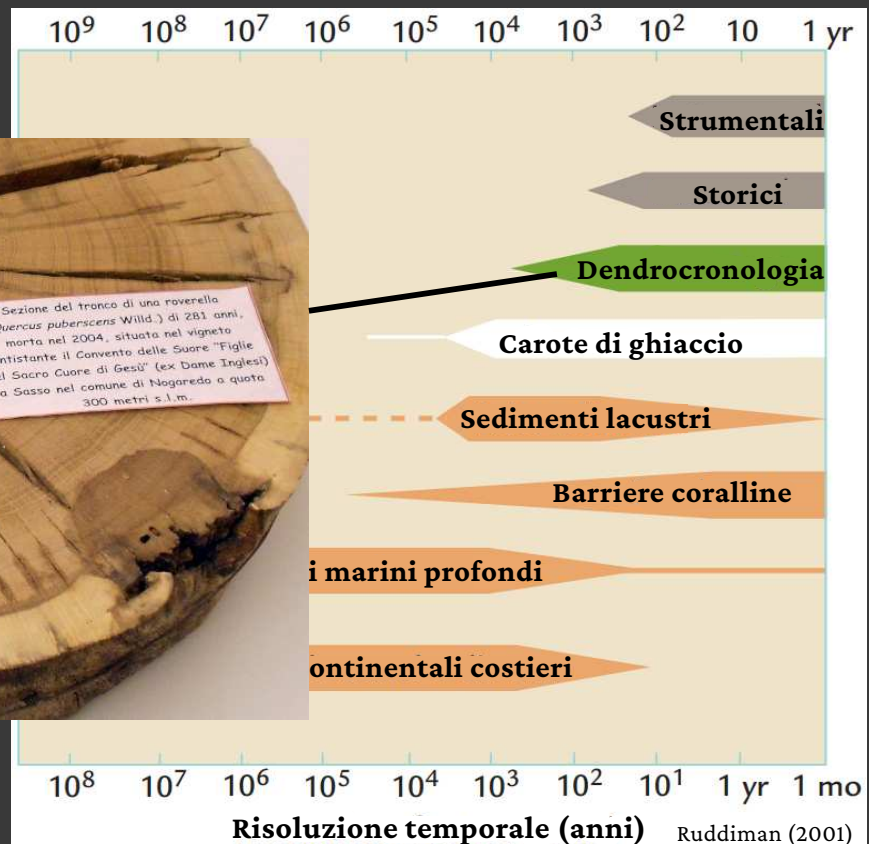
- sono CORPI FISICI di diversa natura (marina, terrestre, glaciologica,...)
- al loro interno esprimono una serie di indicatori
- permettono la trasformazione di una condizione climatica, di un momento o di un periodo di tempo, in un RECORD PERMANENTE



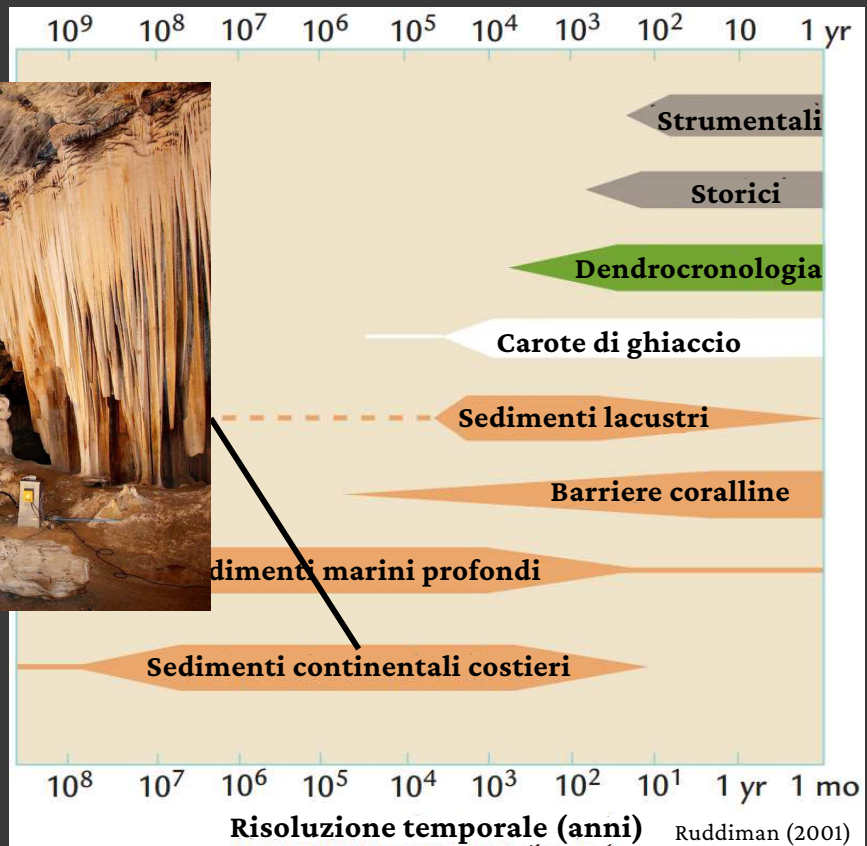
Gli archivi paleoclimatici:



Foto: Museo Civico di Rovereto (TN)



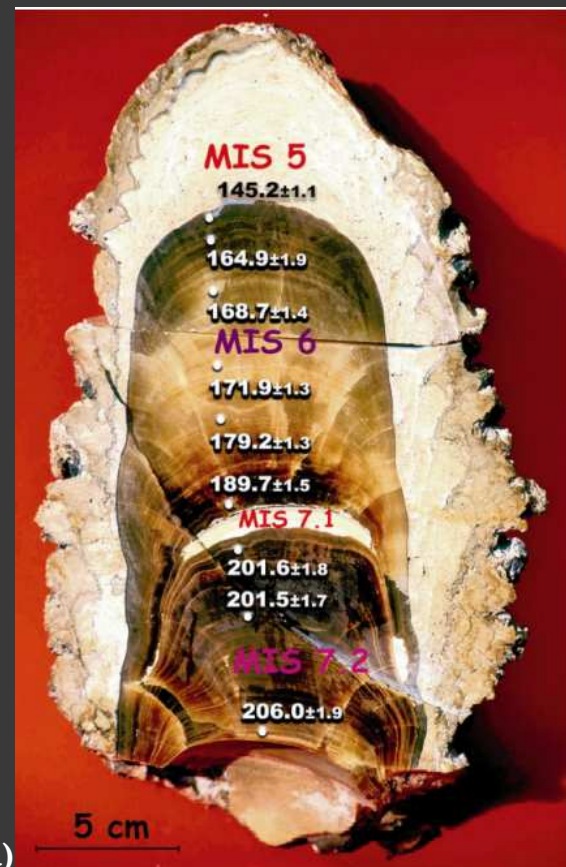
Gli archivi paleoclimatici:



Grotte di Cango (Sudafrica)
Crediti: Oudtshoorn tourism

Gli archivi paleoclimatici: SPELEOTEMI

- Concrezioni di CaCO₃ ad altissima risoluzione temporale (anche stagioni!)
- Condizioni necessarie: precipitazioni acide, suolo ricco in materia organica che poggia su rocce carbonatiche
- indicatori diretti di temperatura e precipitazioni
- limite 500-600mila anni

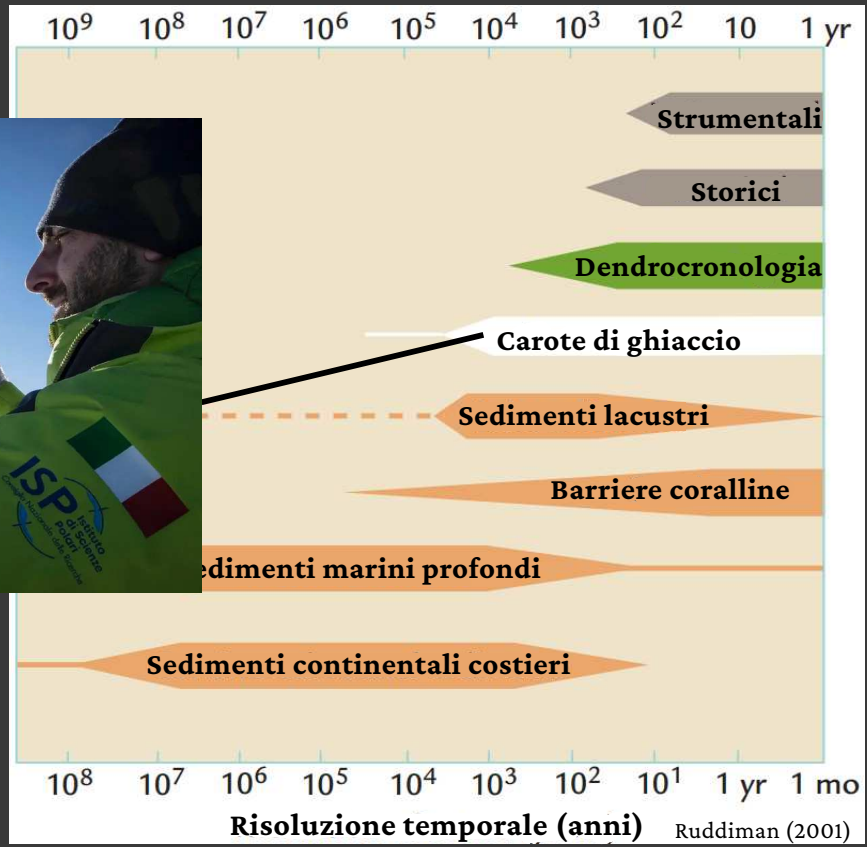


Bard et al., 2002 Grotta di Argentarola (Toscana)

Gli archivi paleoclimatici:



Carota di ghiaccio recuperata nelle isole Svalbard (Norvegia) Aprile 2023.
Foto: Scandberg Sauer



Gli archivi paleoclimatici: CAROTE DI GHIACCIO

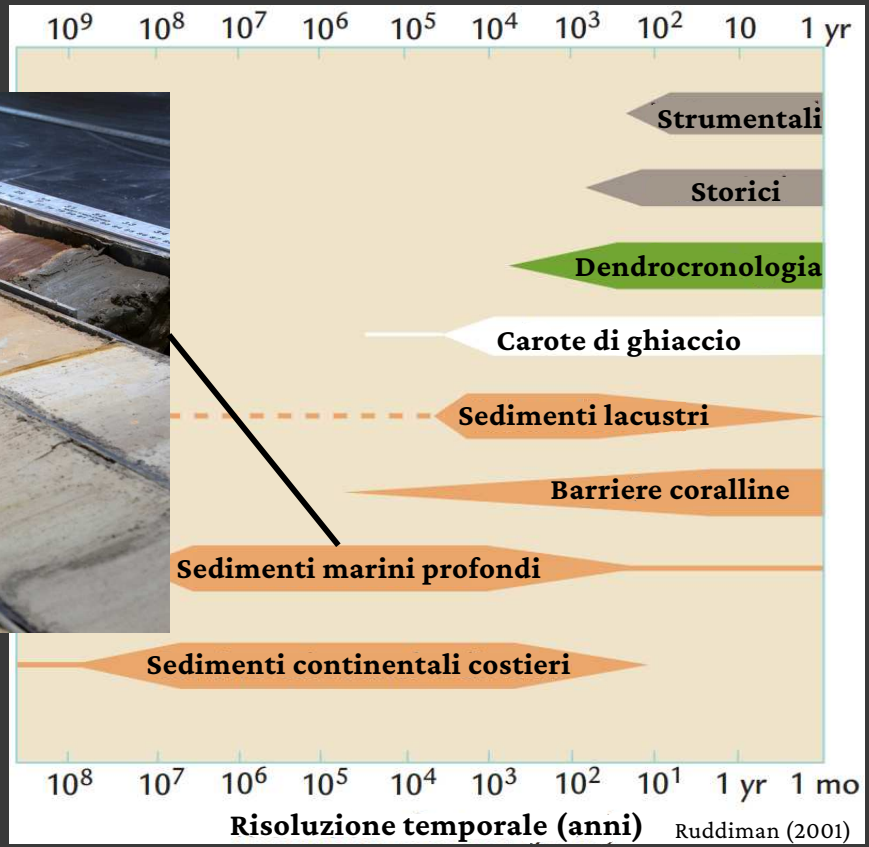


Immagine generata con Google Gemini

Gli archivi paleoclimatici:



La storia del Mediterraneo orientale raccontata dagli strati di queste carote di sedimento. Foto: Nichole Anest



Gli archivi paleoclimatici: SEDIMENTI MARINI PROFONDI



25 mm ogni
1000 anni

Limite 60 milioni di anni



70% della
superficie
terrestre

VIDES Resolution

Take home messages:

- Differenza tra meteo e clima
- 5 componenti del clima
- Concetto di feedback
- Archivi paleoclimatici sono corpi fisici da interpretare

Foto: Parco Naturale Adamello Brenta



CONNESSIONI CULTURALI

I viaggi virtuali che illuminano la mente

**Paleoclima e cambiamento
climatico globale:
2 - Archivi paleoclimatici
nei ghiacci**

Se non senti
l'audio cerca
questa icona
e clicca sul
messaggio
che compare

Supporto Tecnico:
02 3598 1534



ci vediamo al prossimo
appuntamento

Per conoscere tutte le
ALTRE CONNESSIONI CULTURALI

www.conneessionioniculturali.com

grazie



APPENDICE A.2

Foto: Parco Naturale Adamello Brenta



2025
International
Year of Glaciers'
Preservation

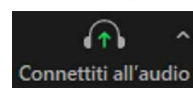
CONNESSIONI CULTURALI

I viaggi virtuali che **illuminano** la mente

**Paleoclima e cambiamento
climatico globale:
2 - Archivi paleoclimatici
nei ghiacci**

Se non senti
l'audio cerca
questa icona
e clicca sul
messaggio
che compare

Supporto Tecnico:
02 3598 1534



Connettiti all'audio

A ritmo di musica: i tempi di risposta

Il complesso (sistema) "Clima"



La criosfera

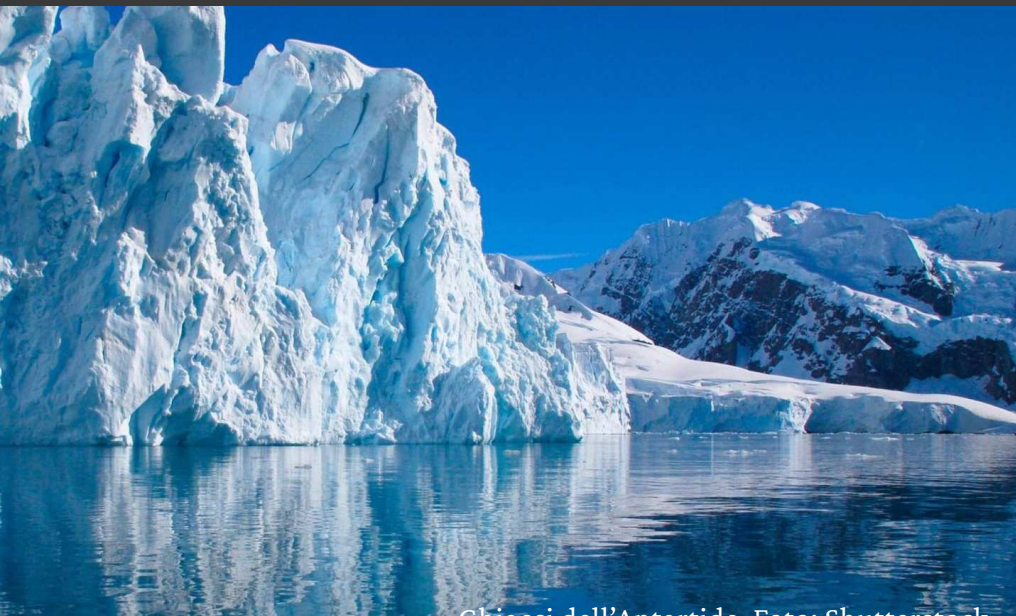


Il ghiacciaio del Mandron. Fonte: Parco Naturale Adamello Brenta

Tempi di risposta di varie componenti del sistema climatico Ruddiman, 2001

Componente	Tempo di risposta	Esempio
Risposte rapide		
Atmosfera	Da ore a settimane	Escursione termica tra dì e notte Sviluppo di un'ondata di calore
Superficie terrestre	Da ore a mesi	Riscaldamento giornaliero delle masse continentali Congelamenti e scongelamenti invernali
Superficie oceani	Da giorni a mesi	Riscaldamento pomeridiano della superficie Accumulo di calore delle spiagge nel tardo-estivo
Vegetazione	Da ore a decenni/secoli	Perdita immediata fogliame per congelamento Lenta crescita degli alberi fino a maturazione
Ghiaccio marino	Da settimane ad anni	Massima estensione tardo-invernale Cambiamenti morfologici area Islanda
Risposte lente		
Ghiacci continentali	10-100 anni	Ritiro globale dei ghiacciai nel ventesimo secolo
Oceano profondo	100-1500 anni	Tempo di sostituzione delle acque profonde
Calotte polari	100-10.000 anni	Avanzamenti/ritiri dei margini delle calotte

La criosfera: calotte polari



Ghiacci dell'Antartide. Foto: Shutterstock

Antartide e Groenlandia

Rappresentano circa il 3% della superficie terrestre (11% considerando solo terre emerse)

32 milioni di Km³ di ghiaccio

≈

70 metri di livello marino

Sono ottimi archivi paleoclimatici:

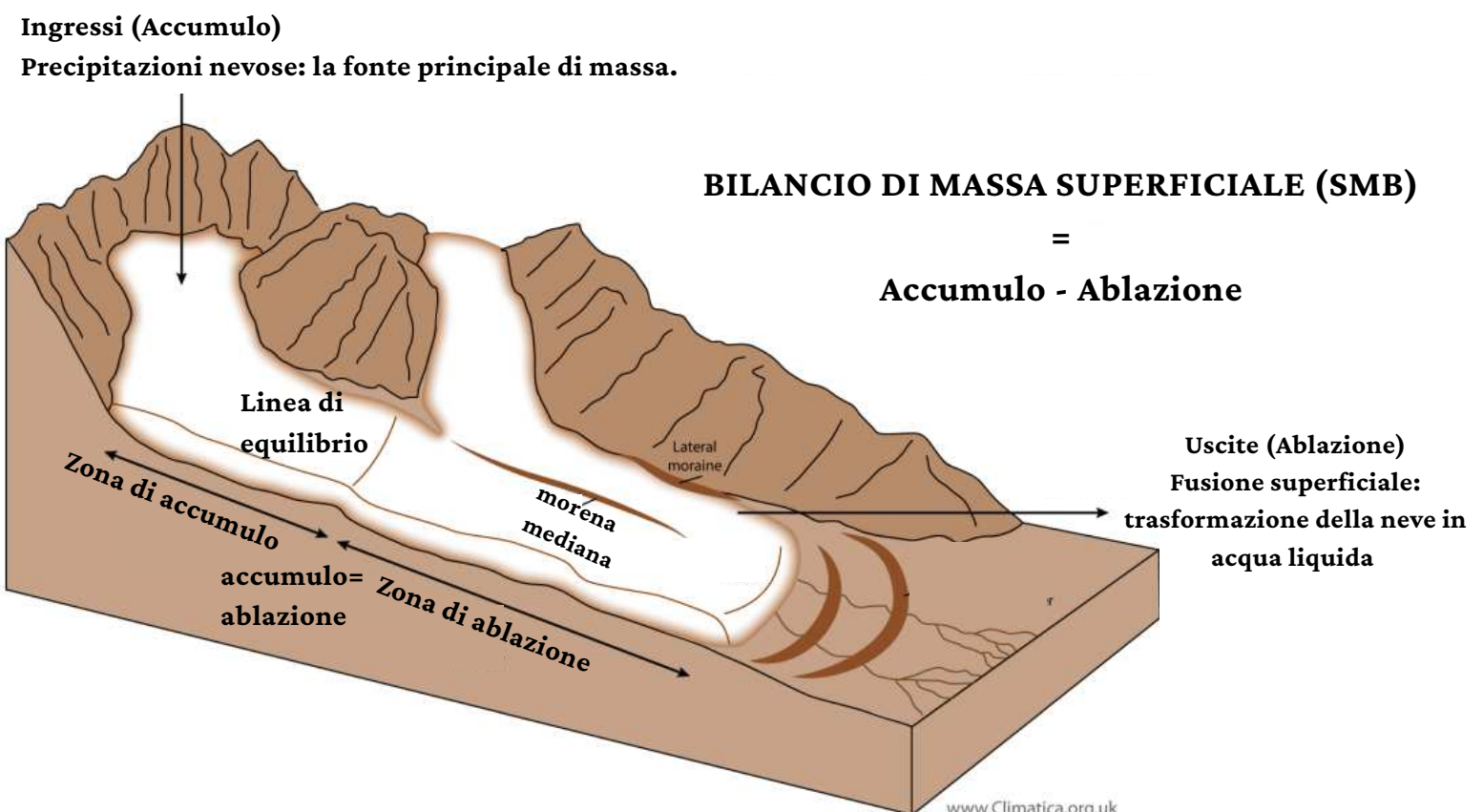
permettono indagini ad oltre un milione di anni fa.

La criosfera: ghiacciai continentali, alpini



Tempo di risposta
30 - 100 anni

Il ghiacciaio di Mandrone. Foto: Michele Zeni (Parco Naturale Adamello Brenta)



Tempi di risposta di varie componenti del sistema climatico Ruddiman, 2001

Componente	Tempo di risposta	Esempio
Risposte rapide		
Atmosfera	Da ore a settimane	Escursione termica tra dì e notte Sviluppo di un'ondata di calore
Superficie terrestre	Da ore a mesi	Riscaldamento giornaliero delle masse continentali Congelamenti e scongelamenti invernali
Superficie oceani	Da giorni a mesi	Riscaldamento pomeridiano della superficie Accumulo di calore delle spiagge nel tardo-estivo
Vegetazione	Da ore a decenni/secoli	Perdita immediata fogliame per congelamento Lenta crescita degli alberi fino a maturazione
Ghiaccio marino	Da settimane ad anni	Massima estensione tardo-invernale Cambiamenti morfologici area Islanda
Risposte lente		
Ghiacci continentali	10-100 anni	Ritiro globale dei ghiacciai nel ventesimo secolo
Oceano profondo	100-1500 anni	
Calotte polari	100-10.000 anni	Avanzamenti/ritiri dei margini delle calotte

Perché i ghiacciai temperati come archivi?

Problema:
sono troppo caldi
= percolamento

Proposta 1
mappare l'attuale
geomorfologia glaciale
e periglaciale

Proposta 2
analizzare
particelle
insolubili

Due scale di osservazione

Macro-scala (Seppi et al., 2025): Forme del rilievo mappate a scala 1:10.000 su un'area di oltre 1000 km². Analisi dell'evoluzione del paesaggio su scale temporali geomorfologiche (Pleistocene-Olocene)

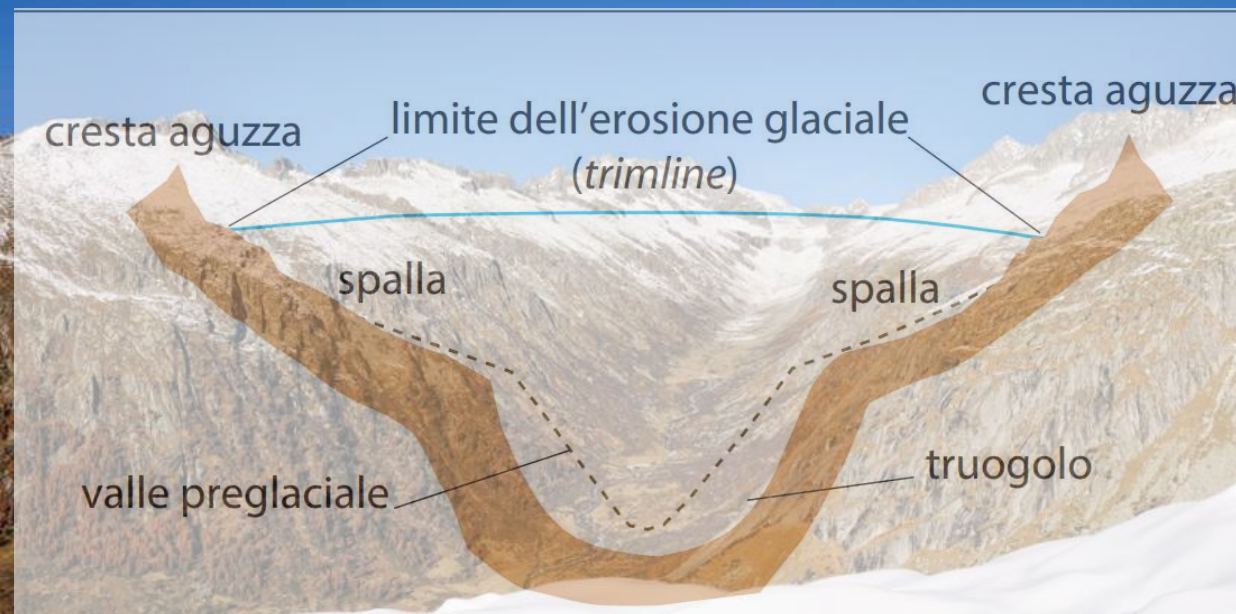


Morene periglaciali, ghiacciaio d'Amola. Foto: Michele Zeni (PNAB)



Micro-scala (Mangili et al., 2024): Particelle da 2,5 a 350 μm . Analisi anno per anno ad altissima risoluzione temporale.

Forme del paesaggio glaciale



Sezione schematica trasversale di una valle di erosione glaciale (Baroni, 2004a)

Val di Fumo (Parco Naturale Adamello Brenta). Foto M. Visintainer

Negli attuali ghiacciai la linea di equilibrio può essere stimata con buona approssimazione osservando la snowline alla fine della stagione di ablazione (fine Agosto/inizio Settembre)



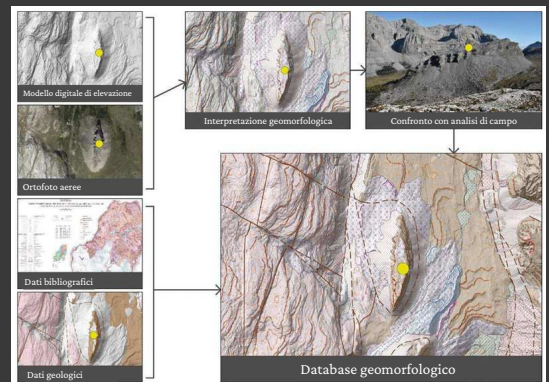
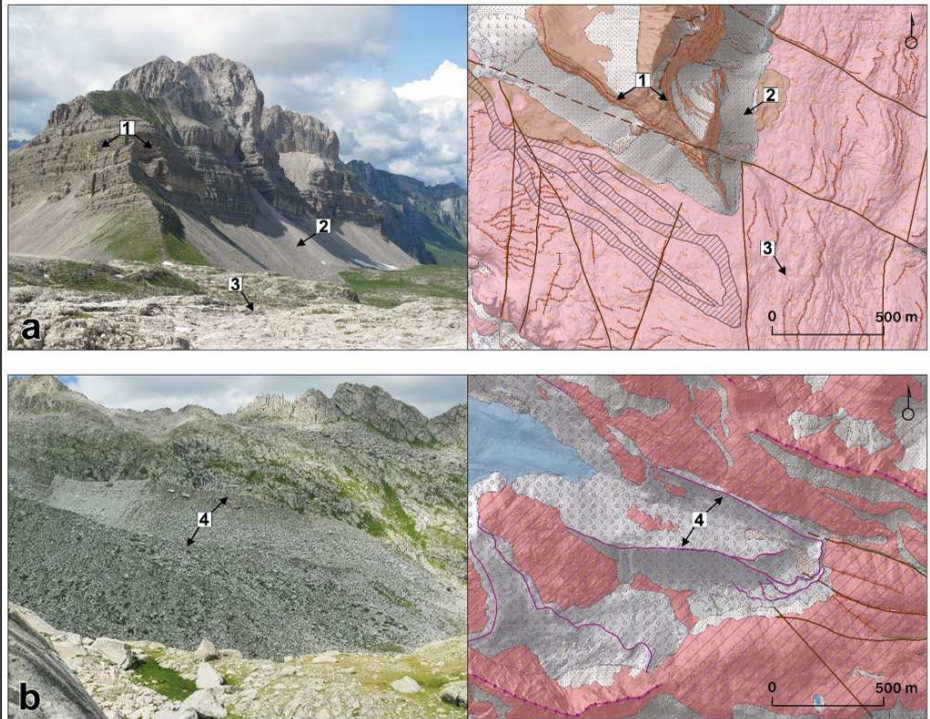
Yukon (Canada). Fonte: R. Seppi

L'analisi delle forme del paesaggio (Seppi et al., 2025)



Fotografie del 1933 (A. Desio) e del 2012 (R. Seppi) che ritraggono la stessa visione in prospettiva del Ghiacciaio del Careser, Gruppo Ortles Cevedale (Carturan et al., 2014)

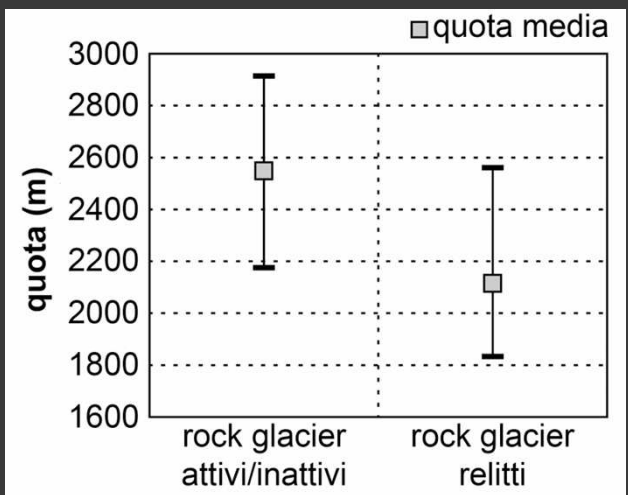
Materiali e metodi (Seppi et al., 2025)



Il Prof. Roberto Seppi con il team

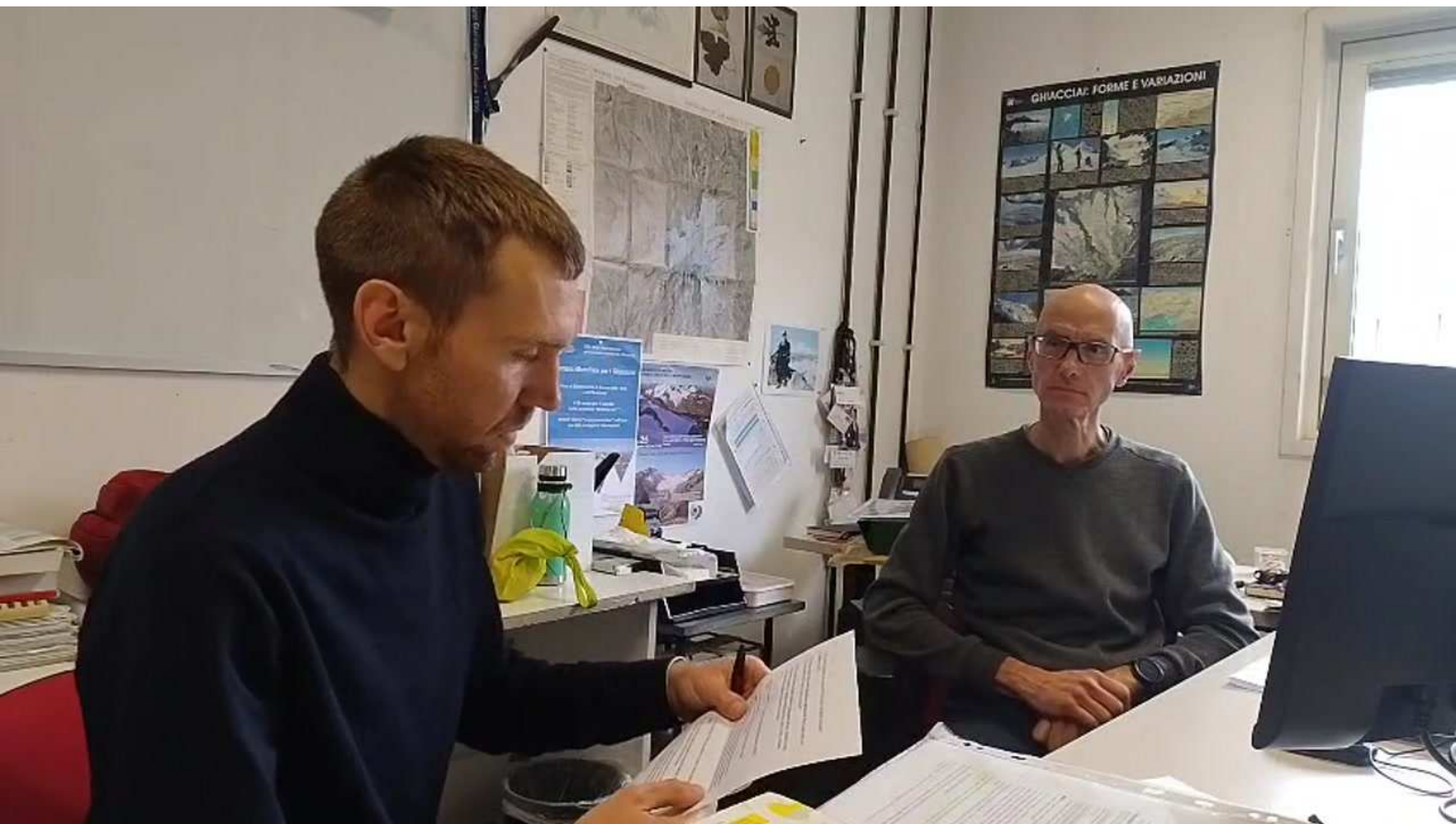
Esempi che mostrano forme del rilievo significative mappate nel Geoparco. a) Ghiaioni e forme strutturali nelle Dolomiti di Brenta; (1) versante a gradinata, (2) ghiaione, (3) superficie carsificata. b) Morene della Piccola Età Glaciale in Val Amola; (4) dorsali moreniche.

L'analisi delle forme del paesaggio: i rock glacier



Intervallo di quota dei rock glacier attivi/inattivi e relitti

Due rock glacier relitti alpini: da Seppi et al. 2010



Gli archivi paleoclimatici: le carote di ghiaccio

Principali indicatori (proxy) paleoclimatici

- analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno (nell'acqua e nell'atmosfera);
- gas contenuti nelle bolle d'aria all'interno del ghiaccio;
- materia disciolta e particolato
- caratteristiche fisiche del firn e del ghiaccio.

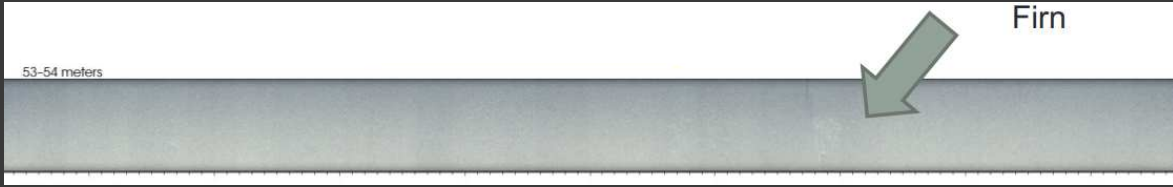


Foto: Parco Naturale Adamello Brenta

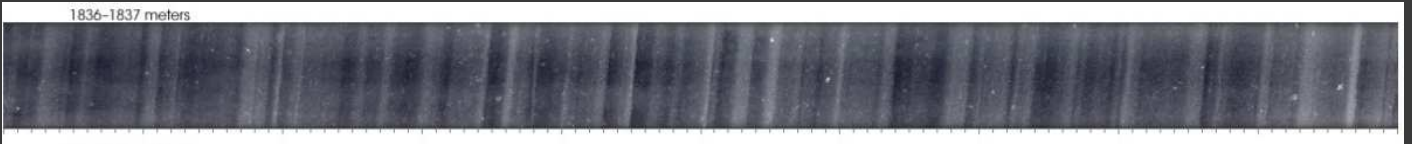
Gli archivi paleoclimatici: CAROTE DI GHIACCIO

Il peso degli strati sovrastanti comprime la neve sepolta trasformandola in ghiaccio:

La neve giovane e superficiale si compatta in cristalli grossolani e granulari chiamati firn (53 metri di profondità)



La neve più vecchia e profonda viene ulteriormente compattata (profondità 1.836 metri).



Sul fondo di una carota di ghiaccio (profondità 3.050 metri), rocce, sabbia e limo scuriscono il ghiaccio.



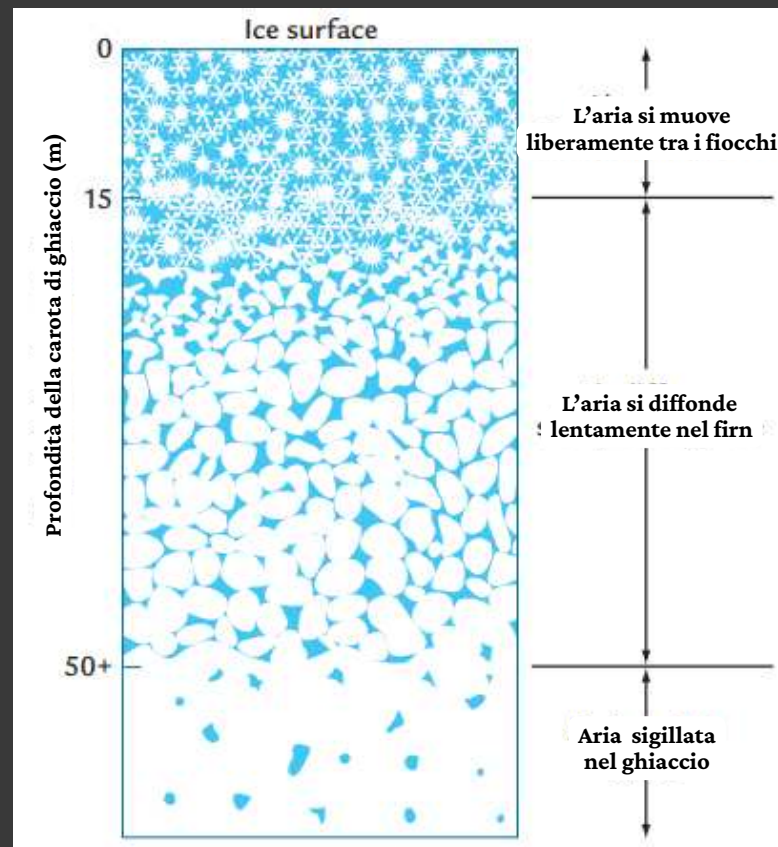
NB: il fondale della carota è tendenzialmente più caldo poichè riceve calore dalla terra...

Progetto GISP2 (Groenlandia). Foto: U.S. National Ice Core Laboratory

Analisi dello scarto di età

L'aria circola tra i granuli di neve finché non viene sigillata definitivamente nel ghiaccio (alla base dello strato di firn).

Le bolle d'aria sono sempre più giovani del ghiaccio che le circonda



Ruddiman (2001)

Analisi dello scarto di età

L'aria circola tra i granuli di neve finché non viene sigillata definitivamente nel ghiaccio (alla base dello strato di firn).

Le bolle d'aria sono sempre più giovani del ghiaccio che le circonda

Bernhard Bereiter / Scripps Institution of Oceanography / Empa / University of Berne



Il ghiacciaio dell'Adamello come archivio

Tasso di accumulo elevato (circa 0.9 m/anno), superiore a molti ghiacciai freddi (es. Colle Gnifetti, Ortles)



Questo permette una risoluzione temporale sub-annuale, essenziale per distinguere eventi stagionali specifici nel passato

Il Ghiacciaio di Lares, 2017. Foto: Michele Zeni (PNAB)

Metodologia: l'approccio Multiproxy sulla carota ADA270

Conteggio simultaneo di differenti tipi di particelle insolubili

A: *Sanguina nivaloides*, un'alga nivale

B: polline di *Ephedra fragilis*

C: diatomea: *Aulacoseira granulata*

D: fitoliti

E: microcarbone

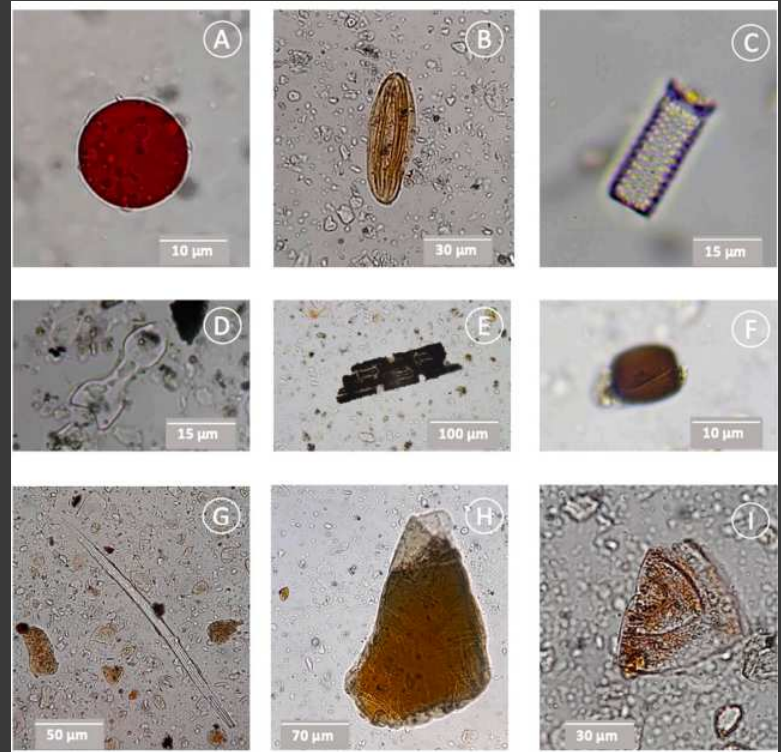
F: spore fungine: *Sporomiella* Sp.

G: spicola spongina

H: particella minerale

I: foraminifero: *Frondicularia* sp.

Ogni particella racconta una storia diversa...



Da Mangili et al. (2025)

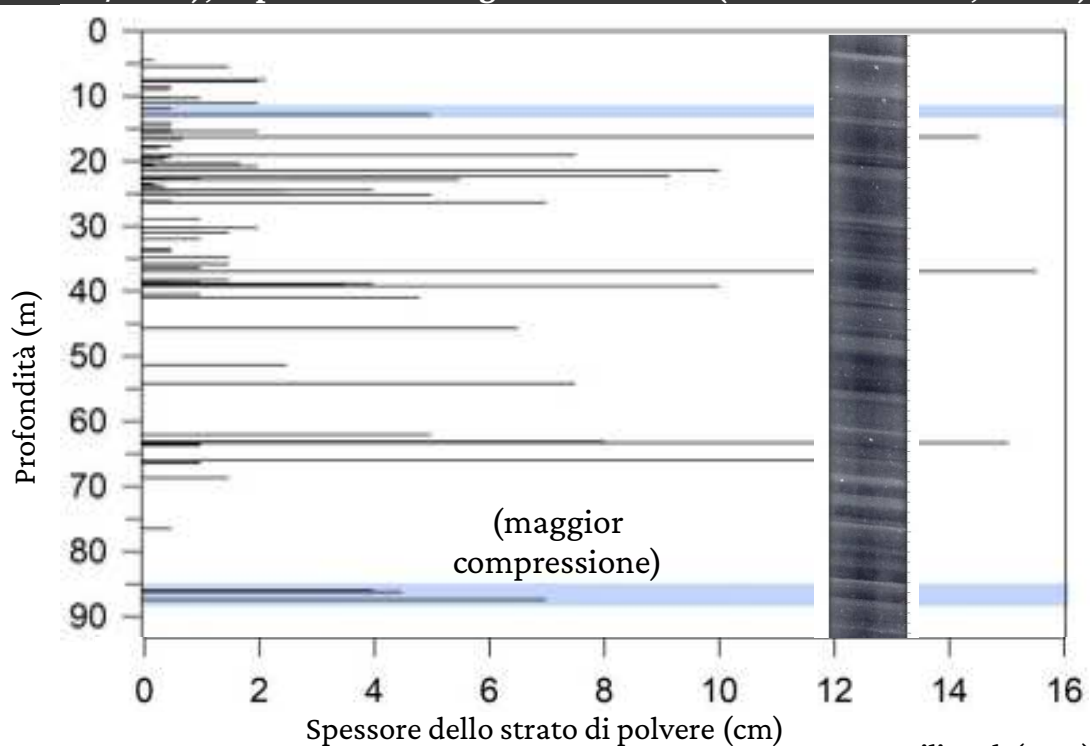
La stratigrafia stagionale (Mangili et al., 2025)

Tasso di accumulo elevato (circa 0.9 m/anno), superiore a molti ghiacciai freddi (es. Colle Gnifetti, Ortles)

Strati estivi: 2-10% dello spessore.

Strati invernali: 90% del volume

Si possono contare gli anni "visivamente" e chimicamente anche in profondità



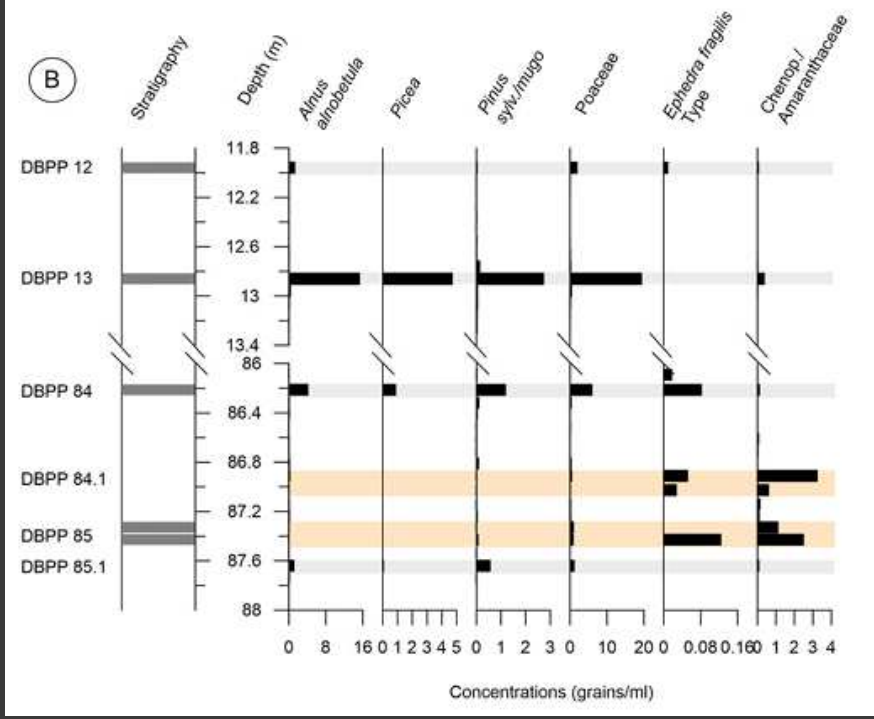
Da Mangili et al. (2025)

Segnale locale 1: la vegetazione (Mangili et al., 2025)

Il polline intrappolato riflette la vegetazione delle pendici (conifere, latifoglie, arbusti), descrivendo come la vegetazione ha risposto ai cambiamenti climatici del passato



Picchi di *Alnus alnobetula* (ontano verde) dominano spesso i layer estivi. Foto: Actaplantarum



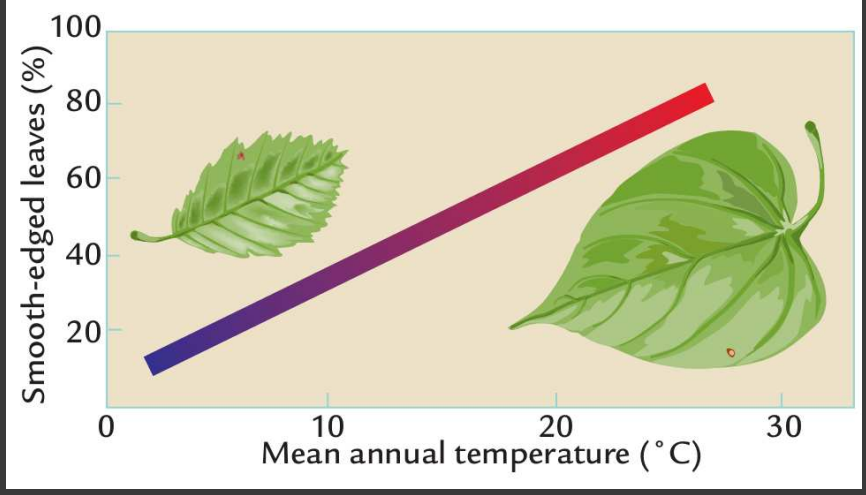
Nel grafico, diversi tratti di carota (ADA 270) testimoniano picchi di polline di specie differenti (Mangili et al., 2025)

Segnale locale 1: la vegetazione (Mangili et al., 2025)

Il polline intrappolato riflette la vegetazione delle pendici (conifere, latifoglie, arbusti), descrivendo come la vegetazione ha risposto ai cambiamenti climatici del passato

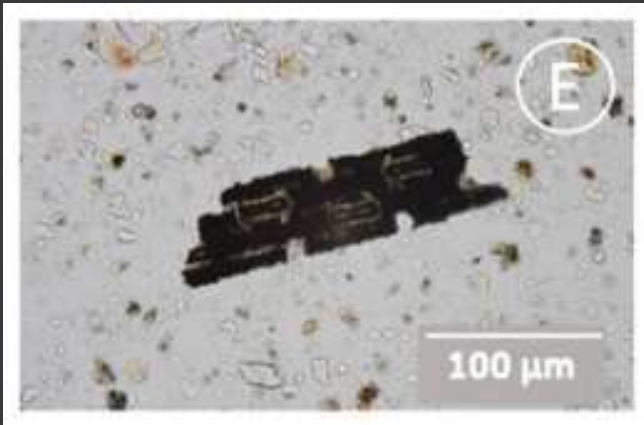


Picchi di *Alnus alnobetula* (ontano verde) dominano spesso i layer estivi. Foto: Actaplantarum



Gli alberi con foglie a bordo liscio prosperano oggi ai tropici, mentre gli alberi con foglie più frastagliate crescono in climi più freddi. (Ruddiman, 2014; riadattato da Wolfe, 1978)

Segnale locale 2: gli incendi (Mangili et al., 2025)



Associazione di alta concentrazione di microcarboni con spore di funghi (genere *Gelasinospora*) che crescono su substrati bruciati

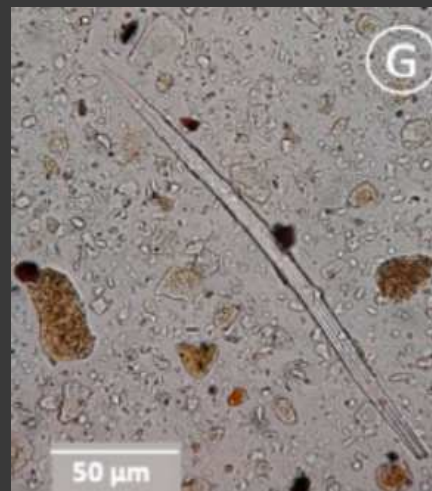
Esempio: un picco di carboni associato a pollini primaverili indica un incendio avvenuto durante la fioritura

Prova: l'anno successivo all'incendio si registra un crollo del polline di conifere, testimoniando il danno alla foresta



Incendio boschivo nel comune di Levico Terme. Foto: Il Dolomiti

Segnale a lunga distanza: il Sahara (Mangili et al., 2025)



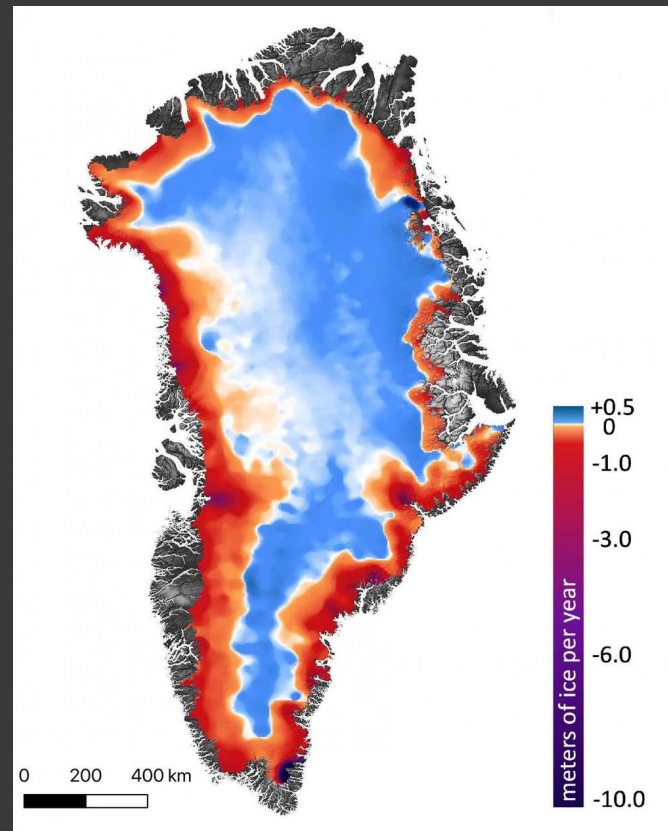
Indicatori biologici esotici: diatomee d'acqua dolce africane *Aulacoseira granulata* (C), polline di *Ephedra fragilis* (B), spicole di spugna (G).

Ipotesi per il futuro

Modello integrabile per i ghiacciai in trasformazione.

FREDDI → TEMPERATI

L'approccio adottato per ADA270 potrebbe diventare lo standard per studiarli.



Bilancio di massa 2003-2018 in Groenlandia (Danimarca). Smith et al. 2018





CONNESSIONI CULTURALI

I viaggi virtuali che illuminano la mente

**Paleoclima e cambiamento climatico globale:
3 - Segnali e previsioni di questo cambiamento**

Se non senti l'audio cerca questa icona e clicca sul messaggio che compare

Supporto Tecnico:
02 3598 1534



ci vediamo al prossimo appuntamento

grazie

Per conoscere tutte le
ALTRE CONNESSIONI CULTURALI

www.connessioniculturali.com

CONNESSIONI CULTURALI

I viaggi virtuali che illuminano la mente

APPENDICE A.3



CONNESSIONI CULTURALI

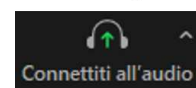
I viaggi virtuali che **illuminano** la mente

**Paleoclima e cambiamento
climatico globale:**

**3 - Segnali e previsioni
di questo cambiamento**

Se non senti
l'audio cerca
questa icona
e clicca sul
messaggio
che compare

Supporto Tecnico:
02 3598 1534

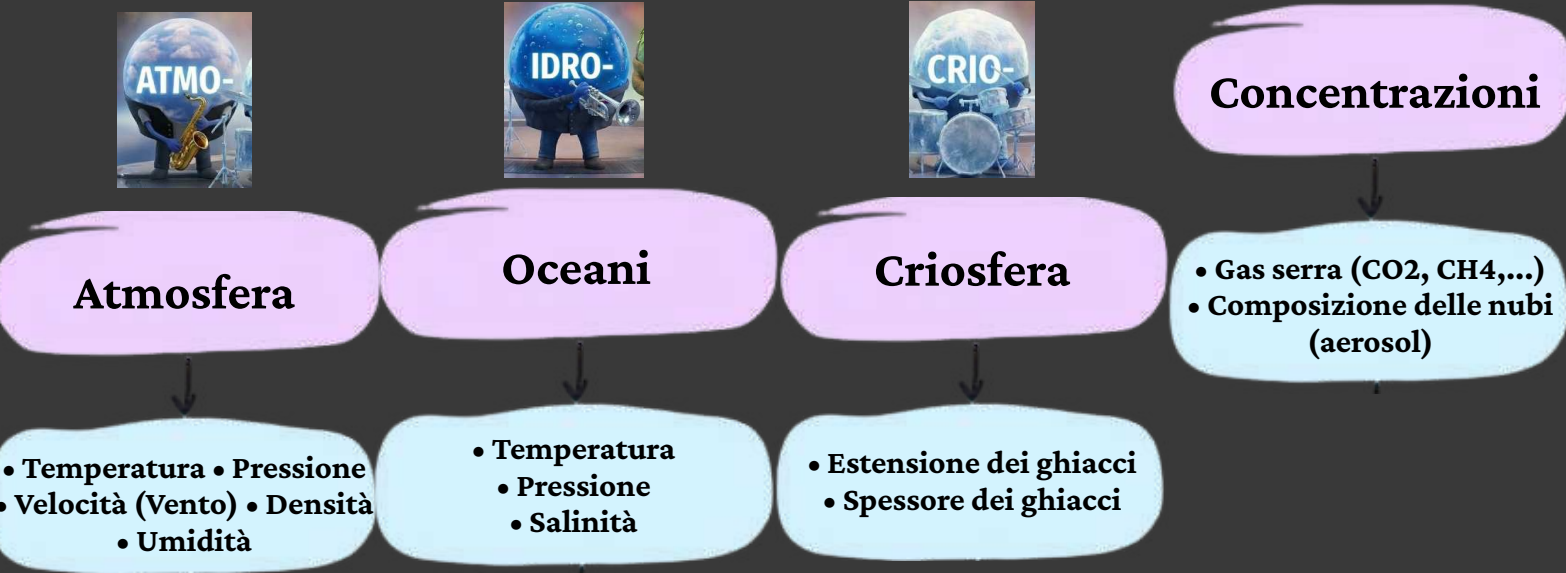


Connettiti all'audio

Le cinque componenti del sistema climatico e i loro tempi di risposta



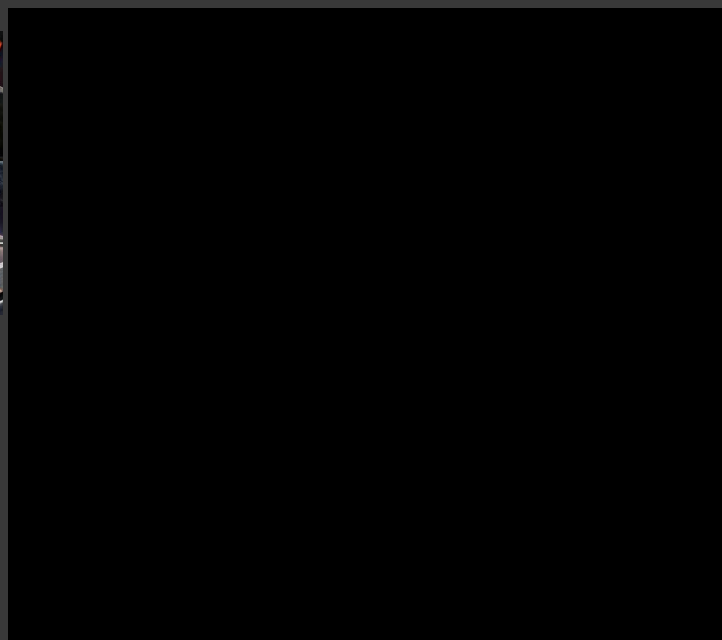
Le principali variabili che determinano il clima



Il complesso sistema clima è anche caotico...

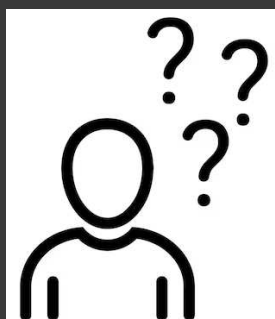


La caoticità di un sistema dinamico deterministico è definita proprio dalla sua sensibile dipendenza dalle condizioni iniziali, concetto spesso noto come "effetto farfalla"

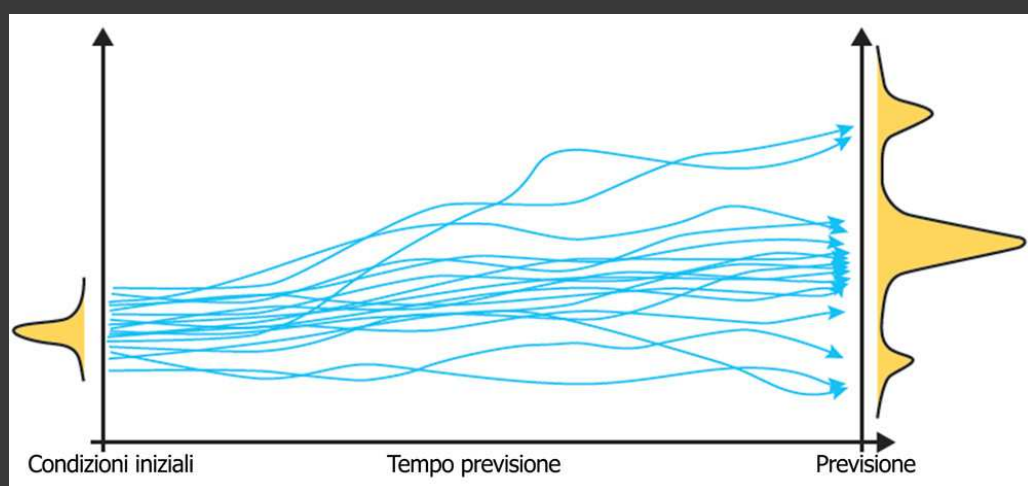


L'attrattore di Lorenz
Animazione: CaptainGranit (da YouTube)

Caos: previsioni ed incertezza

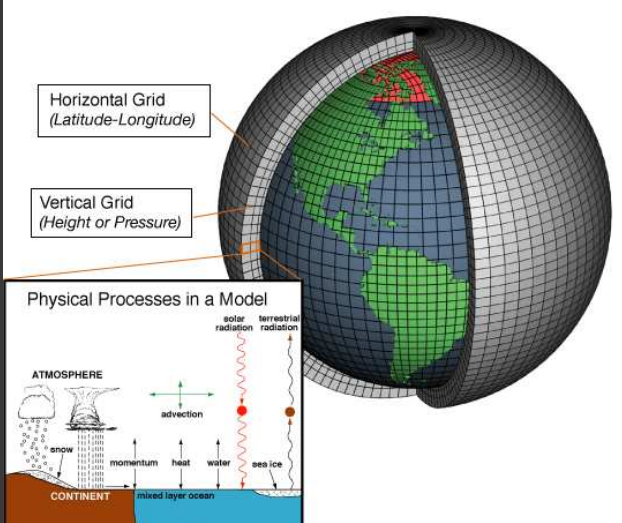


~~INCERTEZZA: "Ho grossi dubbi, o insicurezza in quello che dico"~~



INCERTEZZA: sono i valori statistici che definiscono la precisione di una stima previsionale
Grafico: consorzio LaMMA

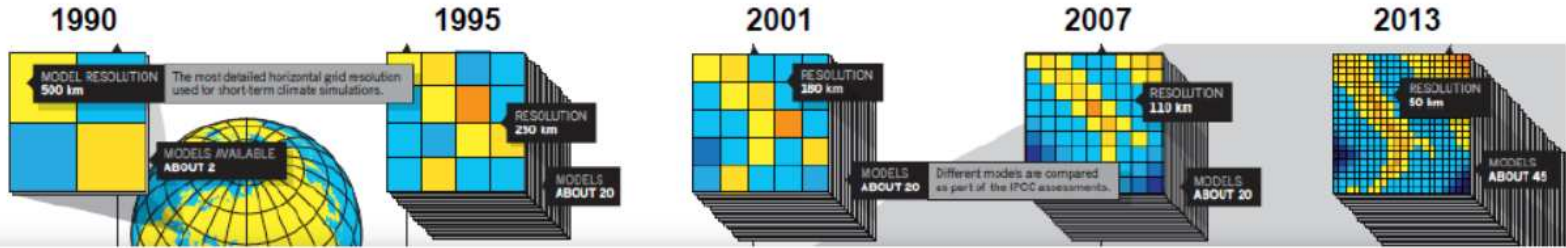
Osservazioni e modellistica climatica



I modelli numerici simulano nel miglior modo possibile i processi principali che avvengono in atmosfera, sulla terraferma e negli oceani.

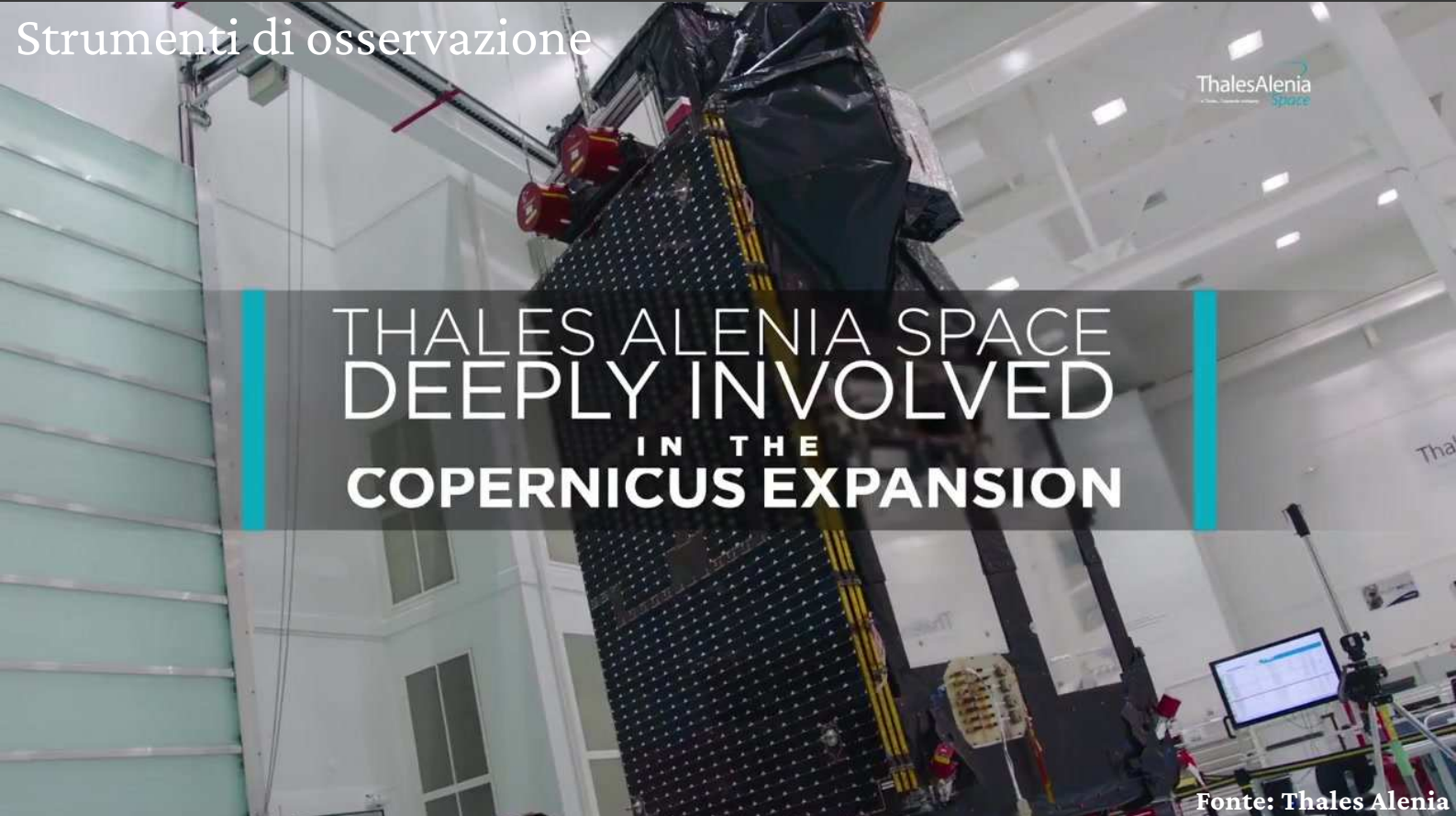
Ogni anno migliorano grazie all'utilizzo di osservazioni sempre più accurate, alle persone che studiano i processi e a computers sempre più potenti

R.Buizza: *Il meteo e il clima* (2025)



Immagini: NOAA

Strumenti di osservazione

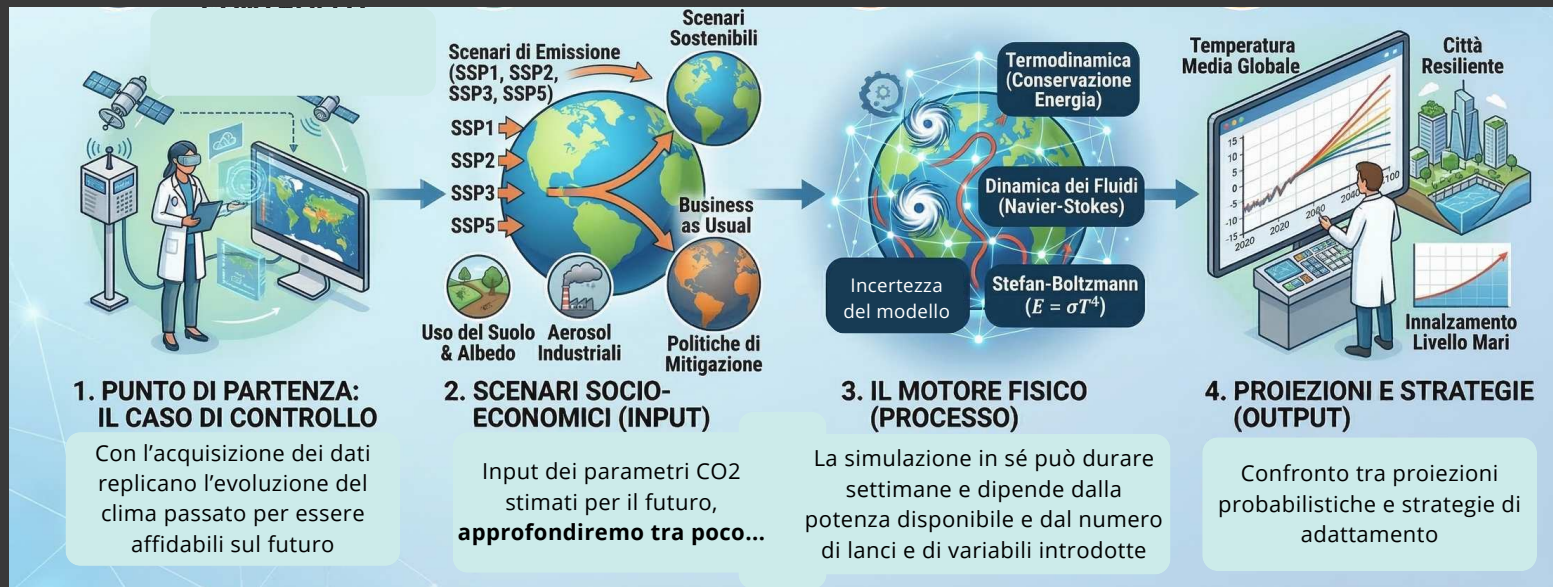


ThalesAlenia Space

THALES ALENIA SPACE
DEEPLY INVOLVED
IN THE
COPERNICUS EXPANSION

Fonte: Thales Alenia

Un laboratorio per il clima futuro: i modelli previsionali



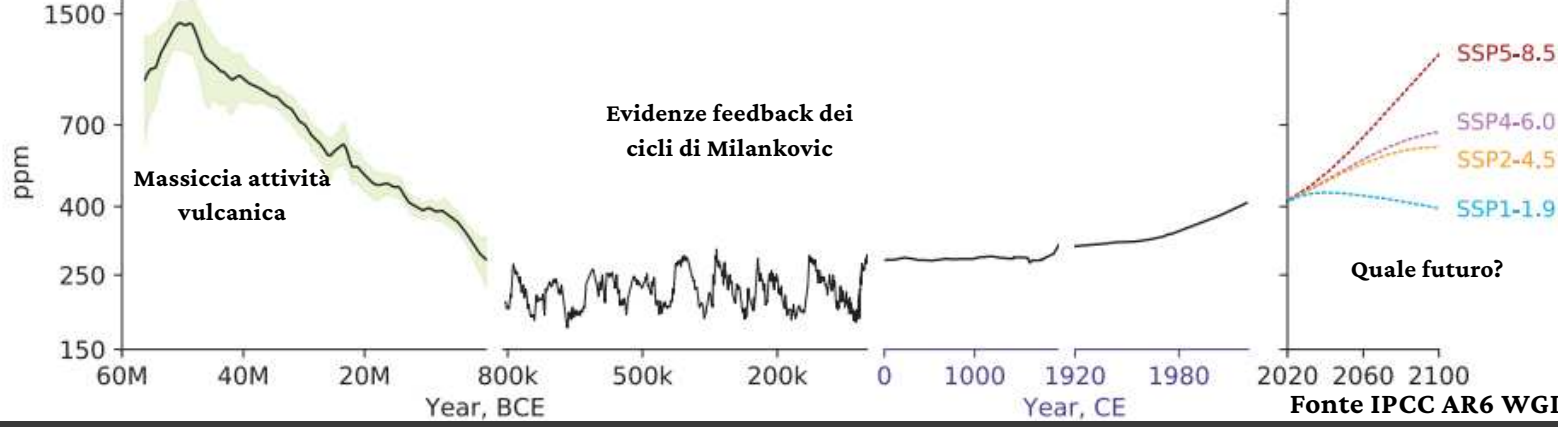
Le basi chimiche di un illustre precursore

"Se la quantità di 'acido carbonico' (CO₂) aumenta in progressione geometrica, l'aumento della temperatura aumenterà quasi in progressione aritmetica."

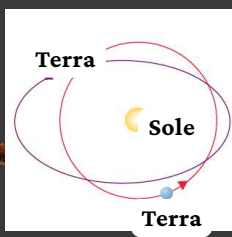


Svante Arrhenius (1859 -1927)

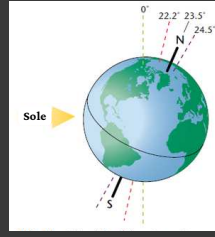
Evoluzione della concentrazione di CO2 in atmosfera



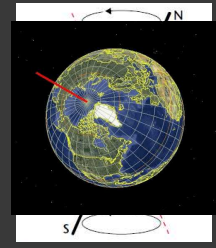
Parasaurolophus 75My ca.



Eccentricità dell'orbita
circa 100.000 anni



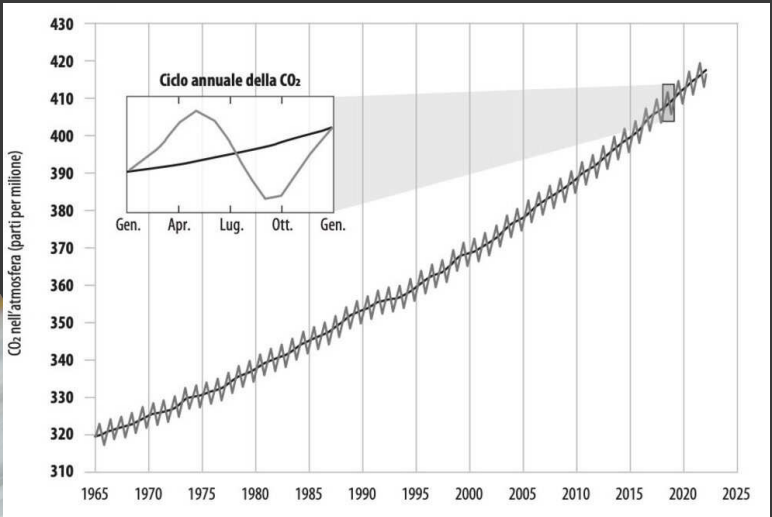
Inclinazione dell'asse terrestre
circa 41.000 anni



circa 26.000 anni



La curva di Keeling: CO2 negli ultimi 60 anni



Andamento della concentrazione di CO2 in atmosfera. Fonte: Enciclopedia Britannica

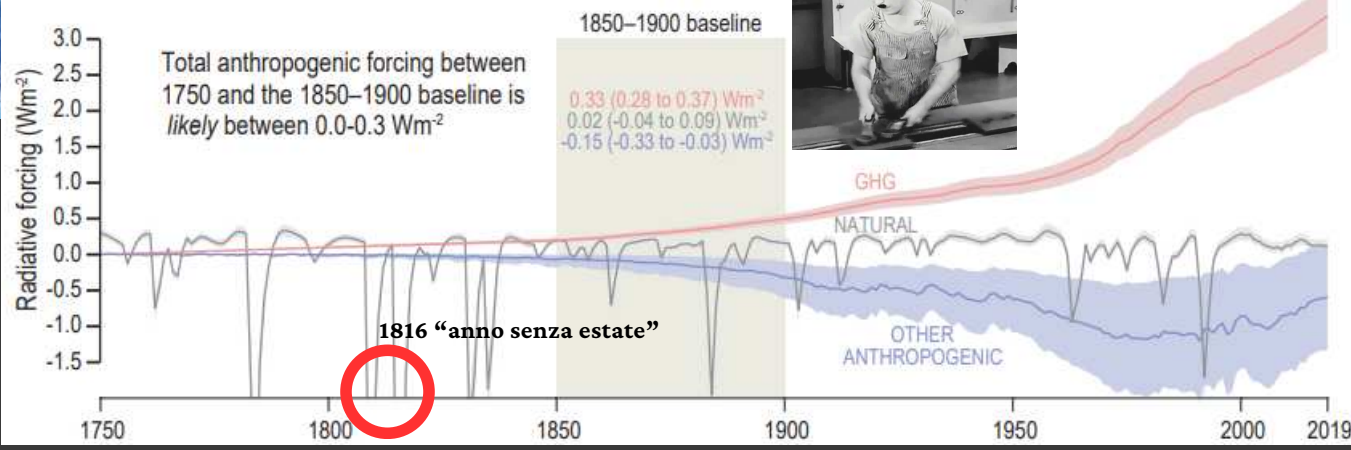
Tempi moderni: rapidi cambiamenti nel forzante radiativo



- gas serra emessi da attività antropiche
- cause naturali (eruzioni vulcaniche)
- altre cause riconducibili all'uomo (emissione aerosol, sfruttamento del suolo)



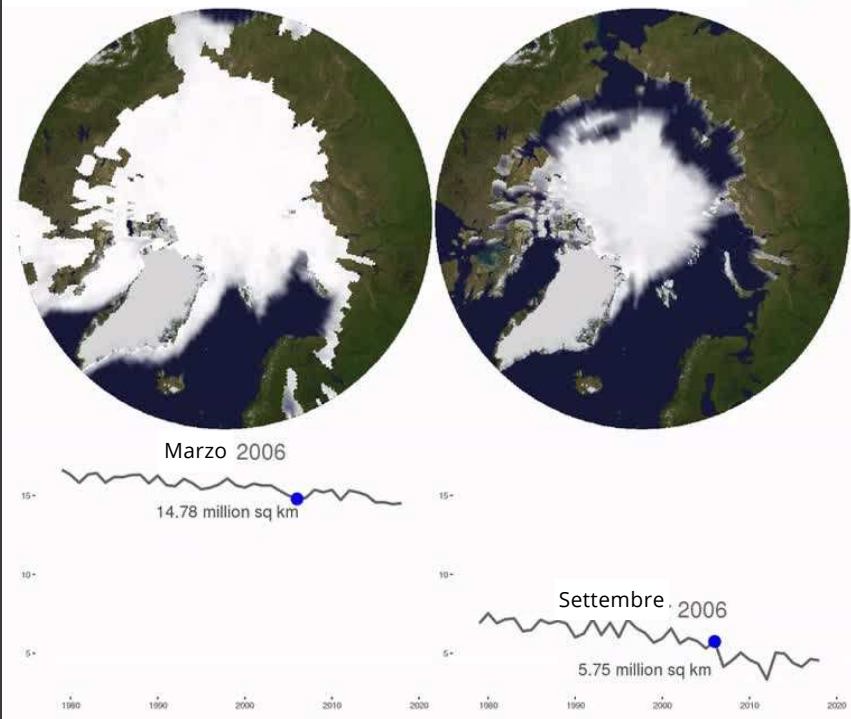
Ruddiman (2001)



Variazioni della potenza radiante ricevuta dalla Terra dal periodo preindustriale ad oggi. Fonte IPCC AR6 WGI

Riduzione dell'estensione dei ghiacci e ripercussioni

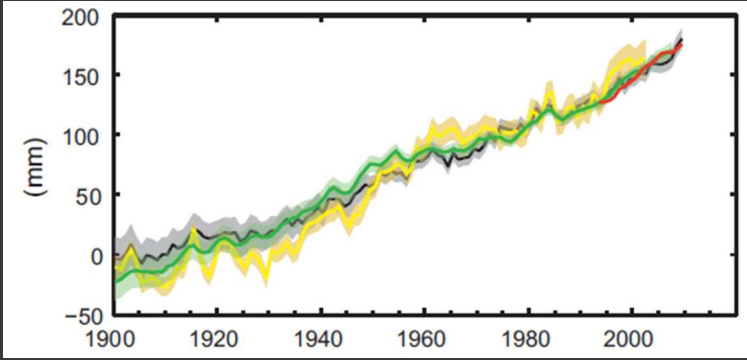
Estensione massima e minima dei ghiacci artici nel 2006



Agosto 2018, prima rotta artica compiuta da Maersk



Oceani: una crescita lenta e in costante aumento

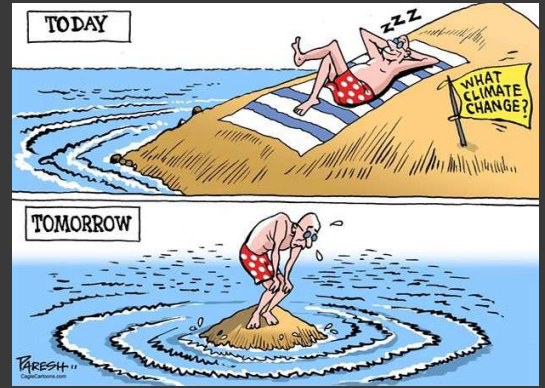


Tasso di crescita del livello dei mari:

- 1.7 mm annui (1901-2010)
- 2.0 mm annui (1971-2010)
- 3.2 mm annui (1993-2010)



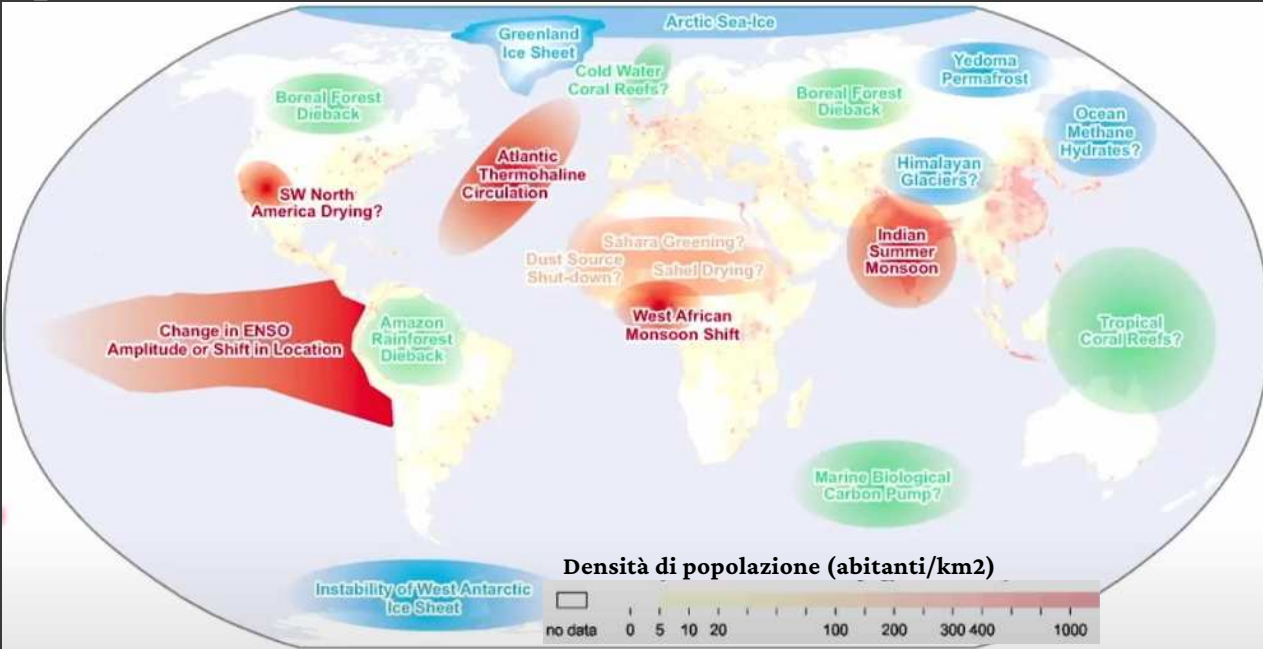
CRESCITA DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE 3.2mm/anno SUL PERIODO 1993-2010	CONTRIBUTO RELATIVO
Espansione termica	37%
Ghiacciai ad esclusione della Groenlandia	26%
Groenlandia	14%
Calotta polare Antartica	9%
Accumulo di acqua sui continenti	13%



IMPATTI PER IL FUTURO?

Fonte: IPCC AR5 WGI

I punti di non ritorno

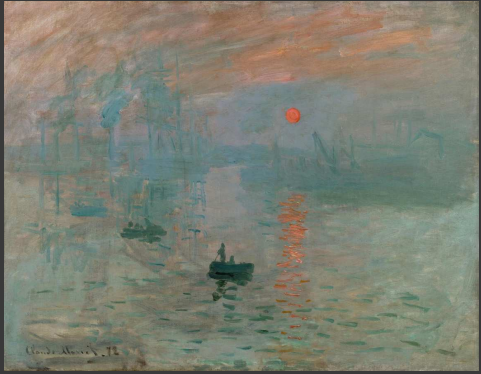
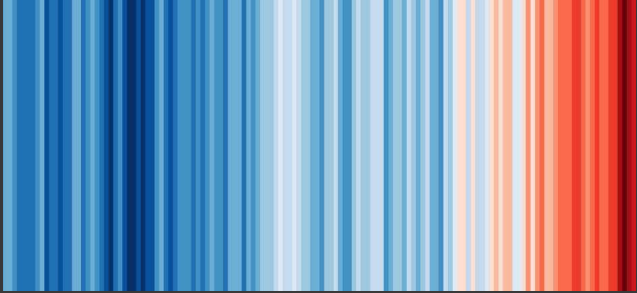
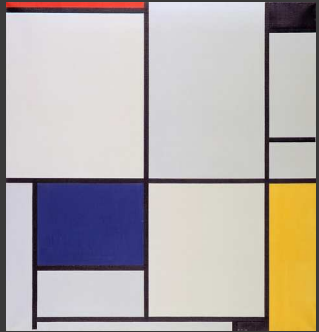


● Cambio di circolazione ● Fusione ● Perdita di biomi

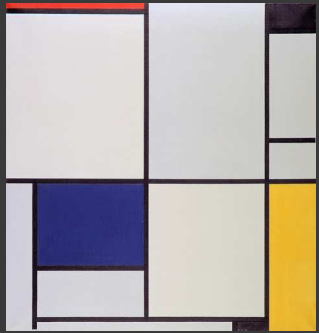


Fonte: Timothy Lenton (University of East Anglia, 2008)

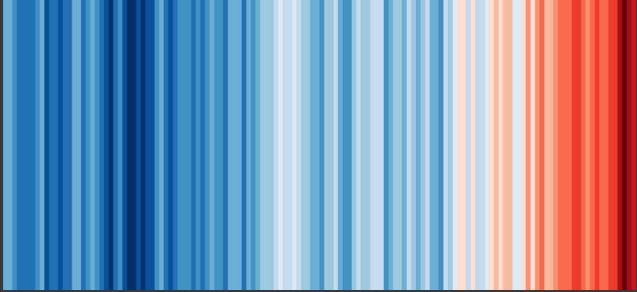
Impara l'arte...



Impara l'arte...



Piet Mondrian,
Tableau I, 1921,
Kunstmuseum,
L'Aia

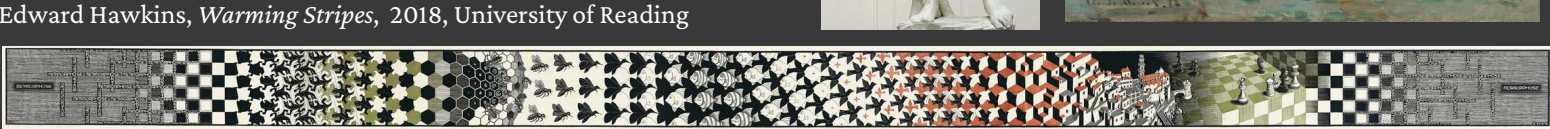


Katsushika Hokusai, *La grande onda di Kanagawa*,
1831, Metropolitan Museum of Art, New York

Michelangelo
Buonarroti,
David, 1501-
1504, Galleria
dell'Accademia,
Firenze



Claude Monet, *Impression, soleil
levant*, 1872, Musée Marmottan
Monet, Parigi

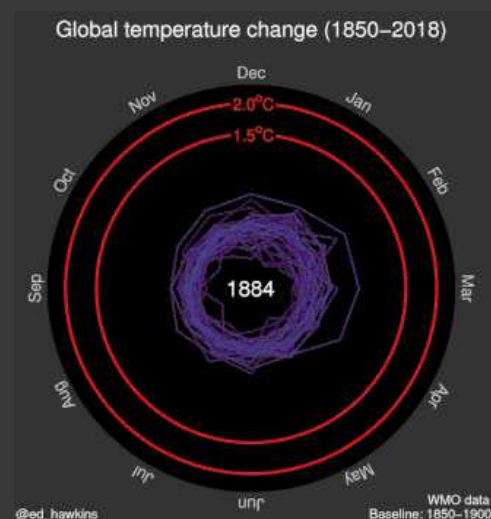


Maurits Cornelis Escher, *Metamorfosi II*, 1939-1940, Escher in Het Paleis, L'Aia

Impara l'arte... di divulgare



Ed Hawkins: climatologo presso l'Università di Reading, nel Regno Unito, Lead Author (autore principale) per il sesto rapporto di valutazione (AR6) del Working Group I dell'IPCC.



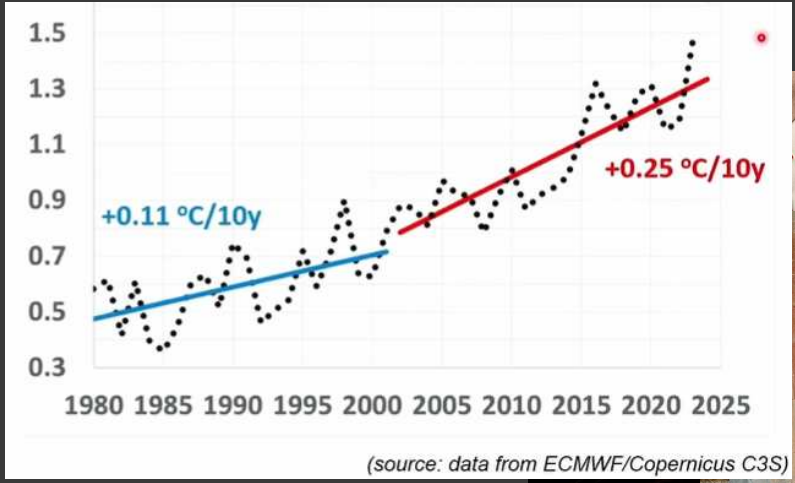
Un'altra "opera" dello stesso autore: la *Climate Spiral*

QUALE

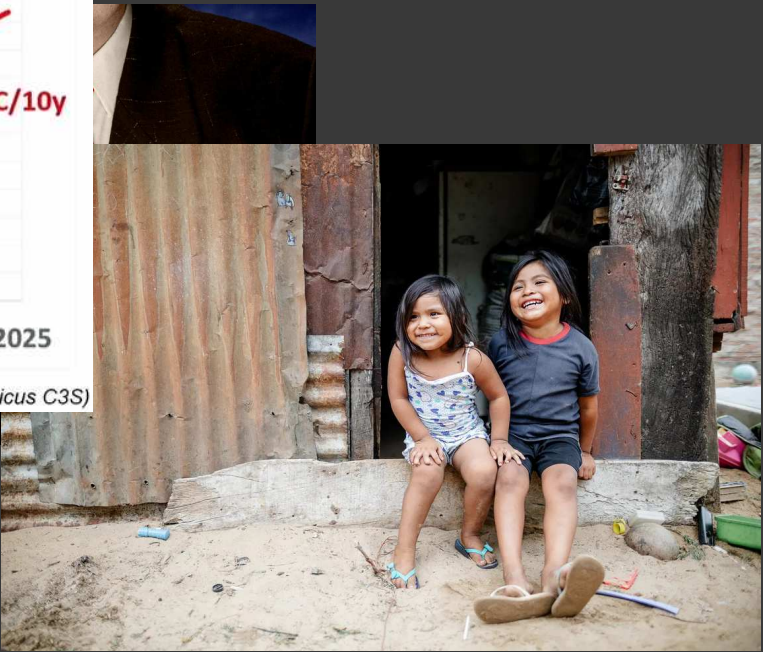


FUTURO?

Il riscaldamento sta accelerando



QUALE



FUTURO?

E le prime a pagarne le conseguenze sono le popolazioni più povere. Foto: Emily Turner

IPCC: struttura e obiettivi

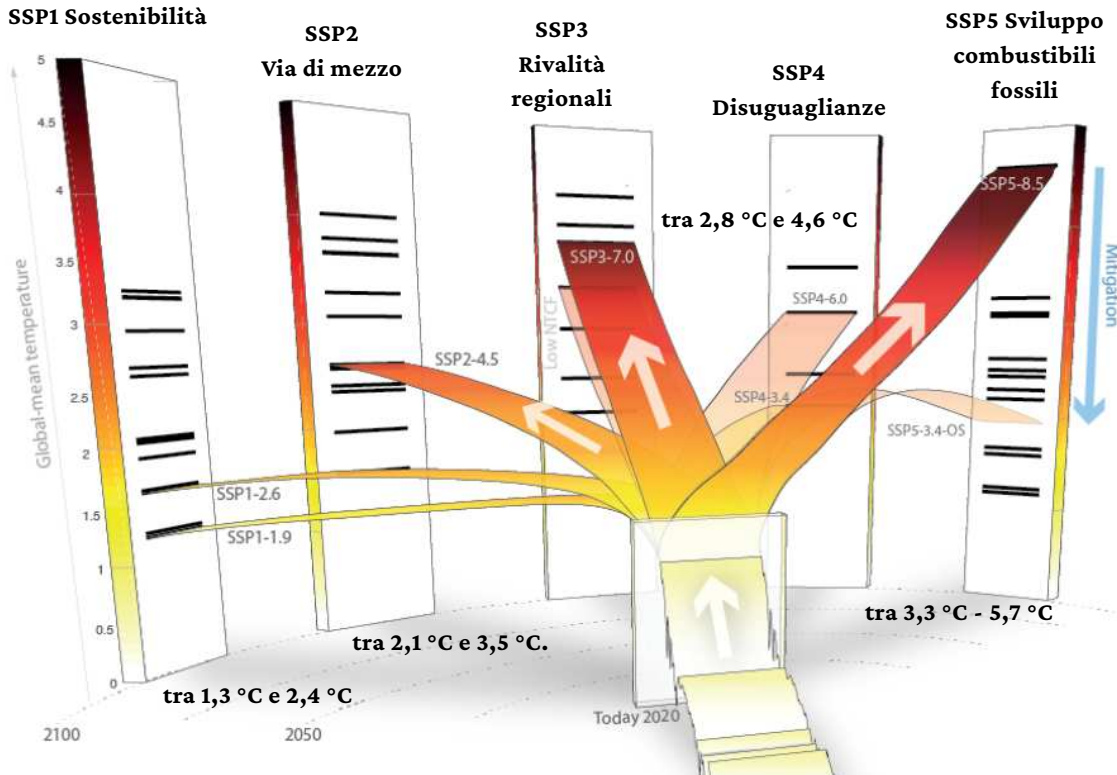


QUALE



FUTURO?

IPCC: i 5 mondi possibili e i relativi aumenti di temperatura



Shared Socio-economic Pathways

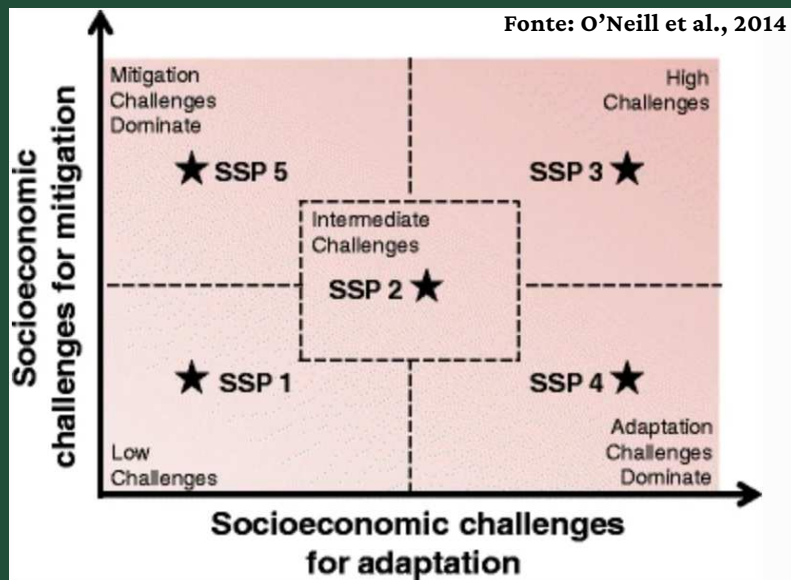
inglobano e sostituiscono

Representative Concentration Pathways

I 5 mondi possibili tra mitigazione e adattamento

un mondo “di mezzo” dove i trend seguono ampiamente i loro modelli storici (SSP2)

un mondo caratterizzato da crescita rapida e senza limiti nella produzione economica e nell’uso dell’energia (SSP5)



un mondo frammentato da “neo-nazionalismi” (SSP3)

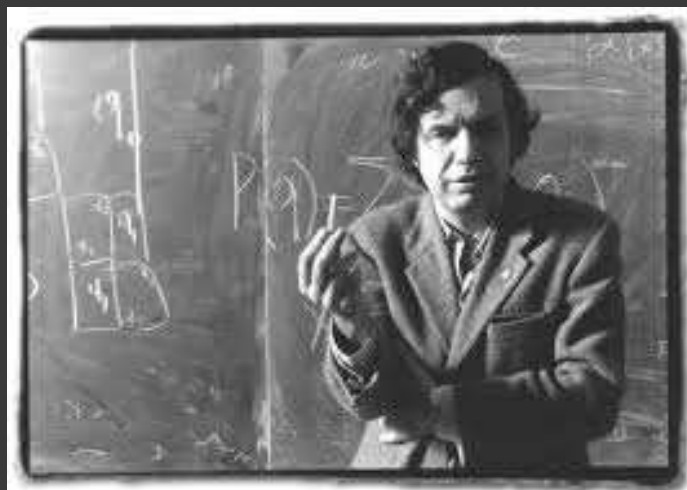
un mondo connotato da crescita sostenibile e uguaglianza (SSP1)

un mondo con disuguaglianze sempre crescenti (SSP4)

Riepilogando: differenze tra meteo e clima



Colonnello Mario Giuliacci



Premio Nobel Giorgio Parisi

Riepilogando: le 5 componenti del clima





Take home messages:

- Modelli e satelliti provano l'impennata di CO₂.
- Le Warming Stripes rendono graficamente l'idea del problema.
- Scenari SSP di IPCC: il clima futuro è una nostra scelta.

un potente

grazie

Per conoscere tutte le
ALTRE CONNESSIONI CULTURALI

www.conneessioniculturali.com



I viaggi virtuali che **illuminano** la mente