

Spier

Cambiamenti climatici ed eventi meteorologici estremi

di P. Vellinga e W. J. van Verseveld



Cambiamenti climatici ed eventi meteorologici estremi

di P. Vellinga e W. J. van Verseveld

(Istitute for Enviornmental Studies vrije Universiteit Amsterdam)

Titolo originale “Climate Change and Extreme Weather Events”

Publicato nel Settembre del 2000 dal WWF-World Wide Fund For Nature a Gland, Svizzera.

Premessa del WWF

- 1.** Introduzione e sommario
- 2.** Cambiamenti osservati nel clima
 - 2.1.** Temperatura
 - 2.2.** Precipitazioni
 - 2.3.** Innalzamento del livello del mare
 - 2.4.** Nevi e ghiacci
 - 2.5.** Modelli di circolazione
 - Circolazione atmosferica
 - El Niño e l'oscillazione dell'Atlantico settentrionale
 - Oscillazione dell'Atlantico settentrionale
 - 2.6.** Cicloni extratropicali
 - 2.7.** Cambiamenti osservati negli ecosistemi
 - 2.8.** Eventi meteorologici estremi e relativo costo
- 3.** Proiezione di cambiamenti climatici futuri
 - 3.1.** Temperatura
 - 3.2.** Precipitazioni
 - 3.3.** Innalzamento del livello del mare
 - 3.4.** Modelli di circolazione
 - El Niño e l'Oscillazione dell'Atlantico settentrionale
 - 3.5.** Cicloni extratropicali
 - 3.6.** Ecosistemi
 - 3.7.** Aspetto sociale
- 4.** Rischi di destabilizzazione del clima globale
 - 4.1.** La grande corrente oceanica (la Corrente del Golfo)
 - 4.2.** Antartide
 - 4.3.** Ulteriori reazioni al cambiamento climatico con basse probabilità di verificarsi ma di grande impatto

- 5.** Conclusioni

Bibliografia

Ogni riproduzione totale o parziale di questa pubblicazione deve riportarne il titolo e menzionare il suddetto editore come proprietario dei diritti. © Testo 2000 WWF. Tutti i diritti riservati.

Traduzione a cura di Elisabetta Luchetti

Revisione a cura di Andrea Masullo

Premessa del WWF

di Jennifer Morgan*

Poiché il mondo continua a bruciare carbone, petrolio e gas per produrre energia, continuano ad aumentare le emissioni di gas che producono il riscaldamento globale. Il rischio di destabilizzare il sistema climatico terrestre cresce di giorno in giorno. Poche cose sono così importanti per la protezione degli ecosistemi e per il benessere della società quanto l'evitare gli effetti catastrofici del riscaldamento globale. E il tempo non è dalla nostra parte.

I danni provocati dagli eventi meteorologici estremi hanno già imposto alla società un pedaggio che poche economie sono in grado di assorbire con facilità. Nel 1998, le piene del fiume Yangtse in Cina hanno provocato 4.000 morti e perdite economiche pari a 30 milioni di dollari. Nello stesso anno in Florida, alcuni eventi climatici estremi hanno portato siccità e incendi spontanei diffusi che hanno provocato la perdita di 483.000 acri di terreno e la distruzione di 356 infrastrutture, con conseguenti perdite economiche stimate in 276 milioni di dollari. Questo genere di impatto, anche economico, è aumentato in maniera drammatica negli ultimi decenni. La domanda che ci si pone è la seguente: quali calamità può ancora avere in serbo il riscaldamento globale?

Anche se a diversi livelli, esistono già prove evidenti del legame tra cambiamenti climatici ed eventi meteorologici estremi, e le istituzioni governative dovrebbero tenerne ben conto quando considerano i costi del cambiamento climatico. Nuovi livelli delle precipitazioni, cicloni tropicali sempre più distruttivi o fenomeni come El Niño, lo scolorimento repentino dei coralli che non consente loro di avere il tempo di rigenerarsi, il ristagno della corrente oceanica e lo scioglimento della calotta polare nell'Antartico occidentale sono eventi rischiosi. Ognuno di essi dovrebbe essere considerato da un punto di vista politico globale. I governi e le industrie che non riescono a mettere in atto valide misure protettive del clima devono ritenersi responsabili delle conseguenze di questo tipo di catastrofi, ridurre le proprie emissioni o versare dei fondi di indennizzo.

I paesi industrializzati non possono chiudere gli occhi di fronte al riscaldamento globale. Con circa un quarto della popolazione mondiale, sono responsabili dei due terzi delle emissioni mondiali di anidride carbonica dovute alla produzione di energia. Tuttavia, saranno le nazioni in via di sviluppo a subire gli effetti più gravi del riscaldamento globale. Le drammatiche piene in Mozambico che hanno provocato migliaia di senza tetto e il recente scolorimento della barriera corallina intorno alle isole Fiji non sono che esempi di ciò che ci prospetta un mondo più caldo.

* *Direttore della campagna WWF per il clima*

1. Introduzione e sommario

In seguito alla richiesta del WWF, e in qualità di ricercatori dell'Institute for Environmental Studies, abbiamo compiuto una valutazione delle conoscenze scientifiche sul cambiamento climatico e l'impatto che ha sugli aspetti meteorologici e gli eventi estremi in particolare.

Il nostro punto di partenza è rappresentato dal rapporto della Commissione intergovernativa sui cambiamenti climatici del 1995. Da quell'anno si sono rese disponibili molte nuove osservazioni e rapporti. Parte delle informazioni sono anche su Internet. Dove possibile vi abbiamo fatto riferimento, in modo che il lettore possa facilmente verificare ed esaminare le fonti utilizzate.

Il presente studio intende dare una risposta a tre importanti quesiti:

- Fino a che punto è possibile oggi misurare l'influenza dell'uomo sul sistema climatico?
- Cosa possiamo prevedere per il futuro, nel breve e nel lungo periodo?
- Fino a che punto le misure di riduzione delle emissioni di gas che provocano l'effetto serra possono influire sul clima futuro?

Nella conclusione dello studio affermiamo che gli effetti delle emissioni di CO₂ e di altri gas-serra sul clima globale sono sempre più visibili. Tra questi effetti vanno citati: il cambiamento della temperatura, dei livelli delle precipitazioni, l'innalzamento del livello del mare, dei modelli di circolazione atmosferica e degli ecosistemi. In molte aree del nostro pianeta questi cambiamenti sono dimostrati dalla diversa frequenza con cui si verificano gli eventi meteorologici estremi. Concludiamo con ragionevole, anche se non totale certezza, che il cambiamento climatico provocato dall'uomo influenza oggi la presenza geografica, la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi.

2. Cambiamenti osservati nel clima

Il clima e la temperatura media della superficie terrestre dipendono dal bilancio tra l'energia solare in arrivo (onde corte) e l'energia in uscita (radiazioni infrarosse) emessa dalla superficie del pianeta. I gas-serra intrappolano parte delle radiazioni infrarosse emesse dalla Terra e fanno sì che il pianeta risulti più caldo di quanto non sarebbe altrimenti. La temperatura media annuale, pari a circa 15 °C, sarebbe sotto zero senza questo naturale effetto dei gas.

La concentrazione di gas-serra quali anidride carbonica, metano, protossido di azoto e CFC è in aumento sin dall'era preindustriale, soprattutto dagli anni Sessanta. L'anidride carbonica è aumentata da 280 a 360 parti per milione in volume (ppmv), il metano da 700 a 1720 ppmv, e il protossido di azoto da 275 a 310 ppmv. Tutti questi aumenti sono chiaramente provocati dalle attività umane connesse in larga parte al consumo di combustibili fossili, all'utilizzo agricolo della terra e ai processi industriali. Ne consegue che anche il cambiamento climatico è in gran misura il risultato delle attività umane, che contribuiscono ad amplificare il naturale effetto serra.

2.1. Temperatura

Negli ultimi 130 anni la temperatura media della superficie terrestre ha subito un innalzamento medio che oscilla tra i 0,3 e i 0,6 °C, come indicato dall'IPCC, 1995 (vedere figura 1). Analisi più recenti, che includono le rilevazioni delle temperature fino al 1999, indicano che la temperatura media globale è aumentata di 0,6 °C nell'intero periodo delle rilevazioni, ovvero dal 1860 (Wigley, 1999). Una lettura più attenta mostra che il maggior incremento si è verificato negli ultimi decenni, durante i quali la temperatura media globale è aumentata di circa 0,2 °C per decennio.

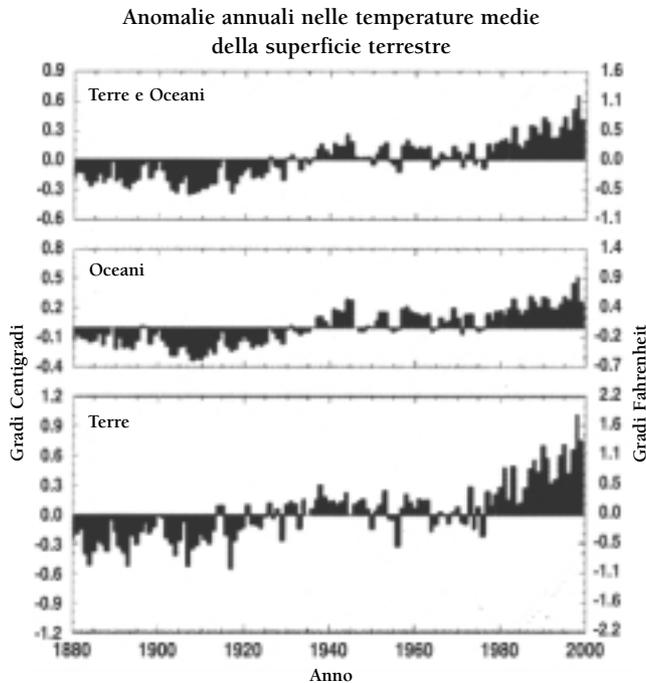


Figura 1. La serie temporale indica le anomalie combinate delle temperature terrestri e oceaniche globali, dal 1880 al 1999 con riferimento al periodo base 1880-1998. L'anomalia più importante si è verificata nel 1998, che è pertanto l'anno più caldo dalla fine del diciannovesimo secolo, periodo che segna l'inizio della diffusione degli strumenti di rilevazione. (Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Centre, Asheville, NC).

Dai dati emerge che il 1998 è stato l'anno più caldo mai rilevato nella storia. I dieci anni più caldi per il mondo - negli ultimi 120 anni - sono tutti successivi al 1981. Tra questi, sei sono successivi al 1990.¹ Sono emerse una serie di anomalie nelle temperature dell'emisfero boreale (Mann et al., 1999). Un lungo periodo con tendenza al raffreddamento (-0,02 °C/al secolo) prima dell'industrializzazione, probabilmente collegato a cause astronomiche, nel ventesimo secolo diventa una tendenza al riscaldamento. È questo infatti il secolo più caldo del millennio. Sebbene vi siano delle incertezze riguardo alle ricostruzioni per l'emisfero settentrionale precedenti al 1400, il riscaldamento dell'ultima parte del ventesimo secolo resta evidente, e l'aumento nelle concentrazioni dei gas-serra è senz'altro la causa più plausibile. Questo insieme di informazioni è la base per concludere che il 1998 è stato l'anno più caldo del millennio.

I ricercatori del Climate Data Center/National Oceanic and Atmospheric Association (NCDC/NOAA) hanno quantificato la variabilità annuale - decennale del contenuto di calore dello strato oceanico del pianeta

fino a una profondità di 3.000 metri, per il periodo 1948 - 1998 (Levitus et al. 1999), come illustrato nella figura 2. Il riscaldamento più elevato si è verificato nei 300 metri superiori, con una media di 0,56 gradi Fahrenheit (0,31°C). Negli ultimi 40 anni i 3.000 metri superiori si sono riscaldati in media di 0,11°F (0,06°C). Sono stati presi in esame i bacini degli oceani Atlantico, Indiano e Pacifico. Il Pacifico e l'Atlantico hanno iniziato a riscaldarsi dal 1950 e l'Oceano Indiano dal 1960. Il riscaldamento osservato dello strato oceanico è probabilmente causato da una combinazione di variabilità naturale e di effetti antropogenici.

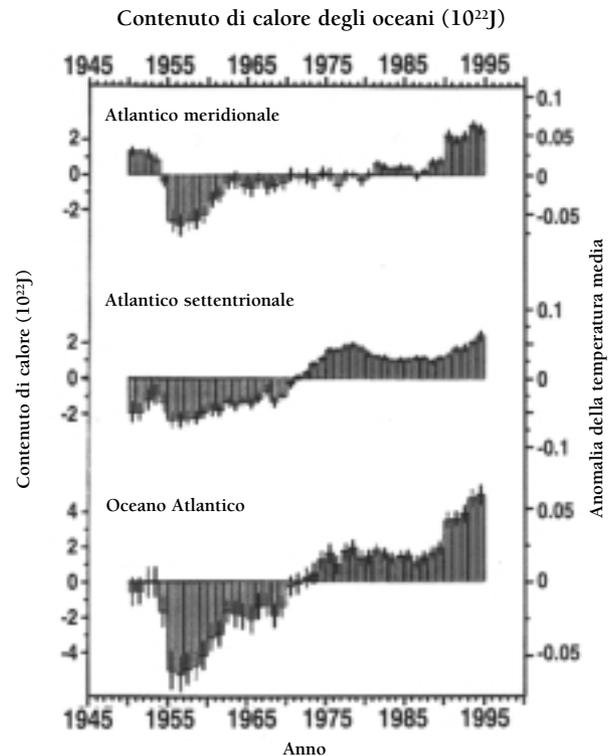


Figura 2. La serie temporale illustra il contenuto di calore dell'oceano nei 3.000 metri superiori dell'Oceano Atlantico, nelle regioni meridionale e settentrionale negli ultimi 40 anni. (Copyright: AAAS/Science magazine). (<http://www.noanews.noaa.gov/stories/s399.htm>).

