

EVOLUZIONE CLIMATICA LA VERITÀ SULL'EFFETTO SERRA

La percentuale di anidride carbonica (CO₂) nell'atmosfera cresce. Nel 1958 era di 315 ppm (parti per milione), cioè in totale 670 Gt (miliardi di tonnellate) di carbonio; nel 2004 era di 377 ppm (798 Gt). Da circa 30 anni sentiamo ripetere ovunque: "Questa crescita intensifica l'effetto serra e fa salire la temperatura dell'atmosfera in modo preoccupante."
Il processo viene chiamato riscaldamento globale - global warming.

DI ROBERTO VACCA

N.B.: Roberto Vacca non è un climatologo, ma un ingegnere sistemista che ha cercato di capire chi abbia ragione fra tanti esperti in disaccordo.

La luce del Sole viene intercettata dall'atmosfera terrestre e attraversata, assorbita o riflessa selettivamente dai gas che la costituiscono. Il vapore acqueo, ad esempio, è fra i principali responsabili dell'effetto serra.

Alcuni scienziati (fra cui J.E. Hansen, NASA, D.A. Lashhof, Environment Protection Agency USA (EPA) dicono che la temperatura dell'atmosfera crescerà di 4 o 5°C nei prossimi 50 anni. Quindi si scioglierebbero grandi masse di ghiaccio in Antartide e in Groenlandia tanto da far salire il livello dei mari, che nell'ultimo secolo sarebbe già cresciuto di 10 centimetri. La tesi è che l'aumento della CO₂ nell'aria è causato dall'uso dei combustibili fossili (carbone, petrolio, metano). Se non limitiamo drasticamente queste emissioni - dicono - il processo si accentuerà. Fra un secolo il livello dei mari si

sarà innalzato di qualche metro: le città costiere andranno sott'acqua. John T. Hardy (*Climate Change*,



Il Polo Nord e le regioni circostanti fotografate da un satellite artificiale. Il polo geografico è al centro, coperto dal ghiaccio del pack artico che si estende a sud su tutto l'altipiano della Groenlandia (in basso a destra).

Wiley, 2003) riporta il parere di esperti secondo i quali l'imminente innalzamento di 1 metro del livello del mare inonderebbe decine di migliaia di km² nelle zone costiere e forzerebbe la migrazione di milioni di persone in USA, in Europa, in Asia, in Africa. **È strano che queste teorie siano state accettate così largamente, dato che solo il 15% dell'effetto serra dipende dalla CO₂ (predomina nettamente l'effetto del vapore acqueo e anche il metano ha un effetto sensibile).** L'argomento è critico: esiste davvero un rischio grave? I pareri sono divisi. I catastrofisti e i loro oppositori (se-

condo i quali le attività antropiche non influiscono quasi affatto sul clima globale) si affrontano sui giornali, in TV, in acri dibattiti pubblici. Firmano a migliaia appelli e manifesti e pubblicano commenti venefici sostenendo che i firmatari dei documenti degli avversari sono pochi e poco qualificati. **Cominciamo col rileggere la storia delle teorie sull'argomento e analizziamo, poi, i numeri, le risultanze empiriche e le teorie.**

LA STORIA DELL'EFFETTO SERRA E DEL CLIMA TERRESTRE

Una storia piena di intuizioni brillanti e anche di calcoli sbagliati - e di calcoli giusti.

Curiosamente, una previsione errata fu avanzata da John von Neumann, il famoso matematico di origine ungherese, davanti al quale Dennis Gabor (il fisico che vinse il Premio Nobel per aver inventato l'olografia) raccontava di essersi sentito come lo scemo del villaggio. Von Neumann, oltre ad aver elaborato teorie e fatto scoperte notevoli, definì la struttura dei primi computer: quello costruito all'Università di Princeton si chiamava JOHN-NIAC in suo onore. Von Neumann elaborò anche la teoria dei modelli climatici chiamati, poi, GCM o General Circulation Models. In questi modelli l'intera atmosfera viene suddivisa in decine di migliaia di celle elementari. Si calcolano le influenze meccaniche e termodinamiche

KYOTO

Il punto di vista che l'aumento della CO₂ e dei gas serra causi un grave riscaldamento globale è ormai considerato una verità ufficiale. Lo incorpora il Protocollo firmato a Kyoto nel 1997 dai governi di 150 Paesi. Questi, tutti insieme, producono circa il 60% dell'anidride carbonica immessa nell'atmosfera. L'obiettivo è diminuire le emissioni di CO₂ fino a tornare nel 2012, a un livello del 7% inferiore a quello del 1990. Il Protocollo di Kyoto è stato ratificato anche dalla Russia, ma non dagli USA che lo ritengono dannoso allo sviluppo della loro economia. Infatti, per applicarlo, dovrebbero adottare misure intese ad aumentare i rendimenti, diminuire i consumi energetici, passare a tecnologie diverse e a fonti rinnovabili di energia. Sostengono che se applicassero le regole di Kyoto, creerebbero 5 milioni di disoccupati e subirebbero perdite economiche fino a 62 G\$ al 2010 e fino a 102 G\$ al 2020. Non sono cifre enormi (circa l'1% del PIL americano), ma ugualmente le considerano inaccettabili.

