



Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima
Consiglio Nazionale delle Ricerche



Clima, cambiamenti climatici globali e loro impatto sul territorio nazionale

ISBN: 978-88-903028-0-0

Quaderni dell'ISAC, volume 1

Edito da ISAC-CNR, Via Gobetti 101, 40129 Bologna

Curatore: Antonello Provenzale,
ISAC-CNR, Corso Fiume 4, 10133 Torino
a.provenzale@isac.cnr.it

E' vietata la riproduzione, anche parziale,
senza l'autorizzazione scritta dell'ISAC-CNR

In copertina:
vista dal lago Nero sul massiccio del Gran Paradiso (foto A. Provenzale)

ISBN: 978-88-903028-0-0



Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima
Consiglio Nazionale delle Ricerche



Il clima, i suoi cambiamenti e l'impatto che questi esercitano sull'ambiente e sulla società umana sono temi di grande interesse scientifico e di elevata rilevanza sociale. Di fronte alle sfide imposte dai cambiamenti climatici, la società si trova a dover prendere decisioni talvolta difficili. E' necessario cercare un equilibrio fra la mitigazione delle cause di tali cambiamenti e l'adattamento agli effetti da essi prodotti, trasformando la necessità di agire in un motore di sviluppo economico e sociale.

A parere di chi scrive, le decisioni sulle strategie per affrontare in modo responsabile le trasformazioni climatiche devono essere fondate su solide conoscenze scientifiche e su dati oggettivi. Per questo motivo, un gruppo di ricercatori dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, impegnati in prima persona nelle ricerche in corso, ha ritenuto importante riassumere le conoscenze oggi disponibili sul clima, sui cambiamenti climatici globali e sul loro impatto sul territorio nazionale. Il risultato è questo piccolo volume, che focalizza l'attenzione soprattutto sugli studi svolti negli ultimi anni e su quegli aspetti del cambiamento climatico che sono di particolare rilievo per il territorio italiano.

Occorre infine ricordare che senza ricerca e senza innovazione la nostra società è condannata al declino e destinata a perdere la competizione globale con altre realtà che sanno rinnovarsi e investire nel futuro. Lo studio del clima è un ambito di ricerca essenziale, che richiede notevoli energie e l'interazione continua fra discipline e competenze diverse. Ci auguriamo che questo piccolo volume riesca a comunicare l'importanza e la complessità del problema, l'opportunità di incrementare le ricerche sui cambiamenti climatici e la necessità di sviluppare senza indugio strategie di mitigazione e adattamento.

Bologna, 21 settembre 2009

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Domenico Anfossi'.

Domenico Anfossi
Direttore ISAC-CNR



Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima
Consiglio Nazionale delle Ricerche



Clima, cambiamenti climatici globali e loro impatto sul territorio nazionale

**riassunto dei risultati scientifici
aggiornato a giugno 2009**

curatore:

A. Provenzale

autori:

S. Corti, S. Decesari, F. Fierli, S. Fuzzi,
A. Provenzale, C. Sabbioni, R. Santoleri, V. Vitale

contributi specifici e revisione del testo:

S. Argentini, F. Barnaba, M. Baudena, F. Bignami,
P. Bonasoni, B. Buongiorno Nardelli, A. Buzzi, F. Cairo,
D. Cava, M. Cervino, R. Cesari, P. Cristofanelli, L. Di Liberto,
M.C. Facchini, M. Fantini, G.P. Gobbi, J. von Hardenberg, A. Lanotte,
G.L. Liberti, U. Magnea, P. Martano, P. Messina, M. Moriconi, E. Palazzi,
M. Premuda, R. Purini, A.M. Sempreviva, F. Tampieri, T. Tirabassi,
C. Tomasi, S. Trini Castelli, A. Viola, R. Viterbi

revisori esterni:

V. Artale, ENEA CR Casaccia, Roma
B. Carli, L. Palchetti, Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara", CNR, Firenze
F. D'Andrea, Laboratoire de Météorologie Dynamique, CNRS, Parigi, Francia
F. Giorgi, Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste
A. Navarra, Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici, Lecce

INDICE

SINOSSI	pag. 3
Elenco delle fonti istituzionali	pag. 5
1. Dinamica e variabilità naturale del clima	pag. 6
2. Riscaldamento globale e impatto del cambiamento climatico	pag. 12
3. Cambiamento climatico in Italia	pag. 14
4. Cause del riscaldamento globale e ruolo degli effetti antropici	pag. 17
5. Scenari globali e regionali	pag. 23
<i>5a. Modelli numerici del sistema climatico</i>	pag. 23
<i>5b. Scenari globali</i>	pag. 26
<i>5c. Impatti attesi sul territorio nazionale</i>	pag. 30
6. Elementi di incertezza e aree ove potenziare la ricerca	pag. 32
7. Conclusioni	pag. 37
Appendice 1. Riferimenti bibliografici aggiuntivi, a completamento delle fonti istituzionali.	pag. 39
Appendice 2. Glossario.	pag. 54

SINOSI

Il dibattito politico sul cambiamento climatico e sulle strategie di mitigazione e adattamento richiede, a nostro parere, che la comunità scientifica italiana debba impegnarsi a sintetizzare e rendere disponibili al mondo politico e alla società le conoscenze quantitative oggi esistenti sul clima e sui cambiamenti climatici. Questo documento, preparato da ricercatori dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR, rappresenta un contributo in tal senso ed è motivato dalla visione di una scienza e di una politica capaci di lavorare insieme, nel rispetto reciproco. Riassumiamo qui i risultati principali, discussi in dettaglio nel seguito.

(1) L'analisi dei dati diretti di temperatura degli ultimi 150 anni e delle ricostruzioni negli ultimi mille anni indica un aumento delle temperature globali di circa 0.6-0.8 °C nell'ultimo secolo, con un tasso di crescita in aumento. I dieci anni più caldi degli ultimi cento anni si sono verificati tutti nel periodo 1997-2008. Le temperature globali delle ultime decadi sono state quasi sicuramente più alte che in ogni altro periodo di durata analoga degli ultimi quattrocento anni e, probabilmente, anche degli ultimi mille anni. Nelle regioni polari, l'aumento di temperatura è stato anche più del doppio della media globale. Il riscaldamento globale comporta effetti, già parzialmente in atto, quali aumento del livello del mare, alluvioni, incendi più estesi, siccità, desertificazione, fusione e possibile collasso di ghiacciai terrestri, riduzione del ghiaccio marino, diffusione di malattie, collasso di ecosistemi, migrazioni di massa.

(2) Negli ultimi venti anni, la dinamica del clima è stata oggetto di analisi accurata da parte della comunità scientifica internazionale. I risultati delle ricerche condotte fino al 2005, pubblicati su riviste scientifiche con procedura di revisione rigorosa ("*peer-review*"), sono riassunti nel 4° rapporto del Comitato Intergovernativo per lo studio dei Cambiamenti Climatici (IPCC 2007). Questi risultati hanno portato a concludere che, con altissima probabilità, la principale causa di cambiamento climatico è l'attività antropica, con l'immissione di gas serra quali biossido di carbonio (o anidride carbonica, CO₂) e metano (CH₄), l'immissione di aerosol ed altre sostanze inquinanti e le estese modificazioni nell'uso del territorio. In particolare, i livelli atmosferici attuali di CO₂ e CH₄ sono i più alti degli ultimi 650 mila anni e sono stati raggiunti con una rapidità mai osservata prima.

(3) Il ruolo cruciale svolto dalle attività umane e il fatto che l'attuale modello di sviluppo si basi su una loro sostanziale crescita futura richiedono previsioni quantitative dei cambiamenti climatici attesi per i prossimi decenni. Le proiezioni climatiche sono ottenute mediante modelli fisico-matematici che utilizzano il calcolo numerico, sulla base di scenari di sviluppo che ipotizzano vari e verosimili tassi di emissione di gas serra e aerosol. Queste proiezioni sono di tipo probabilistico e, seppur affette da margini di incertezza, non soffrono delle limitazioni temporali delle previsioni meteorologiche deterministiche, permettendo una stima quantitativa della probabile evoluzione del clima globale del nostro pianeta.

(4) L'ultima generazione di modelli del clima riproduce con buona approssimazione l'andamento temporale negli ultimi cento anni di molte grandezze, come la temperatura superficiale media terrestre, la sua distribuzione su scala continentale, la circolazione generale atmosferica e oceanica e l'estensione del ghiaccio marino, assicurando confidenza nelle capacità predittive dei modelli. Sebbene ci siano ancora significative incertezze, dovute alla insoddisfacente conoscenza di molti processi climatici potenzialmente rilevanti, tutti i modelli concordano nello stimare che il riscaldamento globale proseguirà nel corso del XXI secolo.

(5) I dati più recenti indicano che la concentrazione di CO₂ e di altri gas serra sta aumentando più rapidamente di quanto ipotizzato nel peggior scenario di emissione, con il rischio di una

accelerazione del riscaldamento globale. Per la gestione di questi cambiamenti possono essere adottate sia procedure di mitigazione (riduzione delle emissioni e tecniche di confinamento della CO₂), che misure di adattamento ai rischi del cambiamento climatico.

(6) Nel 2005, l'Unione Europea ha formalizzato la proposta di limitare la quantità totale di gas serra in atmosfera ad un livello per cui la temperatura media globale della superficie della Terra non aumenti più di 2 °C rispetto ai livelli precedenti l'era industriale. La scelta di un limite di 2 °C è indicativa: un aumento della temperatura maggiore di questo valore viene infatti considerato eccessivo, per i rischi ed i costi associati.

(7) La stima della emissione totale di gas serra (in miliardi di tonnellate, Gt, di CO₂ equivalente) corrispondente ad un aumento di temperatura di 2 °C è ancora in discussione. Recenti analisi dei risultati disponibili (aprile 2009) suggeriscono che emissioni totali nel periodo 2009-2050 inferiori alle 700 Gt di CO₂ equivalente comportino una probabilità del 75% di non superare la soglia dei 2 °C entro il 2100. Tuttavia, in base a scenari che prevedono anche una contemporanea riduzione delle emissioni di polveri fini (alcune delle quali hanno un effetto netto di raffreddamento), la probabilità di riuscire a contenere il riscaldamento al di sotto della soglia dei 2 °C diventa notevolmente più bassa.

(8) Nelle regioni polari del nostro pianeta il limite di 2 °C è molto più vicino, se non addirittura raggiunto. Ciò dà una chiara indicazione della grande complessità del sistema climatico e rende evidente che, alla visione globale del problema, occorre affiancare anche una visione regionale. Tale approccio permetterà di comprendere e parametrizzare meglio sia i processi che caratterizzano aree specifiche del nostro pianeta che l'impatto delle attività umane maggiormente legate alla distribuzione geografica delle sorgenti di inquinanti.

(9) L'analisi dei dati e le proiezioni dei modelli climatici indicano che l'area mediterranea è una "hot-spot", ovvero un'area particolarmente sensibile al cambiamento climatico. Le serie storiche di temperatura e precipitazione nell'ultimo secolo indicano che il clima in Italia sta diventando più caldo e più secco, in particolare al centro-sud, con la contemporanea tendenza all'aumento delle precipitazioni intense ed un maggiore rischio di eventi siccitosi in molte aree mediterranee. Un aumento di precipitazioni intense comporta peraltro un aumento del rischio di alluvioni, frane ed erosione dei suoli. Nell'Italia nord-occidentale e nella regione alpina, l'analisi dei dati indica che negli ultimi cinquant'anni le temperature medie sono aumentate di oltre 1 °C, la copertura nevosa si è fortemente ridotta e molti ghiacciai alpini si sono ritirati anche per più di 500 metri. In generale, è stata anche misurata un'espansione nella distribuzione di parassiti e insetti nocivi.

Di fronte alla sfida del cambiamento climatico e dei suoi effetti, riteniamo necessario uno sforzo congiunto della scienza e della politica, basato su conoscenze scientifiche attuali ed oggettive, per affrontare e mitigare i rischi dei cambiamenti in atto e trasformare un potenziale pericolo in un motore di sviluppo economico e sociale. In ambito scientifico, gli attuali modelli climatici hanno ancora significative incertezze nel rappresentare diversi processi fisici, chimici e biologici, sui quali è necessario continuare lo studio. Analogamente, i modelli sono ancora poco efficaci nella rappresentazione del clima di regioni geografiche di dimensioni ridotte, quali l'area mediterranea ed il territorio italiano, e sono in buona parte mancanti stime quantitative dell'impatto dei cambiamenti climatici sul territorio nazionale. Gli autori del presente documento ritengono essenziale un incremento delle attività nazionali di ricerca sul clima e si rendono disponibili a fornire ai decisori il supporto tecnico e scientifico necessario per una valutazione e pianificazione efficace.

Elenco delle fonti istituzionali

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <http://www.ipcc.ch/>
IPCC Fourth Assessment Report, 2007.

WGI: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>

WGII: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg2.htm>

WGIII: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>

IPCC Special Report. Emissions Scenarios, 2000.

<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>

Commissione delle Comunità Europee, 2007.

Limitare il surriscaldamento dovuto ai cambiamenti climatici a +2 gradi Celsius.

La via da percorrere fino al 2020 e oltre.

http://ec.europa.eu/environment/climat/future_action.htm

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0002:FIN:IT:PDF>

European Environment Agency

Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment

http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_4

Organizzazione Mondiale della Sanità - World Health Organization.

Climate Change and Human Health, 2009.

<http://www.who.int/globalchange/climate/en/>

World Climate Research Programme (WCRP).

<http://wcrp.wmo.int/wcrp-index.html>

International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). <http://www.igbp.net/>

Arctic Council and the International Arctic Science Committee (IASC), 2004.

Arctic Climate Impact Assessment (ACIA).

Synthesis Report "Impacts of a Warming Arctic", 2004. <http://www.acia.uaf.edu/>

Aerosols, Clouds, Precipitation and Climate Initiative, ACPC.

Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study, iLEAPS.

http://ileaps.org/acpc/index.php?option=com_content&task=view&id=156&Itemid=176

NATO Science for Peace and Security. <http://www.nato.int/science/index.html>

NATO Desertification Workshop: Desertification in the Mediterranean Region. A Security

Issue. <http://www.nato.int/science/news/2003/docu/031211c-desertification.pdf>

The National Academy of Sciences, Washington DC, USA, 2006.

Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years.

http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11676#toc

National Science Foundation, Arlington, VA, USA, 2009. Climate Change Report, 2009.

http://www.nsf.gov/news/special_reports/climate/index.jsp

La lista completa e le indicazioni bibliografiche degli articoli scientifici cui il testo si riferisce sono riportate nell'appendice I.

1. Dinamica e variabilità naturale del clima

Con il termine "clima" si intende l'insieme delle condizioni meteorologiche e ambientali che caratterizzano una regione geografica, mediate su un tempo sufficientemente lungo (tradizionalmente trent'anni). Dal punto di vista fisico, chimico e biologico, il clima è un sistema dinamico ("sistema climatico") straordinariamente attivo e complesso, che include molte componenti distinte (oceano, atmosfera, criosfera, biosfera, litosfera) in grado di interagire tra loro su scale di spazio e di tempo anche notevolmente diverse. Lo stato del clima è determinato sia da cause esterne (dette forzanti), come i cambiamenti dell'irraggiamento solare, che da cause interne, dovute alla variabilità intrinseca del sistema climatico stesso.

La radiazione solare rappresenta la principale fonte di energia del sistema climatico¹. La superficie del nostro pianeta si riscalda a causa dell'energia ricevuta dal Sole sotto forma di radiazione luminosa. Non tutta l'energia incidente viene però assorbita: una parte di essa viene riflessa, sia dalla superficie terrestre che dall'atmosfera, senza contribuire a modificare la temperatura della Terra. La frazione di energia incidente che viene riflessa è misurata dall'*albedo*.² Se non vi fossero l'atmosfera e l'oceano, la temperatura di equilibrio della superficie del nostro pianeta sarebbe regolata semplicemente dalla distanza della Terra dal Sole e dall'albedo terrestre. Senza l'atmosfera e l'oceano, la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di circa -18 °C, molto minore di quella effettivamente osservata.

La presenza del sottile strato di atmosfera attorno alla Terra introduce una significativa ridistribuzione del calore fra la superficie terrestre, la bassa atmosfera e gli strati atmosferici più alti. I raggi solari incidenti attraversano l'atmosfera (che risulta quasi trasparente alla radiazione luminosa visibile) e vengono in parte riflessi e in parte assorbiti dalla superficie terrestre e dall'oceano, che si scaldano e riemettono, a loro volta, parte dell'energia assorbita in forma di radiazione infrarossa. Una frazione di questa è assorbita da alcuni gas presenti in atmosfera: innanzitutto il vapor d'acqua, a cui si aggiungono (in ordine di importanza) il biossido di carbonio (anidride carbonica, CO₂), il metano (CH₄) e l'ozono (O₃). Insieme, queste sostanze costituiscono i "gas serra" (GHG, "*GreenHouse Gases*"). L'energia assorbita dai gas serra viene riemessa in tutte le direzioni, contribuendo a riscaldare la superficie terrestre. In conseguenza di questo, la temperatura della superficie terrestre raggiunge in media i +15 °C (ben 33 °C in più rispetto ai -18 °C della temperatura di equilibrio radiativo in assenza di atmosfera). Questo fenomeno, del tutto naturale, è chiamato "effetto serra"; in prima approssimazione è tanto maggiore quanto più grande è la quantità di gas serra presenti in atmosfera.

La figura 1a mostra lo spettro di radianza in onda lunga con cui la Terra si raffredda disperdendo energia verso lo spazio, ottenuto da ricercatori dell'Istituto di Fisica Applicata del CNR con un esperimento effettuato da pallone stratosferico. Si tratta della prima misura spettralmente risolta di tutta la radianza che include anche le componenti a grande lunghezza d'onda al di sotto di 500 cm⁻¹. La curva verde indica l'emissione dalla superficie terrestre mentre la curva rossa, ottenuta dalle misure stratosferiche, indica l'emissione effettiva verso lo spazio. La differenza fra le due curve è riportata in figura 1b e costituisce una misura

¹ Un'altra sorgente di energia, che può giocare un ruolo significativo nel bilancio energetico della dinamica oceanica, è associata alle forze mareali e alla dissipazione delle onde di marea sulla piattaforma continentale. L'energia geotermica dovuta al decadimento radioattivo di nuclidi nel mantello terrestre è in generale trascurabile per il bilancio energetico globale del clima attuale e può giocare un ruolo solo in particolari condizioni, come sul fondo delle grandi calotte glaciali artiche ed antartiche.

² Per la Terra nelle condizioni attuali, l'albedo media determinata dalla riflettività della superficie terrestre, degli oceani, dell'atmosfera e delle nubi è circa il 30%.

diretta della radianza intrappolata dall'atmosfera e dai gas serra e fornisce una quantificazione dell'effetto serra.

La presenza dell'atmosfera e dell'oceano permette anche un efficiente trasporto di calore dall'equatore verso i poli. I tropici e le regioni equatoriali ricevono infatti più radiazione solare di quanta radiazione infrarossa riemettono, mentre il contrario avviene alle medie ed alte latitudini. Il sistema climatico trasporta calore dalle regioni tropicali verso i poli, grazie alle correnti oceaniche (come la Corrente del Golfo nell'Oceano Atlantico, che sposta acqua calda dai tropici verso nord) ed al sistema della circolazione generale dell'atmosfera. Grazie a questo trasporto di calore, la differenza di temperatura fra equatore e poli è minore di quella che si avrebbe in assenza di oceano ed atmosfera.

Spettro di radianza in onda lunga: REFIR-PAD, Teresina; Brasile, 30 giugno 2005

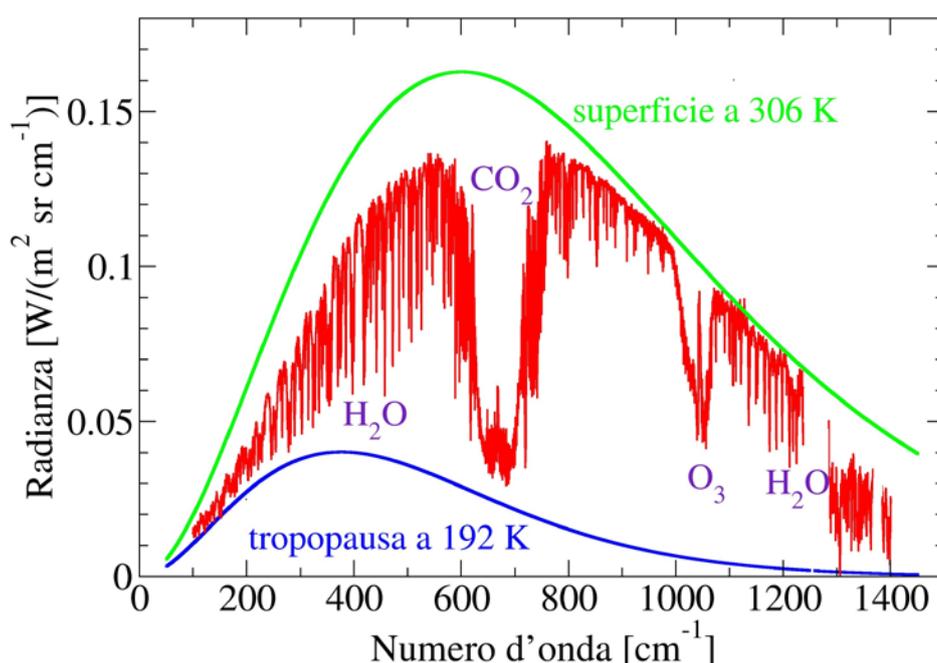


Figura 1a. Spettro di radianza in onda lunga (in Watt per m² per steradiante per cm⁻¹) con cui la Terra si raffredda disperdendo energia verso lo spazio, misurato da ricercatori dell'Istituto di Fisica Applicata del CNR con un esperimento effettuato in Brasile da pallone stratosferico a 34 km di quota. Curva verde: emissione di corpo nero della superficie terrestre a 306 K (gradi Kelvin) (circa +32.85 °C); curva blu: emissione di corpo nero della tropopausa a 192 K (circa -81.15 °C); curva rossa: radianza misurata nell'esperimento. Si tratta della prima misura spettralmente risolta di tutta la radianza includendo anche le componenti a grande lunghezza d'onda. Si nota, in particolare, il contributo dei principali gas che causano l'effetto serra. (Riadattata da Palchetti et al., *Atmos. Chem. Phys.* 2006.)

