

Cambiamenti climatici: certezze e problematiche aperte

Condizionata dal numero e dalla complessità delle variabili in gioco, la scienza climatologica richiederà eccezionali sinergie con altre discipline per fornire attendibili previsioni di lungo termine capaci di tener conto degli effetti antropici

Franco Prodi

Il cambiamento del clima è ormai tema centrale dell'agenda politica internazionale, ed influisce nei rapporti fra popoli, tra i gruppi di paesi sviluppati, in via di sviluppo e sottosviluppati, e, ovvia-

mente, su scala nazionale. È ormai chiaro inoltre che esso si interfaccia con gli altri due grandi problemi planetari: il reperimento delle fonti di energia e la salvaguardia ambientale della Terra.



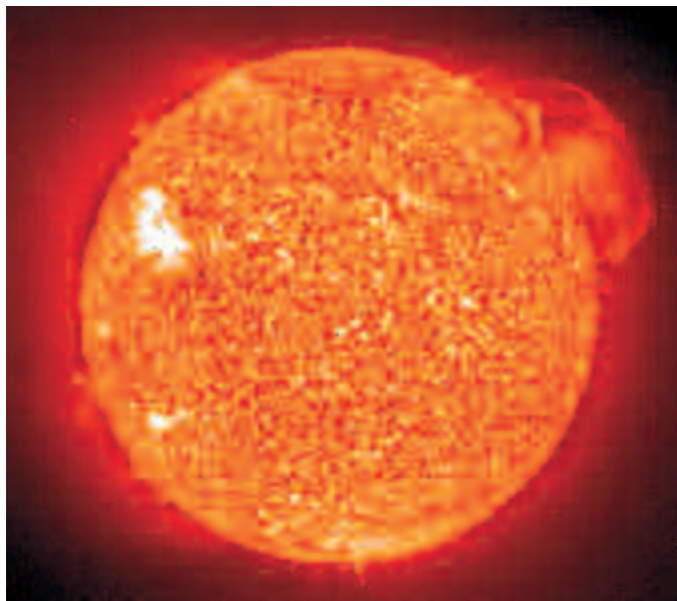
La temperatura media del nostro Pianeta è aumentata di 0,74°C nell'ultimo secolo. Gli scenari climatici ci prospettano, per il prossimo secolo, un ulteriore incremento della temperatura media che, a causa dell'attuale carenza nella conoscenza del sistema clima, è compreso in una forbice molto ampia (tra 1,1 e 6,4°C)

Questo tema peserà nelle elezioni presidenziali degli Stati Uniti d'America e nelle scelte politiche internazionali.

È quindi opportuno riflettere sugli aspetti cruciali della questione, partendo anzitutto dal livello attuale della conoscenza scientifica sul problema. Troppo spesso si dà per scontata l'entità dei cambiamenti climatici in corso, e si fa credere che si debba ragionare solo sulla mitigazione (come ridurli) o sull'adattamento (come questi effetti si rifletteranno sui diversi settori dell'economia e quali provvedimenti adottare per adeguarsi). Ma la riprova del livello di conoscenza raggiunto in ogni disciplina è la capacità di prevedere. Quanto carente sia la conoscenza del sistema clima è quindi dimostrato dall'ampia forbice degli scenari prospettati alla fine di questo secolo, per la temperatura dell'aria (da 1,1 a 6,4 gradi), per l'innalzamento del livello dei mari (da 0,18 a 0,59 metri) per parlare solo dei parametri più discussi.

In tempi recenti la polemica si è focalizzata, com'è giusto, sul ruolo dell'uomo industriale nei cambiamenti, quindi sugli ultimi duecento anni della storia del Pianeta. Questo periodo di due secoli è anche l'unico per il quale si possano avere misure fisiche di parametri meteorologici (temperatura dell'aria, umidità relativa e quantità di precipitazione). Sono infatti poche le misure che si riferiscono all'era pre-industriale (che si fa iniziare dall'invenzione della macchina a vapore di Watt, 1795). La stessa nascita della scienza moderna (Galileo, col suo termometro riprodotto in molti esemplari) precede di circa due secoli (in termini temporali e climatici) l'inizio dell'attività industriale su grande scala. Si devono poi considerare le non omogeneità dei dati della serie (cambi di posizione del punto di misura, anche come altezza dal suolo), cambi di caratteristiche del sito (un sito rurale diventa periferia di grande città) ecc. Ci accorgiamo subito di quanto sia complicato estrarre, sulla tendenza a lungo termine di una serie storica di misure, informazioni che sono dello stesso ordine degli errori presenti nella misura del singolo dato.

