

CLIMA

E' vero che il clima che ha regolato la vita dei nostri nonni è differente da quello che sperimentiamo quotidianamente e soprattutto sarà differente da quello che dovranno "affrontare" i nostri figli e nipoti? E in che modo la società umana si sta attrezzando oggi per contrastare questo cambiamento domani?

Christian Ronchi
Nicola Loglisci

ARPA Piemonte
Area Previsione e Monitoraggio Ambientale
Via Pio VII, 9 – 10135 Torino
cronchi@arpa.piemonte.it
nloglisci@arpa.piemonte.it

La questione dei Cambiamenti Climatici è divenuta di grande attualità negli ultimi anni anche e soprattutto a causa della sempre più frequente ricorrenza di fenomeni meteorologici di un certo rilievo e di forte impatto sulla società umana quali siccità, ondate di calore, alluvioni, uragani o periodi prolungati di freddo intenso.

A partire da queste considerazioni, il mondo scientifico si è messo in moto per cercare una conferma ad un eventuale cambiamento del clima mondiale attuale e valutare le possibili ripercussioni a cui si potrà andare incontro nel prossimo futuro. Questo processo ha raggiunto il suo apice nell'anno appena trascorso grazie anche ad una serie di importanti iniziative a respiro mondiale e nazionale quali la pubblicazione del IV Rapporto IPCC sul Cambiamento Climatico e la Conferenza Nazionale sui Cambiamenti Climatici.

Quali sono quindi le evidenze conclamate di cambiamenti climatici in atto sia a scala globale che sull'Area Alpina? Quali strumenti ha a disposizione la comunità scientifica per indagare i mutamenti del sistema climatico e prevedere la sua evoluzione futura? In che modo il mondo politico ed economico si sta muovendo per mitigare quella che l'IPCC definisce "la pericolosa interferenza antropogenica con il sistema climatico"?

In questo articolo, che non ha la pretesa di essere esaustivo, si cerca di dare una risposta sintetica alle principali domande legate al clima e ai suoi cambiamenti, focalizzando l'attenzione sulla regione alpina. Partendo dalla percezione storica di "sistema climatico" si arriva ad illustrare le più recenti conoscenze acquisite in tale ambito e i possibili scenari futuri che si stanno delineando, passando attraverso l'analisi degli strumenti scientifici ed economici più efficaci per valutare ed orientare quotidianamente scelte politiche e sociali, in termini di adattamento e mitigazione, che debbono garantire l'armonia tra l'innata spinta al progresso della società umana ed il fondamentale rispetto per le risorse naturali e l'equilibrio ecologico dell'intero pianeta.

TRA PASSATO, PRESENTE E FUTURO



INTRODUZIONE

Il 2007 è stato un anno da ricordare nella storia dello studio del Clima, della sua evoluzione fisica e delle modificazioni che le attività umane possono indurre sul suo naturale andamento.

Una serie di tappe fondamentali ne hanno scandito il percorso, con un calendario di eventi a respiro globale che hanno coinvolto scienziati, economisti, politici ed opinione pubblica.

Basti pensare alla pubblicazione del IV Rapporto sullo Stato del Clima diffuso dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ed approvato a Parigi nell'ottobre 2007, alla Conferenza Nazionale Italiana sui cambiamenti climatici organizzata dal Ministero dell'Ambiente

e da APAT, svoltasi a Roma nel settembre 2007 poche settimane prima della XII Conferenza internazionale sui cambiamenti climatici tenutasi a Bali e che ha definito una strategia di azione mondiale per il dopo-Kyoto.

Tutti questi eventi danno l'esatta dimensione di quanto "la questione dei Cambiamenti Climatici" sia divenuta di grande attualità negli ultimi anni, anche e soprattutto a causa della sempre più frequente ricorrenza di fenomeni meteorologici di un rilievo e di forte impatto sulla società umana quali siccità, ondate di calore intense, alluvioni, uragani o periodi prolungati di freddo intenso che hanno coinvolto differenti regioni del globo.

L'insieme crescente delle osservazioni

della terra e dell'atmosfera disponibili presenta l'immagine di un mondo in via di generale riscaldamento con rilevanti evidenze di un cambiamento nel sistema climatico. Le emissioni di gas serra ed aerosol dovute alle attività umane continuano ad alterare l'atmosfera e ad influire sul clima. Anche applicando interventi di mitigazione (Protocollo di Kyoto) per limitare il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C rispetto al periodo pre-industriale, dovranno essere comunque fronteggiati gli impatti dovuti al cambiamento climatico già in atto (adattamento).

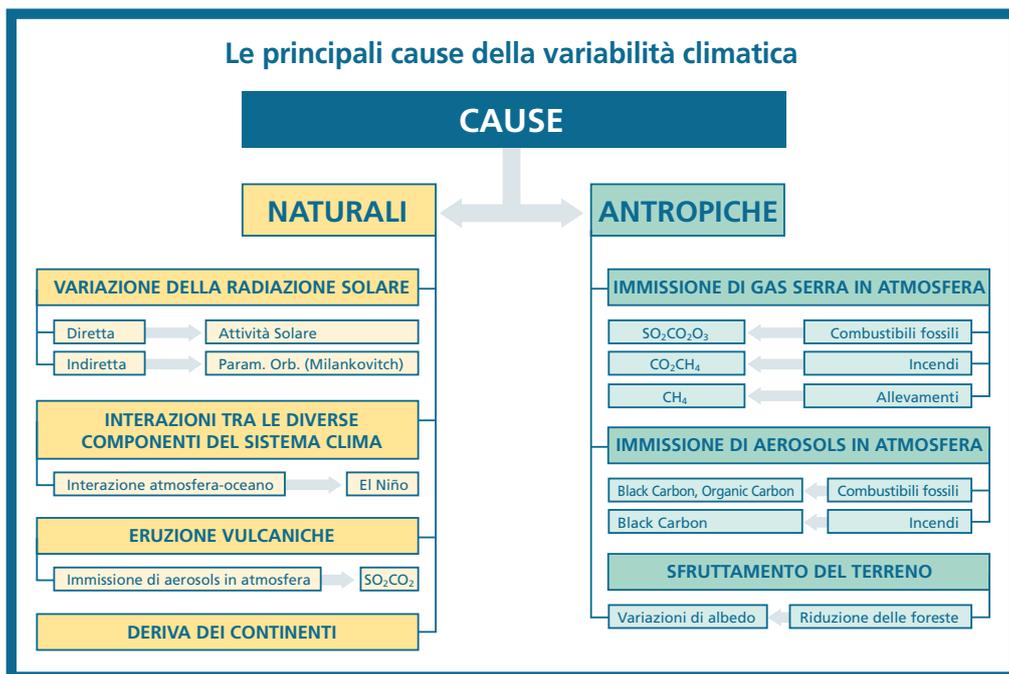
In questo quadro va sottolineato come gli ecosistemi montani risultino particolarmente sensibili al cambiamento climatico, che spesso si presenta come un fattore di stress aggiuntivo ad altre forme di pressione legate all'antropizzazione dell'ambiente naturale (Scholze et al, 2006).

Grazie a consolidate applicazioni di modelli numerici climatici (i cosiddetti Earth System Models) è attualmente possibile simulare l'andamento del clima atteso nel XXI secolo in funzione di differenti scenari socio-economici e quindi valutare i futuri impatti potenziali del cambiamento climatico sul sistema ambientale. Lo scopo principale di questo articolo è quindi quello di dare una visione di insieme introduttiva sulla "questione clima", con particolare attenzione alla risposta dell'ambiente alpino a sollecitazioni di tipo climatico e sugli strumenti messi attualmente a disposizione dalla comunità scientifica internazionale per valutarne l'evoluzione nei prossimi cento anni.

Il punto di riferimento scelto è il Quarto Rapporto IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, l'organismo internazionale afferente alle Nazioni Unite che si occupa del Clima e del Cambiamento Climatico in senso lato) presentato nell'ultima Conferenza Internazionale svoltasi a Parigi nel febbraio 2007, nel quale si legge l'importante affermazione per cui l'aumento delle emissioni di gas serra in atmosfera, identificati come i principali responsabili del Cambiamento Climatico in atto, sia al 90% da attribuire a fattori umani.



Fig. 1



CHE CLIMA FA

I cambiamenti climatici fanno parte del naturale "ciclo vitale" del nostro pianeta. Dalla nascita della terra, circa 4,5 miliardi di anni fa, il clima è cambiato innumerevoli volte, anche in maniera radicale, e questo principalmente a causa di modificazioni della composizione chimica dell'atmosfera e soprattutto per ragioni orbitali astronomiche (Teoria di Milankovic). Queste ultime infatti, modulano la quantità di radiazione solare che raggiunge il nostro pianeta e che è il vero grande motore del sistema climatico. La scala di queste variazioni va dalle migliaia alle centinaia di migliaia di anni. Tuttavia nel corso degli ultimi 500 anni, alla naturale variabilità climatica si è sovrapposto un nuovo elemento di "forcing" climatico, causato dall'intensificazione delle attività antropiche, che si basano, a tutt'oggi, prevalentemente sullo sfruttamento del carbonio e dei suoi derivati (fig. 1).

