

Sesti e disesti climatici. L'effetto serra all'alba del terzo millennio

Approfondimento a cura di Alessandro Marani

SESTI E DISSESTI CLIMATICI

Nel mondo industrializzato è in atto un acceso dibattito sul clima sollecitato dagli eventi meteorologici che i giornali, le televisioni ed il cinema propongono per fare notizia o spettacolo. Il dibattito prescinde dal sapere scientifico dal quale, però, attinge suggestioni per possibili disesti planetari producendo fra la gente due schieramenti contrapposti.

Gli «**ambientalisti scettici**» dicono che non ci sarà alcun dissesto e che, al più, cambierà la distribuzione del clima. Gli altri sostengono, a diverso titolo, che non si possono dormire sonni tranquilli.

La gente si chiede: «Chi ha ragione?» e anche «Quali comportamenti tenere nei confronti dei cambiamenti globali?».

Superando i conflitti di **opinione** (la scienza non è né ottimista, né pessimista) ed entrando nel particolare, è indubbio che i «**gas serra**» in aumento produrranno aumenti della temperatura del Pianeta, ai quali potranno seguire aumenti del livello dei mari, aumenti in intensità e frequenza degli eventi meteorologici estremi, ma anche variazioni delle correnti oceaniche in grado di sconvolgere le aspettative con **manifestazioni di segno opposto** a quelle comunemente attese. Ciò vuol dire incertezza sulle conseguenze piuttosto che sulle cause, ma chiare indicazioni di rischio. Per questo gli scienziati scrutano:

- l'aumento di **temperatura della Terra** che è evidente in tutte le rilevazioni strumentali;
- i **paleoclimi** spingendosi fino ad epoche molto antiche per cercare analogie ed individuare opzioni di comportamento;
- la **riduzione dei ghiacciai** che è osservabile a qualsiasi latitudine pur con alcune apparenti eccezioni riguardo all'Antartide.

L'«**effetto serra**», un fenomeno che finora ci è stato amico minaccia di diventare ostile perché:

1. la **concentrazione** di «gas-serra» in atmosfera, misurata con strumenti oggettivi, ha assunto valori preoccupanti; esistono inoltre depositi di «gas-serra» dormienti che potrebbero liberarsi bruscamente;
2. gli andamenti della temperatura della Terra sono ben interpretati dai **modelli matematici** che lasciano pochi dubbi sulle proiezioni future e sui contributi antropici;
3. le **popolazioni** aumentano ed espandono l'uso di risorse e la produzione di rifiuti in conseguenza anche dell'evoluzione tecnologica.

La politica internazionale ha prodotto, ad oggi, il solo Protocollo di Kyoto (non ancora ratificato dagli USA), secondo il quale, nell'arco temporale 2008-2012, i Paesi industrializzati dovrebbero ridurre le emissioni inquinanti del 5,2% rispetto a quelle del 1990. L'accordo è entrato in vigore nell'ottobre 2004 con la ratifica del protocollo da parte della Russia, che ha permesso di raggiungere le condizioni minime. Di fatto, la volontà politica di affrontare i problemi e investire su tecnologie capaci di mitigare i disagi del Pianeta è ostacolata dalle esigenze di «mercato», il quale richiede, per sopravvivere, un regime di espansione dei consumi (ovvero dei rifiuti: l'«usa e getta» come paradigma). In questo criterio si inserisce anche l'idea secondo cui un «inquinatore» può barattare le sue emissioni di CO₂ con azioni di forestazioni realizzate da altri (emissions trading).

NB: i termini evidenziati in rosso sono esplicitati di seguito

Ambientalisti scettici

Le persone che si dichiarano scettiche riguardo ai rischi ambientali giustificano il loro scetticismo nei confronti dei cambiamenti climatici rilevando contrasti fra gli scienziati ed argomentando che gli scenari ostili non poggiano su «evidenze sperimentali», bensì su «modelli matematici» ai quali attribuiscono scarsa coerenza con le misure. Le stesse persone, però, non forniscono indicazioni sui riferimenti dai quali traggono i loro presagi e rimandano spesso ad un libro del 2001 di Bjørn Lomborg, «The Skeptical Environmentalist. Measuring the Real State of the World» (traduzione di una precedente (1998) versione Danese dal titolo «Verdens Sande Tilstand». Edizione italiana del 2003 dal titolo «L' ambientalista scettico. Non

è vero che la terra è in pericolo») nel quale l'autore pretende di «misurare lo stato reale del mondo» esibendo, come credenziali, una passata milizia in Greenpeace ed una docenza di statistica nel Dipartimento di Scienze Politiche dell'Università di Aarhus (Danimarca). In questo libro molti opinionisti (si badi bene, opinionisti non scienziati) hanno visto una possibile chiusura agli allarmi che vengono lanciati da scienziati (si badi bene, non da associazioni ambientaliste) direttamente impegnati nelle ricerche sull'ambiente. Il capitolo del libro dedicato al global warming (il capitolo 24), è impegnato a screditare le indicazioni dell'IPCC giocando sulle incertezze delle previsioni, criticando i modelli (a p.266: «Computers are number-crunchers and not crystal balls», i calcolatori sono sgranocchiatori di numeri e non sfere di cristallo), mettendo in dubbio gli effetti previsti per la CO₂ sulla temperatura ed insinuando che sono stati trascurati gas serra più importanti e che non si sono considerati altri fattori climatici (attività del Sole). Di fatto, esaminando le considerazioni IPCC, Lomborg finisce per contestarne solo aspetti marginali anche perché volendo ricondurre il global warming ad un problema di costi-benefici aggiunge alla complessità dei fenomeni quella della valutazione economica per quantificare vantaggi e svantaggi di possibili interventi globali. In particolare, sfuggono allo statistico di scienze politiche i limiti delle monetizzazioni e le distorsioni che contengono gli indicatori economico-sociali. L'impressione è che il libro abbia voluto compiacere il «Potere», smussando le responsabilità ambientali dei Paesi industrializzati. Del resto, troppo spesso Lomborg viene citato dai paladini dell'affarismo.

Commenti benevoli e malevoli relativi alla disputa giornalistica fra ambientalisti scettici e non, avviata dal libro di Lomborg, sono apparsi in vari contesti e pronunciati da vari pulpiti tanto da rendere difficile una loro rassegna. D'altra parte, l'argomento non merita più di tanto e conviene rimandare ogni commento a due siti internazionali contrapposti: uno a favore (<http://www.lomborg.com/>) ed uno contro (<http://www.anti-lomborg.com>).

Qualche considerazione sulle argomentazioni degli ambientalisti scettici va fatta per rilevare l'adozione di logiche speciose con effetti distruttivi. La scienza è relativa per definizione e propone risultati che sono necessariamente incerti (veri fino a prova contraria) soprattutto se si trattano problemi di frontiera. Affermare che ciò implica disaccordo fra gli scienziati non è corretto e produce solo confusione.

Ambientalisti non scettici

Nel 1988, riconoscendo l'esistenza del problema di possibili cambiamenti del clima globale, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale, OMM, (World Meteorological Organization, WMO) ed il Programma Ambientale delle Nazioni Unite (United Nations Environment Programme, UNEP) hanno costituito un gruppo di esperti intergovernativo (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), aperto a tutti i membri delle Nazioni Unite e del WMO.

Il ruolo dell'IPCC è di stabilire su base esauriente, oggettiva, aperta e trasparente le informazioni scientifiche, tecniche e socioeconomiche rilevanti per comprendere i fondamenti scientifici del rischio di cambiamenti climatici indotti dall'uomo e di stabilirne l'impatto potenziale e le possibilità di adattamento e di mitigazione. L'IPCC non effettua ricerche o misure sul clima, ma basa le sue valutazioni sulla letteratura scientifico-tecnica pubblicata su riviste «peer reviewed». Il ruolo, l'organizzazione, la partecipazione e le procedure dell'IPCC sono descritte nel sito Internet <http://www.ipcc.ch/about/procd.htm>, mentre le sue attività principali ed i suoi prodotti sono esposti nel sito Internet <http://www.ipcc.ch/about/about.htm>. Per statuto, quindi, l'IPCC si basa su tutte le ricerche descritte in articoli che hanno superato il vaglio delle riviste scientifiche con reviewer. Cioè, gli affiliati all'IPCC hanno il compito di filtrare (e condensare) i risultati scientifici già vagliati dalla comunità scientifica mondiale. Ciò garantisce ai prodotti dell'IPCC (Rapporti Periodici) un elevato grado di (i) affidabilità scientifica e di (ii) consenso fra specialisti. Ovviamente, il consenso non vuol dire unanimità di pensiero, ma centralità statistica dei giudizi. Per dare un significato quantitativo alla parola, sulla rivista Science del 13 maggio 2005, Roger A. Pielke, Jr. riporta che su circa 11.000 articoli estratti dalla banca dati ISI con la parola chiave «climate change» il 10% esprime «un qualche disaccordo» con l'IPCC. In altre parole, è difficile giustificare posizioni scettiche nei confronti dei cambiamenti climatici che sono indiscutibili. Inoltre, è ormai riconosciuto il contributo antropico al riscaldamento terrestre, mentre rimangono incerte la sua entità (1,5÷5,0 °C in 100 anni) e le sue conseguenze (quali aree si riscalderanno e quali si raffredderanno; dove le

inondazioni, dove le siccità; ecc.). Ricordiamo che gli scettici si basano su opinioni (non su asseriti scientifici) come nel caso di Lomborg e di quanti fanno riferimento al suo libro «The Skeptical Environmentalist».

I cambiamenti climatici costituiscono un argomento molto complesso, che si presta ad equivoci quando lo si affronta superficialmente. D'altra parte, sono di vitale importanza per l'uomo e per il suo ambiente. Questi motivi giustificano non solo gli studi sull'argomento, ma anche le domande della gente comune. E per cercare di fornire risposte alla portata di tutti, UNEP e WMO, hanno commissionato un rapporto dal titolo Common Questions about Climate Change che è stato redatto da scienziati del settore e revisionato da un nutrito panel di giudici ed è ora esposto, insieme con i nomi dei redattori e dei giudici, nel sito <http://www.gcrio.org/ipcc/qa/index.htm>.

Opinioni e metodo scientifico

Il metodo scientifico si basa su una «conoscenza sperimentale» resa oggettiva dalle «verifiche». Queste ultime devono essere intese come strumento necessario per rendere «oggettivo» il sapere personale e per rendere possibile la sua trasmissione a terzi. Nelle scienze classiche lo strumento consiste in modelli fisici (generalmente di laboratorio), mentre nelle scienze ambientali consiste necessariamente e sempre in modelli formali di simulazione (algoritmi). Gli algoritmi, come gli apparati di laboratorio sono i più svariati e si affidano alla fantasia dei ricercatori. Per questo non è possibile catalogarli e classificarli univocamente. In altre parole, la scienza nella sua qualità di conoscenza verificabile, non può prescindere dalle verifiche, possibili solo qualora l'oggetto di studio in qualche modo riproducibile. Popper completa il discorso sulla riproducibilità dicendo che una teoria scientifica deve indicare le condizioni per la sua falsificabilità: le idee scientifiche non hanno fonti privilegiate (scaturiscono comunque dalla fantasia di qualcuno), ma è indispensabile che vengano provate e perciò devono essere provabili (devono contenere conseguenze confutabili, cioè falsificabili da fatti).

