



REGIONE AUTONOMA
VALLE D'AOSTA



AMBIAMENTI



LIMATICI

IN



ALLE



D', AOSTA



SOCIETÀ METEOROLOGICA SUBALPINA

CAMBIAMENTI CLIMATICI IN VALLE D'AOSTA

OPPORTUNITÀ E STRATEGIE DI RISPOSTA



Autunno nei dintorni del Col de Joux (11.10.2003)

REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA
PRESIDENZA DELLA REGIONE
RÉGION AUTONOME VALLÉE D'AOSTE
PRÉSIDENTE DE LA RÉGION



SOCIETÀ' METEOROLOGICA SUBALPINA

Sezione Alpi Occidentali della Società Meteorologica Italiana Onlus



ISBN 88-900099-9-3

Cambiamenti climatici in Valle d'Aosta: opportunità e strategie di risposta.

© Copyright 2006

Società Meteorologica Subalpina
Castello Borello, Bussoleno (TO), Italia
www.nimbus.it - info@nimbus.it

Elaborazione grafica copertina: Andrea Barberis Organista Design, Biella
Stampa e confezione: Graficat, Torino

Supervisione scientifica:

CLAUDIO CASSARDO, GIOVANNI BADINO

Dipartimento di Fisica Generale, Università di Torino

Coordinamento scientifico ed editoriale:

LUCA MERCALLI

Redazione: VALENTINA ACORDON,

DANIELE CAT BERRO, GENNARO DI NAPOLI

Revisione grafica e informatica: SOFIA MONTUSCHI

Desideriamo esprimere i nostri ringraziamenti a:

Presidenza della Regione Autonoma Valle d'Aosta

Assessorato Agricoltura e Risorse Naturali

Assessorato Sanità, Salute e Politiche Sociali

Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche

Assessorato Turismo, Sport, Commercio e Trasporti
nonché a tutti i membri del Comitato di Pilotaggio,
all'ARPA Valle d'Aosta e alla Compagnia
Valdostana Acque S.p.A. (CVA).

Tutte le fotografie sono degli Autori, salvo un'im-
magine in copertina e a p. 123 dello Studio
Guindani di Gressoney-St-Jean, a p. 79 di M.
Palomba, a p. 99 di M. Tron, a p. 124 di V.
Bertoglio, e a p. 139 della Compagnia Valdostana
Acque (CVA).

Dedichiamo questo lavoro a WILLY MONTÉRIER, da un
cinquantennio scrupoloso direttore
dell'Osservatorio Meteorologico di Gressoney-
D'Ejola, a quota 1850 m, così importante per le
analisi climatiche storiche in Valle d'Aosta.

Presentazione

LUCIANO CAVERI - Presidente Regione Autonoma Valle d'Aosta

Io l'ho visto il cambiamento climatico. Capisco che chiunque dica una cosa di questo genere possa essere preso per matto. Gli scienziati, ma anche gli storici, ci parlano sempre con grande cautela di secoli e millenni, che si fanno un baffo della breve durata della vita di ogni singolo essere umano.

Eppure io i cambiamenti li ho visti! Conosco diversi ghiacciai di cui ho constatato *de visu* la «sofferenza». Ho vissuto inverni *d'antan* con nevicata memorabili che non ho più visto. Ricordo certe primavere e certi autunni — da esatta descrizione come da libro delle elementari — ed oggi non li vedo più! Ho constatato l'invasività del bosco e i problemi crescenti nell'approvvigionamento dell'acqua.

Non lo dico con visione nostalgica e per altro ho la certezza che certi alti e bassi sono nella storia della Natura che ha forgiato la geografia della Valle e le caratteristiche del suo popolamento.

Questo studio nasce tuttavia da un'esigenza, quella previsionale. Per capire, nel limite del possibile, dove andremo a finire per decidere sui diversi temi: quale turismo, quale agricoltura, quale politica energetica e via di questo passo. Si tratta, per altro, anche nel nostro piccolo di applicare misure che invertano fenomeni di inquinamento e di degrado ambientale, che potrebbero - il condizionale resta d'obbligo - essere alla base di certi cambiamenti climatici.

Ringrazio tutti coloro che, in ogni struttura della Regione, hanno collaborato con Luca Mercalli, cui mi lega un'antica amicizia, un eguale amore per la montagna e anche una certa *vis polemica*, sempre a fin di bene!

Prefazione

MARTIN BENISTON - Université de Genève, Suisse

La situation géographique et la configuration des Alpes en font une région particulièrement intéressante pour de nombreuses études climatiques et environnementales dans la mesure où ce massif se situe à un «carrefour climatique» comprenant les influences océaniques, continentales, polaires, méditerranéennes et, à l'occasion, sahariennes.

Dans un climat qui change, la fréquence d'apparition de ces masses d'air se modifie également, avec des régimes secs ou humides, froids ou secs différents de ceux observés depuis plus d'un siècle. Les modèles de climat, appliqué à la région alpine, semblent s'accorder sur le fait que les hivers d'ici la fin du 21^e siècle seront plus doux (2-4°C de plus qu'aujourd'hui) et un peu plus humides, alors que les étés seront beaucoup plus chauds (4-6°C) et secs. Dans le même temps, certains événements extrêmes pourraient augmenter dans les Alpes, notamment les sécheresses et les pluies abondantes, mais aussi les vagues de chaleur et probablement les tempêtes de vent.

Aucune région alpine ne sera épargnée, que ce soit au nord des Alpes ou au sud, comme le Tessin ou le Val d'Aoste. L'environnement alpin sera fortement touché non seulement par l'amplitude des changements climatique mais aussi par leur rapidité. Ainsi, certains écosystèmes auront de réelles difficultés d'adaptation, alors que plus de la moitié des glaciers vont progressivement disparaître. La neige tombera à plus haute altitude avec un enneigement plus aléatoire pour les stations de ski et par conséquent des problèmes financiers à la clé. Enfin, l'hydrologie des bassins versants alpins sera fortement affectée par le climat futur ; la quantité d'eau et le caractère saisonnier des écoulements sera très différent d'aujourd'hui.

Comme il est peu vraisemblable de renverser la tendance au réchauffement en cours, vu l'inertie du système climatique, la seule stratégie que l'on peut adopter pour la protection de l'environnement passe par l'adaptation. Ceci nécessitera rapidement la mise en œuvre de choix politiques, économiques et technologiques pour faire face aux aspects négatifs du réchauffement du climat alpin.

Introduzione

LUCA MERCALLI - Presidente Società Meteorologica Italiana

Il cambiamento climatico, già evidente anche in Valle d'Aosta con l'aumento delle temperature e la rapida riduzione dei ghiacciai, propone al tempo stesso sfide e opportunità per il futuro delle regioni montane. Turismo, agricoltura, sanità, edilizia, riserve idriche, produzione energetica e trasporti saranno in qualche modo influenzati dai nuovi assetti climatici e ambientali che andranno delineandosi nel XXI secolo, quali che siano le cause, antropiche, naturali o verosimilmente una combinazione di entrambe. La Società Meteorologica Italiana cominciò a studiare il clima della Valle d'Aosta attorno al 1870 e — dopo un periodo di stasi — è ritornata a portare il proprio contributo di ricerca e di divulgazione a partire dal 1993, con l'attività della Società Meteorologica Subalpina, che ne costituisce il braccio operativo per le Alpi Occidentali.

Sono pertanto lieto che l'Amministrazione della Regione Autonoma Valle d'Aosta, nella persona del suo Presidente Luciano Caveri, uomo di cultura attento ai cambiamenti ambientali — con il quale da oltre un decennio ho condiviso queste problematiche tanto al tavolo dei convegni quanto sulle nevi del Trofeo Mezzalama — abbia voluto affidare alla nostra Associazione il compito di tracciare un quadro sugli scenari climatici del futuro valdostano.

La Valle d'Aosta diviene così tra le prime regioni in Italia, insieme alla Toscana, a dotarsi di uno studio di sintesi che descriva i rischi ma anche i potenziali vantaggi legati agli scenari climatici futuri, individuando soluzioni e strategie per la mitigazione di un problema complesso, in analogia a quanto già fatto da anni in altri paesi alpini.

Lungi dal voler dare risposte definitive ed esaustive a un problema che in Italia si apre da poco al dibattito pubblico, essendo stato perlopiù lasciato in balia di chiacchiere confuse, questo lavoro vuole semplicemente informare e sensibilizzare tecnici e amministratori locali sui problemi connessi con i cambiamenti climatici, in modo che possano operare le proprie scelte strategiche con piena coscienza dei principali caratteri evolutivi attesi nei prossimi decenni, effettuando eventualmente ulteriori studi e approfondimenti nei singoli settori applicativi. Sono certo infine, che oltre alla competenza tecnico-scientifica del gruppo di lavoro, da queste pagine emergerà anche il profondo coinvolgimento e l'appassionata affezione che tutti noi nutriamo per il meraviglioso territorio alpino della *Vallée*.

Sintesi delle tendenze e degli scenari di alcuni indicatori climatici in Europa e in Valle d'Aosta

<i>Indicatori</i>	<i>Punti chiave</i>
Clima e atmosfera	
<i>Gas serra</i>	A causa dell'attività antropica, la concentrazione di CO ₂ (biossido di carbonio) è aumentata del 36% dall'età pre-industriale, con una accelerazione nella crescita dal 1950. Attualmente il valore è di 381 ppmv, all'inizio dell'era industriale era 280 ppmv.
	La crescita complessiva della concentrazione di tutti i gas serra dall'era pre-industriale è di 170 ppmv di biossido di carbonio equivalente. L'anidride carbonica contribuisce per il 61%, il metano per il 19% , i CFC e HCFC per il 13% e l'ossido d'azoto per il 6%
	Se non vengono attuate politiche di contenimento, entro il 2100 si profila un ulteriore aumento fino a 650 -1215 ppmv di CO ₂
	Per conseguire l'obiettivo UE di contenere entro i 2 °C l'aumento della temperatura, le emissioni di gas serra devono essere ridotte sensibilmente rispetto ai livelli del 1990
<i>Temperatura dell'aria</i>	La temperatura media globale è aumentata di 0.7±0.2 °C negli ultimi 100 anni. Gli anni 1990 sono stati il decennio più caldo mai osservato.
	Il riscaldamento sulla regione alpina è stato maggiore di quello globale, con un aumento di circa 1 °C dal 1900. L'aumento di temperatura è stato più sensibile in inverno che in estate
	In Valle d'Aosta il 2003 è stato l'anno più caldo, seguito dal 2004 e dal 2002
	A livello globale tra il 1990 e il 2100 si prevede un aumento di temperatura tra 1.4 e 5.8 °C, e tra 1.5 e 5.4 °C in Valle d'Aosta. La soglia di 2 °C di aumento di temperatura rispetto all'età pre-industriale, sarà probabilmente superata intorno al 2050.
<i>Precipitazioni</i>	Il trend delle precipitazioni annuali in Europa tra il 1900 e il 2000 mostra un comportamento opposto tra il nord-Europa (più piovoso del 10-40%) e il sud-Europa (fino al 20% più secco). In gran parte d'Europa i cambiamenti sono stati più sensibili in inverno.
	In Valle d'Aosta appare una diminuzione delle precipitazioni dopo il 1940, con un aumento della frequenza degli anni meno piovosi della media, ma le tendenze sono poco evidenti.
	In futuro si prevede un aumento delle precipitazioni annuali del 1-2 % per decennio nell'Europa settentrionale e una diminuzione delle precipitazioni annuali del 1% per decennio nell'Europa meridionale, con punte fino al 5% di diminuzione per decennio nelle precipitazioni estive.
	L'effetto della diminuzione delle precipitazioni sull'Europa meridionale porterà a siccità più frequenti, con impatti considerevoli sull'agricoltura e sulla disponibilità d'acqua.
<i>Eventi estremi</i>	Negli ultimi 100 anni il numero di giorni di gelo è diminuito in gran parte d'Europa, compresa la Valle d'Aosta (meno 15-20% da metà anni 1970), mentre sono aumentati il numero di giorni con temperature superiori a 30 °C e la frequenza delle ondate di calore.
	La frequenza di giorni con precipitazioni intense è generalmente diminuita nell'Europa meridionale, mentre è aumentata nell'Europa centro-settentrionale. In Valle d'Aosta, nonostante la percezione comune, si evidenzia una lieve tendenza alla diminuzione degli eventi di pioggia intensa, in particolare nella stagione invernale.
	Si stima che gli inverni rigidi scompariranno quasi del tutto intorno al 2080, mentre le estati molto calde diventeranno più frequenti
	Si presuppone che intorno al 2080 sia le siccità che gli episodi di precipitazioni intense diventeranno più frequenti

Sintesi delle tendenze e degli scenari di alcuni indicatori climatici in Europa e in Valle d'Aosta (2° parte)	
<i>Indicatori</i>	<i>Punti chiave</i>
Neve e ghiacciai	
<i>Ghiacciai</i>	Dal 1850 al 1980 i ghiacciai alpini hanno perso un terzo della loro area e metà della loro massa. Dal 1980 i ghiacciai rimanenti si sono ridotti di un altro 20-30%, mentre solo nell'estate 2003 è stato perso il 10% della massa glaciale rimanente.
	La fusione dei ghiacciai alpini ha raggiunto oggi livelli superiori a quelli degli ultimi 5000 anni.
	In Valle d'Aosta la superficie glaciale si è ridotta del 50 % dal 1820 a oggi. Nel 1983 la superficie glaciale era pari a 202 km ² e nel 1999 misurava solo più 157 km ² , con una perdita del 23% in soli 16 anni.
	Si stima che nel 2050 il 75% dei ghiacciai Svizzeri sarà scomparso. La situazione potrebbe essere analoga anche per la Valle d'Aosta.
<i>Neve</i>	Nell'emisfero nord l'estensione della copertura nevosa annuale è diminuita del 10% dal 1966.
	La durata della neve al suolo sull'Europa centrale e sulla regione alpina si è accorciata in media di circa 9 giorni per decennio tra il 1971 e il 1994.
	In Valle d'Aosta negli ultimi 15 anni si è assistito ad un anticipo di circa 15 giorni della fusione primaverile.
	La copertura nevosa nell'emisfero nord diminuirà ulteriormente nel corso del XXI secolo. In Valle d'Aosta sulle zone di bassa montagna (quota inferiore a 1500 metri) si stima una diminuzione del 35% della durata dell'innevamento per ogni grado di aumento della temperatura .
Ecosistemi terrestri e biodiversità	
<i>Struttura del popolamento vegetale</i>	Il cambiamento climatico degli ultimi 30 anni ha causato una diminuzione delle popolazioni di specie vegetali in Europa.
	La diversità delle specie vegetali è cresciuta in Europa nord-occidentale a causa della migrazione verso nord delle specie meridionali termofile.
	Globalmente un gran numero di specie potrebbe estinguersi a causa delle future condizioni climatiche, anche per la combinazione con fattori non climatici, come la frammentazione degli habitat, che limitano le capacità di migrazione e adattamento dei vegetali.
<i>Distribuzione delle specie vegetali nelle regioni montane</i>	Le specie montane endemiche sono minacciate dalla migrazione verso l'alto di altre specie sub-alpine più competitive.
	Nelle Alpi la migrazione verso l'alto ha portato ad un incremento di specie vegetali in 21 su 30 vette, mentre nelle altre è diminuito o è rimasto costante.
	I cambiamenti termici stimati in Europa sono al di fuori del limite di tolleranza di molte specie alpine, che verranno sostituite da specie più competitive, con perdita di endemismi tipici delle regioni montane.
<i>Sequestro di carbonio terrestre</i>	Nel periodo 1990-1998 la biosfera terrestre europea è stata un assorbitore netto di carbonio che ha parzialmente compensato le maggiori emissioni antropogeniche di biossido di carbonio.
	Il sequestro di carbonio in Europa può essere incrementato con l'espansione e la cura delle foreste. Il potenziale aggiuntivo di sequestro di carbonio in Europa dovuto a agricoltura e foreste è tuttavia relativamente piccolo se confrontato con gli obiettivi del protocollo di Kyoto.
	L'aumento termico stimato ridurrà probabilmente in futuro il potenziale sequestro di carbonio da parte della biosfera terrestre europea.
<i>Fenologia e periodo vegetativo</i>	Mediamente il periodo vegetativo in Europa si è allungato di 10 giorni tra il 1962 e il 1995 e si ritiene che si dilaterà ulteriormente in futuro.
<i>Sopravvivenza dell'avifauna</i>	Gli effetti positivi dell'incremento termico sulla vegetazione saranno probabilmente vanificati da un aumento del rischio di siccità in Europa meridionale.
	I tassi di sopravvivenza di differenti specie di uccelli migratori in Europa sono aumentati negli ultimi decenni e si prevede che, a causa delle temperature invernali più miti, aumenteranno ulteriormente. Non è possibile tuttavia determinare quale impatto ciò possa avere sulle popolazioni di uccelli migratori e non.

Sintesi delle tendenze e degli scenari di alcuni indicatori climatici in Europa e in Valle d'Aosta (3° parte)	
Indicatori	Punti chiave
Acqua	
<i>Deflusso fluviale annuale</i>	Il deflusso annuale dei fiumi europei è cambiato negli ultimi decenni: in alcune regioni è aumentato, mentre in altre, come in Europa meridionale, è diminuito.
	L'effetto combinato dei cambiamenti della temperatura e delle precipitazioni amplificherà i cambiamenti nel deflusso annuale.
	Il deflusso annuale è destinato a ridursi fortemente in Europa meridionale con conseguenze per la disponibilità idrica.
	In Valle d'Aosta sarà possibile un anticipo della "morbida" tardo primaverile-estiva a causa di una più precoce fusione nivale, e una più pronunciata magra estiva a causa della diminuzione delle precipitazioni e dell'esaurimento della riserva glaciale.
Agricoltura	
<i>Produzione vegetale</i>	Le rese per ettaro dei principali prodotti agrari sono cresciute negli ultimi 40 anni grazie ai progressi tecnologici, mentre i cambiamenti climatici hanno avuto influenza marginale.
	L'agricoltura nell'Europa centro-settentrionale potrà potenzialmente beneficiare di temperature più elevate e maggiori concentrazioni di CO ₂
	L'area coltivata potrà espandersi verso nord.
	In molte zone dell'Europa meridionale l'agricoltura verrà minacciata dalla carenza idrica.
	Durante l'ondata di caldo del 2003 molti paesi dell'Europa meridionale hanno sofferto perdite di raccolto fino al 30%. In Valle d'Aosta l'estate 2003 ha causato perdite nella produzione foraggera di circa il 27%.
	Perdite di raccolto potranno diventare più frequenti a causa di un aumento di eventi meteorologici estremi (siccità, alluvioni, tempeste, grandinate) e della maggior diffusione di patologie da parte di funghi e insetti.
Economia	
<i>Perdite economiche</i>	In Europa il 64% di tutti gli eventi catastrofici a partire dal 1980 sono direttamente attribuibili a estremi climatici e assommano al 79% delle perdite economiche.
	Le perdite economiche causate da eventi climatici sono passate da 5 miliardi di dollari verso il 1980 agli attuali 11 miliardi di dollari.
	Il probabile aumento di eventi meteorologici estremi in futuro causerà un incremento dei danni.
Salute umana	
<i>Ondate di calore</i>	Più di 30000 vittime, in particolare tra la popolazione anziana, sono attribuibili all'ondata di caldo che ha investito l'Europa sud-occidentale nell'estate 2003.
	In Valle d'Aosta non sono stati segnalati significativi incrementi di mortalità nell'estate 2003.
	Le ondate di calore sono previste diventare più frequenti e intense nei prossimi decenni con aumento nel numero di decessi dovuti al caldo; la Valle d'Aosta potrebbe beneficiare di una maggior frequentazione estiva da parte delle popolazioni delle città padane soggette a forte aumento termico.
<i>Alluvioni</i>	Tra il 1975 e il 2001 sono state registrate in Europa 238 alluvioni rilevanti; in questo periodo il numero di eventi è aumentato.
	Il numero di persone coinvolte in alluvioni cresce significativamente con conseguenze negative sulla salute sia fisica sia psicologica.
	Le vittime causate da alluvioni sono diminuite, probabilmente a causa di migliori misure di prevenzione e soccorso.
	I cambiamenti climatici incrementeranno probabilmente la frequenza delle alluvioni, in particolare delle piene improvvise in territori montani, che sono quelli che presentano il maggior rischio di causare vittime.
<i>Parassiti e infezioni</i>	Non si rilevano in Valle d'Aosta cambiamenti apprezzabili.