Questi aspetti sono stati studiati con metodo e rigore da un gruppo di ricerca



Il Sole è la stella che ci illumina nonché l'unica (se si trascura la radiazione proveniente dall'interno della Terra) fonte di energia. Le variazioni della sua attività (che si manifesta, per esempio, con la presenza di macchie solari) e le alterazioni dell'orbita terrestre attorno al Sole sono tra le principali cause naturali delle variazioni climatiche

del mio Istituto, in linea con quanto avviene nel mondo. I dati di circa cento stazioni italiane, dopo l'omogeneizzazione, sono ordinati ed accorpati in aree climaticamente omogenee e poi mediati, in modo da rendere più facile lo studio della variabilità attribuibile ai cambiamenti climatici e isolare le tendenze nei diversi sottoperiodi. È risultato evidente come in Italia, nell'intero periodo 1803-2003 la temperatura dell'aria si mantenne relativamente più bassa sino a quasi il 1860, con il 1816 identificabile come l'anno più freddo (per il materiale gassoso ed il particolato emesso durante l'eruzione vulcanica del Tambora, in Indonesia). Successivamente al 1860 si nota una graduale tendenza al rialzo della temperatura, che culmina attorno al 1950. Segue un lento e lieve calo generale sino alla fine degli anni '70, e infine un nuovo periodo di forte crescita, che culmina nel 2003, che a causa di una fortissima anomalia estiva risulta il più caldo dell'intera serie. Per quanto attiene invece alle precipitazioni, gli ultimi due secoli per le regioni del nord Italia mostrano successioni di massimi e minimi relativi, senza alcuna tendenza evidente verso l'incremento o la diminuzione. C'è peraltro una lieve diminuzione della quantità totale di precipitazione, per giunta con un leggero au-

(pari a 0,74°C nell'ultimo secolo, come riportato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), tuttavia ciò non deve stupire poiché il *trend* globale è dato dalla media di *trend* locali abbastanza diversificati tra loro: vi sono infatti regioni del Pianeta dove l'aumento della temperatura è molto più pronunciato (come l'area Euro-Mediterranea) e altre dove è più debole (come per esempio sugli oceani). Portandoci a discutere di clima in tempi precedenti si può lavorare solo su indizi (i cosiddetti «proxy data» per lo studio dei climi del passato), mentre si sviluppano nei maggiori centri di ricerca modelli interpretativi per il presente e per azzardare previsioni climatiche per il futuro. Questi modelli - quanto meno quelli che ambiscono ad una rappresentazione totale dei sottosistemi (atmosfera, oceano, criosfera, vegetazione) e delle loro interazioni - sono in una fase che definirei metaforicamente di infanzia. Certamente i sopracitati due secoli dell'«uomo industriale» sono un battito di ciglia rispetto all'intera storia del Pianeta, ma un battito di ciglia che si verifica per la prima volta con queste caratteristiche ed è ben giustificata l'attenzione all'effetto antropico. Man mano che ci allontaniamo dal tempo presente la conoscenza del clima si fa

sempre più incerta, essendo basata non più su vere misure fisiche di parametri meteorologici come per gli ultimi due secoli, ma su documenti storici o letterari, sullo studio degli anelli di accrescimento degli alberi, di sedimenti lacustri e marini, su carotaggi di ghiacciai, su rilevamenti geologici e paleontologici ecc. Se consideriamo l'ultimo millennio, variazioni di poco superiori (presumibilmente da 1 a 1,5°C) hanno prodotto tanto la cosiddetta «piccola età glaciale» (dal 1400 al 1850) quanto il periodo di riscaldamento denominato «optimum medioevale» (1000-1300) con noti effetti sulle colture agrarie, le abitudini di vita del tempo ecc. Procedendo ancora a ritroso osserviamo grandi variazioni modulate in cicli di centotrentamila anni circa. Su scale temporali ancora più estese, il clima si associa alla storia del pianeta Terra, essendo variato nel corso dei milioni di anni il rapporto tra oceani e terre emerse, mutata la collocazione dei continenti a motivo della loro deriva, il livello degli oceani, la stessa composizione dell'atmosfera.