I ricercatori hanno anche rilevato che il riscaldamento delle temperature delle acque sotterranee oceaniche precede il riscaldamento delle temperature degli strati superficiali aerei e terrestri, che è iniziato nel 1970.²

Poiché il clima varia naturalmente nel corso dei decenni e dei secoli, la diretta attribuzione di questi cambiamenti di temperatura alle attività umane è complicata. Tuttavia, l'osservazione sistematica mostra che il riscaldamento globale e i modelli spaziali di questo riscaldamento vanno oltre le previsioni e le stime relative alla variabilità naturale. Simon Tett e i suoi colleghi dell'Hadley Centre for Climate Prediction and Research insieme al Rutherford Appleton Laboratory hanno simulato i modelli di cambiamento della temperatura nello spazio e nel tempo provocati da cause naturali (irradiazione solare e aerosol vulcanico stratosferico) e da influenze antropogeniche (gas-serra e aerosol solfato) con un modello di circolazione generale che prende in esame la coppia atmosfera-oceano. Le simulazioni sono quindi state confrontate con i cambiamenti osservati.

I risultati di questo studio indicano che una combinazione di cause naturali, in particolare un aumento nell'energia solare, può aver contribuito ai cambiamenti climatici nella prima parte del secolo, ma l'aumento della temperatura globale durante gli ultimi 50 anni deve essere almeno in parte attribuito a componenti antropogenici (Tett et al. 1999). I dati sono stati confermati da analisi statistiche condotte da Tol e Vellinga (1998). Indipendentemente dal modo in cui l'influenza del Sole viene inclusa nei modelli statistici, l'accumulazione di anidride carbonica e di altri gas-serra nell'atmosfera ha un effetto significativo sulla temperatura. Tol e Vellinga rilevano inoltre che la sensibilità climatica stimata è influenzata in maniera sostanziale solo se i dati osservati relativi alla lunghezza del ciclo solare vengono manipolati oltre le modalità fisiche plausibili.

I diversi contributi responsabili dell'innalzamento della temperatura media globale sono stati elaborati da Wigley in *The Science of Climate Change* (1999). I risultati di questo studio confermano il lavoro di modellazione dell'Hadley Centre e il lavoro statistico di Tol e Vellinga (vedere figura 3). Come indicano le figure 1 e 3, la temperatura media globale è in rapida crescita dalla fine degli anni Ottanta.

Il cambiamento globale della temperatura non è equamente distribuito. Il riscaldamento più esteso e recente è tra i 40°N and 70°N. In poche aree, ad esempio nell'Atlantico settentrionale al di sopra dei 30°N, negli ultimi decenni la temperatura è invece diminuita (Houghton et al., 1996). In generale, le aree terrestri si riscaldano più velocemente rispetto agli oceani, e ciò è spiegabile con la maggiore capacità termica delle acque. Di conseguenza, aumenta la differenza di temperatura tra oceano e terra e in tutta probabilità ciò ha influenza sulle circolazioni atmosferiche.

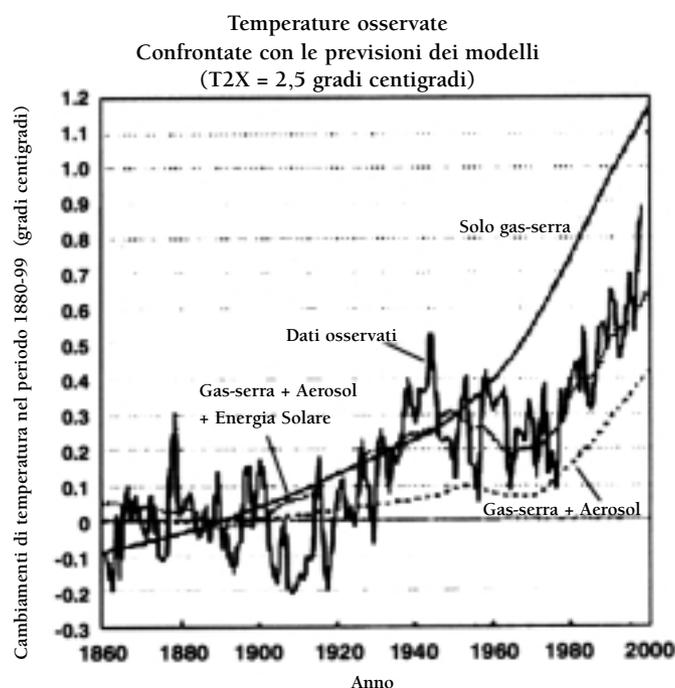


Figura 3. Se si considerano gli effetti delle emissioni di gas-serra, aerosol ed energia solare (linea tratteggiata), il modello previsto di riscaldamento è in perfetto accordo con il riscaldamento osservato (linea nera sottile). (Wigley 1999). (Copyright PEW Center on Global Climate Change).

2.2. Precipitazioni

Un aumento della temperatura globale media può portare a maggiori evaporazione e precipitazioni. Tuttavia, a causa dei complessi processi di evaporazione, trasporto e precipitazione e anche della limitata qualità dei dati, dei brevi periodi di misurazione e delle lacune nelle serie temporali è difficile prevedere e misurare i cambiamenti precisi nel ciclo idrogeologico. A dispetto di queste limitazioni, negli ultimi decenni è stato comunque possibile rilevare dei cambiamenti specifici nella quantità e nella distribuzione dei modelli delle precipitazioni.

In generale, è stato osservato un aumento medio delle precipitazioni nelle zone comprese tra i 30°N e i 70°N. Il dato è valido anche per l'area compresa tra 0° e 70° di latitudine sud. Nell'area compresa tra 0° e 30° di latitudine nord si è verificata una generale diminuzione delle precipitazioni medie (Houghton et al., 1996).

Oltre a questi cambiamenti globali, sono stati rilevati anche alcuni cambiamenti regionali nella media delle precipitazioni. Nel Nord America sono aumentate le precipitazioni annuali (Karl et al. 1993b; Groisman e Easterling, 1994). Nelle regioni settentrionali del Canada e dell'Alaska si è registrata una tendenza all'aumento delle precipitazioni negli ultimi 40 anni (Groisman e Easterling, 1994). I dati rilevati nelle regioni meridionali del Canada e in quelle settentrionali degli Stati Uniti mostrano un aumento che va dal 10 al 15 per cento (Findlay et al., 1994; Lettenmaier et al., 1994). In generale, è stato riscontrato un aumento delle precipitazioni nell'Europa settentrionale e una diminuzione nell'Europa meridionale. La quantità di piogge nel Sahel, Africa Occidentale, nell'arco di tempo che va dal 1960 al 1993, è stata minore a quella del periodo precedente agli anni Sessanta (Houghton et al., 1996).

Diverse analisi sull'osservazione delle precipitazioni indicano negli ultimi decenni un aumento dell'intensità dei temporali. Negli Stati Uniti ad esempio, il 10 per cento delle precipitazioni annuali avviene durante i forti nubifragi (almeno 50 mm al giorno). All'inizio del secolo la percentuale era inferiore all'8 per cento (Karl et al., 1997). Secondo Groisman et al. (1999), questi temporali violenti rappresentano il 10 per cento delle precipitazioni totali medie quando non ci sono cambiamenti nella frequenza delle precipitazioni. Risultano modificati i valori delle precipitazioni totali medie, e nelle aree in cui le precipitazioni sono aumentate è maggiore il numero di precipitazioni a carattere violento. L'analisi dei modelli delle precipitazioni negli USA (Karl and Knight, 1998), nell'ex Unione Sovietica, nel Sud Africa, in Cina (Groisman et al., 1999) e in India (Lal et al., 1999) mostra infatti un aumento significativo dei forti nubifragi.

2.3. Innalzamento del livello del mare

Negli ultimi 100 anni, il livello del mare si è sollevato in tutto il mondo di circa 10-12 centimetri. È possibile considerare questo innalzamento come il periodo conclusivo di un innalzamento continuo che perdura dall'ultima glaciazione, ma il livello delle acque è cresciuto in maniera più evidente negli ultimi 50 anni (vedere figura 4). Il monitoraggio del livello del mare è complicato, perché nelle misurazioni vanno sempre inclusi i movimenti verticali della massa terrestre. Dal 1990 tutta-

via sono stati elaborati metodi sempre più precisi per compensare nelle misurazioni i movimenti della massa terrestre. Ad oggi è possibile affermare in maniera attendibile che il volume delle acque oceaniche è aumentato.

È probabile che il recente aumento del livello di innalzamento delle acque sia connesso all'aumento osservato della temperatura globale del pianeta e della temperatura superficiale delle acque oceaniche. Il volume dello strato superficiale delle acque oceaniche aumenta con il riscaldamento di 0,1°C dello strato superficiale degli oceani, e corrisponde ad un livello delle acque marine più alto di circa un centimetro. Pertanto, l'aumento rilevato di 0,6 °C della temperatura superficiale delle acque marine corrisponde ad un aumento di 6 centimetri del livello delle acque. Lo scioglimento e il ritiro osservato nei ghiacciai e nelle calotte polari indica un ulteriore innalzamento compreso tra i 2 e i 5 centimetri.

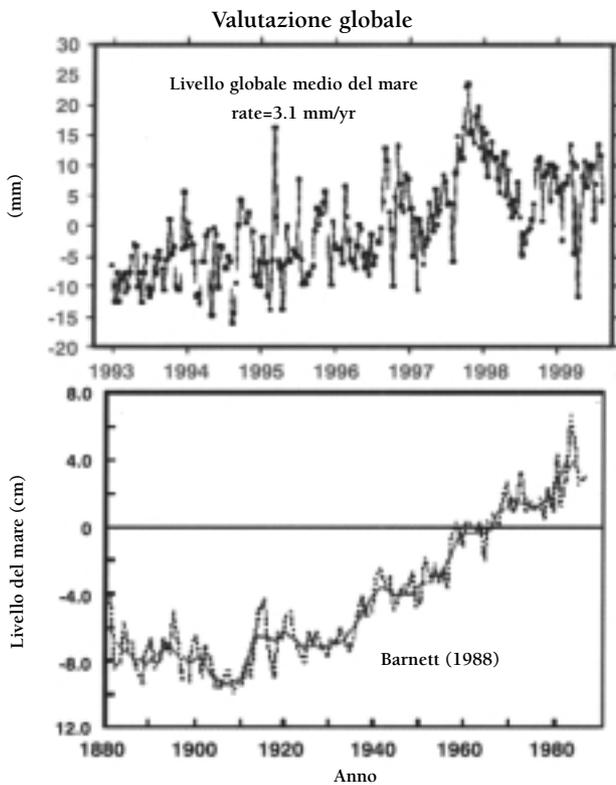


Figura 4. Innalzamento del livello delle acque del mare nell'ultimo secolo (sotto) e variabilità temporale dell'innalzamento delle acque marine elaborato da TOPEX/POSEIDON (in alto). (Copyright Center for Space Research) (<http://www.csr.utexas.edu/gmsl/tptemporal.html>)

2.4. Nevi e ghiacci

In tutto il mondo i ghiacciai si stanno sciogliendo. Nell'ultimo secolo quelli sul Monte Kenya hanno perso il 92% della loro massa e quelli sul Kilimanjaro il 73 %. Il numero di ghiacciai presenti in Spagna è passato da 27 a 13 dal 1980. I ghiacciai dell'Europa alpina hanno perso circa il 50 % del loro volume nell'ultimo secolo. Quelli in Nuova Zelanda hanno subito una diminuzione del volume pari al 26 % dal 1980. Negli ultimi 100 anni il Caucaso ha perso circa il 50 % dei suoi ghiacciai.

La strumentazione laser indica che l'Alaska presenta la maggior parte

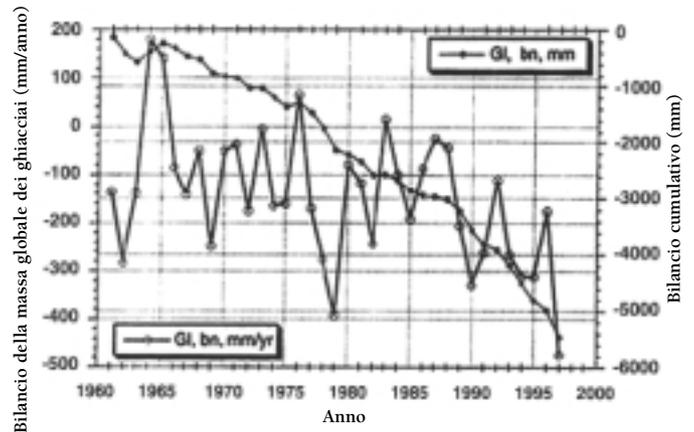
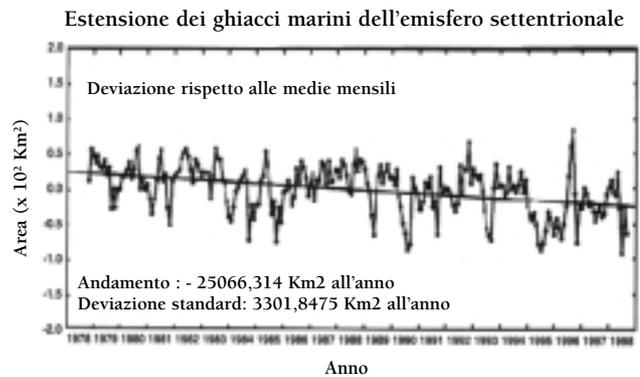


Figura 5. La figura illustra i dati relativi al bilancio della massa globale media per ogni anno dal 1961 al 1997, e l'insieme dei cambiamenti cumulativi (- sei metri) nel bilancio della massa, in riferimento a questo periodo. (Copyright: National Snow and Ice Data Center, Università del Colorado, Boulder, USA).

dei ghiacciai. Teoricamente, un'atmosfera più calda in inverno può provocare un maggiore trattenimento di umidità, che può a sua volta provocare un aumento nelle precipitazioni nevose (vedere anche la sezione 2.2, "Precipitazioni"). La neve non si scioglie immediatamente, pertanto lo strato di ghiaccio può aumentare di volume. Tuttavia, questo aumento invernale di volume non riesce a tenere il ritmo con lo scioglimento causato da estati più lunghe e più calde. I ghiacciai sono diminuiti in volume e in estensione durante gli ultimi 100 anni, soprattutto nelle aree delle latitudini medie e basse.