Una teoria, per quante conferme possa aver avuto, non è mai certa e definitiva, in quanto il prossimo controllo potrebbe smentirla (relativismo della scienza). In effetti, esiste una asimmetria logica tra la verifica e la falsificazione: miliardi di conferme non rendono certa una teoria, mentre un solo fatto negativo la falsifica. Cioè una teoria scientifica resta valida «fino a prova contraria». Ed è la prova contraria che uno scienziato deve cercare, non la conferma. Tra l'altro, in questo modo risulta che l'induzione non è uno strumento logico della scienza, perché da una falsificazione non conseguono necessariamente migliorie alle ipotesi. Anzi, ipotesi falsificate richiedono la formulazione di ipotesi nuove, eventualmente ottenute modificando quelle precedenti.

Per i problemi ambientali i rapporti fra sperimentazione e riproducibilità si schematizzano come segue:

1. l'ambiente non si ripete (l'evento osservabile in questo momento ha pochissime probabilità di ripresentarsi con le stesse modalità);
2. le osservazioni sull'ambiente sono opinioni che diventano conoscenza scientifica solo quando un qualche modello le rende riproducibili.
3. le schematizzazioni possibili in laboratorio sono troppo grossolane per consentire di riprodurre le complessità dell'ambiente e quindi le osservazioni devono essere fatte necessariamente in situ (salvo aspetti marginali);
4. gli algoritmi diventano l'unico strumento capace di rendere riproducibili (cioè scientifici) i concetti derivati dalle osservazioni sull'ambiente.

Gas serra

Il concetto di gas serra è legato allo sbilanciamento (*forcing radiativo*) fra radiazione solare entrante (onda corta) e radiazione termica uscente (onda lunga): in assenza di forzanti, le due radiazioni mediamente si compensano. L'aggiunta di gas serra aumenta la quantità di radiazione termica (infrarossa) trattenuta dall'atmosfera, la quale la reirradia verso la superficie terrestre, producendo effetti riscaldanti (*forcing positivo*: la radiazione entrante

eccede quella uscente che è stata contemporaneamente ridotta). In tabella 1 sono elencati i gas serra principali (H₂O, CO₂, CH₄, N₂O) e quelli fuoroclorurati (XFC) in buona parte banditi per legge nei Paesi industrializzati, gli altri gas serra e quelli indiretti (che producono gas serra). Il Riscaldamento Potenziale Globale (Global Warming Potential – GWP) è l'indice per confrontare il «forcing radiativo» di gas differenti e si calcola come rapporto fra il *forcing radiativo* di un chilogrammo di gas e quello di un chilogrammo di CO₂ considerando un periodo di tempo definito (generalmente 100 anni). Il *forcing radiativo* globale è stimato con riferimento all'anno 2000 e rappresenta lo sbilanciamento indotto complessivamente.

Tipo di gas	Gas (formula)	Protocollo di Kyoto	Global Warming Potential GWP (2001)	Forcing radiativo globale
Serra	vapor d'acqua (H ₂ O)	n.c.	n.d.	n.d.
	anidride carbonica (CO ₂)	Riferimento	(valore = 1)	1,5 W/m ²
	metano (CH ₄)	compreso	23	0,50 W/m ²
	ossido di azoto (N ₂ O)	compreso	296	0,15 W/m ²
	ozono stratosferico (O ₃)	n.c.	n.d.	n.d.
	perfluorocarburi (PFC)	compresi	7850	n.d.
	idrofluorocarburi (HFC)	compresi	140+11.700	n.d.
Altri Serra	fluorocarburi alogenati (HCFC)	n.c.	2.800	n.d.
	esafluoruro di zolfo (SF ₆)	compreso	22.200	n.d.
	Carburi alogenati (CFC)	n.c.	n.d.	n.d.
	Ozono troposferico (O ₃)	n.c.	n.d.	n.d.
Serra Indiretti	Ossidi di Azoto (NO _x)	n.c.	n.d.	n.d.
	Ossido di carbonio (CO)	n.c.	n.d.	n.d.
	Idrogeno (H ₂)	n.c.	n.d.	n.d.
	VOC (Composti Organici Volatili)	n.c.	n.d.	n.d.

Tabella 1 – Elenco dei gas serra e loro caratterizzazione [n.c. = gas non compreso nel protocollo di Kyoto; n.d. = valore non disponibile].

In definitiva, i gas serra più importanti sono H₂O (di fatto indipendente dall'uomo), CO₂, CH₄, ed NO₂. I secondi due sono legati al carbonio, elemento che in forma organica si stima sulla Terra come descritto in figura. Si osserva che i due maggiori depositi sono i combustibili ed i gas idrati. Questi ultimi sono attualmente ben custoditi, ma potrebbero entrare nei bilanci serra in modo prepotente qualora si superassero soglie termodinamiche che si pensa siano già state superate 55,4 milioni di anni fa in corrispondenza ad un massimo termico molto pronunciato (~ 5°C). Maggiori dettagli sui depositi di gas serra sono riferiti in altro capitolo.

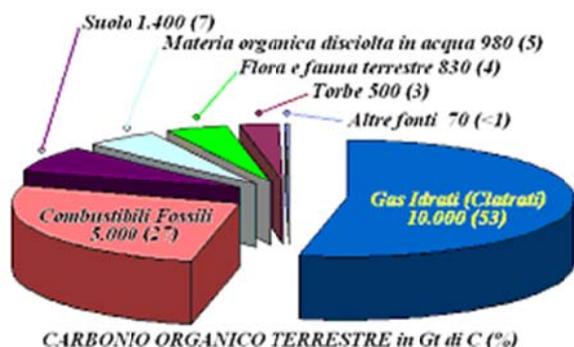


Fig. 1. - Ripartizione del carbonio organico terrestre

I contributi radiativi all'effetto serra dei singoli gas si differenziano per la natura e distribuzione delle sorgenti (riportate in tabella distinte per origine), per il comparto che ospita i depositi e per l'entità delle immissioni (per il CH₄ stime in tonnellate/anno sono riportate tra parentesi). Le valutazioni sono riportate in tabella 2, dove quelle del metano risultano anche quantificate.

GAS	SORGENTI	
	Naturali	Antropiche
CO ₂	Combustione di Biomasse Respirazione delle Biomasse	Produzione di Energia Trasporti Industria Combustione di Biomasse Variazioni d'uso dei suoli
CH ₄	Aree umide (100 + 250) Termitai (~ 20) Oceani (~ 15) Idrati metanici (5 + 10) Totale parziale (140 + 295)	Energia (~ 100) Discariche (30 + 70) Ruminanti (~ 100) Rifiuti organici (15 + 25) Risaie (50 + 100) Combustione di biomasse (20 + 40) Totale parziale (315 + 345)
N ₂ O	Oceani Atmosfera Suoli tropicali e temperati	Suoli coltivati Combustione di biomasse Trasporti Industria Bestiame e foraggi

Tabella 2 – Sorgenti dei tre maggiori gas serra. Per il metano sono riportate fra parentesi le stime in milioni di tonnellate all'anno delle immissioni in atmosfera attribuite alle singole sorgenti.

In fig. 2 è riportata la storia millenaria dei tre gas serra principali dalla quale risulta evidente la tendenza recente a crescite importanti per tutti e tre. Le scale a destra si riferiscono ai forcing radiativi globali che permettono di confrontare i contributi dei singoli gas all'effetto.

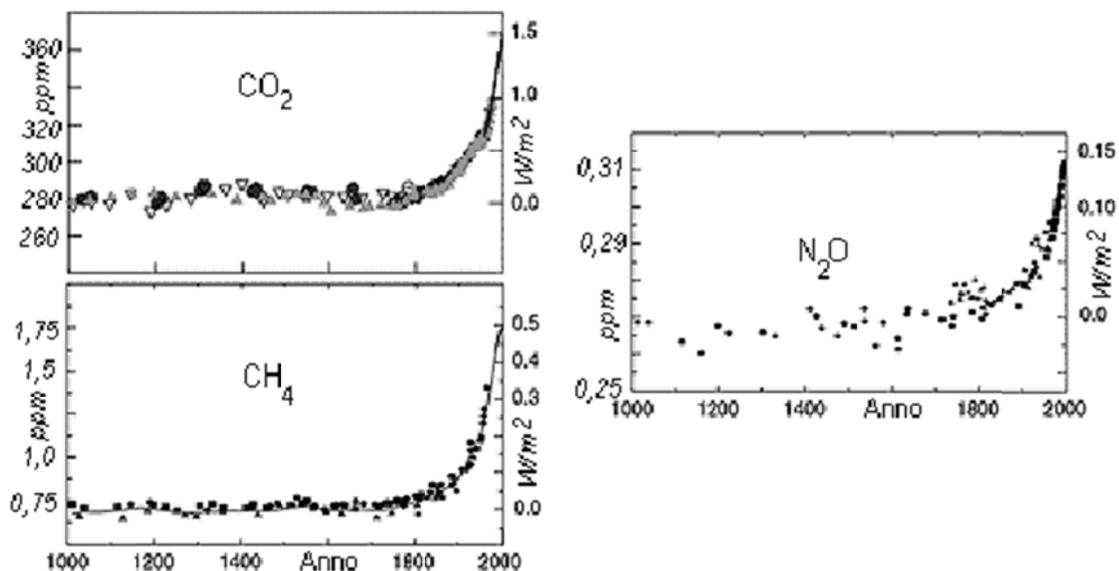


Fig. 2. - Evoluzione della concentrazione atmosferica dei tre maggiori gas serra. La scala di destra riporta una stima dei contributi radiativi (forcing radiativi) corrispondenti alle concentrazioni della scala di sinistra.

Manifestazioni di segno opposto

Dopo le sollecitazioni del film «THE DAY AFTER TOMORROW» (titolo italiano: «L'alba del giorno dopo»), la circolazione termoalina (thermohaline circulation, THC) degli oceani è diventata un tema di dominio pubblico e non senza motivo. La THC contribuisce a guidare le correnti oceaniche attorno al globo ed è importante per il clima mondiale (v. figura). Esiste la possibilità che durante questo secolo le THC del Nord Atlantico subiscano un considerevole indebolimento con spiacevoli effetti sul nostro clima: non una cinematografica era glaciale, ma, forse, un raffreddamento su parte del Nord Europa. La THC è un meccanismo che pilota le

correnti oceaniche perché alle alte latitudini il raffreddamento dell'acqua e la formazione di ghiaccio aumenta la densità delle acque superficiali, tanto da farle inabissare. Il fenomeno coinvolge più processi che vengono indicati collettivamente col nome di ventilazione. In figura i tondi viola indicano le aree di ventilazione che alimentano i flussi di acque dense profonde (linee blu).