Un operaio usa una sonda per misurare la temperatura di un compressore di gas. Il gas naturale trattato in questo impianto (fotografato in Scozia) viene estratto dai giacimenti petroliferi del Mare del Nord e compresso per poter essere distribuito nelle case dove viene utilizzato come combustibile.



fra le celle, mirando a prevedere ogni futuro evento meteorologico. **L'approccio è interessante e serve a prevedere il tempo atmosferico con vari giorni di anticipo.** I modelli sono inadeguati a formulare previsioni a lungo termine e von Neumann sostenne, nel 1955, che l'insuccesso dipendeva dalla scarsa velocità dei computer del tempo. Vaticinò che per il 1980 la velocità dei computer sarebbe stata tanto alta da permettere previsioni a mesi o forse anni di distanza. Non andò così. Ora i com-

puter sono molti milioni di volte più veloci di quanto lui prevedeva - ma il clima futuro non si riesce a calcolare: dipende da una moltitudine eccessiva di fattori in modi ancora non chiariti. I calcoli giusti vengono fatti e servono a illustrare quali siano i punti di vista più ragionevoli in merito alle variazioni del clima passate e future. I processi coinvolti sono tanto complessi che le certezze raggiunte sono scarse e le questioni opinabili. Il fisico e matematico francese Fourier formulò per primo la teo-



Il supercomputer Param Padma, il più potente dell'India, capace di una potenza di calcolo di un Teraflop. Questo supercomputer viene usato per effettuare analisi basate su grandi quantità di dati, come quelle nei settori della bioinformatica, della meccanica strutturale, e della scienza dell'atmosfera...



ria fisico-matematica della trasmissione del calore e scoprì le serie matematiche (note con il suo nome) indispensabili per analizzare ogni tipo di fenomeni periodici (e anche le variazioni del clima, come vedremo più oltre). Nel 1824 fu anche il primo a capire che l'atmosfera produce un effetto serra sul nostro pianeta: l'energia irradiata dalla Terra verso lo spazio è minore di quella ricevuta dalla radiazione solare (che ha una lunghezza d'onda minore). **Se non ci fosse l'atmosfera, non ci sarebbe effetto serra e la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di 18°C più bassa di quella attuale (che è di 15°C).** Dalla metà del secolo XIX si affermò sempre più chiaramente l'idea che molti millenni fa la Terra aveva attraversato ere glaciali. Gli studiosi che la svilupparono erano K. Schimper (il primo a parlare di *Eiszeit* = era gla-

ciale), lo svizzero L. Agassiz, lo scozzese J. Croll. Nessuno, però, era in grado di stimare la durata, né la successione di queste presunte ere. Nel 1896 il chimico svedese (Premio Nobel) Svante Arrhenius sostenne che l'uso continuato del

carbone come combustibile avrebbe raddoppiato nei prossimi tre millenni la quantità di CO₂ nell'atmosfera, accentuando l'effetto serra e producendo un aumento di 5°C della temperatura media dell'aria. Arrhenius non disponeva, però, di misure atten-

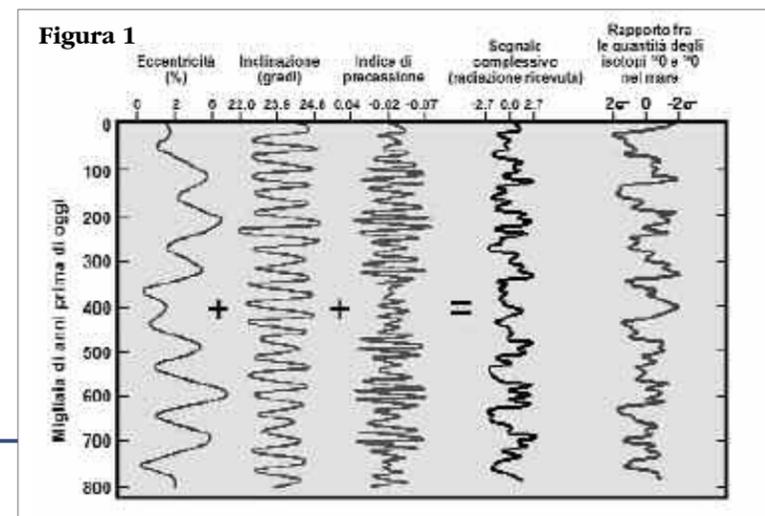
FATTORI ASTRONOMICI

Gia nel 1842 il matematico francese Alphonse Adhemar aveva sostenuto che le ere glaciali fossero causate da variazioni nell'orbita terrestre. L'idea fu ripresa dall'ingegnere (e astronomo) serbo Milutin Milankovitch che dal 1912 al 1940 calcolò accuratamente (a mano!) gli effetti sull'energia solare irradiata sulla Terra di tre ordini di fenomeni:

- la variazione dell'eccentricità dell'orbita ellittica della Terra con periodo di 100.000 anni;
 - la variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre (tra 22° e 25°) con periodo di 40.000 anni;
 - la precessione degli equinozi che ha un periodo di 22.000 anni;
- La concomitanza di queste tre periodicità, secondo Milankovitch, costituisce il più importante fattore causale delle ere glaciali verificatesi negli ultimi 600.000 anni.

La **figura 1** riporta i diagrammi dei 3 tipi di fenomeni citati con i loro periodi di 100.000, 40.000 e 22.000 anni. Il quarto diagramma da sinistra mostra l'effetto cumulativo sull'entità della radiazione ricevuta dalla terra. Milankovitch asserì che le variazioni corrispondenti sono la causa delle ere glaciali verificatesi negli ultimi 800.000 anni.

La teoria destò notevole interesse, ma fu poi criticata in base alla considerazione che non dava conto in modo adeguato delle risultanze climatiche relative ai due emisferi terrestri.



La ricercatrice che lavora al terminale di un grande computer sta valutando, su due monitor che mostrano il flusso dei dati e la loro rappresentazione grafica, i risultati forniti da un programma che cerca di predire gli effetti della presenza dell'anidride carbonica nell'atmosfera sull'effetto serra. (Goddard Institute for Space Studies, USA).



La superficie della Terra assorbe parte della radiazione solare che la raggiunge e parte la riflette. A causa del calore assorbito, la superficie irradia raggi infrarossi che vengono in gran parte intercettati dall'atmosfera e riflessi verso il basso. La quantità dei raggi infrarossi che viene riflessa dipende dai gas di cui l'atmosfera è composta e dalle loro concentrazioni. Tutto questo processo prende il nome di effetto serra, ed è simile a quello che si sviluppa nelle serre ove vengono coltivate piante che necessitano di una temperatura e di una umidità più elevate di quelle dell'ambiente esterno.

dibili delle temperature antiche, né di serie storiche del tasso di CO₂ presente nell'atmosfera.