Indicazioni per la programmazione politica nei confronti dei cambiamenti climatici

- | |
|---|
| 1) Potenziamento reti irrigue |
| 2) Risparmio idrico e cisterne domestiche per raccolta acqua piovana |
| 3) Massimo isolamento termico edifici secondo standard Casaclima (BZ) o Minergie (Svizzera) |
| 4) Massima incentivazione dell'uso di energia solare |
| 5) Utilizzo biomassa legnosa dimensionato con le potenzialità forestali |
| 6) Stabilizzazione impianti innevamento programmato senza nuove espansioni |
| 7) Minimizzazione della produzione di rifiuti e massima quota riciclabile |
| 8) Economia di filiera corta dove possibile (minimo trasporto) |
| 9) Salvaguardia reti di osservazione meteoidrologica |
| 10) Educazione e sensibilizzazione della cittadinanza al consumo critico |

Le tabelle di sintesi delle tendenze e degli scenari climatici delle pagine precedenti sono state desunte da «Impacts of Europe's changing climate» - EEA report 2/2004 - European Environment Agency, con integrazioni degli autori per la Valle d'Aosta.



La superficie crepacciata del ghiacciaio del Rutor, tra i maggiori apparati glaciali valdostani (08.10.1999, f. D. Cat Berro). Negli ultimi 150 anni, dalla fine della Piccola Età Glaciale, la superficie glacializzata - sulle Alpi intere come in Valle d'Aosta - si è ridotta della metà, e l'ulteriore riscaldamento atmosferico atteso per il XXI secolo potrebbe segnare la scomparsa dei ghiacci al di sotto dei 3500 m circa. Il venir meno di questo affascinante elemento del territorio montano locale, oltre a determinare un'alterazione nei regimi idrologici e nella disponibilità di acqua, imporrà anche una revisione dell'offerta turistica, che potrà orientarsi verso altre attrazioni naturali e culturali che certamente in Valle d'Aosta non mancano.

Il clima e i suoi cambiamenti



Colori e limpidezza autunnali in alta Valle d'Aosta: il Monte Bianco dal sentiero per il Rifugio Deffeyes, La Thuile (08.10.1999, f. D. Cat Berro).



«La valutazione integrata del cambiamento climatico a scala regionale sarà uno dei principali obiettivi della comunità scientifica nei prossimi anni. La regione alpina sembra molto favorita per giocare da questo punto di vista un ruolo fruttuoso. Possiede una forte tradizione nel coinvolgere il pubblico nei processi decisionali. E' una delle regioni economicamente più dinamiche e prospere del mondo. Comprende un grande ventaglio di differenti tradizioni culturali. Se una valutazione integrata ha successo nel mediare la discussione circa i conflitti reali o immaginari tra obiettivi sociali, economici e ecologici, vi sono buone possibilità che questa regione assuma una posizione pionieristica nell'adottare una strada praticabile verso il futuro sostenibile.»

CLAUDIA PAHL-WOSTL, 1998

«Il rispetto per l'opinione dell'uomo della strada è un importante elemento della tradizione politica nella regione alpina.»

MAX IMBODEN, 1962

«Indipendentemente da quello che si fa nei laboratori di ricerca, è la politica che deve trovare la soluzione, cominciando a comprendere che un conto è la valutazione del rischio, e un conto la vulnerabilità. In altre parole: che le Torri Gemelle fossero vulnerabili ad attacchi terroristici era ben noto, e poco conta quale fosse il rischio di una particolare forma di attacco.»

GUIDO VISCONTI, 2005

1. CHE COS'E' IL CLIMA

1.1 - Il clima terrestre dipende da una complessa rete di interazioni tra fattori quali l'energia solare, gli oceani, l'atmosfera, la biosfera. Qui sotto, nubi lenticolari al tramonto del 06.01.2000 a Estoul, Val d'Ayas (f. D. Cat Berro).

«Tutti gli aspetti del clima terrestre — il vento, la pioggia, le nubi, le temperature — sono il risultato dei trasferimenti e delle trasformazioni di energia all'interno dell'atmosfera, sulla superficie terrestre e negli oceani.»

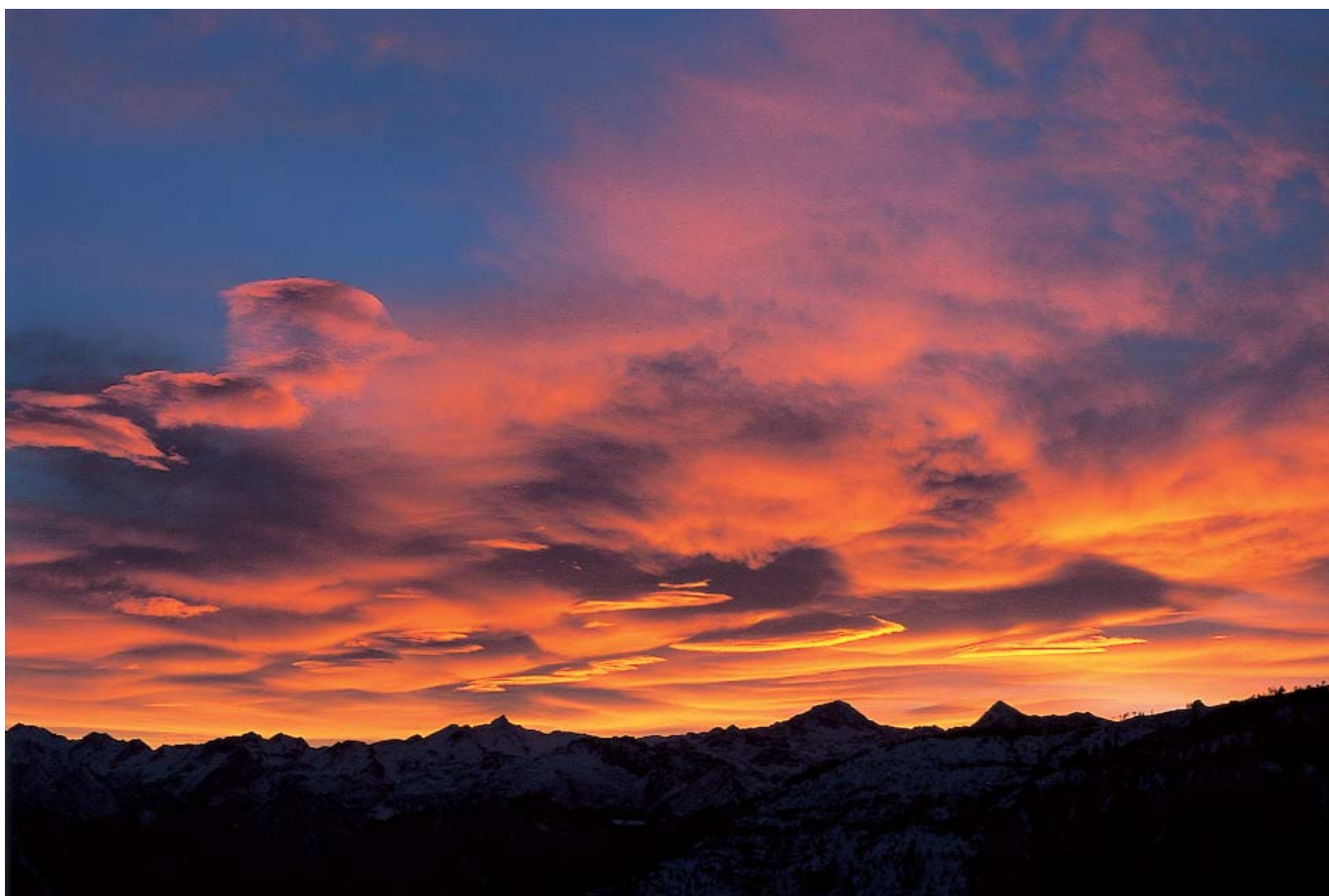
(WILLIAM BORROUGHS, 2003)

Una definizione: dal «tempo» al «clima»

Le situazioni climatiche e le loro variazioni permeano e influenzano la vita quotidiana e le attività economiche, locali e globali.

Che cosa si intende per clima?

Mentre ciò che chiamiamo «tempo» è rappresentato dall'insieme delle condizioni atmosferiche (stato del cielo, temperatura, umidità relativa, visibilità, velocità e direzione del vento, ecc...) osservate in un preciso momento su una località, il «clima» consiste nel comportamento atmosferico mediamente atteso su una regione, sulla base di misure e osservazioni quotidianamente condotte per un lungo periodo di tempo (di solito almeno un trentennio, in



accordo con le normative della Organizzazione Meteorologica Mondiale). In altre parole, «tempo» è ciò che puntualmente si osserva, «clima» è invece ciò che ci si aspetta di osservare in un dato periodo (giorno, mese, stagione, anno) e in dato un luogo.

Un esempio: ad Aosta il clima di luglio è solare, secco e assai ventilato; mediamente si totalizzano 35 mm di pioggia e la temperatura media si attesta a 21 °C. Questi dati provengono dall'osservazione del tempo atmosferico che si è succeduto nel mese di luglio negli ultimi 30 anni. Ma in realtà — tra un anno e l'altro — le condizioni variano più o meno ampiamente, scostandosi spesso dalla «norma climatica», talora in modo eclatante: ci sarà un luglio molto caldo e arido, bagnato appena da poche gocce di pioggia (come quello del 1994, che ad Aosta ebbe temperatura

media di 23 °C e 8 mm di precipitazione), magari seguito da un luglio instabile, fresco e piovoso (come quello del 1996, con 19.5 °C e 65 mm). Ecco dunque introdotti i concetti di **variabilità climatica** e di **estremi climatici**, che verranno trattati meglio nel capitolo 2.

Come funziona: una complessa rete di interazioni tra Sole, Terra e atmosfera

Il clima terrestre è il risultato di un insieme di **complesse interazioni tra l'energia in arrivo dal Sole** («motore» di tutti i processi climatici), **l'atmosfera, gli oceani, le nubi, i suoli, la biosfera e la natura della superficie terrestre** (copertura vegetale, presenza ed estensione dei ghiacci, superfici artificiali create dall'uomo, ecc...). Una descrizione adeguata di questi fenomeni richiederebbe una lunga trattazione, ma in questa sede ci limitiamo a descrivere schematicamente alcuni elementi — astronomici, geologici, geografici, chimico-fisici — che concorrono a rendere il clima terrestre così come oggi lo conosciamo, al fine di comprendere meglio i capitoli che seguiranno.

Aspetti astronomici: la posizione della Terra nel Sistema Solare (mediante a 150 milioni di chilometri di distanza dal Sole) e l'inclinazione dell'asse terrestre condizionano la quantità di radiazione in arrivo dal Sole. Al limite superiore dell'atmosfera l'in-

Etimologia di «clima»

Il termine «*clima*» deriva dal greco antico «*klima*», ovvero «*inclinazione*», appropriato riferimento al ruolo primario che l'altezza del Sole sull'orizzonte - nelle diverse stagioni e latitudini - ha nel determinare l'intensità della radiazione solare, dunque le temperature e di conseguenza tutti gli altri aspetti dei fenomeni atmosferici.

tensità della radiazione solare è mediamente pari a 1367 W/m^2 : questo valore è definito *costante solare* (cfr. pag. 6).

Riflettività del pianeta: la natura della superficie terrestre, nonché la copertura nuvolosa, determinano la quantità di energia solare riflessa o assorbita dal pianeta. La neve fresca appena caduta ha un'elevatissima *albedo* (frazione di radiazione incidente che viene riflessa da un corpo), circa 0.9: questo significa che il 90% della radiazione che la colpisce viene nuovamente riflessa verso lo spazio. Gli oceani invece hanno un'albedo molto bassa (circa 0.03), per questo assorbono molta energia termica proveniente dal sole.

Sono le nubi il principale fattore di controllo dell'albedo terrestre, che globalmente

ammonta in media a 0.3: dunque il 30% della radiazione solare incidente sulla Terra viene immediatamente riflessa verso lo spazio per via delle caratteristiche ottiche delle superfici colpite (nubi, oceani, ghiacciai, foreste, deserti, città). L'albedo del pianeta Venere è molto elevata (0.78), per via della densa copertura nuvolosa che riflette buona parte della radiazione solare, ma l'atmosfera è composta per il 97% di CO_2 e la temperatura è di circa $450 \text{ }^\circ\text{C}$. In sintesi, l'albedo determina la quantità di energia assorbita o riflessa, dunque la temperatura, sia localmente (differenze nel riscaldamento di un prato rispetto a una strada asfaltata), sia a livello planetario.

Presenza dell'atmosfera: se la Terra non fosse circondata da un'atmosfera, la sua temperatura media in superficie sarebbe di $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ (255 K), considerando la sua albedo e la distanza dal Sole. Tuttavia, i gas atmosferici a effetto serra, quali il vapore acqueo e il biossido di carbonio (CO_2), assorbono parte della radiazione infrarossa a onda lunga ri-emessa dalla superficie terrestre, consentendo un guadagno termico di $33 \text{ }^\circ\text{C}$: infatti l'effettiva temperatura media del pianeta è di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (288 K). Oggi però le attività umane stanno modificando la composizione chimica dell'atmosfera, incrementando artificialmente l'effetto serra naturale e inducendo cambia-

1.2 - La posizione della Terra nel Sistema Solare, a 150 milioni di chilometri dal Sole, l'albedo (frazione di radiazione riflessa dal pianeta verso lo spazio, pari al 30%) e la composizione atmosferica concorrono in primo luogo a determinare la temperatura media terrestre, pari a circa $15 \text{ }^\circ\text{C}$.





1.3 - Il versante settentrionale del M. Emilius, incumbente sulla conca di Aosta, in una tersa giornata d'estate (11.06.2002, f. L. Mercalli). Intorno al 21 giugno si raggiunge la massima quantità di energia solare giornaliera ricevuta dall'emisfero Nord, circa 31 MJ/m^2 (8.6 kWh/m^2) nei giorni più limpidi alla latitudine della Valle d'Aosta e a quota 500 m.

menti climatici, in primo luogo un anomalo aumento delle temperature globali.

Gli oceani: la loro elevata capacità termica, ovvero la capacità di assorbire e immagazzinare (e dunque anche di rilasciare lentamente) enormi quantità di calore proveniente dal Sole — di gran lunga superiore a quella dell'atmosfera — ne fa uno dei principali fattori di regolazione del clima planetario: gli oceani infatti giocano un ruolo fondamentale nel ridistribuire il calore intorno alla Terra. La circolazione globale delle acque oceaniche è controllata dalla loro temperatura e salinità (*circolazione termalina*), le quali innescano un lento flusso (*Great Conveyor Belt*) che, nel volgere di un migliaio di anni, porta le acque superficiali del Pacifico set-

Quanta energia ci arriva dal Sole?

Il flusso di radiazione che raggiunge una superficie piana, esposta perpendicolarmente ai raggi solari al di fuori dell'atmosfera terrestre e alla distanza media Terra-Sole, è pari a 1367 W/m^2 , ed è denominato costante solare. Poiché però questa energia si distribuisce sulla superficie pressoché sferica della Terra, che ha estensione quattro volte superiore all'area della sezione circolare del pianeta, e poiché non tutte le zone sono investite con eguale intensità dai raggi, ne consegue che al limite superiore dell'atmosfera questo valore si riduce - in media - a 340 W/m^2 . Di questa quantità, però, soltanto il 51% viene effettivamente assorbito dalla superficie terrestre (circa 170 W/m^2), la rimanente porzione viene assorbita da atmosfera e nubi (19%), o riflessa dalla superficie terrestre, dalle nubi e dall'atmosfera (30%). Ad Aosta ogni anno si totalizza mediamente una radiazione solare globale di circa 4800 MJ/m^2 (MegaJoule per m^2), pari a circa 1333 kWh/m^2 ; il minimo mensile è di circa 80 MJ/m^2 in dicembre ed il massimo è di $680\div 690$ in giugno-luglio.

1.4 - Gli oceani sono tra i principali regolatori del clima terrestre, poiché sono in grado di accumulare e cedere enormi quantità di energia termica in tempi lunghi. A lato, l'Oceano Atlantico sulla costa meridionale dell'Islanda, dove giunge l'acqua mite della Corrente del Golfo.

tentrionale attraverso l'Oceano Indiano e l'Oceano Atlantico fin nei pressi dell'Islanda, dove si inabissano (a causa dell'aumento di densità, dovuto al loro raffreddamento e all'aumentata salinità) e invertono la rotta per ritornare, in profondità, nel Pacifico Settentrionale, dove riemergono in superficie.

Le correnti oceaniche possono influenzare fortemente il clima delle regioni costiere che lambiscono: la tiepida Corrente del Golfo, che attraversa il Nord Atlantico dal Golfo del Messico alle coste europee, rende il clima del Regno Unito e della Norvegia relativamente temperato rispet-

to a quello delle regioni poste alla medesima latitudine sull'opposta sponda dell'oceano (Canada, Groenlandia).

Ciclo dell'acqua: la radiazione solare attiva il ciclo dell'acqua, che è alla base della formazione di nubi e precipitazioni. La quantità d'acqua evaporata da oceani e terre emerse eguaglia quella delle precipitazioni, che globalmente durante l'anno ammontano a 496.000 km³ (13.000 volte il volume del Lago Maggiore). Durante i passaggi di stato (evaporazione, condensazione, fusione, solidificazione, sublimazione) che avvengono nell'ambito del ciclo



dell'acqua, si verificano importanti scambi di *calore latente*, assorbito durante l'evaporazione e la fusione o rilasciato durante la condensazione e la solidificazione in atmosfera: ciclo dell'acqua e scambi di energia termica in atmosfera sono dunque strettamente correlati.

Ciclo del carbonio: tra i cicli *biogeochimici*, quello del carbonio è particolarmente importante per il clima terrestre, in quanto partecipa alla regolazione della quantità di carbonio atmosferico che — sotto forma di CO₂ (biossido di carbonio o anidride carbonica) — concorre all'effetto serra, a sua volta strettamente legato alla temperatura dell'aria. Esiste un attivo stoccaggio di carbonio atmosferico da parte degli ecosistemi marini e terrestri (*pozzi di carbonio o carbon sinks*): si stima che negli Anni 1990 gli oceani abbiano assorbito mediamente 1.9 GtC (gigatonnellate di carbonio atmosferico, vale a dire 10¹² kg) per anno.

Foreste: sono una notevole sorgente di vapore acqueo, che viene immesso in atmosfera attraverso l'evapotraspirazione dalle piante. La fotosintesi clorofilliana consente la temporanea cattura del carbonio emesso in atmosfera dalle attività umane, ma in modo efficace soltanto nel caso di piante giovani, in fase di attivo

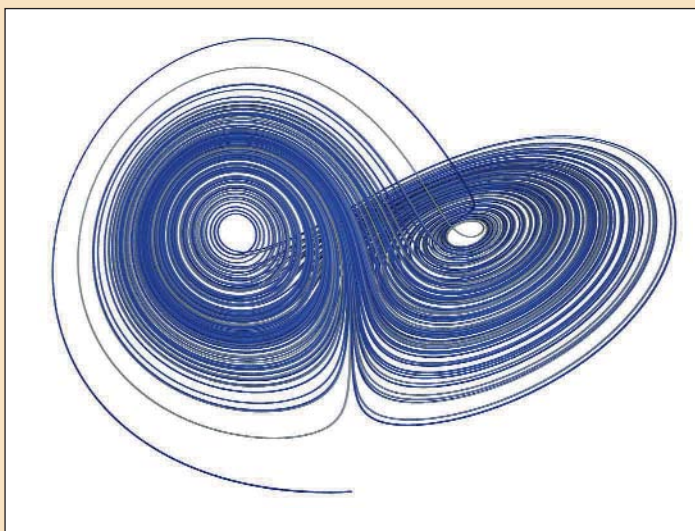
immagazzinamento del carbonio nei tessuti vegetali in crescita. Il taglio di estese porzioni di foresta può portare, specialmente nella fascia equatoriale, a sostanziali alterazioni nei regimi delle piogge, nonché a gravi perdite di suoli per erosione e dilavamento.

Vi è dunque una complessa rete di interazioni di natura fisica, chimica e biologica all'interno del sistema climatico, in cui i fattori elencati sopra sono solo alcuni tra i più importanti, e le cui dinamiche peraltro non sono ancora del tutto note in dettaglio, ragion per cui la comprensione della «macchina atmosferica» — e soprattutto la previsione del suo stato futuro — è questione assai difficile. Si tratta infatti di un sistema complesso, non lineare, nel quale la variazione di uno solo dei componenti può riflettersi sullo stato di tutto il sistema, in modo spesso difficilmente prevedibile. Proprio verso la migliore comprensione di queste interazioni oggi si concentrano grandi sforzi di ricerca scientifica.

Il fatto che vi siano ancora molte relazioni da chiarire e meccanismi di azione da comprendere, non riduce tuttavia il valore della gran quantità di argomenti ormai noti e la necessità di agire per proteggere il clima.

Caos e complessità del clima

Il clima terrestre è frutto di un continuo flusso di energia (proveniente dal sole) e materia (vapore acqueo, CO₂ e altri gas) tra atmosfera, oceani, vita animale e vegetale, suolo e vulcani. Nel corso delle ere geologiche il clima terrestre ha raggiunto diversi stati di equilibrio, come quello attuale, oppure quello delle ere glaciali, rispondendo a fattori «forzanti» naturali *esterni*, vale a dire variazioni nell'attività solare o differente geometria dell'orbita terrestre, e *interni*, come il contenuto atmosferico di gas serra o di ceneri vulcaniche.