Variazioni nell'estensione dei ghiacci marini determinate dalle microonde passive. Medie mensili per l'Emisfero settentrionale, 1978 - 1998

Figura 6. Una serie temporale di estensioni dei ghiacci antartici dal 1978 in poi. (Copyright: National Snow and Ice Data Center, Università del Colorado, Boulder, USA).

Vinnikov et al. mostrano che l'estensione dei ghiacci marini nell'emisfero settentrionale è diminuita negli ultimi 46 anni. Il modello del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) e quello dell'Hadley Centre, entrambi forzati con gas-serra e aerosol di solfato troposferico, simulano in maniera realistica la tendenza osservata nell'estensione dei ghiacci marini. Di conseguenza, la diminuzione può essere interpretata come la combinazione dell'effetto serra e della variabilità naturale. La probabilità che l'ampiezza della tendenza osservata nel periodo 1953-98 (-190.000 Km² ogni 10 anni) rispetto all'estensione dei ghiacci marini sia causata solo dalla variabilità naturale è inferiore

allo 0,1 %, secondo i dati di verifica sul lungo periodo eseguita sul modello del GFDL. Relativamente alla tendenza osservata nel periodo 1978-98 (-370.000 Km² ogni 10 anni) la probabilità è inferiore al 2%. Altre ricerche hanno rilevato anche una diminuzione nell'estensione della copertura dei ghiacciai esistenti nelle regioni dell'emisfero settentrionale nel periodo 1978-1995 (Johannessen et al., 1996), nell'Oceano Artico orientale e nei mari di Kara e Barents nel periodo 1979-1986 (Parkinson, 1992), e nei mari della Siberia orientale e di Laptev nel periodo 1979-1995 (Maslanik et al., 1996). Parkinson et al. (1999) hanno utilizzato i dati rilevati da satellite con strumentazione passiva a microonde dal novembre 1978 al dicembre 1996, e hanno rivelato una tendenza globale alla diminuzione (-34.300 ± 3700 Km² per anno) dell'estensione dei ghiacci del mare Artico. Di recente gli scienziati del Goddard Space Flight Center hanno messo insieme i dati provenienti dai satelliti Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SSMR) e Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), lanciati dalla NASA rispettivamente nel 1978 e 1987 (vedere figure 6 e 7).³ Le tendenze stimate con questi dati suggeriscono una diminuzione netta dell'estensione dei ghiacci Artici pari a circa il 2,9 per cento per decennio (Cavaliere et al., 1997).

Rothrock et al., studiando le rilevazioni sui ghiacci marini effettuate in crociere sottomarine nei periodi dal 1993 al 1997 e dal 1958 al 1976, indicano che lo spessore della superficie di ghiaccio è diminuito di circa 1,3 metri. La diminuzione è maggiore nell'Artico centrale ed orientale che nei mari di Beaufort e Chukchi.

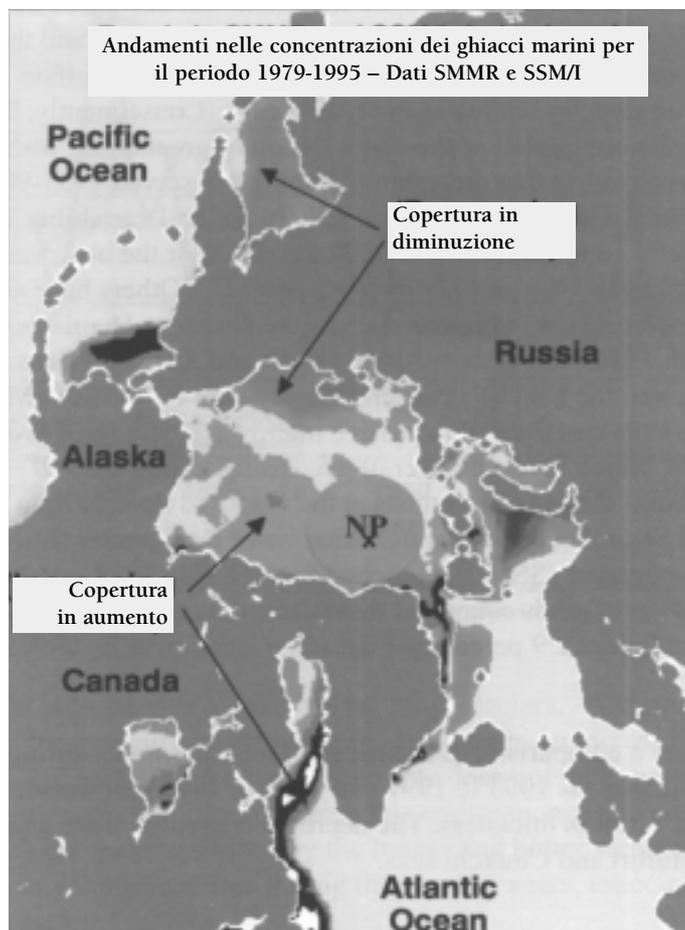


Figure 7. Andamenti relativi ai ghiacci del mare Artico nel periodo 1979-1995. (Copyright: National Snow and Ice Data Center, Università del Colorado, Boulder, US).

Le recenti tendenze e le variazioni negli strati di ghiaccio e nel loro spessore risultano coerenti con i cambiamenti rilevati nelle temperature dell'aria a latitudini elevate, nei venti e nelle condizioni oceaniche.

2.5. Modelli di circolazione

Circolazione atmosferica

Le superfici terrestri assorbono meno calore di quelle oceaniche. Ecco perché le temperature superficiali sulla terra reagiscono più velocemente ad un aumento della forza radiativa rispetto alle superfici oceaniche. In un modo o nell'altro, questa differenza di temperatura influenza i modelli di circolazione atmosferica, la velocità della distribuzione e della frequenza dei venti, la forza e le traiettorie dei campi di alta e bassa pressione.

Un aumento nel numero di aree di bassa pressione è stato rilevato in parte degli Stati Uniti, nella costa orientale dell'Australia e nell'Atlantico settentrionale (Houghton et al., 1996).

Un altro fenomeno che almeno in parte è collegato ad un cambiamento nei modelli di circolazione è la relativa siccità nel Nord Africa negli ultimi decenni. L'aridità del Sahel è aumentata notevolmente negli ultimi 25 anni. Da quando vengono effettuate rilevazioni strumentali questo periodo di essiccazione rappresenta il cambiamento più evidente e sostenuto rispetto agli schemi di caduta delle piogge. Probabilmente il fatto è collegato alle modifiche nelle temperature superficiali delle acque marine dell'Oceano Atlantico. Temperature più basse a sud dell'Equatore e più alte a nord sono legate a una minore quantità di precipitazioni nel Sahel. Il cambiamento di temperatura delle acque oceaniche porta con tutta probabilità ad un cambiamento nella circolazione atmosferica, che a sua volta influenza la quantità di pioggia che cade nel Sahel (Hulme and Kelly).⁴

Di recente sono stati osservati cambiamenti nelle temperature anche nella parte superiore dell'atmosfera. Le osservazioni, secondo Gary Thomas dell'Università del Colorado Boulder, indicano un raffreddamento della mesosfera, l'area compresa tra i 50 e i 90 chilometri d'altezza, con dei valori senza precedenti, pari a quasi 1 °C all'anno nei 30 anni passati. Secondo Hans-Friederich Graf, scienziato senior del Max Planck Institute for Meteorology di Amburgo. Il clima della stratosfera (lo strato tra 15 e 50 chilometri al di sopra della superficie terrestre) è cambiato nei decenni passati, specialmente sopra l'Artico. Qualitativamente questi dati sono in linea con la teoria dei gas-serra, che riscaldano la troposfera; il calore prodotto a livelli inferiori non riesce a diffondersi verso l'alto e l'atmosfera superiore si raffredda. Il processo è conosciuto come raffreddamento radiativo.

Oltre al raffreddamento radiativo anche altri processi hanno un ruolo caratteristico. Shindell et al. (1999) suggeriscono che l'aumento di temperatura tra i tropici e i poli può essere responsabile per l'ulteriore raffreddamento della stratosfera. Il gradiente di temperatura che aumenta dai tropici ai poli intensifica la forza e la velocità di un potente vento invernale, "the polar night jet". A sua volta questo vento può ricevere isolati banchi di aria fredda artica. I cambiamenti nella circolazione atmosferica causati dall'effetto serra possono aumentare il raffreddamento radiativo. Una spiegazione complementare dal rapido raffreddamento della mesosfera è data da Gary Thomas dell'Università del

Colorado. Suggestisce che l'evento sia da attribuire ad un fenomeno ad onde su scala planetaria.⁵

La conclusione che possiamo trarre è che i cambiamenti rilevanti nella temperatura e nella circolazione sono probabilmente legati all'aumentato effetto serra. Comunque, molti di questi processi sono compresi solo in parte e l'insieme di dati è troppo limitato per poter trarre delle conclusioni definitive.

El Niño e l'Oscillazione dell'Atlantico settentrionale

Come risultato di un maggiore investimento nella ricerca sui cambiamenti climatici e sull'analisi della circolazione negli oceani e nell'atmosfera, è aumentata anche la comprensione della variabilità climatica naturale su scala temporale relativamente alle stagioni, agli anni e ai decenni. Ciò vale soprattutto per l'Oscillazione meridionale di El Niño (El Niño Southern Oscillation, ENSO) e per il fenomeno dell'Oscillazione dell'Atlantico settentrionale, che può oggi essere simulato da modelli di circolazione generali accoppiati atmosfera-oceano.

Durante gli anni in cui El Niño non è attivo, gli alisei che si spostano da est a ovest sul Pacifico spingono con sé le acque riscaldate dal sole tropicale. L'acqua di superficie diventa progressivamente più calda a causa della lunga esposizione al riscaldamento solare. Di tanto in tanto gli alisei si indeboliscono e le acque riscaldate fluiscono di nuovo verso est, passando dal Pacifico al Sud America. Questo fenomeno è chiamato El Niño. Si tratta quindi di un evento climatico naturale, che ha luogo in media una volta ogni sette anni. In associazione ad esso si verificano nel mondo simultaneamente siccità e piene.

Il verificarsi di El Niño ha profonde implicazioni per l'agricoltura, le foreste (incendi), le precipitazioni, le risorse idriche, la salute dell'uomo e la società in generale (Trenberth, 1996). Barsugli et al. (1999), ad esempio, attribuiscono a El Niño del 1997/1998 alcuni eventi climatici su larga scala come le tempeste di neve del gennaio del 1998 avvenute negli Stati Uniti nordorientali e nel Canada sudorientale, e le piogge del febbraio 1998 nella California centrale e meridionale. Ci sono anche alcune prove che ad una fenomenologia più forte di El Niño seguono in Europa piogge più copiose durante la successiva primavera (KNMI, 1999).

El Niño si è verificato molto più spesso dal 1975, e le misurazioni che riguardano gli ultimi 120 anni indicano che la durata del fenomeno nel periodo 1990-95 è stata la più lunga mai registrata.

Knutson e Manabe (1998) del Geophysical Fluid Dynamics Lab di Princeton, giungono alla conclusione che il riscaldamento osservato nel Pacifico tropico-orientale negli ultimi decenni non è solo il risultato della variabilità climatica naturale. È più probabile che un'energia termica sostenuta, come quella causata dall'aumento dei gas-serra nell'atmosfera sia stata almeno in parte responsabile del riscaldamento osservato in una vasta regione triangolare dell'Oceano Pacifico associata a El Niño.

Ciò a sua volta suggerisce che i cambiamenti climatici indotti dall'uomo possono essere considerati almeno in parte responsabili del carattere estremo degli effetti provocati da El Niño negli ultimi anni, in varie parti del mondo.

Oscillazione dell'Atlantico settentrionale

Lo schema dominante di variabilità della circolazione atmosferica in inverno sul Nord Atlantico è conosciuto come Oscillazione dell'Atlantico settentrionale (NAO, North Atlantic Oscillation). L'oscillazione è provocata dalla differenza tra l'area di bassa pressione dell'Islanda e quella di alta pressione vicino alle Azzorre. I valori positivi degli indici NAO indicano una corrente occidentale più sostenuta del normale alle medie latitudini, legata ad anomalie di pressione nelle regioni suddette. Questa fase positiva è associata ad inverni più miti in Europa occidentale e inverni più freddi nell'Atlantico nordoccidentale. L'indice del NAO è aumentato negli ultimi 30 anni con poche eccezioni, e dal 1980 la tendenza è quella di rimanere su valori positivi. Il fenomeno è responsabile delle temperature medie eccezionalmente alte e dei molti e violenti nubifragi che hanno colpito l'Europa nordoccidentale negli ultimi 10 anni.

Nonostante ciò, non è possibile collegare un qualsiasi evento meteorologico estremo specifico direttamente ai cambiamenti climatici. In termini statistici, una precipitazione annuale che ha la probabilità di verificarsi una volta ogni 1000 può avvenire anche in un intervallo di clima "costante".