Non c'è da stupirsi quindi se il cambiamento climatico attualmente in corso è il più rapido osservato negli ultimi 1000 anni e ci sono numerose evidenze scientifiche dell'interferenza delle attività umane nei naturali mutamenti del clima. (IPCC, 2007).

Sulla base di tutti gli studi effettuati dai circa 2500 scienziati che cooperano all'interno dell'IPCC, si è concluso che il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile e tale evidenza è confermata principalmente dai seguenti effetti (fig. 2):

- **l'aumento della temperatura media a livello globale.**

La temperatura media superficiale dell'aria è aumentata con una tendenza positiva quantificabile in 0.74 ± 0.18 °C negli ultimi 100 anni (1906-2005). Inoltre la velocità del riscaldamento globale, rispetto agli ultimi 100 anni, è circa raddoppiata negli ultimi 50 anni. Secondo tale studio le regioni a latitudini maggiori dell'emisfero boreale sono maggiormente interessate da tali incrementi termici. Anche il contenuto di calore degli oceani è aumentato negli ultimi 50 anni, ma le terre emerse sembrano essersi riscaldate più

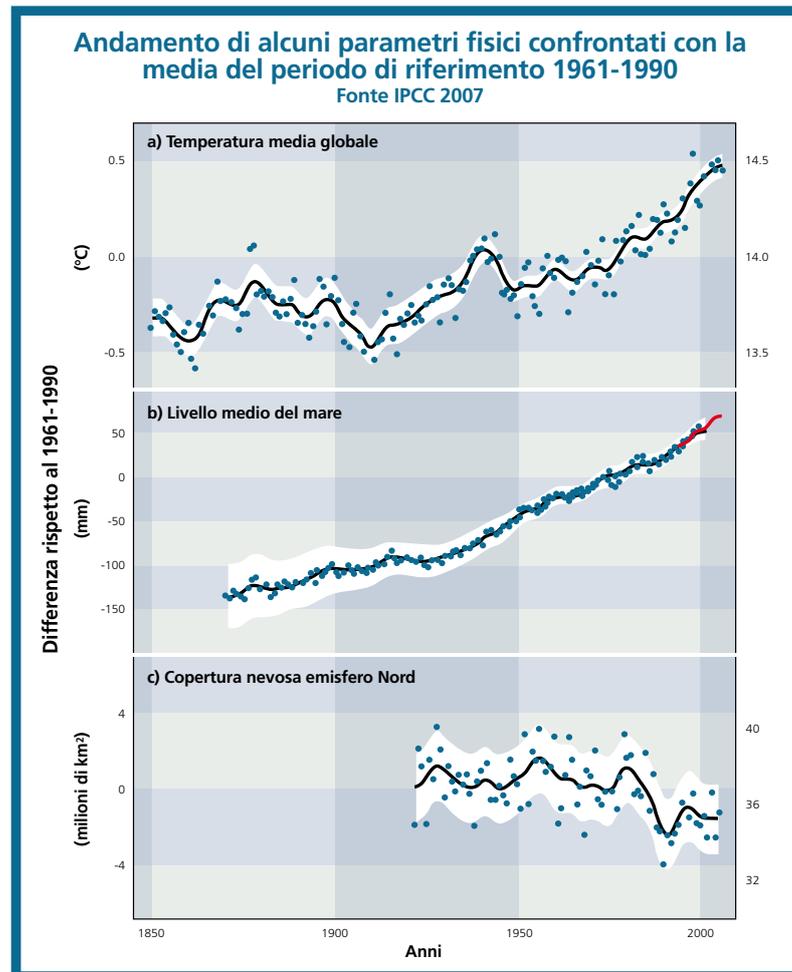


Fig. 2

Fig. 3 - Bilancio di massa cumulo dei principali ghiacciai continentali e ice caps negli ultimi 50 anni espresso come contributo all'aumento del livello marino per ciascuna regione graficata.

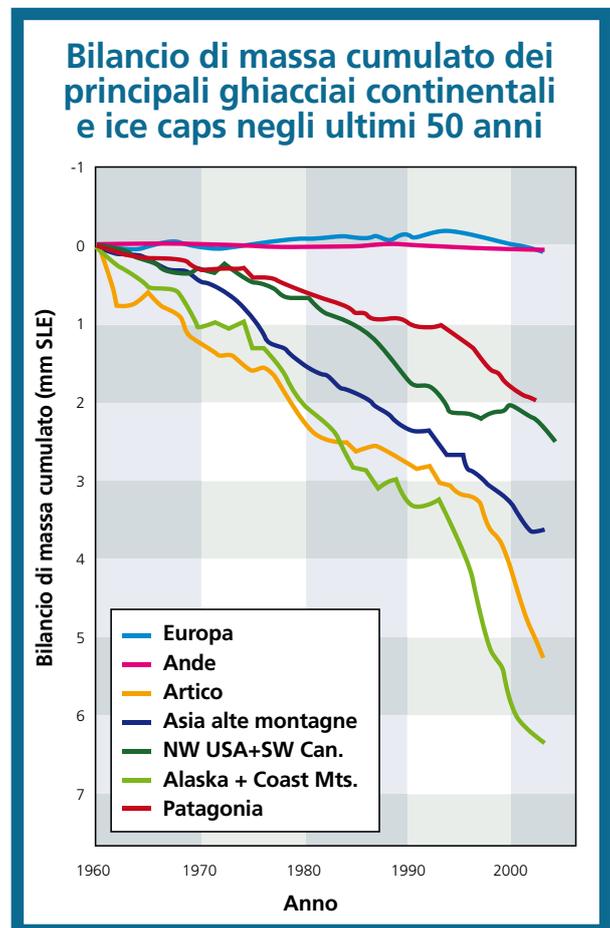
velocemente degli oceani: a partire dal 1979 un aumento di circa 0.25 °C per decade, soprattutto in inverno e primavera nell'emisfero boreale.

- **il ritiro dei ghiacciai continentali e dei ghiacci polari.**

I cambiamenti nella criosfera includono il forte ritiro del ghiaccio marino artico ($2.7 \pm 0.6\%$ per decade), il continuo ritiro dei ghiacciai montani (fig 3), la riduzione della copertura nevosa e del terreno ghiacciato stagionale e l'incremento della temperatura del permafrost. Le temperature medie dell'artico negli ultimi 100 anni sono aumentate di quasi 2 volte rispetto alla temperatura media globale. L'area massima coperta da ghiaccio stagionale dal 1900 è diminuita di circa il 7% nell'emisfero nord.

- **l'innalzamento del livello dei mari.**

Le ultime stime vedono un aumento del livello dei mari compreso tra i 18 e i 58 cm. Il livello dei mari globale è salito dal 1961 ad un ritmo di 1,8 mm/anno. Anche



in questo caso l'incremento nel livello dei mari e il decremento nella copertura nevosa e dei ghiacciai sono consistenti con il riscaldamento globale.

Secondo il IV rapporto IPCC è verosimile che la seconda metà del 20° secolo sia stato il cinquantennio più caldo dello scorso millennio per l'emisfero nord. Studi di tipo paleoclimatologico hanno eviden-

ziato come un grande innalzamento del livello marino sia stato associato ad un forte riscaldamento circa 125000 anni fa che ha causato il ritiro su larga scala dei ghiacci della Groenlandia e dell'artico, contribuendo ad un aumento del livello dei mari circa 4-6 m al di sopra dei valori attuali.

Altre evidenze di cambiamento climatico

nella seconda metà del 20° secolo si sono osservate nella variazione della circolazione atmosferica con una intensificazione ed una migrazione verso i poli dei venti occidentali, una diversa distribuzione delle precipitazioni su vaste aree e il superamento di alcuni estremi climatici.

Una tendenza positiva significativa nei dati dal 1900 al 2005 è stata osservata in termini di aumento delle precipitazioni nella parte orientale del continente americano, nell'Europa settentrionale, e in Asia settentrionale e centrale, mentre tendenze negative (siccità) sono stati osservati per la zone del Sahel, per il Mediterraneo, per l'Africa e l'Asia meridionale.

Periodi siccitosi più intensi e severi si sono verificati dagli anni 70 specie ai tropici e nei subtropici, causa l'aumento delle temperature.

I giorni freddi, le notti fredde e ghiacciate stanno diventando più rari, mentre i giorni e le notti calde e le ondate di calore stanno diventando più frequenti (Schär et al, 2004).

Le osservazioni evidenziano un incremento negli estremi di acqua alta in gran parte dei siti mondiali dal 1975 e una intensificazione dei venti, delle tempeste e delle maree alle medie latitudini.