La variegata combinazione di questi fattori fa del clima terrestre un sistema in perenne mutamento. Esso è dunque un sistema instabile ma non ciclico, nel senso che al suo interno mai si ripropongono condizioni identiche. In questo sta il significato del termine «complesso», che non vuol dire solo «complicato», ma significa che tutte le interazioni tra le molteplici variabili sono legate dalla dinamica *non lineare*, ovvero non sono riducibili a equazioni dove il rapporto *causa-effetto* è identificabile e prevedibile con accuratezza. E c'è dell'altro, nella dinamica

non lineare talora piccole cause possono dare grandi effetti, il noto *effetto farfalla* scoperto dal meteorologo Edward Lorenz.

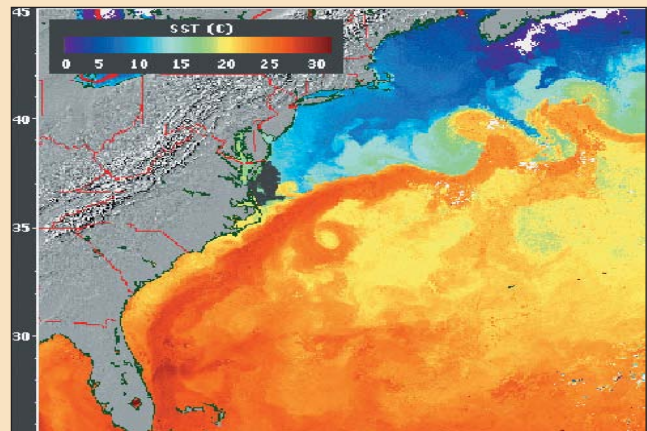
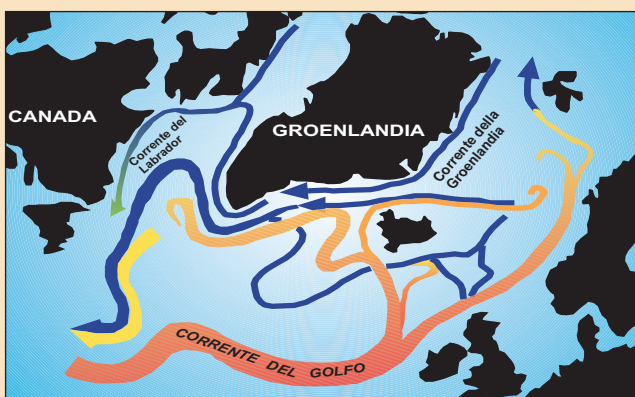
Seguendo LUIGI SERTORIO (2002): «*Complesso include il clima, l'ecosistema, la collettività umana. Qui compaiono il concetto di biforcazione e il concetto di frattale. (...) le equazioni non lineari possono anche ospitare delle biforcazioni, come ad esempio degli scambi di stabilità, il che vuol dire che, modificando uno o più parametri regolatori, tutta l'architettura complessa delle soluzioni delle equazioni governanti può cambiare.*

E qui si tratta della comprensione dell'andamento globale di tutta la Terra, e di tutta la vita che essa ospita». Per questi motivi, alterare artificialmente i delicati equilibri che il clima ha costruito nel corso di millenni presenta rischi rilevanti legati non solo a una graduale variazione di una grandezza fisica (come la temperatura, o le precipitazioni...), ma anche alla possibilità di cambiamenti bruschi e di grande portata, che renderebbero estremamente difficile l'adattamento della società umana e degli ecosistemi.

E qui si tratta della comprensione dell'andamento globale di tutta la Terra, e di tutta la vita che essa ospita». Per questi motivi, alterare artificialmente i delicati equilibri che il clima ha costruito nel corso di millenni presenta rischi rilevanti legati non solo a una graduale variazione di una grandezza fisica (come la temperatura, o le precipitazioni...), ma anche alla possibilità di cambiamenti bruschi e di grande portata, che renderebbero estremamente difficile l'adattamento della società umana e degli ecosistemi.

La Corrente del Golfo: probabile indebolimento?

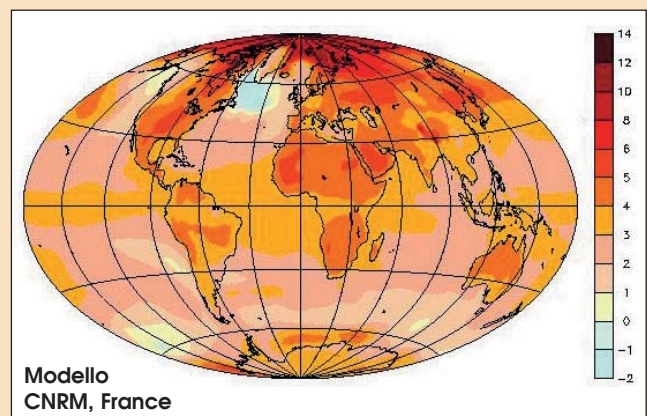
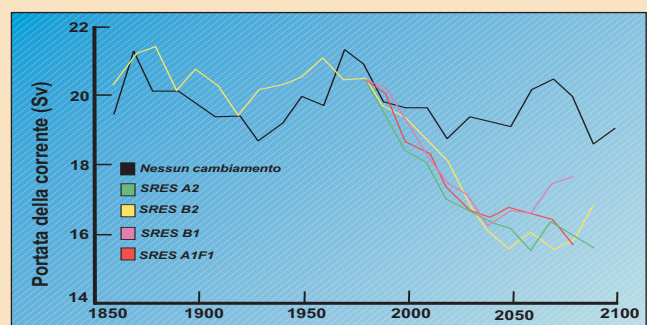
La salinità delle acque del Nord Atlantico gioca un ruolo chiave nel mantenimento della *circolazione termoalina* (pag. 6), di cui la Corrente del Golfo è parte. Questa trasporta acqua calda superficiale dal Golfo del Messico verso l'Europa atlantica, mitigandone gli inverni. L'aumento delle precipitazioni in zona artica e la maggiore fusione della calotta glaciale della Groenlandia, incrementano l'afflusso di acqua dolce, riducono la salinità e la densità delle acque oceaniche che quindi si inabissano più difficilmente, rallentando il ritorno delle acque profonde verso il Golfo del Messico. Come già accaduto verso la fine dell'ultima glaciazione, circa 12 mila anni fa, la Corrente del Golfo potrebbe rallentare o interrompersi in un prossimo futuro, e molti temono che questo possa portare una nuova glaciazione sull'Europa. In realtà, il modello climatico HadCM3 dell'Hadley Center, pur prevedendo entro il 2100 una riduzione fino a un quarto della portata della corrente, ne esclude un collasso totale. Per l'Europa questo non significherebbe certo un'era glaciale, ma solo un riscaldamento inferiore ad altre zone del mondo.



1.5 (sotto a sinistra) - Schema della Corrente del Golfo. Le acque calde provenienti dal Golfo del Messico ($>20^{\circ}\text{C}$) giungono a lambire le coste europee, mentre le fredde correnti della Groenlandia e del Labrador ($5\text{-}10^{\circ}\text{C}$) discendono lungo le coste dell'Atlantico nord-occidentale. La netta distinzione tra le temperature superficiali del Nord Atlantico è visibile in fig. 1.6 (qui sopra, da <http://science.hq.nasa.gov>).

1.7 (qui sotto) - Modellizzazione della portata passata e futura della Corrente del Golfo, con previsione fino al 2100 (HadCM3, Hadley Center, UK), secondo differenti scenari di emissione di gas serra: la circolazione (nel grafico espressa in Sv - 1 Sverdrup = 1 milione m^3/s) potrebbe ridursi di circa un quarto rispetto a oggi (fonte: MetOffice).

1.8 (in basso) - Variazioni delle temperature medie previste entro il 2100 (modello CNRM, scenario A2). Modificazioni nelle correnti oceaniche potrebbero indurre un locale raffreddamento sull'Atlantico Nord-occidentale, ma non sull'Europa (<http://www.insu.cnrs.fr>).



2. VARIABILITÀ CLIMATICA ED EFFETTO SERRA

«Oggi, la quantità di gas serra ha superato i livelli dell'intero Quaternario e nessuno sa quali potranno essere le conseguenze. Sono convinto che il cambiamento in questi parametri essenziali del clima segni l'inizio di una nuova epoca geologica, e ho proposto di chiamarla Antropocene (dal greco *anthropos*, uomo).»

(PAUL J. CRUTZEN, 2005).

Variabilità climatica: naturale e indotta

Le condizioni climatiche in una località variano naturalmente tra un anno e l'altro, di solito entro un certo margine intorno ai valori «normali», ma talora vi si scostano anche in modo più netto, in occasione di fenomeni estremi/rari: si tratta della *variabilità naturale* del clima.

A questa, per via dell'alterazione della composizione chimica dell'atmosfera da parte dell'uomo, si può sovrapporre una *variabilità indotta*. In questa fase di cambiamento climatico, nel caso di eventi climatici importanti quali inondazioni, siccità oppure ondate di calore, è molto difficile riconoscere se essi rientrano ancora nella naturale variabilità del clima, oppure se siano già effetto — almeno in parte — del riscaldamento globale.

L'estate del 2003 è stata la più calda da

almeno 500 anni sulle Alpi, e ad Aosta la temperatura media del trimestre giugno-agosto ha superato la norma di 4.7 °C. Un'anomalia di questa portata, mai osservata in precedenza, secondo i climatologi non è più spiegabile ricorrendo alla sola variabilità climatica naturale, bensì sarebbe verosimilmente da attribuirsi agli effetti del *global warming*.

Perché il clima cambia? Forzanti naturali e antropiche

Nella storia geologica della Terra il clima è cambiato più volte, talora in maniera eclatante, per cause naturali: variazioni

2.1 - Grandi quantità di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale) vengono impiegate per le attività industriali, i trasporti, il riscaldamento degli edifici, e generano l'emissione di gas che incrementano artificialmente l'effetto serra naturale del nostro pianeta. Prima conseguenza è l'aumento delle temperature terrestri, già ben avvertito dagli strumenti (+1.1 °C negli ultimi 100 anni sulle Alpi) e confermato dal forte regresso dei ghiacciai.



2.2 - Schema-tizzazione del bilancio energetico tra Sole, Terra e atmosfera. Dei 342 W/m^2 in ingresso ai margini superiori dell'atmosfera, soltanto 168 W/m^2 in media vengono effettivamente assorbiti dal suolo, la rimanente parte viene assorbita dall'atmosfera oppure riflessa dalle nubi e dalla superficie terrestre (in varia misura a seconda dell'albedo). Dei 390 W/m^2 emessi dalla superficie, 235 vengono persi verso lo spazio, i restanti 155 W/m^2 vengono intercettati dai gas serra (effetto serra naturale) e restituiti insieme alla radiazione precedentemente assorbita dall'atmosfera (67 W/m^2), al calore di condensazione del vapore d'acqua (78 W/m^2) e a quello trasferito dalla convezione (24 W/m^2); tutti questi contributi vanno a costituire i 324 W/m^2 della radiazione di ritorno dall'atmosfera che vengono assorbiti dalla Terra.

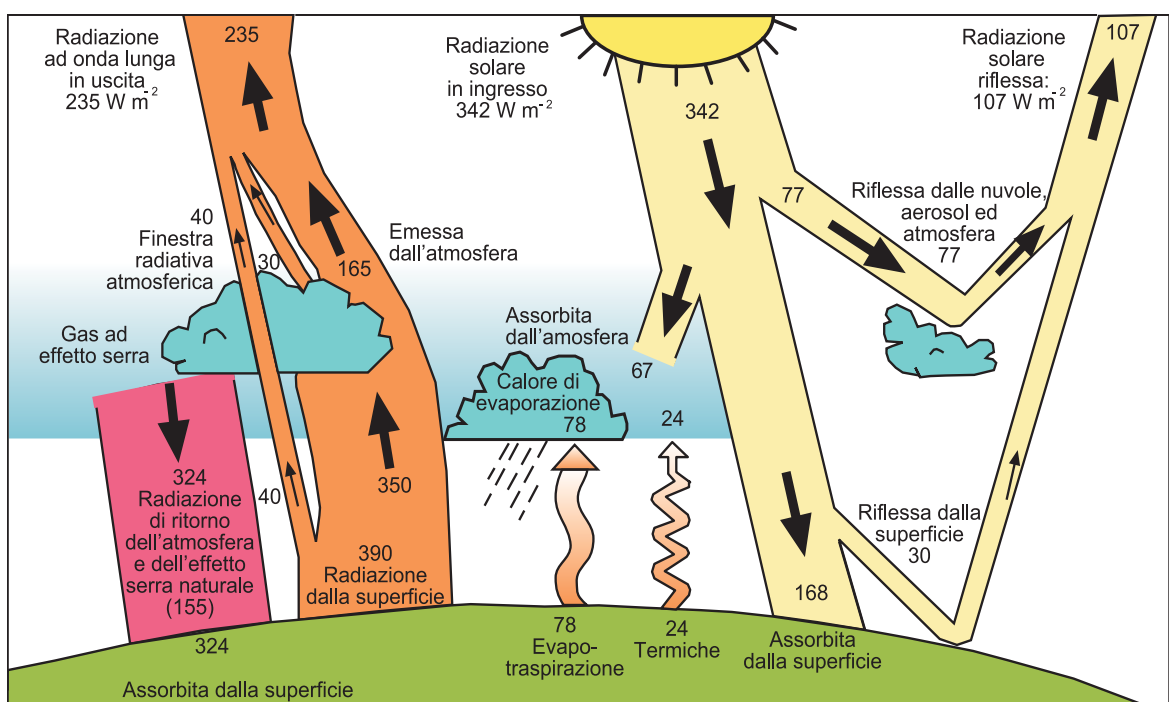
periodiche dell'attività solare, della distanza Terra-Sole, dell'inclinazione e dell'orientamento dell'asse terrestre, dell'eccentricità dell'orbita planetaria, tutti fattori che portano a cambiamenti nella quantità di energia ricevuta dal Sole, dunque in grado di dare inizio a una fase glaciale oppure di segnarne la fine.

Il geofisico serbo Milutin Milankovitch (1879-1958) studiò gli effetti combinati di questi fattori astronomici, e individuò una ciclicità di circa 100 mila anni nelle glaciazioni dell'Era Quaternaria (ultimo milione di anni); tuttavia le sue teorie non spiegano completamente tutte le variazioni climatiche osservate sulla Terra in questo lasso di tempo, ed alcuni aspetti rimangono da chiarire.

Anche le imponenti eruzioni vulcaniche

Perché effetto «serra»?

Si parla di effetto «serra» perché si accomuna l'effetto riscaldante di alcuni gas atmosferici con quello che si osserva sotto i vetri di una serra da giardino. In realtà, sotto il profilo fisico questo paragone non è corretto. Infatti, mentre in atmosfera il riscaldamento è dovuto all'assorbimento radiativo da parte di questi gas (vapore acqueo, biossido di carbonio, metano, ecc...) in particolari intervalli di lunghezze d'onda della radiazione emessa dal pianeta, sotto una serra l'aumento di temperatura si deve ricondurre all'assenza di scambi di aria con l'esterno, e soltanto marginalmente ad effetti di filtro radiativo.



2.3 - Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ all'Osservatorio del Monte Mauna Loa (Hawaii) nel periodo 1958-2004 (fonte: www.cdiac.ornl.gov). La tendenza è in aumento, e attualmente (2006) si è raggiunto il valore di 381 ppmv. Le regolari oscillazioni stagionali sono dovute al temporaneo sequestro estivo di CO₂ da parte della fotosintesi nelle foreste boreali di caducifoglie.

costituiscono una considerevole *forzante climatica naturale* interna al sistema terrestre, poiché il rilascio in atmosfera di milioni di tonnellate di aerosol e polveri è in grado di produrre un raffreddamento, solitamente per alcuni anni. Alle eruzioni dei vulcani El Chichon (Messico, 1982) e Pinatubo (Indonesia, 1991) sono in parte attribuite le temporanee flessioni delle temperature globali osservate nel 1984 e nel 1992-93.

Oggi a questi fattori naturali si sovrappongono però quelli *antropici*, essenzialmente l'emissione di gas che incrementano l'effetto serra, e di aerosol di origine industriale. L'uomo sta alterando la composizione dell'atmosfera e gli equilibri del clima, sistema già di per sé molto complesso e di difficile comprensione. Un pericoloso esperimento «a cielo aperto» condotto a scala globale, senza precedenti

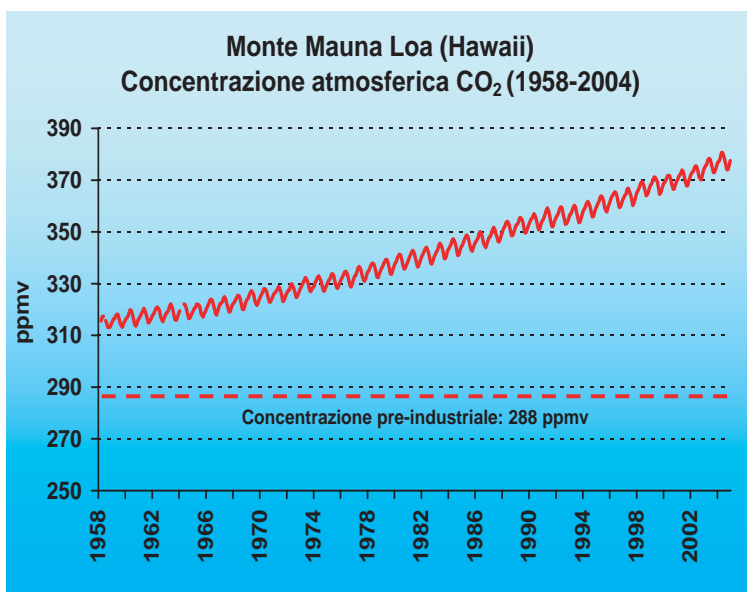
nella storia del nostro pianeta...

L'effetto serra naturale e il suo incremento da parte dell'uomo

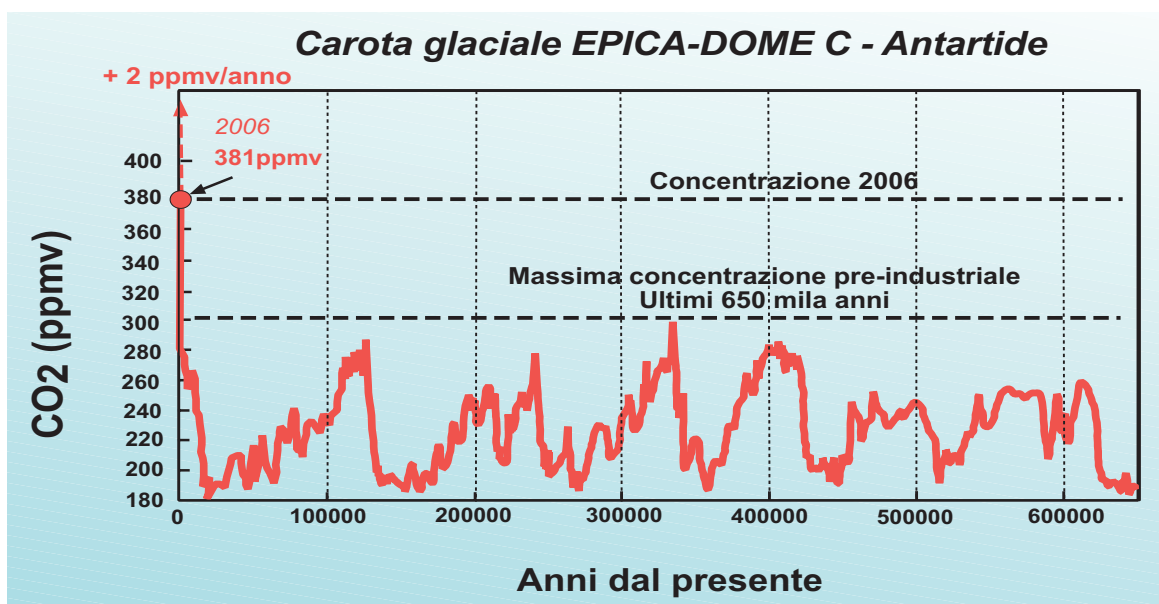
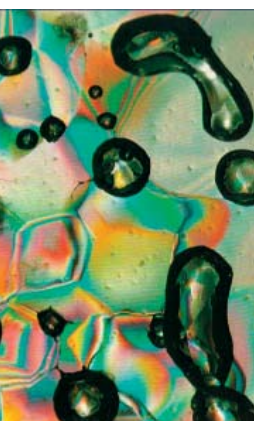
L'effetto serra è anzitutto un fenomeno *naturale* che comporta il trattenimento — all'interno dell'atmosfera terrestre — di una parte della radiazione termica solare che viene ri-emessa dal pianeta sotto forma di *raggi infrarossi a onda lunga* (6÷14 μm). Questa radiazione, in assenza di atmosfera e dunque di effetto serra naturale, verrebbe completamente dispersa nello spazio, e la Terra avrebbe una temperatura media di -18 °C, anziché i 15 °C attuali. Responsabili di questo fenomeno sono «gas a effetto serra» quali — in ordine di importanza tra quelli presenti in natura — il vapore acqueo, il biossido di carbonio (CO₂), il metano (CH₄), l'ozono (O₃), il protossido di azoto (N₂O): agiscono come una sorta di «coperta termica» che impedisce al calore terrestre di sfuggire completamente verso lo spazio.