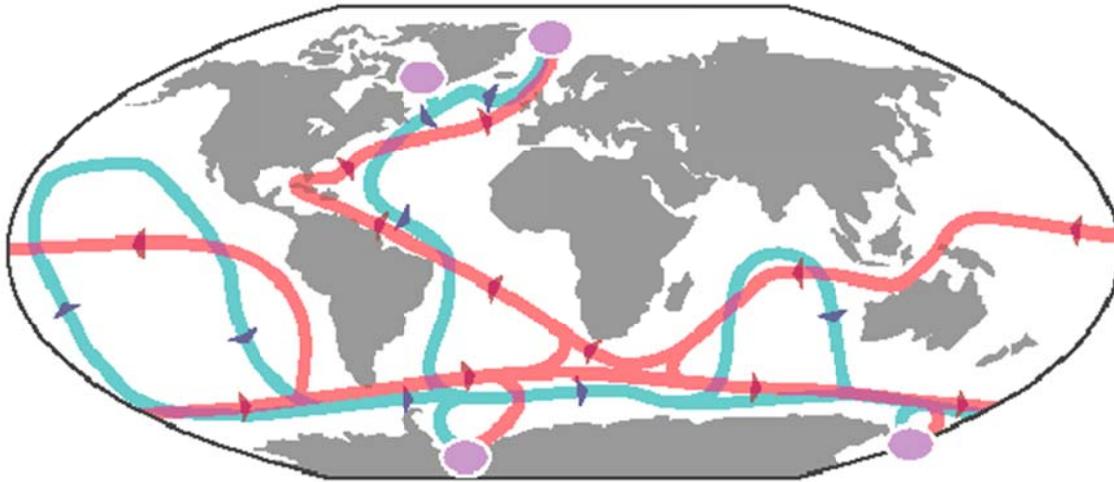


Fig. 1. - Circolazione termoalina. Mappa schematica della circolazione termoalina degli oceani.

Queste acque si muovono attraverso gli oceani risalendo lentamente verso lo strato superiore delle aree di ventilazione come correnti calde di compensazione (linee rosse). Nel Nord Atlantico la situazione diventa critica per la presenza del Greenland-Scotland Ridge, il crinale sub-oceanico che divide il bacino in due.

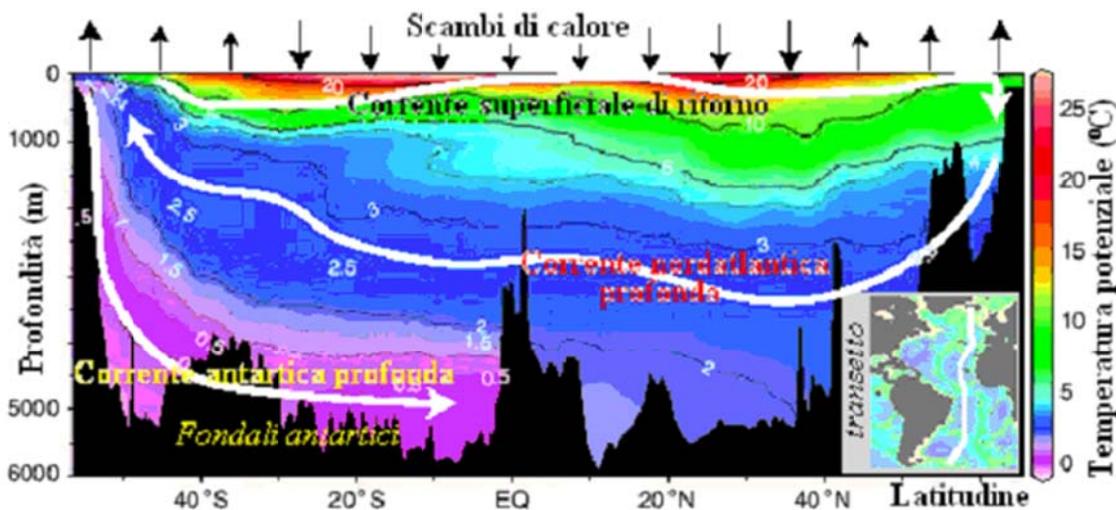


Fig. 2. - Schema di trasporto del calore lungo una sezione verticale dell'Oceano Atlantico e di scambio fra Oceano e Atmosfera.

Come ovvio, il film esaspera situazioni, manifestazioni e scale temporali, ma alcuni assunti non sono peregrini se si considera che sono già stati annunciati rallentamenti osservabili della Corrente del Golfo.

Di fatto, i disastri ambientali (come quello che avrebbe estinto i dinosauri, per intenderci) sono potenzialmente riconducibile ad effetti climatici, ma oggi rimangono comunque incerte le cause che li possono produrre ed i segnali che li annunciano. Sull'argomento alcune istituzioni scientifiche (governative e universitarie) stanno lavorando alacremente ed emergono continuamente complementi ai maggiori sospetti, come pure conferme ai risultati dei modelli che migliorano progressivamente le loro prestazioni. Per esempio la fig. 2 dettaglia, con riferimento al calore, i meccanismi del trasporto lungo una sezione verticale dell'Oceano Atlantico a completamento dello schema di fig.1.

Temperatura della Terra

Quando si parla di «temperatura della Terra» si deve intendere un indicatore del clima terrestre che rappresenta la temperatura dell'aria a livello del suolo. La temperatura al suolo, però, varia nello spazio (da punto a punto) e nel tempo (da istante ad istante) e, quindi, per definire il parametro «temperatura della Terra» è necessario precisare anche per il metodo di misura. Per il presente le metodiche di misura sono di:

A) determinare la media di tutte le misure effettuate nei siti omologati dalla Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM). Dati che provengono da 17300 stazioni (10000 a terra, 7000 installate su navi e 300 installate su boe) e che l'OMM raccoglie attraverso quattro *satelliti polari* (i quali percorrono orbite parallele ai meridiani terrestri e sorvolano i due poli durante ciascuna rivoluzione) e cinque *satelliti geostazionari* (i quali percorrono orbite equatoriali alla stessa velocità di rotazione della Terra e rimangono perciò sopra un punto fisso dell'equatore). Gli indici di temperatura vengono calcolati interpolando le misure in modo da trasferire i valori su un reticolo che copre la Terra con passo di $5^{\circ}5'$ gradi. Su questi dati si determinano le «anomalie» (ovvero scostamenti dei valori di temperatura misurati dal valore medio, ottenuto in base a serie storiche di dati disponibili per quella latitudine) a scale temporali diverse.

B) misurare con i satelliti la radianza di onda lunga della Terra (lunghezze d'onda fra 8,5 e 12,0 μm , costituenti il cosiddetto *infrarosso termico*).

Per il periodo che va dal 1850÷80 ad oggi si usano i dati di archivio (v. Fig. 1) ottenuti con misure dirette (come in A) mentre per i periodi precedenti si ricostruiscono indicatori correlati alla temperatura (*proxy*), quali spessori degli anelli di crescita annuale degli alberi, strati di carote di ghiaccio prelevate nei ghiacciai (le carote più antiche sono state estratte in Antartide (nelle basi di Vostok, Siple e Dome-C), stratificazioni di suoli e di sedimenti marini o lacustri, rocce e coralli.

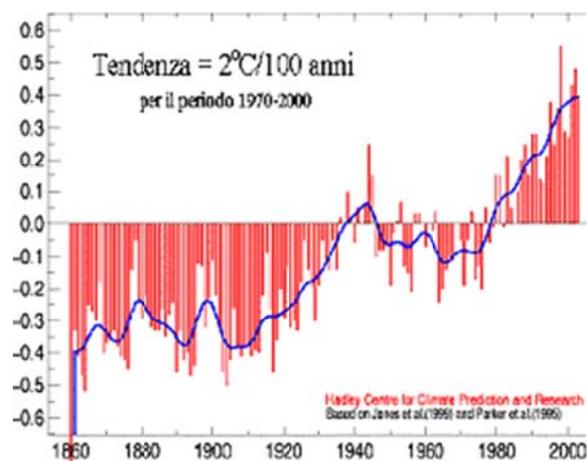


Fig. 1. – Temperatura della Terra per il periodo 1860÷2000.

Per il periodo 1000÷2000 le temperature della Terra sono state ricostruite da vari autori e sulla base di indicatori diversi (v. Fig. 2).

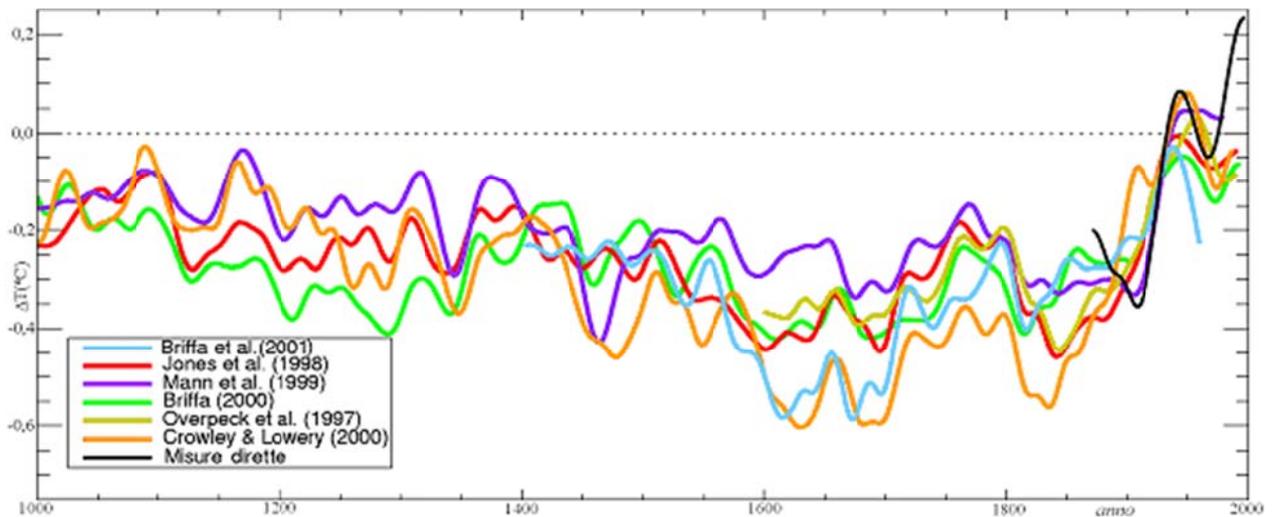


Fig. 2. – Ricostruzioni delle temperature della Terra per il periodo 1000÷2000.

Nella fig. 3 è riportata come esempio la serie temporale dei dati ricostruiti nella stazione russa Vostok, ma le altre ricostruzioni concordano con essa e riproducono anche le maggiori caratteristiche di quelle ottenute in Groenlandia e su ghiacciai alpini.