La frequenza delle precipitazioni inten-

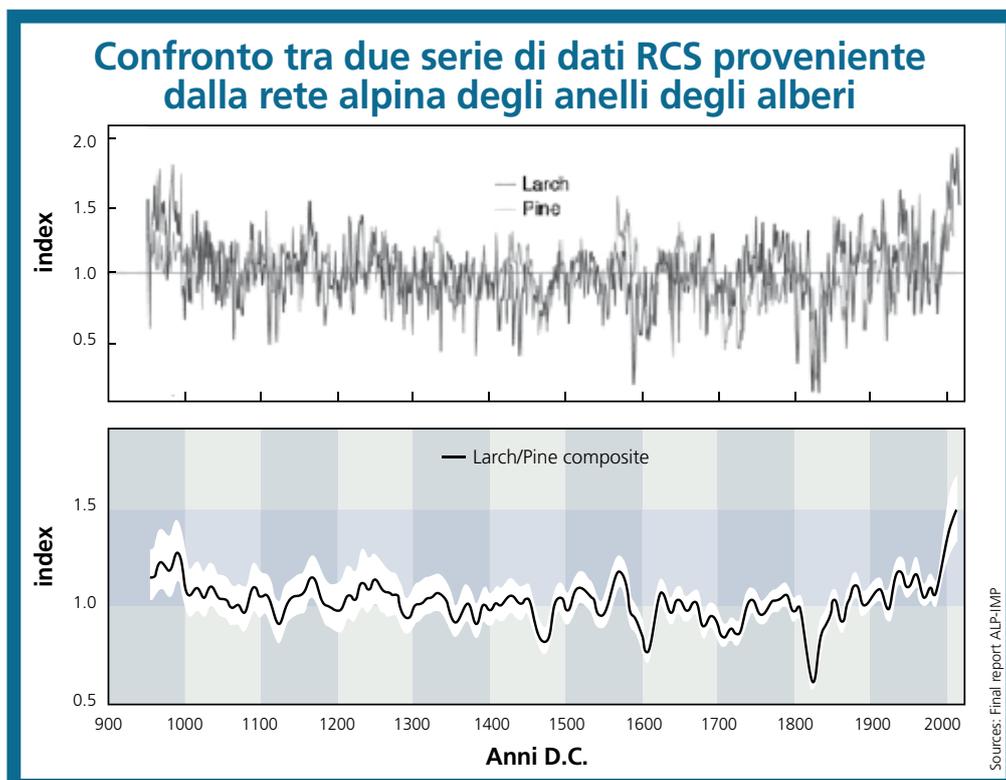


Fig. 4 - Confronto tra due serie di dati RCS provenienti dalla rete alpina degli anelli degli alberi: la prima dalla Svizzera (larici) la seconda dall'Austria (pini).



se è aumentata ed inoltre c'è evidenza che i cicloni tropicali sono diventati più intensi.

Alcuni fenomeni estremi, pur essendo significativi in quanto ad impatti socio-economici, non possono essere simulati dai modelli numerici climatici, in quanto il loro raggio di azione spaziale è inferiore alla risoluzione del modello stesso (è il caso di tornado o trombe d'aria ad esempio): allo stato attuale è quindi impossibile fornire una loro adeguata valutazione.

Sia i sistemi fisici che quelli biologici sono stati influenzati dal recente cambiamento climatico che riguarda tutti i continenti e alcune zone oceaniche. Se per questi sistemi è oramai dimostrata l'evidenza dell'influenza da parte del cambiamento climatico negli ultimi trent'anni, per quanto riguarda invece i sistemi umani, è difficile discernere quanto effettivamente essi ne siano stati condizionati. Tale difficoltà è causata dalla capacità di adattamento e a fattori non climatici tipici della specie umana.

LA "FEBBRE DELLE ALPI"

Attualmente, come abbiamo visto, la comunità scientifica è largamente concorde nell'attribuire, come cause del riscaldamento globale, motivazioni legate sia alla variabilità climatica naturale che ad effetti antropici connessi alle attività dell'uomo.

Ma se a livello mondiale gli effetti del cambiamento climatico sono stati quantificati, in particolare dall'ultimo rapporto del IPCC, quali sono le ricadute su sistemi complessi e unici come le regioni costiere e, in particolar modo l'Arco Alpino? Tali regioni sono, in Europa, tra i territori più vulnerabili al cambiamento climatico.

Sulle Alpi i sistemi naturali viventi (es. gli ecosistemi) e non (es. l'erosione del suolo) sono fortemente legati alla temperatura dell'aria e alla sua evoluzione.

Un leggero cambiamento della media annuale delle temperature su un sistema così complesso può tradursi in drastici cambiamenti su altre basi temporali (orarie, giornaliere o mensili). Queste ultime

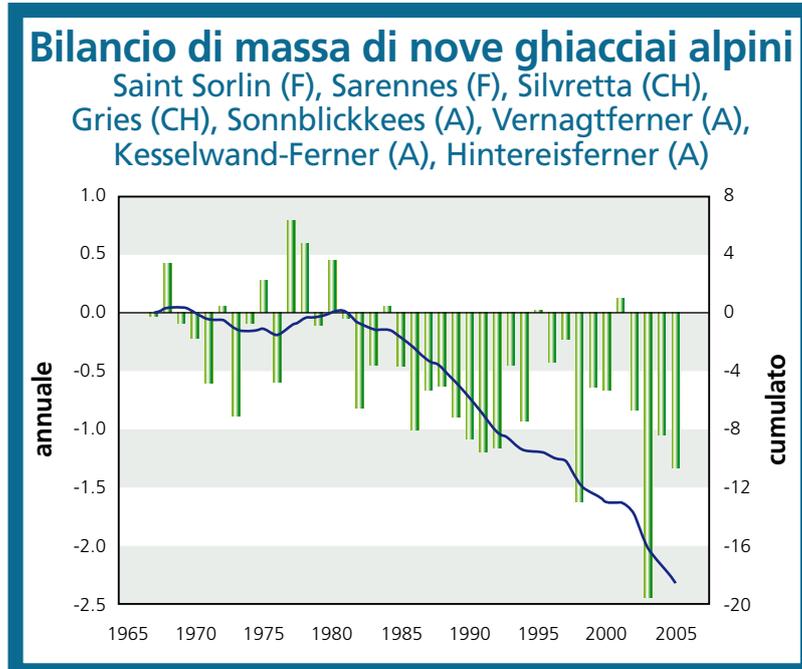


Fig. 5

Fig. 6

sono rilevanti dal punto di vista dell'innescamento di eventi naturali, degradazione del permafrost e altri importanti fattori. Inoltre isoterme e linee di equilibrio sono cruciali per la distribuzione di specie viventi, la localizzazione dei ghiacciai, la copertura nevosa e la sua longevità. Non solo la temperatura, anche cambiamenti nei regimi di precipitazione hanno impatti sui ghiacciai, sui bacini fluviali e sulla vegetazione, nonché sulla popolazione nel caso di eventi naturali come siccità ed alluvioni.

Per cercare di fare un po' di luce sul cambiamento climatico così come visto e percepito su tutto il complesso sistema delle Alpi, è fondamentale cercare le sue ripercussioni su alcuni aspetti di base: l'andamento della temperatura dell'aria e delle precipitazioni, il comportamento dei ghiacciai e del permafrost, la copertura nevosa. I dati che verranno elencati fanno parte di una recente pubblicazione sul clima fatta nell'ambito del progetto europeo ClimChAlp - Spazio Alpino - Interreg IIIb.

Le osservazioni fatte in tutte le regioni alpine (dalla Francia a ovest alla Slovenia a est) dimostrano come la "febbre" delle Alpi sia più alta rispetto a ciò che è stato quantificato a scala planetaria.

Sebbene le tendenze termiche registrate nelle varie regioni alpine siano differenti

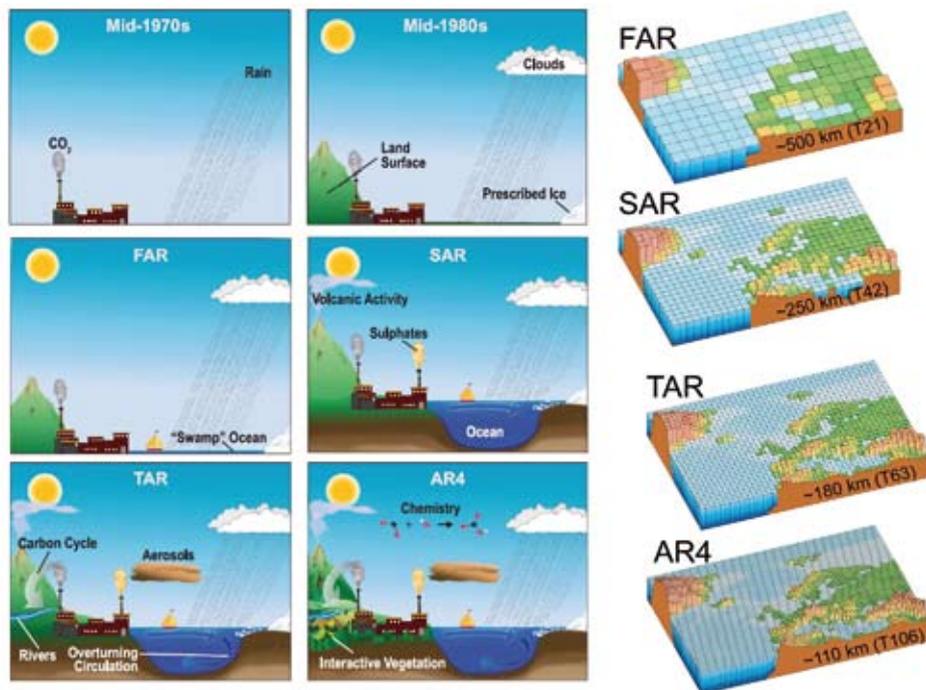


in termini di ampiezza, tutti convergono verso un'unica direzione: il riscaldamento. Il fenomeno è, inoltre, in fase di accelerazione nell'ultimo decennio.