Ora però l'effetto serra sta diventando un grave problema per gli ecosistemi terrestri e l'umanità, poiché le attività umane ne stanno aumentando artificialmente l'intensità. Conseguenza più evidente è l'incremento della temperatura globale del pianeta.

Con l'avvento dell'era industriale, nella



2.4 - L'estrazione della carota glaciale EPICA-DOME C dalla calotta antarctica (profondità 3270 m) ha consentito di ricostruire la composizione atmosferica e la temperatura negli ultimi 650.000 anni. Il grafico mostra l'andamento della concentrazione del biossido di carbonio (CO₂), ottenuta dall'analisi delle bollicine di aria intrappolate nel ghiaccio (figura in basso). Nel periodo considerato si sono succeduti sette periodi glaciali - identificabili con un calo delle temperature e dei livelli di gas serra - e soprattutto non si è mai superata la soglia delle 300 ppmv di CO₂, mentre oggi si sono toccate le 381 ppmv (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005).



seconda metà del 1700, l'uomo ha iniziato a utilizzare quantità crescenti di risorse energetiche fossili, prima *carbone*, e poi — dalla fine del 1800 — *petrolio* e *gas naturale*, la cui combustione comporta ingenti emissioni di gas serra, in particolare di CO₂, nonché di altri composti chimici e particolati (polveri fini) pure dannosi per l'ambiente e la salute.

I processi industriali liberano perfino nuove molecole ad effetto serra, non esistenti in natura: ad esempio i CFC (clorofluorocarburi), gas utilizzati come propellenti nelle bombolette spray o come refrigeranti; responsabili anche della distruzione dell'ozono stratosferico, ora sono banditi grazie al Protocollo di Montréal del 1987.

Ecco alcune caratteristiche dei principali gas a effetto serra (MERCALLI, 2000):

— **Vapore acqueo:** è il maggiore

responsabile dell'effetto serra naturale (60%), per la sua abbondanza in atmosfera e la sua efficacia. La sua concentrazione, assai variabile nello spazio ma relativamente stabile nel tempo, non è aumentata direttamente dalle attività umane, ma dipende dalla temperatura dell'aria.

— **Biossido di carbonio (anidride carbonica):** l'emissione antropica deriva dal consumo di combustibili fossili; è il gas serra in assoluto predominante tra le emissioni di origine umana, e fornisce il contributo maggiore (64%) al riscaldamento globale. Negli ultimi 650.000 anni la sua concentrazione atmosferica è variata da minimi intorno a 180 ppmv (parti per milione in volume) durante le fasi glaciali a massimi di poco inferiori a 300 ppmv durante gli interglaciali (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005); ma nel corso del-

2.5 - Riepilogo di alcune caratteristiche dei principali gas a effetto serra. In verde sono indicati i composti già presenti in natura, e la cui concentrazione è incrementata artificialmente dall'uomo; in giallo quelli prodotti dall'industria chimica. Alcuni gas, la cui molecola è molto più attiva del CO₂ nel determinare l'effetto serra, fortunatamente sono presenti in concentrazioni assai limitate, ad esempio l'esfluoruro di zolfo. Il biossido di carbonio, per la sua relativa abbondanza, resta il gas responsabile del maggiore contributo all'effetto serra antropico (64% del totale).

l'era industriale la concentrazione è artificialmente salita di pari passo con i consumi e il livello di benessere dei paesi occidentali, fino a raggiungere le attuali 381 ppmv (marzo 2006). Modeste variazioni stagionali o interannuali sono dovute all'interazione con la biosfera (fotosintesi) e gli oceani, che fungono da serbatoi di assorbimento (*sinks*). In assenza di politiche di controllo delle emissioni, il raddoppio della concentrazione (rispetto ai livelli preindustriali) avverrà entro il 2050. Anche la massiccia deforestazione e gli incendi comportano l'ingente rilascio, sotto forma di CO₂, del carbonio stoccato nei tessuti vegetali. Parallelamente, i cambiamenti d'uso dei suoli e la loro artificializzazione causano un calo della capacità di assorbimento della CO₂ atmosferica per fotosintesi.

— **Metano:** è rilasciato da fermentazioni anaerobiche (decomposizione) della sostanza organica, che avvengono in modo massiccio nei campi di riso allagati e nell'intestino degli animali d'allevamento.

L'incremento delle temperature terrestri causa pure ingenti emissioni di metano per la scomparsa del *permafrost* dai suoli delle regioni circumartiche (Siberia); si tratta di un meccanismo di *retroazione positiva* (*feedback*), in grado di «autoalimentare» il processo di riscaldamento atmosferico. La singola molecola è 21 volte più efficiente della CO₂ nel causare l'effetto serra, ma nel complesso contribuisce soltanto al 17% del riscaldamento antropico, per via della minor concentrazione. Negli ultimi 650.000 anni questa ha oscillato tra circa 350 ppbv (parti per miliardo in volume) durante le glaciazioni e 700-780 ppbv negli interglaciali (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005). Oggi ha toccato le 1776 ppbv, ma complessivamente la concentrazione pare stabilizzarsi.

— **Protossido di azoto:** l'emissione antropica deriva principalmente dalla produzione di fertilizzanti azotati e di acidi industriali. Assai attivo (una molecola agisce come 230 molecole di CO₂) ma presente in modeste tracce (280 ppbv nell'e-

Caratteristiche dei principali gas a effetto serra

Gas	Formula	Concentr. pre-industriale	Concentr. attuale (2004)	Trend annuo %	Tempo di permanenza in atmosfera (anni)	Contributo % riscald. tot.	Effetto potenziale rispetto a CO ₂ in 100 anni
Biossido di carbonio	CO ₂	288 ppm	377 ppm	0.5	120	63.8	1
Metano	CH ₄	848 ppb	1776 ppb	0.2	12	19.2	21
Protossido di azoto	N ₂ O	285 ppb	319 ppb	0.3	120	5.7	310
CFC-11	CCl ₃ F	-	254 ppt	-0.5	50-102	10.5	3800-8100
HCFC-22	CHClF ₂	-	164 ppt	3.4	12	0.4	1500
Esfluoruro di zolfo	SF ₆	-	5.4 ppt	4.0	3200	0.3	23900
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	-	3.0 ppt	3.3	10000	*	9200

Combustibili ed emissioni di CO₂

Trasporti, riscaldamento degli edifici e produzione di energia elettrica rientrano tra i settori più coinvolti nell'emissione di gas serra, poiché alimentati in gran parte da fonti energetiche fossili. Ecco le emissioni specifiche di CO₂ per alcuni combustibili tradizionali:

1 kg di carbone = 3.66 kg CO₂

1 kg di benzina = 3.13 kg CO₂ (2.35 kg CO₂/l)

1 kg di gasolio = 3.14 kg CO₂ (2.66 kg CO₂/l)

1 kg di metano = 2.60 kg CO₂ (1.86 kg CO₂/m³) *

* Normal metro cubo, a pressione = 1013 hPa e temperatura = 0 °C.

ra preindustriale, 319 ppbv oggi), contribuisce per il 6% al riscaldamento globale.

— **Esafluoruro di zolfo:** di origine artificiale, è estremamente raro (0.003÷0.004 ppbv) ma attivissimo come gas serra (24 mila volte più potente della CO₂).

— **CFC:** categoria di composti prodotti artificialmente dal 1950 e impiegati come refrigeranti, propellenti nelle bombole spray, ed estinguenti negli impianti antincendio. Sono 16 mila volte più potenti del CO₂ nel causare l'effetto serra. Responsabili anche della distruzione dell'ozono stratosferico, le loro emissioni sono state nettamente ridotte con l'applicazione del Protocollo di Montreal (1987). Tuttavia, alcuni gas che li hanno sostituiti (idrofluorocarburi, perfluorocarburi) sono pure gas a effetto serra.

L'efficacia di un gas nel determinare l'effetto serra dipende dal tipo di molecola, dal tempo di permanenza in atmosfera e dalla porzione di spettro radiativo assorbita (alcune bande possono risultare già saturate). Per esprimere univocamente le emissioni totali di gas serra, i contributi di ciascun gas (con efficacia diversa tra uno e l'altro nel determinare il riscaldamento globale) vengono tradotti in tonnellate di CO₂ equivalente. Attualmente ogni anno vengono emesse nel mondo 28 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalente, con distribuzione geografica delle emissioni assai variabile in base alla situazione socio-economica di ciascuna nazione (HENGEVELD & *al.*, 2002). Le maggiori intensità di emissione pro-capite appartengono ai paesi con elevati livelli di consumi e forte industrializzazione: nel 2003 sono



2.6 - St-Oyen, 17.05.1995 (f. L. Mercalli). La vegetazione in fase di crescita è in grado di catturare una porzione netta della CO₂ emessa dall'uomo (6,24 t di carbonio/anno per ogni ha di nuova foresta), ma ciò è ampiamente insufficiente a tamponare le imponenti emissioni antropiche (attualmente circa 7.6 miliardi di t/anno di carbonio).

2.7 - Emissioni pro-capite di gas a effetto serra in alcuni Paesi del mondo, espresse in t di CO₂ equivalente. Sono considerati i seguenti composti: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆. I valori sono tutti riferiti al 2003, eccetto quello del Bangladesh, riferito al 1997 (comunque relativamente stabile nel tempo). In Australia e USA, dove la popolazione è concentrata in alcune grandi città energivore, le emissioni pro capite ammontano a oltre 20 t CO₂/anno.

Il valore della Cina, in recente forte aumento, è ancora relativamente basso in virtù dell'elevata popolazione su cui si distribuisce l'enorme carico di emissioni. Fonte: <http://unfccc.int/resource/docs/2005/sbi/17f.pdf>.

Il ruolo degli aerosol in atmosfera

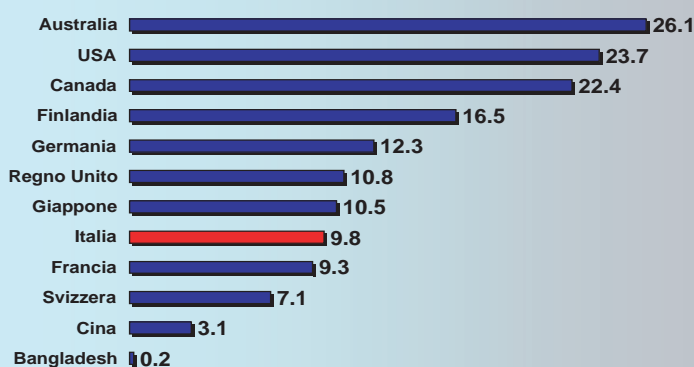
Oltre ai gas a effetto serra, vi sono anche altri agenti di origine antropica che possono alterare il clima: ad esempio gli *aerosol*, fini particolati in sospensione nell'atmosfera. Alcuni di questi, come gli *aerosol solfati* (che derivano dal biossido di zolfo, SO₂), riflettono parte della radiazione solare e determinano un raffreddamento al suolo, che può attenuare in parte i reali effetti del riscaldamento globale. Altri invece generano un aumento di temperatura, come ad esempio la *caligine*. Il loro ruolo costituisce dunque uno dei punti di incertezza sull'entità del riscaldamento futuro. Tuttavia, accoppiando gli incrementi previsti di gas serra e aerosol solfati, il modello HadCM2 ha restituito una stima dell'aumento termico previsto entro il 2100 inferiore tra un terzo e un quarto. Si tratta comunque di stime grossolane, poiché i possibili scenari di emissione di SO₂ individuati da IPCC per il XXI secolo sono molto variabili tra loro. Poiché gli aerosol dimorano in atmosfera da qualche giorno a qualche settimana, la loro distribuzione è irregolare, e sono più concentrati vicino alle zone di emissione (HENGEVELD & *al.*, 2002).

state emesse 26.1 t/pro-capite in Australia, 23.7 negli Stati Uniti, 22.4 in Canada; tra i paesi europei, 16.5 in Finlandia, 12.3 in Germania, 10.8 nel Regno Unito, 9.8 in Italia, 9.3 in Francia, 7.1 in Svizzera (fonte: UNFCCC). Questi dati non tengono conto del cambiamento

d'uso dei suoli e dell'abbattimento delle foreste, processi che — si stima — riversano ulteriormente ogni anno nell'atmosfera da 800 milioni a 2.4 miliardi di tonnellate di carbonio.

Complessivamente, la variazione netta di forzatura radiativa sul sistema climatico intervenuta dal 1880 al 2003 è di **+1.8 W/m²**, considerando l'effetto combinato dei gas serra, dell'attività solare, degli aerosol, dei cambiamenti d'uso del suolo, dell'albedo terrestre (HANSEN & *al.*, 2005). L'incertezza di ± 0.85 W/m² intorno a questo valore è in buona parte attribuibile al ruolo degli aerosol, ancora poco noto. I gas a effetto serra contribuiscono con una forzatura di +2.75 W/m², mentre gli

Emissioni pro capite di gas serra nel 2003
(tonnellate di CO₂ equivalente)



Tutti d'accordo sul cambiamento climatico?

Il pensiero di scettici e «negazionisti»

La grande maggioranza della comunità scientifica internazionale è concorde sulla pesante responsabilità dell'uomo nel cambiamento climatico: i tassi di incremento rilevato dei gas serra in atmosfera corrispondono bene alle emissioni antropiche, e sono i più elevati da almeno 650.000 anni, e il meccanismo di azione dei gas serra è ben noto da oltre un secolo. Tuttavia, nonostante le numerose evidenze, una minoranza di scienziati contesta che le attività umane abbiano svolto un ruolo significativo nell'alterare il clima terrestre, sostenendo talora che i modelli climatici sovrastimino la portata dei possibili cambiamenti futuri. Essi mantengono dunque una posizione di *scetticismo*, talora di aperto *negazionismo*. Le incertezze che effettivamente esistono su come e quanto il clima potrebbe cambiare nel prossimo futuro, portano inoltre a un acceso dibattito politico e pubblico sulle azioni che dovrebbero essere intraprese. Gruppi di ricercatori scettici o negazionisti sono emersi soprattutto negli Stati Uniti, in Australia, ma anche nel Regno Unito e in Germania. E' da rilevare come le argomentazioni avanzate da costoro siano talora carenti sotto il profilo scientifico, o comunque derivanti dall'analisi incompleta di un problema molto complesso quale è quello del cambiamento climatico. Tra le fila dei negazionisti non mancano tuttavia figure di scienziati autorevoli, come Richard Lindzen (docente al *Massachusetts Institute of Technology*, Boston), secondo cui l'effetto «contrario»

delle nubi di vapor d'acqua potrebbe nettamente ridurre gli effetti termici derivanti dall'incremento dei gas serra (HENGEVELD & *al.*, 2002), e l'attuale surriscaldamento sarebbe in minima parte attribuibile alle attività umane; queste posizioni sono state peraltro sostenute durante il convegno «I cambiamenti climatici», tenutosi a Roma il 20 giugno 2005 sotto l'egida del Ministero dell'Ambiente, evento che tuttavia ha provocato un'accesa reazione dei ricercatori italiani, citata anche dalla prestigiosa rivista *Nature*. Recentemente, tesi negazioniste sono pure comparse nel romanzo *Stato di paura* di Michael Chrichton, un'opera tuttavia di dubbia qualità che riporta confusamente dati scientifici avulsi dal loro adeguato contesto, in un intreccio spesso infarcito da contraddizioni ed errori non trascurabili... ampiamente confutati sul sito www.recalclimate.org. Al di là dei dubbi, che pur sempre fanno parte di un percorso di indagine scientifica, la comunità scientifica internazionale ritiene che la gran mole di prove a sostegno del ruolo umano nel cambiamento climatico, suggerisce piuttosto di agire in modo rapido e coordinato, a livello sia locale sia internazionale, per contenerne quanto meno le conseguenze entro livelli accettabili. Nel 1988 la WMO (World Meteorological Organization) e l'UNEP (United Nations Environment Program) hanno fondato l'**IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)**, coordinamento che ha lo scopo di valutare le basi scientifiche del cambiamento climatico, gli scenari futuri, l'impatto sulla società, l'economia, l'ambiente (www.ipcc.ch).

aerosol producono un'azione contraria raffreddante pari a -1.4 W/m^2 , che dunque solo in parte contrasta il riscaldamento dovuto ai gas climalteranti. Nei circa 125 anni considerati il contributo derivante dall'attività solare ammonta soltanto a $+0.22 \text{ W/m}^2$, ed è di gran lunga meno importante rispetto a quello dato dalle forzanti di origine antropica, a conferma della responsabilità umana nell'attuale cambiamento climatico (sebbene secondo SCAFETTA & WEST, 2006, il contributo dell'attività solare al riscaldamento del periodo 1900-2000 salirebbe al 45÷50%). Si tenga inoltre presente che la sensibilità globale della temperatura è di $0.75 \text{ }^\circ\text{C}$ per ogni W/m^2 ; il valore è stato calcolato in base alle forzanti climatiche in gioco durante le ere glaciali, pari a -6.6 W/m^2 , associate a una temperatura inferiore di circa $5\div6 \text{ }^\circ\text{C}$ rispetto a oggi (HANSEN & *al.*, 2005). Attualmente il cambiamento climatico è già percepibile con un vistoso incremento delle temperature globali, che **negli ultimi 100 anni sono aumentate di $0.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, e i modelli climatici prevedono un ulteriore aumento compreso tra 1.4 e $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ entro il 2100**, in assenza di politiche di riduzione delle emissioni (fonte: UNFCCC). Il riscaldamento ha subito una brusca accelerazione negli ultimi due decenni, benché la presenza degli aerosol solfati e del particolato che rende più

opaca l'atmosfera possa avere in parte mascherato la reale entità dell'aumento termico (vedi approfondimento a pag. 17). La comunità scientifica è concorde nell'attribuire una considerevole parte di responsabilità all'azione umana. Infatti l'entità e soprattutto la rapidità dei cambiamenti climatici già osservati (gli Anni 1990 sono stati i più caldi dell'ultimo millennio) non è più spiegabile solamente all'interno della naturale variabilità del clima; ci sono infatti molte evidenze per affermare che gran parte dell'aumento termico misurato negli ultimi 50 anni sia attribuibile all'attività dell'uomo.

Il livello dei mari è già aumentato da 10 a 20 cm negli ultimi 100 anni, sia per la dilatazione termica degli oceani, sia per la maggiore fusione delle calotte glaciali, e un ulteriore incremento tra 9 e 88 cm è previsto entro il 2100 (fonte: UNFCCC): questo aspetto tuttavia non riguarderà direttamente la Valle d'Aosta, la cui altitudine minima è di 300 m (Pont-St-Martin).

Gli effetti del futuro cambiamento climatico potranno ripercuotersi pressoché in ogni ambito degli ecosistemi terrestri (con estinzione delle specie animali e vegetali che non riusciranno ad adattarsi in tempo), dell'agricoltura, dell'economia e della società umana, intimamente legati da una fitta trama di relazioni.

I capitoli che seguono sono dedicati all'a-

nalisi delle potenziali conseguenze di queste alterazioni ambientali in Valle d'Aosta, distinguendo in particolare gli effetti legati a cambiamenti nelle temperature, nelle precipitazioni e nell'innevamento. Si individueranno strategie di mitigazione dei rischi e di adattamento, ma anche eventuali opportunità legate a nuovi scenari ambientali.

