

Climate Central

Le stranezze del clima

Che cosa sta cambiando,
e perché

Traduzione di Luisa Doplicher

Chiavi di lettura a cura di
Federico Tibone e Lisa Vozza

indice

<i>Introduzione</i>	5
1. Che cosa dice la scienza	13
2. Che cosa sta realmente succedendo	71
3. Che cosa potrebbe riservarci il futuro	109
4. Che cosa possiamo fare?	145
<i>Epilogo: Ma che cos'è questo famoso IPCC?</i>	173
<i>Le nostre fonti</i>	177
<i>I nostri revisori esterni</i>	178
<i>Indice analitico</i>	180

Introduzione

Nel febbraio del 2010 l'opinionista e premio Pulitzer Thomas Friedman ha lanciato questo appello nella sua rubrica sul *New York Times*:

Sebbene l'esistenza del cambiamento climatico sia confermata da una marea di ricerche svolte da varie istituzioni, i cittadini sono sempre più perplessi. Che cosa sta accadendo davvero? A mio parere la comunità dei climatologi dovrebbe riunire i maggiori esperti – da istituzioni come la NASA, i laboratori governativi, il Massachusetts Institute of Technology, l'università di Stanford, il California Institute of Technology e lo Hadley Centre del Meteorological Office britannico – e stilare una semplice relazione di cinquanta pagine. Potrebbero intitolarla «Che cosa sappiamo sul clima», riassumendovi lo stato attuale delle conoscenze sul cambiamento climatico in un linguaggio comprensibile a un ragazzino, con inoppugnabili note di approfondimento controllate da altri esperti.

Siamo d'accordissimo. Gli scienziati comprendono sempre meglio le cause e gli effetti del cambiamento climatico, e ormai hanno pochi dubbi sul fatto che esso possa rappresentare una seria minaccia alle persone, alle cose e agli ecosistemi; eppure, sorprendentemente, i cittadini sembrano più confusi che mai.

Il cambiamento climatico si sta verificando davvero? E in tal caso, se nel passato è avvenuto per cause naturali, perché dovremmo pensare che stavolta i responsabili siamo noi? Non è mai capitato che gli scienziati si sbagliassero? Non riescono nemmeno a prevedere il tempo che farà tra una settimana: come possono dire alcunché sul clima che la Terra avrà fra cinquant'anni?

Gran parte del problema nasce dal fatto che la climatologia è una disciplina relativamente giovane, in continua evoluzione. Gli scienziati stanno ancora imparando come funzionano il sistema climatico terrestre; come le terre emerse, gli oceani e l'atmosfera assorbono il calore solare e poi lo ridistribuiscono; e come quel calore generi le tempeste, le siccità, l'innalzamento del livello dei mari e altro ancora.

Ma anche se gli scienziati non sanno tutto sul clima, ciò non significa che non sappiano nulla. Al contrario sanno con certezza, ormai da oltre un secolo, che l'anidride carbonica (CO₂) presente nell'atmosfera intrappola il calore solare. Sanno che bruciando i combustibili fossili – come il carbone, il petrolio e il gas naturale – si immette nell'atmosfera anidride carbonica, che va ad aggiungersi a quella che c'è già naturalmente.

Gli scienziati sanno che dai tempi della Rivoluzione industriale stiamo bruciando i combustibili fossili in quantità sempre maggiori, e che perciò la concentrazione della CO₂ nell'atmosfera è aumentata di oltre un terzo rispetto a un paio di secoli fa. Nessuno scienziato responsabile, inclusa la maggioranza

di quelli che vengono definiti «scettici» rispetto al cambiamento climatico, negherebbe tutto questo.

C'è anche ben poca discussione sugli effetti generali di un aumento della CO₂: il pianeta inizierebbe a riscaldarsi e di conseguenza il livello del mare a salire, perché le acque oceaniche riscaldandosi si espandono, e l'aria più calda fa sciogliere i ghiacciai e le calotte polari.

Questo è proprio ciò che mostrano le misurazioni, che siano effettuate a terra o dai satelliti: in media il livello degli oceani è salito di circa 20 centimetri rispetto al 1900, e la temperatura è aumentata di circa 0,7 °C.

Le cose si complicano quando gli scienziati cercano di predire che cosa è probabile accada nel futuro. Il motivo è che la Terra non si limita a rispondere passivamente all'aumento di temperatura: può reagire in molti modi diversi, che potrebbero amplificare quell'aumento o al contrario mitigarlo, e gli scienziati non sono ancora venuti a capo di tutte queste possibilità.

Per esempio, una copertura nuvolosa più estesa potrebbe riflettere nello spazio una frazione maggiore dei raggi solari. Ma il restringersi della superficie ghiacciata nell'Artico potrebbe avere l'effetto opposto. E lo scioglimento del permafrost potrebbe sprigionare altra anidride carbonica, rimasta intrappolata nel suolo ghiacciato per centinaia di migliaia di anni.

Non è nemmeno del tutto chiaro in che modo la variazione globale della temperatura influenzerà le condizioni locali. È molto probabile però che il tem-

po atmosferico e il clima a cui siamo abituati cambieranno, e forse in modi sorprendenti: il riscaldamento è soltanto uno tra i fenomeni che possiamo aspettarci.

Queste incertezze sono tra i motivi per cui l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, cioè «Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico»), nel tentare di prevedere l'aumento di temperatura tra il 2000 e il 2100, ha potuto soltanto stimarlo come compreso tra 1,8 °C e 4,0 °C. Un altro motivo è che non sappiamo se da qui al 2100 l'uso dei combustibili fossili aumenterà, si stabilizzerà oppure diminuirà.

Ciò non significa che tutti i climatologi, dal primo all'ultimo, concordino su questi risultati. Alcuni ritengono che la temperatura aumenterà meno di 1,8 °C, altri che aumenterà più di 4 °C. Ma in nessuna disciplina scientifica – che sia la genetica, la biologia evuzionistica o l'astrofisica – il consenso è assoluto, specialmente quando si entra nei dettagli.

Lo scopo dei rapporti pubblicati regolarmente dall'IPCC è presentare un quadro su cui i climatologi concordino *a grandi linee* in un dato momento (dopo il rapporto del 2007, il prossimo è previsto per il 2014).

E per quanta risonanza mediatica possano avere avuto alcune critiche mosse all'organizzazione e ai suoi metodi, vari studi indipendenti hanno riscontrato che nelle migliaia di pagine dei rapporti dell'IPCC gli errori scientifici sono appena una manciata.

Lo stesso vale per il caso soprannominato «*climatogate*»: alcuni scienziati hanno parlato un po' trop-

po liberamente in uno scambio di email private, e non hanno conservato certi dati con la debita cura. Gli esperti esterni chiamati a investigare sulla vicenda hanno effettivamente constatato che c'è stata leggerezza nel tono colloquiale con cui gli scienziati si sono scambiati idee e opinioni, ma hanno anche scritto che non c'è stato nulla che minasse la credibilità delle conclusioni scientifiche.

Ogni scienziato responsabile sa anche quanto sia importante continuare a mettere in discussione i propri risultati. Come diceva il fisico Richard Feynman, «Il primo principio è non ingannare te stesso; ma tu sei la persona più facile da ingannare». Feynman intendeva dire che gli scienziati devono sempre prendere in esame tutte le possibili spiegazioni dei fenomeni osservati, non soltanto quelle più ovvie o convenzionali.

Se la Terra si sta riscaldando, è probabile che la responsabilità sia dei gas-serra; ma la ragione potrebbe anche essere che il Sole sta emettendo più calore. Gli scienziati hanno vagliato accuratamente questa possibilità, che non sembra però reggere alla prova dei fatti. Hanno anche esaminato il ruolo dei vulcani e di altri fenomeni naturali che in passato hanno fatto variare la temperatura del globo: per ora nulla spiega il riscaldamento tanto bene quanto il meccanismo che coinvolge i gas-serra.

Non c'è dubbio, infine, che l'opinione pubblica sia stata confusa da affermazioni sul cambiamento climatico che sembrano autorevoli, ma sono pure e semplici falsità. Un esempio è l'asserzione, spesso

ripetuta, secondo cui il riscaldamento globale si sarebbe arrestato nel 1998.

Se si riporta su un grafico la temperatura media globale tra il 1998 e il 2010, quella tesi potrebbe sembrare fondata: non si distingue alcun aumento. Ma il 1998 è un punto di partenza fuorviante, perché è stato un anno eccezionalmente caldo. Se si fa partire il grafico dal 1997 o dal 1999, il quadro appare molto diverso: l'aumento appare chiaro. E se si amplia la visuale, esaminando tutti i dati dal 1900 al 2010, risulta chiaro che il primo decennio del ventunesimo secolo è stato il più caldo degli ultimi 110 anni.

Tutto ciò non avrebbe molta importanza, se stesimo parlando di una disciplina come l'astrofisica: in fin dei conti, la presenza o meno di un buco nero al centro della Via Lattea non ha grandi conseguenze pratiche.

Ma se il cambiamento climatico è davvero destinato ad avere effetti devastanti, ignorarlo sarebbe molto pericoloso; e se invece gli effetti saranno minimi, rischiamo di sprecare molte risorse inutilmente.

Il problema è che, se aspettiamo che gli scienziati appurino ogni dettaglio con assoluta certezza, sarà troppo tardi per rimediare ai danni, qualunque essi siano.

È quindi essenziale che il pubblico e le autorità comprendano ciò che sappiamo sul cambiamento climatico: che cosa riteniamo fortemente probabile, in base ai dati disponibili, e su che cosa siamo ancora incerti. Tale comprensione è necessaria per prendere le decisioni a ragion veduta.

E l'obiettivo di questo libro è proprio fare una panoramica delle conoscenze attuali sul cambiamento climatico, spiegandone i fondamenti scientifici in un linguaggio chiaro e semplice.

Non tratteremo ogni lato della questione, ma abbiamo incluso tutto ciò che è essenziale. E poiché vari aspetti del cambiamento climatico sono collegati tra loro, lo stesso vale per molte parti del libro: alcune informazioni ricorrono più volte, in forme diverse.

Per dare al testo la massima credibilità, ci siamo sforzati di essere imparziali. Diremo chiaramente su quali aspetti del problema non è ancora possibile pronunciarsi con certezza, e quali invece secondo i climatologi sono ormai assodati.

Per garantire l'accuratezza tecnica, ogni capitolo è stato revisionato dagli scienziati di Climate Central e modificato in base alle loro osservazioni.

I capitoli sono stati poi sottoposti a eminenti scienziati esterni con particolare competenza dell'argomento trattato e quindi, ove necessario, sono stati modificati di nuovo.

Il risultato è, ne siamo convinti, una panoramica accurata dello stato attuale della climatologia.

Un'ultima osservazione: non possiamo promettere che questo libro sarà comprensibile fino all'ultima parola anche a un ragazzino. Ma abbiamo cercato per quanto possibile di mantenere un linguaggio semplice, immediato e privo di tecnicismi. Speriamo che lo troverete un'utile lettura.

Chi siamo

Questo libro è un'opera collettiva degli scienziati e dei giornalisti di Climate Central, un'organizzazione indipendente e senza scopo di lucro che si occupa di comunicazione della scienza.

Il libro è stato scritto da Emily Elert e Michael D. Lemonick. Prima del controllo scientifico da parte degli esperti esterni, che trovate elencati alla fine del libro, il testo è stato revisionato da numerosi scienziati di Climate Central: Philip Duffy (direttore scientifico), Nicole Heller (specialista di ecosistemi e adattamento), Alyson Kenward (specialista di chimica), Eric Larson (specialista di sistemi energetici) e Claudia Tebaldi (specialista di statistiche climatiche).

Che cosa dice la scienza

Circa 650 milioni di anni fa, molto prima della comparsa dei dinosauri, secondo i geologi la superficie terrestre era tutta ricoperta di ghiaccio.

Il fenomeno era assai più marcato che nelle glaciazioni, che sono molto più recenti e hanno visto i ghiacciai ricoprire soltanto parte dell'Europa settentrionale e del Nordamerica, mentre prosperavano gli uomini di Neandertal e i mammut lanosi.

In quella remotissima «era della Terra a palla di neve», invece, il ghiaccio ricopriva il terreno dai poli giù fino ai tropici.

Anche all'equatore faceva così freddo che, secondo alcune ipotesi, gli oceani erano ricoperti tutto l'anno da uno straterello di ghiaccio (forse neanche tanto sottile).