Lo studio più generale sull'Arco Alpino, fatto attraverso la ricostruzione dendrocronologia della temperatura negli ultimi 110 anni (basata sull'analisi degli anelli di crescita di larici e pini alpini) dimostra come l'aumento termico possa essere quantificato intorno ai 2°C in più rispetto alla climatologia di riferimento (Fig4).

Tale anomalia non è da attribuire a tutti i settori alpini, ma è da interpretare come media su tutto il dominio di analisi ovvero le Alpi. Ciò evidenzia la forte variabilità climatica alpina e come la più grossa catena montuosa d'Europa reagisca in modo diverso alle forzanti climatologiche. Il settore nord delle Alpi appare più colpito da tale riscaldamento (picchi di +2.7°C in Baviera, +3.5 °C in Svizzera su

Le principali tappe dell'evoluzione dei modelli numerici climatici a partire dagli anni '70 fino ai nostri giorni



riscaldamento globale è rappresentato dai ghiacciai, tanto che essi costituiscono da soli un vero e proprio indicatore climatico: il volume di un ghiacciaio, dunque la sua superficie, la sua profondità e sua lunghezza sono determinati dal bilancio tra periodi di ablazione e di accumulo. Sulle Alpi è stato osservato un numero sempre maggiore di ghiacciai in arretramento o estinzione ed il fenomeno sembra essere in continua evoluzione. Infatti, la lunghezza dei ghiacciai e la lunghezza dei periodi di ablazione e di accumulo è variata in maniera consistente nell'ultimo decennio. Il motivo è da ricercare, in assenza di una vera tendenza nelle precipitazioni, in primis nell'aumento della temperatura media sulle Alpi, ma va anche evidenziato un possibile cambiamento nel bilancio energetico dovuto ad una differente copertura nevosa.

Veniamo ai dati. Dal 1850 i ghiacciai alpini europei hanno perso tra il 30% ed il 40% delle loro aree e circa il 50% del loro volume (Haerberli & Beniston 1998). Da sottolineare il fatto che la grandezza di un ghiacciaio è un fattore critico nella sua sensibilità alle variazioni climatiche, tanto più alta quanto più piccolo è il ghiacciaio. In Fig. 6 è possibile osservare come dalla metà degli anni ottanta si delinei un periodo di continua ed accelerata perdita di volume dei ghiacciai, quantificabile dai 0.5 ad 1 metro all'anno di acqua equivalente (2.5 metri nel solo 2003). La perdita totale ammonta a circa 20 metri (Fig. 5 - Fig. 6).

Anche la copertura nevosa sulle Alpi risente del cambiamento climatico attuale, ma è cruciale per il benessere delle Alpi. Essa oltre a costituire la risorsa primaria per il turismo invernale, ha anche delle importantissime funzioni di immagazzinamento dell'acqua, di partecipazione attiva nel bilancio energetico isolando la superficie terrestre dall'aria e riflettendo gran parte dell'energia incidente sul suolo innevato. E' inoltre una superficie vitale per la sopravvivenza di alcune specie. Gli studi recenti mettono in luce come in tutti i paesi dell'Arco Alpino la copertura nevosa abbia una tendenza negativa

Visione della griglia di un modello climatico regionale "innestato" all'interno di un modello globale (GCM)



Fig. 8 alcuni settori svizzeri).

Fig. 7 (sopra) - A destra sono riassunti i processi fisici e i principali "feedback" simulati progressivamente da ogni nuova generazione di modelli, a sinistra il corrispondente aumento della loro risoluzione.

La "febbre delle Alpi" è stata correlata a metodi di variabilità climatica intrastagionale e interannuale. Tra le figure sinottiche più correlate con la tendenza positiva delle temperature troviamo la NAO (North Atlantic Oscillation) in particolare nel periodo invernale e la EA (East Atlantic

pattern) durante tutto l'anno. Queste forti correlazioni possono in qualche modo spiegare il diverso comportamento dei due settori Nord e Sud della catena alpina (Beniston. & Jungo 2002, Beniston 2005a, Ciccarelli et al., 2007).

Sebbene tutti gli studi fatti in ambiente alpino convergano verso una tendenza positiva delle temperature sulle Alpi, lo stesso non si può dire se ad essere prese in considerazione sono le precipitazioni. Attualmente non sembra esserci un vero e proprio trend di crescita o diminuzione delle precipitazioni sulle Alpi e, a volte, gli studi sono alquanto contraddittori. La motivazione di questo comportamento può essere ricercata in:

- problemi nella misura della precipitazione sulle Alpi, legate alla complessa orografia;
 - difficoltà nella ricostruzione dei dati mancanti;
 - differente comportamento dei due settori Nord e Sud delle Alpi rispetto alle forzanti meteorologiche a grande scala.
- L'effetto più evidente e tangibile del cambiamento climatico ed in particolare del

(ovvero una diminuzione nel tempo) ed in generale si sta assistendo ad un innalzamento della quota delle nevicate. Quest'ultimo fattore è di fondamentale importanza se si pensa ad una diminuzione delle nevicate in rapporto ad un comportamento non significativo delle precipitazioni.

Da aggiungere alle considerazioni precedenti è la riduzione della longevità della superficie di suolo innevato, ovvero, mediamente i periodi in cui si può osservare la neve al suolo si sono accorciati rispetto al passato in particolare a quote medio-basse.

Un altro aspetto cruciale è l'influenza del cambiamento climatico sul permafrost. Esso è costituito da quella porzione di suolo in cui le temperature rimangono sotto zero per periodi molto lunghi (da 2 anni in avanti) (Muller, 1947). Sono esclusi da tale definizione i ghiacciai.

Con queste caratteristiche il permafrost influenza l'idrologia e la stabilità di alcuni versanti agendo come barriera alla percolazione dell'acqua e da collante tra costituenti del suolo (Zimmermann & Haeberli 1992).

Com'è facile intuire il permafrost è dunque fortemente legato ai cambiamenti climatici, in particolare al riscaldamento globale e alla riduzione della longevità del suolo innevato.

Quest'ultimo in particolare agisce, come detto in precedenza, da isolante alle forzanti meteorologiche esterne, quindi un ritardo nella copertura nevosa autunnale agisce positivamente nei confronti del permafrost, permettendo infatti alla superficie terrestre di raffreddarsi più rapidamente, al contrario un prematuro manto nevoso autunnale riscalderà la superficie sottostante in quanto essa immagazzinerà tutto il calore ricevuto nella stagione estiva precedente. Allo stesso modo una superficie sulla quale il manto nevoso fonde precocemente espone il permafrost a temperature più calde e alla radiazione solare, mentre un manto nevoso più longevo ha l'effetto contrario.

Negli ultimi anni si è assistito ad un innalzamento della temperatura del perma-



frost, stimato intorno ai $+0.5^{\circ}\text{C}$ / $+0.8^{\circ}\text{C}$ nei primi 100 m e negli ultimi 100 anni, che, in alcuni casi, ha determinato l'erosione completa di quest'ultimo, dando luogo a cedimenti di versanti (es. Cervino 2003).

Anche gli ecosistemi si evolvono rispetto al cambiamento climatico. E' infatti stato osservato sulle Alpi un innalzamento della quota di alcune specie vegetali, animali ed insettivore, nonché la comparsa di nuove specie vegetali come l'ambrosia. Per tali motivi le società montane, già in difficoltà per cambiamenti sia interni che esterni, devono far fronte con una vulnerabilità climatica futura. Infatti le conseguenze di un cambiamento climatico si ripercuotono sui sistemi socio-economici e tali effetti hanno una ripercussione anche a valle, dove sfociano le risorse idriche fornite dalla riserva d'acqua alpina d'Europa. E' indispensabile, quindi, che le società, in particolare quelle alpine, reagiscano immediatamente e senza perdita di tempo e risorse ai cambiamenti climatici attraverso strategie di mitigazione ed adattamento.

LE "PREVISIONI" DEI MODELLI CLIMATICI NUMERICI

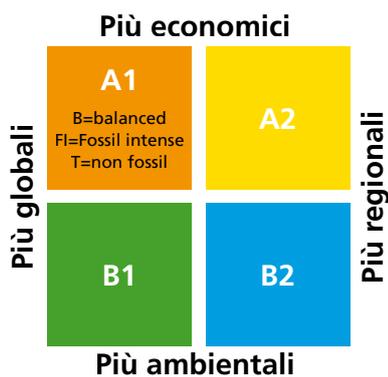
Una volta riconosciuta l'alta probabilità che il cambiamento climatico in atto sia

reale e fortemente connesso in rapporto di causa-effetto con le attività umane in termini di immissione di gas clima-alteranti in atmosfera, è necessario predisporre le opportune contromisure sia in termini di mitigazione (ossia riduzione delle emissioni) sia di adattamento (ossia adeguamento della società umana ad un differente clima). Tuttavia per programmare ed ottimizzare in modo efficiente tali strategie, sono necessari strumenti quantitativi atti a simulare l'evoluzione del clima futuro, a scala globale e regionale, in risposta a scenari che presuppongono un maggior o minor interferenza delle attività umane nel naturale ciclo evolutivo del clima.