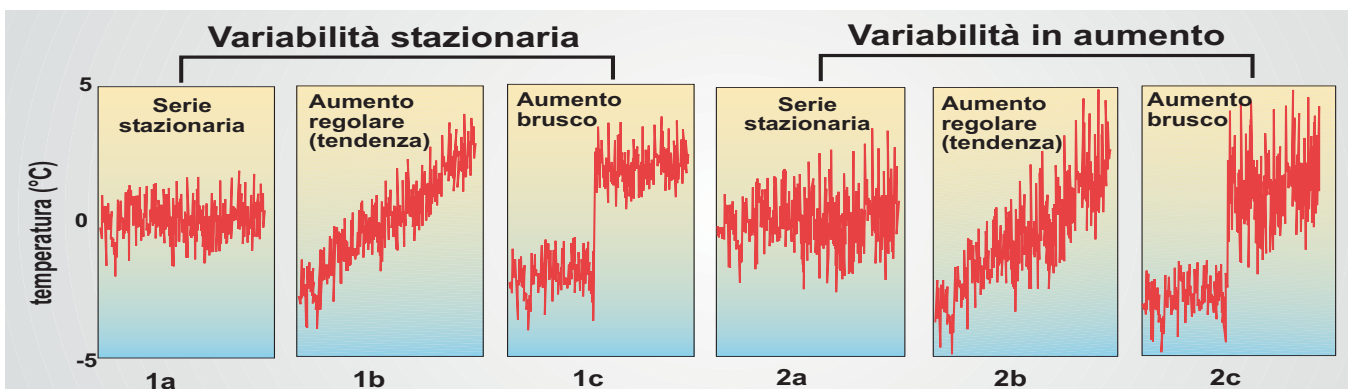
2.8 - Il cambiamento climatico potrebbe alterare non soltanto i valori medi dei parametri, bensì anche la loro variabilità e la distribuzione degli estremi. I grafici qui sotto esemplificano differenti tipologie di evoluzione della temperatura sul lungo periodo (1a), in aumento costante (1b) e brusco (1c), ma con variabilità costante; nei disegni 2a, 2b e 2c ai medesimi andamenti è invece associato un aumento nella variabilità. (BORROUGHS, 2003, *ridis.*)

Leggere i grafici: tendenze, fluttuazioni, variabilità

Sia che si parli di clima passato sia che si parli di clima futuro, la rappresentazione grafica dei risultati e la loro corretta interpretazione è fondamentale. Al di là della grande variabilità interannuale tipica dei parametri climatici (che si traduce in un andamento del grafico molto irregolare, a denti di sega), ciò che conta davvero è la loro *tendenza* su un lungo periodo di tempo. Infatti, i segnali del cambiamento si colgono più efficacemente sulle fluttuazioni a lungo termine piuttosto che sulle singole anomalie giornaliere, stagionali o

annuali che si osservano in una località. Ad esempio, una nevicata tardiva su Aosta in aprile inoltrato, oppure una giornata di luglio fresca e piovosa, sono fenomeni temporanei e locali solo apparentemente in contrasto con le evidenze del riscaldamento globale, e in realtà non è affatto detto che lo smentiscano.

Il cambiamento climatico può riservare differenti tipologie di evoluzione di un parametro, ad esempio la temperatura, come illustrato nei grafici qui sotto: gli scenari 1a-1b-1c mostrano rispettivamente un andamento stazionario, in costante aumento, e infine un brusco aumento imputabile a un cambiamento sostanziale nel sistema climatico, ma in un ambito di variabilità immutata nel tempo. Nei grafici 2a-2b-2c, invece, alle medesime evoluzioni del punto (1) è associato anche un notevole incremento della variabilità interannuale del parametro, evoluzione peraltro verosimile in futuro, che potrebbe portare alla frequente alternanza di forti anomalie climatiche di segno opposto.



3. VULNERABILITÀ E ADATTAMENTO

3.1 a, b - I danni prodotti da un evento naturale sono strettamente correlati alla vulnerabilità del territorio, che cresce all'aumentare della densità abitativa e della presenza di infrastrutture. In alto, la deserta pianura di fronte al ghiacciaio Skeidarar in Islanda, spazzata da una imponente piena glaciale nell'autunno 1996, che tuttavia ha recato danni relativamente contenuti in virtù della scarsa antropizzazione del territorio (03.10.2002, f. D. Cat Berro). In basso gli effetti dell'alluvione dell'ottobre 2000 sul fondovalle della Dora Baltea presso Champdepraz (AO): le acque esondate hanno interferito con insediamenti industriali, abitazioni, strade e ferrovia (f. Prot. Civ. Reg. Aut. Valle d'Aosta).

«Le misure di adattamento sono le attività che riducono al minimo gli impatti negativi del cambiamento climatico o che ci permettono di ottenere un profitto dalle nuove occasioni che ne derivano.»
(WARREN F.J. & al., 2004)

Occupazione del territorio, crescita economica e vulnerabilità

Tra il 29 settembre e il 13 ottobre 1996 un'eruzione del vulcano subglaciale Grimsvotn, ricoperto dalla calotta islandese del Vatnajökull, determina la fusione di svariati miliardi di metri cubi di ghiaccio: l'accumulo delle acque nella caldera si protrae, sebbene con afflussi minori, anche dopo l'eruzione, fino a raggiungere i 4 miliardi di metri cubi. All'alba del 5 novembre l'attesa *jökullhlaup* (alluvione derivante dalla rotta di un serbatoio d'acqua glaciale) irrompe sulla desolata pianura antistante lo Skeidararjökull, una tra le numerose lingue glaciali che si protendono verso l'Oceano Atlantico: il massimo deflusso raggiunge i 45 mila m^3/s , all'incirca la portata del fiume Congo. Il colossale volume d'acqua si riversa verso Sud alluvionando interamente lo Skeidararsandur, desolata pianura costiera di fini sabbie vulcaniche. Nonostante si sia trattato di una tra le più imponenti alluvio-

ni della storia recente, i danni prodotti sono stati relativamente contenuti, avendo questa interessato una zona disabitata, con poche e rare infrastrutture: un ponte abbattuto, due gravemente lesionati, 10 km di strada e svariati tratti di linee elettriche e telefoniche spazzati via, nessuna vittima umana, per un totale di «appena» 31 milioni di dollari US. Un episodio di questa entità sulla pianura padana, territorio diffu-



samente abitato e ricoperto da una fittissima rete di infrastrutture (edifici, insediamenti industriali, rete stradale e della distribuzione di elettricità, acqua e gas, ecc...), avrebbe prodotto una catastrofe di proporzioni inimmaginabili. A titolo di esempio, l'alluvione dell'ottobre 2000, durante la quale il Po ha raggiunto una massima portata di 12.000 m³/s a Cremona (quattro volte inferiore a quella della piena islandese), ha recato danni per un totale di circa 5.7 miliardi di Euro nel bacino padano (l'evento è risultato circa 200 volte più «costoso»).

Ecco introdotto, con questo esempio, il concetto di **vulnerabilità**, che è strettamente legato all'occupazione del territorio da parte dell'uomo. La vulnerabilità dipende sia dalla **sensibilità** dell'ambiente (il grado di risposta a un cambiamento di una data entità), sia dall'**adattabilità** delle specie (uomo, animali, vegetali) che lo popolano.

In caso di eventi naturali straordinari, è la presenza umana a fare la differenza: da un lato si può avere una piena spettacolare che invade una pianura disabitata senza causare problemi di sorta, dall'altro un semplice temporale estivo che manda sott'acqua un popoloso quartiere di una città, la cui rete di drenaggio magari è sottodimensionata oppure otturata da detriti, con conseguenti notevoli perdite economiche. Solitamente, tanto maggiore è la densità di popolazione, tanto più elevata sarà la vulnerabilità. Anche la crescita economica e delle infrastrutture influisce pesantemente sull'esposizione al **rischio**: a parità di pericolo (vedi la definizione dei concetti di pericolo, esposizione e rischio nel riquadro), i danni potenziali crescono con l'aumentare dei beni esposti.

La scienza giudica la *magnitudo* degli eventi naturali secondo grandezze fisiche, mentre gli uomini tendono a giudicarli in base ai danni osservati, che tuttavia non

3.2 - Schematizzazione dei concetti di pericolo, esposizione, rischio e preoccupazione

Pericolo	<i>Proprietà intrinseca ad un fenomeno di produrre un danno (es. piena fluviale, valanga)</i>
Esposizione	<i>Misura quantitativa; affinché ci sia esposizione il pericolo deve essere presente in una certa quantità.</i>
Rischio	<i>Probabilità matematica che il fenomeno provochi un danno.</i> Rischio = pericolo x esposizione
Preoccupazione	<i>Timori e paure del pubblico in merito a un pericolo, che non necessariamente derivano da evidenze scientifiche né sono correlate al grado di rischio.</i>



Vulnerabilità	<i>Grado per cui un sistema rischia di subire o di essere interessato negativamente dagli effetti dei cambiamenti climatici, compresa la variabilità climatica e i fenomeni estremi. La vulnerabilità dipende dalle caratteristiche, dall'entità e dalla velocità dei cambiamenti climatici a cui il sistema è esposto, nonché dalla sua sensibilità e dalla sua capacità di adattamento.</i>
Sensibilità	<i>Livello degli effetti positivi o negativi provocati in un sistema da parte di forzanti legate al clima. L'effetto può essere diretto (variazioni nel rendimento agricolo a seguito dell'aumento della temperatura media o della variabilità termica, ad esempio) o indiretto (danni causati dall'aumento di frequenza di inondazioni).</i>
Adattabilità	<i>Capacità di un sistema di far fronte alle conseguenze del cambiamento climatico (compresa la variabilità e gli estremi climatici), attenuando i potenziali effetti negativi e sviluppando le opportunità.</i>
Vulnerabilità = Caratteristiche cambiamento + Sensibilità + Adattabilità	

3.3 - Schematizzazione dei concetti di vulnerabilità, sensibilità e adattabilità (da WARREN F.J. & al., 2004).

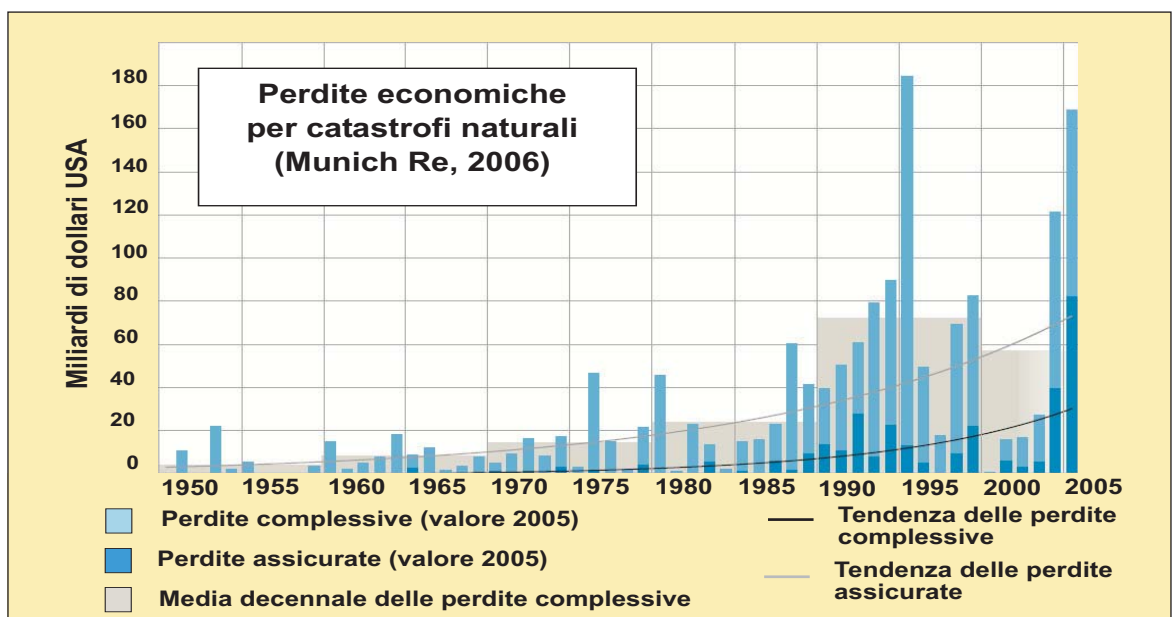
sempre rispecchiano le dimensioni fisiche del fenomeno.

Osservando le statistiche sull'entità dei disastri naturali compilate dalle compagnie assicurative, si osserva una vistosa tendenza all'aumento negli ultimi decenni: dal 1960 a oggi a livello planetario l'entità delle perdite dovute a catastrofi naturali è aumentata, in valore reale, di un fattore 7.9, e i danni a beni assicurati di un fattore 13.6. Ciò è in gran parte spiegabile con l'in-

cremento della vulnerabilità dovuto alla crescita demografica ed economica, mentre il ruolo di un reale cambiamento nell'assetto climatico oggi non è ancora chiaramente distinguibile, ma è verosimile che si presenti in futuro (AA.VV., 2002).

Dunque la vulnerabilità varia non solo nello spazio, da un tipo di ambiente a un altro, ma cambia fortemente anche nel tempo: nella Valle d'Aosta del 1600, ad esempio, una piena torrentizia/fluviatile erodeva

3.4 - Andamento delle perdite economiche (barre azzurre) e dei soli danni a beni assicurati (barre blu) recati dalle catastrofi naturali dal 1950 al 2005, in miliardi di dollari USA (MUNICH RE, 2006). Buona parte dell'aumento delle perdite è spiegabile con la crescita economica e demografica, dunque con l'aumento della vulnerabilità.





Strategie di adattamento (livello crescente da 1 a 6)			
	Categoria	Situazione	Esempio
1	Presa in carico dei costi	Niente da fare per ridurre la vulnerabilità e le perdite economiche	Impossibilità di irrigare durante una siccità, abbandono delle piante all'appassimento/morte
2	Riduzione al minimo delle perdite	Adozione di misure per ridurre la vulnerabilità	Potenziamento degli impianti di irrigazione per far fronte alla siccità estiva
3	Diluizione o distribuzione delle perdite	Condividere/distribuire le perdite tra diversi sistemi produttivi/popolazioni	Stipula di un'assicurazione
4	Cambiamento di attività	Sostituzione delle attività che non sono più sostenibili nelle nuove condizioni climatiche	In località solamente sciistica, conversione - differenziazione delle attività turistiche in base alla stagione (es. escursionismo, equitazione in primavera-estate)
5	Cambiamento di sito	Spostamento dell'attività in luoghi più favorevoli	Spostamento di colture sofferenti il caldo/secco su versanti più ombrosi, freschi e umidi
6	Miglioramento della capacità di adattamento	Incremento della solidità del sistema al fine di accrescere l'adattabilità	Riduzione dell'inquinamento, oculate scelte di pianificazione del territorio (no edificazione in aree ad alto rischio)

3.5 - Schematizzazione di possibili strategie di adattamento al cambiamento climatico, elencate in ordine crescente di efficacia e sostenibilità sul lungo periodo (da WARREN F.J. & al., 2004).

sponde, prati e campi, tratti di mulattiera o di selciato, abbatteva passerelle provvisorie in legno e mulini, qualche casolare. Oggi, una piena della stessa intensità troverà lungo il suo percorso molti più beni da danneggiare: strade asfaltate e ponti in cemento, tralicci dell'alta tensione, condomini e alberghi, piloni di impianti di risalita, talora stabilimenti industriali e supermercati. I danni lamentati dalle comunità saranno certamente più gravi. Le stesse considerazioni valgono per una valanga: se oggi dovessero ripetersi le situazioni degli inverni 1885 o 1888, le perdite materiali e umane sarebbero probabilmente ancora superiori, a causa della più intensa frequentazione invernale della montagna a fini turistici, e ciò nonostante l'effetto sicuramente positivo della maggiore disponibilità di informazione (bollettini di allerta, delimitazione delle aree a rischio). Si consideri anche che negli ultimi decenni i numerosi

interventi di protezione da piene e valanghe — che tuttavia non possono fornire una protezione assoluta — hanno generato spesso un eccessivo senso di sicurezza, che talora ha indotto amministrazioni e imprese a progettare infrastrutture in aree a rischio, aumentando così le potenzialità di subire danni in caso di eventi gravi (AA.VV., 2003). Indubbiamente vi sono anche aspetti positivi nella crescita economica per quanto riguarda la vulnerabilità: ad esempio, la mondializzazione del commercio oggi consente di far fronte più facilmente ad annate di crisi nella produzione alimentare locale dovute a fenomeni climatici, che invece nei secoli passati pote-

«L'adattamento non è una novità: gli esseri umani si sono sempre adattati al cambiamento, e continueranno a farlo in futuro.» (WARREN F.J. & al., 2004)

«Stipuliamo assicurazioni contro gli incendi della nostra casa, e sulla nostra salute. Abbiamo bisogno di un'assicurazione anche sulla sostenibilità planetaria.»

(STEPHEN H. SCHNEIDER, 2005)

vano comportare gravi carestie e aumento della mortalità tra la popolazione.

Adattarsi ai cambiamenti

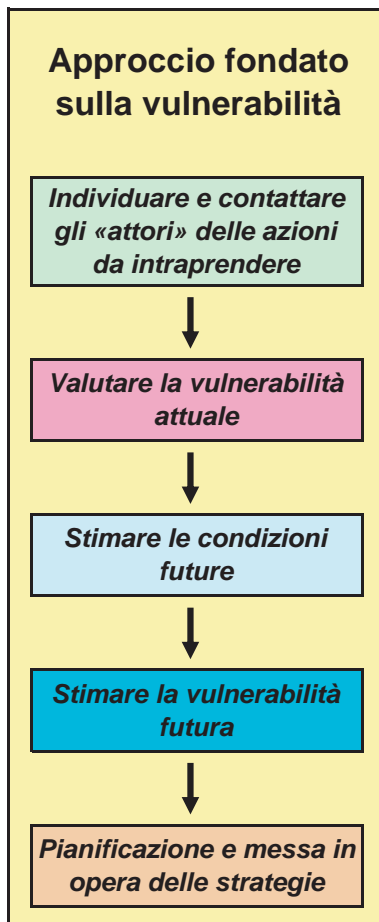
In vista di cambiamenti climatici è assolutamente necessario contenere le cause che li generano con misure di **attenuazione**, vale a dire la riduzione delle emissioni di gas serra e la stabilizzazione a lungo termine della loro concentrazione atmosferica.

Ma poiché il tempo di residenza di queste molecole in atmosfera è assai lungo (da decenni a millenni, a seconda della molecola) e poiché gli oceani reagiscono con lentezza a variazioni nell'assetto climatico terrestre, l'aumento della temperatura glo-

bale e gli effetti relativi continueranno comunque a farsi sentire, probabilmente per secoli. Ecco che allora si deve intervenire anche con una diminuzione della vulnerabilità del territorio e della società umana, attraverso misure di **adattamento** e di **mitigazione** del rischio, da raggiungere attraverso opportune pianificazioni in ogni settore, dall'agricoltura al turismo, dall'edilizia alla sanità, dalla produzione di energia alla pianificazione delle infrastrutture pubbliche, ecc... La programmazione e la messa in opera delle misure di mitigazione e adattamento dovranno tenere conto dell'evoluzione dinamica degli eventi naturali, nonché della stima della *vulnerabilità attuale e futura*, e dovranno essere condotte nel senso dello sviluppo sostenibile e duraturo (ecologico, economico e sociale). Si dovranno privilegiare possibilmente misure che al tempo stesso comportino ricadute positive anche in altri

3.6 - Elenco di fattori economici e sociali che influiscono sulla capacità di una società di adattarsi al cambiamento climatico (WARREN F.J. & al., 2004).

Fattori influenti sulla capacità di adattamento	
Risorse economiche	<i>Maggiori sono le risorse economiche, più grande è la capacità di adattamento</i>
Tecnologie	<i>La carenza di tecnologie limita la scelta delle azioni</i>
Informazione e competenze	<i>La presenza di popolazione e tecnici ben preparati e qualificati aumenta la capacità di adattamento. Migliore è l'accesso all'informazione, maggiori sono le possibilità di mettere in pratica le misure di adattamento nei tempi opportuni</i>
Infrastrutture	<i>Una rete di infrastrutture diversificate può offrire maggiori possibilità di adattamento, e anche le loro caratteristiche e la loro localizzazione sono determinanti</i>
Istituzioni	<i>Solide istituzioni sociali aiutano a ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici e ad aumentare l'adattamento</i>
Equità	<i>Un'equa distribuzione delle risorse accresce la capacità di adattamento, così come la disponibilità e l'accessibilità delle medesime sono fattori importanti</i>



3.7 - Percorso di azione per individuare opportune strategie di fronte al cambiamento climatico, basato sull'analisi della probabile evoluzione futura della vulnerabilità (WARREN F.J. & al., 2004).

tra maggiori rischi dati dai cambiamenti climatici risiede nel fatto che una variazione in un sistema sensibile come quello alpino può portare a conseguenze ben più importanti rispetto alle cause che le hanno generate, per cui fenomeni nuovi e più gravi potrebbero prodursi in zone in cui prima tali episodi erano pressoché sconosciuti (AA.VV., 2003). In queste circostanze, capitale importanza assume l'**educazione** della popolazione, nonché dei *decision makers* e dei tecnici chiamati a pianificare l'assetto del territorio (vedi cap. 12). Le misure di attenuazione, adattamento e mitigazione si compongono di scelte «dall'alto» (strate-

settori (strategie *win-win*), e che lascino — una volta realizzate — un ampio margine di flessibilità nella gestione.