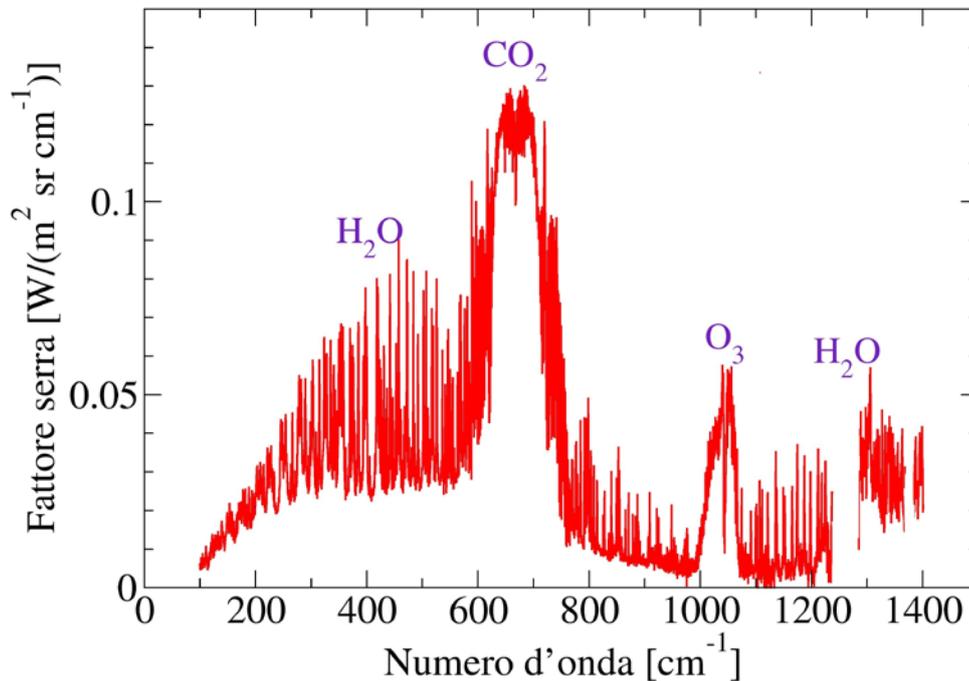


Figura 1b. Quantificazione dell'effetto serra, ottenuta dalla differenza fra l'emissione della superficie terrestre (curva verde in figura 1a) e l'emissione misurata in stratosfera (curva rossa in figura 1a). Le misure sono state effettuate da ricercatori dell'Istituto di Fisica Applicata del CNR con un esperimento effettuato da pallone stratosferico. (Riadattata da Palchetti et al., *Atmos. Chem. Phys* 2006.)

Il clima non deve essere considerato come qualcosa di statico ed invariabile, perché le caratteristiche climatiche di ciascuna regione e dell'intera Terra variano nel tempo anche in modo molto evidente. I dati paleoclimatici³ indicano che negli ultimi tre milioni di anni il clima della Terra ha subito pesanti variazioni, caratterizzate dall'alternanza fra periodi glaciali e interglaciali che hanno portato a cambiamenti nella temperatura media globale di alcuni gradi centigradi. La figura 2 riporta la variazione, negli ultimi 800 mila anni, della temperatura stimata dalla misura della concentrazione di deuterio (isotopo dell'idrogeno) nel ghiaccio (curva superiore) e della concentrazione di CO₂ nelle bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio (curva inferiore), ricavate dall'analisi della carota di ghiaccio antartico ottenuta nell'ambito del Progetto Europeo EPICA svoltosi nella base antartica franco-italiana di DomeC.

³ La Paleoclimatologia studia i climi del passato e le fluttuazioni climatiche che si sono succedute sul nostro pianeta. Per ottenere informazioni sul paleoclima, ovvero sulle condizioni climatiche anteriori agli ultimi due secoli, per i quali sono disponibili misure dirette di temperatura e precipitazione, ci si affida a ricostruzioni delle grandezze climatiche attraverso i cosiddetti *proxy data* (dati "per procura"). Per esempio, si utilizza il contenuto di isotopi radioattivi nei sedimenti marini per ricavare informazioni sulla temperatura e sulla precipitazione nei climi del passato. Altri esempi importanti sono lo studio degli anelli degli alberi, l'analisi dei contenuti isotopici dei coralli marini e dei pollini nei sedimenti lacustri, che forniscono preziose informazioni paleoclimatologiche. Importantissime indicazioni vengono poi dalla misura del contenuto di isotopi nei ghiacci polari e dall'analisi chimica della composizione dei gas racchiusi negli strati profondi di ghiaccio. Il programma di ricerca europeo EPICA, cui l'Italia partecipa attivamente, è volto al carotaggio dei ghiacci polari antartici fino a profondità superiori ai 3000 metri e alla misura dei contenuti isotopici e chimici dei ghiacci estratti durante le operazioni di carotaggio. Anche se i dati *proxy* non forniscono una misura diretta della temperatura e delle condizioni passate, rimangono comunque una essenziale fonte di informazione sulla variabilità climatica negli ultimi cinque milioni di anni.

Le misure di CO₂ e radioisotopi nei ghiacci antartici suggeriscono che al termine di un periodo glaciale la crescita della concentrazione di CO₂ atmosferica segua, con un ritardo di circa 600-1000 anni, la crescita della temperatura in Antartide. Il meccanismo della deglaciazione sembra dunque molto complesso, con l'aumento della temperatura in Antartide seguito dall'aumento di CO₂ atmosferica, seguito a sua volta dall'aumento della temperatura nell'emisfero nord. Questo risultato è stato talvolta considerato un'indicazione del fatto che la concentrazione di biossido di carbonio in atmosfera sia sempre un prodotto del riscaldamento e non viceversa. Tuttavia, occorre tenere conto delle scale di tempo che si stanno considerando. Su scale di tempo paleoclimatiche, la crescita della temperatura in una fase di deglaciazione impiega circa 5000 anni per essere completata. In questo caso, la situazione più probabile è che la crescita iniziale della temperatura sia innescata da fattori diversi rispetto alla concentrazione di CO₂ atmosferica, che inizia effettivamente a crescere in seguito all'aumento di temperatura. Dopo il periodo iniziale, le maggiori concentrazioni di CO₂ atmosferica aumentano l'effetto serra e dunque amplificano e accelerano il riscaldamento. Sulle scale di tempo più recenti, invece, la crescita della concentrazione di CO₂ atmosferica iniziata con l'era industriale, di gran lunga più rapida di quella osservata al termine di un periodo glaciale, è stata indotta dall'attività umana, indipendentemente dallo stato climatico, e l'effetto netto dell'aumentata concentrazione di gas serra è un evidente riscaldamento.

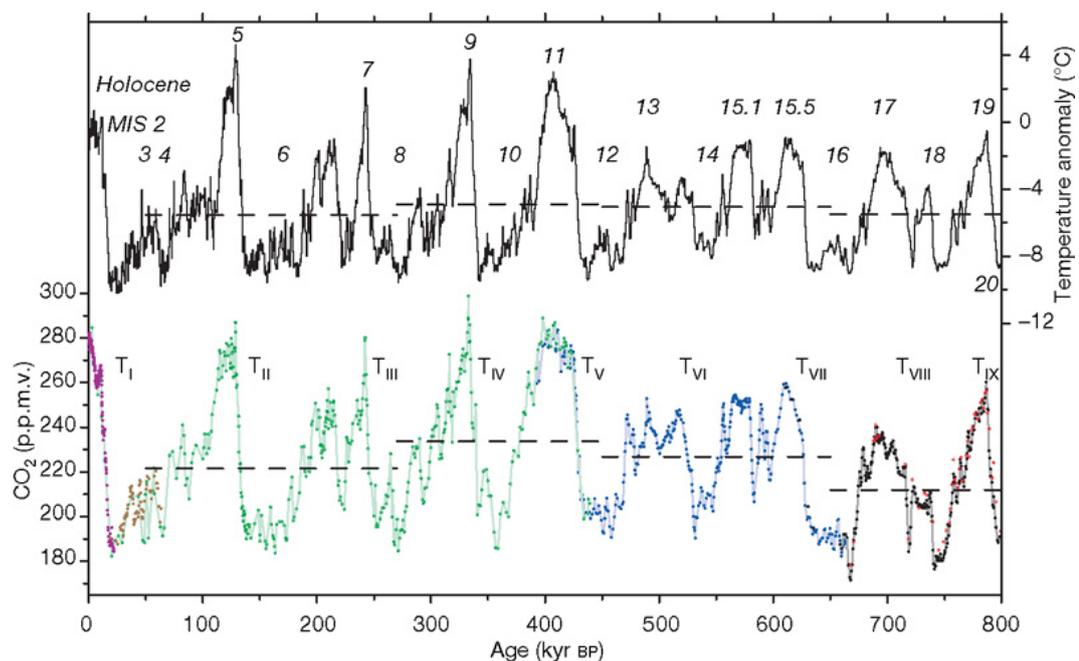


Figura 2. Curva superiore: anomalia di temperatura ricostruita dalle misure di concentrazione di deuterio nella carota di ghiaccio EPICA - Dome C (l'anomalia è calcolata rispetto alla temperatura media dell'ultimo millennio). La curva in basso riporta i dati di concentrazione di CO₂ ottenuti dall'analisi delle bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio. I simboli riportati vicino alle curve indicano specifici momenti o eventi nell'alternanza fra periodi glaciali ed interglaciali. Come d'uso nella rappresentazione dei dati paleoclimatici, la scala del tempo, in migliaia di anni, indica la data di formazione/deposizione del ghiaccio rispetto al presente (BP: Before Present, ovvero prima del presente), e quindi aumenta andando verso il passato. In altre parole, il tempo reale "scorre" da destra verso sinistra. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, Luthi et al. 2008, copyright 2008.)

Su periodi di tempo più vicini a noi, la figura 3 (tratta dal rapporto sulle ricostruzioni di temperatura superficiale terrestre negli ultimi 2000 anni, compilato dall'Accademia Nazionale delle Scienze degli USA) mostra alcune ricostruzioni, indicate dalle varie curve e specificate nella legenda, della temperatura media globale e di quella dell'emisfero nord dal

900 al 2000 (si osservi che, a differenza della figura 2, la scala di figura 3 mostra tempi crescenti da sinistra verso destra). E' da notare come sia i dati paleoclimatici che le ricostruzioni delle temperature negli ultimi millenni mostrino sia fluttuazioni di lungo periodo, su scale di tempo di centinaia di anni, che variabilità su scale più brevi, di poche decine di anni. Molto evidente risulta inoltre la crescita della temperatura globale negli ultimi 150 anni, cui dedichiamo il prossimo capitolo.

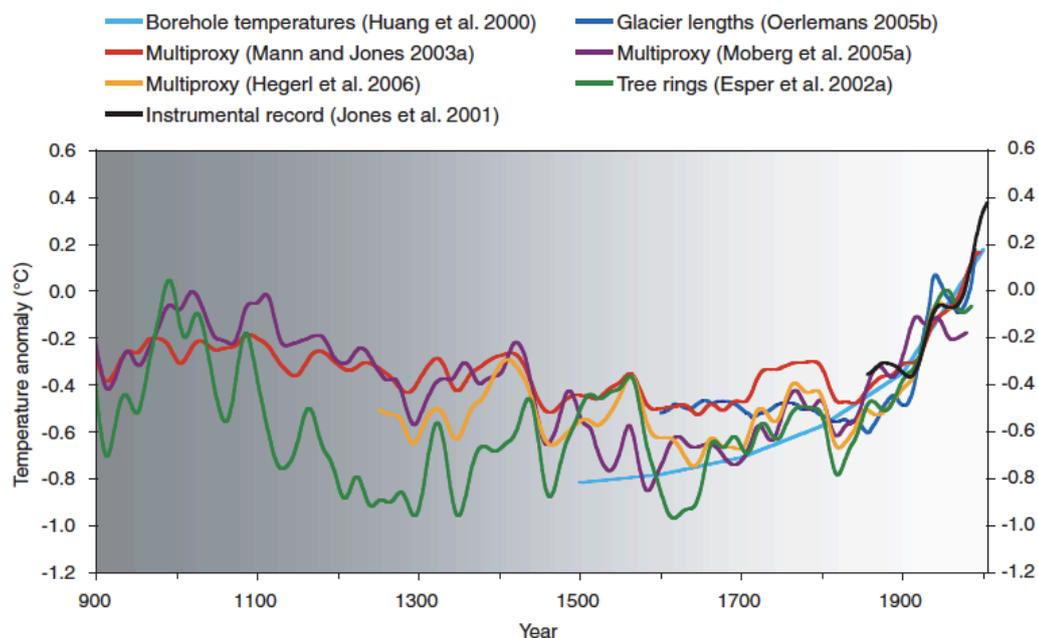


Figura 3. Ricostruzioni delle anomalie della temperatura globale e di quella dell'emisfero nord nel periodo dal 900 al 2000 (curve colorate, come indicato nella legenda) e dati strumentali (curva nera che inizia nel XIX secolo). Le curve sono state filtrate con una media mobile a 40 anni. Le anomalie di temperatura sono riferite alla media della serie di dati strumentali nel periodo 1961-1990. (Tratta da *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*, National Academy of Sciences, Washington DC, USA, 2006.) (Reprinted with permission from the National Academies Press, Copyright 2006, National Academy of Sciences.)

Parte della variabilità del clima può essere ascritta alla variazione delle forzanti naturali del sistema climatico. Tali variazioni sono principalmente legate a cambiamenti nei flussi di energia che agiscono sul sistema climatico; in prima istanza, la quantità di energia solare che incide sulla Terra. Questa può variare sia a causa di cambiamenti nella quantità di energia emessa dal Sole⁴, che per la variazione delle principali caratteristiche dell'orbita della Terra (eccentricità, obliquità, posizione degli equinozi)⁵, con i conseguenti cambiamenti nella quantità e distribuzione stagionale dell'energia solare incidente alle varie latitudini. L'alternanza fra periodi glaciali e interglaciali è associata, almeno in parte, alle variazioni dei parametri dell'orbita terrestre.

⁴ La "costante solare", che misura la quantità di energia solare che raggiunge l'atmosfera terrestre, vale in media circa 1366 Watt/m² e mostra variazioni temporali, per esempio con il ciclo undecennale delle macchie solari.

⁵ L'orbita della Terra è, in prima approssimazione, un'ellisse di cui il Sole occupa uno dei fuochi. Questo sarebbe strettamente vero se nell'Universo non vi fossero altri corpi celesti e Sole e Terra fossero puntiformi. In realtà, le caratteristiche orbitali della Terra variano lentamente nel tempo, a causa delle perturbazioni indotte dal moto degli altri pianeti del Sistema Solare, principalmente Giove.

Un'altra forzante naturale⁶ è rappresentata dall'attività vulcanica. Questa può immettere in atmosfera grandi quantità di aerosol che, riflettendo verso lo spazio la radiazione solare, possono raffreddare il clima terrestre; tuttavia, almeno nel caso delle eruzioni registrate negli ultimi secoli, il loro effetto non è durato più di qualche anno. Su scale di tempo molto più lunghe (decine e centinaia di milioni di anni), anche la dinamica dell'interno della Terra può influire sul clima globale, con effetti dovuti ad eruzioni vulcaniche di grande estensione e modifiche nelle concentrazioni di gas serra e di aerosol atmosferici.

Come accennato all'inizio di questo capitolo, la variabilità del clima è anche dovuta a meccanismi interni al sistema climatico stesso e, in particolare, alla presenza di numerosi processi di "retroazione" ("*feedback*"). Questi processi possono attenuare (retroazione negativa) o amplificare (retroazione positiva) la risposta del sistema a variazioni delle forzanti esterne o a perturbazioni interne, introducendo fenomeni di instabilità.

Per esempio, una diminuzione dell'estensione delle calotte glaciali continentali (come i ghiacci della Groenlandia o dell'Antartide e, nell'ultimo periodo glaciale, delle calotte glaciali della Fennoscandia e Laurentide) può essere causa di una diminuzione dell'albedo terrestre (il suolo riflette meno radiazione solare rispetto ad una superficie ghiacciata) e, di conseguenza, di un aumento dell'energia solare assorbita dal pianeta, con relativo aumento della temperatura sulla superficie terrestre e ulteriore diminuzione dei ghiacci. Analogamente, la diminuzione della vegetazione arbustiva nelle zone aride (dove la disponibilità d'acqua è il principale fattore limitante la crescita delle piante) può comportare un aumento dell'albedo e una riduzione dell'evapotraspirazione. Tali fattori possono indurre una diminuzione dei moti convettivi atmosferici e della precipitazione, riducendo ulteriormente la vegetazione. In particolare, risultati recenti suggeriscono che l'insorgenza di siccità estive alle medie latitudini continentali (come nell'estate 2003 in Europa) sia almeno in parte determinata da condizioni di bassa umidità del suolo e dallo stato della vegetazione: un suolo secco o una vegetazione coltivata, incapace di rispondere a condizioni di temporanea aridità, comportano una possibile diminuzione nei processi convettivi atmosferici ed un aumento della probabilità di estati siccitose. L'interazione fra la concentrazione di CO₂ atmosferica e quella disciolta nelle acque marine è un altro esempio di retroazione positiva: una maggiore concentrazione di biossido di carbonio in atmosfera induce un aumento della temperatura, anche delle acque marine. Acque più calde però trattengono una minore quantità di CO₂ e, quindi, rilasciano ulteriore biossido di carbonio in atmosfera, amplificando il riscaldamento globale.

Una fondamentale catena di retroazioni è associata alla presenza di vapor d'acqua in atmosfera e alla dinamica delle nubi. Sia il vapor d'acqua che l'acqua liquida delle goccioline di nube sono molto efficaci nell'assorbire e riemettere radiazione infrarossa e quindi generare effetto serra. Nel caso delle nubi, i meccanismi di retroazione sono duplici: un aumento della temperatura contribuisce ad un aumento della quantità di acqua in atmosfera e della copertura nuvolosa e, quindi, dell'effetto serra (retroazione positiva). Allo stesso tempo, la aumentata superficie delle nubi accresce l'albedo del pianeta, diminuendo la quantità di energia solare incidente che viene assorbita dalla superficie (retroazione negativa). Il bilancio fra questi due effetti e, quindi, il ruolo delle nubi, dipende dai dettagli del processo di riflessione e assorbimento della radiazione all'interno delle nubi, che a sua volta è fortemente dipendente da quota, struttura microfisica e spessore delle nubi. Quelle alte, come i cirri, possono portare

⁶ Consideriamo l'attività vulcanica una forzante "esterna" in quanto non è presumibilmente influenzata dal sistema climatico su scale di tempo delle centinaia o migliaia di anni. Se consideriamo invece l'evoluzione del nostro pianeta su scale di tempo di centinaia di milioni di anni, il sistema clima e l'interno della Terra devono probabilmente essere considerati insieme. In questo caso, l'attività vulcanica va trattata come una causa "interna" al Sistema Terra nel suo complesso.

ad una preponderanza dell'effetto serra, mentre nel caso di nubi a quote più basse, come strati e cumuli, domina l'effetto di aumento dell'albedo. La struttura microfisica delle nubi dipende inoltre, in modo cruciale, dalle caratteristiche chimiche e fisiche degli aerosol che fungono da nuclei di condensazione per le goccioline di nube. La composizione della popolazione di aerosol, sia di origine naturale che antropica, e il fatto che questa possa contenere diversi componenti, influenza infatti i processi termodinamici alla base della formazione di nubi e precipitazione⁷. Tutti questi fattori contribuiscono a determinare il segno della retroazione (positiva o negativa) delle nubi sul sistema climatico.

2. Riscaldamento globale e impatto del cambiamento climatico

Nonostante la grande variabilità naturale del clima, illustrata nel capitolo precedente, il confronto quantitativo fra le variazioni attuali e i dati storici e paleoclimatici indica che i cambiamenti in atto rappresentano un evento nuovo rispetto a quanto si conosce relativamente al periodo precedente l'era industriale.

Negli ultimi 150 anni, la temperatura superficiale globale del nostro pianeta è aumentata di un valore compreso fra 0.6 e 0.8 °C. Le analisi condotte dalla NASA hanno mostrato che gli otto anni più caldi dell'ultimo secolo si sono verificati tutti dopo il 1998. Un'apposita commissione scientifica dell'Accademia Nazionale delle Scienze degli USA, su richiesta del Congresso statunitense, ha riconsiderato i dati storici e di ricostruzione climatica degli ultimi mille anni (mediante l'analisi di pollini, anelli degli alberi, estensione dei ghiacciai ecc.) ed ha concluso che quasi sicuramente le temperature globali medie delle ultime decadi sono state più alte che in qualunque altro periodo, di lunghezza confrontabile, negli ultimi quattrocento anni. Inoltre, è plausibile che, nelle ultime decadi, l'emisfero nord del nostro pianeta sia stato addirittura più caldo che in qualunque altro periodo, di lunghezza confrontabile, negli ultimi mille anni. Il lavoro del Comitato Intergovernativo per lo studio dei Cambiamenti Climatici (IPCC), dopo un attento esame degli articoli pubblicati nella letteratura scientifica internazionale con procedura di "*peer-review*" ed un'ampia discussione scientifica che ha coinvolto migliaia di ricercatori, ha concluso nel 4° rapporto tecnico pubblicato nel 2007 che "il riscaldamento globale è inequivocabile".

Il riscaldamento globale sta inducendo importanti effetti sull'atmosfera, sull'idrosfera, sulla criosfera, sulla biosfera e sulla complessa rete di interazioni e di cicli biogeochimici che intercorrono fra loro. Le temperature globali più alte sono associate ad un maggior contenuto di calore delle acque oceaniche, sia in superficie che in profondità, come mostrato in figura 4. A causa della dilatazione termica dell'acqua e della fusione dei ghiacci terrestri, nell'ultimo secolo il livello del mare è aumentato di circa 1.8 mm/anno, con notevoli differenze da un bacino ad un altro e una forte tendenza all'accelerazione della crescita nelle ultime decadi. Nei prossimi decenni, l'aumento del livello dell'acqua potrà portare alla scomparsa di numerosi territori abitati in prossimità di coste basse o dei grandi delta fluviali. Questo aspetto risulta preoccupante anche per quanto riguarda le coste del Mediterraneo, ove vi sono grandi concentrazioni di popolazione proprio nella zona passibile di sommersione marina o di danni da parte delle onde. Inoltre, l'analisi dei dati relativi al nord Atlantico ha indicato che la maggiore temperatura oceanica ha portato ad un aumento dell'intensità degli uragani, con ovvie conseguenze negative sulle regioni da essi colpite e possibili estensioni dei danni anche a regioni abitualmente immuni. Infine, la quantità di ghiaccio marino nella regione polare artica è diminuita fortemente, sia in copertura totale che in spessore. Nel settembre 2007,

⁷ E' importante ricordare che una parte rilevante degli aerosol è di origine biogenica; questo aggiunge un altro anello alla complessa catena che lega la dinamica del clima e quella della biosfera del nostro pianeta.

l'area coperta dai ghiacci ha toccato il minimo storico di 4.1 milioni di km², una perdita di circa la metà rispetto ai valori degli anni '50. Dal 1975 al 2000, lo spessore medio del ghiaccio marino artico è diminuito di circa il 33%, da 3.7 a 2.5 metri circa.

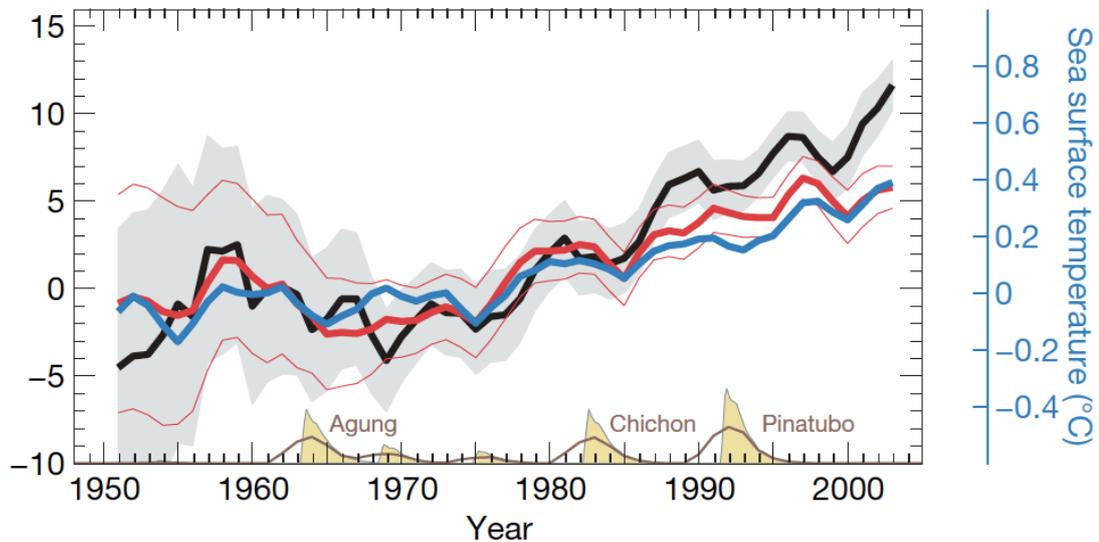


Figura 4. Variazioni del contenuto di calore (in unità di 10^{22} Joule) delle acque marine a profondità inferiori a 700 metri (linea nera, la zona ombreggiata indica l'incertezza a una deviazione standard) e a profondità inferiori a 100 metri (linea rossa spessa, le linee rosse sottili indicano la stima dell'incertezza a una deviazione standard) rispetto ai valori misurati nel 1961. La linea azzurra, associata alla scala di temperatura a destra del grafico, indica la variazione della temperatura della superficie del mare, sempre rispetto al valore del 1961. Tutte le curve sono state smussate con una media mobile a tre anni. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, Domingues et al. 2008, copyright 2008.)

La copertura dei ghiacciai terrestri nell'area polare dell'emisfero nord diminuisce di 160 miliardi di tonnellate all'anno. Le osservazioni satellitari mostrano che tra il 1996 ed il 2005 il deficit del bilancio di massa della calotta polare che ricopre la Groenlandia è più che raddoppiato, soprattutto a causa del grande aumento nella velocità di scorrimento dei ghiacciai verso il mare nella fascia latitudinale fino a 70° N. La ragione di questo aumento non è stata ancora del tutto chiarita, anche se esso appare connesso al riscaldamento globale. Se questo aumento della velocità di scorrimento si sposterà a latitudini più alte, il contributo della calotta groenlandese all'innalzamento del livello del mare potrebbe aumentare significativamente. Le ricerche sulla dinamica della fusione dei ghiacciai continentali indicano, inoltre, la possibilità di fenomeni di instabilità, che possono comportare inaspettati e rapidi collassi verso il mare delle masse ghiacciate. In seguito a ciò, il livello del mare potrebbe iniziare a crescere ad un ritmo molto maggiore rispetto a quello odierno.

L'aumento delle temperature ha avuto conseguenze rilevanti su molte specie animali e vegetali, sia terrestri che acquatiche, che negli ultimi decenni hanno modificato i propri areali di distribuzione, spostandosi verso nord nell'emisfero boreale e/o verso altitudini maggiori nelle zone montane. Non tutte le specie rispondono allo stesso modo al riscaldamento globale, con il rischio di sfasamento ("*mismatch*") fra le varie componenti delle comunità biologiche naturali⁸, possibile perdita di biodiversità e cambiamento radicale, o eventualmente collasso, di alcuni ecosistemi. Questo problema è amplificato dalla attuale forte frammentazione degli

⁸ Ad esempio, se i fiori sbocciano precocemente ma gli insetti impollinatori non si attivano prima, si crea uno sfasamento fra queste due componenti dell'ecosistema, con conseguenze potenzialmente gravi per la sopravvivenza sia delle piante che degli impollinatori.

habitat naturali dovuta ad ostacoli di origine antropica (città, autostrade e linee ferroviarie, alvei fluviali artificiali), che possono impedire gli spostamenti di piante ed animali e indurre estinzioni locali o globali di molte specie.

Un riscaldamento così consistente del pianeta potrà avere importanti effetti anche sulla salute. Nel gennaio 2008, l'Organizzazione Mondiale per la Sanità (OMS), ha stilato un documento in cui si sottolineano i rischi per la salute associati al riscaldamento globale e la necessità di misure sia di mitigazione che di adattamento. La figura 5 mostra un diagramma di flusso con cui l'OMS indica in modo semplificato la catena di effetti del cambiamento climatico e le aree ove è necessaria un'azione internazionale. Fra i maggiori rischi previsti, vi è l'aumento e l'espansione di malattie portate da agenti patogeni che beneficiano delle temperature più alte, le patologie connesse alla carenza di acqua potabile e gli effetti degli eventi estremi come l'ondata di calore dell'estate 2003 in Europa.

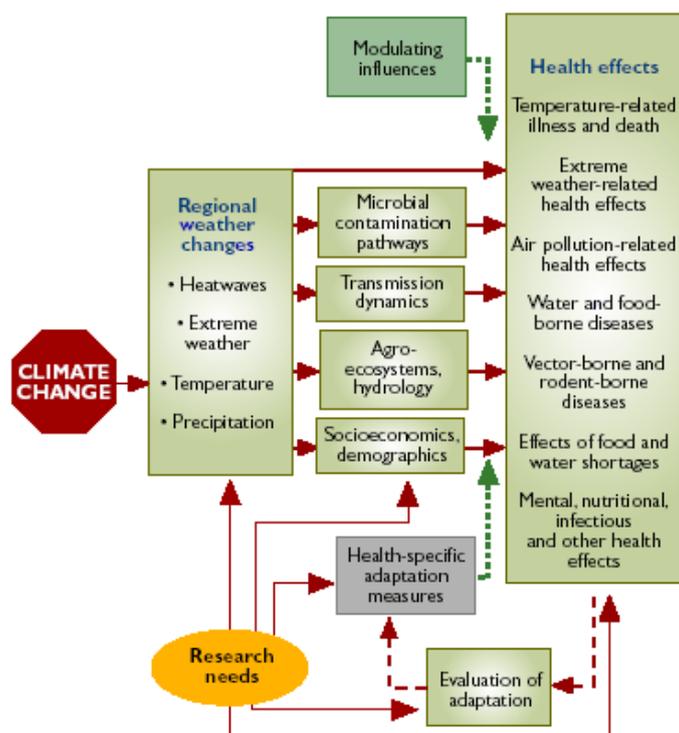


Figura 5. Effetti sulla salute del riscaldamento globale e aree di intervento. (Tratta dal sito OMS, <http://www.who.int/globalchange/climate/en/>)

3. Cambiamento climatico in Italia

Il riscaldamento globale non va pensato come un aumento omogeneo della temperatura in tutte le regioni della Terra. Condizioni particolari possono far sì che alcune aree presentino variazioni superiori o inferiori alla media globale. In Italia, il riscaldamento è stato più intenso: l'analisi delle serie storiche di temperatura e precipitazione nell'ultimo secolo indica che, in area mediterranea, il clima sta apparentemente diventando più caldo e più secco, con precipitazione concentrata in eventi più rari e più intensi. L'aumento di temperatura è associato a variazioni in diverse componenti del ciclo idrologico, spesso correlate con l'andamento di indici climatici come l'indice NAO ("*North Atlantic Oscillation*"). L'analisi delle serie temporali di precipitazione, relative all'intero territorio nazionale, evidenzia una

lieve diminuzione delle stesse ed un significativo cambiamento nella distribuzione temporale della precipitazione, con una diminuzione del numero di giorni piovosi, un aumento dell'intensità degli eventi piovosi ed un aumento della durata massima di periodi privi di precipitazione. Analogamente, l'analisi di indici standard di siccità indica un generale aumento di condizioni secche. A causa del riscaldamento, la maggior parte dei grandi laghi prealpini ha mostrato, negli ultimi anni, un ridotto mescolamento verticale, con un lento accumulo di calore nelle acque profonde.

In Italia nord-occidentale, l'analisi dei dati di precipitazione e temperatura indica che, negli ultimi cinquant'anni, le temperature medie sono aumentate di circa 1 °C. La figura 6 mostra la media delle anomalie delle temperature massime e minime giornaliere ottenute dalle analisi di una rete di numerose stazioni di misura in Piemonte e Valle d'Aosta, rispetto al valore medio per lo stesso periodo. In Appennino, le variazioni delle anomalie positive delle temperature estive registrate a Monte Cimone dal 1964 al 2006 (ottenute dai dati del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare) hanno indicato che, a partire dalla fine degli anni novanta, queste sono raddoppiate in frequenza, passando da 1.0 (27 dal 1964 al 1990) a 2.3 anomalie/anno (34 dal 1991 al 2006).

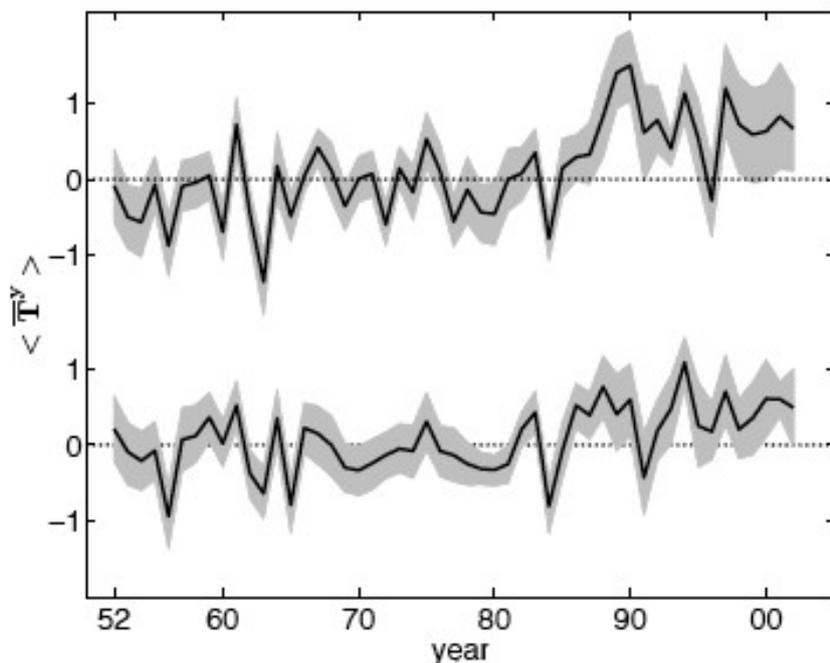


Figura 6. Serie temporali dell'anomalia media annua della temperatura giornaliera massima (curva superiore) e minima (curva inferiore) in Piemonte e Valle d'Aosta, nel periodo dal 1952 al 2002. Le anomalie indicano la differenza fra la media annuale e il valore medio su tutto il periodo di misura. La curva nera rappresenta la media mentre la zona ombreggiata indica i limiti di confidenza al 95%. Negli ultimi cinquanta anni, in media, le temperature sono aumentate di circa un grado, con un aumento più intenso negli ultimi venti anni. (Riadattata da Ciccarelli et al., *Global Planet. Change* 2008.)

Nelle regioni alpine, l'aumento di temperatura si è verificato particolarmente in inverno ed ha comportato una significativa diminuzione della profondità e della permanenza del manto nevoso ed una riduzione drastica dell'estensione dei ghiacciai. La figura 7 mostra la posizione del fronte di cinque grandi ghiacciai delle Alpi occidentali. Tutti questi ghiacciai si stanno ritirando, pur con forti fluttuazioni e anche temporanei avanzamenti; in alcuni casi, negli ultimi ottanta anni il fronte è arretrato per più di 500 metri. Analogamente, la temperatura del permafrost è aumentata in tutte le regioni montuose europee, con accentuato rischio di instabilità di molti versanti rocciosi.

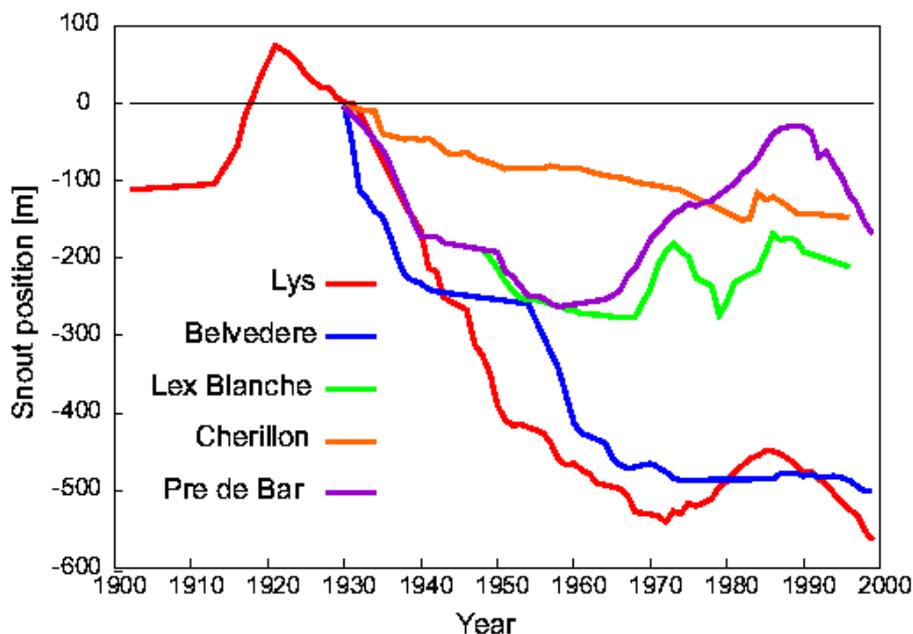


Figura 7. Variazioni nella posizione del fronte di cinque grandi ghiacciai delle Alpi occidentali italiane (Lys, Belvedere, Lex Blanche, Cherillon, Pre de Bar). La variazione nella posizione del fronte è riferita alla posizione misurata nel 1927, quando è iniziato un monitoraggio quantitativo di diversi ghiacciai. Tutti questi ghiacciai, pur con fluttuazioni significative, si stanno ritirando. (Riadattata da Calmanti et al., *Int. J. Climatology* 2007.)

Molte specie animali e vegetali hanno risentito dell'aumento delle temperature, specialmente in area montana. Uno studio sulla distribuzione della vegetazione al Parco dello Stelvio ha mostrato che sono evidenti sia una rapida espansione degli arbusti che una significativa regressione della vegetazione d'alta quota. E' stato stimato che un aumento di temperatura di 1-2 °C possa essere sufficiente per indurre importanti cambiamenti nella struttura delle comunità vegetali montane. Analogamente, negli ultimi anni si è verificata una drastica diminuzione del numero di stambecchi (*Capra ibex*) della popolazione originaria del Parco Nazionale Gran Paradiso, dovuta alla ridotta sopravvivenza dei capretti. Una possibile causa risiede nella fioritura anticipata della vegetazione alpina indotta dalle temperature più alte, che non permette alle madri di trovare nutrimento adatto a produrre latte di sufficiente qualità. I piccoli, di conseguenza, crescono meno robusti e con minore probabilità di sopravvivere durante l'inverno seguente.

Per contro, diversi parassiti beneficiano delle temperature invernali aumentate. Ad esempio, sulle Alpi italiane nel periodo dal 1974 al 2004, la processionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), un pericoloso parassita di molte aghifoglie, ha esteso il suo areale verso quote più elevate. La leishmaniosi, trasmessa da insetti del genere *Phlebotomus*, è attualmente in espansione nelle zone continentali italiane, principalmente a causa delle aumentate temperature. Un'ulteriore preoccupazione, confermata negli ultimi anni, viene dalla diffusione di malattie virali e febbri tipicamente tropicali come la *Chikungunya*, comparse in Italia in seguito alla diffusione di insetti vettori come *Aedes albopictus*, nota come zanzara tigre, capace di veicolare almeno venti diversi tipi di malattie virali. Anche in questo caso, i cambiamenti climatici locali sono annoverati fra le concause.

Profondi cambiamenti sono stati anche osservati nel Mar Mediterraneo. L'analisi dei dati di temperatura superficiale del mare, ottenuta dalle ricostruzioni dei dati disponibili, ha evidenziato che la temperatura media del bacino è aumentata di circa 0.004 °C/anno nei 135

anni fra il 1871 e il 2006, in analogia con l'aumento osservato globalmente. I dati degli ultimi 30 anni, che hanno una distribuzione più omogenea, evidenziano un aumento di 0.7 °C, contro 0.3 °C dell'oceano globale. Misure mareografiche relative agli ultimi 100 anni, disponibili solo in poche stazioni, mostrano che nell'ultimo secolo il livello del mare nel Mediterraneo è aumentato alla velocità di 1.3 mm/anno. Le misure satellitari altimetriche, regolarmente disponibili a partire dal 1992, mostrano un'accelerazione del processo, con un sollevamento medio del livello del Mediterraneo di 3 mm/anno negli ultimi quindici anni e con forti variazioni da un sottobacino all'altro. Recenti analisi hanno mostrato che negli ultimi 40 anni c'è stata una riduzione di circa il 20% dell'apporto fluviale verso il Mar Mediterraneo, con conseguenze sia sulla salinità che sulla concentrazione di nutrienti. In particolare, la successiva diminuzione di nutrienti disponibili ha influito negativamente sulla produzione primaria lungo la fascia costiera Mediterranea.

Gli studi sui cambiamenti climatici nel Mar Mediterraneo rivestono un'importanza notevole anche a livello globale, poiché si ritiene che le acque mediterranee, che escono dallo stretto di Gibilterra ed entrano in Atlantico ad una profondità di circa 1000 metri, possano influire sulla circolazione termoalina globale. Negli ultimi 50 anni, l'acqua profonda che ogni anno si forma nel Golfo del Leone si è riscaldata con continuità, aumentando la sua temperatura di circa 0.1 °C e influenzando il flusso di acque mediterranee verso il nord Atlantico. Variazioni nella circolazione termoalina mediterranea sono state anche provocate dallo spostamento della sorgente di acqua profonda, di provenienza orientale, dall'Adriatico all'Egeo negli anni 1987-1991. Questo fenomeno, noto come "*Eastern Mediterranean Transient*", ha avuto un notevole impatto anche sulla fioritura algale primaverile del bacino del Mediterraneo.

4. Cause del riscaldamento globale e ruolo degli effetti antropici

L'effetto serra, dovuto all'assorbimento della radiazione terrestre da parte del biossido di carbonio in atmosfera, è un fenomeno conosciuto fin dai lavori di Fourier, Tyndall e Arrhenius e descritto da leggi fisiche di base (il lavoro di Fourier contenente l'identificazione dell'effetto serra è del 1824). Il biossido di carbonio è un gas con un lungo tempo di vita in atmosfera ed è soggetto a meccanismi di trasporto globale, risultando ben rimescolato nella troposfera. Per questo motivo, sia le ricostruzioni delle variazioni di concentrazione di CO₂ nel passato, basate su serie temporali paleoclimatiche ottenute da singoli siti, che le misure di routine effettuate in osservatori atmosferici sono considerate rappresentative dei trend globali.

La concentrazione di biossido di carbonio in atmosfera, misurata per la prima volta in modo regolare da Keeling alle Hawaii, è aumentata da 315 ppm (parti per milione) nel 1958 a 385 ppm nel 2008. In Europa, la serie di misure più lunga è quella disponibile per il sito di Monte Cimone, mostrata in figura 8, che riproduce il trend di crescita costante delle concentrazioni di CO₂ già rilevato alle Hawaii.

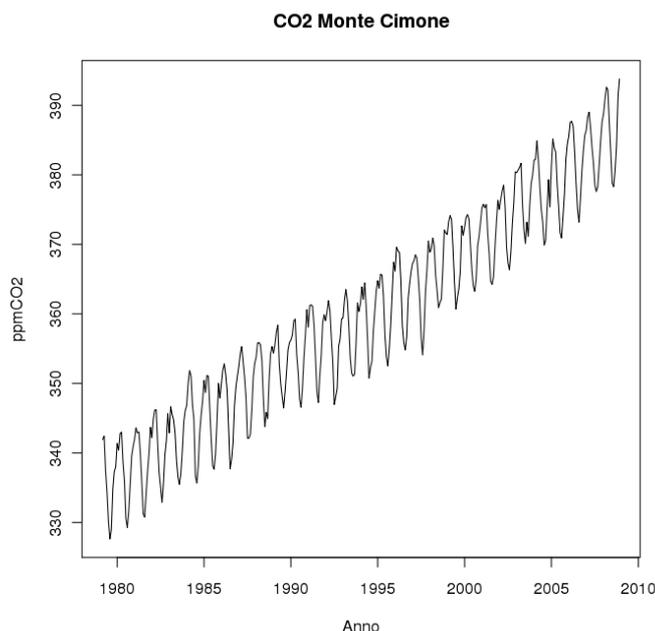


Figura 8. Aumento delle concentrazioni di CO₂ misurate presso l'Osservatorio Meteorologico dell'Aeronautica a Monte Cimone (2165 m s.l.m.). Sul trend di crescita è sovrapposto il ciclo legato ai processi di fotosintesi e respirazione degli organismi viventi, che induce un'oscillazione annuale nella quantità di biossido di carbonio in atmosfera, in fase con il ciclo stagionale dell'emisfero nord. (Fonte: Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare.)

L'aumento della concentrazione di CO₂ atmosferica è attribuibile principalmente alle emissioni di origine antropica. Questo risultato è confermato sia dal rapporto isotopico ¹³C/¹²C che dall'evidenza, proveniente dalla ricostruzione della concentrazione di CO₂ con misure indirette, che la concentrazione di biossido di carbonio è rimasta relativamente costante durante l'Olocene (ultimo periodo post-glaciale), mentre è aumentata drasticamente a partire dall'epoca della rivoluzione industriale, come mostrato in figura 9. A partire da tale epoca, le modificazioni degli ecosistemi naturali indotte dall'uomo (deforestazione ed espansione delle terre agricole) si sono molto accentuate; inoltre, l'uso massiccio di combustibili fossili ha determinato un ulteriore aumento delle emissioni. Anche il metano (CH₄) e l'ossido di diazoto (N₂O) hanno analoghe proprietà radiative rispetto alla CO₂, ovvero sono in grado di generare effetto serra, hanno un lungo tempo di vita in atmosfera e sono prodotti anche da attività antropica⁹. I flussi dovuti ad attività umana, sebbene possano essere anche molto inferiori rispetto alle emissioni naturali, caratterizzano in modo inequivocabile l'evoluzione della concentrazione di gas serra in atmosfera negli ultimi due secoli.

⁹ I diversi gas hanno capacità diversa di generare effetto serra, a seconda della loro capacità di assorbire e rimettere radiazione infrarossa (determinata dalle caratteristiche delle righe di emissione e quindi dalla struttura atomica o molecolare). Per semplicità, quando si discute la concentrazione di un determinato gas in grado di generare effetto serra, spesso si parla di concentrazione di "CO₂ equivalente", ovvero della concentrazione di biossido di carbonio necessaria per avere lo stesso effetto serra del gas in questione. Ai fini dell'effetto serra, è rilevante soltanto la somma degli effetti prodotti da tutti i gas serra, e si può quindi parlare di concentrazione, o di quantità, di CO₂ equivalente per avere un certo aumento della temperatura. In altri casi, si preferisce ragionare in termini di quantità di carbonio emesso.

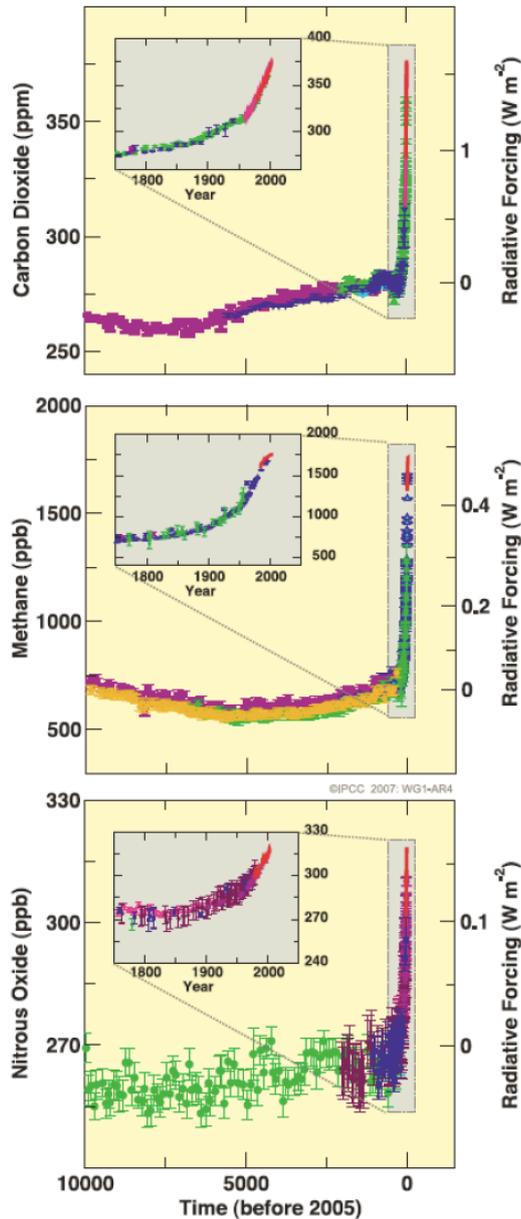


Figura 9. Andamento temporale della concentrazione dei maggiori gas serra durante gli ultimi 10000 anni e in dettaglio, negli inserti, durante gli ultimi due secoli. La parte in rosso della serie temporale della CO₂ include le osservazioni di Keeling. Il biossido di carbonio (CO₂) è in ppm (parti per milione), mentre l'ossido di diazoto (N₂O) e il metano (CH₄) sono in ppb (parti per miliardo). (Figura 2.3 del Synthesis Report, IPCC 2007, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)

L'entità del cambiamento dell'effetto serra è determinata dal bilancio delle varie forzanti antropiche e dalla variabilità naturale. La forzante radiativa diretta, indotta dall'immissione di CO₂ e CH₄ in atmosfera ad opera delle attività umane, è stimata essere, con buon margine di sicurezza, rispettivamente di 1.66 e 0.48 W m⁻² (Watt per metro quadro), come illustrato in figura 10. Oltre a biossido di carbonio, metano e ossido di diazoto, nel corso del XX secolo sono stati immessi in atmosfera alcuni prodotti chimici di sintesi, gli

idrocarburi alogenati e l'esfluoruro di zolfo, che presentano tempi di vita in atmosfera anche maggiori di quello della CO₂ e che hanno ulteriormente accentuato l'effetto serra¹⁰.

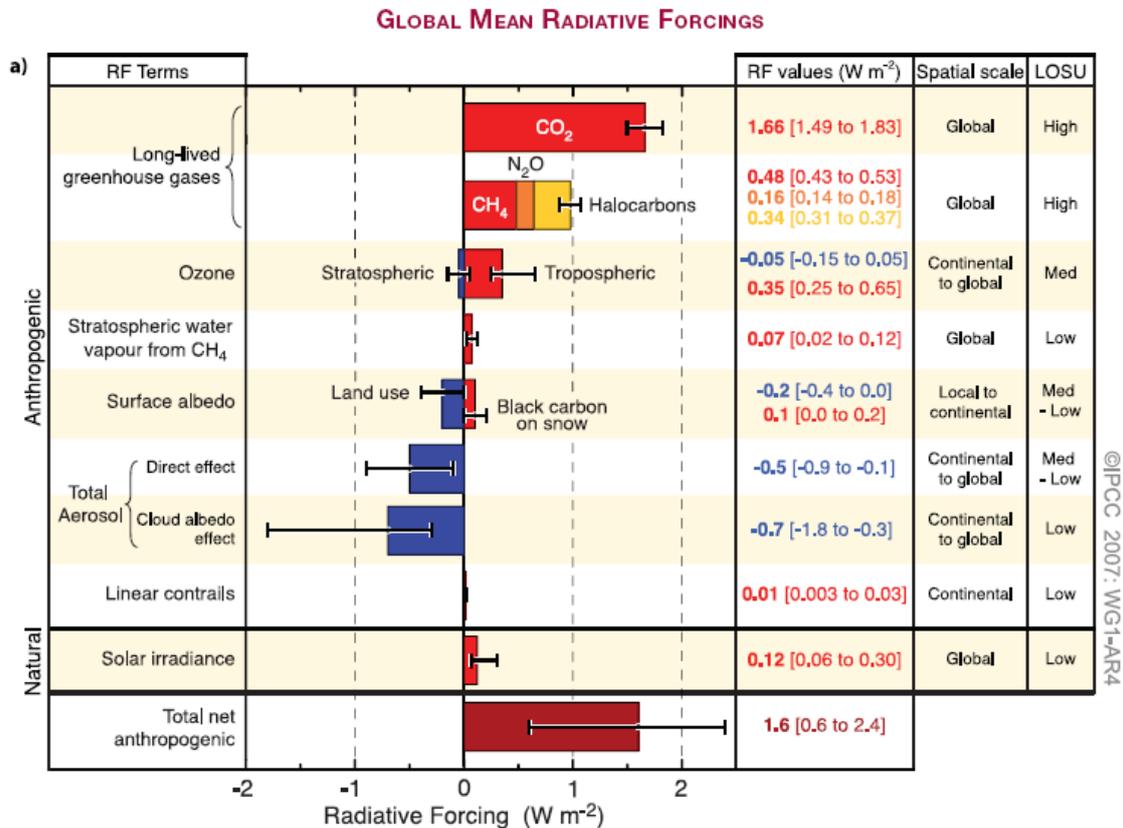


Figura 10. Forzanti radiative medie sul bilancio energetico dell'atmosfera dovute a attività antropiche (prime 8 righe) e variabilità naturale (nona riga). Il bilancio netto è riportato nell'ultima riga. L'effetto radiativo diretto degli aerosol è la somma tra una forzatura positiva dovuta al "black carbon" ed una forzatura negativa dovuta agli aerosol riflettenti la radiazione luminosa. (Figura 2.4 del Synthesis Report, IPCC 2007, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)

L'ultimo gas serra rilevante per il riscaldamento planetario è l'ozono (O₃), per il quale non possediamo sufficienti misure, dirette o indirette, che ci permettano di ricostruirne le

¹⁰ Talvolta è stato affermato che quando si arriverà a valori di concentrazione di CO₂ intorno ai 450 ppm, non ci sarà più ulteriore effetto serra che provochi l'aumento della temperatura della superficie terrestre. L'affermazione che la banda di CO₂ vada in saturazione, e che quindi l'effetto serra non dovrebbe crescere ulteriormente, è falsa: aumentando la concentrazione di CO₂ fino al suo raddoppio, si registreranno i seguenti effetti: (1) si allargherà l'intervallo spettrale di centro banda della CO₂ a 14.8 μm, che è soggetto a saturazione, con il risultato che vi sarà un leggero aumento della radianza emessa dalla Terra verso lo spazio ed un apprezzabile aumento della radianza emessa dall'atmosfera verso la superficie, con effetti di riscaldamento dell'atmosfera prossima al suolo; (2) si intensificherà l'assorbimento della CO₂ nell'ala destra della banda (da 15 a 20 μm, con una diminuzione della radianza emessa verso lo spazio ed un aumento della radianza emessa dall'atmosfera verso la superficie, tali effetti essendo poco importanti per il bilancio di radiazione del pianeta in quanto sovrapposti agli effetti di assorbimento del vapore acqueo; e (3) si intensificherà l'assorbimento della CO₂ nell'ala sinistra della banda (da 14.5 a meno di 12 μm, con una diminuzione della radianza emessa verso lo spazio ed un aumento della radianza emessa dall'atmosfera verso la superficie, tali effetti essendo sovrapposti solo a deboli effetti dell'assorbimento continuo del vapore acqueo e contribuendo quindi efficacemente a far aumentare l'effetto di riscaldamento globale per condizioni di cielo sereno (in assenza di nubi), valutabile in circa 1.9 W m⁻² per un aumento della concentrazione media di CO₂ dai valori attuali al valore di 570 ppm.

variazioni secolari. E' stato tuttavia possibile stabilire che le concentrazioni di O₃ presso vari siti europei sono aumentate di un fattore 1.5-2 fra gli anni '50 e gli anni '90, molto probabilmente a causa dell'aumento dei precursori antropici (sostanze chimiche che portano alla formazione di ozono troposferico). Gli studi condotti presso siti alpini hanno evidenziato un trend positivo nel periodo 1991-2002 e hanno evidenziato un aumento delle concentrazioni di O₃ presso lo Zugspitze (2962 m, Germania) pari al 12.6% per decade (1.3% per anno). Con l'ausilio di modelli, si stima che l'effetto associato all'aumento delle emissioni, di origine antropica, di precursori dell'ozono abbia compensato la riduzione delle emissioni di precursori associata alla perdita di ecosistemi naturali e la diminuzione dell'ozono stratosferico.

L'effetto netto di raffreddamento da parte degli aerosol di origine antropica, associato alla loro capacità di riflettere la radiazione solare, ha in parte compensato il riscaldamento dovuto ai gas serra. Nel periodo dal 1940 al 1980 è stata registrata una lieve diminuzione della temperatura media dell'atmosfera rispetto ai valori degli anni precedenti, a dispetto della crescente concentrazione di CO₂. E' ben noto che le emissioni di biossido di zolfo (o anidride solforosa, SO₂) siano gradualmente aumentate dal 1940 fino a dopo il 1980, sia in Nord America che in Europa, per effetto di un crescente impiego di derivati del petrolio e del carbone. Su tali aumenti, è stato valutato che la produzione globale di SO₂ sia aumentata da 38.8 Tg S (Teragrammi di zolfo) per anno nel 1940 a 94.1 Tg S per anno nel 1975, segnando un aumento medio del 7% annuo, associato ad un aumento più marcato nell'emisfero settentrionale che in quello meridionale. Poiché il biossido di zolfo si converte in parte in solfati, attraverso processi di ossidazione che hanno tempi caratteristici piuttosto brevi, si è avuto un aumento delle concentrazioni di materiale particolato (solfati d'ammonio, principalmente) nelle aree più antropizzate del pianeta a vocazione industriale/rurale, come l'Europa e gli Stati Uniti d'America. Tale aumento ha fatto aumentare l'albedo del sistema superficie-atmosfera, dato che i solfati d'ammonio sono altamente riflettenti e scarsamente assorbenti, determinando un effetto di raffreddamento dell'atmosfera nelle aree continentali d'intensità paragonabile a quella osservata su scala globale nei due anni successivi all'eruzione del vulcano Pinatubo. Infatti, nel periodo dal 1960 fino al 1990 si è osservata una continua diminuzione della radiazione solare in arrivo al suolo in stazioni continentali, dell'ordine di 6 - 9 W m⁻², corrispondente ad una diminuzione del 4 - 6% sull'arco di 30 anni, per effetto della diminuzione di trasparenza atmosferica dovuta all'aumento dello spessore ottico degli aerosol.

Con il graduale calo delle emissioni di SO₂ registratosi nei paesi Occidentali verso il 1990 (per esempio, l'EPA registra una diminuzione complessiva del 71% nelle emissioni di SO₂ dal 1980 al 2008 negli USA) e con il brusco collasso delle emissioni in tutto il territorio dell'ex Unione Sovietica, è cessato l'effetto di diminuzione della radiazione solare ed è invece iniziato il graduale aumento di luminosità dell'atmosfera al suolo ("*brightening*"). Queste osservazioni sono state recentemente confermate dalle misure del livello di *background* dello spessore ottico dell'aerosol nelle aree remote dell'Artico, che confermano come la diminuzione delle emissioni di SO₂, iniziata massicciamente dopo gli anni '80, abbia portato ad una diminuzione dello spessore ottico dell'aerosol di circa il 2% per anno in Alaska e nelle Isole Svalbard e di più del 6% nelle aree remote della Siberia che si affacciano sull'Oceano Artico.

Gli aerosol di origine antropica hanno quindi impedito che il pieno potenziale di riscaldamento planetario dei gas serra potesse manifestarsi. L'effetto degli aerosol sul clima è tuttavia molteplice ed estremamente complesso: la forzante di -0.5 W/m² dovuta all'azione diretta delle componenti antropiche dell'aerosol atmosferico è in realtà la risultante di componenti con effetto di raffreddamento e di una componente, chiamata "*black carbon*",

che, assorbendo la radiazione solare, esercita un marcato effetto riscaldante. Il “*black carbon*” è emesso da processi di combustione sia di combustibili fossili che di combustibili tradizionali. Stime più recenti rispetto a quelle riportate nel Rapporto IPCC del 2007 suggeriscono che l’effetto di riscaldamento globale dovuto al “*black carbon*” sia di $+0.9 \text{ W/m}^2$, rendendolo così la seconda forzante positiva in ordine di importanza, inferiore solo all’effetto della CO_2 .

Le misure delle diverse forzanti radiative ottenute finora, riassunte nella figura 10 (tratta dal quarto rapporto IPCC del 2007), indicano dunque che le forzanti di origine antropica sono di gran lunga predominanti. La variabilità solare diretta è responsabile solo in parte delle fluttuazioni climatiche osservate negli ultimi secoli. In particolare, l’analisi accurata dei dati mostra che non c’è nessuna correlazione significativa fra la variabilità del ciclo solare e il forte riscaldamento globale degli ultimi quarant’anni: la misura diretta dell’emissione solare, disponibile dal 1978, mostra che sono presenti fluttuazioni di intensità associate con il ciclo undecennale delle macchie solari, ma non vi è nessun “*trend*” di crescita o decrescita dell’intensità. Analogamente, l’ipotesi che un’apparente correlazione tra attività magnetica del Sole, intensità dei raggi cosmici galattici e copertura nuvolosa potesse essere una rilevante causa di variabilità climatica è stata smentita da analisi recenti. Queste hanno mostrato che tale correlazione è stata in realtà generata da un incorretto trattamento dei dati e che, alla prova dei dati raccolti negli ultimi dieci anni, non risulta confermata.

L’aumento di temperatura e le attività antropiche innescano processi che possono portare a variazioni importanti di molti altri parametri climatici, quali la concentrazione di vapore acqueo, la nuvolosità, il livello di aerosol in atmosfera, la temperatura, la salinità e l’acidità oceanica. Questi parametri, oltre a determinare le condizioni di sostenibilità della vita sulla Terra, hanno a loro volta un effetto sulla temperatura terrestre, modificando la quantità di radiazione disponibile e/o le concentrazioni dei gas ad effetto serra, inducendo di conseguenza ulteriori cambiamenti attraverso i meccanismi di retroazione climatica. Descriviamo nel seguito, a titolo di esempio, due tra i processi di retroazione fondamentali.

(1) Il riscaldamento indotto da una maggiore concentrazione di gas serra induce una maggiore evaporazione alla superficie terrestre e marina ed una maggiore capacità della troposfera a mantenere vapore in condizioni sotto-sature. Questo comporta un aumento di vapore acqueo in atmosfera, con un effetto di amplificazione del riscaldamento poiché il vapore acqueo è esso stesso un gas a potente effetto serra. Negli ultimi anni, questo meccanismo è stato ampiamente dibattuto e la sua importanza è stata messa in discussione, ipotizzando meccanismi di retroazione negativa che ne potrebbero annullare l’effetto, ossia assumendo che il contenuto di vapore in troposfera non debba necessariamente aumentare al crescere della temperatura. Tuttavia, l’aumento della concentrazione di vapore acqueo in atmosfera è stato recentemente confermato da osservazioni satellitari ed è coerente con l’aumento di anidride carbonica e di temperatura a scala globale; questo ha confermato sia l’effetto del riscaldamento globale sull’aumento di vapore acqueo in atmosfera che l’importante ruolo di retroazione positiva giocato dal vapore d’acqua. Resta ancora di difficile quantificazione il ruolo della variazione della copertura nuvolosa indotta dall’aumento di vapore d’acqua.

(2) Un rilevante processo oceanico è la capacità di cattura, da parte della biosfera marina, del biossido di carbonio disciolto nell’acqua. L’aumento della pressione parziale di CO_2 atmosferica porta ad un maggiore assorbimento di biossido di carbonio nei mari e di conseguenza ad un graduale aumento dell’acidità degli oceani, principalmente determinata dalla quantità di CO_2 disciolta nell’acqua. La diminuzione del pH dell’acqua marina, che può essere prevista in modo accurato, è dunque legata all’aumento di concentrazione di CO_2 in

atmosfera ed è determinata dall'attività antropica. L'acidità dell'acqua è un fattore importante per la dinamica degli organismi marini: sebbene alcuni organismi traggano beneficio da una maggiore acidità, la maggior parte delle specie marine, dai coralli alle aragoste ai molluschi, risente in modo fortemente negativo dell'aumentata acidità. Vi è quindi un rischio significativo di degrado di molti ecosistemi marini. Se così fosse, l'aumento di acidità dell'oceano potrebbe portare ad una minore capacità di cattura della CO₂ da parte della biosfera marina e, come conseguenza, potrebbe contribuire ad un ulteriore aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera. Nel giugno 2009, la necessità di adottare misure di mitigazione per limitare l'acidificazione dell'oceano è stata oggetto di uno specifico documento dell' "InterAcademy Panel on international issues" (IAP), che raduna alcune delle più importanti accademie scientifiche del mondo (inclusa l'Accademia dei Lincei italiana).

In conclusione, l'analisi dei dati disponibili indica che l'accumulo di gas serra di origine antropica ha un effetto di riscaldamento a scala globale e costituisce la maggiore forzante sul bilancio radiativo terrestre e quindi sulla temperatura. I fattori naturali (variazioni nell'attività solare, eruzioni vulcaniche) hanno plausibilmente contribuito alle variazioni della temperatura globale nell'ultimo millennio, compreso il *trend* osservato nella prima metà del XX secolo. Tuttavia le conclusioni della comunità scientifica internazionale, sin dal rapporto IPCC del 2001, concordano sul fatto che il rapido aumento delle temperature medie globali durante gli ultimi decenni del secolo scorso sia da attribuire, con alta probabilità, principalmente all'aumento di emissioni dovute all'attività umana. Il rapporto IPCC più recente (2007) conferma e rinforza questa asserzione indicando: (1) che il ruolo antropico sul riscaldamento globale è accertato con probabilità maggiore del 90% e (2) che è altamente improbabile che l'innalzamento osservato della temperatura sia dovuto esclusivamente a fattori naturali.

5. Scenari globali e regionali

Il riscaldamento globale non implica soltanto un aumento delle temperature medie della superficie terrestre e l'aumento del livello dei mari, ma anche una serie di impatti significativi su molte componenti del sistema Terra. Data per scientificamente assodata l'altissima probabilità che i cambiamenti climatici in atto siano reali e che un significativo contributo sia dovuto all'azione umana, occorre domandarsi quali misure, sia di mitigazione (come la limitazione delle emissioni di gas serra e lo sviluppo di procedure di confinamento di CO₂) che di adattamento a condizioni climatiche diverse da quelle del passato possano essere adottate per ridurre i rischi. Per poter agire al meglio, è importante disporre di metodologie quantitative per prevedere come evolverà il clima, globale e regionale, in risposta a diversi scenari di intervento (o non intervento) umano.

5a. Modelli numerici del sistema climatico

Un fondamentale strumento a disposizione della comunità scientifica è la simulazione numerica della dinamica del clima e delle sue variazioni, in risposta a diversi scenari di emissioni di gas serra e di utilizzo del territorio. Partendo dai modelli di circolazione atmosferica utilizzati per le previsioni meteorologiche, nelle ultime tre decadi la comunità dei ricercatori impegnati nello studio del clima ha sviluppato diversi modelli di simulazione che descrivono la dinamica dell'atmosfera e dell'oceano, della criosfera, del suolo e della vegetazione e includono i cicli biogeochimici di diversi elementi, primo fra tutti il ciclo del carbonio. Questi modelli, basati sulle leggi della fisica, della chimica e della biologia, sono rappresentazioni matematiche del sistema in esame, come avviene in tutti gli ambiti scientifici. In tale contesto, si fa riferimento ad una gerarchia di modelli classificati come di

bassa, intermedia ed alta complessità a seconda del numero delle componenti climatiche considerate e delle loro interazioni. Per quelli di media ed alta complessità, si definiscono specifici scenari ove vengono ipotizzati gli andamenti temporali delle emissioni di CO₂ e degli altri gas serra, come conseguenza di diversi ipotetici modelli di sviluppo delle società umane. Generalmente, vengono considerati scenari con caratteristiche molto diverse, quali un mondo globalizzato, in rapido sviluppo e con forti emissioni di gas serra, oppure un mondo ove gli accordi internazionali portano ad una riduzione delle emissioni nel giro di pochi decenni, per permettere una stima del regime di cambiamento massimo o minimo che dovremo aspettarci. Nel 2001, l'IPCC ha formalizzato alcuni dei possibili scenari definendoli con specifiche sigle. Negli anni successivi, questi scenari di emissione sono stati adottati come casi standard da utilizzare come condizioni forzanti per stimare la risposta del sistema climatico mediante la simulazione numerica.

Nella realizzazione di proiezioni climatiche, non è possibile verificare direttamente se le proiezioni siano corrette, se non lasciando che si realizzi un certo scenario e aspettando il tempo necessario perché le previsioni si avverino oppure no. Sulla scala di tempo degli ultimi quindici anni, i modelli climatici attuali e quelli utilizzati nel corso degli anni '90 sono stati valutati sulla base delle proiezioni da questi effettuate dal 1990 (anno di inizio delle prime proiezioni IPCC) fino ai giorni nostri. I risultati mostrano che anche i modelli utilizzati all'inizio degli anni '90 (molto più semplici rispetto agli attuali) sono stati in grado di fornire una proiezione della temperatura media in linea con quanto si è verificato negli anni successivi. I modelli climatici di ultima generazione, seppur ovviamente lontani dalla perfezione, sono molto più realistici dei precedenti e sono risultati in grado di prevedere correttamente molte quantità globali.

Su scale di tempo di diversi decenni, tuttavia, attendere che si verifichi il cambiamento previsto potrebbe risultare estremamente rischioso, dato che vi sono indicazioni concrete di un'alta probabilità di cambiamenti climatici di portata grande o perfino devastante. In questo caso, si devono utilizzare metodi alternativi, indiretti, per stimare l'attendibilità delle proiezioni fornite dai modelli climatici su scale pluri-decennali.

Un modo ampiamente utilizzato è basato sulla verifica della capacità dei vari modelli di riprodurre le caratteristiche principali del clima attuale e le variazioni climatiche del passato. Come mostrato in figura 11, le simulazioni effettuate con insiemi ("*ensemble*") di modelli diversi hanno mostrato che è possibile simulare l'andamento della temperatura osservata negli ultimi 100 anni solo se si includono, come condizioni al contorno, sia le variazioni delle forzanti naturali che l'aumento di concentrazione di gas serra di origine antropica. In altre parole, se non si tiene conto delle forzanti antropiche non è possibile riprodurre l'aumento delle temperature effettivamente osservate. Questo risultato indica dunque che l'ultima generazione di modelli del clima è in grado di riprodurre con buona approssimazione l'andamento nel tempo di molte grandezze medie, come la temperatura superficiale terrestre, la sua distribuzione su scala continentale, la circolazione generale atmosferica e oceanica e l'estensione del ghiaccio marino, e fornisce un'ulteriore conferma del ruolo antropico nel riscaldamento globale¹¹.

¹¹ Poiché le previsioni climatiche forniscono informazioni di tipo probabilistico, è importante disporre di più simulazioni per avere una stima della probabilità che si realizzi un determinato tipo di situazione climatica. Questa stima viene spesso ottenuta generando un gran numero di simulazioni per uno stesso modello e/o considerando molte simulazioni basate su modelli diversi. Ciascun modello è basato su parametrizzazioni leggermente differenti fra loro e l'insieme ("*ensemble*") delle simulazioni e dei modelli fornisce sia una stima quantitativa del clima medio atteso, e del relativo margine di incertezza, che una stima della distribuzione di probabilità dei possibili stati climatici attesi.

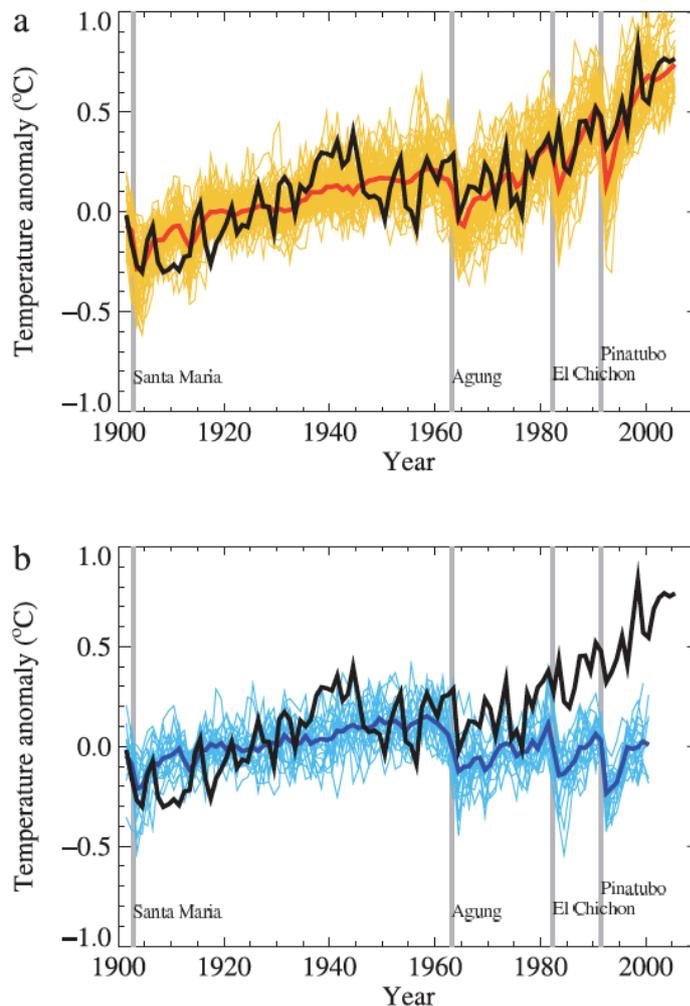


Figura 11. Confronto fra le anomalie medie di temperatura globale misurate (curva nera) e simulate da un *ensemble* di modelli climatici (curve colorate). Le anomalie sono calcolate rispetto alla temperatura media nel periodo 1901-1950. Nel pannello a, le simulazioni includono sia le forzanti naturali che quelle di origine antropica (gas serra); le curve sottili rappresentano 58 simulazioni ottenute con 14 modelli diversi e la curva spessa indica la media su tutte le simulazioni e tutti i modelli. Nel pannello b, le simulazioni includono soltanto le forzanti naturali; le curve sottili rappresentano 19 simulazioni ottenute con 5 modelli diversi e la curva spessa indica la media su tutte le simulazioni e tutti i modelli. Le linee grigie verticali rappresentano le date delle principali eruzioni vulcaniche del XX secolo. (Figura 9.5 del Rapporto del Working Group I, IPCC 2007, WGI, capitolo 9, <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter9.pdf>)

Detto ciò, è importante sottolineare che il problema della definizione dei limiti alla predicibilità del clima è tuttora un importante argomento di ricerca. A questo proposito, occorre ricordare la grande differenza esistente fra una proiezione climatica e una previsione meteorologica. Una previsione meteorologica deterministica tenta di prevedere lo stato del tempo atmosferico in un certo istante futuro (per esempio domani a mezzogiorno) a partire dalle nostre conoscenze dello stato iniziale (per esempio adesso). Le previsioni meteorologiche hanno una limitazione intrinseca, dovuta al fatto che l'atmosfera è caratterizzata da comportamento caotico, con un limite temporale alla predicibilità deterministica. Diverse stime pongono questo limite teorico intorno alle due settimane o anche meno: ovvero, oltre questo intervallo di tempo non è possibile, neppure in linea di principio, prevedere in modo deterministico lo stato dettagliato dell'atmosfera.

Altra cosa è una proiezione climatica. Innanzitutto il clima è, di per sé, definito in senso probabilistico. Fare una proiezione climatica, ipotizzando uno specifico scenario futuro di emissione, significa prevedere se, quanto e come la distribuzione di probabilità che rappresenta il clima in quella regione sarà soggetta a cambiamenti significativi, imputabili alle variazioni nelle emissioni ipotizzate dallo scenario. Le proiezioni climatiche dunque, seppur affette da significativi margini di incertezza, non soffrono delle stesse limitazioni temporali di base delle previsioni meteorologiche deterministiche e permettono di fornire una stima della probabile evoluzione dello stato climatico del nostro pianeta e della distribuzione di probabilità delle grandezze climatiche.

Negli ultimi anni è diventata particolarmente importante la valutazione dell'affidabilità delle proiezioni climatiche su scala regionale, attraverso lo sviluppo di metodologie di verifica basate sulle capacità predittive dei modelli di clima su scale di tempo "brevi" (mensili, stagionali, decennali). La nozione di "*seamless predictions*" (previsioni senza soluzione di continuità) si basa sull'osservazione che la corretta rappresentazione dei processi fisici che avvengono su scale di tempo brevi è importante anche per scale di tempo lunghe. Ciò è dovuto alla non-linearità del sistema climatico, ovvero all'interazione e alla retroazione di processi fisico-chimico-biologici che agiscono su scale spaziali e temporali molto diverse. Per esempio, l'emissione di gas serra rappresenta una forzante di tipo radiativo che è direttamente connessa a processi veloci che agiscono su scale temporali dell'ordine di un giorno o anche meno, la cui variazione sistematica induce una perturbazione nelle onde planetarie dell'atmosfera e nelle strutture di teleconnessione (10 giorni) che a loro volta influenzano (e sono influenzate) dalla circolazione superficiale oceanica (100 giorni) che in ultimo, su scale temporali di 1000 giorni e oltre, induce variazioni nella criosfera e nella biosfera. Per determinare con la necessaria accuratezza gli impatti climatici dovuti all'emissione di gas serra, è quindi necessario quantificare le carenze sistematiche dei modelli climatici di ultima generazione nel rappresentare ognuno dei processi alla base di questa catena di interazioni e retroazioni. Di conseguenza, si può pensare di fornire una stima di attendibilità dei modelli utilizzati per le proiezioni climatiche sulla base della loro validazione probabilistica su scale di tempo stagionali e decennali.

In conclusione, possiamo affermare che, da un punto di vista scientifico, negli ultimi anni si è verificato un notevole progresso nei modelli numerici del clima e nell'interpretazione dei risultati con essi ottenuti. E' anche importante sottolineare che, nonostante le loro incertezze e i loro limiti, i modelli climatici sono oggi l'unico strumento a disposizione della comunità scientifica e dei decisori politici per ottenere proiezioni quantitative, di tipo probabilistico, sul clima atteso in un determinato scenario di emissione di gas serra e di uso del territorio.

5b. Scenari globali

I risultati di tutti i modelli numerici del sistema climatico sono concordi nel prevedere che, in tutti i diversi scenari considerati, compresi quelli ove si ipotizza un'immediata stabilizzazione delle emissioni di gas serra, la temperatura globale continuerà ad aumentare per diversi decenni. Le proiezioni relative ai diversi scenari sono riassunte nel Quarto Rapporto IPCC del 2007, cui rimandiamo per una descrizione dettagliata del cambiamento climatico atteso.

Seguendo un approccio leggermente diverso, nel 2005 l'Unione Europea ha ufficialmente proposto di limitare la quantità totale di gas serra emessi dalle attività antropiche (indipendentemente dalla loro concentrazione finale in atmosfera e da come questa viene raggiunta) ad un livello per cui la temperatura media globale della superficie della Terra

non aumenti più di 2 °C rispetto ai livelli precedenti l'era industriale (ovvero, non più di circa 1.2 °C rispetto alla temperatura media attuale). Le analisi effettuate negli ultimi anni suggeriscono infatti che il riscaldamento globale sia influenzato soprattutto dalla quantità totale di gas serra immessi in atmosfera durante un periodo preciso (per esempio, dal 2009 al 2049), piuttosto che dalla loro concentrazione atmosferica una volta raggiunta la stabilizzazione delle emissioni, come ipotizzato alla stesura del Protocollo di Kyoto.¹²

La scelta di un limite di 2 °C è indicativa: un aumento della temperatura maggiore di questo valore viene infatti considerato eccessivo, per i rischi connessi ed i costi associati alle procedure di adattamento. Tuttavia, la stima della emissione totale di gas serra (in Giga tonnellate, Gt, di CO₂ equivalente) corrispondente ad un aumento di temperatura di 2 °C è ancora incerta. Recenti analisi dei risultati disponibili (aprile 2009) suggeriscono che emissioni totali nel periodo 2009-2049 inferiori alle 700 Gt di CO₂ equivalente comportino una probabilità del 75% di non superare la soglia dei 2 °C. La figura 12 mostra la probabilità di superamento della soglia di 2 °C in funzione delle emissioni totali fra il 2009 e il 2049 e per diversi scenari. Tuttavia, se gli scenari di emissione prendono in considerazione anche gli altri fattori che esercitano una forzante radiativa sull'atmosfera, le proiezioni possono variare ed essere anche più pessimistiche. Infatti, se si assistesse ad una rapida riduzione delle emissioni di aerosol ai fini di tutela della qualità dell'aria, diminuirebbe anche la forzante associata agli stessi aerosol e, quindi, anche il loro potere di compensare parzialmente l'effetto di riscaldamento dei gas serra.

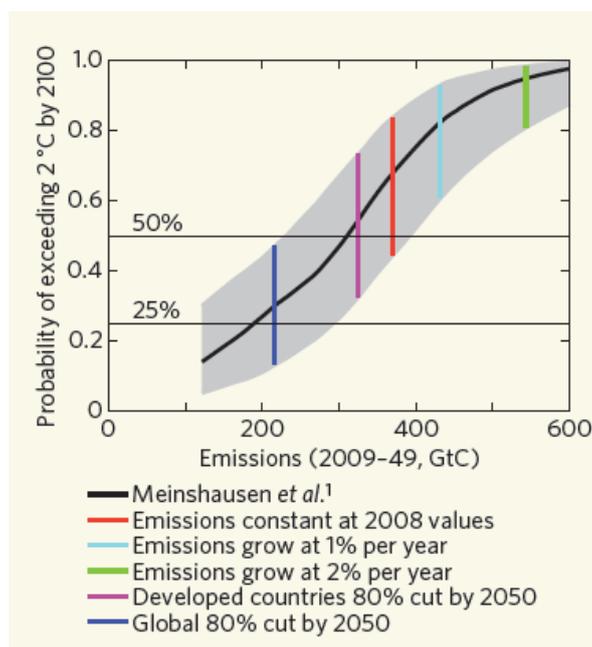


Figure 12. Linea nera: probabilità che la temperatura globale ecceda il limite di 2 °C oltre le temperature preindustriali, in funzione della quantità totale di Gigatonnellate di carbonio emesse fra il 2009 e il 2049 (1 Gt di carbonio corrisponde a circa 3.67 Gt di CO₂). Le linee verticali colorate indicano la probabilità di superamento della soglia per diversi scenari di emissione. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, Schmidt and Archer 2009, copyright 2009.)

¹² La quantità totale di CO₂ (equivalente) emessa in un certo intervallo di tempo è una misura diretta della perturbazione di origine antropica indotta sul sistema climatico. La concentrazione atmosferica di CO₂ in un determinato anno, una volta che le emissioni sono divenute costanti nel tempo, risente sia del totale delle emissioni che dei complessi meccanismi all'opera nel sistema climatico, che potrebbero temporaneamente mascherare l'aumento di CO₂ atmosferica e dunque non rappresentare correttamente i processi lenti e la presenza di possibili instabilità innescate dalle retroazioni presenti nel sistema.

E' importante ricordare che l'aumento delle temperature globali comporta una serie di conseguenze in generale negative (anche se alcune regioni o Paesi potrebbero trarne qualche vantaggio economico a breve termine) e potenzialmente drammatiche per la maggioranza delle nazioni del globo, sia quelle più sviluppate che, soprattutto, quelle meno sviluppate. Il livello dei mari potrà salire ulteriormente, portando alla perdita di molte aree costiere densamente popolate. Le temperature più alte, la maggiore energia disponibile per i moti convettivi atmosferici, lo spostamento longitudinale dei percorsi dei cicloni delle medie latitudini nonché le variazioni nell'intensità dei cicloni tropicali possono indurre significativi cambiamenti nel ciclo idrologico e nelle caratteristiche della precipitazione, con aumentata probabilità di eventi di precipitazione intensa, alluvioni ed erosione dei suoli.

Sono attesi significativi effetti del riscaldamento globale sulla salute, incluso un possibile aumento di mortalità per motivi cardiovascolari e difficoltà respiratorie in corrispondenza di onde di calore, una espansione di malattie oggi confinate nelle regioni più calde e possibili effetti di malnutrizione nel caso di danni alle colture. Ci si aspetta anche un accresciuto rischio di estinzione per molte specie animali e vegetali, con conseguenti effetti di perdita di biodiversità.

L'impatto dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale è un altro aspetto da non trascurare. In particolare, è emerso come le variazioni del ciclo dell'acqua avranno in futuro un ruolo predominante nell'innescare i principali fenomeni di degrado su monumenti e siti archeologici europei. Alcuni fra i principali risultati che emergono dalle proiezioni future indicano un aumento della perdita di materiale per marmi e calcari in nord Europa a causa delle precipitazioni, un aumento generale del fenomeno di cristallizzazione di sali, particolarmente dannoso per i materiali porosi, quali ad esempio arenarie e mattoni, ed un impatto sempre più rilevante della radiazione solare sui siti archeologici in marmo nel bacino del Mediterraneo.

Un importante aspetto riguarda la possibilità di cambiamenti irreversibili nel sistema climatico. La fusione dei ghiacci continentali in Artico (Groenlandia) rappresenta un esempio di quei processi che, attraverso cambiamenti piccoli se visti su scale temporali brevi, possono tuttavia portare il sistema ad un punto di non ritorno, creando le condizioni per conseguenze a lungo termine. Al momento, la temperatura media che caratterizza la regione artica porta ad un assottigliamento della calotta nelle fasce costiere, mentre la parte interna della calotta si trova ancora in equilibrio. Un ulteriore incremento della temperatura potrebbe tuttavia avere come conseguenza l'estensione del fenomeno di fusione all'interno della calotta. Se la temperatura dovesse arrivare ad un livello tale da rendere instabile l'intera calotta, essa non potrebbe far altro che scomparire completamente. Se questo avvenisse, una sua nuova formazione potrebbe avviarsi non in conseguenza di un ritorno della temperatura media ai livelli attuali, ma solo una volta che tale temperatura fosse scesa ulteriormente di diversi gradi, in un classico esempio di ciclo di isteresi.

La presenza di cicli di isteresi e di valori critici che separano comportamenti diversi è comune nei sistemi non-lineari complessi, come il sistema climatico stesso, ed è, in genere, associata alla presenza di instabilità, equilibri multipli e possibilità di transizioni rapide e imprevedibili tra questi equilibri. Ad esempio, una drastica riduzione della salinità nell'Atlantico del nord può innescare un'instabilità nella circolazione termoalina oceanica, oppure una modifica nella copertura vegetale di una regione semiarida può portare il sistema a trovare un nuovo punto di equilibrio corrispondente a condizioni desertiche. In termini fisici, l'esistenza di punti di biforcazione (chiamati anche "*tipping points*") nell'andamento temporale

è una peculiarità di tutti i sistemi non lineari. La loro identificazione, oltre ad essere estremamente importante per una corretta valutazione del rischio e quindi delle politiche da perseguire, è fondamentale per la comprensione del sistema. I cambiamenti repentini delle condizioni climatiche, scoperti grazie all'analisi delle carote di ghiaccio, rappresentano un altro esempio di quanto instabile e delicato possa essere il sistema. E' proprio la presenza di cicli di retroazione positiva che rende possibili questi "abrupt climate changes", le cosiddette "sorpresa climatiche" che possono avvenire su scale di tempo anche di alcuni decenni soltanto: in questi casi, una forzante di entità modesta, o a crescita graduale, può indurre cambiamenti climatici repentini che potrebbero poi non essere reversibili se non su tempi di centinaia o migliaia di anni.

Riassumendo alcuni fra i vari impatti attesi, la figura 13 fornisce un aggiornamento delle stime di rischio basate sui dati più recenti, confrontate con quelle ottenute dopo il Terzo Rapporto IPCC del 2001. Sono indicate le stime di rischio, in colore via via più acceso per rischi maggiori, in funzione del valore della temperatura globale. Sono anche indicate le proiezioni relative a due scenari IPCC, rispettivamente di raddoppio (scenario B1) e triplicazione (scenario A1F1) della concentrazione di CO₂ atmosferica rispetto ai livelli pre-industriali. Come si vede, il rischio e i costi economici e sociali del riscaldamento globale aumentano con la temperatura raggiunta dalla superficie del nostro pianeta, diventando molto gravi per aumenti superiori ai 2-3 °C rispetto all'era preindustriale.

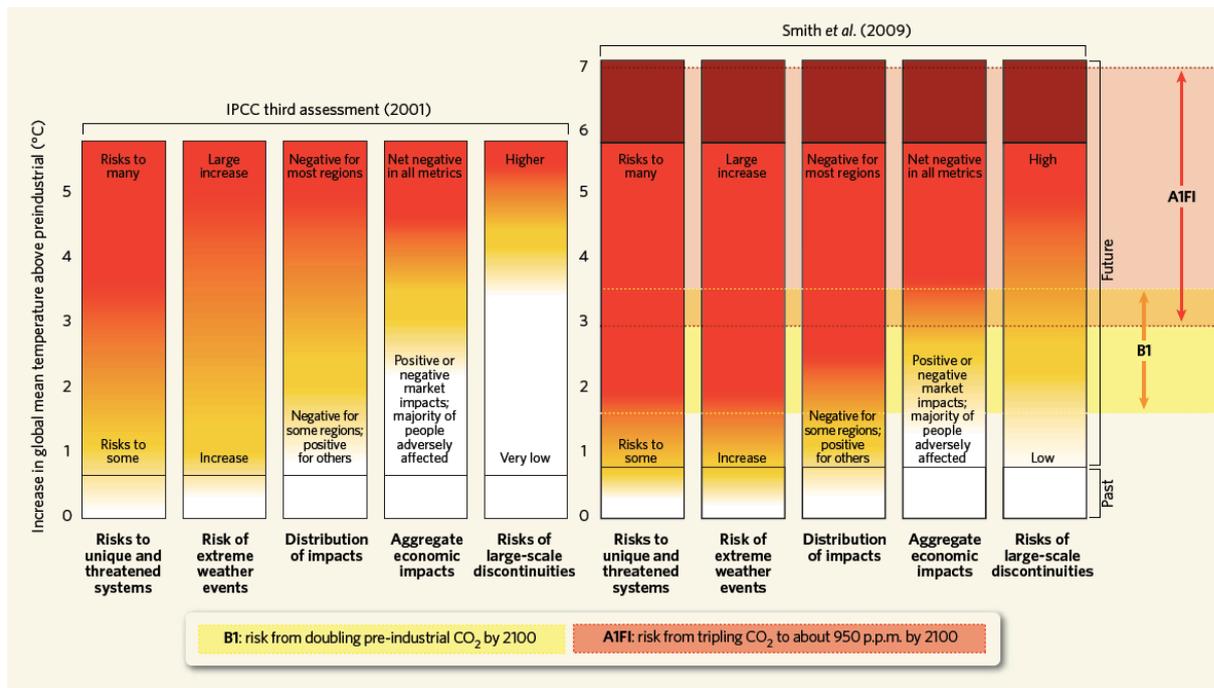


Figura 13. Aggiornamento del grafico delle "braci ardenti" ("burning embers") in seguito al Rapporto IPCC del 2007 e ai dati successivi. Sono identificate cinque principali "ragioni di preoccupazione" ("reasons for concern") e sulla verticale è indicato l'aumento di temperatura globale rispetto ai livelli pre-industriali. La scala in colore, dal bianco al rosso, indica la gravità del rischio. Sono indicate le proiezioni per due scenari IPCC, rispettivamente di raddoppio (B1) e triplicazione (A1F1) della concentrazione di CO₂ atmosferica. L'Unione Europea ha indicato come aumento massimamente sostenibile il livello di 2 °C rispetto all'epoca pre-industriale. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, Schneider 2009, copyright 2009.)

5c. Impatti attesi sul territorio nazionale

I modelli climatici globali hanno massima risoluzione spaziale dell'ordine del centinaio di chilometri e non sono in grado di descrivere correttamente il cambiamento climatico atteso in regioni specifiche. Le stime degli impatti attesi su regioni geografiche limitate sono quasi sempre ottenute con procedure di "downscaling" dei modelli climatici globali. In questo approccio, le informazioni fornite dagli scenari globali vengono utilizzate come condizioni al contorno e come forzanti per modelli, sia deterministici che di tipo statistico/empirico, che descrivono le caratteristiche di interesse della regione in esame. La stima del cambiamento climatico a scala regionale è ancora affetta da errori significativi (molto più che nel caso delle proiezioni globali) e, per la sua importanza, è al momento oggetto di intensa ricerca. Citiamo nel seguito alcune delle proiezioni climatiche più significative per l'area mediterranea e per il territorio italiano.