In tale ottica il maggiore contributo è dato dai modelli numerici di simulazione e previsione del clima, strumenti che hanno subito un costante sviluppo a partire dagli anni '70 con una notevole accelerazione negli ultimi 10 anni anche in virtù della forte evoluzione tecnologica che ha consentito di disporre di risorse di calcolo sempre più potenti (Fig.7).

I modelli numerici sono strumenti matematici basati sulle leggi fisiche atmosferiche e sulla loro interazione con la superficie terrestre (in particolare con il mare). Essi si suddividono in una vasta gamma di famiglie che va dai semplici modelli concettuali i quali forniscono importan-

Descrizione schematica degli scenari socio-economici IPCC



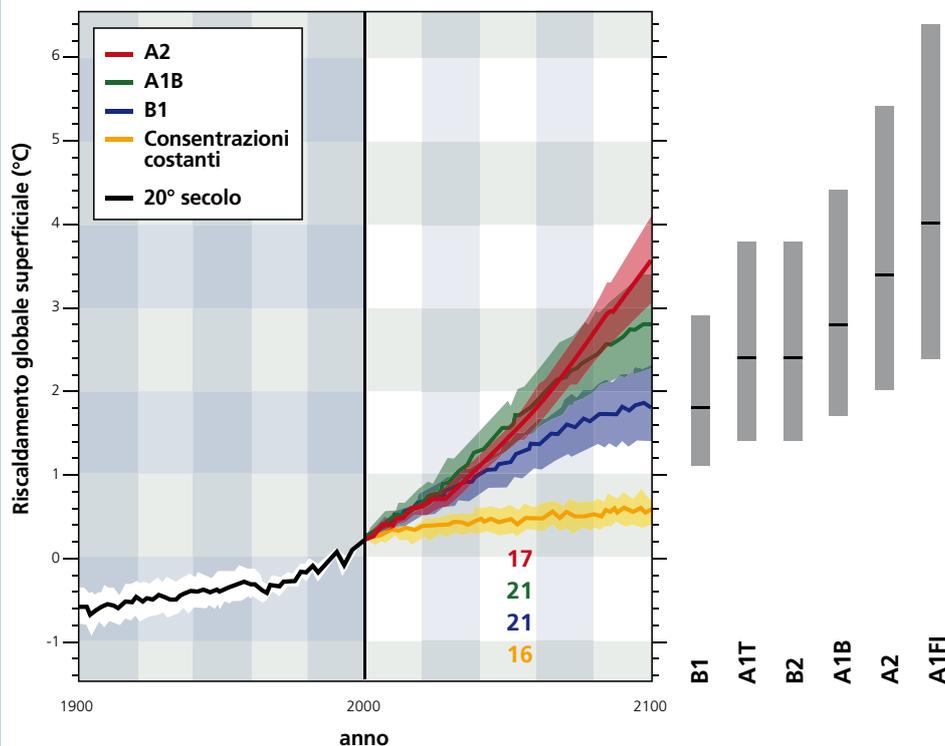
- **A1 Work Markets**
(consumismo e globalizzazione)
- **A2 Global Sustainability**
(Sostenibilità e globalizzazione)
- **B1 Provincial Enterprise**
(Individualismo e localismo)
- **B2 Local Stewardship**
(Sostenibilità e localismo)

Caratteristiche dello Scenario	A1	A2	B1	B2
Crescita della popolazione	Bassa	Alta	Bassa	Media
Crescita PIL	Molto alta	Media	Alta	Media
Uso Energetico	Alta	Alta	Bassa	Media
Cambiamenti nell'uso del territorio	Bassa	Media	Alta	Media
Disponibilità di risorse	Media	Bassa	Bassa	Media
Crescita tecnologica	Rapida	Lenta	Media	Media

Fig. 9

Fig. 10

Riscaldamento globale in °C



ti, se pur limitate, informazioni di base sul sistema clima e su alcuni dei processi fondamentali all'opera nel sistema climatico stesso, passa attraverso i modelli numerici a complessità intermedia (EMIC), che mirano ad includere gran parte delle

componenti e dei processi fondamentali, tuttavia in forma estremamente semplificata e parametrizzata in modo da ridurre la complessità ed il numero di parametri liberi, per finire con i più evoluti modelli globali di circolazione generale GCM

(General Circulation Model) che tengono conto di tutti i processi che legano assieme le differenti componenti climatiche attraverso parametrizzazioni raffinate dei processi fisici (Corti S. et al,2007).

I GCM, opportunamente modificati (inizializzati), possono essere utilizzati anche per simulazioni su porzioni più limitate del globo RCM (Regional Climate Model).

I modelli di circolazione generale GCM sono modelli che risolvono le equazioni descrittive le leggi fisiche atmosferiche suddividendo il globo e l'atmosfera in celle il cui insieme può essere visto come una griglia tridimensionale.

L'atmosfera e la superficie terrestre vengono, quindi, rappresentati tramite una maglia geometrica regolare: la distanza tra ciascuna intersezione, detta punto griglia, definisce la risoluzione del modello.

Su ciascun punto griglia vengono assegnate le variabili meteorologiche all'istante iniziale della simulazione, ovvero le condizioni iniziali di calcolo.

Tali condizioni iniziali non sono nient'altro che la traduzione sul grigliato stabilito, della realtà. Non è esattamente la realtà, in quanto essa necessiterebbe di punti griglia infinitesimamente vicini l'uno all'altro, ma è ciò che più si avvicina.

Tale procedimento viene condotto raccogliendo i più svariati tipi di osservazioni su scala mondiale (dati da stazioni meteo al suolo, da radiosondaggi, da satellite, da radar, ecc.) e riportando tali dati sui punti griglia con processi matematici chiamati processi di assimilazione. A questo punto le equazioni fondamentali vengono risolte numericamente nel tempo su ciascun punto griglia. Attenzione: le informazioni che se ne traggono riguardano l'andamento medio delle molte grandezze meteorologiche nel prossimo secolo. Nessun modello climatologico è in grado di prevedere che tempo farà, ad esempio, il 18 febbraio del 2073!

I modelli GCM si suddividono al loro volta in tre categorie: AGCM (Atmosphere General Circulation Model); OGCM (Ocean General Circulation Model); AOGCM (Atmosphere-Ocean General Circulation Model).

Gli AOGCM sono i modelli più complessi

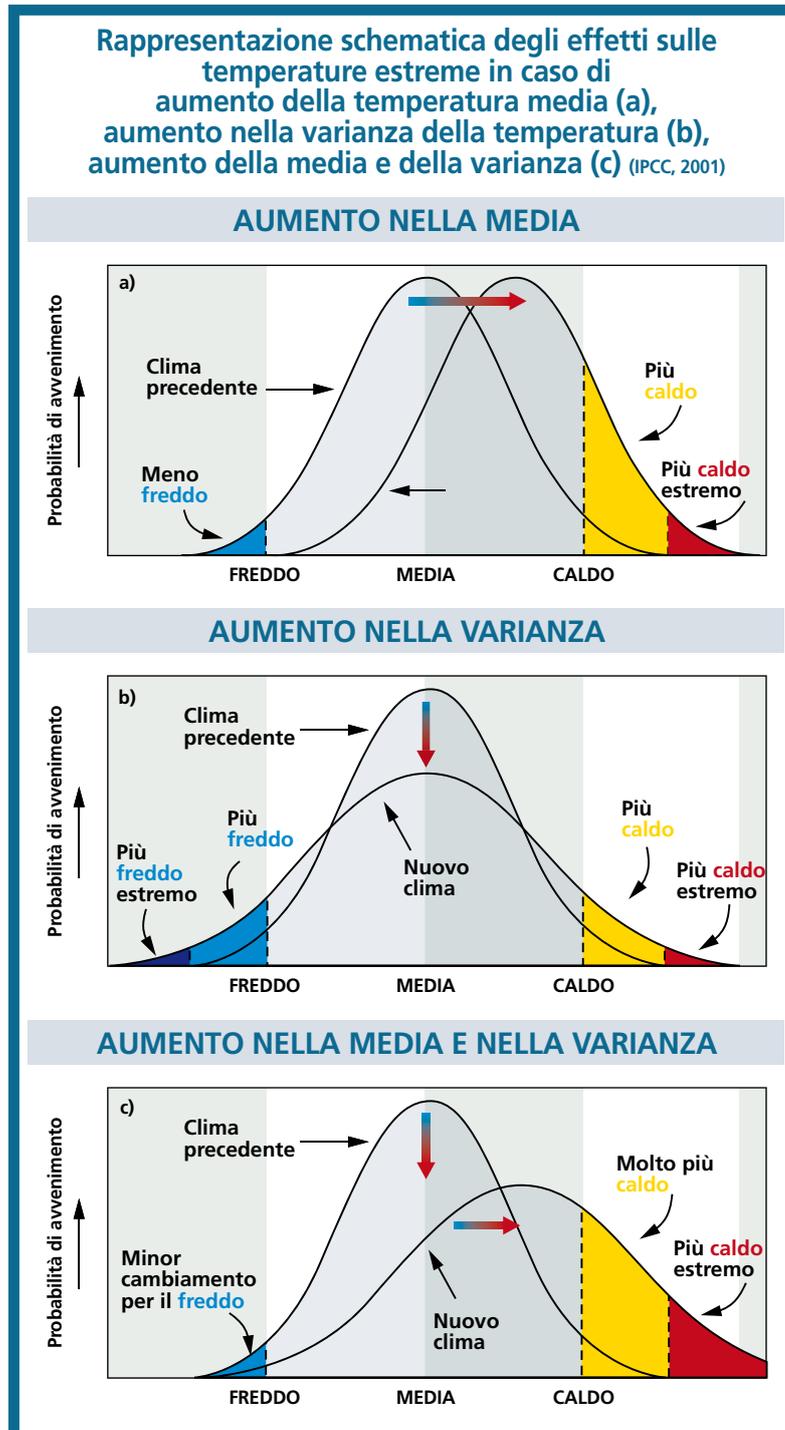
rappresentati da un modello AGCM (atmosferico) accoppiato interamente con un modello OGCM (oceanico). Accoppiamento significa che la parte marina del modello è dinamica e trasmette/risceve informazioni in continuo con la parte atmosferica. Proprio per tali caratteristiche, gli AOGCM possono essere usati per previsioni sui cambiamenti climatici. Possono essere usati, inoltre, per studiare la variabilità e i processi fisici del sistema climatico accoppiato atmosfera-oceano. I modelli di previsione climatologica più recenti hanno una risoluzione di qualche centinaio di chilometri.