Il Royal Netherlands Meteorological Institute suggerisce che i cambiamenti indotti dal riscaldamento globale nelle temperature superficiali del mare e i cambiamenti ad esso collegati nei modelli di circolazione atmosferica e oceanica possono essere in parte responsabili per gli indici NAO permanentemente positivi osservati e per i conseguenti inverni miti e umidi. Ma questi dati di fatto non possono essere provati perché il periodo di misurazione è troppo breve e i modelli producono ancora dei risultati contraddittori (KNMI 1999). Sebbene il KNMI sia prudente nelle sue conclusioni, Corti et al. (1999) indicano che il riscaldamento osservato della superficie terrestre genera cambiamenti nella distribuzione della frequenza delle modalità esistenti di variabilità climatica, come quelli del fenomeno NAO osservato. L'Oscillazione Artica (AO, Arctic Oscillation) è un'estensione del NAO a tutte le longitudini. Le variabilità di AO e NAO sono strettamente connesse. Il Modello di circolazione generale (GCM) del NASA Goddard Institute for Space mostra che gran parte dell'aumento dei venti di superficie e delle temperature di superficie continentali nell'Emisfero nord sono il risultato di un aumentato effetto serra. Il confronto dei vari modelli indica che i cambiamenti in superficie sono guidati soprattutto dall'effetto dei gas-serra sulla stratosfera (Shindell et al. 1999).⁶

2.6. Cicloni extra tropicali

Come conseguenza del cambiamento climatico globale, è possibile prevedere nuove modalità nel verificarsi e nel comportamento dei cicloni tropicali ed extra tropicali. Negli ultimi dieci anni hanno avuto luogo alcuni cicloni con conseguenze piuttosto serie, tra i quali ricordiamo Andrew, Mitch e Floyd. Tuttavia, cicloni gravi si sono verificati anche precedentemente, e pertanto potrebbe non esistere una relazione diretta con il cambiamento climatico. Dati affidabili relativi alle attività dei cicloni tropicali mostrano una variabilità regionale nell'arco di vari decenni, e sono assenti prove chiare di una tendenza a lungo termine nell'attività globale dei cicloni tropicali (Henderson-Sellers et al.,

1998). Anche la commissione WASA (Waves and Storms in the North Atlantic) conclude che parte della variabilità delle tempeste e delle ondate climatiche nell'Atlantico nordorientale e del Mare del Nord sono da ricollegare all'Oscillazione dell'Atlantico e non al cambiamento climatico globale (WASA Group, 1998). Tuttavia, come spiegato nella sezione precedente, se il regime del NAO è collegato alla temperatura della superficie, allora parte del regime delle correnti e delle tempeste è naturalmente connesso al cambiamento climatico globale e al maggiore effetto dei gas-serra. Inoltre, le temperature di superficie delle acque tropicali vicino all'Indonesia, collegate a El Niño, potrebbero influenzare il NAO (KNMI, 1999). Se il clima indotto dalle attività umane è pertanto responsabile per il comportamento del fenomeno ENSO, allora il cambiamento nel regime del NAO è indirettamente connesso al maggiore effetto serra.

L'influenza di El Niño nell'attività dei cicloni tropicali è più chiara. Di fatto, El Niño influenza l'aumento dell'attività dei cicloni tropicali in alcuni bacini (ad esempio nell'area centrale del Pacifico settentrionale, vicino alle Hawaii, il Pacifico meridionale, e il Pacifico Nordoccidentale tra 160°E e la linea del cambiamento di data (Chan 1985; Chu and Wang, 1997; Lander, 1994) e la diminuisce in altri bacini, come l'Atlantico, il Pacifico Nordoccidentale ad ovest dei 160°E e la regione Australiana (Nicholls, 1979; Revelle and Goulter, 1986; Gray, 1984). La Niña implica condizioni opposte. Pielke e Landsea (1999) rilevano una relazione tra il ciclo ENSO e i danni provocati dagli uragani negli Stati Uniti. La probabilità che si verificano, negli USA, danni superiori al milione di dollari è pari a 0,77 negli anni in cui agisce La Niña e di 0,32 in quelli in cui agisce El Niño e dello 0,48 negli anni neutri. Le temperature delle acque del Pacifico e i danni provocati dagli uragani atlantici sono fortemente connessi. Poiché almeno parzialmente l'innalzamento delle temperature può essere attribuito all'aumentato effetto dei gas-serra, è possibile concludere che i cambiamenti nell'attività dei cicloni tropicali sono almeno in parte il risultato di cambiamenti climatici indotti dall'uomo.

Una relazione causale generale può essere che l'aumento nelle concentrazioni di gas nell'atmosfera causano un aumento delle temperature di superficie delle acque degli oceani. Come ricordato prima, il cambiamento climatico provoca modifiche nelle temperature delle acque superficiali e nei modelli di circolazione oceanica ed atmosferica, e possono pertanto essere in parte responsabili per gli indici NAO osservati, persistentemente positivi, e per i connessi inverni miti e umidi. L'intensità di fenomeni di circolazione atmosferica e oceanica quali El Niño cresce con l'aumento delle temperature superficiali delle acque oceaniche. In cambio, la gravità degli estremi meteorologici in molte parti del mondo è da ricollegarsi con la forza dei fenomeni dovuti a El Niño. Si tratta di un'ipotesi, ma è estremamente plausibile. È difficile verificarla a fondo, poiché i dati registrati sono troppo pochi e i vari modelli non riescono ancora a riprodurre risultati totalmente identici quando si tratta di simulare il fenomeno della circolazione globale in condizioni di aumentate energie radiative.

2.7. Cambiamenti osservati negli ecosistemi

La barriera corallina rappresenta un'associazione di sostentamento

vitale reciproco tra alga e corallo. Lo scolorimento della barriera, causato da temperature enormemente elevate dell'acqua marina, è una riduzione nella densità delle alghe o dei relativi pigmenti. Episodi di questo fenomeno sono stati osservati nel 1980, 1982, 1987, 1992, 1994 e 1998 nella Grande Barriera corallina in Australia e in molti altri luoghi del mondo. Tali eventi hanno avuto una maggiore frequenza dagli anni Ottanta in poi e l'IPCC ha concluso che l'aumento osservato è da mettere in relazione con l'aumento misurato delle temperature delle acque oceaniche.

La ricerca indica che la popolazione di merluzzi nei Mari del Nord è colpita negativamente da un declino nella riproduzione degli individui giovani. Secondo O'Brien et al., questa diminuzione non è solo da collegarsi ad una pesca eccessiva ma anche al significativo aumento delle temperature delle acque marine registrato negli ultimi 10 anni (O'Brien, C.M. et al. 2000). Pesca eccessiva e temperature più elevate minacciano la sostenibilità nel lungo periodo dei merluzzi nel Mare del Nord.

Gli insetti, che sono particolarmente sensibili ai cambiamenti di temperatura e alle precipitazioni, possono essere degli ottimi indicatori dei cambiamenti climatici. Diversi ricercatori hanno individuato le prove dello spostamento verso il polo di varie specie di farfalle nel Nord America e in Europa (Parmesan, 1996; 1999).

Alcuni ricercatori dell'Università di Vienna hanno rilevato che varie specie di piante alpine sono migrate verso aree più vaste nei Pals austriaci e nell'est della Svizzera. Le osservazioni locali indicano un aumento della temperatura pari a 0,7 °C durante gli ultimi 90 anni (Grabherr et al., 1994).

Questi studi esaminano principalmente i cambiamenti in atto; tuttavia, è ancora impossibile attribuire questi cambiamenti all'aumentato effetto dei gas-serra. Le ricerche però indicano che gli ecosistemi sono molto sensibili ai cambiamenti di temperatura.

2.8. Eventi meteorologici estremi e relativo costo

Oltre al dibattito meteorologico, è dimostrato che i danni economici risultanti dagli eventi meteorologici estremi sono drammaticamente aumentati negli ultimi decenni (vedere figura 8). Naturalmente, l'inflazione, la crescita della popolazione e la crescita della ricchezza globale contribuiscono all'aumento dei costi causati dai danni dovuti agli eventi meteorologici estremi. Munich Re, una delle più grandi società mondiali di riassicurazione, ha confrontato le perdite calcolate negli anni Sessanta e quelle degli anni Novanta, rettificata in base ai suddetti fattori e ha rilevato che una parte notevole dell'aumento delle perdite è dovuta ai cambiamenti nella frequenza degli eventi meteorologici estremi (Francis e Hengeveld, 1998). Swiss Re (2000a) ha realizzato un elenco delle 40 perdite maggiori calcolate negli anni compresi tra il 1970 e il 1999, rilevando che solo 6 catastrofi non erano ricollegabili ad eventi atmosferici. Nel periodo 1963-1992, il numero di disastri che ha causato più dell'1 per cento di perdita rispetto al PIL è aumentato da due a tre volte per i disastri collegati agli eventi climatici rispetto ai disastri provocati dai terremoti (Nazioni Unite, 1994).

Swiss Re (1999b) conclude perciò che le perdite economiche provocate

dai disastri naturali sono aumentate del doppio nel periodo 1970-1990, considerando anche gli effetti dell'inflazione, della diffusione delle assicurazioni, dei prezzi e il migliorato standard di vita. Mentre il PIL globale reale è aumentato di un fattore pari a tre dal 1960, la somma totale dei danni provocati dai cambiamenti climatici è aumentata di un fattore pari a otto.

Disastri connessi ai grandi eventi climatici 1950 – 1999
Perdite economiche non assicurate – Confronto per decenni

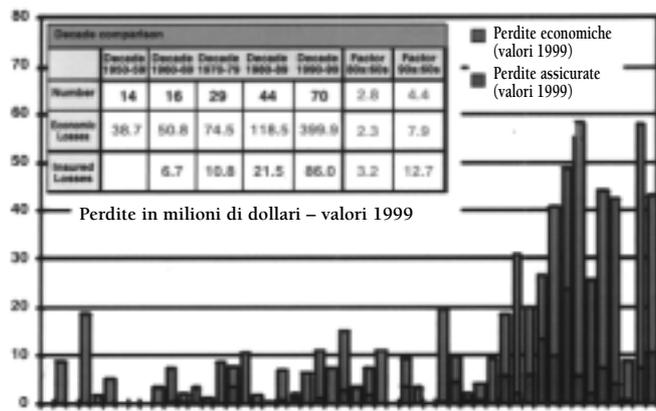


Figura 8. Disastri connessi ad eventi climatici nel periodo 1950-1999 (catastrofi naturali che superano i 100 morti e/o 100 milioni di dollari di perdita. (Fonte: Munich Re 1999b, più ulteriori ricerche effettuate su richiesta degli autori). (c) Munich Reinsurance Company

Per illustrare l'impatto degli eventi meteorologici estremi sui servizi finanziari e sulla società, indichiamo di seguito alcuni esempi. La tempesta di ghiaccio nel Canada orientale è stata caratterizzata da un'straordinaria persistenza, estensione, e ampiezza della distruzione provocata (Francis e Hengeveld, 1998). La quantità di pioggia gelida caduta in 6 giorni fu pari a 100 mm, in un'area estesa dall'Ontario centrale fino all'isola Prince Edward. Con 25 morti e un danno stimato tra 1 e 2 miliardi di dollari, si è trattato della più costosa catastrofe meteorologica nella storia del Canada (vedere figura 9). Nel 1988, le piene del fiume Yangtze in Cina furono responsabili della morte di 4.000 persone e di perdite economiche pari a 30 miliardi di dollari. La causa di quelle piogge va ricercata innanzitutto nelle insolite forti piogge estive, ma è la gestione da parte dell'uomo dei bacini idrografici che influenza l'impatto delle piogge.⁷

Durante il periodo aprile-giugno 1998, una forte siccità ha colpito gran parte delle regioni centromeridionali e sudorientali degli Stati Uniti. In Louisiana e in Florida sono caduti solo 150 mm di pioggia, record che batte quello precedente del 1895. La siccità è stata accompagnata da un caldo record in Texas, Louisiana, Arkansas e Florida (da due a quattro gradi in più del normale). Una delle conseguenze di queste condizioni climatiche estreme è stata, ad esempio in Florida, la diffusione di numerosissimi incendi spontanei. Al 5 di luglio, 1955 km² e 356 infrastrutture erano state consumate dal fuoco, provocando un danno economico quantificato in circa 276 milioni di dollari (Bell et al., 1999).

Figura 9. Il costo dei disastri naturali (Ricerca della Munich Re).

Livello	Anno	Evento	Area	Perdite assicurate (in milioni di dollari)	Perdite economiche (in milioni di dollari)
24	1983	Uragano Alicia	USA	2.200	3.500
8	1987	Nubifragio invernale	Europa occidentale	4.700	5.600
5	1989	Uragano Hugo	Caraibi, USA	6.300	12.700
4	1990	Nubifragio invernale Daria	Europa	6.800	9.100
23	1990	Nubifragio invernale Herta	Europa	1.800	2.600
12	1990	Nubifragio invernale Vivian	Europa	2.800	4.400
22	1990	Nubifragio invernale Wiebke	Europa	1.800	3.000
3	1991	Tifone Mireille	Giappone	6.900	12.700
16	1991	Incendi in Oakland	USA	2.200	2.600
1	1992	Uragano Andrew	USA	20.800	36.600
17	1992	Uragano Iniki	Hawaii	2.000	3.700
15	1993	Tormenta di neve	USA	2.000	5.800
28	1993	Alluvioni	USA	1.200	18.600
2	1994	Terremoto	USA	17.600	50.600
9	1995	Terremoto	Giappone	3.400	112.100
26	1995	Grandinata	USA	1.300	2.300
19	1995	Uragano Luis	Caraibi	1.700	2.800
13	1995	Uragano Opal	USA	1.400	3.400
18	1996	Uragano Fran	USA	1.800	5.700
25	1998	Tempesta di ghiaccio	Canada, USA	1.200	2.600
27	1998	Alluvioni	Cina	1.050	30.900
21	1998	Tempesta di grandine	USA	1.400	1.900
7	1998	Uragano George	Caraibi, USA	3.500	10.300
29	1999	Grandinata	Australia	1.000	1.500
20	1999	Tornado	USA	1.485	2.000
11	1999	Uragano FLoyd	USA	2.200	4.500
14	1999	Terremoto	Taiwan	1.000	14.000
10	1999	Tifone Bart	Giappone	3.000	5.000
6	1999	Nubifragio invernale Lothar	Europa	4.000	7.500
30	1999	Nubifragio invernale Martin	Europa	1.000	2.000

Cifre rettificata con i valori dell'inflazione

3. Proiezioni di cambiamenti climatici futuri

Diversi gruppi di ricerca hanno confrontato la reazione climatica ad un aumento dei gas-serra e degli aerosol di solfato con i modelli osservati dei cambiamenti delle temperature. Questi studi dimostrano una chiara similarità tra i cambiamenti osservati e i calcoli dei modelli. Ecco perché l'IPCC conclude che "le prove suggeriscono una evidente influenza umana sul clima globale" (IPCC, 1995). In altre parole, è molto probabile che l'aumentato effetto dei gas-serra stia già contribuendo ai cambiamenti osservati nel clima globale.