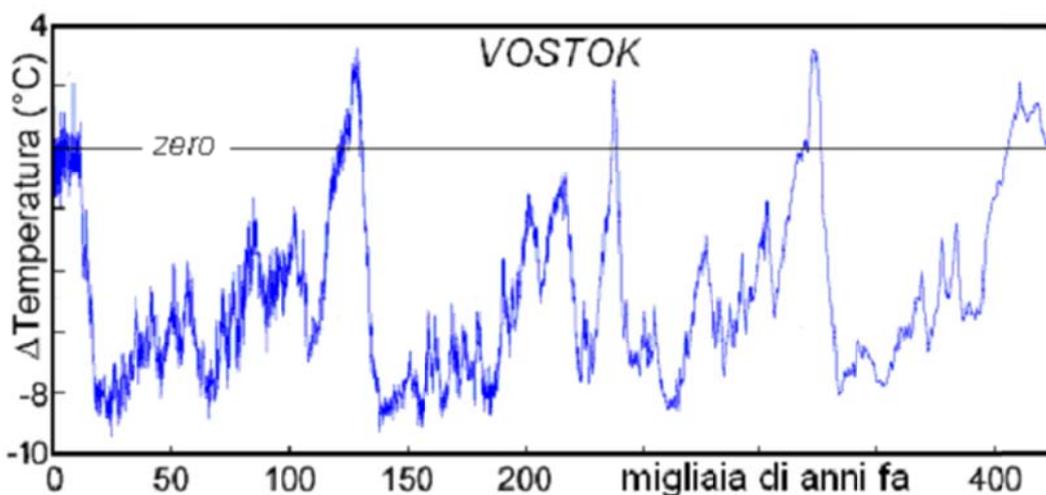


Fig. 3. – Temperature della Terra ricostruita da analisi di carote di ghiaccio estratte nella stazione russa Vostok.

La temperatura della Terra è scomponibile in componenti oscillanti delle quali in fig. 4 è riportato uno schema che cerca di mettere in rilievo le principale scale temporali degli eventi conosciuti. Sono ovvi i picchi ad un giorno e ad un anno. Un po' meno gli altri, ma alcuni sono ben spiegati da fenomeni astronomici, altri sono oggetto di studio come quello legato all'attività solare con massimo a 12-14 anni.

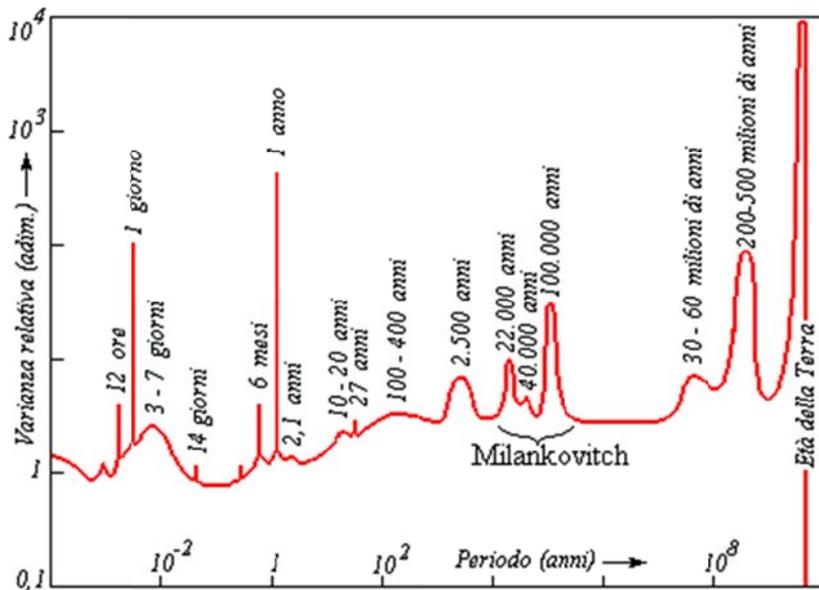


Fig. 4. – Periodicità degli eventi termici terrestri.

Ricostruzione di paleoclimi

La geologia e l'archeologia sono impegnate a studiare le condizioni che hanno prodotto la catena evolutiva generatrice del Pianeta attuale. In fig. 1 si osserva una ricostruzione fantasiosa della fauna presente in Inghilterra 500.000 anni fa riportata nella rivista Science a compendio dei ritrovamenti archeologici locali.

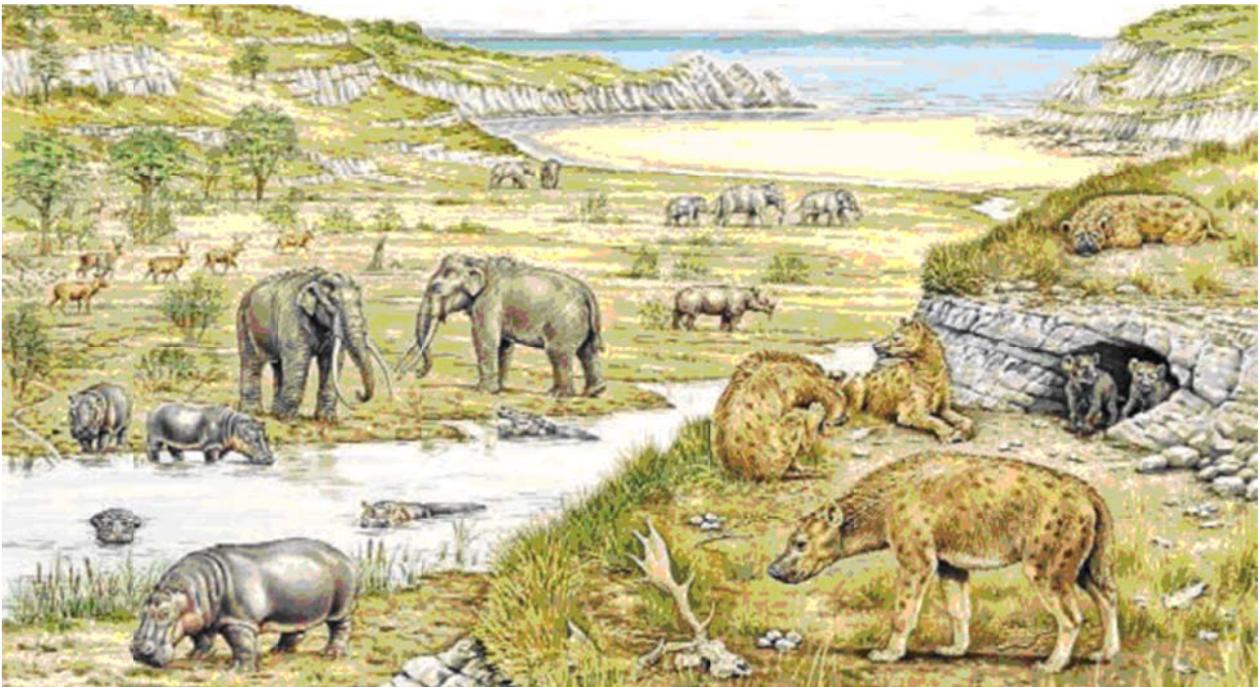


Fig. 1. – Ricostruzione di un possibile scenario inglese di 500.000 anni fa effettuata su reperti archeologici (. . . con un po' di fantasia!).

Per i climi interessano le temperature e le concentrazioni di CO₂ in modo da stabilire le condizioni termiche e l'attività radiativa dell'atmosfera dell'epoca.

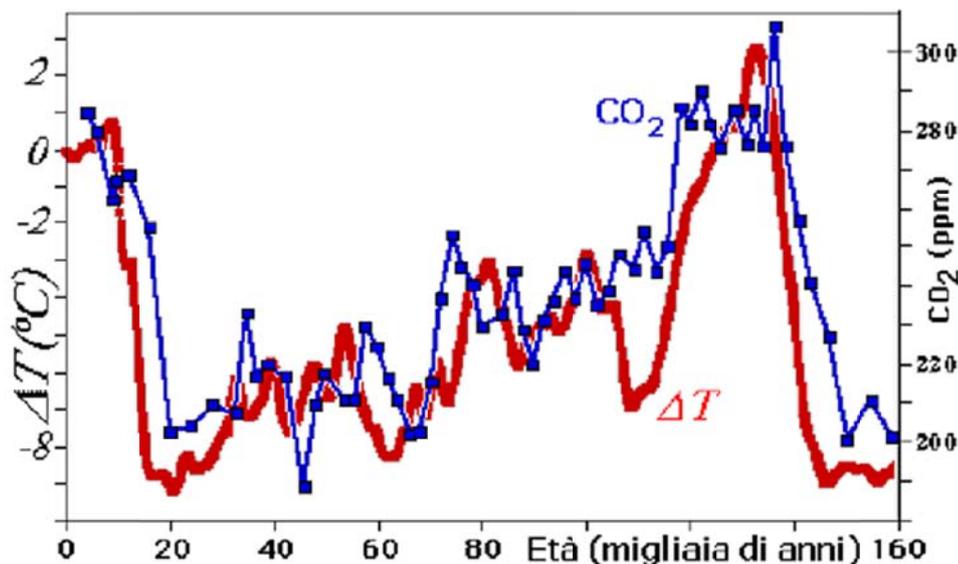


Fig. 2. – Storia e preistoria della temperatura e della CO₂ nell'atmosfera terrestre.

Nella fig. 3 sono riportate le temperature misurate nel periodo 1880-2000 ed a confronto quelle ricostruite da vari autori. Il diagramma è stato riportato anche dall'IPCC e mostra che le ricostruzioni tendono a sottostimare le temperature recenti e che comunque tutte denunciano tendenze vistose al rialzo.