Il «clima normale» è cambiato nel tempo

Al culmine del Cretaceo, 500 milioni di anni più tardi, sulla Terra non c'era praticamente ghiaccio. I dinosauri si aggiravano per l'Antartide, in Siberia crescevano le palme e nelle isole Svalbard, oltre il Circolo polare artico, strisciavano coccodrilli.

Nell'epoca della «Terra a palla di neve», gran parte dell'acqua presente sul globo era ghiacciata; durante il Cretaceo, invece, con la fusione di tutto quel ghiaccio il livello del mare era centinaia di metri più alto rispetto a oggi.

Due milioni di anni fa la Terra è entrata in un'ulteriore fase, il Pleistocene, in cui il clima oscillava fra *periodi glaciali* molto freddi e *periodi interglaciali* con temperature simili a quelle odierne.*

La durata di questi periodi variava, ma si aggirava comunque sulle decine di migliaia di anni. Oggi ci troviamo in un periodo interglaciale detto Olocene, che è iniziato circa diecimila anni fa.

Abbiamo citato soltanto alcuni esempi dei vari tipi di clima che si sono succeduti sulla Terra.

Poco più di due milioni di anni fa, per esempio, prima che iniziassero ad alternarsi i periodi glaciali e interglaciali, l'emisfero settentrionale era sgombro dai ghiacci, che invece abbondavano in Antartide.

E durante un bizzarro evento chiamato *massimo termico del Paleocene-Eocene*, verificatosi circa 55 milioni di anni fa, la temperatura è salita di circa 6 °C, è rimasta alta per centomila anni e poi è scesa di nuovo.

Se si guarda all'intera storia del pianeta, allora, è chiaro che l'espressione «clima normale» ha avuto significati assai diversi a seconda dell'epoca.

Tutti i cambiamenti climatici di cui abbiamo parlato sono stati «naturali», giacché noi abbiamo iniziato

*Quando si parla di «era glaciale», si intende l'insieme di un periodo glaciale e di uno interglaciale.

a emettere gas-serra tramite attività artificiali soltanto duecento anni fa. Il clima può ovviamente variare in modo naturale, ma ciò non esclude che possa cambiare anche in conseguenza delle attività umane.

Testimonianze indirette del clima del passato

La capacità dei gas-serra come la CO₂ di intrappolare il calore è facile da misurare in laboratorio, ma non sempre quelle misure ci dicono che cosa succederà nel mondo reale.

Nell'atmosfera la CO₂ intrappola effettivamente calore, ma quel calore aggiuntivo ha varie altre conseguenze: fa fondere la neve e il ghiaccio dell'Artico, fa aumentare la copertura nuvolosa, influisce sulla vegetazione e provoca molti altri fenomeni che a loro volta possono far aumentare oppure diminuire la quantità di calore intrappolato.

Per prevedere che cosa potrebbe succedere nei prossimi cento o addirittura mille anni, gli scienziati hanno bisogno di comprendere l'effetto *complessivo* di un aumento dei gas-serra, al di là dei singoli dati che si possono ottenere in laboratorio.

Un modo per farlo è esaminare il lontano passato, studiando le epoche che sono state più calde o più fredde rispetto a oggi. Se gli scienziati riescono a capire come in passato i gas-serra e altri fattori abbiano influenzato la temperatura, il livello del mare e così via, sapranno anche delineare un quadro di ciò che potrebbe accadere in futuro.

L'invenzione del termometro risale ad appena qualche secolo fa, e in passato nessuno si preoccupava di prelevare e conservare campioni d'aria. Ma numerose testimonianze naturali ci forniscono informazioni indirette che aiutano a ricostruire il clima del lontano passato. Questi dati indiretti o «vicarianti», che nel gergo scientifico sono detti *proxy*, sono tutt'altro che perfetti: si riferiscono a luoghi e a periodi storici differenti, e non sono tutti attendibili allo stesso modo; ma forniscono comunque indizi importanti su ciò che è accaduto al clima terrestre quando la concentrazione atmosferica dei gas-serra era maggiore o minore di quella odierna.

Alcuni tra i dati proxy più utili provengono dal ghiaccio estratto dalle profondità dei ghiacciai e delle calotte polari, soprattutto in Antartide e in Groenlandia. Quel ghiaccio racchiude campioni di aria risalenti fino a 800 000 anni fa: sono bollicine rimaste intrappolate nella neve che, compressa dalle nevicate successive, si è poi trasformata in ghiaccio. Grazie a questi minuscoli campioni d'aria gli scienziati possono scoprire quanto erano abbondanti i gas-serra migliaia di secoli fa.

Nel ghiaccio si trovano anche granelli di polvere e frammenti di materia vegetale, che forniscono indizi sul grado di umidità e sulla vegetazione prevalente nelle varie epoche.

La composizione stessa del ghiaccio, infine, risente della temperatura globale dell'epoca: si tratta sempre di H₂O congelata, ma l'ossigeno (O) esiste in due forme lievemente diverse, un *isotopo* più leg-

gero e uno più pesante; e quando l'aria è più calda, l'acqua contiene più ossigeno pesante.

Un altro insieme di dati proxy si trova sul fondo del mare. Vi si accumulano continuamente detriti di ogni sorta, fra cui polvere e materia vegetale, ma anche resti di minuscoli organismi detti *foraminiferi*, protozoi dotati di un guscio fatto di carbonato di calcio, un minerale che contiene ossigeno, carbonio e calcio.

Proprio come succede per il ghiaccio antico, nei gusci l'ossigeno ha peso diverso a seconda della temperatura che aveva il mare quando si sono formati. Anche il carbonio può avere pesi atomici diversi, e studiando la prevalenza dei suoi diversi isotopi si può dedurre il tasso di CO₂ nell'atmosfera dell'epoca. Mentre i dati provenienti dal ghiaccio si fermano a meno di un milione di anni fa, i foraminiferi permettono di arrivare a un passato lontano decine di milioni di anni.

Questi sono soltanto alcuni esempi dei dati proxy che gli scienziati usano per ricostruire le temperature del passato. Ci sono anche gli anelli di crescita degli alberi: per ogni anno di vita della pianta si forma un anello, il cui spessore dipende dalla temperatura e dalle precipitazioni in quell'anno. Ci sono i coralli, con il loro scheletro di carbonato di calcio; e i segni lasciati dal mare sugli scogli e sulle pareti rocciose (se il livello del mare era alto, il clima era più caldo); poi i diari e altre testimonianze scritte di osservazioni del clima fatte diversi secoli fa; e molto altro ancora.

Come abbiamo detto, tutti questi dati non sono perfetti. Combinandoli, però, si ricava un quadro abbastanza coerente: quando i livelli di CO₂ sono alti, lo è anche la temperatura globale.

Questi dati ci danno un'idea di quali fossero i valori della temperatura, della composizione dell'atmosfera, delle precipitazioni e di altri parametri, prima che li potessimo misurare direttamente.

Ai cambiamenti climatici si sopravvive; ma a che prezzo?

La nostra specie ha assistito a veri e propri sconvolgimenti climatici.

Da quando sono apparsi i primi esseri umani moderni, circa 200 000 anni fa, sul nostro pianeta si è verificato almeno un periodo glaciale, con temperature tra 4 °C e 8 °C al di sotto dei valori odierni (questa è una media su scala mondiale; ci saranno state sicuramente zone più calde e più fredde). Tutto ciò non ha impedito ai nostri antenati di colonizzare gran parte del mondo, di creare utensili di pietra sempre più sofisticati e di tracciare meravigliose pitture rupestri, come nella grotta francese di Lascaux o in alcuni siti australiani.

E quando il clima si è fatto molto più caldo, circa diecimila anni fa, i nostri antenati sono sopravvissuti e hanno anzi iniziato a prosperare. Probabilmente non è una coincidenza che la civiltà umana sia fiorita negli ultimi diecimila anni, quando le temperature

sono state non soltanto alte, ma anche straordinariamente costanti nel tempo. Questo periodo ha beneficiato, almeno in alcune regioni del mondo, di un'insolita stabilità climatica che può aver facilitato lo sviluppo dell'agricoltura, rendendo così possibile un notevole aumento della popolazione umana.

Negli ultimi diecimila anni, in effetti, si è verificata una vera e propria esplosione demografica: da circa 5 milioni di individui – la popolazione odierna della Sicilia, ma distribuita sul mondo intero – si è arrivati ai 7 miliardi di oggi.

Quei 5 milioni di esseri umani preistorici non avevano una residenza stabile. Come i loro antenati nel corso di milioni di anni, vivevano in piccoli gruppi che potevano rimanere a lungo sedentari, ma di fronte a un ghiacciaio in avvicinamento, o a una siccità prolungata, potevano levare le tende e spostarsi. Di sicuro alcuni di questi gruppi sono stati spazzati via per vari motivi, fra cui i cambiamenti climatici. Ma eventi del genere non hanno messo a repentaglio la sopravvivenza dell'intera specie.

Quando è stata inventata l'agricoltura, però, la maggioranza delle persone, invece di procacciarsi il cibo andando in cerca di semi e frutta, ha iniziato a coltivarli.

L'agricoltura è una maniera assai più efficace di procurarsi da mangiare, e l'abbondanza di cibo ha permesso un notevole aumento della popolazione. Ma ha anche reso stanziali gli esseri umani, facendo nascere e crescere le città. Gli insediamenti tendevano a sorgere vicino ai laghi, ai fiumi e ai mari,

che forniscono acqua, cibo e vie di comunicazione, ma hanno anche maggiori probabilità di straripare o prosciugarsi in seguito a variazioni del clima.

Ecco perché oggi il cambiamento climatico è un motivo di preoccupazione così serio. In caso di necessità, un piccolo gruppo può benissimo smontare l'accampamento e spostarsi di qualche centinaio di chilometri, verso siti più propizi. Ma ben altra faccenda è spostare una città minacciata dall'innalzamento del mare, come potrebbero essere Venezia, Il Cairo, New York o Shanghai. Oppure spostare le grandi aziende agricole, insieme alle relative infrastrutture (strade, ferrovie, elettrodotti), se il clima locale diventa troppo caldo e secco per la coltivazione dei cereali. O ancora portare al sicuro le decine di milioni di abitanti delle nazioni costiere poco elevate sul livello del mare, come il Bangladesh. In breve, la nostra civiltà ha un alto grado di adattamento al clima attuale; se questo subisse variazioni significative, di qualunque tipo, è quasi certo che le conseguenze sarebbero devastanti.

Dunque, se è vero che la specie umana nel lontano passato è sopravvissuta a cambiamenti climatici, va detto che all'epoca adattarsi alle nuove condizioni era abbastanza semplice; e comunque, con tutta probabilità, ha comportato un numero di vittime che oggi riterremmo inaccettabile.

Per noi oggi è importante la sopravvivenza di ogni individuo, non soltanto quella della specie. Secondo le proiezioni degli esperti, il riscaldamento globale spingerà le temperature oltre il massimo

raggiunto durante i periodi interglaciali passati; ma anche se dovessero soltanto ripetersi gli sconvolgimenti a cui siamo già sopravvissuti una volta, il fatto che la popolazione oggi è così grande, e che esiste la civiltà moderna, cambia completamente le regole del gioco.

Sconvolgimenti climatici, naturali e non

Sin da quando il nostro pianeta si è formato, il clima terrestre ha subito molti cambiamenti, a volte radicali. Come abbiamo visto, gli scienziati lo hanno dedotto da vari indizi, fra cui le bollicine d'aria intrappolate nel ghiaccio e gli strati antichi di fango depositati sui fondali marini. Ovviamente quei cambiamenti non erano dovuti agli esseri umani, giacché esistiamo soltanto da una frazione minuscola della storia della Terra.

Gli scienziati hanno identificato un certo numero di fattori naturali che possono influenzare il clima, provocando fluttuazioni lunghe e graduali o sbalzi brevi e improvvisi: tra gli altri ci sono le variazioni nell'energia emessa dal Sole, le eruzioni vulcaniche, le oscillazioni dell'orbita terrestre, la dinamica dei ghiacciai continentali e delle correnti oceaniche.

Miliardi di anni fa, quando il nostro pianeta era giovane, l'energia emessa dal Sole era appena il 70% del valore attuale. Di conseguenza tutta l'acqua presente sulla Terra avrebbe dovuto congelare; eppure sappiamo che all'epoca c'era acqua in forma liquida,

quindi la temperatura non doveva essere tanto bassa.