La qualità delle simulazioni dei modelli climatici presenti e passati, e per brevi periodi prevedibili, anche di fenomeni come El Niño, è notevolmente aumentata negli ultimi anni. Come conseguenza, aumenta anche la fiducia nelle previsioni dei cambiamenti futuri. Le Treut e McAvaney vedono ancora sostanziali disaccordi rispetto alla portata dei cambiamenti nella temperatura dell'aria, nel vapore acqueo e nelle nubi e nei dettagli della loro distribuzione tra i vari modelli che si basano sul raddoppiamento delle concentrazioni atmosferiche di CO₂.⁸ Pertanto, rimane difficile prevedere il clima su scala regionale o locale, perché la variabilità naturale delle condizioni climatiche può amplificare o indebolire gli effetti dei cambiamenti climatici indotti dall'uomo. La previsione su scala regionale è difficoltosa anche a causa della complessità del sistema climatico. Ciononostante, è possibile fare alcune previsioni che hanno un buon livello di attendibilità, rispetto alla temperatura, alle precipitazioni all'innalzamento del livello dei mari, alla circolazione atmosferica, ai cicloni e a determinati ecosistemi. Vengono presentate di seguito le principali analisi condotte sulla più recente letteratura sull'argomento, e verranno anche esaminate le possibilità di cambiamenti rapidi e imprevedibili del clima.

3.1. Temperatura

Con l'aumento in atto delle concentrazioni di gas-serra nell'atmosfera, la temperatura media mondiale potrebbe alzarsi di 1,3-4,0 °C entro l'anno 2100, a seconda dello scenario scelto e dei modelli climatici che utilizzano gli scenari di emissione più recenti (vedere figura 9 e tabella 1). Questi scenari preliminari sono stati elaborati per un rapporto speciale dell'IPCC sulle emissioni (SRES, Special Report on Emission Scenarios), poiché quelli IS92, elaborati nel 1992, presentavano dei limiti ormai riconoscibili (Wigley, 1999). La differenza più marcata tra gli scenari SRES e quelli IS92 è rappresentata dalle minori emissioni di SO₂ presenti negli scenari SRES. Sono stati sviluppati quattro diversi scenari "indicatori", definiti B1, B2, A1 e A2 (Wigley, 1999).

Stime delle temperature centrali ed estreme per gli scenari SRES preliminari

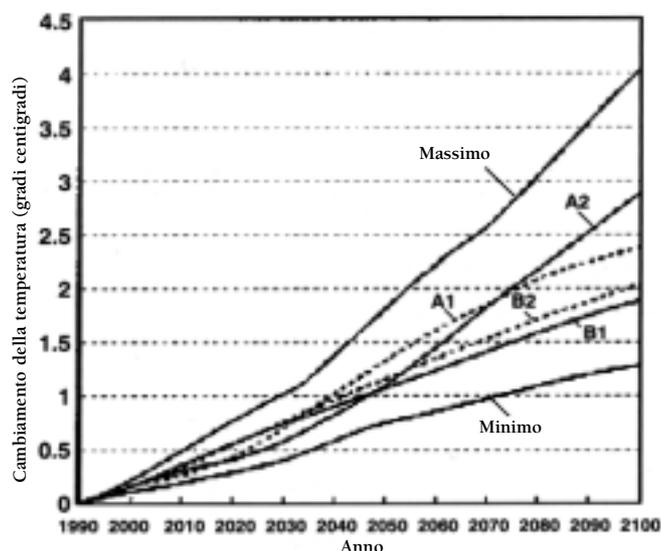


Figura 10. Questo grafico mostra i cambiamenti delle temperature nei modelli, in base ai differenti scenari di emissione considerati. I valori minimo e massimo risultano dall'utilizzo di sensibilità differenti pari a 1,5 °C e 4,5 °C (Wigley 1999). (Copyright: Pew Center on Global Climate Change)

Tabella 1. Cambiamenti globali causati da differenti scenari di emissione. Non sono presi in considerazione gli aerosol. (Fonte: Hulme et al. 1999).

	Concentrazione Anidride carbonica (ppmv)		Temperatura globale (°C)		Innalzamento dl livello marino globale (cm)	
	2050	2080	2050	2080	2050	2080
B1-basso	479	532	0.9	1.2	13	19
B2-medio	492	561	1.5	2.0	36	53
A1-medio	555	646	1.8	2.3	39	58
A2-alto	559	721	2.6	3.9	68	104

La proiezione mostra che l'aumento di temperatura delle masse terrestri nell'Emisfero Nord sarà due volte maggiore rispetto all'aumento medio globale, vale a dire un innalzamento di temperatura tra i 2,5 e gli 8 °C per questi territori. L'aumento nell'Emisfero Sud, dominato dagli oceani, sarà minore rispetto alla media globale (IPCC, 1995). Poiché le masse terrestri coprono una parte minore della Terra, il riscaldamento in queste aree ha una deviazione maggiore sul riscaldamento medio globale rispetto agli oceani dell'Emisfero meridionale. Un aumento della temperatura media porterà anche ad una crescita sostanziale della probabilità di estati molto miti, come illustra la figura 13. L'esempio mostrato è relativo al Regno Unito: un aumento delle temperature di 1,6 °C fa salire la probabilità delle così dette estati calde in questa regione da 1,3 % all'anno a 33,3 % all'anno.

Aumento delle probabilità del verificarsi di eventi climatici estremi

Esempio: temperature estive nell'Inghilterra centrale

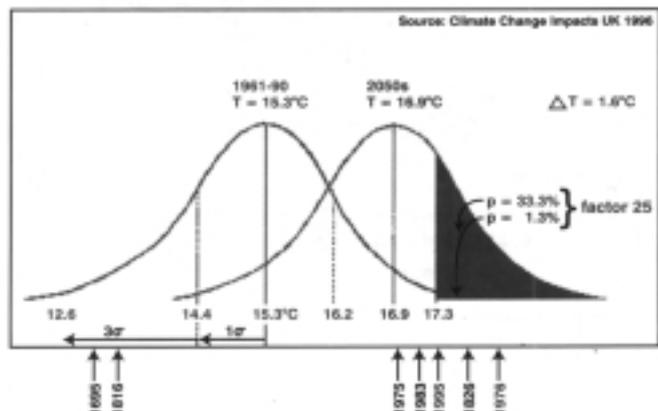


Figura 11. Un piccolo cambiamento nelle temperature medie estive nell'Inghilterra Centrale (1,6 °C) potrebbe causare un sostanziale aumento nella probabilità di un'estate molto calda. La curva a sinistra si basa sui dati registrati nell'arco di 300 anni, quella di destra mostra la distribuzione delle temperature estive medie per un aumento di temperatura dell'1,6 °C. In questo caso la probabilità di una cosiddetta estate calda nel Regno Unito aumenterebbe dall'1,3/100 per anno. (Fonte: Fig. 2.4 in CCIRG (1996) , Review of the potential effects of climate change in the United Kingdom, Climate Change Impacts Review Group. HMSO, Londra, 247pp.).

3.2. Precipitazioni

Quasi tutti i modelli prevedono che un aumento dell'intensità delle precipitazioni andrà di pari passo ad una concentrazione dei gas-serra. Temperature generalmente più miti porteranno ad un ciclo idrogeologico più potente (Houghton et al., 1996). Le precipitazioni globali medie aumenteranno dal 4 al 20 per cento. Tuttavia, le differenze su scala regionale hanno fondamentale importanza.

Vari ricercatori (Cubasch et al., 1995b; Gregory e Mitchell, 1995) prevedono uno spostamento nella distribuzione delle quantità di precipitazioni quotidiane. In alcune aree si avranno più forti nubifragi simultanei, con un aumento del numero di giornate secche. Il numero di giornate secche potrebbe aumentare se diminuiscono le precipitazioni medie. Ecco perché potrebbe verificarsi un aumento nella lunghezza dei periodi di siccità. Ad esempio, la probabilità di un periodo di siccità di 30 giorni nell'Europa meridionale, nelle previsioni aumenta di un fattore da 2 a 5 se si raddoppiano le concentrazioni dei gas-serra, mentre le precipitazioni medie diminuiscono solo del 22 per cento (Houghton et al., 1996).

I cambiamenti futuri delle precipitazioni in Europa mostrano più precipitazioni (tra +1 e +4 per cento per decennio) durante la stagione invernale, nella maggior parte d'Europa. Per l'estate è prevedibile una marcata differenza di quantità di precipitazioni tra l'Europa settentrionale e quella meridionale. L'Europa meridionale diventerebbe più secca (fino al 5 per cento in più per decennio) mentre l'Europa del Nord diventerebbe più umida (fino a +2 per cento per decennio) durante l'estate.

Dai loro esperimenti di modellazione, Zwiers e Kharin (1998) conclu-

gono che gli estremi delle precipitazioni aumenteranno più dei valori medi. L'aumento medio delle precipitazioni è approssimativamente del 4 per cento, mentre, ad esempio, la possibilità che si verifichi una precipitazione estrema che accade ogni venti anni sarebbe pari a circa l'11 per cento.

L'intensità delle precipitazioni (acqua caduta per unità di tempo) aumenterà con l'aumento della temperatura (vedere figura 12). La pioggia, in alcune zone, dipenderà dall'umidità relativa: il rapporto tra la concentrazione di vapore acqueo e il valore di saturazione. Quando l'umidità relativa raggiunge il 100 per cento, il vapore acqueo si condensa e la precipitazione ha luogo. In base ai modelli computerizzati, la distribuzione dell'umidità relativa difficilmente cambierà al cambiare del clima. Ciò che invece subirà modifiche con l'aumento della temperatura sarà l'umidità assoluta, la concentrazione di vapore acqueo nell'aria, nel momento in cui il valore della saturazione è raggiunto (la concentrazione di vapore acqueo massima aumenta del 6 per cento per un grado Celsius di aumento di temperatura). Un clima più caldo potrebbe non provocare cambiamenti nella frequenza degli eventi legati alle precipitazioni (connessi al numero quando l'umidità relativa raggiunge il 100 per cento), ma certamente causa un aumento nella quantità di precipitazioni per evento (relativo alla quantità di acqua nell'aria al punto di saturazione).

Andamento delle piogge invernali in un clima più mite (esempio Paesi Bassi)

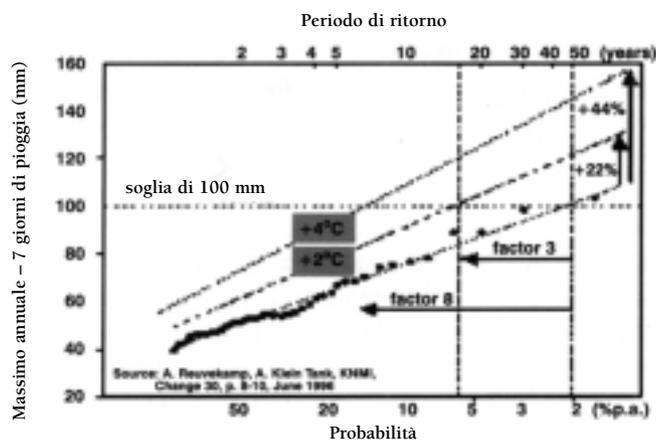


Figura 12. Questo grafico mostra il cambiamento nella probabilità del verificarsi di un evento piovoso di sette giorni che superi il massimo annuale dei 100 mm nel caso in cui la temperatura si alzi di 2 o 4 gradi Celsius (Reuvekamp A, A. Klein Tank, KNMI, Change, giugno 1996, p. 8-10). (Copyright: KNMI/RIVM).