Dalle proiezioni dei modelli attuali il bacino mediterraneo emerge chiaramente, e in modo consistente fra i diversi modelli, come una "hot-spot", ovvero un'area particolarmente sensibile al cambiamento climatico, soprattutto nel periodo primavera-estate che, secondo le proiezioni, dovrebbe diventare molto più caldo e secco in futuro. Nelle prossime decadi, il riscaldamento globale comporterà, con grande probabilità, un aumento degli episodi estremi in Europa e in Italia, sia nel senso di precipitazioni intense che di onde di calore estive, e una maggiore incidenza di eventi siccitosi. In particolare, fenomeni come l'onda di calore dell'estate 2003 in Europa possono diventare molto più probabili, con temperature estive medie anche di 4 °C maggiori rispetto a quelle del trentennio 1961-1990, come indicato dai modelli climatici regionali.

Un impatto particolarmente forte del riscaldamento globale è atteso nelle aree montane, in particolare sul ciclo idrologico in area alpina e sulla quantità e qualità d'acqua disponibile, sia come acqua potabile che per usi industriali e di produzione di energia. Un impatto significativo riguarda la possibilità di cambiamenti nel regime e nell'abbondanza delle precipitazioni, nell'altezza, estensione e durata del manto nevoso, con le conseguenti modifiche dei regimi fluviali e della disponibilità di acqua, anche in regioni di pianura distanti dalle zone montane. Analogamente, ci si attende una ulteriore riduzione dei ghiacciai e del permafrost, con i conseguenti rischi associati all'instabilità dei versanti. Ad esempio, nell'estate 2002, l'intensa fusione ha portato alla formazione, sul ghiacciaio Belvedere nel gruppo del Monte Rosa, di un lago temporaneo di vaste proporzioni chiamato "Lago Effimero" e mostrato in figura 14; il lago minacciava le strutture a valle e il suo svuotamento ha richiesto l'intervento massiccio della Protezione Civile. Fenomeni di rottura catastrofica di dighe moreniche, associati alla fusione intensa e alla caduta di massi o blocchi di ghiaccio nei laghi glaciali, sono stati osservati nelle Montagne Rocciose canadesi, sulle Ande e nel Caucaso. Questi eventi possono diventare più frequenti anche sulle Alpi in condizioni di forte riscaldamento.



Figura 14. Il ghiacciaio Belvedere in Valle Anzasca nel gruppo del Monte Rosa, con il Lago Effimero situato sulla superficie del ghiacciaio, il 29 giugno 2002. Nel periodo di maggior estensione, il Lago Effimero ha raggiunto un volume di circa 3 milioni di metri cubi di acqua con una profondità massima di più di 50 metri. Si intravede a sinistra il Lago delle Locce, associato ad un precedente episodio alluvionale (foto A. Provenzale).

Gli ecosistemi terrestri potranno risentire in modo significativo del riscaldamento globale, soprattutto in area alpina, con aumentato rischio di estinzione per molte specie, cambiamenti nella struttura delle comunità biologiche e rischio di perdita di biodiversità, soprattutto per aumenti di temperatura superiori ai 2-3 °C. Può tuttavia essere difficile distinguere fra gli effetti del cambiamento climatico e quelli dovuti alle modifiche nelle pratiche agropastorali e nell'uso del territorio, che non possono essere ignorate per poter prevedere con precisione la risposta degli ecosistemi naturali.

Più complessa risulta la risposta del livello marino nel Mediterraneo. La variazione del livello del mare in una determinata regione geografica è causata dalla combinazione di cause geologiche (eustatismo, glacio-idro-isostasia, tettonica) e di cause climatiche, che inducono variazioni di densità, attraverso modifiche della salinità e della temperatura dell'acqua, e variazioni nella quantità totale di acqua liquida, a causa della fusione dei ghiacci continentali. L'innalzamento del livello marino del Mediterraneo, previsto dagli scenari climatici, potrebbe essere inferiore rispetto a quello globale (fino al 50%), con massimi relativi nelle zone più settentrionali. Le proiezioni dei modelli climatici indicano infatti che il bacino del Mediterraneo sarà soggetto ad un aumento della temperatura e ad una diminuzione della portata dei fiumi. Questi due effetti combinati potrebbero limitare i cambiamenti nella stratificazione delle acque, in quanto la diminuzione dell'apporto fluviale implica un aumento della salinità del mare che potrebbe essere compensato dall'aumento di temperatura. Tuttavia, l'invasione di specie marine alloctone (ovvero non originarie di questo mare), già osservata nel Mediterraneo, e la possibilità della loro sopravvivenza sono fortemente correlate all'aumento di temperatura. Questo implica non solo una nuova composizione delle comunità biologiche presenti in una determinata zona di mare (nuove specie si sostituiscono a quelle indigene) ma anche la possibilità di impatti importanti sulle attività economiche legate alla pesca, se il fenomeno coinvolgerà specie di interesse commerciale.

Il cambiamento climatico potrà avere impatti significativi sul regime dei venti, e, di conseguenza, sulla produzione di energia eolica. Per sfruttare appieno l'energia eolica e portare non solo benefici ambientali e climatici ma anche economici, è necessario avere informazioni sulla climatologia del vento nel passato e su quella attesa in futuro, in termini di distribuzione di frequenza del vento e, soprattutto, dei valori estremi dei venti e dei tempi di ritorno ad essi associati. Queste informazioni permettono di determinare il tipo di turbina più adatto al tipo di clima atteso, per assicurare agli impianti eolici un periodo di vita più lungo possibile. L'impatto dello spostamento delle traiettorie dei cicloni extratropicali sulla distribuzione di frequenza del vento e l'intensificazione degli eventi estremi sono quindi di estremo interesse al fine dell'ottimizzazione dello sfruttamento dell'energia eolica, sia sulla terraferma che *offshore*.

Come già discusso per gli impatti a scala globale, anche nel caso del territorio italiano sono attesi ulteriori impatti sulla salute, con il rischio di maggiore diffusione di malattie legate alle alte temperature, possibili impatti sul turismo, specialmente in aree montane, e un impatto negativo del riscaldamento globale sul patrimonio culturale, particolarmente significativo a causa della rilevanza del patrimonio artistico italiano.

6. Elementi di incertezza e aree ove potenziare la ricerca

Il clima è un sistema complesso, il cui studio richiede un approccio interdisciplinare e l'utilizzo di tutti gli strumenti a disposizione della comunità scientifica: dati ad alta risoluzione, serie storiche, dati paleoclimatici, esperimenti di laboratorio su processi specifici, approcci teorici e concettuali per la comprensione di singoli meccanismi, modelli numerici che richiedono l'uso di super-calcolatori. Per ottenere risultati significativi, occorre una strategia nazionale che permetta una stretta collaborazione fra le diverse Istituzioni che si occupano di ricerca climatica in Italia e nelle altre nazioni.

In questo contesto e sulla base di quanto esposto nei capitoli precedenti, riteniamo che vi siano diversi temi fondamentali ancora aperti, che richiedono un particolare sforzo di ricerca al fine di migliorare la comprensione dei processi climatici ed ottenere una più precisa simulazione numerica del cambiamento climatico atteso e dei suoi impatti sul territorio nazionale. Nel seguito, citiamo alcuni esempi, in una lista chiaramente non esaustiva.

1. Ruolo degli aerosol

Insieme alle nubi, gli aerosol rappresentano attualmente uno dei maggiori fattori di incertezza nei modelli climatici. La concentrazione di aerosol dipende, oltre che da fattori naturali (eruzioni vulcaniche, polveri desertiche, sale marino, particolato biogenico) anche dall'intensità delle emissioni antropiche. Inoltre, le modificazioni indotte dall'uomo sugli ecosistemi possono aumentare l'intensità di alcune sorgenti naturali di aerosol, quali il sollevamento di polveri dai suoli aridi e gli incendi boschivi. Le regioni di produzione di aerosol da attività antropiche hanno assunto, nel corso del XX secolo, estensioni e poteri emissivi tali da modificarne la concentrazione su scala continentale, con possibili effetti sul bilancio radiativo dell'atmosfera terrestre.

Il bilancio globale delle forzanti radiative, come riportato in figura 10, fornisce informazioni sulla tendenza della variazione della temperatura media globale, ma non è in grado di rappresentare la diversità degli effetti tra le varie regioni del globo. In particolare, le

forzanti associate agli aerosol antropici presentano forti variazioni spaziali dovute alla disomogenea distribuzione delle sorgenti, alla varietà delle caratteristiche chimiche, fisiche e ottiche degli aerosol e al loro breve tempo di residenza in atmosfera. Ne risulta una differenza di diversi ordini di grandezza nell'intensità delle forzanti associate agli aerosol tra le regioni interessate dall'accumulo e dal trasporto di inquinanti e quelle remote, meno inquinate. Inoltre, le forzanti legate agli aerosol nelle diverse regioni presentano *trend* temporali distinti a seconda dell'area considerata. Questo fa sì che, mentre nel caso della CO₂ le riduzioni siano ugualmente efficaci nelle varie regioni del globo, nel caso degli aerosol gli effetti delle riduzioni nelle emissioni operate nei diversi Paesi non saranno tra loro equivalenti. Ad esempio, l'adozione di tecnologie di combustione più "pulite" in Europa ha portato negli ultimi trent'anni a una marcata diminuzione della forzante radiativa degli aerosol nelle regioni artiche. Da questo punto di vista si ritiene che, in aree fortemente influenzate da attività antropiche di combustione, la riduzione delle emissioni di "black carbon" possa rappresentare una strada efficace per la riduzione degli effetti antropici sul riscaldamento globale.

Un'altra importante conseguenza della diversa distribuzione spaziale delle forzanti radiative dovute ad aerosol, nonché del loro diverso effetto nei vari livelli dell'atmosfera, è la modificazione della circolazione atmosferica. Tali effetti potranno essere pienamente compresi solo grazie all'utilizzo di modelli climatici che includano una descrizione dettagliata della dinamica, della chimica e del trasporto di aerosol.

2. Ruolo delle nubi

Il cambiamento climatico porterà inevitabilmente a modificazioni della copertura nuvolosa nelle varie regioni del pianeta, con impatti sull'albedo terrestre e sul bilancio radiativo di entità ancora da comprendere pienamente. Per questo, determinare come l'estensione, il tempo di vita e le caratteristiche ottiche delle nubi varino nel tempo è un obiettivo di primaria importanza per i modelli climatici.

E' stato dimostrato che elevate concentrazioni di aerosol portano alla formazione di nubi composte da goccioline più piccole con un impatto sulla riflettività delle nubi, sulla copertura nuvolosa e sulle precipitazioni. Un secondo effetto è quello dell'assorbimento e riflessione della radiazione solare da parte delle particelle di aerosol che influenzano la stratificazione termica dell'atmosfera e quindi l'altezza delle nubi e la convezione. L'effettiva entità di questi impatti è tuttora affetta da grande incertezza, perché gli effetti osservati dipendono dal tipo di nube e sono generalmente resi confusi dalla grande variabilità e complessità dei processi meteorologici e dinamici. Fra tutti i meccanismi fisici di retroazione (conosciuti) del sistema climatico, dunque, quelli associati ai processi di formazione delle nubi sono probabilmente ancora associati alla maggiore incertezza, anche se negli ultimi anni la comprensione di questi processi è migliorata grazie allo sviluppo sia delle tecniche di osservazione (telerilevamento) che di quelle modellistiche, in grado ora di riprodurre una maggiore diversità di processi meteorologici, radiativi e microfisici.

In generale, inoltre, l'avanzamento della conoscenza degli effetti degli aerosol sulle nubi è avvenuto in maniera differenziata per diversi tipi di nube e per diverse regioni del pianeta, con risultati più consolidati per le regioni tropicali. Nonostante la grande incertezza di questi effetti sul riscaldamento/raffreddamento del pianeta, molto si è comunque appreso sugli impatti a scala regionale, che sono importanti per il ciclo dell'acqua, i flussi tra ecosistemi ed atmosfera e per l'agricoltura.

3. Ruolo del vapore acqueo

Come mostrato in figura 1, il vapore acqueo è il principale gas serra, ma, come risulta dalla figura 10, non è annoverato fra le forzanti che possono causare un cambiamento del bilancio radiativo. Questa apparente incoerenza è dovuta al fatto che la concentrazione di vapore d'acqua non è in generale determinata da emissioni dirette, di origine antropica, di vapore. La concentrazione di vapore d'acqua dipende invece da fattori quali la temperatura, i meccanismi di trasporto e i processi di formazione delle nubi. Questi dipendono, a loro volta, dallo stato climatico: per questo motivo, la concentrazione di vapore d'acqua e il forte effetto serra da esso generato, pur non aumentando per emissioni antropiche dirette, può cambiare in modo indiretto a causa del riscaldamento globale. Come discusso in precedenza, il vapore d'acqua gioca dunque un ruolo cruciale di amplificazione del riscaldamento indotto dall'immissione di gas serra di origine antropica. Migliori misure del vapore acqueo nell'alta troposfera, zona che maggiormente contribuisce all'effetto serra di questo gas, sono estremamente importanti per la comprensione quantitativa del ruolo del principale gas serra.

4. Qualità dell'aria e cambiamenti climatici

Le tematiche riguardanti la qualità dell'aria ed i cambiamenti climatici sono state fino ad oggi considerate separatamente, sia al livello di ricerca scientifica che a quello della definizione di politiche ambientali. Tuttavia, sta oggi emergendo in modo sempre più chiaro la consapevolezza che le due tematiche sono strettamente correlate e che vanno affrontate in un contesto unitario. E' intuitivo osservare che le fonti di inquinamento antropiche (traffico veicolare, produzione di energia, produzioni industriali) emettono contemporaneamente in atmosfera anche specie chimiche, CO₂ in primo luogo, che influenzano l'evoluzione del clima. Dal punto di vista degli effetti, vi sono politiche ambientali che possono determinare sia un miglioramento della qualità dell'aria che una riduzione dell'emissione di gas ad effetto serra, ma vi sono anche politiche che, migliorando uno di questi aspetti, vanno a detrimento dell'altro. Il caso, già citato, della diminuzione globale degli aerosol atmosferici di origine antropica è un esempio di come misure fondamentali per la salute umana possano comportare un effetto netto di aumento dell'effetto serra. A scala locale o regionale, gli effetti climatici degli aerosol sono molto variabili in segno ed intensità e dipendono dalla predominanza e dal tipo di sorgenti antropiche presenti nell'area. Ad esempio, la riduzione delle emissioni di *black carbon*, che ha tempi di vita in atmosfera di pochi giorni o settimane, può mitigare in molte aree il riscaldamento ed aiutare a "prendere tempo" per attuare strategie di riduzione di emissioni di CO₂. Ovviamente, la riduzione della emissione di *black carbon* porta anche a positivi effetti immediati sulla salute umana. Analogo esempio può essere avanzato per quanto riguarda l'aumento della concentrazione di ozono atmosferico, inquinante dannoso per l'uomo e per gli ecosistemi e gas a potente effetto serra. E' sempre più chiaro che vi sono vantaggi sufficientemente grandi in termini sociali ed economici a perseguire politiche di "co-benefit".

5. Dinamica dell'oceano, interazioni fra oceano e atmosfera, strutture a mesoscala

L'oceano ha un importante ruolo di regolazione del clima (la metà circa del calore trasportato dall'Equatore verso i Poli è associata alle correnti oceaniche), stante l'elevata capacità termica che lo caratterizza ed il fatto che circa il 70% della superficie terrestre è ricoperto da acqua. Oltre all'innalzamento del livello marino, la fusione della calotta groenlandese e la conseguente diminuzione della salinità dell'acqua marina potrebbero portare ad una diminuzione dell'intensità della circolazione termoalina nell'Oceano Atlantico. Tale circolazione è associata ad un delicato bilancio di temperatura e salinità, per cui ogni

variazione di questi parametri potrebbe avere effetti significativi e potenzialmente innescare delle instabilità nella struttura della circolazione stessa. Negli ultimi anni, il ruolo della circolazione termoalina e delle sue instabilità è stato ampiamente studiato ed in parte ridimensionato: in particolare, i risultati modellistici riportati dall'IPCC valutano poco probabile l'interruzione della circolazione termoalina con gli attuali livelli di riscaldamento globale. Ulteriori studi sono dunque necessari, per definire in modo quantitativo la sensibilità della circolazione oceanica a diversi livelli di riscaldamento globale.

Gli oceani sono anche responsabili di una frazione rilevante dell'assorbimento di CO₂ di origine antropica. Tuttavia, numerosi processi che possono modificare la capacità di assorbimento della CO₂ da parte degli oceani sono tuttora poco noti. Di fatto, l'assorbimento della CO₂ avviene attraverso processi fisico/chimici (scambi con l'atmosfera e trasporto negli strati profondi) e processi biologici (fotosintesi fitoplanctonica) che sono fortemente influenzati dalla circolazione oceanica e dalla sua variabilità. La circolazione oceanica è a sua volta determinata da forzanti di tipo sia termodinamico (flussi di calore, flussi di acqua e sale, attraverso la differenza fra evaporazione e precipitazione e gli apporti fluviali) che meccanico (vento), nonché da complessi meccanismi di interazione con l'atmosfera e di redistribuzione dell'energia su differenti scale di moto. Seppure siano note le caratteristiche generali di questa circolazione, esistono numerosi fattori che rendono incerto il ruolo netto degli oceani nel mitigare o amplificare i cambiamenti climatici in atto. L'incertezza riguarda sia alcune grandezze misurate che la loro variabilità, nonché la possibilità di simulare adeguatamente la loro dinamica con i modelli numerici.

Su scale spazio-temporali più piccole, un processo importante riguarda la convezione marina intensa e localizzata in piccole aree, soprattutto polari, che alimentano la circolazione termoalina. Altro fattore importante riguarda l'effetto dei processi a mesoscala (circa 10-200 km) nella formazione e nel trasporto orizzontale e verticale delle masse d'acqua e con esse dei nutrienti necessari alla fotosintesi e della CO₂ disciolta. Alla mesoscala, i flussi oceanici sono caratterizzati dalla presenza di strutture quali vortici, fronti e getti, che creano una turbolenza dinamicamente disomogenea e rendono i processi di trasporto assai diversi da quanto previsto da semplici modelli di dispersione stocastica. Ad oggi, non è ancora chiaro in quale misura l'attività a mesoscala moduli la circolazione generale degli oceani, né in che modo l'attività a mesoscala possa risentire del cambiamento climatico in atto. Una stima più precisa dell'effetto netto delle instabilità a mesoscala (e in particolare del trasporto verticale ad essa associato) risulta dunque essenziale. Sono necessarie analisi più accurate delle misure satellitari e dei dati oceanografici che descrivono la dinamica oceanica e le interazioni tra la sua variabilità e le risposte dell'ecosistema marino. Inoltre, una migliore stima dei fenomeni di mescolamento, orizzontale e verticale, associati ai processi a mesoscala è cruciale per poter rappresentare correttamente il trasporto meridionale di massa e di calore e i fenomeni di subduzione nei modelli climatici.

6. Interazioni fra clima e biosfera

Il clima terrestre è determinato, in molti suoi processi, dalle proprietà della biosfera e dai flussi di elementi chimici, di acqua e di energia fra la biosfera e le altre componenti del sistema climatico. Sta emergendo, in modo sempre più evidente, come gli organismi viventi possano giocare un ruolo essenziale nella regolazione della dinamica e della variabilità climatica, fino ad arrivare ad una vera e propria co-evoluzione del clima e della biosfera, che solo ora stiamo iniziando a comprendere e modellare. Per esempio, i flussi di evapotraspirazione associati con la presenza di vegetazione possono modificare il bilancio di vapor d'acqua atmosferico, favorendo l'instabilità convettiva, influenzando il regime delle

precipitazioni in aree continentali e contribuendo a diminuire la probabilità di siccità estive e onde di calore. In molte regioni, meccanismi di retroazione positiva fra vegetazione e clima possono indurre fenomeni di instabilità nella dinamica degli ecosistemi, associati con il superamento di un "*tipping point*", ovvero di un punto di non-ritorno. Al momento, non è ancora chiaro se e come meccanismi ecologici locali possano innescare una cascata di effetti su scale via via maggiori, tema questo centrale nella ricerca sulle interazioni fra clima e biosfera. Analogamente, è necessario ottenere migliori descrizioni della dinamica degli ecosistemi e dei flussi biogeochimici associati (ciclo del carbonio, ciclo dell'azoto), da inserire nei modelli globali e regionali. La comprensione del funzionamento di alcuni di questi ecosistemi e, in particolare, dell'ecosistema marino, risulta ad oggi ancora molto parziale: saranno necessari notevoli sforzi, sia di carattere sperimentale che modellistico, perché si possa avere un quadro sufficientemente accurato dei meccanismi che li regolano. Nonostante la complessità degli effetti e dei meccanismi di retroazione coinvolti, si stima comunque che la risposta complessiva degli ecosistemi terrestri e marini all'aumento delle temperature globali sarà una minore capacità di contenimento di CO₂ e metano, il che si tradurrà in un'accelerazione del riscaldamento (retroazione positiva). Negli ultimi anni è anche emerso il ruolo cruciale giocato dall'attività biologica marina nella produzione di aerosol (e conseguentemente nei processi di formazione di goccioline di nube) ed è dunque necessario sviluppare parametrizzazioni adeguate di questi effetti, da inserire nei modelli climatici.

7. Studio e modellistica del paleoclima mediterraneo

In Italia, sia negli enti di ricerca che in varie università e soprattutto nell'ambito delle Scienze Geologiche, sono attivi diversi gruppi di ricerca che si occupano della misura e dell'analisi di dati paleoclimatici. I dati disponibili alla comunità scientifica del nostro paese riguardano sia le fluttuazioni climatiche su periodi di decine o centinaia di migliaia di anni, ottenuti da carotaggi dei ghiacci antartici (progetto EPICA), che in maggiore dettaglio le fluttuazioni avvenute negli ultimi 10-20 mila anni, soprattutto nell'area mediterranea. Manca invece, quasi completamente, uno sforzo modellistico volto alla simulazione del paleoclima su diverse scale temporali. La simulazione del paleoclima è tuttavia essenziale come banco di prova per verificare se la nostra comprensione dei meccanismi di variabilità climatica risulta corretta. E' dunque importante la realizzazione di uno sforzo nazionale volto alla costruzione di una gerarchia di modelli per la simulazione del paleoclima e dei suoi meccanismi di variabilità. Particolare rilevanza riveste lo sviluppo di un modello paleoclimatico regionale semplificato, per la simulazione del clima dell'area mediterranea dalla fine dell'ultima glaciazione.

8. Modelli climatici a scala mediterranea e impatti del cambiamento climatico sul territorio nazionale

I modelli climatici sono ancora scarsamente efficaci nella rappresentazione dei cambiamenti climatici su regioni geografiche di dimensioni ridotte, quali l'area mediterranea e la regione alpina. Da un punto di vista di gestione del rischio e delle risorse, invece, sono necessarie stime quantitative degli effetti associati con i cambiamenti climatici in vari scenari di riscaldamento globale e, soprattutto, degli impatti attesi sul ciclo idrologico e sulla disponibilità di acqua, sugli ecosistemi e la biodiversità, sulla produzione agricola, sulla salute e sul patrimonio artistico ed architettonico.