Questo è il cosiddetto «paradosso della debolezza del Sole giovane»; secondo gli scienziati, la soluzione è che all'epoca l'atmosfera conteneva molta più CO₂, in grado di intrappolare il calore.

Nel corso di miliardi di anni, il Sole è diventato gradualmente più luminoso, e i livelli della CO₂ sono calati in modo da mantenere le temperature grossomodo costanti. Questo termostato naturale però opera con estrema lentezza, perciò non avrà alcun effetto sul riscaldamento in corso oggi.

Anche le eruzioni vulcaniche possono far salire le temperature, perché riversano altra CO₂ nell'atmosfera. Non sono all'origine dei cambiamenti climatici recenti, perché oggi la CO₂ proveniente dai vulcani è meno dell'1% di quella dovuta alle attività umane. Ma siccome la CO₂ rimane a lungo nell'atmosfera, nel corso di milioni di anni quella emessa dai vulcani può accumularsi fino a esercitare un'influenza notevole sul clima terrestre.

I vulcani possono anche provocare brevi episodi di raffreddamento. Alcune eruzioni di particolare violenza riversano biossido di zolfo negli strati superiori dell'atmosfera, dove esso può diffondersi rapidamente, riflettendo i raggi solari e quindi raffreddando la Terra.

Nel 1991 per esempio l'eruzione del Pinatubo ha raffreddato il pianeta di circa 0,5 °C per un paio d'anni (nel 1992 gli Stati Uniti hanno assistito al mese di agosto più freddo e umido degli ottant'anni precedenti). Questo effetto del biossido di zolfo

dura però soltanto un paio d'anni, passati i quali il pianeta torna a riscaldarsi.**

Un'altra possibile origine di cambiamenti climatici è il moto della Terra. L'orbita terrestre intorno al Sole varia leggermente nel tempo, diventando alternativamente più circolare e più ovale, con un periodo di circa centomila anni. Inoltre il pianeta ondeggia come una trottola e compie altre oscillazioni su cicli che durano migliaia di anni. Tutti questi movimenti influenzano la quantità di energia solare ricevuta dalle varie regioni della Terra nei diversi periodi dell'anno.

Di per sé, queste variazioni non bastano a modificare radicalmente il clima; danno però l'avvio a vari processi naturali che ne amplificano gli effetti, secondo il fenomeno detto *feedback* o *retroazione*. Per capire di che si tratta, consideriamo l'esempio dei ghiacciai continentali. Grazie al loro colore bianco, contribuiscono a mantenere bassa la temperatura terrestre, riflettendo nello spazio i raggi solari in arrivo. Quando le variazioni orbitali raffreddano un poco la Terra, si forma altro ghiaccio, che riflette una maggiore quantità di raggi solari e raffredda ulteriormente il pianeta, provocando la formazione di altro ghiaccio, e così via. Al contrario, quando le variazioni orbitali riscaldano il pianeta, parte del ghiaccio fonde; così l'energia solare riflessa diminuisce e il riscaldamento del pianeta si intensifica, portando alla fusione di altro ghiaccio.

** Milioni di anni fa invece ci sono state eruzioni davvero catastrofiche, responsabili di un raffreddamento assai più intenso.

Un altro caso di retroazione è quello che riguarda la CO₂. Quando l'atmosfera si raffredda, gli oceani assorbono più CO₂, così si riduce la quantità di anidride carbonica che nell'aria può intrappolare il calore; ciò raffredda ulteriormente l'atmosfera, intensificando l'assorbimento da parte degli oceani. Se invece l'atmosfera si riscalda il meccanismo si inverte, come succede con la retroazione del ghiaccio. Dunque l'assorbimento della CO₂ negli oceani, è una causa ma anche un effetto, come i ghiacciai, delle variazioni della temperatura.

Esistono altri meccanismi naturali che fanno variare il tasso atmosferico di anidride carbonica. La vegetazione per esempio assorbe anidride carbonica dall'atmosfera per vivere. E per quanto possa sembrare sorprendente, anche alcune rocce assorbono la CO₂, seppure a un ritmo assai meno intenso rispetto alle piante.

Infine il clima può essere modificato, a scala sia locale sia globale, da variazioni nelle correnti oceaniche. A livello planetario queste correnti sono una sorta di enorme nastro trasportatore che ridistribuisce il calore su tutta la Terra. Se questo trasferimento rallenta, il clima regionale può variare molto.

Un esempio è il frequente fenomeno climatico detto «El Niño», che è provocato dallo spostamento di masse d'acqua marina calda nell'Oceano Pacifico orientale. In genere si associa questo evento a variazioni locali della temperatura e delle precipitazioni, ma El Niño è anche in grado di influenzare la temperatura globale.

In conclusione, gli scienziati non hanno alcun dubbio che le forze naturali possano modificare il clima. Ma il fatto che un fenomeno possa avvenire per cause naturali non significa che avvenga sempre e soltanto così. Per convincersene basta pensare agli incendi boschivi: per centinaia di milioni di anni sono stati i fulmini a provarli, senza alcun intervento umano. Oggi però, come vi dirà chiunque abbia investigato sugli incendi che si ripetono ogni estate, la loro origine di solito è ben diversa.

La CO₂ è una specie di piumone planetario

Il meccanismo con cui l'atmosfera intrappola il calore è chiamato «effetto serra» perché è analogo a quello con cui una serra intrappola calore al proprio interno. Certo, nelle serre il calore non è trattenuto da una sostanza gassosa, come nell'atmosfera, ma dal vetro delle pareti. Ma a parte le eventuali imprecisioni terminologiche, si tratta di un fenomeno che comprendiamo bene, e nessuno ne mette in dubbio l'esistenza. L'effetto serra è stato dimostrato dal fisico britannico John Tyndall in una serie di esperimenti di laboratorio svolti più di centocinquant'anni fa, nel 1859.

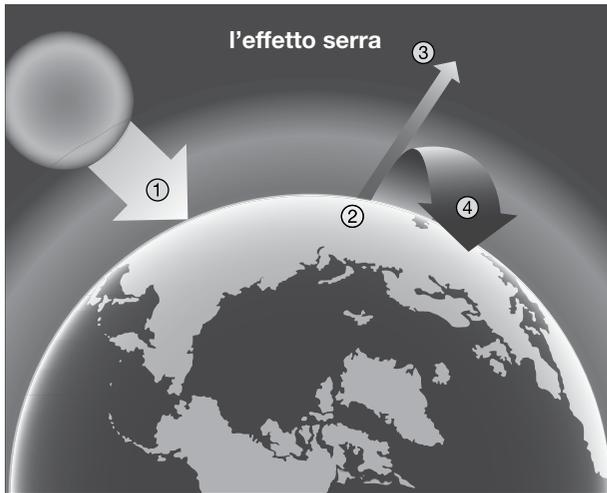
Ecco come funziona. Il Sole inonda la Terra di energia, sotto forma di luce ma anche di radiazioni invisibili all'occhio umano, come i raggi ultravioletti.

Diversamente dalle altre radiazioni, la luce visibile attraversa l'atmosfera indisturbata, finendo per riscaldare gli oceani e le terre emerse. Una volta ri-

scaldata, la superficie terrestre riemette poi una parte di quel calore sotto forma di radiazione infrarossa (un altro tipo di raggi invisibili all'occhio umano).

Se la Terra fosse priva di atmosfera – o se ne avesse una molto rarefatta, come Marte – il calore sfuggirebbe direttamente nello spazio. Ma le molecole di certi gas presenti nell'atmosfera terrestre glielo impediscono.

Uno di questi gas è l'anidride carbonica, o CO_2 : se è colpita da radiazione infrarossa, la assorbe; que-



La luce solare attraversa l'atmosfera e riscalda la superficie terrestre (1). La Terra emette parte di quel calore come radiazione infrarossa (2), che in una certa misura si disperde nello spazio (3). Se immettiamo nell'atmosfera gas-serra come l'anidride carbonica, però, rimane intrappolata una quantità più grande di calore (4) e la temperatura aumenta.

sta è semplicemente una conseguenza del modo in cui è fatta la molecola di CO_2 .

Ogni molecola di CO_2 colpita da radiazione infrarossa, dunque, assorbe energia che poi in parte riemette. In un certo senso, questa è una replica in miniatura di ciò che fa il globo terrestre: riscaldamento seguito da perdita di una frazione del calore per irraggiamento.

Il calore emesso dalla Terra e catturato dalle molecole di CO_2 , perciò, non si disperde subito nello spazio: prima di farlo riscalda l'aria, e in ultima analisi riscalda la Terra stessa (altrettanto vale per gli altri gas-serra, che comprendono il metano, il protossido di azoto e il vapore acqueo).

Se nell'atmosfera non ci fossero gas-serra che intrappolano il calore, la temperatura media del nostro pianeta sarebbe bassissima: circa $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Su Venere, che ha un'atmosfera molto densa composta quasi soltanto di CO_2 , rimane intrappolata una tale quantità di calore che la temperatura raggiunge valori spaventosi: oltre $450\text{ }^\circ\text{C}$. Al contrario su Marte, dove l'atmosfera è molto rarefatta, la temperatura media alla superficie è di circa $-60\text{ }^\circ\text{C}$ (rispetto alla Terra, Venere è più vicino al Sole e Marte è più lontano: ma questo spiega soltanto una piccola parte della differenza tra le temperature sui tre pianeti).

L'esistenza di un effetto serra naturale, osservato sulla Terra e su altri pianeti, è uno dei motivi per cui gli scienziati sono tanto sicuri che l'aggiunta di gas-serra nell'atmosfera terrestre sta provocando un riscaldamento globale.

«Riscaldamento globale» o «cambiamento climatico»? Fa lo stesso

Quando la CO₂ si accumula nell'atmosfera terrestre, per cause naturali o in seguito alle attività umane, l'effetto serra innesca un aumento delle temperature. In altri termini, il globo terrestre si riscalda: è questa l'origine dell'espressione «riscaldamento globale».^{***}

Ma se la temperatura aumenta, il risultato non è semplicemente una versione leggermente più calda del mondo attuale. I ghiacciai montani iniziano a sciogliersi, modificando la portata dei fiumi alimentati dall'acqua di disgelo. Una maggiore quantità d'acqua evapora dal suolo e dagli oceani, intensificando le precipitazioni piovose e nevose in alcune zone e portando la siccità altrove. Il riscaldamento degli oceani può far rallentare o accelerare le principali correnti oceaniche, influenzando i fenomeni meteorologici.

Possono variare anche le differenze di temperatura tra l'equatore e i poli, perché è improbabile che il riscaldamento dovuto all'effetto serra si distribuisca in maniera omogenea in tutto il globo. E siccome il vento è provocato dalle differenze di temperatura, anche la direzione e l'intensità dei venti possono

^{***} Come vedremo, esistono altre cause naturali che possono provocare un riscaldamento globale, e in certi casi anche un raffreddamento globale; ma in questo momento ci occupiamo degli effetti della CO₂.

cambiare, alterando la regolarità dei fenomeni meteorologici. Molti habitat possono modificarsi in modo significativo, costringendo animali e piante a diffondersi in nuovi areali geografici per sopravvivere, pena l'estinzione.

Queste sono soltanto alcune probabili conseguenze di un riscaldamento del globo: ma ce ne sono altre. Per esempio, la CO₂ accumulata nell'atmosfera verrà in parte assorbita dagli oceani, aumentandone il tasso di acidità. Anche questo potrebbe avere conseguenze notevoli sulla vita acquatica, vegetale e animale.

Poiché molti sconvolgimenti provocati dall'accumulo di gas-serra vanno al di là di un semplice aumento di temperatura, molti esperti preferiscono parlare di «cambiamento climatico» anziché di «riscaldamento globale». Non che quest'ultima espressione sia errata, ma «cambiamento climatico» dà un'idea più completa dei fenomeni in corso. Però anche così non si evitano del tutto i malintesi, perché nel corso della storia terrestre il clima è cambiato molte volte, e per ragioni esclusivamente naturali. Per correttezza tecnica bisogna quindi distinguere fra il cambiamento climatico naturale e quello antropogenico, cioè dovuto all'attività umana.