3.3. Innalzamento del livello del mare

I valori dei parametri delle "migliori stime" per l'innalzamento del livello del mare indicano un livello previsto di 46-58 centimetri in più rispetto a oggi per l'anno 2100 (Wigley, 1999). Questi valori si basano sulle migliori stime per lo scioglimento della neve e del ghiaccio e per la sensibilità del clima. Anche il modo in cui l'innalzamento "autonomo" del livello del mare è elaborato nelle proiezioni influenza i risultati dei modelli climatici. Ne risulta una proiezioni globale valutata tra

i 17 e i 99 centimetri entro l'anno 2100, se vengono prese in considerazione le diverse stime relative allo scioglimento, all'espansione delle acque marine, e alla sensibilità climatica (vedere figura 13). I cambiamenti nel livello delle acque non saranno uniformi. Quelli a

Stime relative al livello del mare centrali ed estreme per gli scenari SRES preliminari

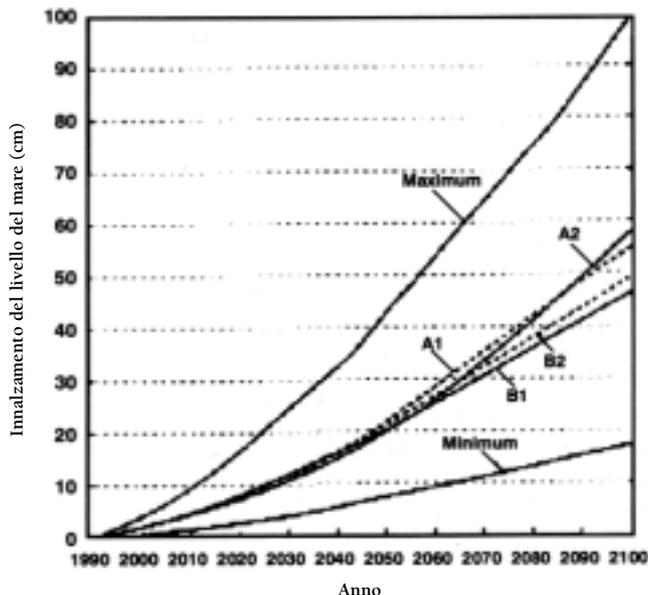


Figura 13. Cambiamenti globali del livello medio del mare in base alla scelta di diversi scenari SRES. I valori minimo e massimo risultano dall'utilizzo di sensibilità differenti pari a 1,5 °C e 4,5 °C e di valori alti e bassi per i parametri dei modelli di scioglimento del ghiaccio (Wigley 1999). (Copyright: Pew Center on Global Climate Change).

livello regionale si verificheranno come risultato delle differenze dei cambiamenti sia nel riscaldamento che nella circolazione degli oceani. L'innalzamento previsto è causato principalmente dall'espansione termica delle acque oceaniche; lo scioglimento delle calotte polari e dei ghiacciai ha un ruolo di minor rilievo, mentre le maggiori nevicate previste in Groenlandia e in Antartide opereranno in maniera opposta. Nel lungo periodo (secoli) questo contributo opposto diminuirà, ma crescerà la probabilità di una diminuzione del volume dei ghiacci. Il livello del mare continua ad aumentare anche molti secoli dopo la stabilizzazione delle concentrazioni dei gas-serra. Le proiezioni per il 2300 prevedono un innalzamento con un fattore da 2 a 4 volte maggiore rispetto alle proiezioni effettuate per il 2100, e risultano in una migliore stima di tale innalzamento che prevede valori da 0,5 m a 2,0 m per il 2300.

3.4. Modelli di circolazione

El Niño e l'Oscillazione dell'Atlantico settentrionale

La maggior parte dei modelli indicano che l'Oscillazione settentrionale El Niño (ENSO) si intensificherà se aumenteranno le concentrazioni di gas-serra. Inoltre potrebbe aumentare l'intensità dei fenomeni climatici associati a ENSO. L'aumento medio delle temperature delle acque marine tropicali e il relativo aumento di evaporazione potrebbe-

ro causare una associata variabilità nelle precipitazioni, anch'essa connessa al fenomeno ENSO.

La ricerca, sin dal 1996, suggerisce che gli eventi di El Niño diventerebbero probabilmente più persistenti e/o intensi se aumenteranno le concentrazioni di gas-serra, e saranno intervallati da episodi più gravi di La Niñas. Meehl e Washington (1996) sono giunti a queste conclusioni utilizzando un modello di circolazione accoppiato oceano-atmosfera. Inoltre, Boer et al. (1998) indicano, con i modelli del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, un "maggiore riscaldamento nel Pacifico orientale tropicale, che potrebbe essere definito simile a El Niño".

La maggior parte dei modelli climatici globali, come quelli appena ricordati, hanno ancora una risoluzione troppo poco precisa per poter simulare efficacemente il comportamento di ENSO in condizioni di riscaldamento aumentato dovuto all'effetto serra. Tuttavia il nuovo modello, con una maggiore risoluzione, utilizzato da Timmerman et al. (1999) del Max Planck Institute di Amburgo mostra una maggiore frequenza di El Niño e più forti eventi freddi (La Niñas) nell'Oceano Pacifico tropicale quando al modello viene applicato il futuro riscaldamento dovuto ai gas-serra. Anche altri modelli mostrano in un mondo con un effetto serra più accentuato un aumento nelle condizioni climatiche provocate da El Niño, intervallato da Niñas più brevi e più forti. Ciò significa un aumento nella frequenza delle condizioni associate a El Niño, ad esempio piogge più forti e tempeste inframmezzate da brevi periodi di siccità in alcune regioni e siccità prolungate interrotte da anni di piogge copiose in altre parti del mondo.

Paeth et al. (1998) rilevano un aumento significativo (con un livello di precisione pari al 95 per cento) nell'indice medio dell'Oscillazione dell'Atlantico settentrionale quando la concentrazione di CO2 si quadruplica. Ciò provocherebbe un clima più marino (con inverni più miti). Anche i due modelli del Max Planck Institute ai quali è applicato l'effetto serra mostrano un aumento dell'indice NAO. Esiste anche un modello dell'Hadley Centre in Inghilterra che suggerisce invece una diminuzione nell'indice NAO (KNMI, 1999). Fyfe et al. (1999) indicano che applicando ai modelli una forzatura dei gas-serra si ottiene un'Oscillazione Artica con maggiori valori positivi e di conseguenza dei valori positivi anche per il NAO.

Il cambiamento climatico indotto dall'uomo non modifica necessariamente la natura degli schemi dominanti di variabilità naturale, ma sarà comunque riflesso in questi schemi, e ne risulterà un cambiamento nella loro frequenza e/o forza. Sebbene i modelli accoppiati oceano-atmosfera siano migliorati negli ultimi cinque anni, la maggior parte di quelli attuali si limitano ancora alla simulazione della complessa variabilità naturale osservata. Ecco perché è poi così difficile raggiungere un consenso globale sulla relazione tra cambiamenti climatici, variabilità meteorologica ed eventi estremi.

3.5. Ciclone extra tropicali

Carnell e Senior (1998) rilevano che con l'aumentare dei gas-serra il numero totale delle tempeste nell'Emisfero settentrionale diminuisce, ma la tendenza si muove verso valori estremi più alti, che indicano una maggiore gravità di tali tempeste. Il lavoro di modellazione e di analisi

si di Lambert (1995) sostiene questo risultato. Un altro studio ha rilevato una riduzione dell'intensità (Beersma et al., 1997). Al momento, i numerosi modelli forzati sull'effetto serra indicano cambiamenti nel comportamento dei cicloni, ma offrono risultati contraddittori perché poco precisi.

La formazione dei cicloni tropicali non dipende soltanto dalla temperatura delle acque superficiali, ma anche da una serie di fattori atmosferici. Sebbene diversi modelli simulino i cicloni tropicali con sufficiente realismo, la comprensione scientifica del comportamento di tali fenomeni tropicali è insufficiente e non consente ancora una valutazione dei cambiamenti futuri. Il numero globale dei cicloni tropicali potrebbe non mantenersi costante, ma probabilmente aumenterà l'intensità della loro forza.

ENSO e i cicloni tropicali sono fortemente correlati (sezione 2.5). La maggior parte dei modelli forzati all'effetto serra prevede un aumento delle condizioni di El Niño intervallato da eventi più forti ma più intensi di La Niña (sezione 3.4). L'attività dei cicloni tropicali che sono positivamente influenzati da El Niño probabilmente aumenterà.

3.6. Ecosistemi

Le popolazioni, che fanno parte di un ecosistema, possono sopravvivere solo se la disponibilità di acqua e la temperatura variano entro un limite determinato. Un'altra popolazione sostituirà quella presente qualora questi venissero superati. Per alcune specie il tasso di sostituzione è basso (ad esempio per gli alberi) mentre per altre è più rapido. Pertanto il cambiamento climatico implicherà probabilmente degli squilibri e/o delle fratture negli ecosistemi, che potrebbero causare cambiamenti repentini. I cambiamenti climatici disturberanno il funzionamento di diversi ecosistemi poiché l'interazione tra le specie mutuamente dipendenti ne risulterà interrotta (ad esempio si verificheranno malattie di alberi e piante). Ciò potrà avere un serio impatto sulla biodiversità, sull'agricoltura e la società ("disastri naturali", malattie delle piante e così via). Al fine di mostrare le potenziali conseguenze dei cambiamenti climatici in alcuni ecosistemi unici, vengono indicati di seguito alcuni esempi.

È probabile che in futuro aumenti la frequenza e l'intensità dei fenomeni di scolorimento dei coralli. I risultati di quattro GCM sono stati utilizzati per analizzare cosa avviene in seguito agli episodi di scolorimento causati dai cambiamenti delle temperature (Hoegh-Guldberg, 1999a). In 20-40 anni questi eventi potrebbero essere provocati dai cambiamenti stagionali nelle temperature dell'acqua. Oggi vanno di pari passo con i fenomeni di El Niño. La frequenza di scolorimento potrebbe raggiungere un punto tale che le barriere coralline non avranno il tempo sufficiente per riprodursi.

Secondo Fleming e Candau (1997), i cambiamenti climatici avranno serie conseguenze anche sulle foreste canadesi – ci saranno tempeste più frequenti e devastanti, danni provocati dai venti, maggiore difficoltà dovute alle siccità, incendi più frequenti e gravi, malattie parassitarie e in alcune zone tassi di crescita vegetativa più elevati.

Un riscaldamento variabile tra i 3,0 e i 6,4 °C (l'intervallo rappresentato dai diversi modelli generati raddoppiando il valore di CO₂ per l'area considerata) potrebbe portare alla perdita della tundra alpina che si

trova tra i 44° e i 57°N, anche se in piccole zone di habitat aperto al di sotto della relativa linea climatica potrebbero persistere alcune popolazioni (Delcourt and Delcourt, 1998).

Il riscaldamento globale avrà certamente effetto sul più grande sistema di foreste di mangrovie del mondo, il Sundarbans in Bangladesh e India. Questo sistema è unico per ciò che concerne l'alta biodiversità (ricchezza di fauna e flora) e per i suoi valori economici e ambientali. Un aumento nella temperatura e di conseguenza nella salinità potrebbe influenzare alcune specie. Un aumento del livello del mare inonderrebbe alcune parti del Sundarbans causando una trasformazione dell'habitat con l'estinzione o la migrazione di alcune specie. Tutto l'ecosistema delle Sundarbans subirebbe gli effetti di una maggiore frequenza di tempeste più violente, risultato del cambiamento climatico.

3.7. Aspetti sociali

L'impatto dei cambiamenti climatici sulla società sarà più evidente per la natura e la frequenza di eventi meteorologici estremi quali alluvioni, tempeste, ondate di calore e periodi di siccità, dei quali forse stiamo già osservando i primi segnali. Non è più possibile ad esempio applicare con certezza le serie temporali relative agli eventi meteorologici estremi, ed è sempre più complicato prevedere il periodo di ritorno di tali fenomeni. Le conseguenze fondamentali sono i danni economici, la distruzione sociale e la perdita di vite umane.

I cambiamenti climatici avranno anche alcuni vantaggi, ad esempio una produzione più cospicua di granoturco se c'è umidità sufficiente, l'espansione del turismo e minori costi per il riscaldamento domestico, anche se saranno maggiori le spese per l'aria condizionata nei periodi estivi. Le rotte di navigazione che connettono i continenti settentrionali non sono al momento accessibili, ma sono più brevi rispetto alle rotte esistenti. Il riscaldamento globale potrebbe rendere questi percorsi praticabili e quindi interessanti dal punto di vista economico. Le aree agricole e le foreste delle regioni del nord potranno beneficiare di temperature più elevate e di maggiori concentrazioni di anidride carbonica. Tuttavia ci vorrà tempo per sfruttare questi vantaggi, poiché la società non è ancora preparata a situazioni del genere. Ad esempio, sarà necessario costruire nuove infrastrutture – strade, sistemi di gestione delle acque e città. La disponibilità ad investire per rendere possibile lo sfruttamento di questi vantaggi dipenderà soprattutto dalla certezza che avremo sulla natura dei futuri cambiamenti climatici. È questo è infatti il problema: il clima non sarà più prevedibile, almeno non a livello locale.

I cambiamenti climatici implicano una redistribuzione globale dei costi e dei benefici del tempo meteorologico. I costi saranno maggiori dei benefici, poiché la società non è preparata a sorprese da questo punto di vista e ci vorrà del tempo per vederne i risultati. A tutti gli effetti, il cambiamento climatico è un'ulteriore incertezza rispetto allo sviluppo economico e pertanto un fattore di costo aggiuntivo. E infine, la società globale non dispone di strumenti e istituzioni che siano in grado di redistribuire o correggere i danni. Pertanto il cambiamento climatico potrebbe portare a tensioni politiche globali. Oltre a ciò c'è il rischio di una grave destabilizzazione del clima globale. Il capitolo successivo affronta questo aspetto.

4. Rischi di destabilizzazione del clima globale

4.1. La grande corrente oceanica (la Corrente del Golfo)

Uno dei maggiori rischi climatici, sostanzialmente differente dall'aumento della temperatura e dal livello delle acque, è rappresentato da cambiamenti repentini e inaspettati del clima. La possibilità che ciò si verifichi non è alta, ma si tratta di eventi difficili da prevedere, che se avvenissero avrebbero un impatto molto forte sulla vita del pianeta. Il ristagno della grande corrente oceanica è uno di questi cambiamenti possibili. La corrente oceanica è una circolazione termosalina provocata dalle differenti densità dell'acqua di mare, che sono conseguenza della temperatura e della salinità delle acque. Questa corrente trasporta un'enorme quantità di calore verso nord e crea nell'Europa nordoccidentale un clima che è superiore in media di 8 gradi rispetto alla temperatura media alla stessa latitudine. Nelle regioni settentrionali del Nord Atlantico l'acqua si raffredda e scende verso il basso, formando una corrente profonda che si sposta verso Sud, circola intorno all'Antartide e poi si sposta verso nord, verso i bacini Indiano, Pacifico e Atlantico. Possono essere necessari anche migliaia di anni perché l'acqua del Nord Atlantico raggiunga il Nord del Pacifico. Le differenze di densità nell'acqua marina determinano la forza della circolazione della corrente. Una modifica di queste differenze di densità come risultato di un cambiamento climatico potrebbe portare ad un indebolimento o addirittura a un 'ristagno' della corrente. In questo caso il clima nell'Europa nordoccidentale diverrebbe come quello del Labrador e della Siberia: più di sei mesi di neve all'anno.