Quando si vuole studiare i cambiamenti climatici su scala regionale tuttavia, ci si scontra con problematiche che i modelli del tipo GCM non possono mettere in evidenza. A scala regionale il clima è fortemente influenzato da fattori locali come la conformazione del territorio ed in particolare dall'orografia. Un modello GCM ha una rappresentazione approssimativa della realtà fisica del globo, limitazione data dalla scarsa risoluzione spaziale del modello dell'ordine di qualche centinaio di chilometri.

La risposta a tale necessità è data dai modelli RCM (Regional Climate Model). In pratica si cerca di risolvere i problemi della scala globale, individuando un'area di interesse e aumentando enormemente la risoluzione del modello solo su tale area. (fig 8)

Per questo motivo i modelli RCM sono detti ad area limitata o regionali, in quanto sono una rappresentazione tridimensionale del sistema accoppiato atmosfera-oceano, ma solo su un'area limitata del globo. Tali modelli hanno necessità di avere dati in ingresso, primi tra tutti le informazioni cosiddette al contorno, che definiscono cosa succede sui bordi della griglia di integrazione (Giorgi F., 1990). Una limitazione rispetto al GCM, e dovuta sempre alla grande risoluzione, è quella di non poter fare simulazioni troppo lunghe, che necessiterebbero di lunghi tempi di calcolo.

Il modo migliore per testare le capacità di tutti questi modelli di simulare il clima,



dal momento che sarebbe quantomeno rischiosa una verifica a posteriori, è quello di osservare se essi sono in grado di riprodurre il più fedelmente possibile il clima attuale e quello degli ultimi secoli, attraverso una comparazione di alcune quantità medie come la temperatura superficiale media del globo, che si ricava dai risultati delle simulazioni con i dati effettivamente misurati. In effetti le ultime generazioni di modelli climatici si comportano in modo soddisfacente, con miglioramento sensibile della predicibilità di numerosi aspetti

climatici, ossia una riduzione dell'errore che si commette nel simulare un particolare aspetto o parametro del sistema climatico. Ciò nondimeno esistono ancora delle zone grigie nella loro formulazione ed, in particolare, va segnalato un aspetto fondamentale tuttora necessario di studi approfonditi: il complesso meccanismo di retro-azione rappresentato dalle nubi e dalla loro formazione. Infatti, il vapor acqueo presente in atmosfera sotto forma di nubi, da un lato aumenta l'albedo terrestre con una conseguente diminuzione

Fig. 9 - All'interno della famiglia A1, sono identificati tre diversi gruppi, che derivano da direzioni di sviluppo diverse della tecnologia applicata ai sistemi di produzione energetica: A1FI considera un utilizzo intensivo dei combustibili fossili, A1T un utilizzo delle fonti rinnovabili, mentre A1B rappresenta un utilizzo bilanciato delle fonti di energia.

Fig. 10 - Riscaldamento globale in °C (relativo al periodo 1980-1999) per gli scenari socio-economici A2, A1B, B1, e per lo scenario a concentrazione costante del 2000, mostrati come proseguimento della simulazione della temperatura del XX secolo, ottenuti con diversi modelli numerici (il numero indica la quantità di simulazioni per ogni scenario). La linea in grassetto rappresenta il valor medio delle simulazioni, l'area ombreggiata l'intervallo corrispondente a +/-1 deviazione standard del campione (IPCC, 2007).

Fig. 11

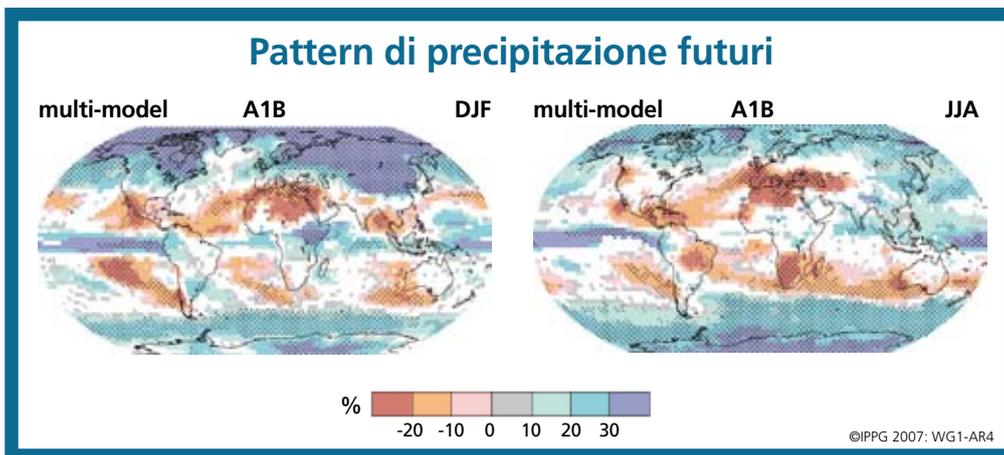


Fig. 12 - Distribuzione della variazione media della precipitazione (mm/giorno) in inverno ed in estate. La variazione è per lo scenario A1B per il periodo 2080-2099 relativamente al periodo 1980-1999. Da notare il deficit previsto per le medie latitudini, in particolare nel periodo estivo sul Mediterraneo (IPCC, 2007).

Fig. 13

Fenomeni e tendenza	Probabilità negli scenari futuri del XXI secolo
Generalmente più caldo con temperature massime e minime maggiori sulla maggior parte delle terre emerse.	Superiore al 99%
Generalmente più caldo con un numero minore di giorni e notti fredde sulla maggior parte delle terre emerse.	Superiore al 99%
Aumento delle frequenze delle ondate di calore sulla maggior parte delle terre emerse.	Superiore al 90%
Aumento della frequenza dei fenomeni di precipitazione intensa (o della proporzione della precipitazione totale dovuta ad eventi intensi) sulla maggior parte delle terre emerse.	Superiore al 90%
Aumento delle aree soggette a siccità.	Superiore al 66%
Aumento dell'intensità dei cicloni tropicali.	Superiore al 66%
Aumento dell'incidenza degli estremi positivi del livello del mare (definiti come i valori orari che superano il 99° percentile della distribuzione del periodo di riferimento), che dipendono sia dal livello medio del mare e dalle forzanti locali meteorologiche (escluso gli tsunami).	Superiore al 66%

ne della radiazione solare assorbita dalla superficie determinando quindi un abbassamento della temperatura nei bassi strati atmosferici; dall'altro contribuisce ad aumentare l'effetto-serra, ossia la radiazione emessa dalla superficie terrestre viene "rimbalzata" verso il basso dalle nubi, con conseguenze diametralmente opposte sulla temperatura superficiale. Va da sé che la corretta valutazione dell'effetto dominante di questo processo potrebbe giocare un ruolo non trascurabile nella simulazione del clima futuro (...).