All'infuori degli ambienti scientifici, però, nessuno parlerà mai di «cambiamento climatico antropogenico». Nella maggior parte dei casi non c'è bisogno di usare il linguaggio specialistico; le espressioni «riscaldamento globale» e «cambiamento climatico» vanno benissimo entrambe, e nell'uso comune hanno essenzialmente lo stesso significato.

Il tempo atmosferico non è il clima; o forse sì?

Tutti sanno distinguere intuitivamente fra il clima e il tempo atmosferico. Entrambi hanno a che fare con fenomeni naturali come gli sbalzi di temperatura, la pioggia, la neve, le nubi e il vento, ma il tempo atmosferico riguarda periodi brevi: si riferisce alle variazioni da un giorno all'altro, o persino da un'ora all'altra. Il clima invece descrive l'evoluzione a lungo termine, le condizioni medie in una data zona nell'arco di molti anni. Ecco perché un singolo evento meteorologico non potrà mai confermare o smentire l'esistenza del cambiamento climatico provocato dall'attività umana.

Il tempo atmosferico può cambiare molto rapidamente a seconda di come si spostano le perturbazioni. Se oggi il tempo è caldo e soleggiato, domani potrebbe essere fresco con piogge torrenziali. Il clima invece non può cambiare in maniera così repentina.

A Bolzano, in media, le temperature di gennaio sono più basse di circa 22 °C rispetto a quelle di luglio; se cercate una città calda tutto l'anno, non è una buona scelta. A Bolzano d'inverno fa freddo: è stato così l'anno scorso e possiamo confidare che sarà così anche l'anno prossimo, benché la temperatura possa aumentare o diminuire di qualche grado da un anno all'altro.

Ma anche se gli inverni sono molto più freddi delle estati, da un giorno all'altro il tempo atmosferico può variare notevolmente. A Torino il clima è freddo d'inverno e temperato d'estate, ma ciò non

esclude l'eventualità di giornate invernali calde. Il termometro ha raggiunto il record di 21,9 °C nel dicembre del 1967 ed è piombato giù a 9 °C nel luglio del 1909. A Roma in genere non nevicava, ma nel febbraio del 2012 in alcune zone della città si è toccato il mezzo metro di neve. Queste sono tutte manifestazioni del tempo atmosferico, non del clima.

Anche il clima può variare, ma a ritmo assai più lento. In una data località la media delle temperature o delle precipitazioni può aumentare o diminuire leggermente da un decennio all'altro, ma le variazioni del tempo atmosferico sulla scala dei giorni saranno sempre maggiori di quelle del clima sulla scala degli anni.

A Napoli un giorno di giugno con 30 °C è più caldo della media, ma di per sé non vuol dire che il clima sta diventando più caldo; e non lo implica nemmeno una serie di giorni consecutivi con 30 °C o più.

Tuttavia, se per molti decenni a Napoli risultasse sempre più numerose le giornate con temperature massime da record, e sempre più rare quelle con temperature minime da record, allora ciò potrebbe indicare che il clima sta davvero cambiando.

Su Venere l'effetto serra fa fondere il piombo

Venere è un pianeta riarso, con una temperatura superficiale incredibilmente alta: circa 460 °C, secondo le misurazioni effettuate dalle sonde spaziali. Un lingotto di piombo lanciato su Venere si trasformerebbe in pochi secondi in una pozzanghera.

Non è sorprendente che il pianeta Venere sia più caldo della Terra. Poiché è più vicino al Sole (del 30% circa), riceve più calore. Ma ciò non basta assolutamente per spiegare la differenza di temperatura.

I planetologi ritengono invece che Venere sia vittima di un «effetto serra a valanga». Secondo la loro teoria, miliardi di anni fa sulla superficie di Venere c'era abbondanza di acqua in forma liquida, come oggi sulla Terra. Poiché Venere è più vicino al Sole, l'acqua ha iniziato a evaporare; e il vapore acqueo, essendo un gas-serra che intrappola il calore, ha fatto riscaldare l'atmosfera. Di conseguenza si è intensificata l'evaporazione, l'atmosfera si è riscaldata ancor di più, e così via.

E non è finita qui. Quasi certamente l'atmosfera primordiale di Venere conteneva anche molta CO₂, che dev'essere stata in parte assorbita dall'acqua superficiale, finché ne rimaneva almeno un po'. Per milioni di anni, quella CO₂ avrà poi reagito con vari minerali formando rocce, proprio come è avvenuto per gran parte della CO₂ contenuta nell'atmosfera primordiale della Terra.

Ma una volta scomparsa tutta l'acqua dalla superficie di Venere, questo meccanismo si è interrotto: così la CO₂ gassosa residua è rimasta nell'atmosfera, e lei si è aggiunta quella emessa per esempio dai vulcani. Oggi il vapore acqueo è quasi del tutto scomparso dall'atmosfera di Venere: si è disperso nello spazio molto tempo fa. Ma la CO₂ è ancora presente, in quantità tali da formare circa il 95% dell'atmosfera venusiana. Ecco perché il pianeta è tanto caldo.

Viene spontaneo chiedersi se potrebbe succedere altrettanto qui sulla Terra, dove c'è abbondanza di acqua in forma liquida che potrebbe evaporare. Gli scienziati lo ritengono improbabile: certo, se la Terra si riscalda, una maggior quantità di vapore acqueo entrerà nell'atmosfera e agirà da gas-serra; ma anche se questo amplificherà il riscaldamento dovuto alla CO₂, i calcoli indicano che nel nostro caso non si arriverà a un effetto serra a valanga.

Non c'è soltanto la CO₂

L'anidride carbonica è un gas-serra che intrappola il calore, ma non è l'unico gas con questa proprietà, e non è nemmeno il più comune.

La medaglia d'oro spetta al vapore acqueo, il terzo gas in ordine di abbondanza nell'atmosfera, dopo l'azoto e l'ossigeno. In media l'atmosfera contiene circa cento volte più vapore acqueo che CO₂.

Di solito puntiamo i riflettori sull'anidride carbonica perché siamo noi con le nostre attività a immerterla nell'atmosfera. Il vapore acqueo, invece, proviene quasi interamente dall'evaporazione degli oceani, dei laghi, dei corsi d'acqua e dell'umidità contenuta nel suolo.

La concentrazione del vapore acqueo nell'atmosfera dipende quasi soltanto dalla temperatura della Terra. Se il pianeta si riscalda, per esempio perché aumenta il tasso atmosferico di CO₂, si intensifica l'evaporazione dell'acqua, e l'atmosfera trattiene

una maggiore quantità di vapore acqueo, che intrappola più calore e fa salire ancora le temperature.

Il vapore acqueo perciò amplifica il riscaldamento provocato dalla CO_2 creata dall'attività umana; è un altro caso di retroazione. E benché il vapore acqueo sia il più importante tra i gas-serra, noi possiamo intervenire sulla sua concentrazione atmosferica soltanto in modo indiretto, controllando la temperatura.

Il terzo gas-serra più comune, dopo il vapore acqueo e la CO_2 , è il metano (CH_4). Come la CO_2 , in parte ha origini naturali: deriva soprattutto dai batteri, che decompongono la materia vegetale nelle paludi e aiutano le termiti a digerire il cibo. Ma il metano è anche un sottoprodotto dell'attività umana. Le trivellazioni alla ricerca di petrolio e di gas naturale possono sprigionare il metano contenuto nel sottosuolo. Lo producono i rifiuti che fermentano nelle discariche e anche il bestiame emette metano, proprio come le termiti. E il riso si coltiva in paludi artificiali, che esalano metano proprio come quelle naturali.

Al quarto posto viene il protossido di azoto (N_2O), un altro gas che può avere origine naturale o artificiale. Le fonti naturali sono di nuovo i batteri, soprattutto quelli presenti nel suolo e nell'oceano. Le fonti artificiali sono l'agricoltura (perché si sparge il suolo di fertilizzanti, ricchi di azoto, e poi lo si smuove con l'aratura), i gas di scarico delle automobili e dei camion, la produzione di acido nitrico negli stabilimenti chimici e vari altri processi.

L'elenco potrebbe continuare: sono gas-serra anche molti altri composti chimici di uso industriale, spesso a base di cloro e fluoro.

È importante rendersi conto che, a parità di concentrazione nell'atmosfera, molti di questi gas intrappolano il calore in maniera assai più efficiente della CO_2 ; alcune sostanze di uso industriale, addirittura, sono diecimila volte più efficienti.

Queste sostanze sarebbero dunque su tutte le prime pagine dei giornali, se non fosse che il loro impatto è limitato, perché l'atmosfera ne contiene quantità molto piccole.

Il metano è assai più comune, e intrappola il calore con efficienza venti volte maggiore della CO_2 , ma non rimane a lungo nell'atmosfera: si scinde rapidamente in altre sostanze.

Bisogna anche ricordare che la maggior parte di questi gas esiste già in natura; nel corso del tempo hanno riscaldato il pianeta, contribuendo a renderlo abitabile. Ma proprio come nel caso della CO_2 , aumentarne la concentrazione ben al di là delle oscillazioni naturali può alterare l'equilibrio energetico della Terra.

Per individuare i gas-serra più preoccupanti, perciò, bisogna esaminare la concentrazione attuale, il contributo proveniente dall'attività umana, l'efficienza nell'intrappolare il calore e la stabilità nell'atmosfera.

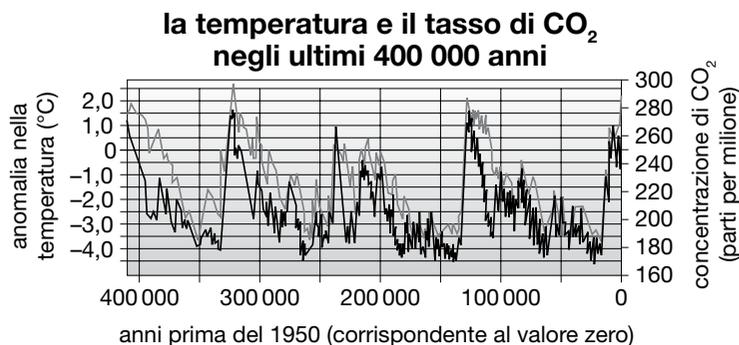
Se si tiene conto di tutti questi fattori è la CO_2 a stravincere la gara, ed è per questo che se ne parla così tanto.

Il cambiamento climatico è figlio della Rivoluzione industriale

Come abbiamo già visto, vari indizi permettono di ricostruire il tasso atmosferico di anidride carbonica nel passato: per esempio le bollicine d'aria imprigionate nel ghiaccio, che sono campioni di atmosfera risalenti fino a 800 000 anni fa, o i foraminiferi depositati sui fondali marini.

In epoche più recenti, verso la fine del Settecento, si sono effettuati i primi prelievi diretti di campioni d'aria per misurarne il tasso di CO₂. Questi studi proseguono ancora oggi, e con precisione assai maggiore.

In base a tutte queste misurazioni, gli scienziati sono concordi nello stimare i livelli di CO₂ durante gli ultimi diecimila anni a 260–280 ppm (parti per milione, cioè 260–280 molecole di CO₂ per ogni milione di molecole d'aria). In questo arco di tempo il tasso è aumentato gradualmente, stabilizzandosi sul valore di 280 ppm nell'Ottocento, all'inizio della Ri-



voluzione industriale. Secondo alcuni, questo lento aumento dell'epoca preindustriale è dovuto all'attività umana, soprattutto alla deforestazione praticata per fare spazio all'agricoltura.

Verso la fine del Settecento, però, l'inventore scozzese James Watt brevettò un modello efficiente di macchina a vapore, che contribuì alla nascita della moderna civiltà industriale.

In genere le macchine a vapore funzionano bruciando carbone o petrolio, il che sprigiona una certa quantità di CO₂. Grazie alle macchine della Rivoluzione industriale l'economia è decollata, rendendo possibile un'esplosione demografica: dai circa 700 milioni di persone del 1750 si è arrivati ai 7 miliardi dei nostri giorni.

Quasi tutte queste persone, soprattutto nei Paesi più sviluppati, consumano energia per i trasporti, il riscaldamento e – novità apparsa nel Novecento – gli apparecchi elettrici.

Non è affatto sorprendente, perciò, che i livelli di CO₂ nell'atmosfera siano aumentati, passando da circa 280 ppm nel 1800, all'inizio della Rivoluzione industriale, alle 400 ppm superate nel 2013.

Il «buco nell'ozono» è un'altra storia

Spesso si fa confusione tra il riscaldamento globale e il buco nell'ozono; in realtà, sebbene siano entrambi dovuti all'attività umana, non c'è quasi alcun rapporto tra un fenomeno e l'altro.