sempre più incerta, essendo basata non più su vere misure fisiche di parametri meteorologici come per gli ultimi due secoli, ma su documenti storici o letterari, sullo studio degli anelli di accrescimento degli alberi, di sedimenti lacustri e marini, su carotaggi di ghiacciai, su rilevamenti geologici e paleontologici ecc. Se consideriamo l'ultimo millennio, variazioni di poco superiori (presumibilmente da 1 a 1,5°C) hanno prodotto tanto la cosiddetta «piccola età glaciale» (dal 1400 al 1850) quanto il periodo di riscaldamento denominato «optimum medioevale» (1000-1300) con noti effetti sulle colture agrarie, le abitudini di vita del tempo ecc. Procedendo ancora a ritroso osserviamo grandi variazioni modulate in cicli di centotrentamila anni circa. Su scale temporali ancora più estese, il clima si associa alla storia del pianeta Terra, essendo variato nel corso dei milioni di anni il rapporto tra oceani e terre emerse, mutata la collocazione dei continenti a motivo della loro deriva, il livello degli oceani, la stessa composizione dell'atmosfera.

Aspetti astronomici delle variazioni climatiche

Per risalire alle cause di queste variazioni bisogna pensare non solo al pianeta Terra ma anche al Sole, la stella che lo illumina continuamente generando energia sotto forma principalmente di onde elettromagnetiche, con reazioni nucleari che consumano quattro atomi di idrogeno per ogni atomo di elio prodotto, convertendo il «difetto di massa» risultante in energia. Ebbene, se la Terra fosse una sfera perfetta ed omogenea e priva di atmosfera la situazione di equilibrio sarebbe facilmente calcolabile. Basterebbe eguagliare il flusso di energia solare intercettato dalla sfera a quello emesso dalla stessa sotto forma di radiazione infrarossa verso tutto lo spazio esterno per ottenere la temperatura di equilibrio. La presenza dell'atmosfera, con i diversi gas costituenti, le particelle di aerosol sospese in essa e soprattutto le nubi, complica il problema, così come lo complica il fatto che l'interno della terra non è omogeneo e contiene fonti di calore endogene.

È chiaro che ciò che altera le caratteristiche geometriche e fisiche del sistema (mutamenti nell'attività del Sole, variazione della distanza Terra-Sole, variazione dell'angolo che l'asse di rotazione della Terra forma col piano dell'eclittica, dell'eccentricità dell'orbita terrestre), cambia anche il flusso di energia in arrivo, quindi anche il clima. La variazione dei parametri astronomici fu estesamente studiata da Milankovitch, e grazie al suo lavoro riconosciuta come causa primaria del succedersi di ere glaciali ed interglaciali. L'attività del Sole inoltre non è costante, cosa evidenziata dalle c.d. «macchie» sulla fotosfera, che mostrano delle evidenti oscillazioni nel numero e nell'estensione connesse ad una ciclicità con periodo di 11 anni circa. A questa variata attività corrispondono fluttuazioni dell'intensità del vento solare (flusso di elettroni, protoni, mesoni ed altre particelle) che investe la Terra interagendo con la sua magnetosfera e provocando deformazioni evidenti nelle Fasce di Van Allen. Questa è oggi considerata una causa astrofisica delle variazioni del clima. Per completare le cause naturali di variazioni climatiche, a quelle di natura astronomiche ed astrofisica vanno aggiunte le interazioni fra le diverse componenti del sistema (atmosfera, oceano, criosfera, litosfera e biosfera), le eruzioni vulcaniche con la relativa immissione di aerosol e gas in atmosfera, la deriva dei continenti e la naturale variabilità delle nubi, tanto come tipologia che come percentuale di copertura.