Per questo motivo, risulta essenziale uno sforzo sinergico, volto alla costruzione e all'implementazione, da parte della comunità scientifica italiana, di un modello climatico

regionale dell'area mediterranea per la stima di scenari regionali di cambiamento climatico e la valutazione degli impatti ad essi associati. Accanto al modello regionale, dovranno essere sviluppate e implementate tecniche di "downscaling" statistico delle variabili climatiche principali (temperatura, precipitazione, venti, etc) per ottenere stime di probabilità di condizioni al suolo, da utilizzare come input per i modelli degli impatti del cambiamento climatico. Fra questi, citiamo il caso critico dell'ambiente montano, particolarmente fragile e fortemente sensibile al riscaldamento globale. In questo ambito, risultano necessari sia lo svolgimento di campagne di misura e monitoraggio in campo che lo sviluppo di modelli deterministici e/o statistici per la stima dell'impatto atteso.

7. Conclusioni

I meccanismi alla base del funzionamento del clima terrestre sono estremamente complessi e certamente non compresi in tutti i loro aspetti. Tuttavia queste incertezze scientifiche non corrispondono ad una mancanza d'informazione: si tratta infatti di conoscenze ben caratterizzate, quantificate in termini probabilistici e accompagnate da valutazioni critiche che ne garantiscono l'oggettività. Il quadro della comprensione scientifica che emerge dai numerosi studi, pubblicati su riviste scientifiche dalla comunità internazionale, conferma la presenza di un riscaldamento globale e indica che, con altissima probabilità, una parte rilevante del riscaldamento è dovuto all'immissione in atmosfera di gas serra di origine antropica.

Le conoscenze attuali segnalano l'urgenza di adottare misure di salvaguardia e di pianificazione, basate su procedure di mitigazione degli impatti che comportano maggior rischio per l'uomo e per gli ecosistemi, assieme a strategie di adattamento ai cambiamenti climatici, considerati ormai inevitabili dati gli attuali livelli di gas serra in atmosfera. Evitando in modo drastico qualunque forma di catastrofismo o di rassegnata accettazione degli eventi, è necessario utilizzare la sfida posta dal cambiamento climatico e dai suoi effetti come motore di progresso economico e sociale, con lo sviluppo di tecnologie sicure, non inquinanti e a bassa emissione di gas serra, tecniche di confinamento della CO₂ e, in generale, un forte impulso alla ricerca e all'innovazione.

La definizione di criteri per la riduzione delle emissioni antropiche aventi un'influenza sul clima dovrebbe avvenire nel contesto delle politiche ambientali, di più lunga tradizione, finalizzate alla tutela della salute dell'uomo e degli ecosistemi. Le esigenze di miglioramento della qualità dell'aria e di salvaguardia della salute nelle aree più densamente popolate del pianeta richiedono la riduzione, nel più breve tempo possibile, delle emissioni di aerosol di origine antropica. Questo comporterà, come effetto collaterale, la diminuzione dell'azione di contro-bilanciamento del riscaldamento globale da parte degli aerosol. La valutazione degli scenari futuri di emissione dovrà dunque tener conto di questo fatto, richiedendo la definizione di politiche molto più rigorose di limitazione dei gas serra. D'altra parte, però, la diminuzione delle emissioni di *black carbon*, agente forzante positivo capace di agire su scale di tempo relativamente rapide, è attualmente considerata una possibile soluzione per guadagnare tempo rispetto agli effetti più drammatici del riscaldamento, permettendo nell'immediato di mantenere la temperatura globale sotto il valore critico, mentre vengono definite le strategie a lungo termine per la riduzione di emissioni di gas serra.

Idealmente, per definire tali misure di salvaguardia e pianificazione, si vorrebbe poter disporre di informazioni certe. Per questo le conclusioni circostanziate dei risultati scientifici, che utilizzano espressioni probabilistiche quali "quasi certamente" ed "estremamente

probabile", possono risultare talvolta di difficile interpretazione per coloro che, sulla base di queste stesse informazioni, devono operare delle scelte. Questo possibile iato fra il linguaggio della scienza e l'azione della politica diventa spesso evidente nel caso dei cambiamenti climatici, che comportano un rischio grave e urgente negli interventi, ma non immediato negli effetti, per giunta segnalato solo dalla scienza e non direttamente percepito dalla società civile. Tuttavia, una società moderna ha bisogno di una scienza e di una politica che siano capaci di lavorare insieme, pur operando senza sconfinamenti reciproci. E' pertanto importante che si identifichino e riconoscano i ruoli e le modalità con cui i cambiamenti climatici dovrebbero essere gestiti da scienza e politica.

Il ruolo della scienza è quello di fornire informazioni quanto più oggettive possibili. I ricercatori che studiano il clima hanno il compito di comprendere i processi naturali e, al meglio di questa comprensione, effettuare delle proiezioni (espresse in termini probabilistici) del clima futuro per diversi scenari di scelte gestionali, valutando anche la minaccia associata a ciascuna di queste previsioni. Alla scienza economica spetta quantificare i costi (in termini di conseguenza sull'economia attuale) e i benefici (in termini di riduzione dei rischi) associati ai diversi scenari di intervento o non intervento, sia in termini di mitigazione (cioè di riduzione delle cause) che di adattamento (cioè premunendoci per gli effetti). Alla fine, il prodotto della minaccia per la probabilità che questa si realizzi rappresenta una misura del rischio che la comunità scientifica segnala alla politica. Sulla base di queste informazioni, la politica ha poi il compito di valutare le modalità d'intervento ed in base alle proprie priorità politiche operare delle scelte di cui si assume la responsabilità.

L'informazione tecnica è un ambito esclusivamente scientifico, le priorità sono un ambito esclusivamente politico. Questo lavoro congiunto, effettuato mantenendo chiara la divisione dei ruoli, consente di razionalizzare le scelte che vengono compiute, assicurando che queste siano a vantaggio di tutta la società. Coerentemente con queste considerazioni, il presente documento si limita a fare il punto sulla attuale conoscenza scientifica e manifesta la disponibilità dei ricercatori dell'ISAC-CNR a contribuire, in collaborazione con gli altri Istituti del CNR e con tutti gli enti che si occupano di studio del clima, alle valutazioni degli effetti che si potrebbero avere nel caso dei diversi scenari di mitigazione.

Più in generale, la comunità scientifica rimane impegnata negli studi finalizzati a migliorare la nostra comprensione dei processi e a colmare quelle che sono le principali incertezze. Quelle sulle proiezioni climatiche sono diminuite significativamente negli ultimi anni, ma certamente non sono state ridotte al livello desiderabile. Anche un progresso in questa direzione richiederà una più stretta collaborazione fra la politica e la ricerca, con un incontro auspicabile fra la capacità scientifica e la volontà politica.

Appendice 1: Riferimenti bibliografici aggiuntivi, a completamento delle fonti istituzionali.

Sinossi:

- M.R. Allen et al. 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, 458, 1163-1166.
- I. Auer et al. 2007: HISTALP - Historical Instrumental climatological Surface Time series of the greater ALPine Region. *International Journal of Climatology*, 27, 17-46.
- A. Battisti et al. 2005. Expansion of geographic range in the Pine Processionary Moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15, 2084-2096.
- M. Brunetti et al. 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two Centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26, 345-381.
- S. Calmanti et al. 2007. Impact of climate variability on Alpine glaciers in northwestern Italy. *International Journal of Climatology*, 27, 2041-2053.
- J.G. Canadell et al. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 104, 18866-18870.
- R.D. Cess, 2005. Water Vapor Feedback in Climate Models. *Science*, 310, 795-796.
- N. Ciccarelli et al. 2008. Climate variability in north-western Italy during the second half of the 20th century. *Global and Planetary Change*, 63, 185-195.
- A.E. Dessler, S.C. Sherwood, 2009. A Matter of Humidity. *Science*, 323, 1020-1021.
- N. Jones, 2009. Sucking it up. *Nature*, 458, 1094-1097.
- K. McGuffie and A. Henderson-Sellers, 2005. *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons.
- G.A. Meehl et al. 2005. How Much More Global Warming and Sea Level Rise? *Nature*, 307, 1769-1772.
- M. Meinshausen et al. 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 458, 1158-1163.
- R. Monastersky, 2009. A burden beyond bearing. *Nature*, 458, 1091-1094.
- Nature Editorial, 2009. Time to Act. *Nature*, 458, 1077-1078.
- NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, 2009. GISS Surface Temperature Analysis, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2008/> .

- R. North et al. (Committee on Surface Temperature Reconstructions in the Last 2,000 Years), 2006. *Surface Temperature Reconstructions in the Last 2,000 Years*. The National Academy of Sciences, National Academies Press, USA.
- T. Palmer, R. Hagedorn, 2006. *Predictability of weather and climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- C. Parmesan, 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637-669.
- M. Parry, J. Lowe, C. Hanson, 2009. Overshoot, adapt and recover. *Nature*, 458, 1102-1103.
- J.A. Patz et al. 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438, 310-317.
- T. Reichler, J. Kim, 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, March 2008, 303-311.
- D. Rosenfeld et al. 2008. Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation ? *Science*, 321, 1309-1313.
- G. Schmidt, D. Archer, 2009. Too much of a bad thing. *Nature*, 458, 1117-1118.
- J.B. Smith et al. 2009. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 'reasons for concern'. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 106, 4133-4137.
<http://www.pnas.org/content/106/11/4133.full>

1. Dinamica e variabilità naturale del clima:

- A. Berger, 1988. Milankovitch Theory and Climate. *Reviews of Geophysics*, 26(4), 624-657.
- S. Bony et al. 2006. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, 19, 3445-3482.
- M.I. Budyko, 1969. The effect of solar radiation variations on the climate of the earth. *Tellus*, 21, 611-619.
- N. Caillon et al. 2004. Timing of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature Changes Across Termination III. *Science*, 299, 1728-1731.
- J.C. Charney, 1975. Dynamics of Deserts and Drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 193-202.
- F. D'Andrea et al. 2006. Hot and cool summers: Multiple equilibria of the continental water cycle. *Geophysical Research Letters*, 33, L24807.

- EPICA Community Members, 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623–628.
- European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA). <http://www.esf.org/index.php?id=855>
- P. Huybers, C. Wunsch, 2005. Obliquity pacing of the late Pleistocene glacial terminations. *Nature*, 434, 491-494.
- D. Lüthi et al. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453, 379-382.
- P. Minnis et al. 1993. Radiative Climate Forcing by the Mount Pinatubo Eruption. *Science*, 259, 1411-1415.
- P. Molnar, P. England. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? *Nature*, 346, 29-34.
- W. Munk, C. Wunsch, 1998. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep-Sea Research*, 45, 1976-2009.
- C.D. O'Dowd et al. 2004. Biogenically driven organic contribution to marine aerosol. *Nature*, 431, 676-680.
- L. Palchetti et al. 2006. First spectral measurement of the Earth's upwelling emission using an uncooled wideband Fourier transform spectrometer. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 5025–5030.
- L. Palchetti et al. 2008. Measurement of the water vapour vertical profile and of the Earth's outgoing far infrared flux. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2885-2894.
- J.P. Peixoto, A.H. Oort, 1992. *Physics of Climate*, American Institute of Physics, New York, USA.
- M.E. Raymo, W.F. Ruddiman, 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359, 117-122.
- A. Robock, 2000. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38, 191–219.
- C. Schar et al. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332-336.
- W.D. Sellers, 1969. A global climatic model based on the energy balance of the earth–atmosphere system. *J. Appl. Meteor.*, 8, 392-400.
- S.I. Seneviratne et al. 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205-209.
- L. Stott, A. Timmermann, R. Thunell, 2007. Southern Hemisphere and Deep-Sea Warming Led Deglacial Atmospheric CO₂ Rise and Tropical Warming. *Science*, 318, 435-438.
- C. Wunsch, R. Ferrari, 2004. Vertical Mixing, Energy, and the General Circulation of the Oceans. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 36, 281-314.

N. Zeng et al. 1999. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286, 1537-1540.

2. Riscaldamento globale e impatto del cambiamento climatico

H. Aspöck et al. 2008. Sandflies and sandfly-borne infections of humans in Central Europe in the light of climate change. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 120, 24-29.

W.S. Broecker 1997. Thermohaline Circulation, the Achilles Heel of Our Climate System: Will Man-Made CO₂ Upset the Current Balance? *Science*, 278, 1582-1588.

J.A. Church, N.J. White, 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.

P.U. Clark et al. 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, 415, 863-869.

C.A. Deutsch et al. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 105, 6668-6672.

C.M. Domingues et al. 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 453, 1090-1093.

M. Edwards, A.J. Richardson, 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430, 881-884.

K. Emanuel, 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686-688.

S. Gruber, W. Haeberli, 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, F02S18.

NASA - GISS. 2007 Was Tied as Earth's Second-Warmest Year.
<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20080116/>

J.T. Overpeck et al. 2006. Paleoclimatic Evidence for Future Ice-Sheet Instability and Rapid Sea-Level Rise. *Science* 311, 1747-1750.

C. Parmesan, G. Yohe, 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.

C. Parmesan, 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637-669.

C. Pasquero, K. Emanuel, 2008. Tropical Cyclones and Transient Upper-Ocean Warming. *Journal of Climate*, 21, 149-162.

J.A. Patz et al. 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438, 310-317.

- E. Rignot, P. Kanagaratnam, 2006. Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet, *Science*, 311, 986-990.
- D.A. Rothrock, D.B. Percival, M. Wensnahan, 2008. The decline in arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data. *Journal of Geophysical Research*, 113, C05003.
- R. Seager et al. 2002. Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? *Q. J. Royal Met. Soc.* 128, 2563-2586.
- M.C. Serreze, M. M. Holland, J. Stroeve, 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking seaice cover. *Science*, 315, 1533-1536.
- D.C. Slobbe, P. Ditmar, R.C. Lindenbergh, 2009. Estimating the rates of mass change, ice volume change and snow volume change in Greenland from ICESat and GRACE data. *Geophysical Journal International*, 176:95106, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03978.x.
- N.C. Stenseth et al. 2002. Ecological Effects of Climate Fluctuations. *Science*, 297, 1292-1296.
- J.R. Walther et al. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- P.J. Webster et al. 2005. Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309, 1844-1846.

3. Cambiamento climatico in Italia

- W. Ambrosetti, L. Barbanti, 1999. Deep water warming in lakes: an indicator of climatic change. *Journal of Limnology*, 58, 1-9.
- I. Auer et al. 2007: HISTALP - Historical Instrumental climatological Surface Time series of the greater ALPine Region. *International Journal of Climatology*, 27, 17-46.
- A. Battisti et al. 2005. Expansion of geographic range in the Pine Processionary Moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15, 2084-2096.
- M. Beniston, 2006. Mountain Weather and Climate: A General Overview and a Focus on Climatic Change in the Alps. *Hydrobiologia*, 562, 3-16.
- I. Bordi, A. Sutera, 2001. Fifty Years of Precipitation: Some Spatially Remote Teleconnections. *Water Resources Management*, 15, 247-280.
- M. Brunetti et al. 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two Centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26, 345-381.
- E. Buffo et al. 2007. Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 9, 65-72.

- S. Calmanti et al., 2007. Impact of climate variability on Alpine glaciers in northwestern Italy. *International Journal of Climatology*, 27, 2041-2053.
- N. Cannone, S. Sgorbati, M. Guglielmin, 2007. Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 360-364.
- M. Chiarle et al. 2007. Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Global and Planetary Change*, 56, 123-136.
- N. Ciccarelli et al. 2008. Climate variability in north-western Italy during the second half of the 20th century. *Global and Planetary Change*, 63, 185-195.
- M. Enserink, 2007. Tropical Disease Follows Mosquitoes to Europe. *Science*, 317, 1485.
- E. Ferroglio et al. 2005, Canine Leishmaniasis, Italy. *Emerging Infectious Diseases*, 11, 1618-1620.
- W. Haeblerli, M. Beniston, 1998. Climate Change and Its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps. *Ambio*, 27, 258-265.
- C. Harris et al. 2003. Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change*, 39, 215-225.
- A. Jacobson et al. 2004. Climate forcing and density dependence in a mountain ungulate population. *Ecology*, 85, 1598-1610.
- A. Mariotti et al. 2002. The Hydrological Cycle in the Mediterranean Region and Implications for the Water Budget of the Mediterranean Sea. *J. Climate*, 15, 1674-1690.
- M.M. Millan et al. 2005. Climatic Feedbacks and Desertification: The Mediterranean Model. *Journal of Climate*, 18, 684-701.
- M. Rixen et al. 2005. The Western Mediterranean Deep Water: A proxy for climate change. *Geophysical Research Letters*, 32, L12608.
- R. Vallorani et al. 2007. La diffusione di *Aedes Albopictus* (Skuse) (Zanzara Tigre) in relazione ai cambiamenti climatici. In: *Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, ISBN 978-88-8080-075-0
- S.E. Wijffels et al. 2008. Changing Expendable Bathythermograph Fall Rates and Their Impact on Estimates of Thermosteric Sea Level Rise. *J. Climate*, 21, 5657-5672.

4. Cause del riscaldamento globale e ruolo degli effetti antropici

- M.O. Andreae, 2007. Atmospheric aerosols versus greenhouse gases in the twenty-first century. *Phyl. Trans. R. Soc. A*, 365, 1915-1923.
- S. Arrhenius, 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, Ser. 5, 41, 237-276.

- B. Bolin, 2007. *A History of the Science and Politics of Climate Change: The Role of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- R.D. Cess, 2005. Water Vapor Feedback in Climate Models. *Science*, 310, 795-796.
- D. Chand et al. 2009. Satellite-derived direct radiative effect of aerosols dependent on cloud cover. *Nature Geoscience*, 2, 181-184.
- R.J. Charlson et al. 1991. Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. *Tellus*, 43, 152-163.
- R.J. Charlson et al. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255, 423-430.
- A.E. Dessler, S.C. Sherwood, 2009. A Matter of Humidity. *Science*, 323, 1020-1021.
- P. Dietze, <http://www.john-daly.com/forcing/forcing.htm>
- V.J. Fabry et al. 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Sciences*, 65, 414.
- J. Fourier, 1824. Remarques Générales Sur Les Températures Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*, 27, 136.167.
- InterAcademy Panel on international issues (IAP). *IAP Statement on ocean acidification*, June 2009. <http://www.interacademies.net/CMS/8900.aspx>
- C.D. Keeling et al. 1976. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, 28, 538.
- C.D. Keeling, A.F. Bollenbacher, T.P. Whorf, 2005. Monthly atmospheric $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratios for 10 SIO stations. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- J.E. Kristjánsson et al. 2008. Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds – a reassessment using MODIS data. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7373-7387.
- R.S. Lindzen, M.-D. Chou, and A.Y. Hou, 2001. Does the Earth Have an Adaptive Infrared Iris? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 417-432.
- D. Möller, 1984. Estimation of the global man-made sulphur emission. *Atmospheric Environment*, 18, 19-27.
- G. Myhre et al. 2009. Modelled radiative forcing of the direct aerosol effect with multi-observation evaluation. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1365-1392.
- S. Oltmans et al., 2006. Long-term changes in tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*, 40, 3156–3173.
- P. Pilewskie, 2007. Climate change: Aerosols heat up. *Nature*, 448, 541-542

- V. Ramanathan, G. Carmichael, 2008. Global and regional climate change due to black carbon. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo156.
- D. Rosenfeld et al. 2008. Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation ? *Science*, 321, 1309-1313.
- S. Sandroni, D. Anfossi, 1995. Trend of Ozone in the Free Troposphere above Europe. *Il Nuovo Cimento*, 18C, 497-503.
- K.P. Shine, W.T. Sturges, 2007. CO₂ is not the only gas. *Science*, 315, 1804-1805.
- W.G.N. Slinn, 1991. Hints of another gremlin in the greenhouse: anthropogenic sulfur. *Atmospheric Environment*, 25, 2473-2489.
- B.J. Soden et al. 2005. The Radiative Signature of Upper Tropospheric Moistening. *Science*, 310, 841-844.
- F. Solmon et al. 2008: Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties. *Geophysical Research Letters*, 35, L24705, doi:10.1029/2008GL035900.
- J. Staehelin et al., 1994. Surface ozone trends at Arosa (Switzerland). *Atmospheric Environment*, 28, 75-87.
- H. Svensmark, E. Friis-Christensen, 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage - A missing link in solar-climate relationships, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 59, 1225-1232.
- The Royal Society, 2008. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. *RS policy document 15/08*, pag. 132.
- C. Tomasi et al. 2007. Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations. *J. Geophysical Research - Atmospheres*, 112, D16205.
- M. Wild et al. 2005. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science*, 308, 847-850.

5. Scenari globali e regionali

5a. Modelli numerici del sistema climatico

Centro euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici
 Divisione applicazioni numeriche e scenari.
<http://www.cmcc.it/ricerca/divisioni-di-ricerca/ans>

- M. Collins, S. Knight, 2007. Theme Issue "Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change", *Philosophical Transaction A*, 365, 1857.
- F. Giorgi, 2005. Climate change prediction. *Climatic Change*, 73, 239-265.

F. Giorgi, 2008. Regional patterns of climate change. *Encyclopedia of Global Change*, The Oxford Companion, Oxford University Press, Oxford, U.K.

Hadley Center, Met Office, UK. *Climate projections*.
<http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/projections/>

J.W. Hurrell et al. 2009. *Decadal Climate Prediction: Opportunities and Challenges*.
Community White Paper. OceanObs'09.

Max Planck Institute fur Meteorologie, Hamburg, Germania.
ECHAM GCM
<http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam.html>

J.S. Pal et al. 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1395-1409.

T.N. Palmer et al. 2008. Towards seamless prediction: calibration of climate change forecasts using seasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 459-470.

S. Rahmstorf et al. 2007. Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science*, 316, 709, DOI: 10.1126/science.1136843.

T. Reichler, J. Kim, 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, March 2008, 303-311.

M. Rodwell, T.N. Palmer, 2007. Using numerical weather prediction to assess climate models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 129-146.

J. Shukla et al. 2009: Revolution in Climate Prediction is Both Necessary and Possible: A Declaration at the World Modelling Summit for Climate Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 16-19.

5b. Scenari globali

M.R. Allen et al. 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, 458, 1163-1166.

R.B. Alley et al. 2003. Abrupt Climate Change, *Science*, 299, 2005-2010.

A. Bonazza et al. 2009a. Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe. *Science of the Total Environment*, 407, 2039-2050.

A. Bonazza et al. 2009b. Climate change impact: mapping thermal stress on Carrara marble in Europe. *Science of the Total Environment* (in stampa).

C.B. Field et al. 2008. *Ecological Impacts of Climate Change*. The National Academy of Sciences, National Academies Press, USA.
<http://dels.nas.edu/climatechange/ecological-impacts.shtml>

- C.M. Grossi et al. 2008. Predicting twenty-first century recession of architectural limestone in European cities. *Environmental Geology*, 56, 455-461.
- T.R. Karl, G.R. Meehl, Eds. 2008. *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate*. U.S. Climate Change Science Program, Synthesis Assessment Product 3.3. Executive Office of the President.
- E. Kriegler et al. 2009. Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 106, 5041-5046.
- T.M. Lenton et al. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 105, 786-1793.
- G.A. Meehl et al. 2005. How Much More Global Warming and Sea Level Rise? *Nature*, 307, 1769-1772.
- M. Meinshausen et al. 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 458, 1158-1163.
- T.N. Palmer, J. Räisänen, 2002. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*, 415, 512-514.
- J.A. Patz et al. 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438, 310-317.
- S. Rahmstorf, 2007. A Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368-370.
- V. Ramanathan, Y. Feng, 2008. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenger ahead. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105, 14245-14250.
- C. Sabbioni, A. Bonazza, P. Messina, 2008. Global climate change and archaeological heritage: prevision, impact an mapping. In Marchetti, N., Thuesen, I. (Eds.), *ARCHAIA. Case Studies on Research Planning, Characterisation, Conservation and Management of Archaeological Sites*. Archaeopress, Oxford, 295-300.
- H.J. Schellnhuber, 2008. Global warming: Stop worrying, start panicking? *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105, 14239-14240.
- G. Schmidt, D. Archer, 2009. Too much of a bad thing. *Nature*, 458, 1117-1118.
- S. Schneider, 2009. The worst-case scenario. *Nature*, 458, 1104-1105.
- J.B. Smith et al. 2009. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ‘‘reasons for concern’’. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 106, 4133-4137.
<http://www.pnas.org/content/106/11/4133.full>
- S. Solomon et al. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 1704-1709.