Ogni settembre, quando nell'emisfero australe inizia la primavera, lo strato di ozono atmosferico si assottiglia nei cieli dell'Antartide e delle zone limitrofe. Questo «buco nell'ozono» si richiude ogni anno, per poi riaprirsi nella primavera australe successiva.

Lo si è scoperto per la prima volta a metà degli anni Ottanta, e nel giro di un paio d'anni gli scienziati hanno individuato il responsabile: un gruppo di sostanze chimiche dette *clorofluorocarburi* o CFC. Questi composti non esistono in natura: sono stati inventati circa cent'anni fa, rivelandosi utilissimi come fluido refrigerante nei condizionatori, nei frigoriferi e per far funzionare le bombolette spray.

I CFC sono del tutto innocui, almeno finché non arrivano nella stratosfera, dove distruggono le molecole di ozono (che sono fatte di tre atomi di ossigeno, O₃). Non creano un vero e proprio «buco», ma fanno diradare l'ozono in una certa porzione di cielo.

Questo è un problema, perché lo strato atmosferico di ozono contribuisce a schermare la superficie terrestre dai raggi ultravioletti emessi dal Sole.

Anche quando lo strato di ozono è intatto, la quantità di raggi ultravioletti che penetra è sufficiente a provocare scottature alla pelle. Se il buco nell'ozono dovesse allargarsi molto, i tumori cutanei diverrebbero assai più comuni e anche le piante potrebbero soffrire.

Per fortuna nel 1987 è stato siglato un trattato internazionale, il Protocollo di Montreal, che ha messo al bando i CFC; prima o poi il buco nell'ozono dovrebbe quindi richiudersi.

Ma allora, che cosa ha a che fare tutto questo con il riscaldamento globale? Assai poco. È vero che i CFC sono gas-serra, ma il loro effetto è secondario rispetto a quello dell'anidride carbonica, del metano e degli altri indiziati principali.

È tuttavia comprensibile che ci sia chi confonde i due fenomeni: in entrambi i casi c'è un potenziale pericolo, è coinvolta l'atmosfera e la causa sono le attività umane.

I cinquant'anni più caldi dell'emisfero boreale

Le prime misurazioni dirette della temperatura globale della Terra risalgono circa al 1850. I termometri esistevano già da un bel po' (Galileo ne aveva costruito un rudimentale prototipo già alla fine del Cinquecento) ma li si usava soltanto per misurare la temperatura in poche località. Per calcolare una media globale servono invece migliaia di valori della temperatura misurati in tutto il pianeta.

In base alle misure effettuate a partire dalla metà dell'Ottocento, sappiamo che nell'ultimo secolo la Terra si è riscaldata di circa 0,7 °C. Sappiamo inoltre che negli ultimi cinquant'anni la temperatura è aumentata con velocità circa doppia rispetto al cinquantennio precedente.

Gli scienziati hanno esaminato i dati storici della temperatura e li hanno confrontati con dati proxy come le variazioni negli anelli di crescita degli alberi, lo spessore degli strati di ghiaccio in Groenlandia

e in Antartide, e altri fenomeni naturali che variano con la temperatura. In questo modo sono riusciti a stimare le temperature medie dell'emisfero boreale risalendo fino a un passato molto più lontano.

L'andamento di queste temperature medie è stato chiamato «grafico a mazza da hockey», perché assomiglia a un bastone da hockey appoggiato a terra: mostra una lunga linea quasi piatta per diversi secoli, poi una brusca impennata negli ultimi 100 anni.

Quando le prime versioni del grafico a mazza da hockey hanno avuto ampia diffusione, c'è chi ha obiettato che le ricostruzioni della temperatura erano imprecise, e che era esagerato concludere che il riscaldamento recente è senza precedenti.

Così gli scienziati hanno ricontrollato i metodi usati e ne hanno sperimentati di nuovi; hanno ricostruito le temperature passate includendo o escludendo certi dati proxy che erano stati messi in discussione (per esempio certi tipi di anelli di crescita degli alberi).

Anche dopo questi controlli, la forma del grafico non è cambiata molto. Continua a ricordare una mazza da hockey: presenta temperature abbastanza stabili per vari secoli, seguite da una brusca impennata nel Novecento. Nel frattempo una commissione di esperti indipendenti, riuniti dall'Accademia nazionale delle scienze statunitense, ha confermato la validità del grafico a mazza da hockey originario, quello che era stato contestato.

Oggi la stragrande maggioranza degli scienziati concorda che nell'ultimo mezzo secolo, se non di più,

le temperature medie dell'emisfero settentrionale sono state maggiori che in qualunque altro cinquantennio individuabile negli ultimi tredici secoli.

Ciò non significa che le temperature siano rimaste perfettamente costanti in questo lungo arco di tempo: al contrario, è probabile che il pianeta fosse più caldo della media verso l'anno Mille, durante il cosiddetto «Periodo caldo medievale», e più freddo della media tra il 1500 e il 1800 circa, durante la «Piccola era glaciale».

Ma comunque non si è mai verificato un aumento delle temperature tanto rapido, o fino a livelli tanto alti, come quello che si osserva dagli anni Cinquanta a oggi.

Un quinto dei gas-serra che emettiamo viene dal nostro consumo di carbone

Milioni di anni fa vaste regioni del mondo erano coperte da una densa foresta tropicale. Poi il livello degli oceani si è innalzato, seppellendo le foreste sotto l'acqua e i detriti. Con il tempo il legno si è fossilizzato trasformandosi in nero, duro carbone, fatto quasi interamente di carbonio.

Alla fine del Settecento è stata inventata la macchina a vapore; presto abbiamo cominciato a bruciare il carbone per sfruttarlo come fonte energetica in molti ambiti, dalle ferrovie alla produzione di elettricità.

E da allora non abbiamo mai smesso. Il carbone soddisfa annualmente circa il 25% del fabbisogno

energetico mondiale e il 50% del fabbisogno elettrico dei soli Stati Uniti (che ne bruciano circa un miliardo di tonnellate all'anno, cioè circa 9 kg a persona ogni giorno).

Il carbone è attraente come fonte energetica: è abbondante e costa relativamente poco. Gli Stati Uniti sono il secondo produttore mondiale, dopo la Cina. Ai ritmi attuali di consumo, le riserve di carbone statunitensi oggi note basteranno per un paio di secoli.

Ma c'è un problema. Il carbone è fatto di carbonio, e bruciandolo si sprigiona molta anidride carbonica: circa 2 kilogrammi di CO₂ per ogni kilogrammo di carbone. A parità di energia prodotta, è circa il doppio della quantità di CO₂ che si produce bruciando gas naturale, e un quarto in più rispetto a quella che si produce bruciando petrolio.

Nel complesso, il 20% delle attuali emissioni umane di gas-serra proviene dalla combustione del carbone. Se si considerano soltanto le emissioni legate alla produzione di energia, la percentuale dovuta al carbone sale a circa il 40% su scala mondiale. E se le tendenze odierne continueranno in futuro, è probabile che questa percentuale aumenterà, perché crescerà la domanda mondiale di energia.

Un quarto della CO₂ che oggi è nell'atmosfera si deve al nostro uso dei combustibili fossili

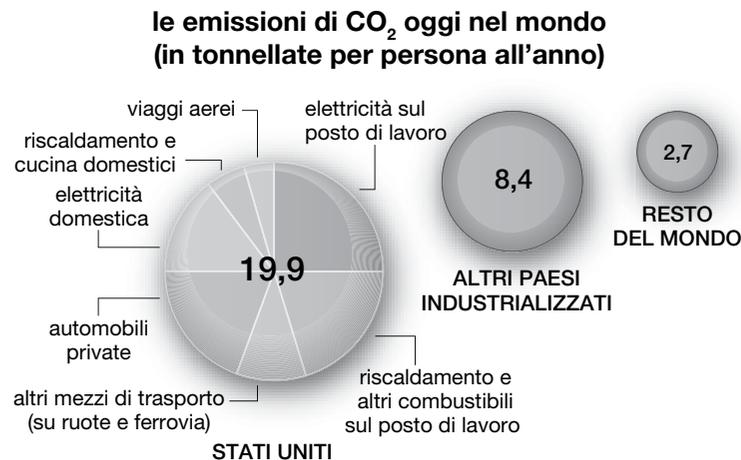
Non tutte le molecole di anidride carbonica sono uguali, perché l'atomo di carbonio può avere mas-

se leggermente diverse. Nell'atmosfera predomina al 99% circa il carbonio-12, il tipo (o *isotopo*) più leggero; il resto è un po' più pesante, carbonio-13 o carbonio-14.

Da quando abbiamo iniziato a immettere la CO₂ nell'atmosfera, bruciando combustibili fossili o tramite la deforestazione, è diminuita la percentuale degli isotopi più pesanti del carbonio; questo è un indizio che può dirci molte cose sulla provenienza di quel carbonio.

In realtà gli indizi sono due. Il carbonio-14 fornisce indicazioni particolarmente utili perché è radioattivo (ma ce n'è così poco che non è pericoloso): con il tempo subisce un decadimento e si trasforma in azoto.

Nelle piante vive la concentrazione del carbonio-14 rimane costante, perché lo assorbono continuamente



dall'atmosfera; ma nei tessuti vegetali morti la concentrazione diminuisce gradualmente nel tempo. È un processo lentissimo: occorrono circa 6000 anni perché metà del carbonio-14 presente in un qualsiasi campione decada, trasformandosi in azoto.

I combustibili fossili come il carbone e il petrolio sono per lo più i resti decomposti di piante morte milioni di anni fa. Poiché sono così antichi, quasi tutto il carbonio-14 si è trasformato in azoto.

Quando immettiamo la CO_2 nell'atmosfera bruciando combustibili fossili, perciò, facciamo aumentare la quantità totale di CO_2 , ma non quella del carbonio-14.

Poiché abbiamo iniziato a bruciare combustibili fossili oltre due secoli fa, la percentuale di carbonio-14 dovrebbe essere in calo: ed è proprio ciò che si osserva analizzando l'atmosfera. L'unica eccezione corrisponde al breve periodo dei test nucleari atmosferici, negli anni Cinquanta, che producevano carbonio-14.

Le misure della riduzione percentuale del carbonio-14 nell'atmosfera confermano dunque che, bruciando combustibili fossili, stiamo aumentando il tasso di CO_2 nell'atmosfera.****

Il carbonio-13 non è radioattivo come il carbonio-14, ma può comunque fornire qualche indizio.

**** Il carbonio-14 che si trova nell'atmosfera decade proprio come quello presente nei combustibili fossili, ma viene continuamente ricreato dalle collisioni tra i raggi cosmici provenienti dallo spazio e gli strati superiori dell'atmosfera.

Poiché le molecole con il carbonio-13 sono più grandi di quelle con il carbonio-12, le piante hanno maggiori difficoltà a trasformarle in nutrimento. I vegetali contengono perciò una percentuale di carbonio-13 minore rispetto all'atmosfera.

I combustibili fossili, avendo origine vegetale, contengono anch'essi meno carbonio-13 rispetto all'atmosfera. Così, man mano che immettiamo nell'atmosfera l'anidride carbonica proveniente dai combustibili fossili, la percentuale di carbonio-13 dovrebbe calare: ed è proprio ciò che si osserva.

Studiando queste due forme più pesanti del carbonio, si trova che circa il 25% della CO_2 oggi presente nell'atmosfera è stato prodotto bruciando combustibili fossili o distruggendo piante vive, soprattutto con la deforestazione nelle regioni equatoriali.

Questo valore coincide con quello che gli scienziati stimano sulla base della quantità di combustibili fossili che abbiamo bruciato finora. Ciò li convince ancora di più che la CO_2 atmosferica aggiuntiva proviene proprio dalle attività umane.

Rinunciare ai combustibili fossili non basta

Come abbiamo appena visto, dai tempi delle prime macchine a vapore gli esseri umani hanno immesso molta anidride carbonica nell'atmosfera, bruciando i combustibili fossili.

Ciò spiega l'origine di una frazione consistente dei gas-serra che abbiamo prodotto in questo lasso di

tempo. Il resto è generato soprattutto dalla deforestazione, dall'agricoltura e dall'industria cementiera.

Distruggendo le foreste – in genere allo scopo di liberare il terreno per l'agricoltura – si sprigiona CO_2 tramite la decomposizione o la combustione della materia vegetale. Nel processo si liberano anche grandi quantità di metano e ossidi di azoto, che sono potenti gas-serra.

Anche altre attività agricole liberano gas-serra. Molto carbonio, sotto forma di materia organica, si trova inglobato nel suolo; dissodando il terreno ed esponendolo all'aria si libera anidride carbonica. L'uso generalizzato dei fertilizzanti commerciali provoca notevoli emissioni di protossido di azoto. Le risaie esalano grandi quantità di metano, e ancora di più ne emette il sistema digestivo delle pecore, delle mucche e di altro bestiame.

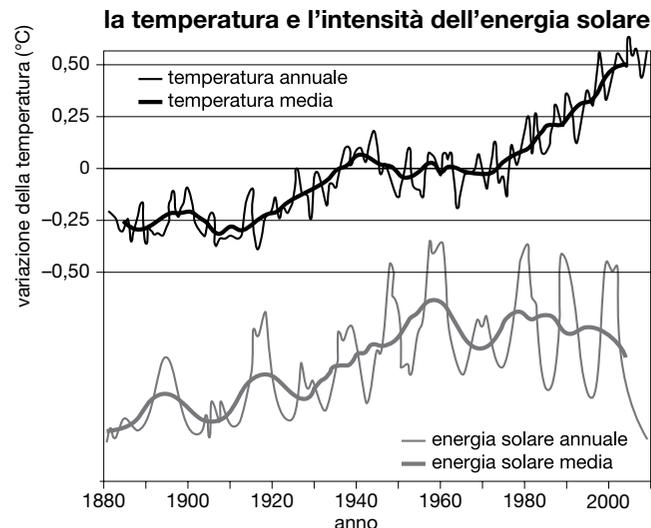
Un altro contributo notevole alle emissioni di CO_2 deriva sorprendentemente dall'industria cementiera, e non soltanto perché questa usa molta energia. Il cemento si produce a partire dal calcare e da altre rocce ricche di carbonio, che nel processo vengono riscaldate e rilasciano anidride carbonica. Nel complesso l'industria cementiera contribuisce da sola per il 5% circa alle emissioni globali di anidride carbonica.

Infine la popolazione attuale della Terra supera i 7 miliardi di esseri umani: si è più che sestuplicata rispetto al 1800. Il risultato è un'enorme quantità di rifiuti: e le nostre discariche, a volte così grandi da risultare visibili dallo spazio, sono un'altra fonte non trascurabile di metano.

Non esistono spiegazioni naturali soddisfacenti

Torniamo alla temperatura media globale, salita di circa $0,7^\circ\text{C}$ nel secolo scorso. Questo riscaldamento prolungato nel tempo può avere soltanto tre spiegazioni: la Terra riceve più energia dal Sole, oppure ne riceve la stessa quantità ma la trattiene in misura maggiore, o entrambe le cose.

In effetti l'energia emessa dal Sole è aumentata nella prima metà del Novecento. Ma poi ha smesso di crescere ed è anzi leggermente diminuita negli ultimi decenni, proprio quando l'aumento di temperatura del nostro pianeta è stato più rapido. Non può quindi essere questa la spiegazione.



La temperatura terrestre può anche diminuire, se parte dell'energia in arrivo dal Sole viene schermata. Le eruzioni vulcaniche possono riversare nell'atmosfera enormi quantità di polvere e di gas, fra cui particelle dette «aerosol di solfati», che formano nella stratosfera una sorta di nebbia capace di bloccare buona parte della luce solare. La gigantesca eruzione del Tambora, avvenuta nel 1815 in Indonesia, bloccò così a lungo l'energia solare che il 1816 rimase famoso come «l'anno senza estate».

Ma se in un certo periodo le eruzioni vulcaniche sono invece particolarmente rare, può succedere il contrario: scarseggiano gli aerosol in grado di bloccare le radiazioni solari, una frazione maggiore di energia solare li attraversa indisturbata e le temperature possono aumentare.

I climatologi hanno ripercorso i dati storici del Novecento alla ricerca di eventuali riduzioni nell'attività vulcanica, ma non hanno trovato nulla che possa costituire la causa principale del riscaldamento globale.

Quando riportano in un grafico tutti i fattori naturali noti in grado di influenzare la temperatura globale, gli scienziati si aspetterebbero di trovare in certi decenni un aumento della temperatura, e in altri una diminuzione. Ma nell'arco di qualsiasi *ventennio* – preso all'inizio del secolo, alla metà o alla fine – la temperatura media globale dovrebbe rimanere grossomodo costante.

Siccome invece le temperature a fine Novecento sono state sempre maggiori che all'inizio del seco-

lo, deve essere in azione qualche altro meccanismo. L'indiziato più ovvio è il calore intrappolato dai gas-serra emessi dalle attività industriali insieme alla deforestazione, all'inquinamento e ad altri fattori capaci di alterare l'equilibrio energetico del pianeta. Sappiamo che queste influenze umane sul clima hanno acquisito rilevanza sempre maggiore con il progredire del Novecento.

Ma un indiziato non è un colpevole. Per capire gli effetti dei gas-serra, e di tutti gli altri fattori, gli scienziati si servono di simulazioni al computer che ricostruiscono l'andamento delle temperature terrestri facendo una certa serie di ipotesi, per esempio includendo o meno l'influenza delle attività umane. Dopodiché confrontano la situazione di questi mondi virtuali con ciò che è successo davvero nel mondo reale.

Così facendo hanno scoperto che l'unico modo per far combaciare le due serie di dati, cioè le temperature ottenute dalle simulazioni e l'andamento osservato a lungo termine nel mondo reale, è tenere conto non soltanto dei fattori naturali, ma anche dell'influenza delle attività umane.

Studi analoghi hanno esaminato altri aspetti della situazione climatica, fra cui gli eventi meteorologici estremi e le differenze nella velocità di riscaldamento tra un luogo e l'altro. Anche in questo caso, l'unico modo per spiegare le osservazioni è tenere conto delle attività umane, soprattutto per quanto riguarda la produzione di gas-serra.

La maggioranza degli scienziati concorda perciò sul fatto che le nostre attività oggi sono il fattore prin-

cipale che determina la tendenza al riscaldamento osservata su scala globale nel corso degli ultimi decenni, e i molti altri cambiamenti a essa collegati.

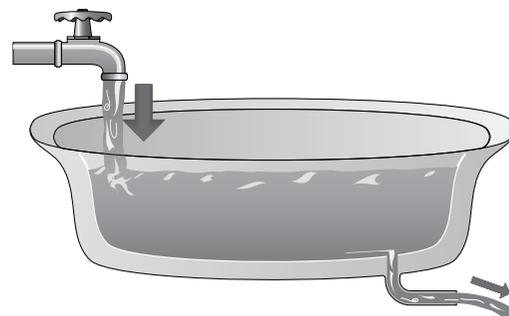
La CO₂ non se ne andrà tanto presto dall'atmosfera

Prima della Rivoluzione industriale, vari processi naturali sprigionavano nell'atmosfera oltre 700 miliardi di tonnellate di anidride carbonica ogni anno. Oggi, bruciando i combustibili fossili, al contributo della natura aggiungiamo oltre 30 miliardi di tonnellate di CO₂ all'anno: è un aumento soltanto del 4% circa, ma queste emissioni hanno un effetto notevole.

Prima che gli esseri umani iniziassero a immettere CO₂ nell'atmosfera, quella che vi entrava naturalmente era rimossa più o meno allo stesso ritmo da processi naturali: la assorbivano gli oceani e la vegetazione, o reagiva chimicamente con le rocce. Ecco perché il tasso atmosferico di CO₂ è rimasto grosso modo costante nel corso del tempo.

Ma dall'inizio della Rivoluzione industriale, quando abbiamo iniziato a bruciare grandi quantità di carbone e di altri combustibili fossili, l'assorbimento naturale non riesce più a tenere il passo; di conseguenza, la concentrazione della CO₂ nell'atmosfera è andata crescendo.

Si può fare un'analogia con il caso di un lavandino con uno scarico piccolo. Se aprite un po' troppo il rubinetto, sulle prime non vi accorgete di nulla, ma dopo un po' vi renderete conto che il livello



dell'acqua sta salendo, e se non chiudete il rubinetto finirà per strabordare.

Con l'anidride carbonica succede qualcosa di simile. Riversandone molta nell'atmosfera, abbiamo aperto un potente rubinetto. Se a un certo punto azzerassimo le emissioni, l'anidride carbonica in eccesso verrebbe assimilata dalle piante, dagli oceani, dalla trasformazione in minerali e da altri processi. Ma proprio come nel caso del lavandino, più si accumula CO₂ aggiuntiva, più tempo ci vuole per eliminarla (la situazione anzi è peggiore che nel caso del lavandino, perché se la Terra si riscalda, l'assorbimento di CO₂ da parte degli oceani e della vegetazione diventa più lento).

Poiché abbiamo aperto parecchio il rubinetto della CO₂, circa metà dell'anidride carbonica aggiuntiva immessa nell'atmosfera negli ultimi due secoli è ancora lì. Potrebbero volerci millenni prima che venga rimossa tutta. E altrettanto vale per la CO₂ che emetteremo quest'anno, il prossimo anno e così via nel futuro.

La CO₂ sta facendo aumentare l'acidità degli oceani

Le bibite frizzanti sono «addizionate di anidride carbonica»: infatti la CO₂ che intrappola il calore nell'atmosfera è lo stesso gas che viene aggiunto alle bibite per renderle effervescenti. E probabilmente anche l'acqua che esce dal rubinetto di casa vostra contiene un po' di CO₂, ma non tanta da risultare frizzante.

In genere non ci pensiamo, forse perché non è un fenomeno osservabile a occhio nudo, ma i gas come la CO₂ possono disciogliersi spontaneamente nei liquidi, proprio come lo zucchero o il sale.

In natura ciò accade di continuo, e i gas atmosferici si disciolgono nell'oceano. Più CO₂ immettiamo nell'atmosfera, più ne assorbono gli oceani. Di fatto, quasi un terzo di tutta la CO₂ emessa bruciando combustibili fossili nell'ultimo paio di secoli è stato assorbito dall'acqua degli oceani.

Parte della CO₂ disciolta reagisce con l'acqua formando acido carbonico (H₂CO₃), che rende gli oceani leggermente più acidi. Così, bruciando combustibili fossili, abbiamo fatto aumentare l'acidità degli oceani di circa il 30% rispetto ai valori precedenti alla Rivoluzione industriale. Sulla scala del pH gli oceani si trovano ancora nella zona alcalina, ma si stanno spostando verso una maggiore acidità.

Questa è una brutta notizia per certe forme di vita marina: gusci, conchiglie e barriere coralline, fatti quasi interamente di carbonato di calcio, sono più difficili da creare se l'acqua è più acida, mentre si dissolvono più facilmente.

Per ora gli oceani non sono abbastanza acidi per distruggere le conchiglie da un giorno all'altro (d'altronde neanche la Coca-Cola può distruggervi i denti da un giorno all'altro, checché ne dica una tenace leggenda metropolitana, forse messa in giro dai dentisti). Ma l'acidità è già tale da rendere difficile la creazione di nuovi gusci; e siccome vicino alla base della catena alimentare marina si trovano proprio minuscoli organismi a guscio, l'acidificazione potrebbe ripercuotersi su molti altri abitanti del mare che se ne cibano.

Oggi gli scienziati comprendono meglio in che modo l'acidificazione degli oceani influenza le singole forme di vita marina, e gli strati di sedimenti antichi forniscono alcuni indizi sul suo impatto nelle epoche passate. Questi sedimenti si sono formati anno dopo anno e secolo dopo secolo, man mano che i detriti, la polvere e i resti degli organismi marini si sono depositati sui fondali, creando nuovi strati che hanno ricoperto quelli anteriori. Quando gli scavi raggiungono gli strati che risalgono a una fase particolarmente calda della storia terrestre, verificatasi circa 55 milioni di anni fa, si trova che i sedimenti hanno un'insolita colorazione scura: manca il bianco dei gusci fatti di carbonato di calcio.

Secondo gli scienziati il motivo è che all'epoca l'acidificazione degli oceani provocò un'estinzione di massa di molluschi, coralli e altri organismi marini. Secondo i dati più affidabili di cui disponiamo, l'acidificazione odierna procede a una velocità ancora maggiore che in quell'epoca lontana.