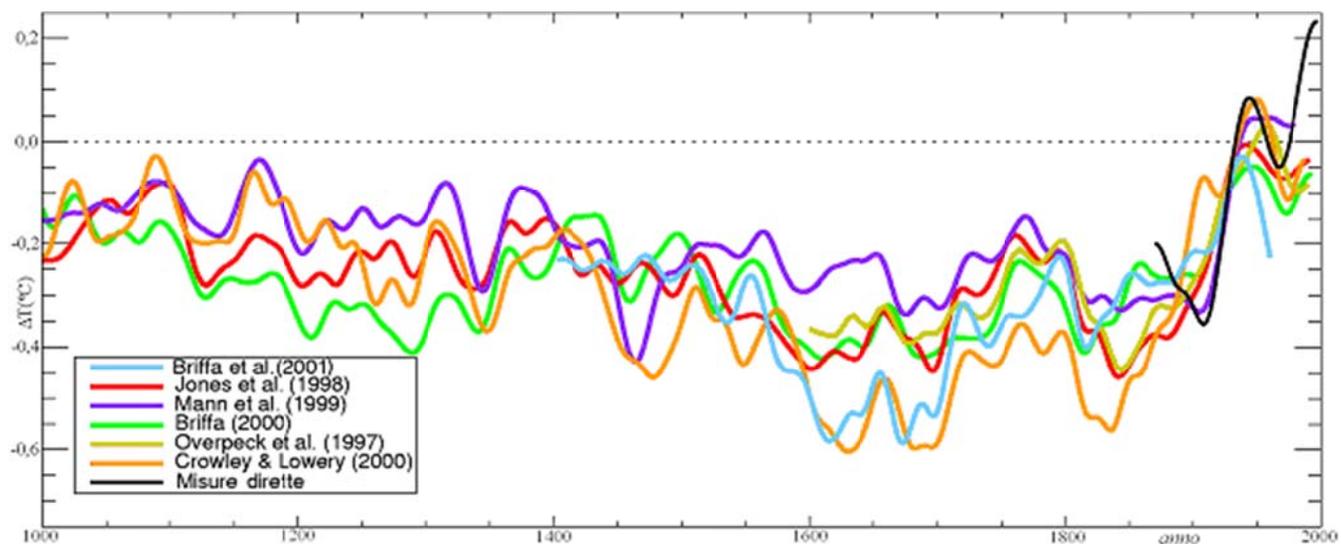


Fig. 3. – Temperatura dell'ultimo millennio. Ricostruzioni di vari autori a confronto con le temperature misurate direttamente.

Le considerazioni sulla temperatura riguardano il fatto che non esistono dubbi sul riscaldamento della Terra in atto, poiché non risulta smentito da alcuna misura oggi disponibile. Inoltre, l'entità e la durata della crescita non appare confrontabile con quelle di oscillazioni precedenti ed è compatibile con la presenza di contributi antropici. In queste condizioni è d'obbligo ricordare l'opportunità di tener conto del «principio di precauzione», secondo il quale i pericoli di dissesto ambientale consigliano prudenza soprattutto potendo agire sui contributi antropici.

La riduzione dei ghiacciai

Un ghiacciaio è una massa di neve e ghiaccio, che può presentare diverse tipologie classificate come: (a) ghiacciai montani, situati ad alte quote; (b) ghiacciai pedemontani, che si estendono

alla base delle montagne e sono formati dalla confluenza di più lingue glaciali provenienti dai circhi glaciali posti a quote superiori; (c) ghiacciai continentali, costituiti dai resti delle antiche glaciazioni e coprono vaste aree, come l'Antartide e la Groenlandia; (d) banchisa, costituita da ghiacciai marini.

I ghiacciai hanno un delicato rapporto con il clima della regione in cui sono situati: la massa di un ghiacciaio aumenta con le precipitazioni e con la sublimazione (passaggio dallo stato solido a quello di vapore e viceversa senza passare per la fase liquida). La perdita di massa dei ghiacciai è causata invece principalmente dallo scioglimento e dalla sublimazione: questi processi avvengono in ogni parte del ghiacciaio, ma con intensità diverse cosicché si hanno zone di accumulazione nelle quali l'accrescimento è maggiore delle perdite e zone di ablazione nelle quali, viceversa, sono più cospicue le perdite. Il bilancio complessivo tra l'accumulazione e l'ablazione nell'arco di un anno è cruciale per determinare il destino del ghiacciaio. Se il bilancio è positivo, un ghiacciaio diventerà più spesso e avanzerà; se è negativo, tenderà ad assottigliarsi e ad arretrare. La maggior parte dei ghiacciai montani sono attualmente in recessione. Nella fig. 1 è riportato un confronto fotografico che esemplifica la situazione per le Alpi ed in fig. 2 un diagramma che ne quantifica le perdite di ghiaccio e gli apporti di neve.

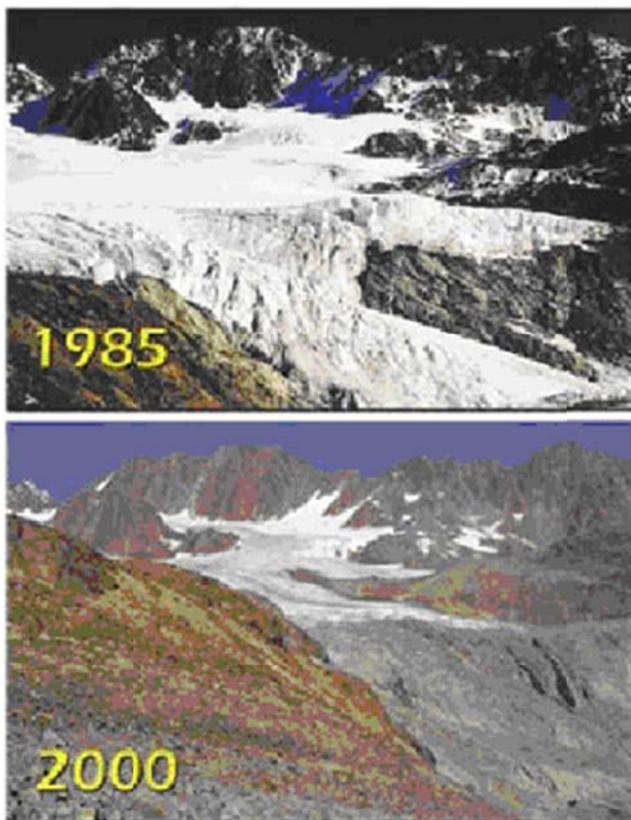


Fig. 1. – Fotografie a confronto di un ghiacciaio alpino (Ghiacciaio Vernagt – Austria).

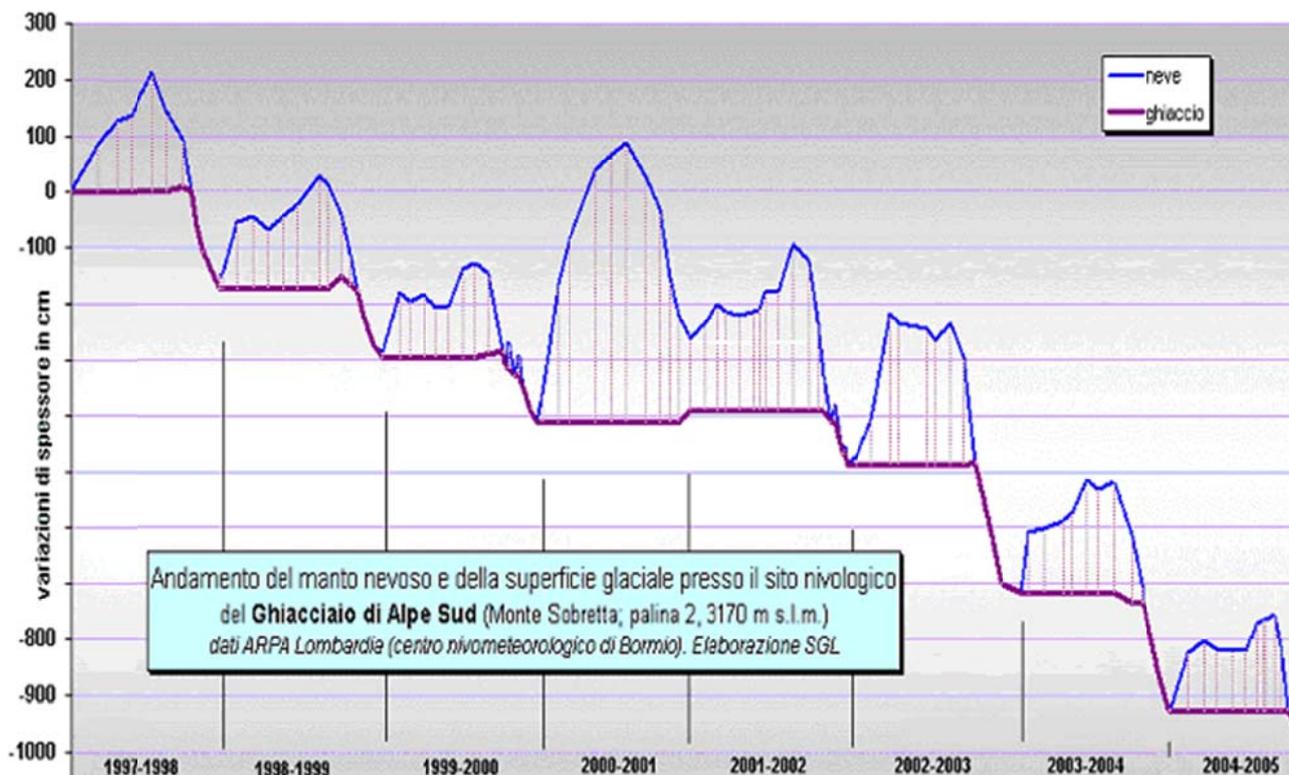


Fig. 2. – Dinamica dei ghiacci e delle nevi sul Monte Sobretta.

Anche i ghiacci polari hanno subito variazioni negative, come mostrano le due immagini Landsat TM del marzo 1986 e febbraio 2001 riportate in Fig. 3. Tuttavia in Antartide la questione è articolata: complessivamente il bilancio dei ghiacci risulta positivo in conseguenza del fatto che le precipitazioni nevose sull'area ad Ovest compensano lo scioglimento in atto ad Est (v. Fig. 4).

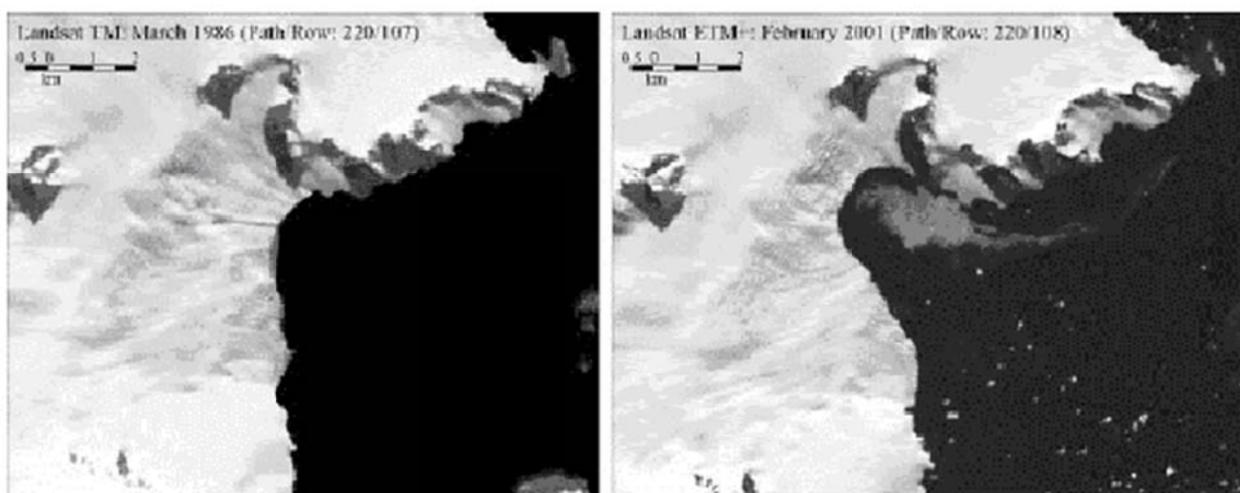


Fig. 3. – Ritiro del ghiacciaio Sheldon – Isola di Adelaide (Antartide)

La situazione riportata in fig. 4 risulta da studi molto recenti, resi possibili dai satelliti europei ERS-1 e ERS-2, il primo dei quali è stato lanciato nel 1992. Questi studi hanno misurato un modesto guadagno di spessore dei ghiacci in Antartide Est ($1,8 \pm 0,3$ cm all'anno), ma coerente con gli aumenti di apporti nevosi previsti dalla meteorologia e con la crescita dei livelli marini compensata dalla quota sottratta dalle precipitazioni nevose. Cioè, pur con le dovute precauzioni, anche l'aumento dello spessore dei ghiacci antartici si inquadra nelle logiche del riscaldamento globale.