I modelli numerici così come descritti finora, non sarebbero comunque in grado di fornire informazioni davvero utili sull'andamento futuro del clima: essi non tengono conto in toto dell'influenza delle attività umane in termini di immissioni di gas climalteranti e di aerosol in atmosfera o dell'uso del suolo. Per questa ragione, nel marzo del 2000, all'epoca del III rapporto IPCC, sono stati definiti una serie di scenari emissivi (SRES; Special Report

on Emission Scenarios) attesi per il XXI secolo, raggruppati in quattro famiglie principali, che si contraddistinguono per supportare differenti concentrazioni in atmosfera di gas serra possibili nei prossimi cento anni. In questa prima formulazione, che costituisce un riferimento anche oggi, ma è in fase di revisione in vista del prossimo V rapporto IPCC (2012), tali scenari non tengono conto delle politiche specifiche di riduzione dei gas serra, come il protocollo di Kyoto, ma implicitamente dipendono dalle politiche di sviluppo sociale ed economico, dall'utilizzo di nuove tecnologie e da azioni relative alla riduzione dell'inquinamento atmosferico (fig 9). Il risultato importante è che, anche con la revisione di questi contributi, le proiezioni globali delle emissioni dei gas serra non variano sensibilmente.

Vediamo quindi, sulla base di tali differenti scenari emissivi, quali sono i principali effetti sull'ambiente previsti dai modelli

climatici e diffusi dall'IPCC nel suo ultimo rapporto.

Temperatura: si stima un incremento medio globale della temperatura dell'aria nel periodo dal 2090 al 2099 compreso tra 1.7 e 4.0 °C a seconda del diverso scenario di emissione di gas serra considerato, che diventa da circa 3 a 6 °C senza interventi strutturali di mitigazione (fig. 10). Il tasso di riscaldamento presentato nelle recenti stime è maggiore di quello osservato nel XX secolo e, sulla base dell'analisi di dati paleoclimatici, è senza precedenti negli ultimi 10000 anni.

La distribuzione nel tempo non è uguale per tutti gli scenari: quelli che vedono un utilizzo dei combustibili fossili, come la famiglia A2, il riscaldamento è mitigato, fino al 2050, dalle emissioni di SO₂, che ha un effetto di raffreddamento dell'atmosfera. A più lungo termine, le emissioni dei gas serra come CO₂ e N₂O diventa dominante. Sulla base dei risultati dei più recenti A0-GCM si stima comunque un riscaldamento di tutte le regioni della terra, maggiore sulle terre emerse che non negli oceani e maggiore alle alte latitudini. In molte aree del pianeta è stimata una diminuzione dell'escursione termica diurna, con un aumento delle temperature minime notturne superiore all'aumento delle massime diurne.

Diverse simulazioni mostrano una generale diminuzione della variabilità delle temperature in inverno e un aumento di tale variabilità nelle aree emerse dell'emisfero nord durante l'estate. L'aumento nella variabilità delle temperature implica anche un aumento negli estremi relativamente alla media climatica (fig. 11). Questa forte sensibilità degli estremi all'ampiezza della distribuzione statistica, ha portato all'affermazione che "la variabilità è più importante della media" (Katz R. et al., 1992).

Il clima estivo europeo potrebbe perciò vedere una maggior variabilità da anno ad anno in risposta al "forcing" dei gas serra e di conseguenza influenzare in modo sostanziale la frequenza delle ondate di calore e degli episodi di siccità in futuro.

Precipitazioni: in generale, la concentrazione media di vapore acqueo in atmosfera è stimata in aumento nel corso del

XXI secolo: questa crescita, insieme alle modificazioni sui regimi meteorologici a grande scala dovuti al riscaldamento, diversamente distribuito sul pianeta, modifica il regime pluviometrico. La maggior parte delle simulazioni modellistiche indica che, dalla seconda metà del XXI secolo, vi è una probabilità superiore al 90% che le precipitazioni aumentino nell'emisfero nord, alle medie ed alte latitudini, ed in Antartide durante l'inverno. Si evidenzia inoltre (fig. 12), sulla maggior parte delle aree del pianeta dove è atteso un aumento della precipitazione media, una variabilità più accentuata nel loro regime da un anno all'altro. Nella maggior parte delle aree subtropicali è probabile (probabilità superiore al 66%) che le precipitazioni diminuiscano (nello scenario A1B le precipitazioni nel periodo 2090-2099 sono viste diminuire fino al 20% del periodo 1980-1999).

Il Nord Africa e l'area del Mediterraneo vedono una tendenza all'inaridimento, mentre più incertezze vi sono circa i cambiamenti nella precipitazione tropicale, soprattutto a causa delle complesse interazioni tra i cambiamenti climatici ed i cicli naturali come quello di El Niño, che dominano il clima ai tropici. Per quanto riguarda l'Europa, la precipitazione totale è vista aumentare dal 10 al 40% sulle regioni settentrionali con un tasso medio dell'1-2% per decade e con una distribuzione non uniforme sulle stagioni: il periodo estivo vede comunque un deficit delle precipitazioni. Su quelle meridionali è attesa una diminuzione dell'ordine del 20% (IPCC 2007), in particolare nel periodo estivo. Sul bacino del Mediterraneo, sembrano probabili delle estati più "asciutte" di quanto non sia stato sino ad ora. Con tutta la cautela legata all'incertezza sui dettagli locali delle simulazioni delle precipitazioni, si può comunque immaginare un aumento delle precipitazioni a nord delle Alpi e una riduzione a Sud, soprattutto durante i mesi estivi, e quindi una progressiva desertificazione delle regioni dell'Italia insulare e meridionale e sensibili manifestazioni di desertificazione anche nelle regioni del centro-nord Italia.

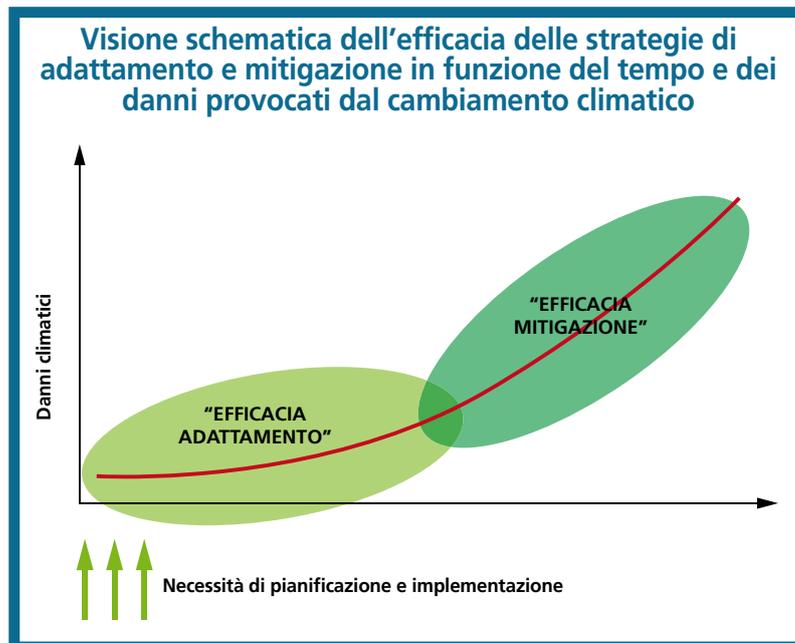


Fig. 14 - Si capisce come in una prima fase l'adattamento ricopra un ruolo preponderante, in particolare per modifiche contenute del clima, ma come sul lungo periodo la strategia che minimizza i danni sia necessariamente quella "attiva" della mitigazione.

Livello dei mari: anche il livello del mare è condizionato dallo scenario considerato di emissione di gas serra per i prossimi anni e, come per la temperatura, i diversi modelli forniscono una risposta concorde sull'aumento del livello del mare con valori più critici all'aumentare della concentrazione dei gas serra. Gli scenari futuri prevedono un innalzamento del livello globale medio del mare, compreso tra 18 e 59 centimetri nel periodo 2090-2099, in funzione dei diversi scenari socio-economici. L'innalzamento previsto è dovuto principalmente (per il 70-75%) all'espansione termica e alla perdita di massa dei ghiacciai e delle calotte ghiacciate. Ai valori indicati, sono da sommare le incertezze dovute al contributo dello scioglimento dei ghiacciai della Groenlandia e dell'Antartide. Se l'aumento recentemente osservato nella portata dovuta allo scioglimento dei ghiacci crescesse linearmente con la temperatura globale, la stima dell'innalzamento medio del livello del mare dovrebbe essere aumentata del 10-25% per ogni scenario.

Queste proiezioni corrispondono ad un aumento pari fino a tre-quattro volte i valori osservati nel corso del XX secolo, che già sono da considerare valori eccezionali (Church e White, 2006). L'effetto sul livello del mare è più lento di quello sulla temperatura, ma risente per tempi più lunghi della forzante iniziale.

Estensione dei ghiacci e sulla copertura nevosa: a livello medio globale ed in particolare nell'emisfero Nord, sia la copertura nevosa sia l'estensione dei ghiacci sono previste in diminuzione a causa del riscaldamento progressivo. La copertura nevosa rappresenta una risposta integrata alla variazione sia della temperatura sia della precipitazione e mostra una forte correlazione negativa con la temperatura dell'aria nella maggior parte delle aree dove la copertura nevosa presenta un andamento stagionale e non permanente. A causa di questa forte dipendenza dalla temperatura, le proiezioni per il XXI secolo ne danno una diminuzione distribuita su vaste aree del pianeta.