Le principali insidie poste alla capacità umana di adattarsi a nuovi scenari ambientali potrebbero essere la *velocità del cambiamento previsto* dai modelli climatici, che non ha riscontri precedenti nella storia dell'umanità, nonché il *probabile aumento della frequenza e dell'intensità dei fenomeni estremi*. Inoltre, uno

già «*top-down*», per dirla con JARED DIAMOND, 2005), vale a dire di natura politica, come una legislazione adeguata ed efficace che favorisca a sua volta scelte e comportamenti virtuosi nella vita di tutti i giorni tra la popolazione (strategie «*bottom-up*», «dal basso»). Si pensi, ad esempio, alla migliore progettazione delle infrastrutture (localizzazione in aree a basso rischio, coibentazione per minimizzare il dispendio energetico), al progressivo passaggio verso fonti energetiche rinnovabili, alla conversione delle attività turistiche, all'ottimizzazione dei trasporti e della gestione dei rifiuti. Tutte queste strategie verranno analizzate più in dettaglio nel cap. 13. Si tratta di interventi che richiedono disponibilità di tecnologia e risorse finanziarie, ma soprattutto cooperazione costruttiva tra ogni settore della ricerca, della politica e della società. Il cambiamento climatico infatti non va visto solamente in chiave negativa: è possibile una pianificazione che minimizzi i costi degli impatti negativi e massimizzi i profitti di quelli positivi. Il *global warming* è sì la più grande sfida che la civiltà umana si troverà a dover affrontare nel XXI secolo, ma potrà anche essere fonte di sviluppo di nuove opportunità.

Recita un proverbio cinese: «*Quando cambia il vento, alcuni costruiscono muri, altri costruiscono mulini.*» Noi dobbiamo costruire gli uni e gli altri, ciascuno al posto giusto...

4.1 a, b - Intorno al 1800 la lingua del ghiacciaio della Brenva appariva turgida, pura e ancora priva di detriti, in un disegno del pittore e incisore JEAN ANTOINE LINK. Nel XX secolo, per la deglaciazione e l'enorme frana del 1920, la superficie si è ampiamente coperta di detrito, e la «Pierre à moulin», finestra rocciosa che nel 1800 era appena visibile tra i seracchi, oggi separa completamente il ghiacciaio in due settori distinti.

4. LEZIONI DAL PASSATO

«I cambiamenti ambientali e i loro impatti sulle risorse che sostengono l'umanità hanno avuto in passato un ruolo dominante nel provocare le migrazioni dei popoli».

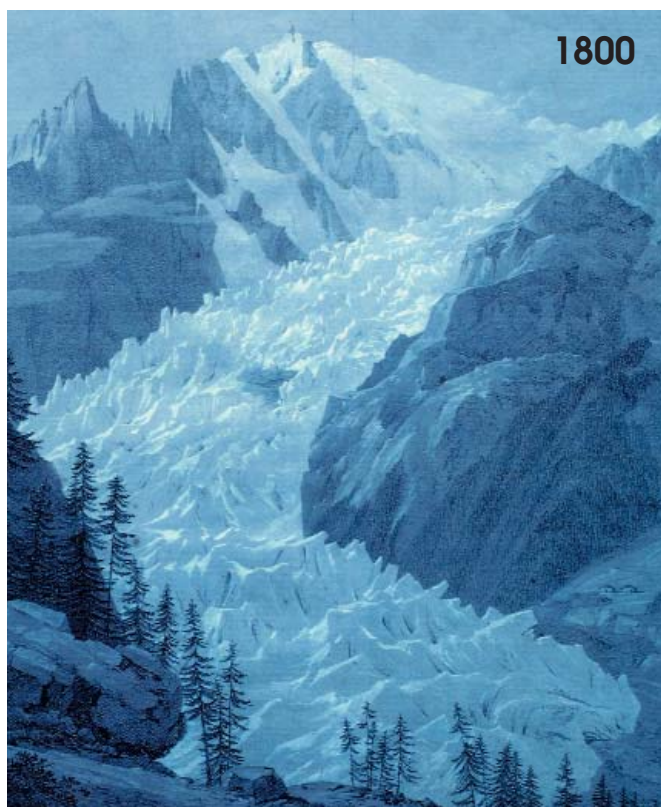
(MARTIN BENISTON, 2004)

La ricostruzione del clima antico

I dati meteorologici strumentali consentono di ricostruire con buona precisione l'andamento climatico degli ultimi due-tre secoli: la serie continua e omogenea più antica è la *Central England Temperature* (inizio dei dati a risoluzione mensile nel 1659, di quelli giornalieri nel 1772). Sulle Alpi il primo osservatorio

venne istituito nel 1817 al colle del Gran San Bernardo, e ad Aosta Georges Carrel iniziò le misure di temperatura nel 1840. Per le epoche anteriori, in assenza di dati strumentali, occorre fare riferimento a metodi indiretti, che prendono in considerazione parametri geo-ambientali correlati all'andamento climatico (*proxy-data*), ad esempio:

- *anelli di accrescimento degli alberi (dendrocronologia)*, la cui ampiezza è indice dell'andamento climatico della stagione vegetativa (secoli);
- *esame dei pollini (palinologia)*, per lo più in torbiere, che fornisce un'idea della



1800



2005

distribuzione delle specie vegetali nell'intorno (da secoli ad alcuni millenni);

— *carotaggi glaciali profondi*, da cui è possibile analizzare campioni di aria «fossile», rimasta intrappolata e inalterata anche per centinaia di migliaia di anni, ottenendo la concentrazione di gas serra, e l'andamento delle temperature attraverso i rapporti isotopici dell'ossigeno e dell'idrogeno.

Quest'ultimo metodo consente di ottenere

ricostruzioni paleo-climatiche molto antiche, nel caso di carotaggi effettuati in particolari settori delle calotte polari (interno dell'Antartide, *inlandsis* della Groenlandia) in cui non vi è flusso orizzontale che alteri le successioni cronologiche del ghiaccio stratificatosi. Il progetto italo-francese EPICA (*European Project for Ice Coring in Antartica*), sviluppato alla base di Dome Concordia (Antartide orientale, 3233 m), ha consentito

L'importanza dei dati meteorologici storici: la situazione valdostana, un patrimonio da salvaguardare

L'acquisizione continuativa, omogenea e regolare dei parametri atmosferici è alla base di ogni studio sul cambiamento climatico. La compilazione del presente rapporto è stata possibile grazie alla disponibilità, in Valle d'Aosta, di un'ampia banca dati meteorologica, già interamente recuperata dal gruppo di lavoro della Società Meteorologica Subalpina per la pubblicazione dell'Atlante Climatico della Valle d'Aosta (AA.VV., 2003). In particolare, la lunga serie storica di Aosta-città consente di estendere le considerazioni fino al 1840, mentre l'installazione di numerose stazioni in quota - presso le dighe idroelettriche - negli Anni 1920-30, tuttora operative, consente analisi di dettaglio sull'evoluzione climatica delle zone di montagna, specialmente nei riguardi dell'innevamento e delle risorse idriche. La fitta e preziosa rete di strumenti afferenti all'Ufficio Idrografico del Po (ente istituito nel 1913) raggiunse l'apice della funzionalità negli Anni 1930-60, quando erano attive circa 60 stazioni termo-pluviometriche, mentre in seguito è andata progressivamente degradandosi fino alla definitiva soppressione dell'ente



4.2 - Le stazioni meteorologiche automatiche attive all'aeroporto di Saint-Christophe. La serie dei dati aeroportuale è omogenea dal 1974.

nel 2003. Tali gravi lacune sono state almeno in parte colmate dalla nuova installazione, a partire dagli Anni 1980-90, di sensori automatici da parte del Servizio Protezione Civile e del Dipartimento Territorio, Ambiente e Risorse Idriche, anche se in alcuni siti (anche di grande interesse, come Champorcher, Courmayeur, Champoluc) la perdita di omogeneità nelle serie storiche è stata comunque inevitabile.

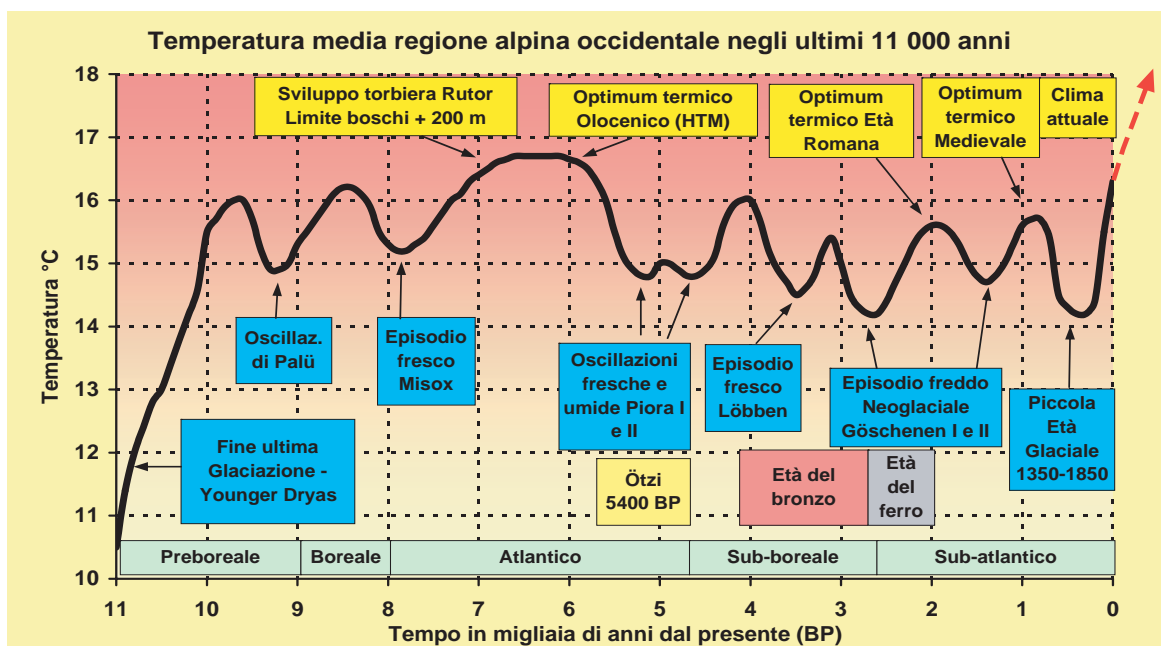
4.3 - Ricostruzione dell'andamento approssimativo delle temperature medie nella regione alpina occidentale negli ultimi 11.000 anni, desunta dai risultati pubblicati da diversi Autori, in particolare OROMBELLI (1998), LISTER & al. (1998), HORMES (2001), BURGA (1995), DAVIS (2003), MOBERG (2005). L'inizio dell'Olocene è stato caratterizzato da un netto aumento termico (circa 5°C nell'arco di un millennio), responsabile della fine delle glaciazioni. In seguito il clima si è stabilizzato su un assetto temperato, con fluttuazioni comprese entro 2.5 °C circa, tra l'Optimum termico olocenico di 6.000-7.000 anni fa circa e i minimi degli episodi Neoglaciali (circa 2500 anni fa) e della Piccola Età Glaciale (1350-1850 d.C.). Le temperature attuali hanno raggiunto, e molto probabilmente ormai superato, i valori già miti degli Optimum termici secondari dell'Età romana e del Medioevo.

finora di ricostruire l'andamento delle concentrazioni di biossido di carbonio, metano e della temperatura terrestre negli ultimi 650.000 anni (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI R. & al., 2005), e costituisce dunque una tra le fonti più preziose oggi a disposizione per la conoscenza del clima passato. Il grafico di pag. 14 mostra l'andamento ricostruito del CO₂, che peraltro consente di evidenziare l'alternanza di almeno 7 fasi glaciali (riconoscibili per il calo di concentrazione del gas serra), le quali sulle Alpi hanno portato i ghiacciai a raggiungere talora gli sbocchi in pianura sul versante padano, e altrettante fasi interglaciali, compresa quella attuale (aumento del gas serra). Ma uno dei risultati più impressionanti riguarda la presenza dei gas serra in atmosfera: in oltre mezzo milione di anni — fino all'era preindustriale — la concentrazione di CO₂ non era mai salita oltre le 300 ppmv, oggi siamo giun-

ti a 381 ppmv, e questo fornisce un'idea dell'importanza del cambiamento ambientale e climatico che oggi stiamo vivendo.

Dalla fine delle glaciazioni a oggi

Per la regione alpina occidentale, i risultati ottenuti dagli studi paleo-climatici di diversi autori, in particolare OROMBELLI (1998), LISTER & al. (1998), HORMES (2001), DAVIS (2003), MOBERG (2005), consentono di tracciare un quadro approssimativo dell'andamento delle temperature medie degli ultimi 11 mila anni, riportato nel grafico 4.3. Allo studio del clima alpino in epoca storica hanno pure contribuito analisi polliniche condotte in Valle d'Aosta, presso la torbiera del Rutor (BURGA, 1995). Tra 11.000 e 10.000 anni fa la temperatura media aumentò di circa 5°C, segnando la fine dell'ultima glaciazione e l'inizio dell'Olocene (l'epoca geologica in cui oggi viviamo): i ghiacciai si

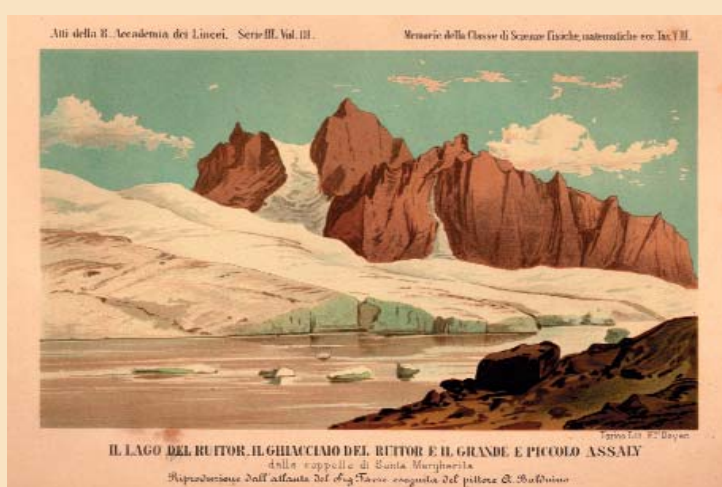


ritirano ad alta quota, e il clima si stabilizza su un assetto temperato simile a quello attuale, che favorisce la colonizzazione umana delle valli alpine, nonché l'affermarsi dell'agricoltura e dell'allevamento verso 6500-7000 anni fa (BP = *before present*), proprio durante l'*Optimum termico olocenico*, periodo mite durante il quale peraltro si forma anche la torbiera del Rutor. La fluttuazione delle temperature medie tra questa fase mite e altre successive più fresche, come l'episodio Neoglaciale «Göschenen I» (3000-2500 BP) e la Piccola Età Glaciale (1300-1850 d.C.), rimangono contenute entro 2.5 °C circa. Dati provenienti dalla larghezza degli anelli di accrescimento degli alberi, da dati archeologici e datazioni al radiocarbonio, da fonti storiche, hanno permesso di ricostruire le oscillazioni storiche dei ghiacciai svizzeri dell'Aletsch, del Gorner, e di Grindelwald inferiore (HOLZHAUSER & *al.*, 2004): sono emerse avanzate pressoché simultanee dei tre apparati nel 1000-600 a.C. (Göschenen I), 500-600 d.C. (Göschenen II), 800-900, 1100-1200 e 1300-1860 d.C. Queste fluttuazioni si collocano in fase con le oscillazioni di livello di laghi della Francia orientale (Jura e Prealpi) e dell'altipiano svizzero. Inoltre il confronto tra le oscillazioni dell'Aletsch e i dati del ¹⁴C mostra il ruolo delle variazioni nell'attività solare come forzante climatica principale durante l'Olocene. Gli ultimi 1000-1200 anni di storia hanno conosciuto una fase mite nel Medioevo, collocabi-

le tra il 900 e il 1200 d.C. circa, seguita da un raffreddamento più pronunciato tra la fine del XIII e la metà del XIX secolo, periodo diffusamente conosciuto come «Piccola Età Glaciale» (approfondimento a p. 32). Di entrambi i momenti storici sono disponibili documenti e cronache che attestano gli effetti delle mutate condizioni climatiche sulle comunità alpine, sulle vie di comunicazione, sull'agricoltura, la cui interpretazione va però effettuata con cautela. Quanto al **periodo mite medievale**, si trovano cenni del più agevole passaggio attraverso alcuni valichi alpini rispetto a oggi (Colle di Teleccio tra Valnontey e la Valle Orco; Colle del Teodulo tra il Breuil e Zermatt), e della diffusa coltivazione di specie tipicamente mediterranee quali la vite e l'ulivo anche in Valle d'Aosta, testimonianze che talora avevano indotto a ritenere — troppo semplicisticamente — che a quei tempi le temperature fossero nettamente più elevate di oggi. Il fatto che durante il Medioevo alcuni valichi alpini fossero praticabili non esclude necessariamente l'esistenza di ghiacciai, così come la coltivazione di specie termofile, magari spinta in condizioni marginali e con mediocre produttività, non implica per forza un clima più mite dell'attuale (peraltro anche oggi vite e ulivo prosperano sui versanti della Valle centrale rispettivamente fino a 500-600 e 700-800 m di quota). Secondo recenti analisi paleo-climatiche, ad esempio quella condotta da OSBORN & BRIFFA

(2006), l'anomalia positiva di temperatura registrata tra l'890 d.C. e il 1170 d.C. è sì in accordo con la definizione di Optimum termico medievale, tuttavia **il riscaldamento osservato nella seconda metà del XX secolo mostra un'intensità, una rapidità e un'esten-**

sione spaziale di importanza ancora maggiore, e costituisce la più notevole caratteristica dell'evoluzione climatica negli ultimi 1200 anni (fig. 4.6), peraltro in fase con le massime concentrazioni di gas serra in atmosfera. Dunque vi sono serie evidenze per ritenere



4.4 - Il lago di Santa Margherita, nelle cui acque si immerge la fronte del ghiacciaio del Rutor, in una raffigurazione tratta da BARETTI (1879).

del ghiacciaio del Rutor in avanzata. Almeno dodici casi si sono contati dal 1430 al 1680, di cui quattro in anni consecutivi dal 1594 al 1597. Su incarico di Carlo Emanuele I, duca di Savoia, l'ingegnere Giacomo Soldati propose la costruzione di una diga a valle del lago per contenerne le acque di svuotamento (capienza fino a 4 milioni di m³), mentre l'ingegnere svizzero Tubinger propose la costruzione - sul fondo del lago - di una galleria di drenaggio lunga 400 metri per prevenirne la formazione, ma entrambi i progetti non vennero realizzati per via dei costi elevati. Dunque gli svuotamenti continuarono... Per scongiurare il fenomeno, nel XVII secolo vennero addirittura portate in processione fino al ghiacciaio le reliquie di San Grato, patrono di Aosta. Nell'agosto 1751, cinque milioni di metri cubi d'acqua vennero rilasciati in 6-7 ore, e la piena si propagò per 30 km. Un ultimo svuotamento di 100.000 m³ d'acqua si produsse nel 1933, dai laghi proglaciali «Nuovo» e «Nuovissimo», ma senza più recare danni a valle (fonte: archivio GRIDABASE, progetto EU Glaciorisk - <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/>). Ora, con il regresso del ghiacciaio questo tipo di pericolo dovrebbe essere scongiurato, ma il riscaldamento atmosferico in atto provoca nuovi cambiamenti in alta montagna (formazione di laghi epiglaciali, crollo di ghiacciai pensili), imponendo una rinnovata sorveglianza.