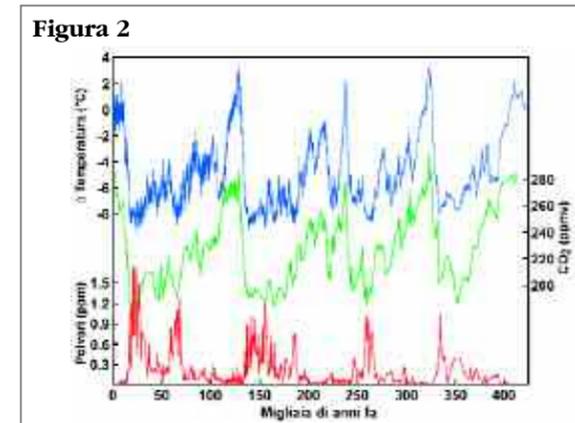
L'astronomo inglese Sir Fred Hoyle avanzò una teoria alternativa, attribuendo la causa delle ere glaciali all'impatto di grossi meteoriti di pietra che causavano l'inizio di un'era glaciale per il polverone sollevato - tale da oscurare il Sole per una decina di anni. La diminuzione della temperatura avrebbe causato il congelamento dell'umidità dell'aria a formare piccolissimi aghetti di ghiaccio (detti "polvere di diamante") che avrebbero poi riflettuto la radiazione solare tenendo bassa la temperatura per millenni. La fine del freddo sarebbe stata causata dall'impatto di un grosso meteorite metallico, cui conseguiva la presenza di particelle metalliche che, assorbendo la radiazione solare e avendo un basso calore specifico, facevano sciogliere la polvere di diamante. Si innalzava la temperatura dell'aria e cominciava un'era interglaciale.

La tesi di Hoyle fu abbandonata, mentre a partire dagli anni settanta trovò ampia conferma la teoria di Milankovitch, basata sulle variazioni dell'orbita terrestre (vedi il box a pagina 18). Furono analizzati, infatti, i carotaggi di ghiaccio eseguiti fino alla profondità di alcuni chilometri nell'Antartide dalla spedi-

zione Vostok. **Di questo ghiaccio profondo è possibile determinare l'età, in base alla profondità. I campioni contengono bolle d'aria: analizzandole si determina la percentuale di CO₂ atmosferico in epoche remote.** La temperatura media dell'atmosfera all'epoca in cui quei campioni d'aria si congelavano entro i ghiacci, si determina in funzione dei valori del rapporto fra le quantità dei due isotopi dell'ossigeno ¹⁸O e ¹⁶O.

I diagrammi nella **figura 2** rappresentano le variazioni della temperatura dell'atmosfera rispetto a medie contemporanee (curva blu), il tasso di CO₂ in ppm (curva verde) e la quantità di polveri nell'atmosfera (curva rossa). I primi due essenzialmente coincidono con i diagrammi di Milankovitch relativi alla insolazione della superficie terrestre determinata in base alla elaborazione di dati astronomici.

Se ne deduce che le variazioni



Fonte: www.ngdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok_data.html

della temperatura sono determinate da regolarità della posizione e del moto della Terra: sono esse, quindi, a causare le variazioni della percentuale di CO₂ nell'atmosfera e non viceversa. Non è l'aumentato effetto serra che causa il riscaldamento globale, ma è l'innalzamento di temperatura che fa crescere la percentuale di CO₂ - e questa, POI, contribuisce a sua volta all'aumento di temperatura.

C'è un'obiezione che potrebbe essere fatta alla tesi secondo cui le variazioni della temperatura e dell'anidride carbonica atmosferica sono causate in modo predominante da eventi astronomici. Infatti, il grafico precedente mostra, sì, una correlazione di quasi il 100% fra temperatura e CO₂, ma la periodicità non è precisa, come ci attenderemmo da una sequenza di eventi che ha cause astronomiche. Gli intervalli di tempo fra i massimi di temperatura (evidenziati nella **tabella 1, a pagina 21**) a partire dall'epoca attuale sono di 130.000, 110.000, 95.000 e 85.000 anni.

[Incidentalmente il massimo di temperatura attuale non sembra ancora raggiunto - per cui dovremmo attenderci un aumento della temperatura atmosferica unicamente in base alle risultanze in merito al paleoclima].

Se consideriamo, però, gli intervalli fra i minimi di temperatura,

BILANCIO CO₂

Ma, allora, quali sono gli argomenti sui quali si basa il convincimento che sono gli uomini a influenzare la composizione dell'atmosfera e a causare il riscaldamento globale?

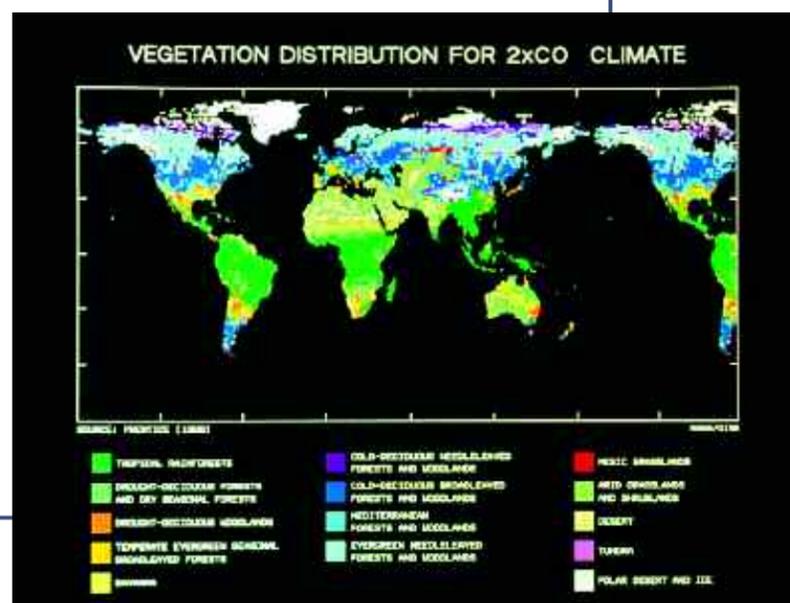
Attualmente, il contenuto di CO₂ dell'atmosfera cresce di 1,6 ppm all'anno, il che corrisponde a 3,3 Gt/anno. È un aumento notevole - e lo analizzo più oltre. Da dove viene questa anidride carbonica? Si valuta che due contributi notevoli e abbastanza facili da misurare siano:

Combustione di gas, carbone, petrolio	5,5 Gt/anno
Deforestazione e attività agricole	1,5 Gt/anno
Totale	7,0 Gt/anno

Aumento CO ₂ atmosferica	3,3 Gt/anno
Differenza assorbita dall'ambiente	3,7 Gt/anno

Dunque, l'aumento annuo della percentuale di CO₂ atmosferica costituisce poco meno del 50% della CO₂ emessa nell'atmosfera per effetto di attività umane. La domanda: "Dove va a finire il resto?" è mal posta. Come in contabilità, non possiamo calcolare questi bilanci per differenza. Infatti, esistono altre fonti e altri assorbitori di CO₂. Occorre considerare tutti i modi in cui l'anidride carbonica è immagazzinata sul nostro pianeta. Testi autorevoli (ad es.: Guido Visconti, *L'atmosfera*, Garzanti, 1989) dicono che il carbonio presente nell'atmosfera come CO₂ pesa 800 miliardi di tonnellate. La biosfera (alberi e piante) ne contiene 2.000 miliardi e i mari 37.000. È ragionevole pensare che comandino i mari - in base a meccanismi ancora non del tutto compresi (vedi Lai, C.C. et al - *Topics in Catalysis*, Kluwer Academic, 2005). Ma L.C. Smith e altri hanno pubblicato sulla rivista *Science* (Vol.303, 16/1/2004) un lavoro sui meccanismi per cui gli enormi depositi di torba nel Nord della Russia funzionano come assorbitori di carbonio e come fonti globali di metano. [Uno solo di questi occupa 600.000 km² (il doppio dell'area dell'Italia) e a seconda della temperatura assorbe o emette enormi quantità di metano e di CO₂]. Esistono notevoli incertezze sulla quantità di carbonio contenuta in questi depositi formati durante l'olocene, cioè negli ultimi 12.000 anni. Le stime variano da 270 a 1050 Gt. L'assorbimento di CO₂ e l'emissione di metano varierebbero in funzione della temperatura: le quantità coinvolte sono così notevoli da superare notevolmente quelle elencate nel bilancio riportato qui sopra. L'effetto delle attività antropiche va, quindi, ridimensionato per più ragioni di una.

Mappa della superficie terrestre che mostra la estensione della vegetazione prevedibile con un raddoppio della CO₂ atmosferica. Si nota la riduzione della tundra nell'emisfero nord, sostituita da foreste sempreverdi, e la espansione delle foreste pluviali tropicali, come risultato delle variazioni climatiche.



Milutin Milankovitch (1879-1958). Geologo serbo, studiò per trent'anni le cause astronomiche delle ere glaciali. Egli calcolò il contributo dato al fenomeno



dalla precessione dell'asse terrestre, dalle variazioni dell'angolo formato dal piano equatoriale con quello dell'orbita terrestre e dalla deviazione dell'orbita dalla forma perfettamente circolare.

vediamo che sono più lunghi e che il periodo di 100.000 anni ricade ogni volta entro la variazione periodica (vedi **Tabella 1** a pag. 21).

Dunque, l'analisi di Fourier dei diagrammi dà un periodo di 100.000 anni e **la ripetizione dei cicli glaciali e interglaciali dipende essenzialmente dal cumulo di circostanze rilevato da Milankovitch.**

La forma d'onda del processo viene deformata da numerosi fattori. L'aumento del tasso di anidride carbonica (dovuto all'aumento della temperatura) causa un aumento dell'effetto serra che amplifica il riscaldamento. Effetto analogo è prodotto dalla diminuzione dell'albedo:

le superfici ghiacciate hanno area minore e riflettono verso lo spazio meno energia solare.

Si ha un forte feedback positivo, il che spiega perché le salite di temperatura alla fine delle glaciazioni sono così rapide.

Entrano in gioco poi altri fattori, fra cui l'attività solare

	primo	secondo	terzo	quarto
Massimi di temperatura (anni fa x 1000)	130	240	335	420
Minimi di temperatura (anni fa x 1000)	20-50	140-170	240-260	340-360

Tabella 1

(variazione delle macchie, etc.) e - a lungo termine - la deriva dei continenti, mentre, a breve termine, si risente spesso dell'offuscamento dell'atmosfera dovuto alle eruzioni dei vulcani. Ad esempio, dopo il 1980 si è avuto un abbassamento della temperatura attribuito all'eruzione del Piñatubo.

LA STORIA RECENTE: DOPO L'ULTIMA GLACIAZIONE E GLI ULTIMI 1000 ANNI

Ci furono glaciazioni importanti 700, 400 e 4 milioni di anni fa, quando l'homo sapiens non esisteva.

Secondo Peter Ward dell'Università di Washington ci fu, invece, un massiccio riscaldamento globale 250 milioni di anni fa, che

condusse nel corso di alcuni milioni di anni all'estinzione del 90% delle specie marine e del 75% di quelle terrestri. Sembra che il tragico fenomeno fu causato da enormi eruzioni vulcaniche in Siberia e, insieme, da eventi geologici che produssero un abbassamento del livello del mare. **I fondali marini esposti avrebbero emesso grandi quantità di metano che è il gas più efficace nel contribuire all'effetto serra. Le condizioni attuali sono molto diverse e quindi quegli eventi ci riguardano poco.**

Rilevante, invece, il fatto che 20 mila anni fa Canada e Nord Europa erano coperti da uno strato di ghiaccio spesso 2.000 metri. Anche a Sud il clima era più rigido. Il grafico di **figura 3**, a pagina 22, mostra gli aumenti della temperatura (di circa 8°K) e dell'anidride carbonica (di circa 100 parti per milione) da allora fino a oggi. Questo è il fenomeno analizzato da Milankovitch. Gli aumenti sono velocissimi. I *neanderthal* e gli *homo sapiens* erano



Un iceberg galleggiante nel lago Jokulsarlon, nell'Islanda meridionale. L'iceberg, staccatosi dal ghiacciaio di Breidamerkurjokull, contiene anche pezzi di roccia raccolti dal ghiacciaio durante il suo lento cammino verso il lago.

già apparsi prima della fine della glaciazione precedente e in quei tempi nelle savane africane i nostri progenitori si evolsero fino a raggiungere la nostra costituzione attuale. Quegli uomini primitivi se la cavavano malgrado le risorse scarse, le conoscenze minime, la tecnologia embrionale.

La **figura 4**, a pagina 22, rappresenta invece le variazioni della temperatura atmosferica secondo sei diverse ricostruzioni fatte da differenti gruppi di scienziati. Tutti confermano il periodo caldo fra l'800 e il 1300 e la mini era glaciale seguente, che si concluse verso la fine del secolo XVII.

La tendenza è confermata dai rilevamenti relativi agli ultimi 150 anni (vedi **figura 5**). Nel

GRADI & CIVILTÀ

Dopo l'ultima glaciazione, se non fosse aumentata la temperatura, non si sarebbe sviluppata poi nessuna delle grandi civiltà umane. Solo quando l'isoterma dei 21°C si spostò a Nord, lungo di essa nacquero le civiltà di Mohenjodaro (fra India e Persia), di Persepoli, Babilonia, Egitto e poi quelle dei Fenici, dei Greci, dei Romani. E lontano si sviluppavano la civiltà cinese e quelle precolombiane amerindie. Con le civiltà crebbero l'agricoltura, le tecniche, le arti, la scienza e tutti i fattori che hanno aumentato la potenza e le risorse umane. Da allora la vita degli uomini ha lasciato tracce. Ha prodotto eventi interessanti, ricordati dopo millenni, e oggetti imponenti ancora visibili. Insieme si sono prodotti tragedie, guerre, genocidi, distruzioni. Malgrado questo, le cose non vanno tanto male. Stiamo molto meglio di quanto toccasse ai nostri avi cacciatori e raccoglitori. Alcune vicende tragiche per certe popolazioni ebbero cause prime climatiche. La scomparsa di grandi regni Maya fu dovuta forse a un lungo periodo di siccità dall'VIII al XIV secolo. Secondo alcuni, rivolgimenti climatici dovuti alla scarsità di macchie solari abbassarono la temperatura nell'Atlantico settentrionale producendo la mini era glaciale (dal XV al XVII): la Groenlandia fu abbandonata, l'Islanda aveva un solo porto libero da ghiacci e gli abitanti stavano per tornare in Danimarca. Poi la temperatura cominciò a salire di nuovo verso il 1700 - e non si bruciavano ancora combustibili fossili - chiaro indizio che l'effetto delle attività industriali viene sopravvalutato.

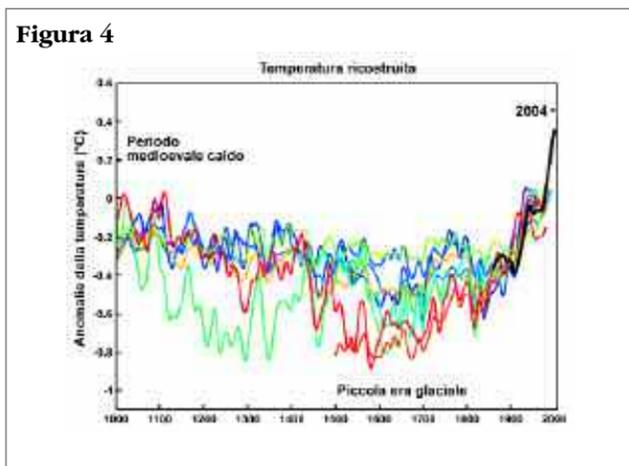
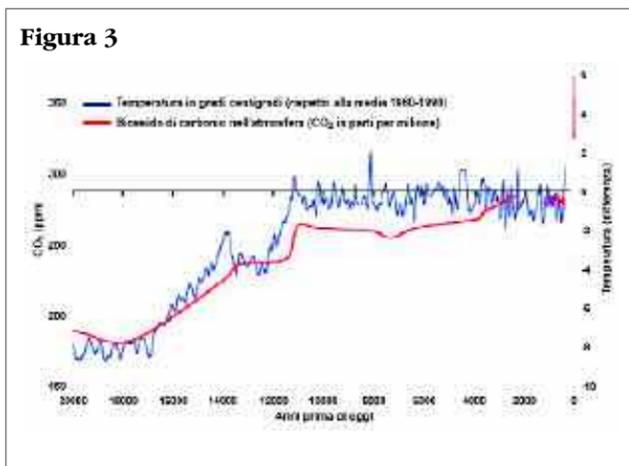
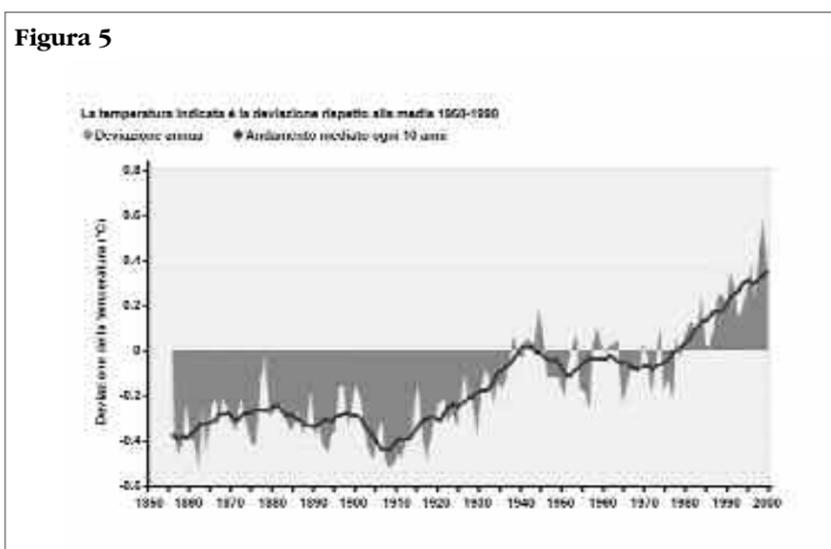


diagramma si notano il raffreddamento - o la stasi - dopo il 1900 e si riconosce anche la modesta diminuzione di temperatura dopo la già citata eruzione del Piñatubo nel 1980.



UNA MIA PREVISIONE MATEMATICA: EMPIRICA, MA ACCURATA

Negli ultimi 4 decenni la concentrazione di CO₂ atmosferica, misurata a MaunaLoa da C.D.Keeling e T.P. Whorf dello Scripps Institute of Oceanography dell'Università della California, è aumentata di continuo.

Questa circostanza è nota a tutti. Meno noto, invece, è il fatto che nel 1976 si verificò una netta discontinuità in questo processo. L'aumento annuo medio della percentuale di CO₂ nell'atmosfera, fra il 1959 e il 1976, fu di 0,95 ppm/anno. Invece fra il 1976 e il 2003 l'aumento è stato in media di 1,608 ppm/anno. **Questa ac-**

celerazione del processo di incremento della CO₂ è stato interpretato da taluno come un indizio che il processo si aggrava e che, quindi, arriveremo presto al temuto raddoppio dell'anidride carbonica atmosferica. Questa, però, è una previsione ingenua che si basa su procedure di extrapolazione semplicistiche. Io ho calcolato quali siano le equazioni che meglio descrivono l'andamento delle serie storiche 1958-1976 e 1976-2003. Ho utilizzato equazioni logistiche di Volterra a 3 variabili del tipo: $x = A/[1 + e^{B(1-x)}]$ Queste equazioni descrivono accuratamente processi di crescita di certe variabili (popola-

zioni biologiche, epidemie, prodotti industriali) che si espandono tendendo a riempire una nicchia ecologica. L'andamento tipico ha forma ad S: crescita iniziale lenta, poi tanto veloce da sembrare esponenziale. Infine, entrano in azione fattori limitanti: la crescita rallenta e tende a un asintoto costante. La **tabella 2** riporta i dati rilevati a MaunaLoa. Le caratteristiche delle due equazioni sono riportate nella **tabella 3**. L'errore standard è la radice quadrata della somma dei quadrati delle differenze fra valori calcolati e valori misurati, divisa per la media dei valori. La costante di tempo è il tempo per passare dal

ANNO	MEDIA ANNUALE ppm	DIFFERENZA ANNO PRECEDENTE
1958	315	-
1959	316	1
1960	316.91	0.91
1961	317.63	0.72
1962	318.47	0.84
1963	319.02	0.55
1964	319.52	0.5
1965	320.09	0.57
1966	321.34	1.25
1967	322.12	0.78
1968	323.11	0.99
1969	324.6	1.49
1970	325.65	1.05
1971	326.32	0.67
1972	327.51	1.19
1973	329.61	2.1*
1974	330.29	0.68
1975	331.16	0.87
1976	332.18	1.02
1977	333.88	1.7
1978	335.52	1.64
1979	336.89	1.37
1980	338.67	1.78
1981	339.95	1.28
1982	341.09	1.14
1983	342.75	1.66
1984	344.44	1.69
1985	345.86	1.42
1986	347.14	1.28
1987	348.99	1.85
1988	351.31	2.45*
1989	352.94	1.5
1990	354.19	1.25
1991	355.62	1.43
1992	356.36	0.74
1993	357.1	0.74
1994	358.86	1.76
1995	360.9	2.04*
1996	362.58	1.68
1997	363.84	1.26
1998	366.58	2.74
1999	368.3	1.72
2000	369.47	1.17
2001	371.03	1.55
2002	373.07	2.04*
2003	375.61	2.54*

Tabella 2

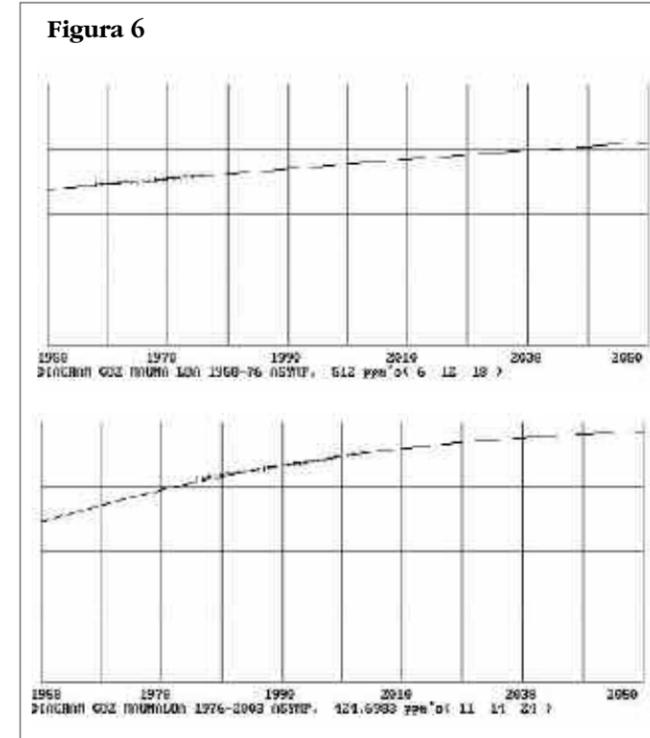
10% al 90% del valore dell'asintoto. Questa analisi indica che, a partire dal 1976, la concentrazione atmosferica della CO₂ aumenta più velocemente che negli anni precedenti, ma tende a un asintoto più basso, di 424 ppm, che dovrebbe essere raggiunto nei primi decenni del XXII secolo

Serie storica	Asintoto	Errore standard	Costante di tempo	B	C
1959-1976	512 ppm	5.12 E-04	513 anni	0.856	-0.897
1976-2003	424 ppm	1.04 E-03	153 anni	2.865	-3.829

Tabella 3

(vedi **figura 6**). I due valori dell'errore standard riportati in tabella sono estremamente bassi, il che indica che questa analisi è molto plausibile. Se le rilevazioni future effettuate a MaunaLoa confermeranno che la tendenza attuale del fenomeno mira a un valore della concentrazione di 424 ppm (solo il 13% maggiore del livello del 2003), avremo un altro elemento che ci induce a ridurre (o ad annullare) il timore che l'aumento della temperatura atmosferica dipenda dalla concentrazione crescente della CO₂ atmosferica. Nella terza colonna della **tabella 2** precedente è riportata la differenza fra il valore di ogni anno e quello dell'anno prima. Tale differenza supera i 2 ppm negli anni: 1973, 1988, 1995, 1998, 2002 e 2003. Appare dunque improbabile che esista una correlazione fra l'aumento della concentrazione

di CO₂ e il fenomeno ENSO (El Niño Southern Oscillation = Oscillazione Meridionale El Niño) dato che El Niño (il noto riscaldamento della superficie marina nel Pacifico meridionale) si verificò intensamente negli anni 1973, 1983, 1993 e 1998: solo in 2 anni (ma non in altri 4) coincisero l'ENSO e un aumento maggiore di 2 ppm.



RIMEDI

Non è ragionevole pensare, dunque, che gli uomini stiano causando danni ecologici gravi e irreversibili per il fatto che bruciano combustibili fossili. Non stiamo producendo, noi, un riscaldamento globale su scala planetaria.

Ancora meno ragionevole sembra una teoria che taluno ha avanzato recentemente. Secondo questa, già migliaia di anni fa i primi agricoltori hanno iniziato la tendenza al riscaldamento globale perché distruggevano le foreste, bruciavano vegetali, allagavano campi per piantare il riso, allevavano animali. In quei tempi



Una stazione automatica di monitoraggio del tempo atmosferico. I dati possono essere scaricati su un computer portatile ad intervalli regolari. La stazione comprende strumenti per registrare la direzione e la velocità del vento, la temperatura, l'umidità, e la quantità di radiazione solare.

remoti, infatti, la popolazione umana del globo era tanto piccola che non ha senso pensare a suoi impatti globali sul clima. In ogni caso, quando le idee erano meno chiare di oggi, alcuni studiosi hanno pensato a rimedi per il caso che effettivamente l'aumento della CO₂ atmosferica potesse rappresentare un rischio grave.

● Il fisico Freeman Dyson propose di piantare mille miliardi di sicomori. Se supponiamo che a regime ogni albero immagazzini 500 kg di carbonio, la quantità totale sarebbe di 500 Gt (miliardi di tonnellate) cioè circa il 60% della quantità esistente nell'atmosfera nel 2004 sotto forma di CO₂.

● Il fisico Cesare Marchetti suggerì nel 1988 [*How to Solve the CO₂ Problem Without Tears - Come risolvere il problema del CO₂ senza lacrime*, 7^a Conferenza sull'idrogeno, Mosca, 1988] di cen-

tralizzare la produzione di CO₂ usando energia nucleare nelle steppe per riformare il gas naturale, estraendone l'idrogeno da usare come vettore energetico. La CO₂ prodotta potrebbe essere liquefatta e immessa nelle profondità degli oceani oppure in pozzi di petrolio esauriti. Quest'ultima soluzione permetterebbe di far emergere residui di petrolio restanti. La CO₂ conservata sotto terra potrebbe essere di nuovo immessa nell'atmosfera per far crescere l'effetto serra e innalzare la temperatura, se dovesse profilarsi una nuova era glaciale.

● Una misura efficace da prendere in ogni caso consiste nello sviluppare energie alternative che evitino di bruciare i combustibili fossili. Fra queste, il fotovoltaico solare ad alto rendimento: teoricamente si potrebbe salire dal 15% attuale all'85%. **Anche se bruciare petrolio e metano non è davvero rischioso ai fini dell'impatto sul clima, queste sostanze sono alla base dell'industria petrolchimica e della plastica con utilità ben maggiore di quella ottenuta bruciandole.**

LE INCERTEZZE

In conclusione, esistono molti fenomeni, situazioni e circostanze che influiscono sul clima.

Sono: regolarità ed eventi astronomici, fenomeni biologici (furono i cianobatteri, miliardi di anni fa, a scomporre le molecole d'acqua assorbendo l'idrogeno e rilasciando ossigeno che formò l'atmosfera originaria), effetti dell'impatto di meteoriti e di eruzioni vulcaniche. Gli esperti hanno capito parecchie

cose, ma non tutte. Quindi non siamo in grado di fare previsioni a lungo termine sul clima.

Ho chiesto il parere del Prof. Guido Visconti, professore di fisica terrestre all'Università dell'Aquila e noto esperto internazionale. Ha risposto:

«Al momento attuale i problemi principali ancora da chiarire riguardano:

- 1. qual è l'esatto meccanismo causale delle glaciazioni;*
- 2. che cosa provoca la variazione in fase di CO₂, temperature, metano, etc.*

Su (1) sembrerebbe che Milankovich avesse ragione eccetto per il fatto che il periodo dominante di 100.000 anni corrisponde effettivamente alle variazioni di eccentricità dell'orbita terrestre. L'entità di tali variazioni, però, ci appare troppo piccola.

Anche gli altri fattori con periodo di 40.000 anni (inclinazione dell'asse terrestre) e 22.000 anni (precessione degli equinozi) sono piccoli e quindi è necessario in ogni caso un meccanismo di amplificazione che al momento non è completamente definito.

Su (2) in passato si pensava a una pompa biologica (se il livello dell'oceano si abbassa, aumenta la fertilità da erosione e quindi aumenta l'attività biologica che succhia CO₂).

In effetti oggi si pensa più ad una fertilizzazione dal cielo, perché una terra glaciale ha molta più polvere in atmosfera.»

VEDIAMO IL SOLE PIÙ FIOCO-O NO?