La deforestazione fa aumentare la CO₂

Fra le attività umane che provocano il cambiamento climatico, la più importante è l'uso dei combustibili fossili come il carbone, il petrolio e il gas naturale. Ma il 20% circa dei gas-serra da noi creati ha un'origine del tutto diversa: la deforestazione.

Ogni anno distruggiamo circa 200 000 chilometri quadrati di foreste, per lo più nelle regioni tropicali. È un'area equivalente a due terzi dell'Italia.

Le piante assorbono l'anidride carbonica e incorporano il carbonio nei propri tessuti, trattenendolo fino alla morte. Ogni vegetale, che sia un filo d'erba o una gigantesca sequoia, è fatto per lo più di carbonio che ha estratto dall'atmosfera durante la sua vita.

Quando la pianta muore e si decompone, quel carbonio a poco a poco ritorna nell'atmosfera. Se invece la pianta viene bruciata, il carbonio si libera tutto in una volta (lo stesso vale per il ciclo delle foglie che spuntano in primavera e cadono in autunno).

Quando si disbosca una zona per fare scorta di legna, o per liberare terreno per le coltivazioni o gli allevamenti, gli alberi muoiono prematuramente e tutti in una volta. Le conseguenze sono due. La prima è che si libera nell'atmosfera anidride carbonica che altrimenti sarebbe rimasta immagazzinata. In particolare gli alberi abbattuti per fare spazio alle coltivazioni sono considerati rifiuti inutili, e il modo più semplice per liberarsene è bruciarli sul posto. La CO₂ aggiuntiva perciò è emessa quasi immediatamente. La seconda conseguenza è che l'anidride

carbonica che sarebbe stata assorbita dagli alberi tagliati rimane invece nell'atmosfera.

Se tutti gli alberi fossero sostituiti da nuove piantine, queste ricomincerebbero ad assorbire l'anidride carbonica dall'atmosfera. Ma gli alberi abbattuti per fare spazio alle coltivazioni non vengono ripiantati, e spesso neanche quelli tagliati per utilizzarne la legna. E anche se fossero ripiantati, dovrebbero passare decenni – o forse secoli – prima che un boschetto di alberelli giovani possa assorbire la quantità di anidride carbonica già liberata bruciando il bosco maturo di vecchie piante.

Azzerare le emissioni di gas-serra non basterebbe

Dal 1900 a oggi la concentrazione atmosferica di CO₂ è cresciuta da circa 300 parti per milione a circa 390 ppm, e al contempo la temperatura media della Terra è salita di circa 0,7 °C.

Poiché la CO₂ è un gas che intrappola il calore, i climatologi nutrono pochi dubbi che i due fenomeni siano strettamente legati. Ma sanno anche che la relazione tra la CO₂ e la temperatura media terrestre non è semplice. Per esempio diversi fattori che influenzano il clima – come l'estensione dei ghiacciai, le nubi o la vegetazione – reagiscono al riscaldamento in maniera complessa, e possono amplificare l'effetto della sola CO₂, o al contrario mitigarlo.

C'è però anche un altro elemento importante: l'aumento della temperatura globale ritarda un po'

rispetto a quello dei gas-serra. Il motivo è che circa il 70% della superficie terrestre è ricoperto dagli oceani; e ci vuole molta più energia per riscaldare queste enormi masse d'acqua che non l'atmosfera o le terre emerse.

Prima o poi gli oceani si riscaldano al punto da assorbire assai meno il calore trattenuto dai gas-serra. Da quel momento in poi, l'energia termica addizionale andrà a riscaldare il resto del pianeta.

Gli scienziati calcolano che l'odierno aumento della temperatura sia poco più della metà di quello che si avrebbe, a regime, se il tasso atmosferico di CO₂ si fermasse ai valori attuali (mentre in realtà è in crescita).

In altri termini, se anche riducessimo le emissioni quanto basta per impedire ulteriori aumenti dei livelli di CO₂, l'aumento di temperatura rispetto al 1900 non si stabilizzerebbe sugli 0,7 °C attuali, ma arriverebbe a 1,1 °C. La CO₂ aggiuntiva – 90 parti per milione rispetto al 1900 – ci ha già condannati a un aumento di temperatura quasi doppio rispetto a quello che osserviamo oggi.

E questo varrebbe se riducessimo immediatamente le emissioni; ma in realtà non stiamo neppure iniziando a farlo, e difficilmente inizieremo a farlo nel prossimo futuro: così le emissioni continuano ad aumentare.

La temperatura perciò non si limiterà a salire di circa mezzo grado rispetto ai livelli attuali; andrà ben oltre quel valore.

Se entro il 2050 riuscissimo a stabilizzare la concentrazione di CO₂, diciamo a circa 450 parti per

milione (un obiettivo assai ambizioso), la temperatura continuerebbe a salire anche nei decenni seguenti. E lo stesso vale se poniamo il traguardo a 550 parti per milione, o a qualsiasi altro valore.

La temperatura salirà esattamente di... non si sa

In laboratorio è abbastanza facile valutare il legame fra l'anidride carbonica e l'aumento di temperatura. Se si immagina di raddoppiare la quantità di anidride carbonica che l'atmosfera conteneva nel Settecento (circa 280 ppm), tenendo costanti tutti gli altri fattori, la temperatura aumenterebbe di circa 1 °C.

Nel mondo reale però le cose non sono così semplici, perché tutta una serie di meccanismi naturali reagisce al riscaldamento in maniera da intensificarlo (è la cosiddetta *retroazione positiva*) oppure da mitigarlo (*retroazione negativa*).

Un esempio di retroazione positiva è il caso già citato del vapore acqueo. Quando la temperatura globale cresce, aumenta l'evaporazione degli oceani. Ma il vapore acqueo è un gas-serra, quindi intrappola il calore proprio come la CO₂, facendo salire ancor più la temperatura.

Un'altra retroazione positiva già discussa riguarda la fusione dei ghiacci, marini (come nell'Oceano Artico) o sulle terre emerse (nei ghiacciai e nella calotta polare antartica). Essendo bianco, il ghiaccio riflette la luce solare nello spazio. La fusione del ghiaccio lascia scoperto il terreno o l'oceano sotto-

stante, che sono più scuri; così meno luce solare è riflessa nello spazio, e ne rimane di più a riscaldare il pianeta.

Un altro esempio di retroazione positiva è la fusione del *permafrost*, il terreno perennemente gelato che si trova in Alaska, nel Canada settentrionale, in Siberia e in altre zone molto fredde. Con l'aumento delle temperature la materia vegetale rimasta intrappolata per secoli nel permafrost inizia a decomporsi, esalando altra CO₂ che contribuisce al riscaldamento del pianeta. E se il permafrost in origine era un terreno paludoso, può liberarsi anche metano, un gas-serra ancora più potente.

Il metano si trova anche intrappolato sui fondali marini, nelle formazioni ghiacciate dette *idrati di metano*. Se l'oceano si riscalda ed esse fondono, il metano può disperdersi nell'aria. Al contempo, un oceano più caldo assorbe meno CO₂; di conseguenza una frazione maggiore della CO₂ immessa nell'atmosfera, qualunque ne sia l'origine, finisce per restarvi.

Tutte queste sono retroazioni positive, ma ne esistono anche di negative. Se per esempio il cambiamento climatico esacerba la siccità in zone aride, il vento che vi soffia può sollevare in aria una maggiore quantità di polvere. Le particelle di questa polvere, a seconda delle dimensioni e della composizione, possono schermare i raggi solari, provocando un raffreddamento.

Lo stesso tipo di retroazione negativa può verificarsi con gli aerosol, piccole particelle o goccioline

emesse quando si bruciano combustibili come il carbone o il diesel.

A volte, tuttavia, non è ovvio se la retroazione sarà positiva o negativa. È il caso delle nubi, che rappresentano la maggior fonte d'incertezza nelle previsioni del clima futuro.

Se il riscaldamento fa aumentare la concentrazione del vapore acqueo nell'atmosfera, potrebbero formarsi più nubi. Queste possono rallentare il riscaldamento, riflettendo i raggi solari proprio come la neve o il ghiaccio; oppure possono accelerare il riscaldamento, perché intrappolano il calore.

Quale dei due effetti predominerà dipende dal tipo di nubi, dall'altitudine a cui si formano, dalla superficie terrestre sottostante (oceano oppure terre emerse) e da tanti altri fattori di cui è molto difficile tenere conto nelle simulazioni al computer.

La maggior parte dei modelli climatici prevede che alla fin fine le nubi intensificheranno il riscaldamento, ma per ora non disponiamo di dati sufficienti a stabilirne in modo affidabile l'effetto complessivo. I pochi studi effettuati finora nel mondo reale sembrano indicare che le nubi hanno contribuito al riscaldamento, ma in misura limitata.

Esistono altri casi possibili di retroazione, ma quelli già citati bastano per capire quanto sia complesso il clima, e quanto sia difficile fare proiezioni affidabili nel futuro. Al momento i dati indicano che se la CO₂ raddoppiasse, la temperatura subirebbe un aumento compreso tra 1,5 °C e 5 °C, con il valore più probabile a +3 °C.

La fusione dei ghiacci fa innalzare il livello del mare (ma ci sono anche altri fattori)

Di solito il legame tra il riscaldamento globale e il livello dei mari è percepito più o meno così: l'atmosfera e gli oceani del nostro pianeta si stanno riscaldando, il che fa sciogliere le calotte polari e i ghiacciai. Dopodiché il ghiaccio trasformato in acqua si riversa negli oceani, facendo salire il livello del mare.

Questo è abbastanza vero, ma la storia non finisce qui. Per esempio, l'acqua proveniente dai ghiacciai situati sulla terraferma spiega soltanto in parte l'innalzamento del mare nel corso degli ultimi cento anni. Il resto è dovuto per lo più al fatto che l'acqua, come la maggior parte dei liquidi, si espande quando la temperatura aumenta. Questa *dilatazione termica* è così piccola che nella vita quotidiana passa spesso inosservata (tranne che in casi particolari, come quello del mercurio o dell'alcol nella colonnina dei termometri).

Inoltre, poiché l'acqua calda si espande più rapidamente di quella fredda, con l'aumento di temperatura gli oceani si espandono a velocità sempre maggiore.

Ma anche la fusione dei ghiacci sta diventando un fattore importante nell'innalzamento del mare. Il problema non è il ghiaccio marino, come quello che ogni inverno ricopre l'Oceano Artico e costituisce l'habitat degli orsi polari. Quel ghiaccio infatti sta a galla, e in base al principio di Archimede sposta la stessa quantità d'acqua che sposterebbe in forma

liquida; anche fondendo, perciò, non influirà sul livello del mare.

Invece il ghiaccio che si trova sulla terraferma, soprattutto nei grossi ghiacciai continentali che ricoprono l'Antartide e la Groenlandia, fa innalzare il livello del mare quando fonde e si riversa nell'oceano, o anche quando vi cade ancor prima di fondere (quest'ultimo processo, che corrisponde alla formazione di iceberg, non è una novità).

I ghiacciai continentali sono in costante movimento: si allargano sotto il proprio stesso peso, come una palla di impasto schiacciata dal mattarello, e in questo modo poco a poco si avvicinano al mare. Ma con l'aumento della temperatura, i ghiacciai hanno iniziato a muoversi più velocemente.

In un primo tempo gli scienziati hanno pensato che l'acqua di disgelo, infiltrandosi nelle fessure del ghiaccio, arrivasse al substrato roccioso e lo lubrificasse, facilitando lo scorrimento del ghiacciaio sulla terraferma; ma oggi questa spiegazione sembra meno convincente. A quanto pare il meccanismo funziona invece così: l'acqua marina, più calda, fa sciogliere le estremità del ghiacciaio in contatto con il mare; queste «lingue» di ghiaccio si staccano e galleggiano libere, invece di continuare a scorrere lentamente sul fondale marino. A quel punto è come se si fosse lasciato andare il pedale del freno: il ghiacciaio si muove più velocemente, scarica una maggiore quantità di ghiaccio nell'oceano e ne innalza il livello.

I vasti ghiacciai continentali che ricoprono la Groenlandia e l'Antartide contengono una quantità

di ghiaccio gigantesca: è più del 70% di tutta l'acqua dolce del pianeta. Se la temperatura terrestre sale, un po' di quel ghiaccio fonderà (anche se l'effetto sarà in parte compensato da un aumento delle nevicate) e un po' cadrà nel mare ancor prima di fondere. Questo processo è già iniziato, soprattutto in Groenlandia, dove le temperature già in partenza sono meno rigide che in Antartide.

Se tutto questo ghiaccio cadesse nell'oceano, il livello del mare salirebbe di circa 60 metri, di cui 6 metri sarebbero dovuti ai ghiacciai continentali che ricoprono la Groenlandia, circa 6 metri alla calotta glaciale dell'Antartide occidentale, e i restanti 48 metri alla calotta glaciale dell'Antartide orientale, molto più spessa ed estesa.

Gli scienziati arrivano a queste cifre in parte misurando la quantità di ghiaccio oggi esistente; ma per stimare il potenziale innalzamento del mare studiano anche le ere del passato in cui il nostro pianeta era quasi privo di ghiaccio (per esempio il Cretaceo, circa 100 milioni di anni fa). In quelle epoche il livello del mare era effettivamente centinaia di metri più alto rispetto a oggi.

Ma perché fonda tutto il ghiaccio presente sulla terraferma, le temperature dovrebbero toccare valori piuttosto alti e mantenerli per varie migliaia di anni (la durata precisa dipende dal valore raggiunto). Per convincervene, immaginate di mettere un cubetto di ghiaccio per pochi secondi nel forno acceso: in un tempo così breve, anche se la temperatura è molto alta, soltanto una parte del cubetto si scioglierà.

Naturalmente il riscaldamento globale non ci porterà a temperature simili a quelle di un forno, e i ghiacciai continentali sono spessi anche parecchi chilometri. Persino se le temperature salissero secondo le previsioni più nefaste, alla fine di questo secolo la maggior parte di quel ghiaccio sarà ancora lì. Naturalmente dopo il 2100 la temperatura potrebbe continuare a salire, accelerando il processo; anche in quel caso, però, e persino se la temperatura non dovesse più calare, il ghiaccio impiegherebbe molti secoli per fondere del tutto.

Ciononostante gli scienziati ritengono che, se le temperature della Groenlandia saliranno di oltre 2,5 °C e resteranno poi a quel valore, è improbabile che lo scioglimento si arresti.

Non è detto che l'anno prossimo sarà più caldo

L'aumento della temperatura terrestre previsto per i prossimi cento anni talvolta è rappresentato con un grafico che è una bella curva liscia in salita costante. Ma si tratta di una semplificazione; il mondo reale si comporta in maniera un po' diversa.

Possiamo immaginare un'analogia sportiva. I tifosi di calcio restano delusi quando il loro centravanti preferito sbaglia un facile gol, ma non per questo concludono che non sa più giocare. Troppi elementi possono influenzare le prestazioni di un giocatore nel corso di una partita: la tecnica, la stanchezza, gli infortuni, la concentrazione e ovviamente anche la

pura casualità. E se anche in una partita l'attaccante sbaglia parecchi tiri, questo non ci dice granché sulla sua bravura. Ciò che importa davvero è la media delle sue prestazioni in molte partite, o addirittura nell'intero campionato.

I climatologi ragionano in maniera analoga. Molti fattori influenzano il clima terrestre, fra cui fenomeni ciclici naturali come le correnti dette *El Niño* e *La Niña*, che riscaldano e raffreddano l'Oceano Pacifico, o l'Oscillazione nord-atlantica, una particolare fluttuazione della differenza nella pressione atmosferica tra le Azzorre e l'Islanda.

Questi fenomeni possono far salire la temperatura globale media in un certo anno e farla scendere l'anno dopo, ma – come nel caso di un centravanti che gioca molto bene o molto male una singola partita – queste variazioni a breve termine non dicono alcunché sulle tendenze globali.

Il clima globale nel decennio scorso è un buon esempio del problema. Le variazioni tra un anno e il successivo sembrano casuali: dal 2000 al 2001 la temperatura media è scesa, quindi è salita per due anni, poi nel 2004 è scesa, nel 2005 è risalita, infine è scesa nei tre anni seguenti, per risalire di nuovo nel 2009 e nel 2010.

Questi valori, riportati in un grafico, darebbero una linea a zigzag. Se però si guardano i dati più da lontano, si noterà che nel corso del decennio lo zigzag è un po' inclinato all'insù. E se si allarga la scala temporale, confrontando il primo decennio del Duemila con gli anni Ottanta e Novanta del Nove-

cento, l'inclinazione risalta ancora di più: ogni decennio è più caldo di quello che l'ha preceduto.

Eppure, anche osservando il grafico a questa scala, si notano interi decenni in cui la temperatura rimane stabile. Dagli anni Quaranta agli anni Settanta del Novecento, per esempio, le temperature sono addirittura scese un po' (secondo gli scienziati il calo è forse dovuto all'inquinamento atmosferico, che ha in parte schermato i raggi solari; le leggi anti-inquinamento degli anni Settanta hanno poi ripulito l'aria, che così ha smesso di raffreddarsi).

Nel corso dell'intero Novecento, comunque, il grafico della temperatura è inclinato verso l'alto.

Anche nelle proiezioni del clima futuro fatte con simulazioni al computer appaiono fluttuazioni da un anno all'altro, e perfino decenni in cui il riscaldamento globale rallenta o diventa impercettibile.

Ma un anno particolarmente caldo o freddo non implica che il cambiamento climatico stia accelerando o rallentando; le uniche tendenze significative sono quelle a lungo termine.

Non è detto che il globo si scaldi in modo omogeneo

Come abbiamo già visto, al cuore del riscaldamento globale c'è il fatto che i gas-serra, generati dall'attività umana, intrappolano una certa quantità di energia termica che altrimenti si disperderebbe nello spazio, e fanno così aumentare la temperatura media del pianeta.

Il sistema climatico però è in costante movimento, con i venti e le correnti oceaniche che ridistribuiscono il calore da una regione all'altra del globo. È probabile che questi meccanismi saranno alterati dal riscaldamento del pianeta, che influenzerà anche l'estensione dei ghiacci, la vegetazione, le nubi e il tasso di polvere nell'aria. Tutti questi cambiamenti possono portare a un riscaldamento che accelera in alcune regioni, mentre in altre può rallentare o addirittura invertirsi.

Per questi e altri motivi, gli scienziati prevedono che il cambiamento climatico non si manifesterà allo stesso modo nelle diverse aree del pianeta. In alcune zone d'inverno cadrà molta più neve, a meno che le temperature salgano tanto da escludere ogni possibilità di nevicata. In altre nevierà di meno, ma pioverà di più durante l'estate. Alcune regioni si riscaldano più velocemente di altre. E ovunque è possibile che l'intensità del riscaldamento vari da una stagione all'altra, o dal giorno alla notte.

Certe zone potrebbero subire ondate di freddo più frequenti, almeno in certi periodi dell'anno. In Siberia e nell'Europa settentrionale, per esempio, alcuni inverni recenti sono stati insolitamente freddi. Non se ne conosce il motivo, ma una possibilità è che la fusione dei ghiacci polari riscaldi l'Artico e alteri l'andamento meteorologico, facendo sì che d'inverno le masse d'aria fredda scendano più a sud del solito.

Gli scienziati prevedono anche altre variazioni nelle correnti d'aria e oceaniche, tali da accelerare il riscaldamento in alcune zone e rallentarlo in altre.

Anche la quantità di precipitazioni nevose e piovose varierà da una regione all'altra. È probabile che nel prossimo secolo il Canada, la Russia e altri Paesi settentrionali assisteranno a precipitazioni più frequenti in tutto il corso dell'anno, e che alcune zone del Nordafrica saranno più aride sia d'estate sia d'inverno. Inverni meno piovosi potrebbero portare una siccità permanente negli Stati Uniti sud-occidentali; e in Australia le estati diventeranno più secche.

Anche se si trascurano le variazioni nei venti, nelle correnti oceaniche e nelle precipitazioni, rimane il fatto che parti diverse del globo reagiscono in modo diverso all'aumento di temperatura.

Ai poli per esempio il ghiaccio inizia a fondere e, come abbiamo già visto, la riduzione della distesa bianca di ghiaccio fa sì che una quantità minore di raggi solari sia riflessa nello spazio. Ciò significa che le terre emerse e gli oceani assorbono più energia, provocando un ulteriore aumento di temperatura.

Se sui poli si depositano aerosol (polvere e altre particelle), il ghiaccio diventa più scuro e inizia a fondere più in fretta. Lontano dai poli gli stessi aerosol, dispersi nell'aria, riflettono invece i raggi solari nello spazio, riducendo così il riscaldamento.

Questi fattori contribuiscono alla cosiddetta «amplificazione artica», un processo che gli scienziati hanno osservato già da cinquant'anni: la regione del Polo nord si riscalda più velocemente rispetto al resto del pianeta. Si prevede che questo fenomeno si accentuerà man mano che le attività umane continuano a provocare un riscaldamento globale.

I poli si riscaldano più del resto del pianeta; proprio come previsto

Molti fattori influenzano il clima in vari modi. A seconda di quali entrano in gioco – le eruzioni vulcaniche, le variazioni della luminosità del Sole, gli spostamenti delle correnti oceaniche e così via - gli scienziati si aspettano che l'atmosfera si riscaldi (o si raffreddi) a ritmo e in luoghi diversi.

Nel corso dell'ultimo secolo, e soprattutto negli ultimi cinquant'anni, gli scienziati sono convinti di aver identificato alcuni «indizi» rivelatori, che legano il cambiamento climatico ai sottoprodotti delle attività umane: i gas-serra (soprattutto la CO₂) e gli aerosol. È molto difficile infatti spiegare i fenomeni osservati in base a cause soltanto naturali.

Tra questi indizi ci sono per esempio le differenze nel riscaldamento delle diverse regioni del pianeta. Se a provocare il recente riscaldamento fossero soltanto, mettiamo, le variazioni nelle correnti oceaniche, allora le terre emerse avrebbero dovuto riscaldarsi di più là dove scorrono le correnti calde. Invece si osserva che le terre emerse si stanno riscaldando tutte, e a velocità maggiore rispetto agli oceani. Le variazioni nelle correnti oceaniche non sono quindi la causa principale di questo fenomeno, benché possano contribuirvi.

Gli scienziati hanno anche osservato che il riscaldamento è più rapido ai poli che all'equatore. È normale che la temperatura attorno ai poli subisca variazioni più ampie, ma il riscaldamento odierno

esula di gran lunga dalle oscillazioni naturali. Se per esempio il responsabile fosse un aumento della luminosità del Sole, il risultato dovrebbe essere opposto: le zone equatoriali si riscalderebbero più rapidamente dei poli, perché ricevono una maggiore quantità di raggi solari diretti.

Un'altra conferma del legame con i gas-serra sta nel modo in cui si è riscaldata l'atmosfera: negli ultimi cinquant'anni la superficie del pianeta e gli strati inferiori dell'atmosfera si sono riscaldati notevolmente, mentre gli strati superiori si sono addirittura raffreddati. Questo è esattamente ciò che ci si deve aspettare se i responsabili sono i gas-serra, che ristagnano negli strati inferiori dell'atmosfera e impediscono al calore di sfuggire, provocando un riscaldamento alle quote minori e un raffreddamento a quelle superiori (qui comunque nemmeno i gas-serra spiegano il fenomeno per intero; un altro fattore rilevante è il calo della concentrazione di ozono negli strati superiori dell'atmosfera).

L'osservazione appena descritta è anche incompatibile con altre possibili cause di riscaldamento. Le eruzioni vulcaniche per esempio riversano negli strati alti dell'atmosfera enormi quantità di polveri che assorbono il calore: il risultato è che l'aria si riscalda a grandi altitudini, mentre le temperature vicino alla superficie terrestre calano (come si è osservato nel 1992–1993, dopo la grande eruzione del Pinatubo).

E se la luminosità del Sole stesse aumentando, tutta l'atmosfera si riscalderebbe in maniera uniforme, a prescindere dall'altitudine.

Nei dati sul clima delle epoche recenti gli scienziati hanno trovato in effetti alcuni indizi dell'influenza di fenomeni naturali, come le eruzioni vulcaniche e l'andamento delle correnti oceaniche. Ma negli ultimi cinquanta (o più) anni i sottoprodotti dell'attività umana – in primo luogo i gas-serra creati bruciando combustibili fossili – hanno lasciato tracce assai più consistenti di qualsiasi fenomeno naturale.