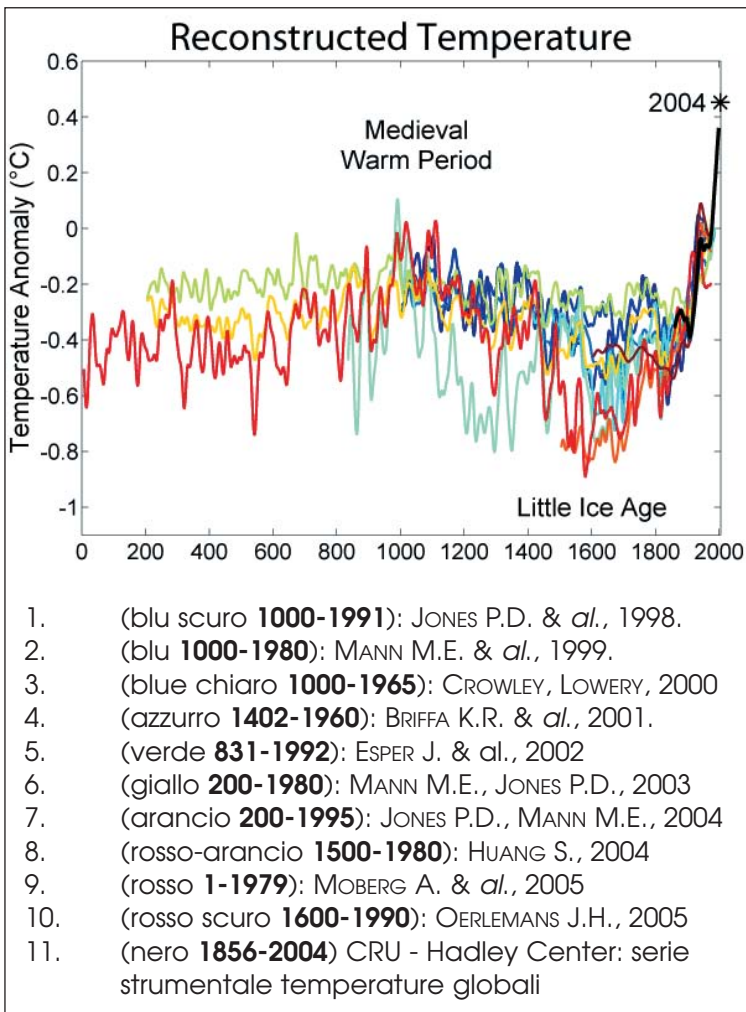
Le rotte glaciali: la storia turbolenta del lago di Santa Margherita al Rutor

In una regione alpina come la Valle d'Aosta il rischio connesso alla presenza dei ghiacciai si è fatto parecchio sentire in passato, specialmente durante la Piccola Età Glaciale. I fenomeni che più hanno segnato la storia locale dell'alta valle sono stati forse i ripetuti svuotamenti del lago di Santa Margherita, formatosi più volte per lo sbarramento del torrente da parte della lingua

La Piccola Età Glaciale

Il periodo intercorso tra la fine del XIII e la metà del XIX secolo (1300-1850 d.C.) è stato caratterizzato, sia sulle Alpi, sia a livello planetario o quanto meno emisferico, da un netto raffreddamento climatico e dalla più importante avanzata dei ghiacciai in epoca storica, dopo la fine delle grandi glaciazioni circa 11.000 anni fa. Questa fase è genericamente indicata con il termine di «Piccola Età Glaciale» (PEG). Si tratta di un concetto che - sotto il profilo climatico e glaciologico - oggi è fonte di vivaci discussioni nell'ambiente scientifico: alcuni autori lo considerano inappropriato, inutile, auspicandone perfino la cessazione dell'uso, per via di differenze e asincronie nello sviluppo delle fasi climatiche tra diverse regioni del globo; questo periodo in effetti non fu uniformemente freddo né nel tempo né nello spazio (JONES & MANN, 2004; MATTHEWS & BRIFFA, 2005). Tuttavia, il suo utilizzo rimane ampiamente diffuso e verrà mantenuto anche nel presente rapporto, per l'elevato impatto che questa fase più fredda e piovosa/nevosa ha avuto sul territorio e sulla civiltà alpina in pieno sviluppo. Ne restano ampie testimonianze in documenti storici, leggende e tradizioni, che parlano di comunicazioni più difficili attraverso gli alti valichi per l'espandersi di nevati e ghiacciai, di pessime annate agrarie e carestie, di pascoli perduti per l'avanzata dei ghiacci (specialmente sul massiccio del Monte Bianco, dove le lingue glaciali giunsero a lambire i fondovalle

presso Courmayeur e Chamonix). Si trattò di un periodo di crisi, cui le popolazioni di montagna - avvezze a vivere in un territorio difficile - seppero tuttavia adattarsi. Sulle Alpi l'espansione dei ghiacciai raggiunse l'apice almeno in tre fasi attorno al 1600, al 1820 e al 1850, quando la superficie glacializzata era circa doppia rispetto a oggi (MERCALLI & CAT BERRO, 2005). Di alcuni grandi ghiacciai delle Alpi occidentali, come la Mer de Glace e il ghiacciaio inferiore di Grindelwald, benché soltanto dal XIX secolo siano iniziate misure accurate, è possibile ricostruire l'andamento negli ultimi 400-500 anni utilizzando fonti storiche, cronache e disegni. ZUMBÜHL & al. (2006) hanno concluso che la Mer de Glace raggiunse il massimo sviluppo nel 1821, cui seguì una pulsazione minore culminata nel 1852-53, mentre per il ghiacciaio inferiore di Grindelwald (Alpi Bernesi) l'avanzata più importante della fase PEG si sarebbe avuta nel 1600. In Val d'Aosta si conoscono le variazioni frontali del ghiacciaio del Lys (Gressoney, Monte Rosa) fin dal 1812: in questo caso la PEG culminò con due pulsazioni pressoché equivalenti nel 1821 e 1859-60, di cui la prima più avanzata di circa 50 m rispetto alla seconda (MONTERIN, 1932). Il regresso glaciale successivo, che prosegue tuttora, è stato innescato dal calo delle precipitazioni e dall'aumento delle temperature (tendenze spesso non in fase tra una regione e l'altra): l'incremento termico è stato evidente nel XX secolo, e valutato, sulle Alpi, in 1.1÷1.4 °C da AUER & al. (2005).

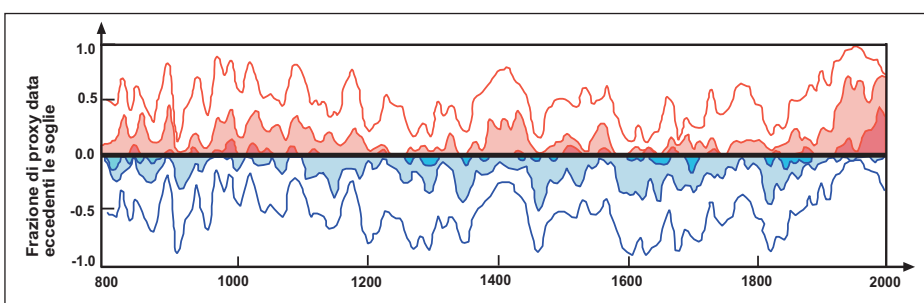


che gli Anni 1990 siano stati i più caldi del millennio, e probabilmente anche degli ultimi 2000 anni, come si evince dal grafico 4.5, che mostra i risultati di diverse ricostruzioni climatiche.

Clima storico e uomo: un rapporto complesso, fatto di crisi e adattamenti

Lungo tutto il corso della sua presenza sulla Terra (come bipede da circa 2 milioni di anni fa, con la comparsa di *Homo erectus*), l'uomo ha dovuto confrontarsi più volte con i cambiamenti del clima, in passato unicamente legati a cause naturali. Durante le ultime pulsazioni glaciali del Pleistocene l'uomo era già presente come cacciatore-raccoglitore in Europa centro-meridionale, ma il nomadismo e la semplicità dell'organizzazione sociale favoriva in un certo senso l'adatta-

bilità in caso di mutamenti nell'assetto ambientale. Terminata la glaciazione, e una volta colonizzati i siti in posizione morfologica più favorevole, con l'aumento demografico le popolazioni alpine hanno iniziato a colonizzare luoghi viepiù marginali e a quote superiori, fino ad arrivare al picco di popolazione che si è registrato durante il XIX secolo, quando, malgrado l'ostilità climatica delle fasi finali della Piccola Età



4.5 (in alto) - Confronto tra diverse ricostruzioni delle temperature medie globali negli ultimi duemila anni, ed elenco dei rispettivi autori. I dati di ogni ricostruzione sono stati smussati con media mobile pesata (gaussiana $\sigma = 5$ anni). Alla fine del XX secolo le temperature medie terrestri hanno superato i valori già miti dell'Optimum Termico Medievale, risultando dunque le più elevate da almeno duemila anni (http://en.wikipedia.org/wiki/Temperature_record).

4.6 (qui sopra) - Da OSBORN & BRIFFA (2006): frazione di serie di proxy-data utilizzate in cui, per ciascun anno, si supera rispettivamente la media (anomalie positive o negative, linea rossa e blu), 1 (aree ombreggiate in rosso e blu) e 2 unità di deviazione standard (area in rosso e blu intenso) calcolate su ciascuna serie. Lo studio fornisce le evidenze di fasi significativamente calde durante l'Optimum termico medievale e significativamente fredde durante la Piccola Età Glaciale, ma il segnale più forte e diffuso nello spazio appare nella seconda metà del XX secolo: alla fine del periodo di analisi (1995), il 70% dei valori delle 14 serie di proxy-data utilizzate era in anomalia positiva rispetto alla media (linea rossa), e il 35% superava la soglia delle due unità di deviazione standard (area rosso intenso).

Glaciale (maggiore permanenza della neve, più freddo, ghiacciai più estesi), la pressione demografica spinse allo sfruttamento, specialmente per il pascolo estivo, di località assolutamente marginali, magre e poco produttive, fin presso i ghiacciai e in situazioni morfologiche poco felici, e non sempre al riparo da piene torrentizie, erosioni e valanghe. In Valle d'Aosta non mancano casi di alpeggi a quote molto elevate, ad esempio l'alpe Tsa de Tsan a 2610 m in alta Valpelline: ai tempi della sua costruzione, sicuramente durante la fase PEG, i magri pascoli sovrastavano addirittura l'ampia lingua valliva dell'omonimo ghiacciaio. Da sempre le genti valdostane, come tutti i popoli delle Alpi, si sono trovate a fronteggiare un ambiente e un clima talora ostili, adattandosi di volta in volta con l'ingegno e i mezzi a disposizione. Perfino il drammaturgo canavesano GIUSEPPE GIACOSA (1847-1906) ricorda, nella sua novella «*I paesi delle valanghe*» (in «*Novelle e paesi valdostani*», 1886), l'esposizione del montanaro agli elementi severi del clima alpino: «*Ma quale vita! E quale lavoro! Quel poco pane il villano deve cercarselo dove lo trova, contendendolo al sole, alla neve, alle frane, ai torrenti divoratori, al vento gelido di tramontana, alle brinate primaverili*». Non che oggi le condizioni siano molto cambiate sotto questo aspetto: il clima continua e continuerà a condizionare fortemente le attività produttive, special-

mente in montagna, ma quanto meno la maggiore facilità degli scambi commerciali a scala continentale e i sussidi stanziati in caso di calamità naturali possono contenere i danni di un'annata negativa, mentre nei secoli passati questa poteva comportare una grave carestia a livello locale. Data la fragilità dell'economia rurale alpina, in passato l'uomo ha messo in atto una serie di accorgimenti per una gestione del territorio il più possibile ottimale, che, anche oggi, andrebbero riscoperti e valorizzati, in vista di nuovi cambiamenti climatici e ambientali. Si veda ad esempio, nel caso valdostano, la rete dei *ru* (canali) per l'irrigazione dei versanti aridi affacciati sulla valle centrale, già testimoni della difficoltà nell'approvvigionamento idrico estivo in tempi remoti: il loro ripristino e potenziamento potrebbe tornare utile in caso di estati future ancora più secche di quella del 2003, laddove l'irrigazione «a pioggia» si rende difficile per ragioni logistiche e morfologiche. Quanto agli insegnamenti che si possono trarre dallo studio degli eventi climatici del passato, grande rilievo rivestono anche le cronache di alluvioni, valanghe, frane, e rotte glaciali: benché il cambiamento climatico possa proporre fenomeni «nuovi» in tempi e luoghi diversi rispetto a un tempo, in ogni caso la conoscenza degli episodi passati consente di individuare le aree più a rischio e di comprendere la potenziale evoluzione futura del territorio.

5. LA PREVISIONE DEL CLIMA FUTURO

«Non chiedere ai modelli climatici ciò che non possono dare».

(MAURIZIO MAUGERI, 2005)

Come si fa a prevedere il clima? I modelli numerici e i loro limiti

L'unico mezzo oggi a disposizione per effettuare delle previsioni sull'evoluzione futura del clima è dato dai modelli numerici. Si tratta di sistemi basati su complesse equazioni differenziali che descrivono le interazioni fisiche tra gli elementi del sistema climatico, e consentono di individuare le tendenze future nel suo comportamento. Concettualmente funzionano come i modelli di previsione meteorologica a breve-medio termine, ma in questo caso

non possono fornire con precisione le condizioni del tempo in un dato luogo e in un giorno preciso, bensì soltanto una tendenza climatica generale sul lungo periodo.

I modelli climatici, globali o regionali che siano (approfondimento a pag. 36), operano tramite una griglia tridimensionale a maglia larga in cui la circolazione atmosferica e quella oceanica sono rappresentate da complesse equazioni fisiche, che servono a prevederne il futuro comportamento. Dopo i primi tentativi negli Anni 1960-70, sono stati migliorati via-via nel tempo introducendo parametrizzazioni riguardanti anche altre componenti, come la natura della superficie terrestre (terre emerse, calotte glaciali, banchisa) e

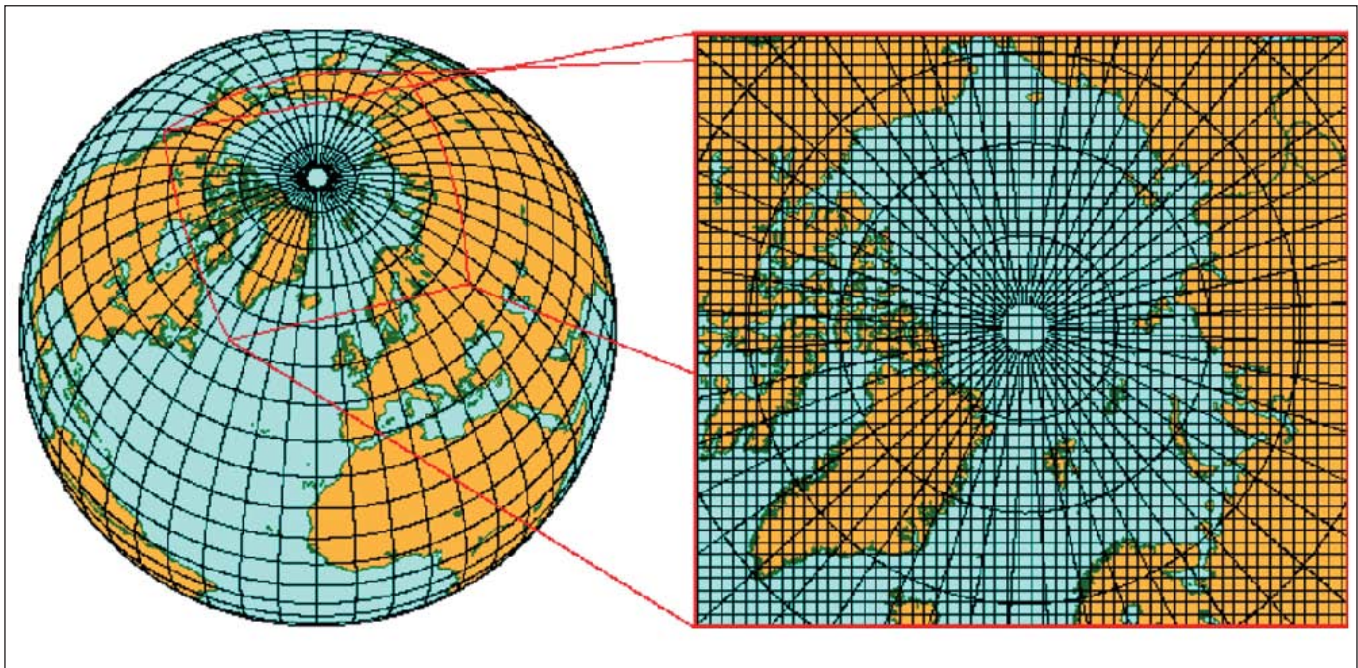
5.1 - Riepilogo delle caratteristiche delle principali categorie di modelli climatici (Fonte: Hadley Center, Met-Office, UK).

Principali categorie di modelli climatici (fonte: Hadley Center, Met-Office, UK)	
Categoria	Funzione
AGCMs – Atmosphere General Circulation Models (Modelli di Circolazione Generale dell'Atmosfera)	Studio dei processi atmosferici e della variabilità climatica
OGCMs – Ocean General Circulation Models (Modelli di Circolazione Generale dell'Oceano)	Studio della circolazione oceanica, dei processi interni agli oceani e loro variabilità
Modelli del ciclo del carbonio	Comprensione di importanti meccanismi di retroazione (<i>feedback</i>) legati al ciclo del carbonio (fertilizzazione piante da CO ₂ , assorbimento CO ₂ da oceani)
Modelli di chimica dell'atmosfera	Comprensione dei processi chimici che regolano la formazione e distruzione di O ₃ e CH ₄ nella bassa atmosfera.
AOGCMs – Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models (Modelli accoppiati di Circolazione Generale Atmosfera-Oceano)	I più complessi oggi in uso. AGCM accoppiato a OGCM. Previsione della velocità di cambiamento del clima e della concentrazione dei componenti atmosferici in risposta a emissioni e cambiamento climatico (se accoppiato con modello di chimica atmosferica).
RCMs – Regional Climate Models (Modelli climatici regionali)	Risoluzione spaziale più elevata (maglia 50 km in genere) per prevedere meglio le peculiarità locali. Inizializzati con i risultati dei modelli climatici ad area globale.

Modelli globali e modelli regionali

Per studiare l'evoluzione futura dell'atmosfera, sia nel breve termine, ai fini della previsione meteorologica, sia nel lungo termine a scopi climatologici, bisogna risolvere le equazioni che ne regolano il moto e che determinano le interazioni tra i vari parametri atmosferici. Queste sono numerose e complesse, e la loro risoluzione richiede l'uso di modelli numerici che «girano» su potenti calcolatori. Non essendo inoltre possibile, come richiederebbe la meccanica classica, studiare lo stato e l'evoluzione di tutti i punti dell'atmosfera (praticamente infiniti), anche perchè occorrerebbe conoscerne tutte le condizioni iniziali, questa deve essere modellizzata attraverso un grigliato tridimensionale; le equazioni del moto vengono, quindi, applicate e risolte solo sui nodi della griglia e il risultato viene poi esteso a tutta l'atmosfera. Ne deriva che, tanto più fitto è il grigliato (cioè tanto maggiore è il numero dei nodi), tanto migliore è l'approssimazione dello stato reale dell'atmosfera. Ovviamente, aumentando la risoluzione del grigliato, aumentano parallelamente i tempi e i costi di calcolo, per cui bisogna trovare il modo di avere una descrizione accettabile dello stato e dell'evoluzione dell'atmosfera in tempi relativamente brevi. La soluzione adottata al giorno d'oggi è di avere un numero limitato di modelli, i cosiddetti **modelli globali** (GCM), che, partendo dalle misure dei parametri meteorologici effettuate dalle reti di rilevamento terrestri e da satellite (inizializzazione del modello), risolvono le

equazioni del moto su tutta l'atmosfera per un periodo intorno ai 5-10 giorni; data la vastità del dominio da simulare e l'estensione temporale che si raggiunge, per esigenze di calcolo la distanza tra i punti griglia rimane piuttosto elevata (dell'ordine di 50 km) e di ciò risente l'accuratezza con cui questo tipo di modelli descrive eventuali effetti locali, dovuti in primo luogo all'orografia. Nel caso dei **modelli climatologici**, che devono tenere conto anche delle interazioni tra atmosfera e oceano, e devono simulare periodi di tempo molto lunghi (fino a un secolo) bisogna adottare un grigliato più ampio (dell'ordine di 300 km) e semplificare ulteriormente le equazioni del moto trascurando i fenomeni alle scale più piccole. Per ottenere risultati più sensibili agli effetti locali, si è quindi sviluppato un secondo tipo di modelli, i **modelli regionali**, che considerano solo una porzione limitata di territorio e possono quindi avere un grigliato più fitto, con una risoluzione dell'ordine di 50 km (ma fino a 1-10 km per i modelli meteorologici locali), che meglio simula l'orografia. La minore estensione spaziale permette, inoltre, di potersi concentrare anche su alcuni particolari fattori climatici, come ad esempio il ciclo idrologico: in questo modo si può arrivare a una migliore previsione di eventi climatici potenzialmente dannosi a scala locale, come piogge intense, uragani e tempeste di vento. I modelli regionali non sono però indipendenti, ma vengono innestati sui modelli globali, utilizzando come inizializzazione le uscite dei modelli a grande scala.



5.2 - Relazione tra un modello climatico globale e regionale. Il modello climatico globale simula l'evoluzione della circolazione generale dell'atmosfera e delle interazioni tra atmosfera e oceano su tutto il globo terrestre con una risoluzione spaziale piuttosto bassa. Il modello regionale partendo dai risultati del modello globale, considera solo una porzione limitata di territorio, ma ad una risoluzione maggiore (fonte www.awi-potsdam.de).

la biosfera (vegetazione): così sono nati i *modelli accoppiati oceano-atmosfera*, oggi i più utilizzati nella ricerca di punta, che integrano i diversi fattori del sistema climatico, migliorando così le prestazioni.

Dati gli elevati tempi di calcolo necessari, nonostante l'impiego dei più potenti calcolatori disponibili, i modelli globali non possono che lavorare su una griglia ancora piuttosto grossolana, di 300 km di lato per ciascuna «maglia» nel caso dei modelli accoppiati atmosfera-oceano. I risultati ottenuti differiscono in base al tipo di modello e agli scenari utilizzati per l'inizializzazione, cioè delle previsioni di possibili future emissioni di gas a effetto serra e aerosol, più o meno ingenti a seconda dello sviluppo economico, demografico, tecnologico, sociale (riquadro a p. 38).

Per verificare l'attendibilità delle simulazio-

ni, il modello viene sottoposto a un test che consiste nel ricostruire il clima passato, le cui fluttuazioni sono conosciute. Se la ricostruzione è sufficientemente fedele alla realtà nota, allora si può «affidare» al modello anche la previsione delle condizioni future.