L'influenza delle attività antropiche sul clima

Ora veniamo al cuore del problema. Per la prima volta nella sua storia l'uomo può influire sul clima attraverso processi che cambiano la composizione dell'atmosfera, le caratteristiche dell'aerosol sospeso e la microfisica delle nubi, variando addirittura l'albedo superficiale del Pianeta. Le cause antropiche vanno quindi individuate nella immissione di gas serra in atmosfera per l'uso di combustibili fossili e per incendi di biomasse, negli allevamenti animali, nel traffico veicolare,

nella deforestazione e nel diverso uso dei suoli. È noto, poiché lo si misura con precisione, che il valore dell'anidride carbonica, ora intorno a 380 parti per milione, è aumentato del 31% dal 1750 ad oggi, certamente per l'attività umana, ed è noto che la forzatura radiativa dovuta alla crescita di tutti i gas serra (non c'è solo la CO₂) è intorno ai 2.5 watt su metro quadrato. Per quanto riguarda gli aerosol e le nubi il contributo alla forzatura radiativa non è ancora conosciuto: non è ben noto in quale verso agisca né quale sia la parte della variazione ascrivibile all'uomo. Val la pena di soffermarsi sul ruolo delle nubi in particolare. Nell'atmosfera priva di nubi la radiazione solare viene in parte riflessa verso lo spazio esterno dalle molecole di gas e dalle particelle di aerosol presenti. Una volta raggiunta la superficie terrestre questa riemette verso lo spazio esterno la radiazione come un corpo nero a 300 K. Se invece vi sono nubi la parte di radiazione solare che viene subito riflessa dalla sommità della nube verso lo spazio esterno aumenta, ma si configura anche sia un assorbimento all'interno della nube che una diffusione (*scattering*). Inoltre molto dipenderà dall'altezza alla quale si trova la nube e dalla composizione della stessa (goccioline d'acqua o cristalli di ghiaccio). Consideriamo in particolare una popo-

lazione di goccioline di nube; essa produce una forte estinzione sia della radiazione solare che della radiazione infrarossa. Gli effetti delle nubi sul clima possono essere così raggruppati:

- Effetti di assorbimento e riflessione della componente visibile della radiazione solare (onda corta) da parte delle nubi con conseguente variazione dell'albedo, attraverso la variazione di spessore ottico. Infatti l'albedo aumenta al crescere dello spessore ottico, e quindi del suo spessore geometrico, al crescere della concentrazione delle goccioline e della loro dimensione. L'assorbimento, d'altra parte, è strettamente legata all'indice di rifrazione delle goccioline ed alle proprietà ottiche della nube. Considerevoli variazioni delle caratteristiche ottiche di una nube possono essere causate non solo dalle particelle di aerosol che sono state catturate dalle goccioline di nube, ma anche dalle particelle cosiddette interstiziali (libere nello spazio tra le goccioline). In particolare le particelle di aerosol prodotte dall'uomo possono provocare notevoli variazioni dell'assorbimento e della riflettanza delle nubi.
- Effetti dovuti alla emissione della radiazione infrarossa da parte delle nubi. Ogni strato di nube emette radiazione termica verso l'alto e verso il basso, comportandosi in maniera molto simile ad un corpo nero avente la stessa temperatura dello strato. In generale una nube emette più radiazione termica verso il



L'attività umana è una delle principali cause dell'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera registrato negli ultimi decenni. La concentrazione di CO₂, attualmente pari a circa 380 parti per milione, è aumentata del 31% rispetto ai valori che si avevano nel 1750



[Foto: asaphoto/T. Colomba]

Le nubi, assieme agli *aerosol*, sono una delle principali fonti di incertezza degli attuali scenari climatici. A seconda delle loro caratteristiche (microfisica, quota e spessore ottico) possono avere un effetto di riscaldamento o di raffreddamento nel bilancio energetico del Pianeta

basso che non verso l'alto (essendo la parte inferiore più calda di quella superiore) cosicché considerando i soli termini della radiazione infrarossa essa contribuisce maggiormente a rafforzare l'effetto serra dell'atmosfera che non i processi di raffreddamento del sistema terra-atmosfera. Si deve tenere presente inoltre che, fatta eccezione per i cirri sottili, lo spessore ottico delle nubi nell'infrarosso è solitamente abbastanza grande perché la radiazione termica emessa dalla superficie terrestre e dagli strati atmosferici sottostanti sia quasi integralmente attenuata dalla nube. Quindi quando si valutano gli effetti delle nubi sul flusso di radiazione infrarossa uscente dal sistema Terra-Atmosfera è importante tenere conto soprattutto della temperatura dello strato superiore della nube, poiché da essa dipende principalmente il valore dell'irradianza emessa dall'atmosfera verso lo spazio esterno.