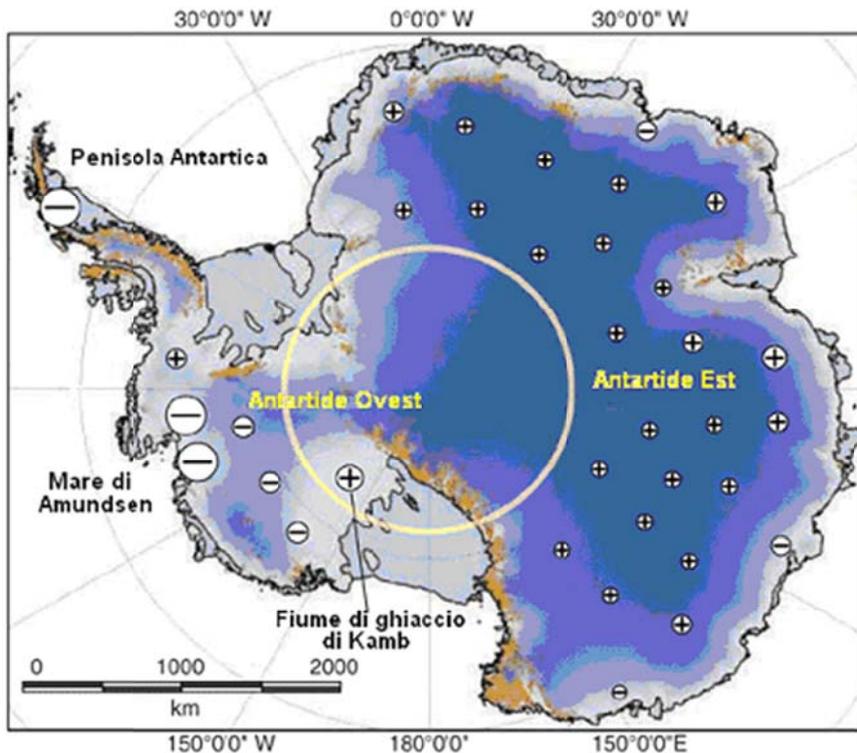


Fig. 4. – Contributi al bilancio dei ghiacci in Antartide.

Effetto serra

L'aria è la miscela di gas e particolato che avvolge la Terra e costituisce l'Atmosfera. Alcuni dei gas presenti nell'atmosfera lasciano passare la radiazione proveniente dal Sole ed impediscono alla radiazione uscente (emessa dalla superficie terrestre e dalla bassa atmosfera) di sfuggire verso lo spazio extraterrestre. Il particolato (pulscolico e nubi) schermano la Terra dalla radiazione solare. I due meccanismi conferiscono all'Atmosfera comportamenti analoghi a quelli dei vetri di una serra (da cui il nome all'effetto).

Le date ed i personaggi rilevanti per la scoperta dell'effetto serra sono:

1827 – Fourier, lancia l'idea che l'atmosfera agisca come i vetri in una casa riscaldata (selettività dell'atmosfera).

1865 – Tyndall, attribuisce la selettività dell'atmosfera al vapor d'acqua.

1884 – Langley e collaboratori, calcolano che senza atmosfera la temperatura della Terra sarebbe di $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1890 – Langley, rettificando i conti precedenti calcola per la Luna (che è senza atmosfera) una temperatura di $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1895 – De Marchi, calcola gli effetti del vapor d'acqua sulla temperatura della Terra in relazione alle glaciazioni.

1896 – Arrhenius, calcola gli effetti della CO_2 atmosferica su 5 scenari: 67; 150; 200; 250; 300% dell'epoca e trova variazioni di temperatura di circa: -3 ; $+3$; $+5$; $+7$; $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Prima di Arrhenius, altri autori (tra questi Lecher e Pertner) attribuirono la selettività dell'atmosfera alla CO_2 , ma il primo a quantificare l'effetto è stato Arrhenius.

Il meccanismo che determina l'effetto è descritto nella fig. 1. La figura spiega anche quanto sia difficile tener conto con soli strumenti intuitivi (non scientifici) dell'azione sul clima esercitata dalle singole forzanti (radiazione solare, nuvole, vapor d'acqua, gas serra e particolato).



Fig. 1. – Meccanismi di trasmissione e cattura dell'energia solare.

L'effetto serra non è sempre negativo per il clima come non lo è la CO₂. Per rendersene conto basta confrontare le condizioni della Terra con quelle di Marte e Venere (v. fig. 2). Marte ha un'atmosfera rarefatta e la CO₂ presente è solida al suolo. Venere ha un'atmosfera densa ed in prevalenza costituita da CO₂. In prima approssimazione il clima di un pianeta è determinato dalla sua massa, dalla sua distanza dal Sole e dalla composizione della sua atmosfera. Così Marte è troppo piccolo per trattenere un'atmosfera sufficientemente densa e, data la distanza dal Sole, ha una temperatura media di -50°C che è troppo bassa per mantenere la CO₂ allo stato gassoso. L'atmosfera della Terra è un centinaio di volte più densa ed è composta per il 78% da azoto, per il 21% da ossigeno e per l'1% da altri gas (dei quali 0,03÷0,04% CO₂). Il vapor d'acqua (che varia fra 0 ed il 2%), la CO₂ ed altri gas radiativamente attivi (gas serra) rendono ragione di una temperatura media pari a +15°C (senza i gas serra la temperatura media sarebbe di circa -20°C). Venere ha circa la stessa massa della Terra ma un'atmosfera composta per il 96% di CO₂ ed una temperatura di +460°C.

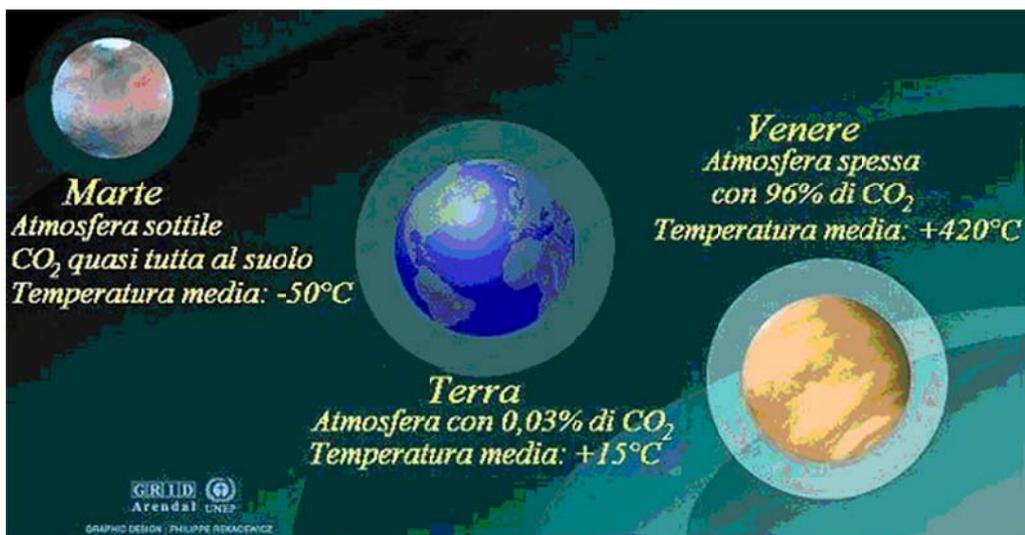


Fig. 2. – Atmosfere a confronto.

Di fatto, nei dettagli le atmosfere sono sistemi complessi con strutture spazio-temporali molto dinamiche. Il loro controllo richiede sofisticati strumenti matematici generalmente imperniati su complicate integrazioni numeriche di equazioni differenziali di bilancio. Nel caso della Terra la situazione è resa difficile anche dai processi di scambio fra atmosfera ed oceani, che

impongono l'uso di modelli capaci di accoppiare la circolazione dell'aria atmosferica e quella dell'acqua oceanica.

L'aumento della concentrazione dei gas serra

I gas serra sono componenti dell'atmosfera, per lo più presenti in minima quantità (concentrazioni che si misurano in parti per milione (ppm) o parti per miliardo (ppb)), che hanno impatti variabili da sostanza a sostanza, in ragione alle loro caratteristiche ottiche (spettro di assorbimento e sezione d'urto ai raggi infrarossi) ed alla loro persistenza (vita media) in atmosfera. Fra questi, il gas di riferimento è l'anidride carbonica (CO₂), perché è il più abbondante e quello con maggiori implicazioni antropiche. Ad essa seguono per importanza, secondo i criteri menzionati, il metano (CH₄) ed il monossido d'azoto (N₂O), che esauriscono quasi completamente l'interesse degli studiosi in quanto il resto della lunga lista dei gas serra contiene sostanze poco controllabili dall'uomo, come il vapor d'acqua, o sostanze completamente controllabili dall'uomo, come i CloroFluoroCarburi (CFC). Infine, vi è il particolato (aerosoli), componente dell'aria non gassoso che agisce nel senso di contenere il riscaldamento terrestre. Le considerazioni che seguiranno saranno ristrette alle dinamiche dei tre gas serra principali, tenendo a mente che il fenomeno è troppo complesso per essere controllabile senza ricorrere alle logiche della matematica e senza l'ausilio dei calcolatori. L'interesse per la CO₂ dell'atmosfera ha diverse motivazioni principalmente legate al clima (in ambito scientifico, le caratteristiche di gas serra della CO₂ presente in atmosfera sono dibattute già alla fine del 1800), alla crescita delle piante (i meccanismi della sintesi clorofilliana vengono discussi durante tutto il XX° secolo) ed all'inquinamento atmosferico (soprattutto come indicatore delle combustioni è materia della seconda metà del secolo XX°). La concentrazione della CO₂ in atmosfera è regolata da processi naturali ed antropici che si sviluppano in tutti i comparti dell'ambiente terrestre secondo il ciclo riportato a grandi linee in fig. 1.