Il modello di circolazione della corrente oceanica è sensibile alle perturbazioni che risultano da arrivi eccessivi di acqua fredda (precipitazioni, scioglimento dei ghiacci) nel Nord Atlantico. I modelli climatici indicano un aumento delle precipitazioni alle latitudini più alte. Come risultato di tali precipitazioni, la corrente potrebbe iniziare a ristagnare tra 100-300 anni a partire da oggi. L'arresto totale della corrente si avrebbe in meno di dieci anni. I carotaggi sui ghiacci indicano che in passato gli arresti della corrente hanno provocato abbassamenti della temperatura fino a 7 gradi Celsius. Questi carotaggi e i modelli elaborati indicano che la circolazione della corrente alla fine si ristabilirebbe, ma solo dopo un periodo che va dai 100 ai 1000 anni (Broecker 1996).

Dopo il lavoro di Broecker del 1996, una serie di gruppi che si occupano di modellazione ha rilevato una diminuzione nella forza della corrente se si forzano i valori dei gas-serra, che provocherebbe un raffreddamento nell'Atlantico settentrionale. Il processo sarebbe il seguente: un aumento delle precipitazioni ad alte latitudini porta ad una diminuzione della concentrazione salina delle acque di superficie. Al momento, l'abbassamento dei livelli salini nelle vicinanze della Groenlandia spinge l'acqua tiepida con una minore salinità (dovuta all'entrata di acqua fredda) verso l'Atlantico settentrionale. Questo abbassamento a latitudini elevate diminuisce e così potrebbe diminuire la forza

di circolazione della corrente. A lungo termine questa fonte di calore dell'Europa nordoccidentale potrebbe risultare fortemente indebolita. Wood e colleghi (1999) presentano delle proiezioni relative al riscaldamento dovuto all'effetto serra elaborate insieme ad un modello climatico, che per la prima volta offre una simulazione realistica delle correnti oceaniche su larga scala. Lo studio mostra che una delle due maggiori 'pompe' che guidano la formazione delle acque di profondità dell'Atlantico settentrionale potrebbe fermarsi nel giro di qualche decennio. Esistono due punti convenzionali, uno in Groenlandia e uno nei mari del Labrador. Quest'ultimo potrebbe subire un arresto completo (Rahmstorf, 1999). Come detto in precedenza, questo evento avrebbe conseguenze drammatiche per la popolazione e gli ecosistemi dell'emisfero boreale, in particolare per l'Europa.

4.2. Antartide

Un altro rischio con bassa probabilità ma con un elevato impatto riguarda l'Antartide e in particolare la calotta dell'Antartide occidentale. Se questa parte di calotta inizia a sciogliersi, è plausibile un innalzamento del livello del mare pari a 4-6 metri. Le rotture dello strato di ghiaccio nella Penisola Antartica sono legate alle più elevate temperature medie ed estive dell'aria, ad un aumento nella stagione di scioglimento, e alla conseguente creazione di aree più vaste di accumulo d'acqua, che provocano la rottura della calotta (Scambos et al., 1999). La maggior parte dei modelli climatici indicano un modesto aumento delle temperature nelle regioni antartiche negli ultimi 50 anni. Durante questo periodo di tempo, l'aumento delle precipitazioni ha probabilmente più che compensato lo scioglimento della superficie. Tuttavia, dopo 50 anni di continuo innalzamento delle temperature, il riscaldamento dell'Antartide potrebbe essere tale da avere effetto sulle parti vulnerabili dello strato di ghiaccio.

Le interpretazioni possibili sui cambiamenti presenti e futuri che riguardano l'Antartide sono considerevolmente complesse e in alcuni casi contraddittorie.

Eppure, è molto chiaro che anche i piccoli cambiamenti nello strato di ghiaccio dell'Antartide occidentale possono portare ad un aumento del livello del mare dell'ordine di qualche metro. Con un aumento costante delle emissioni di gas-serra, lo scenario più probabile è quello di uno strato di ghiaccio che sparisce nell'oceano nell'arco di 500-700 anni, ma c'è anche una piccola possibilità che tutto avvenga nei prossimi 100 anni. In questo caso l'innalzamento repentino del livello marino potrebbe essere pari a 4 - 6 metri.

4.3. Ulteriori reazioni al cambiamento climatico con basse probabilità di verificarsi ma di grande impatto

Di seguito vengono presi in esame altri tre meccanismi con basse possibilità di verificarsi, ma con conseguenze imprevedibili.

Il clima freddo e umido della zona boreale (regioni settentrionali dell'Europa e dell'Asia) ha creato le condizioni adatte per l'accumulo del carbonio nel sottosuolo. Circa il 40 % delle riserve di carbonio nelle foreste si trovano nella zona boreale. Il riscaldamento globale può

modificare questa situazione, influenzando il carbonio immagazzinato e provocando quindi un feedback positivo. Le riserve di carbonio sono da 1,2 a 1,5 volte più grandi nei sottosuoli boreali che nell'atmosfera (Posch et al. 1995).

L'aumento delle temperature oceaniche come risultato del riscaldamento globale potrebbe portare ad una diminuita solubilità dell'anidride carbonica, e quindi trasformare i bacini regionali in fonti di maggiore concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera. La potenziale reazione tra cambiamento climatico e metano clatrato potrebbe aumentare il riscaldamento globale. Il metano clatrato è un composto simile al ghiaccio nel quale le molecole di metano sono incastrate nelle cavità formate dalle molecole di acqua. Si forma negli oceani, nei sedimenti delle zolle continentali. È stabile a determinate combinazioni di temperatura e profondità, e per la maggior parte ha origini biologiche. Con il riscaldamento potrebbe passare da una condizione di stabilità ad una di instabilità, provocando il rilascio di enormi quantità del metano che contiene. Potrebbe quindi provocare una destabilizzazione totale del clima presente. Va chiarito che questo modello è piuttosto speculativo, poiché è basato su una serie di presupposti che non sono stati verificati (Harvey 1994).

La destabilizzazione del clima globale ha basse probabilità ma conseguenze difficili da immaginare. Però, poiché il clima è un sistema complesso, unico e relativamente poco approfondito, anche questi fenomeni che hanno poca possibilità di verificarsi ma che avrebbero un enorme impatto vanno presi in considerazione.

In generale, una riduzione delle emissioni dei gas-serra potrebbe portare ad una riduzione del tasso di cambiamento climatico e anche ad una riduzione del rischio di destabilizzazione del clima globale.

5. Conclusioni

Sulla base di un'analisi sistematica dei cambiamenti osservati nelle temperature medie, negli schemi e nell'intensità delle precipitazioni, nel livello del mare, nelle nevi e negli strati di ghiaccio, nei modelli di circolazione atmosferica e oceanica e degli ecosistemi, concludiamo con ragionevole certezza che stiamo ora assistendo ai primi effetti dell'aumento dei gas-serra nell'atmosfera. Almeno parte dei cambiamenti osservati dovrebbe essere attribuita ai cambiamenti climatici indotti dall'uomo.

I cambiamenti climatici in ogni particolare regione della Terra vanno di pari passo con i cambiamenti nella natura e nella frequenza di eventi meteorologici estremi. Le modifiche ai valori medi hanno conseguenze nell'intensità degli eventi estremi. Pertanto è possibile affermare che la serie recente osservata di eventi meteorologici estremi è influenzata dalle maggiori temperature medie. Ciò implica che almeno parte dei danni causati dagli eventi meteorologici estremi è dovuta ai cambiamenti indotti dall'uomo. Giungiamo a questa conclusione con ragionevole ma non assoluta certezza, poiché esiste qualche remota possibilità che i cambiamenti osservati possano essere attribuiti anche alla variabilità naturale del clima.

Un ulteriore aumento nelle concentrazioni di gas-serra nell'atmosfera porterà a cambiamenti ulteriori nel clima globale. Le conseguenze ora previste sono: un ulteriore aumento della temperatura globale media, un aumento nei nubifragi violenti, un sostanziale aumento del livello del mare e un cambiamento degli schemi di circolazione oceano/atmosfera, con conseguente modifica dei modelli, delle frequenze e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi. È impossibile eseguire al momento proiezioni accurate su base regionale relativamente ai futuri cambiamenti.

Alcune regioni possono trarre profitto dai cambiamenti climatici, soprattutto al nord, ma altre zone subiranno perdite. Di fatto, i cambiamenti climatici implicheranno una redistribuzione globale dei costi e dei benefici. I costi saranno maggiori dei vantaggi, perché i sistemi sociali ed ecologici avranno difficoltà ad adattarsi. Inoltre, la società globale non dispone di strumenti e istituzioni in grado di ricompensare i perdenti. Pertanto, è possibile prevedere delle gravi tensioni sociali. Oltre ai cambiamenti gradualmente del clima e ai danni sociali che aumenteranno, un rischio ulteriore è la possibile destabilizzazione del clima globale che potrebbe verificarsi come risultato del ristagno della grande corrente oceanica, dello scioglimento della calotta polare antartica e dell'emissione di ulteriori gas-serra provocati dal riscaldamento degli oceani e/o delle aree di tundra. Si tratta di fenomeni a bassa probabilità ma ad elevatissimo impatto, che devono trovare il loro spazio nel dibattito sui cambiamenti climatici e sulle misure politiche da intraprendere per limitare le emissioni di gas-serra.

Solo la limitazione delle emissioni nette di gas-serra è in grado di ridurre il tasso di cambiamento climatico, e quindi i danni sociali ed ecologici prevedibili. Prevedendo le problematiche distributive e i maggiori rischi per la società, oggi l'unica ragionevole risposta alla sfida imposta dai cambiamenti climatici è un'azione immediata che metta

in atto immediate misure di controllo delle emissioni.

L'analisi della letteratura più recente sull'argomento è stata condotta da Pier Vellinga e Willem van Verseveld dell'Institute for Environmental Studies (IVM) della Vrije Universiteit di Amsterdam. Ringraziamo Fons Baede del Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) e Jim Bruce, Presidente del Consiglio internazionale UNU Network on Water, Environment and Health ed ex vicepresidente della Commissione intergovernativa sui cambiamenti climatici (IPCC), Gruppo di lavoro 3, per il contributo dato nella revisione e per i loro commenti. Tuttavia, come autori, siamo gli unici responsabili del contenuto di questo studio.

Bibliografia

- Anonimo. 1998. *World's glaciers continue to shrink according to new CU-Boulder study*. Nuova versione dell'Università del Colorado, 26 maggio 1998. (Internet: http://www.colorado.edu/PublicRelations/NewsReleases/1998/Worlds_Glaciers_Continue_To_Sh.html)
- Barsugli, J. J., J. S. Whitaker, A. F. Loughe, P. D. Sardeshmukh e Z. Toth. 1999. *The effect of the 1997/98 El Niño on individual large-scale weather events*. Bulletin of the American Meteorological Society 80(7). Luglio 1999.
- Beersma, J. J., E. Kaas, V. V. Kharin, G. J. Komen e K. M. Rider. 1997. *An analysis of extratropical storms in the North Atlantic region as simulated in a control and 2*CO₂ timeslice experiment with a high-resolution atmospheric model*. Tellus 48A: 175-196.
- Bell, G. D., A. V. Douglas, M. E. Gelman, M. S. Halpert, V. E. Kousky e C. F. Ropelewski. *Climate change assessment 1998*. Stampato nel maggio 1999 come supplemento a Bulletin of the American Society 80 (5). (Internet: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/product/assessments/assess_98/index.html)
- Boer, G. J., G. Flato e D. Ramsden. 1998. *A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century*. Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Victoria B.C., in corso di stampa.
- Broecker, W. S. 1996. *Climate implications of abrupt changes in ocean circulation*. U.S. Global Change Research Program Second Monday Seminar Series. (Internet: <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/960123SM.html>)
- Carnell, R. E. e C. A. Senior. 1998. *Changes in mid-latitude variability due to increasing greenhouse gases and sulphate aerosols*. Climate Dynamics 14:369-383.
- Cavalieri, D. J., P. Gloersen, C. L. Parkinson, J. C. Comiso e H. J. Zwally. 1997. *Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes*. Science 278:1104-06.
- Chan, J. C. L. 1985. *Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon*. Mon. Wea. Rev. 113:599-606.
- Chu, P. e J. Wang. 1997. *Tropical cyclone occurrences in the vicinity of Hawaii: are the differences between El Niño and non-El Niño years significant?* J. Climate 10:2683-2689.
- Corti, S., F. Molten e T. N. Palmer. 1999. *Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes*. Nature 398:799-802.
- Cubasch, U., G. Waszkewitz, Hegerl e J. Perlwitz. 1995b. *Regional climate changes as simulated in time slice experiments*. MPI Report 153. Clim. Change 31:321-304.
- DeAngelo, B. J., J. Harte, D. A. Lashof e R. S. Saleska. 1997. *Terrestrial ecosystems feedbacks to global climate change*. In: Annual review of energy and the environment, edizione 1997, vol. 22.
- Delcourt, P. A. e H. R. Delcourt. 1998. *Paleoecological insights on conservation of biodiversity: a focus on species, ecosystems, and landscapes*. Ecological Applications 8:921-934.
- Doake, C. S. M. e D. G. Vaughan. 1991. *Rapid disintegration of Wordie ice shelf in response to atmospheric warming*. Nature 350(6316):328-330.
- Epstein, P. R. 1996. *Global climate change*. From an Abstract of Remarks by Scientists at the National Press Club, Washington, D.C. Newsletter 1(1), 3 novembre 1996.
- Feely, R. A., R. Wanninkhof, T. Takahashi e P. Tans. 1999. *Influence of El Niño on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO₂ accumulation*. Nature 398. 15 aprile 1999.
- Findlay, B. F., D. W. Gullet, L. Malone, J. Reycraft, W. R. Skinner, L. Vincent e R. Whitewood. 1994. *Canadian national and regional standardized annual precipitation departures*. In: Trends '93: A compendium of data on global change, T. A. Boden, D. P. Kaiser, P. J. Sepanski e F. W. Stoss (eds.). ORN/CDIAC-65, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, U.S.A., pp. 800-828.
- Fleming, R. A. e J-N. Candau. 1997. *Influences of climatic change on some ecological processes of an insect outbreak system in Canada's boreal forests and the implications for biodiversity*. Environ. Monitoring & Assessment, 49:235-249.
- Francis, D. e H. Hengeveld. 1998. *Extreme weather and climate change*. ISBN 0-662-268490. Climate and Water Products Division, Atmospheric Environment Service, Ontario, Canada.

- Fyfe, J.C., Boer, G.J., Flato, G.M. (1999), *Climate studies-the Arctic and Antarctic Oscillations and their projected changes under global warming*, Geophysical research Letters, Vol. 26 (Numero 11), 1999, 1601-1604 (4)
- Grabherr, G., M. Gottfried e H. Pauli. 1994. *Climate effects on mountains plants*. Nature 369(6480), 9 giugno 1994.
- Gray, W. M. 1984. *Atlantic seasonal hurricane frequency*. Part II: forecasting its variability. Mon. Wea. Rev. 112:1669-1683.
- Gregory, J. M. e J. F. B. Mitchell. 1995. *Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation over Europe in the current 2 x CO2 climates using the UKMO climate model*. Quart. J. R. Met. Soc. 121:1451-1476.
- Groisman, P. Ya, T. R. Karl, D. R. Easterling, R. W. Knight, P. B. Jamason, K. J. Hennessy, R. Suppiah, Ch. M. Page, J. Wibig, K. Fortuniak, V. N. Razuvaev, A. Douglas, E. Forland e P.M. Zhai. 1999. *Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change*. Climatic Change 42(1):243-283.
- Groisman, P. Ya e D. R. Easterling. 1994. *Variability and trends of precipitation and snowfall over the United States and Canada*. J. Climate 7:184-205.
- Harvey, D. 1994. *Potential feedback between climate and methane clathrate*. Università di Toronto, Dipartimento di geografia, Toronto, Ontario, Canada. (Internet: <http://harvey.geog.utoronto.ca:8080/harvey/index.html>)
- Henderson-Sellers, A., H. Zhang, G. Berz, K. Emanuel, W. Gray, C. Landsea, G. Holland, J. Lighthill, S-L. Shieh, P. Webster e K. McGuffie. 1998. *Tropical cyclones and global climate change: a post IPCC assessment*. Bulletin of the American Society 79(1), gennaio 1998.
- Hindmarsh, R. C. A. 1993. *Qualitative dynamics of marine ice sheets*. NATO ASI Series I 12, pp. 68-69.
- Hoegh-Guldberg, O. 1999a. *Climate change coral bleaching and the future of the world's coral reefs*. Greenpeace, Sydney, Australia.
- Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg e K. Maskell. 1996. *Climate change 1995, the science of climate change, contribution of working group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pubblicato dalla Commissione intergovernativa sul cambiamento climatico. IPCC, 1995. (Vedere anche IPCC, 1995, Cambridge University Press)
- Hulme, M. e M. Kelly. 1993. *Climate change, desertification and desiccation, with particular emphasis on the African Sahel*. Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, Università dell'East Anglia, Norwich, Regno Unito, GEC93-17, p. 37. (Internet: http://www.uea.ac.uk/menu/acad_depts/env/all/resgroup/cserge/)
- Hulme, M., Sheard, N., Markham, A. (1999) *Global Climate Change Scenarios*, Climatic Research Unit, Norwich, Regno Unito, 2pp.
- IPCC. 1995. *Climate change 1995: the science of climate change*. Cambridge University Press. (Vedere anche Houghton et al., 1995)
- Johannessen, O. M., M. W. Miles e E. Bjorgo. 1996. *Global sea-ice monitoring from microwave satellites*. Proc. 1996 IGARSS, 932-934.
- Karl, T. R., P. Y. Groisman, R. W. Knight e R. R. Heim, Jr. 1993b. *Recent variations of snowcover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations*. J. Climate 7:1144-1163.
- Karl, T. R., R. W. Knight, D. R. Easterling e R. G. Quayle. 1995. *Trends in U.S. climate during the twentieth century*. Consequences 1:2-12.
- Karl, T. R. e R. W. Knight. 1998. *Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA*. Bull. Am. Meteorol. Soc. 79:231-241.
- Karl, T. R., R. W. Knight e N. Plummer. 1995. *Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century*. Nature 377:217-220.
- Karl, T. R., N. N. Nicholls e J. Gregory. 1997. *The coming climate: meteorological records and computer models permit insights into some of the broad weather patterns of a warmer world*. Scientific American, maggio 1997. (Internet: <http://www.sciam.com/0597issue/0597karl.html>)
- Khain, A. e I. Ginis. 1991. *The mutual response of a moving tropical cyclone and the ocean*. Beitr, Phys. Atmosph. 64:125-141.
- KNMI. 1999. *De toestand van het klimaat in Nederland 1999* (in lingua olandese). (Internet: <http://www.knmi.nl/voor/nader/klim/klimaatrapportage.html>)
- Knutson, T. R. e S. Manabe. 1998. *Model assessment of decadal variability and trends in the tropical Pacific Ocean*. Journal of Climate, settembre 1998.
- Lal, M., S. K. Singh e A. Kumar. 1999. *Global warming and monsoon climate*. In: Proceedings of the Workshop on Climate Change and Perspective for Agriculture, novembre 20-21, 1998. S.K. Sinha, ed. National Academy of Agricultural Sciences, Nuova Delhi.
- Lambert S. J., 1995. *The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths*. Journal of Climate 8:1447-1452.
- Lander, M. 1994. *An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the Western North Pacific and ENSO*. Mon. Wea. Rev. 114:1138-1145.
- Lettenmaier, D., E. F. Wood e J. R. Wallis. 1994. *Hydroclimatological trends in the continental United States, 1948-88*. J. Climate 7:586-607.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer e C. Stephens. 2000. *Warming of the world ocean*. Science 287, 24 marzo 2000.
- Mann, M. E., B. S. Bradley e M. K. Hughes. 1999. *Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations*. Geophysical Research Letters 26(6):759-762.
- Maslanik, J. A., M. C. Serreze e R. B. Barry. 1996. *Recent decreases in Arctic summer ice cover and linkages to atmospheric anomalies*. Geophysical Research Letters 23:1677-1680.
- Meehl, G. A. and W. M. Washington. 1996. *El Niño-like climate change in a model with increased atmospheric CO2 concentrations*. Nature 382.
- Münich Re (1999) *Topics – Annual Review of Natural Catastrophes 1990*. Münich Re, Monaco.
- Münich Re (1999) *Topics 2000: Natural Catastrophes – The Current Position* Münich Reinsurance Group Geoscience Research Group. Monaco, Germania, Report 2895-m-e.
- Münich Re (2000) *M R Natural Catastrophes Service: Significant Natural Disasters in 1999*.
- Nicholls, N. 1997. *A possible method for predicting seasonal tropical cyclone activity in the Australian region*. Mon. Wea. Rev. 107:1221-1224.
- NOAA Internet site:
<http://www.ncdc.noaa.gov/o1/climate/research/1998/ann/ann98.html>
- O' Brien, C. M., C. J. Fox, B. Planque e J. Casey. 2000. *Fisheries: climate variability and North Sea cod*. Nature 404:142. 9 marzo 2000.
- Paeth, H., Hense, A., Glowienka-Hense, A., Voss, S., Cubasch, U., (1999) *The North Atlantic Oscillation as an indicator for greenhouse-gas induced regional climate change, Climate Dynamics: observational, theoretical and computational research on the climate system*, Vol. 15 (Numero 12), 1999, 953
- Parkinson, C. L., D. J. Cavalieri, P. Gloersen, H. J. Zwally e J. C. Comiso. 1999. *Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996*. Journal of Geophysical Research 104(C9):20, 837-20, 856. 15 settembre 1999.
- Parkinson, C. 1992. *Spatial patterns of increases and decreases in the length of the sea-ice season in the north polar region, 1979-1986*. Journal of Geophysical Research 97(14):388.
- Parmesan, C. 1996. *Climate change and species range*. Nature 382:765-766.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu C., Hill, J.K., Thomas, C.D., Descimon [num] J. H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammara, T., Tennent, W.J., Thomas, J.A., Warren, M., (1999) *Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming*, Nature, Volume 399, Numero 6736, pp. 579 – 583, 1999.
- Pielke, R. A. e C. W. Landsea. 1999. *La Niña, El Niño, and Atlantic hurricane damages in the United States*. Bulletin of the American Meteorological Society, 6 aprile 1999. (Internet: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/LandSea/lanina/index.html>)
- Posch, M., P. Tamminen, M. Starr e P. E. Kauppi. 1995. *Climatic warming and carbon storage in boreal soils*. RIVM, Paesi Bassi.
- Rahmstorf, S. 1999. *Shifting seas in the greenhouse?* Nature 399. 10 giugno 1999.
- Rahmstorf, S. e A. Ganopolski. 1999. *Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model*. Climatic Change 43(2):353-367.

Reuvekamp, A., A. Klein Tank, KNMI, *Change*, giugno 1996, p. 8-10, Paesi Bassi

Revelle, C. G. e S. W. Goulter. 1986. *South Pacific tropical cyclones and the Southern Oscillation*. Mon. Wea. Rev. 114:1138-1145.

Rothrock, D. A., Y. Yu e G. A. Maykut. *Thinning of the arctic sea-ice cover*. Geophysical Research Letters 26(23). 1 dicembre 1999.

Scambos, T.A., Kvaran, G., Fahnestock, M.A., *Improving AVHRR resolution through data cumulation for mapping polar ice sheets*, Remote Sensing of Environments: an interdisciplinary journal, Vol. 69 (Numero 1), 1999, 56-66 (11)

Simon F.B. Tett, Peter A. Stott, Myles R. Allen, William J. Ingham & John F.B. Mitchell (1999), *Causes*

Shindell, D. T., R. L. Miller, G. A. Schmidt e L. Pandolfo. 1999. Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse gas forcing. *Nature* 399:452-455.

Swiss Re. 1999b. World insurance in 1998. Sigma 7 Swiss Reinsurance Company, Zurigo. (Internet: <http://www.swissre.com/e/publications/publications/sigma/sigma9907.html>)

Swiss Re. 2000a. Natural catastrophes and man-made disasters in 1999. Sigma Report No. 2/2000. Swiss Re, Zurigo

Tett, S. F. B., P. A. Stott, M. R. Allen, W. J. Ingham e J. F. B. Mitchell. 1999. *Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface*, *Nature*, Vol. 399, 10 giugno 1999.

Timmerman, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif e E. Roeckner. 1999. *Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming*. *Nature* 398. 22 aprile 1999.

Tol, R. e P. Vellinga. 1998. *Climate change, the enhanced greenhouse effect and the influence of the sun: a statistical analysis*. *Theoretical and Applied Climatology* 61:1-7.

Trenberth, K. E. 1996. *Global climate change*. From an Abstract of Remarks by Scientists at the National Press Club, Washington, D.C., Climate Analysis Section, Newsletter 1(1). 3 novembre 1996.

United Nations. 1994. *Disasters around the world—a global and regional view*. U.N. World Conference on Natural Disaster Reduction, Yokohama, Japan, May 1994. IDNDR Information Paper No.4.

Vaughan, D. G. 1998. *Antarctica: climate change and sea level*. Statement prepared by Ice and Climate Division, British Antarctic Survey. (Internet: <http://bsweb.nerc-bas.ac.uk/public/icd>)

Vellinga, P. e R. Tol. 1993. *Climate change: extreme events and society's response*. *Journal of Reinsurance* 1(2):59-72. C. Lilly, ed.

Vinnikov, K. Y., A. Robock, R. J. Stouffer, J. E. Walsh, C. L. Parkinson, D. J. Cavalieri, J. F. B. Mitchell, D. Garrett e V. F. Zakharov. 1999. *Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent*. *Science* 286:1934-1937. 3 dicembre 1999.

WASA Group. 1998. *Changing waves and storms in the Northern Atlantic?* Bulletin of the American Meteorological Society 79(5), maggio 1998.

Wigley, T. M. L. 1999. *The science of climate change, global and U.S. perspectives*. National Center for Atmospheric Research, PEW Center on Global Climate Change, 29 giugno 1999.

Wood, R.A., Keen, A.B., Mitchell, J.F.B. and Gregory, J.M., *Changing spatial structure of the thermohaline circulation in response to atmospheric CO₂ forcing in a climate model*, *Nature*, Vol. 401 (Numero 6752), 1999, 508 (1)

Zwiers, F. W. e V. V. Kharin. 1998. *Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂-doubling*. *Journal of Climate* 11:2200-2222.1

NOTE

- 1 Per ulteriori dati sull'andamento della temperatura negli ultimi 100 anni e per altre rilevazioni sul clima, visitare l'indirizzo Web <http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/research/1999/ann/ann99.html>.
- 2 Vedere anche: <http://www.noaaneews.noaa.gov/stories/s399.htm>
- 3 Per ulteriori informazioni vedere anche: <http://gcmd.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/md/>.
- 4 Vedere anche: http://www.uea.ac.uk/menu/acad_depts/env/all/resgroup/cserge
- 5 Vedere anche: <http://www.newscientist.com/ns/19990501/contents.html>
- 6 Vedere anche: <http://www.giss.nasa.gov/research/intro/sbindell.04/index.html>
- 7 Vedere anche: <http://www.ncdc.noaa.gov/ol/reports/chinaflooding/chinaflooding.htm#sites>
- 8 Vedere: www.bom.gov.au/bmrc/clcb/bma/wgcm_1.html



attenzione
RIVISTA WWF PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Info:
Redazione di:
“Attenzione”
WWF Italia
Via Po, 25/C - 00189 Roma
Tel. 06.84497455 - fax 06.84497212