I modelli specificatamente sviluppati per simulare gli impatti del cambiamento climatico nella zona Artica (Arctic Climate Impact Assessment - ACIA), proiettano alla fine del XXI secolo una riduzione della copertura nevosa annuale nell'emisfero nord in un intervallo dal 9 al 17%, con una media intorno al 13%, nello scenario B2 scenario (ACIA, 2004).

Le maggiori riduzioni si hanno in primavera e nel periodo tardo autunno-inizio dell'inverno, portando ad una diminuzione del periodo in cui il suolo si presenta coperto da neve, oltre ad una diminuzione vera e propria della superficie coperta da neve. L'inizio della stagione di accumulo della neve al suolo, che corrisponde alla



fine della stagione in cui si ha fusione, è ritardata, mentre è anticipato l'inizio della stagione in cui si ha la fusione (Hosaka et al., 2005). In generale nell'emisfero Nord si ha una diminuzione sia della quantità di neve, sia dell'estensione della copertura nevosa, anche se in alcune regioni specifiche, come ad esempio la Siberia, la quantità di neve è vista aumentare a causa dell'aumento della precipitazione nevosa nel periodo autunno-inverno (Melleshko et al., 2004; Hosaka et al., 2005). Per quanto riguarda i ghiacci una consistente riduzione è attesa per i ghiacci marini, sia nell'estensione sia nello spessore, mentre particolarmente critica è attesa la situazione dei ghiacciai alpini, che potrebbero progressivamente scomparire. Una conseguenza indiretta della diminuzione delle superfici ghiacciate e della copertura nevosa è la diminuzione dell'albedo, ossia della capacità della superficie terrestre di riflettere la radiazione incidente. Attualmente i ghiacci ricoprono il

75% della superficie dell'Oceano Artico, riflettendo dal 50 all'80% della radiazione incidente, mentre le acque marine ne assorbono circa l'85% (Washington and Parkinson 2005). Nel 2100, la calotta glaciale Artica, che è vista scomparire quasi del tutto durante la tarda estate, modificherà pertanto il bilancio termico di quest'area del pianeta. La diminuzione dell'albedo a causa della riduzione dei ghiacci e della copertura nevosa, produce un meccanismo di retroazione positiva (Chapin et al. 2005), favorendo a sua volta l'aumento del riscaldamento. Dal 1978 la superficie di ghiaccio oceanica si è fusa di circa il 3% per decade, e non è escluso che vi sia una soglia nella riflettività della terra, superata la quale il sistema cambia rapidamente e radicalmente stato. Lo scioglimento dei ghiacci ha come conseguenza anche l'aumento del vapore acqueo in atmosfera, che, come abbiamo visto in precedenza, oltre ad essere un importante gas serra di per sé, è all'origine di meccanismi di

retroazione complessi e non del tutto compresi legati alla formazione ed alla dinamica delle nubi.

Infine la tabella (Fig. 13) riassume i principali cambiamenti negli estremi meteorologici attesi nel XXI secolo con il relativo grado di confidenza espresso in termini percentuali (IPCC, 2007).

CONCLUSIONI

Il clima dunque sta cambiando. Non è una grande scoperta, visto che si tratta di un sistema in equilibrio dinamico. Tuttavia l'enorme mole di lavoro svolto negli ultimi decenni da parte della comunità scientifica, ha messo in risalto come il cambiamento climatico in atto nell'ultimo mezzo secolo sia il più rapido mai osservato sul nostro pianeta e come l'intrusione antropica abbia un peso non indifferente sul naturale equilibrio del sistema. Sono stati compiuti significativi passi avanti sulla comprensione dei complessi processi e meccanismi (i cosiddetti "feed-back" positivi e negativi) che legano assieme tutte le componenti climatiche, questo soprattutto grazie allo sviluppo di modelli climatici numerici sempre più raffinati e dettagliati. In particolare questo è il campo in cui sono attesi per gli anni a venire, ulteriori miglioramenti, un po' perché i risultati delle simulazioni modellistiche sono lo strumento principale sulla base dei quali poter decidere se e come sia possibile eventualmente intervenire, un po' perché una ulteriore riduzione dell'incertezza delle previsioni attese permette interventi più efficaci e mirati. Gli eventi mondiali che hanno caratterizzato il 2007 dimostrano come la questione del cambiamento climatico sia uscita definitivamente e prepotentemente dai laboratori e dalle riviste scientifiche per giungere sul tavolo dei decisori e presso l'intera opinione pubblica mondiale. Le risposte che la nostra società sta perseguendo si basano su due strategie tutt'altro che antitetiche, bensì estremamente integrate (fig. 14): da un lato la mitigazione, ossia il tentativo di limitare le immissioni di gas clima-alteranti derivanti da attività

antropiche in atmosfera (e il Protocollo di Kyoto è il padre di tutte le iniziative in questo senso), dall'altro l'adattamento, ossia quell'insieme di azioni che mirano sia a minimizzare i danni causati dal cambiamento climatico sia a sfruttare nuove opportunità socio-economiche che potrebbero nascere da esso. Naturalmente tutte queste misure debbono essere realizzate nell'ottica di garantire l'armonia tra l'innata spinta al progresso della società umana ed il fondamentale rispetto per le risorse naturali e l'equilibrio ecologico dell'intero pianeta. Ci sono pochi dubbi che il clima che spe-

rimenta la nostra generazione sia differente in termini di media e di frequenza da quella dei nostri nonni e, le simulazioni modellistiche, ci indicano che le generazioni future potrebbero trovarsi a convivere con condizioni ambientali decisamente diverse. Nei prossimi anni la sfida della ricerca scientifica deve farsi ancora più ambiziosa e spostare in avanti i suoi obiettivi, nel tentativo di rispondere in modo soddisfacente a due fondamentali quesiti a tutt'oggi non sufficientemente chiari: quanto velocemente il "forcing" supplementare determinato dalle attività antropiche può modificare

la naturale evoluzione del clima e se esso possa destabilizzare in modo irreversibile l'equilibrio natura del sistema. La sfida è aperta.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano tutti i colleghi dell'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa Piemonte ed in particolare il settore meteorologico per il lavoro di ricerca e di sintesi ragionata di tutte novità in campo climatico sfociato nella pubblicazione "Il Piemonte nel Cambiamento Climatico", Arpa 2007, a cui questo articolo deve la paternità.

Bibliografia

- Beniston, M., Junco, P., (2002): Shifts in the distributions of pressure, temperature and moisture and changes in the typical weather patterns in the alpine region in response to the behaviour of the North Atlantic Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 71, p 29-42.
- Beniston, M., (2005): Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 162, p. 1587-1606. Referenced as Beniston 2005a.
- Chapin et al. 2005. Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming Science 28 October 2005: Vol. 310. no. 5748, pp. 657 - 660
- Church, J.A., White N.J., 2006. 'A 20th century acceleration in global sea-level rise', *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.
- Ciccarelli N., Von Hardenberg J., Provenzale A., et al., (2007): Climate Variability in North-Western Italy during the Second Half of the 20th Century, *MedCLIVAR Special Issue of Global and Planetary Change*, in press.
- Corti S., Provenzale A., S. Fuzzi S., 2007. Predicibilità del clima e delle sue variazioni. *Sapere*, 4, 62-65.

- FOEN (Federal Office for the Environment) (2007): Il cambiamento climatico in Svizzera. Indicatori riguardanti cause, effetti e misure. Ittingen: FOEN publication, 77 p.
- F. Giorgi, 1990. "Simulation of Regional Climate Using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model," *J. Climate*, No. 3, 94.
- Haeberli, W. Beniston, M., (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 1998, Vol. 27, p 258-265.
- Hosaka, M., D. Nohara, and A. Kitoh, 2005. Changes in snow coverage and snow water equivalent due to global warming simulated by a 20km-mesh global atmospheric model. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 1, 93-96.
- Katz R. et al. (1992) "Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages", *Journal Climatic Change*, Volume 21, Number 3, pp. 289-302.
- Meleshko, V.P., et al., 2004: Anthropogenic climate change in 21st century over Northern Eurasia. *Meteorol. Hydrol.*, 7, 5-26.
- Muller, S.W. (1947): Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. *JW Edwards; Ann.Arbor, Mich.*
- Scholze, M.; Knorr, W.; Arnell, N.W.; Prentice, I.C., 2006. A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National*

Academy of Sciences, 103: 13116-13120.

- Schär, C., Vidale, P.L., Luthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European Summer heatwaves. *Nature*, 427, 332-336.
- Warren Washington and Claire L. Parkinson 2nd Edition, *University Science Books*, 2005, *An Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling*.
- Zimmermann, M., Haeberli, W., (1992): Climatic change and debris flows activity in high mountain areas: a case study in the Swiss Alps. *Catena Supplement*, Vol. 22, p 59-72.
- IPCC, 2007. *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*.