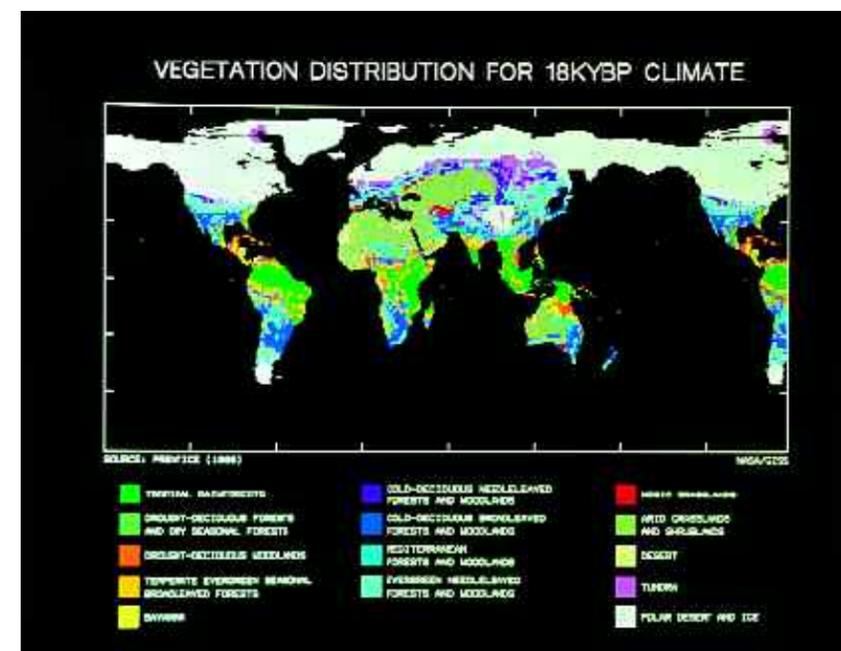
Atsumu Ohmura è un geografo e lavora al Politecnico Federale Svizzero.

Nel 1985 analizzava le serie storiche della radiazione solare registrata sulla superficie terrestre negli ultimi 30 anni e rimase basito: stava diminuendo di circa lo 0,3% all'anno. In tre decenni era calata del 10%. Esitò quattro anni prima di pubblicare i suoi risultati. Quando lo fece, fu ignorato. Intanto, altri ricercatori sostenevano che la luce solare sulla Terra tendeva a diminuire negli ultimi due decenni del secolo scorso. Stanhill e Shabtai Cohen (del Centro Volcani a Bet Dagan, Israele) ritennero di aver dimostrato che la radiazione solare che raggiunge la Terra è diminuita dal 1958 al 1992 fra lo 0,23 e lo 0,32% all'anno. Questi studiosi furono presi sul serio da Graham Farquhar, biologo australiano dell'Università di Canberra, che studiava la velocità di evaporazione dei mari e sosteneva che fosse diminuita di pari passo con la calante radiazione registrata al suolo. Quando Farquhar ne parlò a un famoso esperto (che non nomina),

E SE VENISSE UN'ERA GLACIALE

Un fattore enorme che influenza il clima è notoriamente l'energia trasportata dalle correnti oceaniche. È migliaia di volte maggiore di tutta quella prodotta dall'uomo. Sappiamo bene che a causa della corrente del Golfo l'Europa Settentrionale ha un clima ben più dolce delle regioni atlantiche di Canada e USA, che alla stessa latitudine sono molto più fredde. L'equilibrio di queste grandi correnti è influenzato dalla deriva dei continenti, fenomeno noto e lentissimo. Una previsione preoccupante è stata pubblicata da Peter Wadhams, professore di fisica degli oceani all'Università di Cambridge e capo del gruppo di studio sulla fisica degli oceani polari. Dopo campagne di rilevazioni in Groenlandia e sotto il Polo Nord (con un sommergibile britannico), lo scienziato riferisce di aver misurato un assottigliamento della calotta polare artica del 45% e una netta diminuzione delle correnti verticali discendenti (fino ai fondali a 3.000 metri di profondità) di acqua fredda e densa proveniente dal Polo. Tali correnti richiamavano in superficie l'acqua calda della Corrente del Golfo in misura molto maggiore dell'attuale. In conseguenza Wadhams considera probabile che entro il 2020 la calotta polare artica sia completamente disciolta. Ritiene che tale evento si verificherà di sicuro entro il 2080. La temperatura delle Isole Britanniche scenderebbe allora di una decina di gradi.

Queste affermazioni suonano un po' avventate, anche se espresse da un noto esperto. Io ritengo che dovremmo essere modesti e stare attenti a non accettare certezze gratuite. Certo, l'immaginazione va coltivata: è alla base del progresso e dell'invenzione scientifica e fornisce i concetti che sono alla base di ogni modello mentale o matematico. Ricordiamo, però, che i modelli matematici, anche se ci impressionano mentre girano velocemente sui computer, devono essere usati con prudenza. Prima di essere validati, non danno certezza alcuna. In questo settore della climatologia a lungo termine finora non abbiamo validazioni. Nessun modello ha previsto accuratamente eventi futuri con decenni di anticipo. Ricordiamo sempre la frase di Galileo Galilei: "Ciò che l'esperienza e i sensi ne dimostrano devesi anteporre a ogni discorso ancorché ne paresse assai fondato."



Mappe del mondo che mostra la distribuzione della vegetazione ipotizzabile per il clima presente sulla Terra 18.000 anni fa. Si nota la forte presenza di ghiaccio a nord, l'esistenza di foreste sempreverdi in Spagna e in Messico, e le grandi distese erbose aride in Europa, Asia ed Africa.

questi rispose: «Sono baggianate, Graham. Se fosse vero, saremmo tutti congelati» Le polemiche divamparono. Un articolo di Farquhar fu accettato nel 2002 dalla ben nota rivista *Science*. La diminuzione della radiazione pare avvenire nella gamma dello spettro visibile e nell'infrarosso - non nell'ultravioletto. **Altri, invece, sostengono che la radiazione solare è aumentata negli ultimi 150 anni.** Come si conciliano queste osservazioni con l'aumento della temperatura atmosferica che è in atto da 3 secoli e che ha dato adito al panico per il riscaldamento globale? Secondo ricercatori citati, la radiazione solare diffusa non danneggia la flora e forse la favorisce. Dunque la temperatura crescerebbe, mentre la luce cala. Le controversie continuano... 