- Effetti dovuti all'attenuazione della radiazione infrarossa. L'estinzione da parte delle nubi avviene per *scattering* ad assorbimento. L'ammontare dipende dallo spessore ottico delle nubi, che ancora una volta dipende dallo spessore geometrico, dalla concentrazione delle goccioline e dalle loro caratteristiche chimiche e fisiche.

- Effetti dovuti alla variazione dell'indice di nuvolosità. Le immagini della Terra ottenute dal satellite negli intervalli di

lunghezza d'onda del visibile e dell'infrarosso mostrano che un'ampia parte della superficie (circa la metà) è coperta da nubi, con valori di albedo più alta delle aree prive di nubi. Chiaramente variazioni dell'indice di nuvolosità (percentuale della superficie terrestre coperta da nubi) comporterebbero una variazione dell'albedo complessiva del Pianeta. Un puro aumento di nuvolosità che non sia accompagnato da una variazione delle proprietà ottiche porterebbe ad un pronunciato effetto di raffreddamento. Ma se questo aumento dell'indice di nuvolosità fosse accompagnato da una diminuzione dell'albedo caratteristica della nube (per esempio per immissione da parte dell'uomo di particelle carboniose più assorbenti), l'effetto complessivo sarebbe di riscaldamento.

La veridicità dell'affermazione che il clima cambia passa quindi anche attraverso l'accertamento del fatto che le nubi cambiano, in estensione, natura e composizione. Si pone quindi il problema di costituire una climatologia delle nubi e della loro variazione, e questo si fa con particolari progetti di climatologia satellitare.

Le responsabilità dei Governi

In un quadro di sintesi possiamo dire che, limitandoci alle cause di variazioni climatiche operanti su tempi paragonabili a quelli dell'industrializzazione, ve

ne sono di note e quantificate (gas serra) e di meno note e da approfondire (aerosol e nubi). Ma consapevoli del rischio che si corre nel restare inattivi anche in carenza di conoscenza di alcuni aspetti si intende procedere in base al principio di precauzione autolimitando con accordi internazionali - come il protocollo di Kyoto, ora messo nuovamente in discussione - l'immissione in atmosfera di anidride carbonica, che ha effetto certo di riscaldamento. Come si è visto lo sviluppo di modelli adeguati di clima passa attraverso la soluzione di problemi insieme difficili e complessi. Introdurre in maniera corretta aspetti ancora controversi, quali l'interazione oceano-atmosfera, l'effetto dell'*aerosol* atmosferico, diretto (sui flussi di radiazione) ed indiretto (nella modifica della microfisica delle nubi) e lo stesso ruolo delle nubi porterà ad una riduzione della grave incertezza degli scenari che caratterizza lo stato attuale della conoscenza. Tale è l'attuale situazione e si deve riconoscere che non si può ancora parlare di previsione climatica affidabile.

Ovviamente, essendo questa la natura della questione, non stupisce che vi siano scienziati che sostengono questo principio di precauzione e scienziati che vi si oppongono sulla base della considerazione che la scarsa conoscenza di alcuni addendi rende la somma incerta.

Che di fronte a gravi pericoli per la Terra i politici debbano procedere sempre nel rispetto del principio di precauzione è cosa largamente condivisibile, pur di non perdere di vista la drammaticità della situazione di una scienza che non può che avanzare con passo lento mentre il pericolo per il Pianeta, soprattutto per il grave degrado ambientale, aumenta a dismisura.

Guardare in faccia il tri-polo ambiente-energia-clima nelle sue strette interrelazioni può guidare l'azione dei Governi con una barra del timone non troppo ondeggiante; e soprattutto può portare a non pensare il benessere dei popoli come totalmente coincidente con lo sviluppo economico o con la massimizzazione del prodotto interno lordo.

Franco Prodi

Direttore Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, ISAC-CNR, Direttore Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara