

CAMBIAMENTI CLIMATICI

___ Indice ___

Introduzione

Il clima

Il Sole e il clima

Il bilancio radiativo e l'effetto serra

Effetto serra

Cambiamenti climatici: conseguenze

I gas serra

Gas serra a confronto

Quando "nacque" l'effetto serra

Che cos'è l'IPCC?

Il clima nel tempo

Quaternario o Era glaciale

Tempi recenti: l'anno senza estate

Il mito della Groenlandia rigogliosa

Dal caldo al freddo

Tamigi "frozen"

Venezia on ice

Studiare il clima

Pollini fossili

Stratigrafia isotopica

Indicatori geologici

Variazioni del mare nel passato

CAMBIAMENTI CLIMATICI

Introduzione

Il clima influenza continuamente la nostra intera esistenza. Il cielo è spesso la prima cosa che guardiamo appena svegli di mattino. La pressione e l'umidità influiscono sul nostro corpo e sul nostro umore; chi, infatti, non ha mai detto "oggi sono depresso: sarà colpa della pioggia!". Almeno una volta al giorno quasi tutti ci informiamo sulle previsioni del tempo e fin dalla nascita siamo abituati a cicli stagionali che regolano i cicli biologici di tutti gli esseri viventi. Sono stati anche inventati dei detti popolari proprio sul tempo che spesso ci sembrano banali luoghi comuni; ma la frase "le stagioni non sono più quelle di una volta", nonostante sia una lamentela davvero antica, poiché la diceva già Virgilio 2000 anni fa, non ci è sembrata mai così attuale come in questi ultimi anni. Negli ultimi anni, infatti, assistiamo a primavere che sembrano estati, inverni che sembrano autunni e nel frattempo i media ci martellano con l'effetto serra e il riscaldamento globale della temperatura, gli ambientalisti lanciano catastrofiche previsioni per il futuro, mentre gli scienziati e i politici sembra che cerchino di calmare gli allarmismi. In tutta questa enorme confusione siamo sempre noi "persone comuni" a non riuscire ad avere le idee chiare e quindi è nostro dovere almeno cercare di capire un po' meglio come stanno realmente le cose.

Il clima

La parola clima deriva dal greco *κλίμα*, ovvero inclinazione. Il clima, infatti, è in parte determinato dall'inclinazione dei raggi solari sulla superficie della Terra al variare della latitudine e delle stagioni. Il termine "clima" viene spesso utilizzato come sinonimo di "tempo" meteorologico, anche se in realtà hanno significati ben diversi. Il tempo meteorologico è l'insieme degli elementi meteorologici che caratterizzano l'atmosfera in un preciso istante. Se guardiamo fuori dalla finestra, possiamo renderci subito vedere che tempo fa. Il clima, invece, viene definito come "l'insieme dei fenomeni meteorologici (ad esempio temperatura, precipitazioni, venti, ecc.) che caratterizzano lo stato medio dell'atmosfera in un punto della superficie terrestre" (secondo la definizione di J. Hann, un meteorologo austriaco). Data l'estrema variabilità dei parametri meteorologici, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale ha stabilito che, per poter individuare le caratteristiche climatiche, e quindi "lo stato medio dell'atmosfera", di una data località, la durata minima delle serie storico-temporali dei dati meteorologici deve essere di almeno 30 anni. La disciplina che studia il clima, i suoi elementi e i suoi fattori e classifica i tipi climatici è la climatologia.

Il Sole e il clima

Se la Terra ruotasse intorno al Sole in modo perfettamente verticale come una trottola, il clima non varierebbe durante l'anno, ovvero non ci sarebbero le stagioni, perché non cambierebbe la quantità di radiazioni solari che attraversando l'atmosfera arriverebbe al suolo. Se l'asse terrestre non avesse alcuna inclinazione rispetto al piano dell'orbita, non solo non ci sarebbero le stagioni, ma neppure differenze tra un emisfero e l'altro e ovviamente nemmeno i tropici esisterebbero. Invece, per

nostra fortuna, durante l'anno la posizione relativa dell'asse terrestre rispetto ai raggi del Sole cambia e, quindi, ci ritroviamo con diverse angolazioni di incidenza dei raggi solari. Così il 21 giugno, il solstizio di estate, i raggi del Sole sono perpendicolari rispetto alla linea immaginaria chiamata tropico del Cancro nell'emisfero boreale; mentre il 22 dicembre, il solstizio di inverno nel nostro emisfero e di estate in quello australe, i raggi colpiscono perpendicolarmente la linea chiamata Tropico del Capricorno, che si trova nell'emisfero australe. Durante i due equinozi, invece, i raggi solari sono perpendicolari all'equatore. I raggi che arrivano al suolo in modo perpendicolare hanno la massima penetrazione nell'atmosfera e il massimo effetto termico ai due tropici, per questo la fascia tropicale è quella con il clima più caldo e costante durante l'anno. La variazione del clima aumenta a mano a mano che si sale a Nord verso l'emisfero boreale e a Sud verso quello australe. È proprio la differenza di temperatura tra le varie latitudini ad innescare la complessa termodinamica climatica che viene in realtà influenzata da molti altri fattori: la geografia locale, come la presenza di grandi masse di acqua o di alti rilievi, le condizioni dell'atmosfera, dalla copertura nevosa, dai ghiacciai, ecc. Un esempio lampante di come la geografia locale influenzi il clima si è avuto con la costruzione della diga di Assuan che comportò la formazione del Lago Nasser, un immenso bacino artificiale che ebbe implicazioni profonde non solo sul clima della regione, ma anche su quello del Mediterraneo meridionale. Prima della sua costruzione non si sarebbe potuto immaginare una tale influenza climatica e da allora è chiaro che le dinamiche climatiche sono fenomeni davvero complessi da prevedere in modo matematico.

Il bilancio radiativo e l'effetto serra

A parte una piccola quantità di energia proveniente dall'interno della Terra, l'energia che alimenta il sistema climatico del nostro pianeta proviene essenzialmente dal Sole. La Terra, infatti, riceve dal Sole energia radiante (cioè trasportata dalla radiazione elettromagnetica) composta per circa metà da luce visibile, da una piccola parte di ultravioletto e per il resto da infrarosso. La radiazione solare che colpisce la superficie terrestre in un'ora è pari a circa 342 w/m^2 ; di questi solo 235 w/m^2 sono effettivamente assorbiti dalla superficie terrestre, mentre i restanti 107 sono immediatamente riflessi nello spazio. La percentuale della radiazione totale incidente che viene riflessa dalla superficie terrestre viene detta albedo. L'albedo della Terra, quindi, è pari al 30% ($342/107=30\%$). Di questi 107 w/m^2 , 77 sono riflessi dalle nuvole, dai gas e dalle microparticelle presenti in atmosfera (aerosol), mentre i restanti 30 w/m^2 ritornano in atmosfera perché riflessi dalle superfici chiare presenti sulla Terra, costituite prevalentemente da ghiacciai, neve e deserti. La neve ha un'elevatissima albedo, pari a $0,9$, il che significa che il 90% della radiazione che la colpisce viene riflessa. L'energia che non viene riflessa verso lo spazio, pari a 235 w/m^2 , viene assorbita dalla superficie terrestre e dall'atmosfera e riemessa sotto forma di radiazione infrarossa (calore). L'atmosfera, costituita prevalentemente da azoto e ossigeno, trasparenti alla radiazione termica infrarossa, lascia sfuggire verso lo spazio queste radiazioni. Esistono, però, alcuni gas (chiamati gas serra) che assorbono la radiazione termica e ne impediscono la dispersione causando il riscaldamento dell'atmosfera. Questo fenomeno fisico naturale, chiamato effetto serra, è

importantissimo per la vita sulla Terra, perché consente alla superficie terrestre di avere una temperatura media di 14°C anziché i -18°C che si avrebbero in assenza di atmosfera e di gas serra.

Effetto serra

Come anticipato, l'effetto serra è un fenomeno naturale, provocato da una miscela di gas presenti nell'atmosfera (definiti, appunto, gas serra) e senza il quale non potrebbe esserci vita sulla Terra. In questo ultimo secolo, però, l'intensa attività produttiva umana ha provocato un aumento della concentrazione di "gas serra" nell'atmosfera. Le cause sono duplici: da una parte, le crescenti emissioni originate prevalentemente dai processi tradizionali di produzione di energia (combustibili fossili); dall'altra, la progressiva distruzione delle foreste che, grazie alla fotosintesi clorofilliana delle piante, sono in grado di "assorbire" l'anidride carbonica presente nell'aria e trasformarla in materia organica (foglie, rami e radici), funzionando come dei veri e propri "serbatoi" o "pozzi" (in inglese "sink") di anidride carbonica. Se la concentrazione di gas serra continua ad aumentare ai ritmi degli ultimi decenni, c'è il rischio che si inneschi un rapido riscaldamento del clima terrestre, poiché la capacità dell'atmosfera di trattenere il calore sulla Terra diventa sempre maggiore. Un aumento eccessivo e in tempi brevi delle temperature dell'atmosfera e degli oceani avrebbe effetti drammatici sugli equilibri climatici, e notevoli impatti sull'uomo. Secondo alcuni esperti di clima, se non si modificheranno i comportamenti umani, nei prossimi 100 anni la temperatura della Terra potrebbe aumentare in media di 1,0 – 3,5°C. Altri dati ci danno un'indicazione delle variazioni intervenute nell'ultimo secolo: dalla rivoluzione industriale ad oggi la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è aumentata del 30%; nello stesso periodo la concentrazione di metano - emesso principalmente dalle risaie e dall'allevamento - è cresciuta del 145%. Molti studiosi, incaricati da organizzazioni nazionali ed internazionali, tra le quali il IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), da alcuni anni effettuano un monitoraggio sul clima del nostro pianeta e studiano i possibili effetti dell'aumento di temperatura della bassa atmosfera e della superficie terrestre, che saranno approfonditi in seguito.

Cambiamenti climatici: conseguenze

Sulla base delle ricerche dell'Organismo Internazionale che studia i cambiamenti del clima, l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), l'aumento delle concentrazioni di gas serra in atmosfera è la maggiore causa dell'intensificazione dei seguenti fenomeni:

- Aumento della temperatura del pianeta.
- Aumento delle precipitazioni: soprattutto nell'emisfero Nord, e in particolare alle medie e alte latitudini. Nelle regioni tropicali e subtropicali, invece, diminuzioni delle piogge.
- Aumento nella frequenza e nell'intensità di eventi climatici estremi: non ci sono ancora dati scientifici dimostrabili, ma pare che una conseguenza dei cambiamenti climatici possa essere l'aumento di eventi catastrofici. Potrebbero verificarsi lunghi periodi di siccità, improvvise piogge eccezionali, alluvioni, ondate di caldo e di freddo eccessivo. I cicloni tropicali

potrebbero essere potenziati dall'aumento delle piogge violente, dei venti e del livello del mare.

Aumento del rischio di desertificazione in alcune zone.

- Diminuzione dei ghiacciai e delle nevi perenni.
- Crescita del livello del mare.
- Perdita di biodiversità: molte specie animali non saranno in grado di adattarsi a questi rapidi cambiamenti climatici. Gli studiosi, infatti, hanno stabilito che gli ecosistemi sono in grado di adattarsi a cambiamenti pari a 1°C in un secolo.
- Problemi nella produzione alimentare: piogge eccessive e caldo intenso mettono a rischio le colture, provocando carestie e malnutrizione. La FAO sostiene che ci sarà una perdita di circa 11% di terreni coltivabili nei Paesi in via di sviluppo entro il 2080, con riduzione della produzione di cereali e conseguente aumento della fame nel mondo.
- Diffusione delle malattie: sembra che il cambiamento climatico possa favorire la diffusione di malattie tropicali come la malaria e la dengue. Infatti, le zanzare che portano queste malattie, si stanno spostando verso nord, dove la temperatura è in aumento. Inoltre, l'aumento di temperatura favorisce l'inquinamento biologico delle acque, facendo proliferare organismi infestanti.

I gas serra

I gas serra naturali comprendono il vapor d'acqua, l'anidride carbonica, il metano, il protossido d'azoto e l'ozono. Alcune attività dell'uomo contribuiscono ad aumentare la concentrazione in atmosfera di questi gas e, inoltre, liberano nell'aria altri gas serra di origine esclusivamente antropogenica. Vediamo ora in dettaglio quali sono le caratteristiche dei principali gas ad effetto serra.

Vapore acqueo. Il vapore acqueo è il principale gas serra, responsabile dei 2/3 dell'effetto serra naturale per la sua abbondanza in atmosfera e per la sua efficacia. Il vapore acqueo atmosferico è parte del ciclo idrologico, un sistema chiuso di circolazione dell'acqua dagli oceani e dai continenti verso l'atmosfera in un ciclo continuo di evaporazione, traspirazione, condensazione e precipitazione. La sua concentrazione è molto variabile nello spazio, ma relativamente stabile nel tempo. Inoltre, non viene direttamente influenzata dalle attività umane, ma dipende esclusivamente dalla temperatura

dell'aria. Per ogni grado Celsius in più, il contenuto di vapore nell'aria aumenta del 7%.

Anidride carbonica. L'anidride carbonica (CO₂) è il principale gas serra derivante dalle attività umane ed è quello che maggiormente contribuisce all'effetto serra antropico. La CO₂ è uno dei principali composti del carbonio e costituisce il principale veicolo attraverso il quale il carbonio è scambiato in natura tra le riserve (o serbatoi) presenti nell'atmosfera, idrosfera, geosfera e biosfera, attraverso i processi che costituiscono il ciclo del carbonio:

- nella biosfera il carbonio è presente all'interno delle molecole organiche (es. lipidi, glucidi, ecc.) con circa 2.000 miliardi di tonnellate o gigatonnellate;
- negli oceani il carbonio è sciolto in forma di carbonati e bicarbonati con 39.000 gigatonnellate;
- nella geosfera il carbonio si trova sotto forma di calcare con 90.000.000 gigatonnellate e combustibile fossile; con 6.000
- nell'atmosfera il carbonio è presente come anidride carbonica con 750 gigatonnellate.

Questi serbatoi sono legati tra loro da scambi, il cui bilancio naturale, in assenza di attività umane, è pressoché in pareggio. A partire dalla Rivoluzione Industriale, con l'intensificarsi delle attività umane, le concentrazioni di anidride carbonica in atmosfera sono aumentate ed oggi la CO₂ è responsabile del 65% dell'effetto serra antropico. L'anidride carbonica derivante dalle attività umane è legata principalmente alla reazione di combustione dei combustibili fossili, alla deforestazione e al cambiamento dell'uso del suolo. La CO₂ può permanere in atmosfera per un periodo che varia tra i 50 e i 250 anni prima di ritornare al suolo.

Metano. Il metano (CH₄) deriva dalla fermentazione anaerobica (cioè dalla decomposizione) della sostanza organica. In natura il metano viene emesso da paludi e mangrovie, mentre le emissioni antropogeniche provengono soprattutto dall'utilizzo di combustibili fossili, dalla zootecnica, dall'agricoltura (risaie) e dalle discariche. Pur essendo più potente della CO₂, il metano contribuisce al 17% dell'effetto serra antropico, per via della minor concentrazione e del più breve tempo di residenza in atmosfera rispetto all'anidride carbonica.

Protossido di azoto. Il protossido di azoto (N₂O) è un gas serra molto potente e con un tempo di permanenza in atmosfera molto lungo (120 anni). Le fonti naturali di N₂O sono gli oceani, le foreste pluviali e i batteri presenti nel suolo. Per quanto riguarda l'attività umana, invece, deriva principalmente da fertilizzanti azotati utilizzati in agricoltura e in alcune produzioni industriali.

Clorofluorocarburi. I clorofluorocarburi o CFC, a differenza dei gas precedentemente descritti, che sono tutti presenti in natura, sono stati prodotti artificialmente dall'uomo e impiegati come refrigeranti, propellenti nelle bombolette spray ed estinguenti negli impianti antincendio. Oltre ad essere responsabili della distruzione dell'ozono stratosferico (buco dell'ozono) sono dei potenti gas serra che persistono in atmosfera per migliaia di anni. Le loro emissioni si sono notevolmente ridotte grazie all'applicazione del Protocollo di Montreal (1987) che ne ha proibito l'utilizzo. Tuttavia, anche i loro sostituti (idrofluorocarburi e perfluorocarburi) sono potenti gas serra.

Gas serra a confronto

Per calcolare il contributo dei differenti gas all'effetto serra bisogna considerare tre parametri fondamentali:

- la concentrazione in atmosfera
- il forcing radiativo di ogni gas, cioè la capacità di intrappolare l'energia che va dal nostro Pianeta verso lo spazio

- la persistenza in atmosfera di ogni gas, cioè il tempo medio in cui un gas rimane in atmosfera; infatti, se un gas rimane in atmosfera per poco tempo avrà un minor effetto di uno che ci rimane a lungo.

Dal momento che i gas serra hanno diverse capacità di assorbire la radiazione infrarossa è stato introdotto il concetto di potenziale di riscaldamento globale (GWP = Global Warming Potential), per cui tutti i gas vengono rapportati all'anidride carbonica alla quale viene assegnato il potenziale 1.

Quando “nacque” l'effetto serra

Nel 1824 lo scienziato francese Jean Baptiste Fourier, famoso per alcune scoperte nel campo della fisica e della matematica, fu il primo a parlare di “effetto serra” e a misurarlo con l'eliotermometro. Secondo questo fenomeno l'atmosfera si comporta come il vetro di una serra, cioè è “trasparente” alla radiazione solare che proviene dal Sole, mentre è parzialmente “opaca” a quella termica emessa dalla superficie terrestre. L'effetto serra è quindi un fenomeno naturale e sussiste sempre sui corpi celesti che possiedono un'atmosfera. Il vero problema, quindi, è dato dalla composizione dell'atmosfera che può aumentare o diminuire gli effetti.

Il chimico svedese Svante Arrhenius nel 1895, dopo circa centocinquanta anni dalla Rivoluzione Industriale, concluse dopo molti calcoli che l'incremento dell'anidride carbonica (CO₂) nell'atmosfera, avrebbe condotto negli anni ad un riscaldamento globale del Pianeta. Nel 1955 Charles Keeling confermò che i livelli di anidride carbonica stavano davvero salendo, tanto che tre anni dopo nelle Isole Hawaii, si iniziò a misurare sistematicamente la concentrazione di questo gas con la costruzione di un vero osservatorio. Alla fine degli anni '80 viene istituito il comitato di esperti delle Nazioni Unite chiamato IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) per vagliare e sintetizzare i risultati ottenuti dalle varie ricerche.

Che cos'è l'IPCC?

A partire dalla fine degli anni '80, si diffuse tra gli scienziati la consapevolezza che le grandi quantità di gas serra emesse dalle attività umane stavano provocando un aumento dell'effetto serra e, di conseguenza, importanti cambiamenti sul clima che potevano comportare molti problemi.

Per avere una conoscenza il più possibile esaustiva e chiara della situazione la World Meteorological Organization (WMO) e il United Nations Environment Programme (UNEP) istituirono nel 1988 l'IPCC, l'Intergovernmental Panel on Climate Change, ovvero il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico, allo scopo di “fornire una chiara visione scientifica dello stato attuale delle conoscenze sul cambiamento climatico e sulle sue possibili ripercussioni ambientali e socio-economiche”.

L'IPCC è un organo intergovernativo a cui aderiscono tutti i Paesi membri dell'UNEP e della WMO e non si occupa di ricerca diretta, ma di analisi. Quindi cosa fa esattamente? L'IPCC punta a raccogliere e riassumere tutte le informazioni rilevanti per comprendere il fenomeno del cambiamento climatico, i suoi possibili impatti e in particolare i rischi per l'uomo ad essi associati, nonché le eventuali misure di risposta di adattamento e mitigazione da mettere in atto prodotte dalla comunità scientifica di tutto il mondo, previa un'attenta revisione che coinvolge centinaia di esperti

e che garantisce la veridicità delle informazioni raccolte. Il compito di coordinare le attività nel proprio paese spetta al Focal Point IPCC, costituito per ogni Paese aderente. L'importanza di questo lavoro è stata riconosciuta nel 2007 con l'assegnazione del Premio Nobel per la Pace all'IPCC e Albert (Al) Gore Jr. "per l'impegno profuso nella costruzione e nella divulgazione di una maggiore conoscenza sui cambiamenti climatici antropogenici, e nel porre le basi per le misure che sono necessarie per contrastarli".

L'IPCC è strutturato in tre gruppi di lavoro (Working Group, WG) e in una task force:

- il WG I si occupa del sistema clima dal punto di vista fisico;
- il WG II indaga sulla vulnerabilità dei sistemi naturali e socio-economici, si occupa della valutazione degli impatti e delle possibili opzioni di adattamento;
- il WG III studia come mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici e propone valutazioni economiche;
- la Task Force sugli Inventari Nazionali dei gas effetto serra è responsabile del programma IPCC sugli Inventari Nazionali dei gas effetto serra e il suo compito principale è quello di sviluppare e perfezionare una metodologia condivisa a livello internazionale e il software per il calcolo delle emissioni nazionali di gas serra.

Una volta l'anno il comitato si riunisce in sessione plenaria per adottare tutte le decisioni ufficiali, come l'approvazione dei rapporti e la definizione dei piani di lavoro. Il compito principale dell'IPCC è quindi produrre periodicamente dei Rapporti di Valutazione (Assessment Reports, AR) che contengono uno stato dell'arte delle conoscenze più significative ottenute dagli scienziati nell'ambito del cambiamento climatico. Il Rapporto di Valutazione è diviso in tre parti, una per ciascun gruppo di lavoro ed è stato pubblicato per la prima volta nel 1990, poi nel 1995, nel 2001, nel 2007 e nel 2014. Nel 2022 è stato pubblicato il Sesto Rapporto, AR6. Oltre agli AR, l'IPCC redige anche Rapporti Speciali (Special Reports) e Articoli Tecnici (Technical Papers), fornendo anche supporto scientifico alla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC).

Il clima nel tempo

Sin dalle origini della Terra, circa 5 miliardi di anni fa, si sono alternati periodi freddi, culminati in numerosi episodi di glaciazione durati milioni di anni, e periodi di clima temperato o caldo, della durata di centinaia di milioni di anni. Il clima ha profondamente condizionato la vita degli esseri viventi che abitano la Terra e ad ogni sua variazione, piante, animali e uomo hanno dovuto adattarsi anche agli ambienti più inospitali. Ci sono sempre state, quindi, delle variazioni climatiche nei secoli ma è importante analizzare l'ampiezza delle variazioni, cioè quanto influenzano la nostra vita, e la loro durata. Se consideriamo l'esperienza personale della vita di un uomo, si possono osservare variazioni stagionali o annuali, ad esempio anni più caldi o più piovosi di altri. Nei secoli, infatti, ci sono state variazioni climatiche molto più ampie rispetto ad oggi. L'innalzamento della temperatura è sempre associato alla fusione dei ghiacci polari e continentali, con conseguente aumento del livello dei mari. Negli ultimi 500 milioni di anni ci sono state variazioni del livello del mare anche di

alcune centinaia di metri rispetto ad oggi (200-300 metri), ma con durata molto lunga, circa 300 milioni di anni, quindi non apprezzabile durante la vita di un uomo.

Cause delle oscillazioni del livello dei mari

Le cause delle oscillazioni del livello dei mari sono differenti, ma dovute principalmente a fenomeni di carattere geologico, climatico, astronomico e antropico. Le principali cause sono dovute principalmente a:

- variazioni del volume dei bacini oceanici, cioè lo spazio dove finisce l'acqua;
- variazioni della quantità di acqua negli oceani;
- variazioni minori: es. variazioni della densità di acqua marina, essiccamento dei mari, parametri meteo marini (pressione atmosferica e venti).

Nel primo caso la variazione del volume dei bacini oceanici è dovuta a processi geologici all'interno della Terra. È noto che sul fondale degli oceani ci siano delle fasce chiamate "dorsali oceaniche", dove il magma risale e gonfia la crosta terrestre che così sposta la massa di acqua facendo salire il livello del mare. Questo è un processo così lento che un uomo non è in grado di apprezzarlo durante la sua vita, infatti, la variazione è di circa 1 cm ogni 1000 anni. La variazione della quantità di acqua negli oceani, invece, è indotta da cause climatiche: durante i periodi di raffreddamento del clima, gran parte dell'acqua degli oceani viene intrappolata nelle calotte glaciali dell'Artide e dell'Antartide e nei ghiacciai continentali, mentre quando il clima è più caldo i ghiacci si fondono facendo rialzare il livello del mare molto velocemente anche di 1 cm all'anno. A tutte queste cause naturali si vanno ad aggiungere nell'ultimo secolo anche gli effetti indotti dalle attività umane che hanno introdotto grandi quantità di gas serra, i quali incidono sui cambiamenti climatici in modo più rapido, e quindi ci interessano da vicino.

Quaternario o Era glaciale

Grandi variazioni climatiche si sono avute soprattutto durante il periodo Quaternario (cioè negli ultimi 2,5 milioni di anni), periodo in cui si è vista anche la comparsa dell'uomo sulla Terra. La causa di queste variazioni è dovuta principalmente alle espansioni massicce delle calotte polari ogni circa 100 mila anni, che hanno, a loro volta, causato l'abbassamento del livello dei mari addirittura di circa 120-140 metri rispetto ad oggi. Ricordiamo che l'ultima glaciazione ha permesso la diffusione dell'uomo sulla Terra, facilitata proprio dai corridoi di terre emerse sorti a causa dell'abbassamento del livello del mare. A questi periodi se ne sono succeduti altri con temperature elevate (molto simili a quelle attuali), che permettevano la fusione dei ghiacci e il conseguente innalzamento dei mari.

Poco prima dell'inizio del Quaternario, a causa della tettonica a zolle che permette il movimento di grandi masse di superfici emerse, la distanza fra l'America del Sud, l'Africa e il Continente Antartico fece sì che si formasse una corrente marina simile ad un enorme "fiume", con un volume di acqua equivalente a 100 volte quello del Rio delle Amazzoni.

Questo fiume si inabissava dal Nord Atlantico, raggiungeva il fondale degli oceani e percorrendo tutto l'Atlantico da Nord verso Sud girava intorno all'Africa, per poi disperdersi in parte nell'Oceano Indiano e in parte proseguiva verso il Pacifico.

Questo enorme volume di acqua ancora oggi si comporta come un grande nastro trasportatore di calore, come se fosse un condizionatore gigantesco che regola il clima sulla Terra. Quando la corrente calda sale fino all'Islanda incontra i venti freddi del Canada e quindi si raffredda, cedendo calore all'aria e mitigando l'effetto che questi venti avrebbero sul Nord Europa. Evaporando l'acqua diventa più densa e tende ad affondare, generando una corrente profonda fredda. Il calore che trasporta questo enorme "nastro" dipende ovviamente da quanto ne immagazzina durante la sua formazione. Attualmente il nastro si trova all'altezza dell'Islanda, ma la sua latitudine può variare oscillando, fino addirittura ad interrompersi, guastando il meccanismo di distribuzione del calore.

Cause delle oscillazioni di latitudine. Durante il succedersi del tempo, il calore del Sole che raggiunge la superficie della Terra e il mare, cambia a seconda dei parametri orbitali del nostro Pianeta. Le cause di queste oscillazioni di latitudine sono principalmente tre.

Variazione dell'inclinazione dell'asse di rotazione della Terra. L'inclinazione dell'asse terrestre subisce una lenta oscillazione che varia da $21,8^\circ$ a $24,4^\circ$ su un periodo regolare di circa 40.000 anni. Attualmente l'angolo è di $23,45^\circ$ e sta calando, diminuendo i contrasti tra estate e inverno.

Variazioni dell'eccentricità dell'orbita terrestre. L'orbita della Terra varia da una circonferenza quasi perfetta a un'ellisse abbastanza marcata. Quando è un'ellisse, la Terra è più vicina al Sole, altrimenti è più distante. Un ciclo orbitale completo che varia dall'orbita quasi circolare a quella a forma ellittica e viceversa, richiede 100.000 anni.

Precessione degli equinozi. Si tratta del fenomeno celeste che porta l'asse del nostro Pianeta a compiere una rotazione completa attorno ad un ipotetico cono ogni 26000 anni. Motivo per il quale le stagioni, anche se lentamente, tendono ad anticiparsi ed a stravolgersi. È esattamente quello che accade quando si fa girare una trottola, infatti, è piuttosto difficile farla star verticale con il suo asse perpendicolare al pavimento. Molto più spesso accade che la sua rotazione risulti eccentrica e che la sua punta descriva un cono in lento movimento rotatorio. Qualcosa di analogo accade anche al nostro Pianeta soltanto che le forze in gioco sono diverse.

In realtà quindi la Terra in migliaia di anni cambia la sua orientazione rispetto al Sole per poi tornare al punto di partenza ogni 26.000, 40.000 e 100.000 anni. La composizione di questi tre fattori porta la quantità di energia a variare (Watt su m^2); superata una data soglia di non ritorno, il calore è talmente alto che i ghiacciai si sciolgono e raggiungono un punto di massima, con un clima simile a quello attuale per un periodo di tempo che dura dai 6000 ai 13000 anni, fino a quando le geometrie terrestri cambiano lentamente e quindi i ghiacciai tornano ad essere più estesi in modo molto repentino (in poche centinaia di anni).

Tempi recenti: l'anno senza estate

Durante l'epoca romana il clima è piuttosto caldo, una testimonianza ci arriva da alcune piscine che gli antichi romani utilizzavano per l'allevamento delle anguille. In queste piscine, infatti, si trovavano due fori, uno in corrispondenza della alta marea e uno della bassa marea. Durante l'alta marea entrava acqua fresca dal primo foro, mentre durante la bassa marea, l'acqua ristagnante usciva dal secondo, in questo modo si aveva un continuo rinnovo di acqua, funzionava, infatti, come i filtri dei

moderni acquari. Nel Mediterraneo la marea mediamente è di circa 20 cm e quindi possiamo sapere con precisione dove arrivava il livello del mare a quell'epoca e di conseguenza quale fosse il clima. La storia ricorda che nel 218 a.C. Annibale attraversò le Alpi con gli elefanti, il che fa ritenere che a quelle quote non vi fosse neve, o meglio le nevi perenni erano accessibili a differenza di oggi.