- N. Stern, 2007. *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press.
- H. Stommel, 1961. Thermohaline convection with two stable regimes of flows. *Tellus*, 13, 224-230.
- C.D. Thomas et al. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- W. Thuiller et al. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 102, 8245-8250.
- United States Global Change Research Program. Global Climate Change Impacts in the United States.
<http://www.globalchange.gov/publications/reports/scientific-assessments/us-impacts>
- 5c. Impatti attesi sul territorio nazionale*
- ACQWA: Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of WAter. EU FP7 Large-Scale Integrating Project, <http://www.acqwa.ch>
- M. Beniston, 2003. Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, 59, 5-31.
- M. Beniston, 2004. The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, 31, L02202.
- M. Beniston, 2005. Warm winter spells in the Swiss Alps: strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L01812.
- P. Burlando, R. Rosso, 2002. Effects of transient climate change on basin hydrology. 1. Precipitation scenarios for the Arno River, central Italy. *Hydrological Processes*, 6, 1151-1175.
- E. Coppola, F. Giorgi, 2009. An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy from recent global and regional climate model simulations. *International Journal of Climatology*, in stampa.
- N.S. Diffenbaugh et al. 2007. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Lett.*, 34, L11706.
- X. Gao, J.S. Pal, F. Giorgi, 2006. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03706.
- X. Gao, F. Giorgi, 2008. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution regional climate projections. *Global and Planetary Change*, 62, 195-209.

F. Giorgi, P. Lionello, 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63, 90-104.

Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/>

P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo (Eds.), 2006. *Mediterranean Climate Variability 4*. Elsevier.

M. Marcos, M.N. Tsimplis, 2007. Forcing of coastal sea level rise patterns in the North Atlantic and the Mediterranean Sea. *Geophys. Res. Lett.* 34, L18604.

M. Marcos, M.N. Tsimplis, 2008. Comparison of results of AOGCMs in the Mediterranean Sea during the 21st century. *J. Geophysical Res.*, 113, C12028.

L. Salandin et al. Il Lago Effimero sul Ghiacciaio del Belvedere. AINEVA, http://www.aineva.it/pubblica/neve51/7_effimero.html

J.-P. Theurillat, A. Guisan, 2004. Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review. *Climatic Change*, 50, 1573-1480.

L. Wietze and R.S.J. Tol, 2002. Impact of climate on tourist demand. *Climatic Change*, 55, 429-449.

6. Elementi di incertezza e aree ove potenziare la ricerca

6.1 Ruolo degli aerosol in atmosfera

T.C. Bond, H. Sun, 2005. Can reducing black carbon emissions counteract global warming? *Environmental Science and Technology*, 39, 5921-5926.

W.-T. Chen, H. Liao, J.H. Seinfeld, 2007. Future climate impacts of direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research*, 112, D14209, doi:10.1029/2006JD008051.

M.Z. Jacobson, 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon plus organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *J. Geophys. Res.*, 107, (D19), 4410, doi:10.1029/2001JD001376.

K.M. Lau et al. (2006). Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 26, 855 – 864.

J.R. McConnell et al. 2007. 20th-Century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing. *Science*, 317, 1381-1384.

V. Ramanathan et al. 2007. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature*, 448, 575-579.

V. Ramanathan, G. Carmichael, 2008. Global and regional climate change due to black carbon. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo156.

L.D. Rotstayn et al. 2007. Have Australian rainfall and cloudiness increased due to the remote effects of Asian anthropogenic aerosols? *J. Geophys. Res.*, 112, D09202, doi:10.1029/2006JD007712.

H. Venzac et al. 2008. High frequency new particle formation in the Himalayas. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105,15666-15671.

6.2 Ruolo delle nubi

M.O. Andreae et al. 2004. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science*, 303, 1337-1342.

U. Lohmann, J. Feichter, 2005. Global indirect aerosol effects: A review. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715-737.

P.H.F. Oliveira et al. 2007. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. *Tellus*, 59B, 338-349.

D. Rosenfeld et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 321, 1309-1313.

6.3 Ruolo del vapore acqueo

R.D. Cess, 2005. Water Vapor Feedback in Climate Models. *Science*, 310, 795-796.

A.E. Dessler, S.C. Sherwood, 2009. A Matter of Humidity. *Science*, 323, 1020-1021.

6.4 Qualità dell'aria e cambiamenti climatici

D.J. Jacob, D. A. Winner, 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environ.*, 43, 51-63.

Kloster et al. 2008. Influence of future air pollution mitigation strategies on total aerosol radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 6405-6437.

V. Ramanathan, Y. Feng, 2009. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmos. Environ.*, 43, 37-50.

6.5 Dinamica dell'oceano, interazioni fra oceano e atmosfera, strutture a mesoscala

P. Cessi, M. Fantini, 2004. The Eddy-driven Thermocline. *J. Phys. Ocean.*, 34, 2642.

A. Hogg et al. 2008. Eddy heat flux in the Southern Ocean: Response to variable wind forcing. *J. Climate*, 21, 608-620.

N.S. Lovenduski, N. Gruber, S.C. Doney, 2008. Toward a mechanistic understanding of the decadal trends in the Southern Ocean carbon sink. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 22, doi:10.1029/2007GB003139.

S.E. Mikaloff Fletcher, et al. 2005. Inverse estimates of anthropogenic CO₂ uptake, transport, and storage by the ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 20, doi:10.1029/2005GB002530.

- C. Pasquero, A. Provenzale, A. Babiano, 2001. Parameterization of dispersion in two-dimensional turbulence. *J. Fluid Mechanics*, 439, 279-303.
- C. Pasquero et al. 2005. Impact of the spatiotemporal variability of the nutrient flux on primary productivity in the ocean. *J. Geophysical Research*, 110, C07005.
- C.L. Sabine et al. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305, 367-371.

6.6 Interazioni fra clima e biosfera

- Alpine Summer School "Interaction and Coevolution of Climate and Biosphere" 2008.
http://www.to.isac.cnr.it/aosta_old/aosta2008/index.htm
- M. Baudena, F. D'Andrea, A. Provenzale, 2008. A model for soil-vegetation-atmosphere interactions in water-limited ecosystems. *Water Resources Research*, 44, W12429.
- R.J. Charlson et al. 1987. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326, 655-661.
- S.C. Dekker, M. Rietkerk, M.F.P. Bierkens, 2007. Coupling microscale vegetation-soil water and macroscale vegetation-precipitation feedbacks in semiarid ecosystems. *Global Change Biology* 13, 671-678.
- W.W. Gregg et al. 2003. Ocean primary production and climate: Global decadal changes. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1809, doi:10.1029/2003GL016889.
- M. Heimann, M. Reichstein, 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 451, 289-292.
- C.D. O'Dowd et al. 2002. Marine particle formation from biogenic iodine emissions. *Nature* 417, 632-636.
- C.D. O'Dowd et al. 2004. Biogenically driven organic contribution to marine aerosol. *Nature*, 431, 676-680.
- M. Scheffer et al. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.
- X.D. Zeng et al. 2006. Intermediately complex models for the hydrological interactions in the atmosphere-vegetation-soil system. *Advances in Atmospheric Sciences* 23, 127-140.

6.7. Studio e modellistica del paleoclima mediterraneo

- M.A. Cane et al. 2006. Progress in Paleoclimate Modeling. *Journal of Climate*, 19, 5031-5057.
- M. Crucifix et al. 2005. Second Phase of Paleoclimate Modelling Intercomparison Project. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 86, doi:10.1029/2005EO280003.
- M. Siddall et al. 2006. Using a maximum simplicity paleoclimate model to simulate millennial variability during the last four glacial periods. *Quaternary Science Reviews*, 25, 3185-3197

6.8. *Modelli climatici a scala mediterranea e impatti del cambiamento climatico sul territorio nazionale*

- M. Beniston et al. 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71-95.
- H. J. Fowler, S. Blenkinsop, C. Tebaldi, Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International J. Climatology*, 27, 1547-1578.
- F. Giorgi, N.S. Diffenbaugh, 2008: Developing regional climate change scenarios for use in assessment of human health and disease impacts. *Climate Research*, 36, 141-151.
- N. Rebola et al. 2006. RainFARM: Rainfall Downscaling by a Filtered Autoregressive Model. *J. Hydrometeorology*, 7, 724-738.
- P.L. Vidale et al. 2003. Predictability and uncertainty in a regional climate model. *J. Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2002JD002810.

Appendice 2: Glossario.

Abrupt climate change: Cambiamento climatico repentino associato ad un'instabilità del sistema climatico ed eventualmente con il passaggio attraverso un "tipping point" (vedasi voce).

Aerosol atmosferico: Particelle e corpuscoli in sospensione in atmosfera, di natura e proprietà chimiche diverse, che dipendono dalla sorgente del particolato. Alcuni aerosol hanno origine naturale e sono generati, per esempio, da eruzioni vulcaniche o dal sollevamento di polveri da parte del vento nelle zone desertiche. Altri aerosol hanno origine antropica, essenzialmente dovuta a sorgenti di inquinamento (per esempio polveri sottili).

Albedo: Capacità di riflessione della radiazione luminosa. L'albedo di un oggetto esposto alla luce solare dipende dal colore dell'oggetto e dalla sua rugosità. In generale, oggetti bianchi o chiari riflettono più luce (e quindi si scaldano di meno) di quelli neri o scuri. Sulla Terra, le superfici di foresta e l'oceano hanno albedo bassa, mentre i ghiacci, la neve fresca, la sabbia del deserto e le nubi hanno albedo molto più alta. Le nubi, in particolare, giocano un ruolo cruciale nel determinare l'albedo media della Terra.

Assimilazione dati e analisi: In meteorologia e oceanografia l'assimilazione dati è una procedura utilizzata per fornire la stima migliore dello stato di un campo meteorologico od oceanico a un certo istante fissato. Tale procedura consiste nel combinare le osservazioni disponibili con uno stato indipendente ("*background*") che rappresenta per definizione la miglior stima dello stato del sistema in assenza di osservazioni. Il *background* viene stimato attraverso una previsione a corto raggio eseguita a partire da uno stato iniziale precedente, a sua volta stimato sulla base delle osservazioni disponibili a quell'istante e in funzione di un precedente stato di *background*. Attraverso l'assimilazione dati possiamo ottenere una rappresentazione tridimensionale dei campi meteorologici e/o oceanici quali temperatura etc. Queste rappresentazioni vengono chiamate analisi.

Black Carbon: Il "black carbon" (BC), contenuto negli aerosol emessi dalla combustione sia di combustibili fossili che di biocombustibili tradizionali, è un potente agente climatico ed è oggi stimato essere il secondo principale contribuente al riscaldamento globale.

Carota: Un campione di sedimento o ghiaccio, in genere di forma cilindrica allungata (da cui il nome), estratto mediante perforazione dei ghiacci polari o dei sedimenti marini. Il contenuto della carota, in termini di radioisotopi, di composizione chimica, di tipo di pollini e di composizione dell'aria intrappolata nelle bolle (nel caso di carote di ghiaccio) fornisce informazioni sulle condizioni climatiche al tempo in cui il sedimento o il ghiaccio è stato deposto.

Cenozoico (o Terziario): E' la più recente delle ere geologiche. Copre l'arco di tempo da 65 milioni di anni fa ad oggi.

Ciclo solare: La variazione circa undecennale del numero di macchie solari, associata con una variazione, di periodo doppio, del campo magnetico del Sole.

Circolazione termoalina: La circolazione marina guidata dalle differenze di temperatura e salinità fra regioni oceaniche diverse. La circolazione termoalina globale raggiunge grandi profondità e collega tutti gli oceani della Terra. Questa circolazione è stata suggerita essere il "nastro trasportatore" del calore negli oceani.

Costante solare: La quantità di energia elettromagnetica di origine solare che raggiunge la parte più alta dell'atmosfera della Terra è misurata dalla "costante solare", definita come la quantità di energia per unità di superficie e per unità di tempo che arriva su una superficie posta perpendicolarmente alla direzione dei raggi solari, alla distanza media della Terra dal Sole (1 Unità Astronomica, U.A.). La costante solare vale circa 1366 Watt/m², ma non è realmente costante nel tempo, in quanto il suo valore varia con il ciclo undecennale delle macchie solari e probabilmente anche su scale di tempo più lunghe.

Downscaling: Metodologia, di tipo deterministico o statistico, utilizzata per estrarre informazioni a scala locale o regionale a partire da valori di variabili climatiche a scala più grande (ad es. fornite da modelli globali di clima).

Effetto serra: L'effetto serra, dovuto ad alcuni dei gas (principalmente vapor d'acqua, CO₂, CH₄), presenti in atmosfera pur in quantità molto minore rispetto all'azoto e all'ossigeno, è un fenomeno fisico noto, nei suoi elementi di base, fin dal 1800, a seguito degli studi pionieristici di Fourier, Tyndall e Arrhenius. Esso fa sì che una parte dell'energia in forma di radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre venga riassorbita dall'atmosfera, mantenendo in tal modo una temperatura alla superficie terrestre e nella troposfera decisamente più elevata rispetto a quella che si avrebbe in assenza di tali gas. Il problema del riscaldamento globale connesso con l'effetto serra ha origine dall'aumento delle immissioni di CO₂, CH₄ e altri gas-serra da parte dell'uomo e dal conseguente aumento di vapor d'acqua in atmosfera.

Ensemble: Termine utilizzato per indicare un insieme di simulazioni ottenute con lo stesso modello climatico o con modelli diversi, al fine di avere una stima dei valori medi che caratterizzano un determinato tipo di clima, dell'incertezza associata a tali valori e della distribuzione di probabilità delle grandezze climatiche. I diversi modelli, seppure basati sulle stesse leggi fisiche e chimiche di base, differiscono fra loro per la risoluzione, gli schemi numerici e le parametrizzazioni dei processi non risolti esplicitamente dal modello.

Feedback: Un ciclo di retroazione (o "feedback") positivo è una serie di processi per cui una perturbazione iniziale viene amplificata dalla risposta del sistema. Si parla invece di retroazione negativa quando i processi innescati dalla perturbazione sono tali da smorzare la perturbazione iniziale. Le retroazioni positive sono particolarmente critiche, perchè possono destabilizzare il sistema climatico.

Forzante: Un fattore che influenza lo stato di un sistema. Nel caso del sistema climatico le forzanti sono generalmente le cause esterne che determinano e variano l'equilibrio radiativo.

Greenhouse Gases (GHG): Gas presenti in atmosfera che hanno la caratteristica di assorbire la radiazione nello spettro dell'infrarosso, detti "gas serra". Esempi di gas serra sono il biossido di carbonio (anidride carbonica, CO₂), il metano (CH₄) e il vapor d'acqua.

IPCC: Il Comitato Intergovernativo per lo studio dei Cambiamenti Climatici (IPCC) è un comitato scientifico che ha il ruolo di riassumere i risultati pubblicati dalle migliaia di ricercatori che operano nei campi della dinamica del clima, della biogeochimica e delle scienze geofisiche. È importante sottolineare che, oltre a privilegiare articoli scientifici pubblicati sulle più importanti riviste scientifiche internazionali (Science, Nature, PNAS), il lavoro di revisione dell'IPCC si fonda unicamente su articoli revisionati da altri scienziati specialisti del settore e pubblicati su riviste scientifiche ad ampia diffusione e con severe procedure di controllo. L'IPCC fu istituito nel 1988 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e dal Programma Ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) con il compito di fornire tutte le informazioni necessarie per la comprensione e quantificazione del rischio di cambiamento climatico dovuto alle attività umane. L'IPCC è composto di tre gruppi di lavoro (*Working Groups I, II, III*) e di una unità operativa. WGI si occupa degli aspetti scientifici dello studio del sistema climatico e dei cambiamenti climatici, WGII stima il grado di vulnerabilità e di adattamento dei sistemi naturali e socio-economici al cambiamento climatico, WGIII, infine, si occupa delle possibili strategie di mitigazione attraverso la limitazione delle emissioni di gas serra. L'unità operativa è responsabile dell'inventario delle emissioni di gas serra per ogni nazione.

Mesoscala: Letteralmente, la "scala intermedia" del moto dei fluidi geofisici, compresa fra le piccole scale della turbolenza e le scale grandi, dette "sinottiche", ove il moto avviene soprattutto in un piano quasi orizzontale ed è dominato dagli effetti della rotazione terrestre. Per gli oceani, le mesoscale coprono un intervallo di scale spaziali fra circa 10 e circa 200 km.

Modello climatico: Una rappresentazione matematica delle leggi fisiche, chimiche e biologiche che regolano la dinamica del clima, tradotta in un algoritmo numerico che può essere risolto mediante l'uso del calcolatore. I modelli sono caratterizzati dalla loro risoluzione (la minima distanza spaziale e il minimo intervallo temporale che sono in grado di risolvere), dal tipo e numero di processi diversi che rappresentano esplicitamente, e dal tipo di parametrizzazioni utilizzate per descrivere i processi che non sono risolti esplicitamente.

NAO (North Atlantic Oscillation): Un fenomeno climatico di origine essenzialmente atmosferica, legato alla variazione, su scale temporali intra-stagionali, interannuali e pluriennali, della differenza di pressione fra il massimo in prossimità delle Azzorre e il minimo nella regione islandese. Questa differenza di pressione contribuisce a determinare l'intensità dei venti da ovest sull'Europa e il percorso delle perturbazioni cicloniche (in particolar modo le tempeste invernali). L'indice NAO misura l'intensità della differenza di pressione fra Azzorre e Islanda. Valori di indice NAO positivi (NAO+) indicano differenze di pressione superiori alla media, associate con una tendenza delle perturbazioni a dirigersi verso l'Europa del nord. Viceversa, valori negativi (NAO-) indicano differenze di pressione inferiori alla media e una tendenza delle perturbazioni a dirigersi verso il Mediterraneo.

Olocene: L'epoca geologica più recente, che inizia alla fine dell'ultima glaciazione (circa 10000 anni fa).

Parametrizzazione: Un modello non può descrivere esplicitamente tutti i processi attivi nel sistema climatico, dalla circolazione a scala planetaria, ai piccoli moti turbolenti alle scale di qualche millimetro. Analogamente, le leggi che regolano la dinamica di alcuni elementi del sistema climatico (come molti processi associati alla biosfera e all'interazione fra suolo e atmosfera) sono soltanto parzialmente note. Per questo motivo, i modelli climatici includono alcune descrizioni approssimate dei processi non risolti, chiamate parametrizzazioni, che forniscono una rappresentazione empirica o semi-empirica di questi processi.

Peer Review: Processo di revisione dei risultati scientifici da parte di ricercatori ("*peer*") non coinvolti nella ricerca in esame. I revisori sono spesso anonimi per mantenere la massima indipendenza e obiettività.

Probabilità: Le stime del cambiamento climatico e dei suoi effetti sono di tipo probabilistico. Ovvero, viene stimata la probabilità che un determinato scenario si realizzi. Una probabilità del 100% implica la certezza che un determinato evento si verifichi. Utilizzando le definizioni adottate dall'IPCC, una probabilità di accadimento superiore al 99% è una virtuale certezza ("*virtually certain*"), una probabilità superiore al 95% è considerata molto alta ("*extremely likely*"), una probabilità superiore al 90% è alta ("*very likely*"), una probabilità superiore al 66% è "*likely*".

Produzione primaria: La produzione di biomassa e composti organici a partire dalle sostanze non viventi e dalla CO₂, realizzata da organismi autotrofi. Generalmente (ma non esclusivamente), la produzione primaria è dovuta alla fotosintesi da parte delle piante.

Proxy data: Dati per "procura", ovvero ricostruzione delle grandezze climatiche attraverso osservazioni indirette.

Rianalisi: Le rianalisi sono analisi omogeneizzate nel tempo, ovvero la procedura di analisi viene applicata alle osservazioni in un certo periodo di tempo utilizzando la stessa metodologia di assimilazione dati e lo stesso modello di previsione per ricavare lo stato di *background*. Per esempio, le rianalisi ERA-40 del Centro Europeo di Previsioni a Medio Termine e quelle del National Center for Environmental Prediction forniscono, a partire dagli anni 50, analisi omogenee ogni 6 ore dello stato dei campi atmosferici.

Seamless Prediction: La previsione "senza soluzione di continuità" è un approccio per migliorare le capacità predittive dei modelli (in questo caso per la proiezione climatica) attraverso la loro applicazione a previsioni a scala temporale più breve.

Sistema dinamico: In termini generali, un sistema la cui evoluzione temporale può essere descritta da un insieme di equazioni e il cui comportamento, date le forzanti esterne, può essere studiato con l'ausilio di metodi matematici o numerici. Nel linguaggio matematico, un sistema dinamico è l'insieme di equazioni che descrivono il comportamento nel tempo (evoluzione temporale) di un sistema fisico, chimico o biologico.

Sistema non-lineare: Un sistema in cui causa ed effetto non sono proporzionali, sono possibili equilibri multipli, oscillazioni spontanee, comportamento caotico, instabilità, biforcazioni e transizioni brusche da uno stato all'altro. Un esempio può essere un precipizio al termine di una discesa dolce, su una montagna immersa nella nebbia: un passo in più, e il malcapitato camminatore precipita nell'abisso. L'effetto (precipitare nell'abisso) non è proporzionale alla causa (un solo passo in più), anche se nei metri precedenti ogni passo faceva scendere il camminatore solo di pochi centimetri. In questo caso, la previsione elementare derivata dalla semplice estrapolazione del comportamento lineare durante la discesa dolce ("continuiamo a camminare come prima, tanto si scende lentamente") risulta fuorviante e pericolosa quando si incontra il precipizio. Da un punto di vista matematico, un sistema non-lineare è caratterizzato dall'essere descritto da equazioni che contengono termini di ordine superiore al primo e per il quale, in generale, non vale il principio di sovrapposizione. La maggior parte dei sistemi naturali è non-lineare e il clima è senza dubbio un sistema altamente non-lineare ove causa (per esempio, quantità di gas serra immessi in atmosfera) ed effetto (per esempio, aumento della temperatura) non sono sempre legati in modo proporzionale.

Serie temporale: Una serie di dati in sequenza temporale, che fornisce informazioni sulla dinamica temporale del sistema in esame.

Tipping point: Punto di instabilità o biforcazione, superato il quale un cambiamento diviene non arrestabile e il sistema climatico passa da uno stato ad un altro.

Trend: In una serie temporale fluttuante, può esserci una variazione "secolare" di crescita o decrescita su tutto il periodo di misura. Per verificare la significatività e l'importanza del trend è necessario usare metodi statistici.