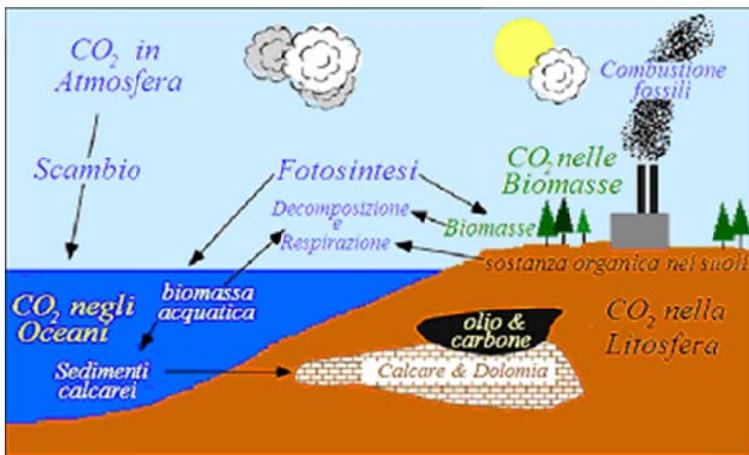


Fig. 1.- I principali meccanismi costitutivi del «Ciclo della CO₂».

Da qualche decina d'anni la concentrazione della CO₂ nell'atmosfera ha accelerato la sua crescita come mostrano le serie di misure riportate nelle figg. 2 e 3. Nella fig. 2 i dati riguardano due scale temporali diverse e due osservatori distinti per caratteristiche e per collocazione geografica. Il buon raccordo dei dati indica che le tecniche utilizzate per ricostruire le misure in Antartide sono confrontabili con quelle adottate alle Hawaii per le misure dirette. Le figg. 2 e 3 riportano misure effettuate in stazioni non soggette a contaminazioni dirette e scelte perché dislocate in luoghi distanti tra loro e con caratteristiche climatiche differenti per latitudine e scale temporali così da rappresentare andamenti generali reperibili anche in altri dati della letteratura. Tra l'altro, la fig. 2 mostra che a scala annuale le oscillazioni sono molto modeste rispetto alle variazioni tendenziali. Nella fig. 3 si vede che sul Monte Cimone l'andamento della concentrazione di CO₂ è coerente con quello rilevato nell'osservatorio delle Hawaii e che l'entità delle oscillazioni stagionali è notevole rispetto alle variazioni tendenziali. A questo proposito si osserva che nel passaggio dall'inverno all'estate le concentrazioni di CO₂ si

riducono di quantità (diminuiscono di circa 15 ppm) e crescono di altrettanto nel passaggio opposto con una deriva dell'ordine di $1,5 \div 2$ ppm all'anno. Le variazioni stagionali sono attribuite ad eventi naturali: in estate aumenta la temperatura che stimola l'attività biologica delle piante le quali fissando il carbonio atmosferico riducono la CO₂ dell'aria. La riduzione delle combustioni estive conseguente all'assenza dei riscaldamenti civili e commerciali ha effetti che sono vistosi ed immediati nelle città, ma che arrivano smorzati sul Monte Cimone dove si manifestano sulle tendenze come risultato di medie spazio-temporali. Queste osservazioni indicano effetti naturali favorevoli al contenimento della CO₂ atmosferica quando per un qualche motivo la temperatura della Terra aumenta, ma su scale temporali maggiori i mari scambiano (assorbono e liberano) CO₂ con l'atmosfera attraverso processi a maggiore inerzia.

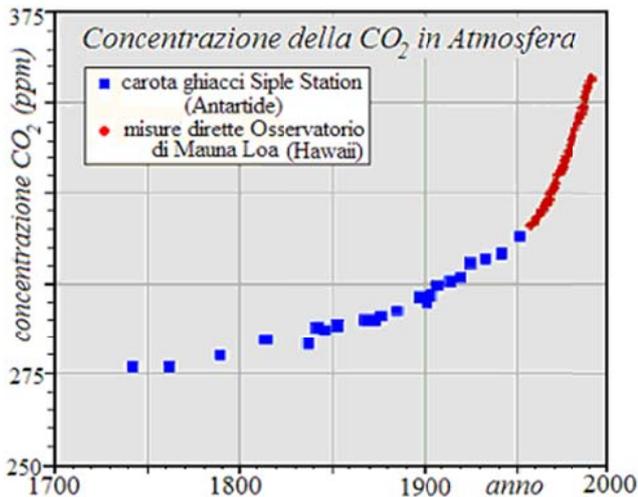


Fig. 2. – Concentrazioni della CO₂ in atmosfera misurata in Antartide ed alle Hawaii.

Un aumento della temperatura per motivi naturali (ad esempio, aumento dell'attività solare) può produrre aumenti della CO₂ atmosferica che non sono sufficienti ad assolvere l'uomo dalle sue colpe perché i più recenti modelli matematici rendono ragione dei contributi antropici all'effetto serra (v. fig. 3). Senza entrare nei dettagli, impressiona osservare come quattro modelli che tendono a sovrastimare i dati (v. periodo 1920÷1960) calcolano un contributo antropico di oltre 1°C per le temperature del 2000.

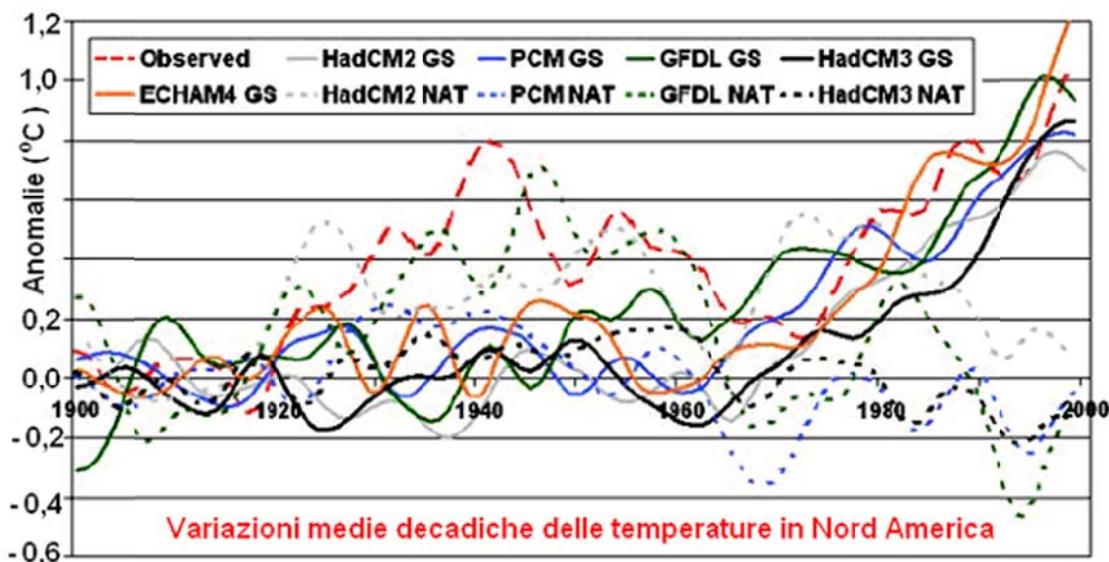


Fig. 3. – Confronto di anomalie termiche ottenute tramite misurazioni e attraverso simulazioni effettuate con modelli matematici che permettono di isolare i contributi antropici.

Senza un modello matematico che smentisca gli andamenti descritti in fig. 3 appare difficile affermare che l'aumento della CO₂ è opera dell'aumento della temperatura. Anche il principio di causalità (gli effetti non possono precedere le cause) sembra indifferente alle due ipotesi perché non risultano sfasamenti temporali misurabili. Ragionamenti simili valgono per la fig. 4 che confronta gli andamenti su scala millenaria dei tre gas serra principali.

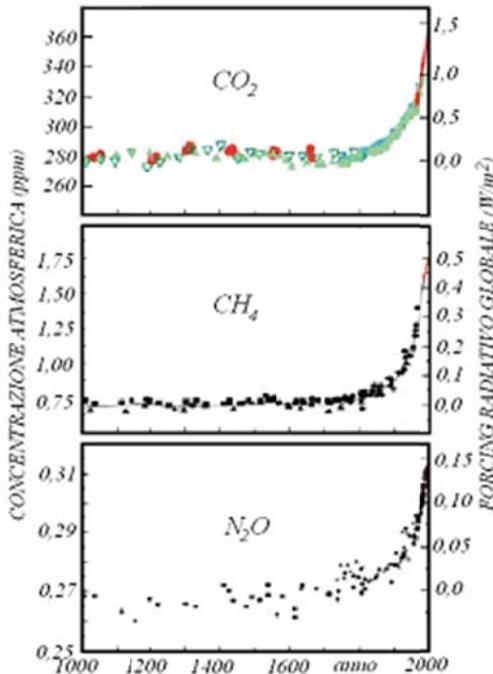


Fig. 4 – Comportamento dei principali gas serra nell'ultimo millennio.

Modelli matematici

La scienza, nella sua qualità di conoscenza verificabile, non può prescindere dalle verifiche, le quali sono possibili solo quando l'oggetto di studio risulti riproducibile illimitatamente. Se l'oggetto di studio è artificiale i problemi da affrontare non riguardano la scienza, ma appartengono alle tecnologie per le quali la riproducibilità è intrinseca all'oggetto stesso (che è appunto artificiale). Se invece l'oggetto di studio è naturale si producono opinioni fino a quando non si realizza uno strumento che permetta di simulare l'oggetto in modo da poterlo riprodurre. Il termine "modello" viene talvolta usato con il significato di "simulatore", talaltra con quello di "descrittore". Entrambi questi significati intervengono nel pensiero scientifico: il primo per intendere uno strumento di verifica ed il secondo uno strumento tassonomico. Alla allocuzione «simulare un evento ambientale» diamo qui il significato di «fornire uno o più algoritmi che collegano le coordinate dello spazio delle fasi (gli indicatori dell'evento) con lo spazio geometrico e con il tempo in modo da calcolare la traiettoria che descrive l'evento punto per punto ed istante per istante». Gli algoritmi possono essere formulati matematicamente in modo deterministico tramite funzioni o tramite equazioni (implicite o esplicite), oppure essere ottenuti con accorgimenti automatici (concettuali, geometrici, numerici, ecc.), oppure contenere elaborazioni statistiche.

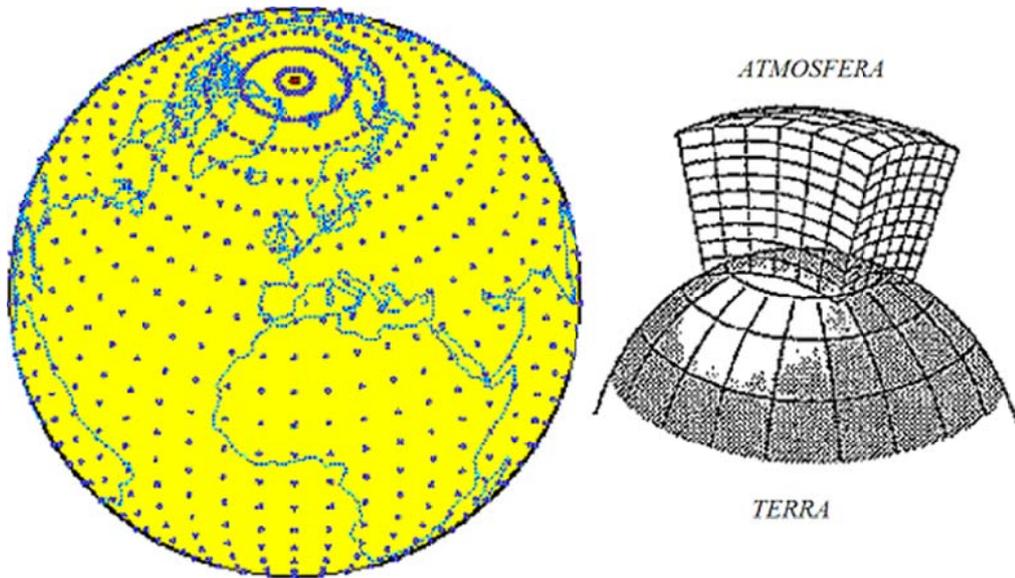


Figura 1. – Nodi del reticolo di calcolo dei GMC. A destra la distribuzione verticale.

I modelli matematici della meteorologia deterministica simulano la circolazione generale, GCM, dell'atmosfera risolvendo numericamente le equazioni fondamentali della meccanica (conservazione dell'energia, della quantità di moto e della massa) su strati di maglie regolari (attualmente 30 strati di maglie da 12,5 km di lato a livello del mare) distribuiti verticalmente a coprire la troposfera dell'intera superficie terrestre. Accurate considerazioni sulla precisione dei risultati si ottengono replicando le simulazioni con condizioni ai limiti (iniziali ed al contorno) variate e valutando medie e deviazioni statistiche dei risultati.

Per le previsioni i modelli stocastici estrapolano misure e/o dati da modelli deterministici utilizzando i metodi della statistica.

I modelli matematici del clima si ottengono con elaborazioni statistiche delle misure al suolo o dei dati prodotti dai GMC, considerando le medie spaziali e temporali più appropriate per il particolare schema climatico.

In internet sono disponibili anche animazioni del clima come ad esempio quelle globali ottenute con gli output del modello PCM e visibili nel sito:

<http://climate.esd.ornl.gov/pcm/presentation1/>. Inoltre nel sito

http://www.gfdl.noaa.gov/~tk/climate_dynamics/climate_impact_webpage.html sono disponibili alcuni esperimenti numerici condotti dal Geophysical Fluid Dynamics Laboratory della NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) con un loro modello climatologico.

A conclusione si rimarca che ogni rappresentazione (ed in particolare quelle del clima) deriva da un modello e che è errata la pregiudiziale secondo cui i risultati di un modello hanno il valore di opinioni. Infatti, i modelli (fisici, matematici o altri) sono l'unico strumento disponibile per rendere scientifica un'osservazione. Ad esempio, una misura di temperatura sottende il concetto (modello) di termometro e una misura di altezza quello di metro. E una temperatura può essere istantanea (?) o mediata (su un'ora, un giorno, un anno, ecc.). Così si cercano indicatori che rappresentano concetti e che sono correlati ad altri concetti. Ad esempio, si lavora con ENSO (El-Niño South Oscillation), NAO (North Atlantic Oscillation), MJO (Madden-Julian Oscillation) e, recentemente, con AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation). Questi indicatori oscillanti cercano di individuare andamenti ricorrenti che possano permettere previsioni dei climi futuri senza passare attraverso le simulazioni dei GCM.

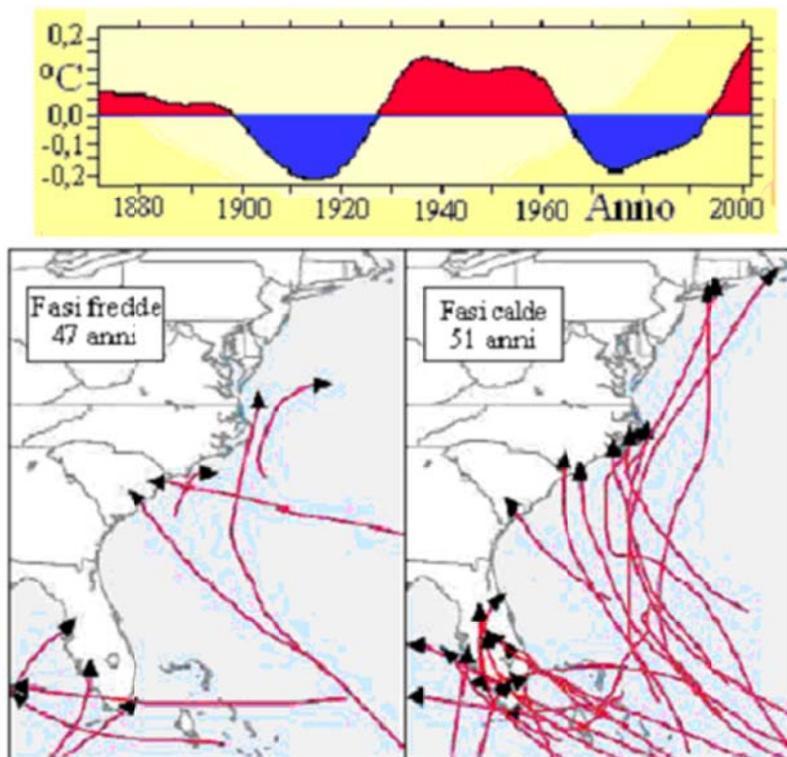


Fig. 2. – Sono riportati: in alto, l'andamento oscillante dell'indice AMO su un arco di tempo compreso fra gli anni 1871 e 2003; in basso, il legame fra fasi fredde (anni 1909÷1925 e 1971÷1994) e calde (anni 1926÷1970 e 1995÷2000).

L'indice è stato calcolato mediando le temperature superficiali del dell'Oceano Atlantico nella regione compresa fra 0° e 60° Nord e fra 75° e 7,5° Ovest, filtrando i risultati con un filtro passa basso ed eliminando le tendenze di lungo periodo.

Crescita della popolazione e della tecnologia

Considerando varie ipotesi di crescita formulate da « Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2004 Revision and World Urbanization Prospects: The 2003 Revision », si possono sviluppare alcune considerazioni. In particolare, dalla fig. 1 si vede che solo nel caso di «bassa crescita» si raggiunge un massimo di popolazione nel breve termine (fra il 2040 ed il 2050), mentre negli altri casi la popolazione cresce anche oltre il 2050 e «quota 10 miliardi» non è una meta lontana. Senza entrare nel merito dei diversi modelli, impressiona pensare che oggi solo il 10% della popolazione si può considerare «sviluppata», cioè capace di produrre la totalità dei rifiuti in circolazione. Qualora tutta la popolazione mondiale fosse sviluppata i rifiuti sarebbero dieci volte quelli attuali.

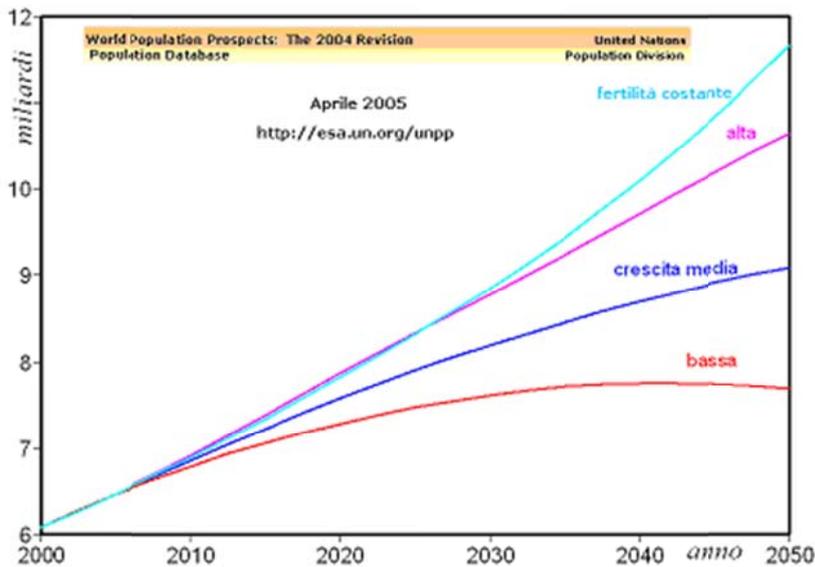


Fig. 1. – La popolazione mondiale secondo diversi modelli di crescita.

Qualcuno spera che le tecnologie possano soccorreroci, ma alcuni indizi non lasciano spazio all'ottimismo. In particolare, l'«uomo tecnologico» ha un rapporto con i rifiuti disastroso rispetto all'«uomo rurale». Infatti, il primo oltre a produrre più rifiuti ne allunga il ciclo di smaltimento. Ma l'uomo tecnologico altro non è che quello inurbato. In fig. 2 è riportato l'andamento della crescita media della popolazione mondiale e di quella urbana ed il parallelismo delle due curve lascia pochi margini alla speranza anche perché gli effetti delle crescite non sono lineari.

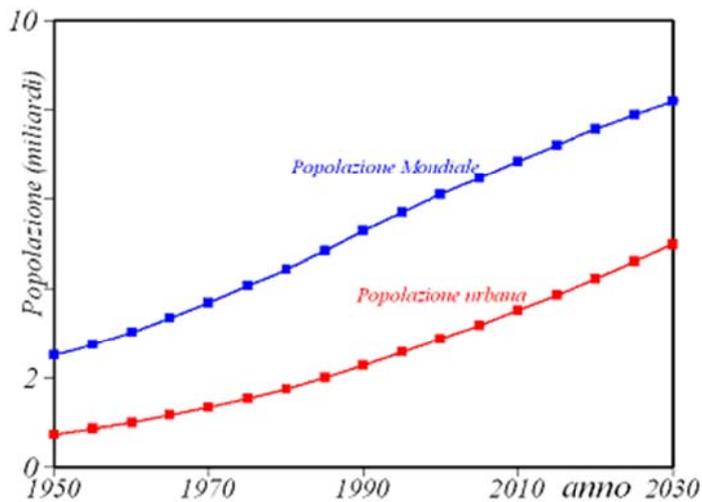


Fig. 2. – Popolazione mondiale e popolazione urbana.

Si pensi ai rifiuti ed ai problemi di sicurezza che pongono le sovrappopolazioni, ma anche agli sprechi di scala degli aggregati urbani ed ai disagi, ai malesseri, alle epidemie, ecc. di cui soffrono i singoli individui di città.