Nel Medioevo si assiste ad un lungo periodo caldo che si estende più o meno dal IX al XII secolo. In Inghilterra si coltivava la vite, 500 chilometri più a Nord rispetto ad oggi!

Dal 1200 circa fino a circa il 1850, si ha una lunga fase fredda che interessa il Pianeta, ma in particolare l'Europa. I Vichinghi lasciano la Groenlandia, i cui porti sono bloccati dal gelo. I ghiacciai avanzano e molte valli alpine vengono abbandonate. Questo è il periodo più freddo degli ultimi 8000 anni, infatti, viene chiamato "Piccola età glaciale" e il 1816 passa alla storia come "l'anno senza estate". Venezia nei quadri del 1700 viene rappresentata completamente ghiacciata e Betlemme ricoperta di neve. Sembra anche che durante la famosa guerra di Waterloo, piogge molto consistenti abbiano fermato Napoleone, la cui cavalleria rimase impantanata.

In seguito, la temperatura risale e nel 1950 si ha la massima temperatura registrata. Dalla fine della Piccola età glaciale a oggi, la temperatura media è aumentata di 0,5-1 gradi. I ghiacciai di tutto il mondo sono in regresso, mentre il livello dei mari cresce di 2 millimetri all'anno. È il riscaldamento globale, forse provocato dall'uomo. La fase attuale secondo alcuni scienziati come quelli dell'ICRAM (Istituto Centrale per la Ricerca scientifica e tecnologica Applicata al Mare), potrebbe rappresentare la porzione di un ciclo caldo/freddo con una "normale" risalita della temperatura, che segue una fase fredda (culminata come già accennato nella prima metà del XIX secolo, fra le più evidenti di tutto l'Olocene medio e recente).

Il mito della Groenlandia rigogliosa

Si sente spesso riportare come prova contro i cambiamenti climatici causati dall'uomo, l'esempio della Groenlandia. Il vichingo Erik il Rosso, circa mille anni fa, chiamò l'isola più grande del mondo "Grönland", cioè "terra verde", terra che oggi è ricoperta dai ghiacci per l'84% della superficie. Il vichingo nel 982 d.C. era scappato dal sud-ovest della Norvegia, sua terra natia a causa di alcuni omicidi e avventurandosi verso ignoti lidi, aveva raggiunto prima l'Islanda e in seguito la Groenlandia. Questa è una terra caratterizzata da brevi estati e inverni molto lunghi e rigidi, che però, agli occhi di un Normanno abituato ad eccessi climatici, può essere sembrata più ospitale del proprio paese a causa della gran quantità di pesci, di mammiferi marini e uccelli commestibili presenti. Erik, per potersi insediare in una zona dove la sopravvivenza non è comunque facile, ha bisogno di invogliare altre persone a seguirlo. Tornato in patria racconta in modo entusiastico di una terra fertile che chiama appunto "terra verde" e convince venticinque navi a partire con lui verso questo "paradiso verde". Quindi, il nome di "terra verde" da solo non può essere una prova inconfutabile di un clima molto più caldo all'epoca dei Vichinghi, ma potrebbe invece rivelarsi una sorta di "slogan" pubblicitario per convincere altri ad insediarsi in un luogo piuttosto inospitale. Sono davvero tanti i nomi geografici che non riflettono esattamente la realtà del luogo, basti pensare alla Conca d'Oro vicino a Palermo, dove una volta si trovavano agrumeti e non di certo oro. Non è da trascurare un ulteriore fatto: resti di insediamenti vichinghi sono stati ritrovati sulla costa

sudoccidentale della Groenlandia in zone ancora oggi verdi a causa della presenza di fiordi nell'entroterra che mitigano le temperature. Tuttavia, nel 2007 illustri scienziati hanno analizzato il DNA di materiale fossile rinvenuto nelle profondità del ghiaccio della Groenlandia. Si sono potuti così identificare gli organismi presenti in quella zona: abeti rossi, pini, betulle, ontani, pioppi, coleotteri, mosche, ragni e farfalle. I ricercatori hanno stabilito che il DNA ritrovato risale a un periodo compreso tra 450.000 e gli 800.000 anni fa, ben lontano quindi dal periodo in cui visse Erik il Rosso.

Dal caldo al freddo

Tutti avranno sentito parlare su giornali e libri di "periodo caldo medievale" e "piccola era glaciale". Questi termini, oggi entrati nell'uso comune, sono stati introdotti rispettivamente dallo storico del clima Hubert Lamb nel 1965 e da un glaciologo, Francois Matthes, nel 1939. Gli storici del clima e i paleoclimatologi non sono però in accordo sulla collocazione temporale e sulla durata di questi periodi e anche le stime delle variazioni di temperatura che li hanno caratterizzati sono diverse. Inoltre, il mutamento climatico in questi periodi non è variato solo da un anno all'altro, ma anche da un luogo all'altro del pianeta. Lamb ha collocato il periodo caldo medievale tra il 950 e il 1200 per la Russia europea e la Groenlandia, mentre per l'Europa ha indicato il periodo tra il 1150 il 1300, con temperature di 1-2°C superiori a quelle dei primi anni del XX secolo. Alcuni studiosi hanno contestato queste affermazioni, concludendo che "in qualche parte del Globo, in qualche periodo dell'anno, potrebbero aver prevalso condizioni relativamente calde". La piccola era glaciale, invece, è un periodo di relativo raffreddamento, che ha interessato l'emisfero nord dal 1300 al 1850. Anche questo periodo freddo non fu costante e globale e secondo Fagan "non ci fu mai un gelo glaciale monolitico" ma "un'altalena climatica", ovvero un'alternanza di periodi caldi e freddi spesso accompagnati da fenomeni climatici disastrosi.

Le differenti tesi proposte dagli scienziati sul "periodo caldo medievale" e sulla "piccola era glaciale" hanno fatto sì che si diffondessero informazioni poco corrette, che spesso sono state usate come prova che i cambiamenti climatici attuali non sono causati dall'uomo. Per cercare di fare un po' di chiarezza, si può far riferimento al capitolo sul "Paleoclima" del Quarto Rapporto IPCC-WG1, fonte autorevole, che afferma che il periodo caldo medievale e la piccola era glaciale sono stati rispettivamente più caldi e più freddi dei periodi che li hanno immediatamente preceduti e seguiti. Inoltre, sono stati fenomeni locali, che non hanno influenzato il clima globale e non hanno interessato nello stesso periodo tutto il pianeta. E, soprattutto, non sono paragonabili all'attuale aumento di temperatura. Infatti, i dati climatici ci dicono che fino al 1900 le variazioni di temperatura sono state limitate, di pochi decimi di grado.

Tamigi "frozen"

Dato che c'è stata una continua alternanza di periodi molto freddi e periodi molto caldi nei tempi passati, alcuni credono che le variazioni di temperatura attuali siano del tutto naturali e trascurabili. In questo modo si minimizza l'importanza dei cambiamenti climatici e diventa "comodo" credere che sia tutto un'invenzione dei media. Come prova di un passato molto più freddo rispetto ad oggi,

viene spesso citato il Tamigi ghiacciato. Il Tamigi, infatti, si ghiacciava frequentemente durante la stagione fredda, mentre non succede più dall'inverno del 1814. E' vero che le temperature sono cambiate, ma ci sono stati altri inverni molto freddi come quello del 1963, il più freddo del XX secolo, in cui gelò persino il lago di Costanza. In realtà ci sono altri motivi per cui il Tamigi non si ghiaccia più. Nel 1831 è stato ricostruito il London Bridge con campate più larghe e senza la chiusa per contenere le maree, che quindi risalgono più a monte e questo evita le ghiacciate in inverno. Infatti, il Tamigi ghiacciato bloccava tutto il porto, fermando anche le attività commerciali. Inoltre, l'aumento di scarichi civili e industriali immessi in questo fiume innalza la temperatura delle acque, impedendo la formazione di ghiaccio.

Venezia on ice

Un'altra prova citata per dimostrare il freddo durante la piccola era glaciale è quella della laguna di Venezia ghiacciata. Molte sono le testimonianze scritte sulle difficoltà causate dal gelo durante la stagione fredda del 1788-1789 e persino dipinti raffiguranti barche incastrate nel ghiaccio, che impediva i rifornimenti e la navigabilità. In realtà le gelate nella laguna di Venezia sono avvenute molte altre volte, anche dopo la presunta piccola era glaciale. Infatti, si trovano testimonianze di questi eventi alla fine del 1920, nel 1956, nel 1985 e persino ultimamente nel 1991. Comunque, negli ultimi decenni il ghiaccio nella laguna di Venezia è sicuramente meno frequente, e questo non è solo a causa dell'aumento di temperatura, ma anche perché anche qui ci sono stati dei grossi cambiamenti strutturali nel porto e la costruzione di canali che hanno cambiato l'assetto idrogeologico della laguna. Questo ha favorito un maggior ricambio dell'acqua, ma anche fenomeni di acqua alta.

Studiare il clima

Il carotaggio è una tecnica di campionamento che serve per la ricerca di risorse minerarie nel sottosuolo con perforazioni di pozzi, per analisi di terreno a altre attività di scavo a scopi di ingegneria civile. Il carotaggio consiste nel prelievo di campioni di roccia cilindrica o ghiaccio chiamate carote. Da queste carote è possibile ricavare molte informazioni sulle variazioni climatiche del passato grazie a quello che rimane imprigionato nel ghiaccio come: bolle di gas, elementi chimici che compongono il ghiaccio, sedimenti, fossili e molto altro. Queste tracce sono dei veri e propri testimoni di epoche passate, utili per ricostruire la storia climatica della Terra. Le carote di ghiaccio, infatti, mantengono le caratteristiche chimiche ed isotopiche acquisite dalla neve nell'atmosfera, all'atto della condensazione e precipitazione, caratteristiche che rimangono in gran parte inalterate nel ghiaccio. Questo è possibile nelle zone interne della Groenlandia e dell'Antartide poiché la temperatura rimane sempre al di sotto dello zero e quindi non si ha una fusione superficiale, e la neve che si accumula ogni anno forma una successione stratigrafica regolare e continua di nevicate sovrapposte. Con l'andare del tempo la compattazione della neve riduce gli spazi vuoti e la neve si trasforma prima in nevato e successivamente in ghiaccio. Proprio durante il passaggio da nevato a

ghiaccio si ha l'occlusione dei pori e quindi l'intrappolamento di bolle di aria che perciò rappresentano campioni di atmosfera del passato.

Pollini fossili

Lo studio dei pollini può ricostruire la storia della vegetazione del passato e quindi dei cambiamenti climatici nel tempo. Ad esempio, possiamo immaginare un lago fossile, custodito all'interno di altri sedimenti, come un archivio con tanti cassette: ogni strato è un cassetto che contiene i pollini di tutte le piante che crescevano in quel dato momento nell'area circostante. Ci sono piante, infatti, che sono considerate indicatori climatici: vivono, cioè, in una certa regione solo se il clima è adatto alle loro esigenze. Ad esempio, querce, noccioli e tigli, tutte piante latifoglie, vivono solo in un clima temperato-caldo e non si troveranno mai in regioni dal clima rigido. Abeti e faggi, invece, vivono in regioni dal clima più fresco e umido. Nelle regioni a clima freddo continentale si trovano solo alcuni tipi di piante erbacee che costituiscono ecosistemi come la tundra o la steppa. Se il clima in una data regione cambia nel tempo, ovviamente anche la vegetazione muterà e seguirà le varie oscillazioni climatiche con grande precisione. Questo è esattamente quello che possiamo vedere studiando l'evoluzione della vegetazione di un lago fossile o di un qualsiasi altro deposito di sedimenti. Una volta individuata una zona adatta si procede con il campionamento attraverso trivellazioni o carotaggi. Una volta estratti i campioni, vengono portati in laboratorio e trattati con agenti chimici per eliminare la frazione organica e inorganica in eccesso, fino ad ottenere i pollini. In seguito, con un'analisi al microscopio si possono riconoscere le varie specie di piante presenti nella zona e quindi ricostruire le oscillazioni climatiche del passato. I dati che si possono raccogliere, quindi, vengono riassunti in diagrammi che rappresentano visivamente le vicissitudini dei differenti periodi storici. Il passaggio successivo dell'analisi consiste nell'attribuire un'età relativa alle singole fasi climatiche, ripercorrendo la sequenza degli eventi nei secoli.

Stratigrafia isotopica

La stratigrafia isotopica si basa sullo studio degli isotopi soprattutto del carbonio e dell'ossigeno. Questa tecnica può essere utilizzata per lo studio delle variazioni di temperatura, della salinità e del volume di masse di ghiaccio nel tempo. In genere si studiano i Foraminiferi planctonici e bentonici che vivono negli strati superficiali del mare o nei sedimenti marini. Dopo il trattamento degli organismi, mediante un apposito strumento, si misura il rapporto isotopico tra ossigeno "pesante" (^{18}O) e ossigeno normale (^{16}O) contenuto nella calcite dei gusci dei Foraminiferi. Se la calcite è in equilibrio isotopico con l'acqua marina, il rapporto tra i due isotopi dell'ossigeno varia in funzione della temperatura di precipitazione della calcite. Quindi, l'aumento del rapporto isotopico dell'ossigeno in un carbonato corrisponde ad un abbassamento della temperatura, mentre la sua diminuzione ad un riscaldamento. Semplificando, è possibile dunque risalire alle fluttuazioni periodiche del clima nel tempo.

Indicatori geologici

Non è di certo facile risalire alle variazioni di livello dei mari che si sono succedute nei vari millenni. Per poter ricostruire questo andamento si sono adottate varie tecniche geologiche, che studiano luoghi particolari nei pressi delle zone costiere.

Il mare scava alla base di una falesia un solco orizzontale sopra il pelo dell'acqua chiamato "solco di battente", che si approfondisce nel tempo. Quando il livello del mare scende, si forma una nuova incisione. Misurando la differenza di altezza dei due segni dovuti all'erosione, si può conoscere la variazione del livello del mare.

Speleotema: quando si ha una grotta in prossimità del mare con stalattiti, si può verificare la diversa altezza del livello del mare studiando le stalattiti stesse. Infatti, quando il mare è più basso della grotta, la stalattite si accresce perché l'acqua che percola nella grotta fa depositare il carbonato di calcio; quando invece il mare invade la grotta, la sua formazione cessa, ma alcuni organismi vanno a concrezionare la stalattite. Questi animali chiamati serpulidi, possiedono un guscio costituito da carbonato di calcio che per questo può essere datato con la tecnica del radio carbonio, e quindi scoprire in quale epoca il mare ha toccato la stalattite.

Quando il livello del mare cresce, trova una particolare morfologia e quindi forma una laguna interna molto bassa chiamata "paleolaguna". In questa laguna si depositano sedimenti e conchiglie fossili. Quando successivamente il mare si ritira, i depositi organici si troveranno a diverse quote sulle colline. Questi depositi vengono poi datati per sapere in quale periodo il livello del mare si trovava in quel dato punto.

Il mare che sta salendo incontra un rilievo formato dalle rocce facilmente erodibili, scolpisce quindi una piattaforma di abrasione a forma di terrazzo detta "terrazzo marino" e una sorta di scarpata. Dove si ha il flesso tra la piattaforma di abrasione e l'inizio della scarpata, punto chiamato "margine interno", si può misurare il livello del mare nel passato.

Variazioni del mare nel passato

Quando si hanno tanti indicatori geologici si può costruire una curva eustatica, che ci indica i differenti livelli del mare durante i millenni. Ed esempio 220.000 anni fa il mare si trovava tre metri al di sotto del livello attuale e circa 140.000 anni fa addirittura 140 metri al di sotto di oggi. Subito dopo è risalito molto bruscamente, in un Periodo chiamato Tirreniano, circa 125.000 anni fa, fino a 7 metri più alto rispetto ad oggi. Questo è stato un periodo molto caldo, molto più di oggi e anche la concentrazione di anidride carbonica era molto superiore rispetto ai giorni nostri. Ovviamente se il livello del mare era 7 metri sopra a quello attuale, gran parte delle attuali zone costiere italiane non esistevano, come ad esempio Venezia. Più recentemente, circa 22.000 anni fa, si ha l'ultima acme glaciale, cioè il momento più freddo dell'ultima glaciazione che aveva abbassato il mare di circa 120 metri. In questo periodo quindi metà dell'Adriatico era emerso, la Corsica e la Sardegna erano unite insieme, l'Elba era attaccata alla penisola, la Sicilia era unita sia all'Africa sia all'Italia. Grazie a queste terre emerse, molti animali africani sono potuti passare per diffondersi da noi in Italia (es. rinoceronti ed elefanti). Una volta staccate le isole dalla penisola italiana, queste specie si sono adattate a questo nuovo ambiente, dando vita ad adattamenti particolari come il fenomeno

del nanismo. In Sicilia, infatti, si sono trovati resti fossili dell'elefante nano, con un'altezza di circa 1 metro scarso, rimasto piccolo rispetto ai cugini africani poiché su di un'isola non aveva predatori, quindi nessuna necessità nel difendersi, e a causa della scarsità del cibo. Con l'abbassamento del mare di queste proporzioni, l'uomo ha trovato anche terreni fertili e nuovi territori di caccia. Dopo l'acme glaciale, il livello del mare inizia di nuovo ad alzarsi fino ai giorni nostri. Quindi alla fine dell'Era Glaciale, inizia un nuovo periodo caldo e i ghiacci si sciolgono permettendo al mare di risalire davvero velocemente (circa 10 metri in 100 anni). Si trovano, infatti, riferimenti storici e religiosi a questo periodo, come il Diluvio Universale. Le pianure dove viveva l'uomo, quindi, vengono invase dal mare e questo costringe a spostamenti anche numerosi durante la vita di un uomo, in particolare in zone vicino al Mar Nero che sono piuttosto pianeggianti. Circa 10.000 anni fa il mare si trova 50 metri al di sotto di oggi, poi la Terra torna a scaldarsi e quindi il mare risale repentinamente circa 5000 anni fa. Una fase che culmina tra 7500 anni fa a 4600 circa, quando vengono raggiunte le temperature più alte degli ultimi diecimila anni. Circa 6000 anni fa il Sahara ha un clima molto umido ed è ricoperto da vaste praterie che ospitano civiltà evolute.