E' a partire da questo insieme di modellizzazioni che l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), nel suo rappor-

«Gli scenari rappresentano uno dei mezzi principali di cui disponiamo per indagare sull'evoluzione dei sistemi complessi, che - per la loro stessa natura - sono imprevedibili; inoltre li conosciamo in modo insufficiente, e sulla loro comprensione persistono grandi incertezze scientifiche.» (CARTER & al., 2001)

Scenari di emissione IPCC-SRES

L'IPCC ha individuato nell'ambito del suo *Special Report on Emission Scenario* (SRES), 40 scenari futuri, che non tengono presente strategie internazionali per l'abbattimento delle emissioni di gas e aerosol climalteranti; sono raggruppati in quattro categorie, di cui due orientate verso una crescente globalizzazione (A1 e B1), e due verso una crescente regionalizzazione delle politiche economiche, sociali e ambientali (A2 e B2).

A1 - Scenari della «*Rapida crescita convergente*». Rapida crescita economica, picco demografico verso il 2050 e successivo declino, rapida introduzione di tecnologie nuove e più efficaci, riduzione delle disparità socio-economiche tra i continenti;

A2 - Scenari del «*Mondo frammentato*». Rapido sviluppo demografico, ma sviluppo economico e tecnologico frammentato e lento, forti differenze tra le regioni del mondo (emissioni più elevate);

B1 - Scenari della «*Sostenibilità ambientale globale*». Come in A1, picco demografico verso il 2050 e successivo declino, ma rapido cambiamento nella struttura economica, sviluppo sostenibile e transizione verso una società dei servizi e dell'informazione, livellamento delle disparità tra i continenti, rapida introduzione di tecnologie efficaci e pulite (emissioni più basse);

B2 - Scenari della «*Sostenibilità locale*». Crescita economica e demografica più lenta e moderata rispetto allo scenario A2; soluzioni locali alla sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Fonte: <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/sres/index.html>

ti del 2001, prevede entro il 2100 un ulteriore aumento delle temperature terrestri variabile tra 1.4 e 5.8 °C, a seconda degli scenari di emissioni di gas serra e aerosol considerati.

Recentemente, grandi sforzi in termini di miglioramento dei modelli e di calcolo sono stati profusi per l'elaborazione del IV rapporto IPCC, la cui pubblicazione è pre-

vista entro l'autunno 2007, dopo le precedenti edizioni del 1990, 1995 e 2001. Vi hanno lavorato 14 gruppi di simulazione coordinati in un grande sforzo internazionale; l'insieme delle simulazioni realizzate è stata estesa di molto, permettendo così di studiare in modo più approfondito l'impatto regionale dei cambiamenti del clima. Tuttavia, benché la potenza dei calcolato-

«Nonostante le numerose incertezze e gli aspetti ancora da comprendere, oggi vi è un ampio consenso intorno al reale pericolo che un brusco riscaldamento globale potrebbe costituire per un ampio spettro di sistemi ambientali, sociali ed economici, sia globalmente sia regionalmente, come sulle Alpi».
(MARTIN BENISTON, 2005)

5.3 a, b - Data la mole e la complessità dei calcoli da eseguire, i modelli climatici e meteorologici devono girare su supercalcolatori, disponibili solo nei grandi centri meteorologici internazionali: a sinistra, il supercomputer Fujitsu VPP 5000 installato nel 1999 alla sede di Météo France a Toulouse, come appariva nel 2001. Ha una potenza di 250 miliardi di operazioni al secondo (250 GigaFlop). A destra, sempre presso la sede di Météo France, il vecchio CRAY in attività nel 1992 (f. L. Mercalli).

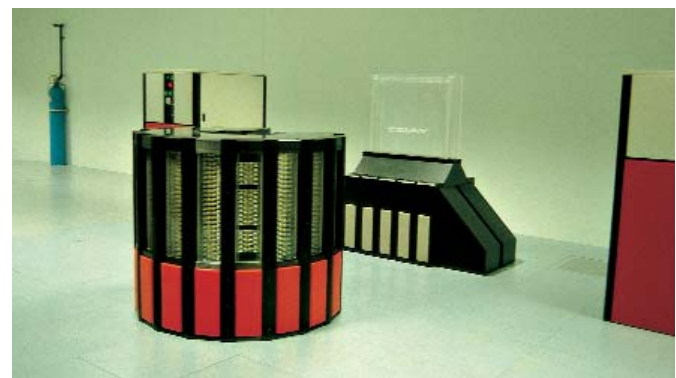
ri sia in continuo aumento, i tempi di elaborazione rimangono considerevoli: per effettuare le nuove simulazioni sul XX e XXI secolo, presentate nel giugno 2005 in vista della stesura del IV rapporto IPCC, i supercalcolatori di Météo France e dell'Institut Pierre Simon Laplace (consorzio francese di ricerca del Centre National de la Recherche Scientifique), hanno lavorato in totale per ben 42.600 ore nell'arco di 8-12 mesi...!

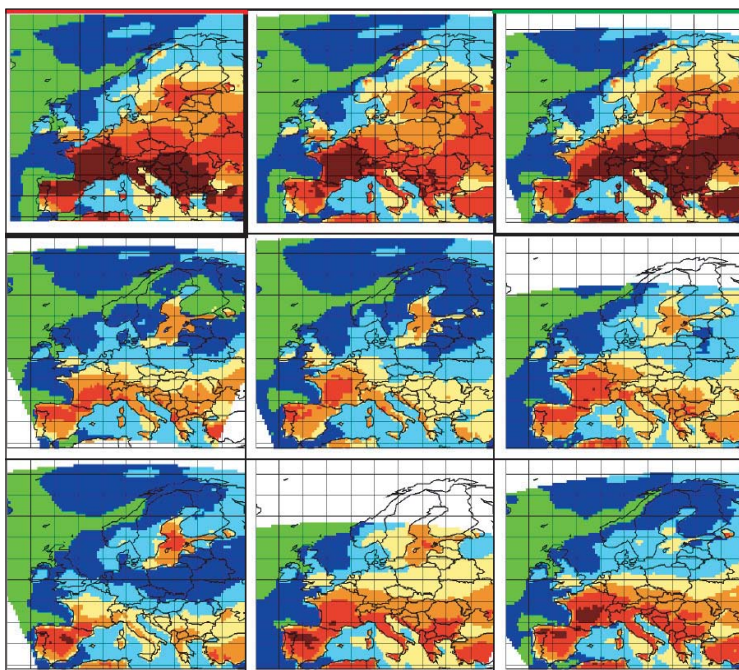
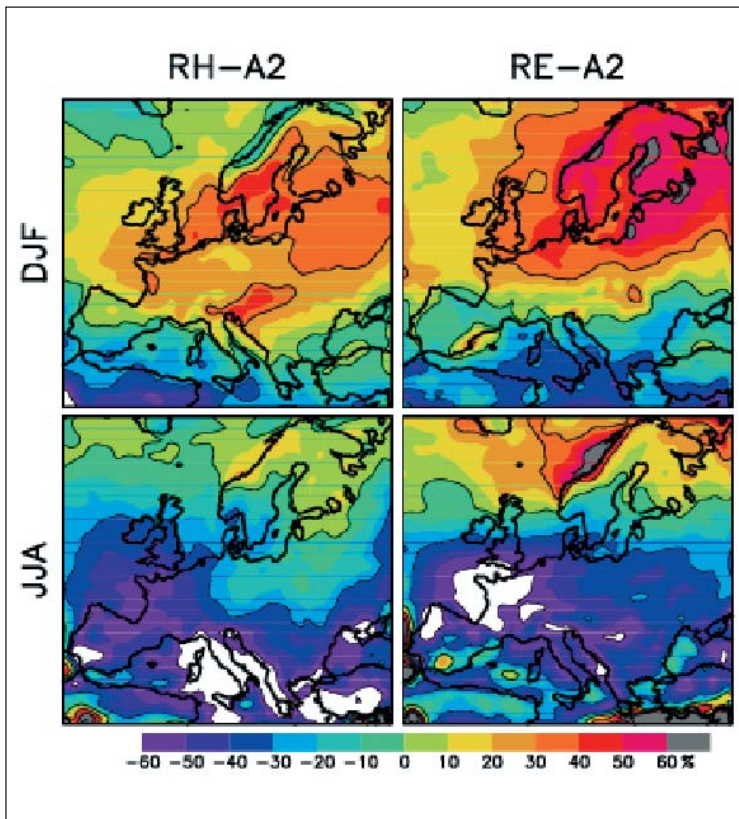
I due modelli impiegati dal gruppo di lavoro Météo France - IPSL (Météo France, CNRS, CEA, 2005) hanno entrambi restituito una previsione di aumento medio globale

di 4 °C entro il 2100, nel caso dello scenario di emissione più pessimistico (SRES-A2).

Rispetto al precedente rapporto IPCC del 2001, il guadagno in qualità della prossima edizione sarà soddisfacente, per via del numero di modelli impiegati, dell'investimento in termini di ore di calcolo e dell'ampiezza della base di dati. I risultati si tradurranno in una migliore comprensione degli impatti a livello regionale, e nella caratterizzazione degli eventi estremi.

L'affidabilità dei modelli climatici è in aumento, essendo stati in grado di simulare correttamente l'aumento di temperatura intervenuto nel corso del XX secolo. Significative incertezze permangono in merito al ruolo delle nubi e degli aerosol nei confronti della radiazione solare. Anche i più sofisticati modelli sono semplificazioni di un sistema estremamente complesso quale è quello atmosferico. Sono per nulla infallibili, ma sono il migliore mezzo oggi a disposizione per effettuare delle previsioni ragionevolmente verosimili sul futuro climatico della Terra.





5.4, 5.5 - Esempi di uscite di modelli climatici, tratti dall'archivio del progetto Prudence. In alto, previsioni della variazione delle precipitazioni estive e invernali in Europa secondo lo scenario IPCC-SRES-A2 (periodo 2071-2100): sulle Alpi si profila un aumento della piovosità invernale e una diminuzione di quella estiva. Qui sopra, alcune possibili evoluzioni dell'anomalia di temperatura massima estiva in Europa, prospettate dai modelli «membri» del progetto Prudence: la media delle previsioni dei singoli modelli rappresenta lo scenario futuro più probabile, vale a dire un aumento di temperatura di 2.8 °C sulla Svizzera meridionale in estate.

Nonostante le progressive migliorie, le numerose retroazioni — anche non lineari — che agiscono all'interno del sistema climatico, difficilmente rappresentabili a livello modellistico, fanno sì che sia illusorio attendersi in un futuro prossimo una diminuzione sostanziale dell'incertezza che ancora permane intorno alla previsione climatica, specialmente a livello di dettagli regionali e locali. Tuttavia non vi sono dubbi sul fatto che i modelli siano in grado di fornire comunque preziose indicazioni sull'evoluzione climatica del futuro, base indispensabile per effettuare opportune scelte strategiche a livello economico, politico e territoriale (HENGEVELD & *al.*, 2002). Per il presente lavoro, in assenza di precedenti studi dettagliati sui cambiamenti climatici futuri in Valle d'Aosta, si farà riferimento, in particolare, alle stime numeriche riportate da FREI (2004) per temperatura (cap. 6) e precipitazioni (cap. 7) nella vicinissima Svizzera meridionale (versante sudalpino), desunte dai risultati del progetto PRUDENCE (*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*), <http://prudence.dmi.dk/>.

Caldo, freddo, pioggia, neve: cosa è cambiato e cosa cambierà



Il regresso dei ghiacciai è tra gli effetti più visibili del cambiamento climatico in Valle d'Aosta: il lago alla fronte del ghiacciaio occidentale del Gran Neyron (Valsavarenche), su cui incombe la mole piramidale dell'Herbetet (15.08.1999, f. D. Cat Berro). Il lago si è formato a seguito del ritiro della fronte, che dal 1980 al 2001 ha totalizzato 75 m.



«Il problema non è di trovare un colpevole, ma di comprendere come l'uomo interagisce con il suo ambiente, e soprattutto quali siano le soluzioni strategiche per evitare una crisi ecologica.»

ERIC LAMBIN, 2004

«La nozione di catastrofe climatica ha rimpiazzato la nozione di cambiamento climatico. Tuttavia, questa voce sembra influenzare solo minimamente i processi politici.»

CLAUDIA PAHL-WOSTL, 1998

«E' più che evidente che la scienza non ci può illuminare più di tanto sul nostro futuro prossimo venturo. Ovvero, non ci può dire molto sui dettagli (sarà più conveniente nel 2050 villeggiare sul Lago Maggiore o a San Vito Lo Capo?). Ma basta solo un modesto studente di meteorologia per dirvi che, a mano a mano che la concentrazione dei gas serra aumenta, la temperatura della Terra sale, e questo non corrisponde a niente di buono.

Accade ciò che capita al fumatore incallito, sicuro che il vizio del fumo non lo porterà mai ad ammalarsi seriamente.

Per la Terra, le cose andranno sempre peggio.

E la rapidità con cui questo avverrà, non è compatibile con i nostri ecosistemi e con le nostre infrastrutture.»

GUIDO VISCONTI, 2005

6. LA TEMPERATURA

«E' inevitabile. La temperatura media della superficie terrestre è aumentata di 0.6 °C nell'ultimo secolo, principalmente per causa nostra. Finora il riscaldamento è stato piuttosto limitato, ma gli effetti già si vedono a occhio nudo.»

PAUL J. CRUTZEN (premio Nobel per la chimica), 2005

Quali segnali di cambiamento?

La temperatura è il parametro climatico che più direttamente mostra le prime evidenze del cambiamento del clima anche in Valle d'Aosta. Mentre gli effetti sulle precipitazioni non sono ancora chiaramente distinguibili dalla naturale variabilità climatica (cfr. cap. 7), l'aumento significativo

delle temperature nel corso del XX secolo, specialmente dalla metà degli Anni 1980, è ben testimoniato dalle registrazioni strumentali, ed è peraltro confermato dall'evoluzione di importanti indicatori naturali come i ghiacciai, pressoché ovunque in forte regresso da circa 150 anni.

Durante il XX secolo le temperature globali sono cresciute di 0.6÷0.7 °C, ma con differenze tra una regione e l'altra del globo.

Sulle Alpi l'incremento è stato di molto superiore, con +1.1 °C dal 1890, come riportato da BÖHM & al. (2001) e da BRUNETTI & al. (2006). Anche la vicina Svizzera ha sperimentato un riscaldamento nettamente più consistente della media globale nel XX secolo: +1.0 °C nel Canton Ticino, +1.3

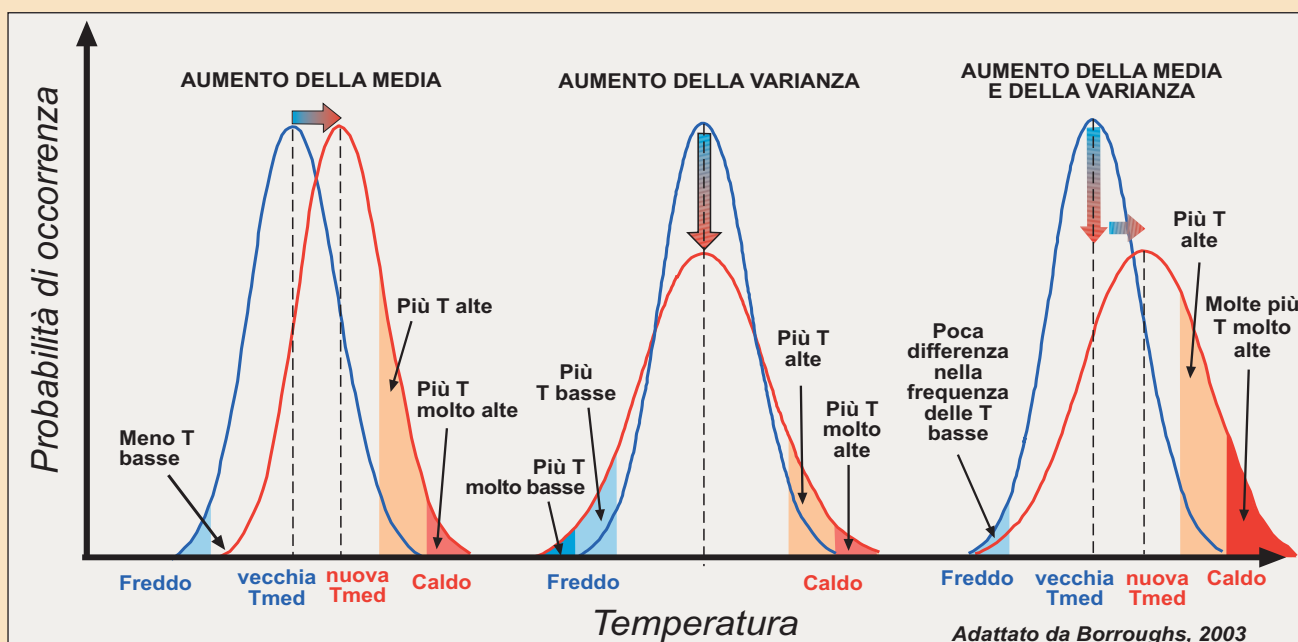
6.1 - Calda atmosfera autunnale l'11.10.2003 a Petit Rhon (Emarese), sulle pendici del Col de Joux. Fino alla fine degli Anni 1990 l'autunno era la sola stagione a non mostrare significativi aumenti di temperatura, dopodiché è iniziata una serie di stagioni più calde del normale, culminata in particolare negli autunni 2001 e 2004 (f. D. Cat Berro).



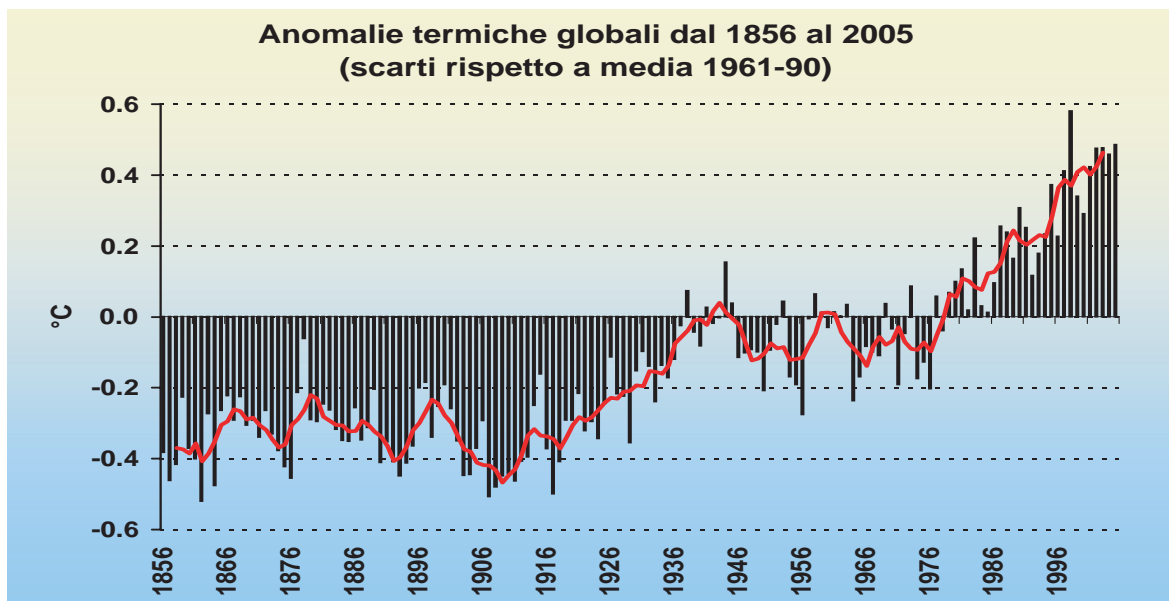
Cambiamento climatico e distribuzione statistica delle temperature

I valori di un campione di misure di un parametro omogeneo (ad esempio la temperatura) si distribuiscono secondo la curva di Gauss o «*distribuzione normale*» o «*gaussiana*». Il valor medio coincide con il massimo della curva ed è il valore più probabile, cioè quello che, nell'insieme delle misure, presenta la più alta frequenza di accadimento. La dispersione dei valori di temperatura intorno al valor medio è data dalla *varianza* (σ); serie di misure caratterizzate da una grande varianza si traducono in una curva più «larga» rispetto a quelle caratterizzate da una piccola varianza. Consideriamo l'insieme delle misure di temperatura; se la temperatura aumenta la distribuzione normale può variare in tre modi diversi (figura sotto, 6.2):

- Aumento della temperatura senza cambiamento nella varianza:** la nuova distribuzione avrà la stessa forma della precedente ma sarà semplicemente tralata verso destra. Ne risulta un aumento nella frequenza delle temperature elevate e molto elevate, mentre diminuisce la frequenza delle temperature molto basse.
- Aumento della varianza senza aumento della temperatura media:** la nuova distribuzione appare più larga e schiacciata; in questo caso, nonostante la temperatura media sia uguale, aumenta la probabilità di avere sia temperature molto elevate sia molto rigide.
- Aumento della media e della varianza:** la nuova distribuzione è tralata verso destra ed appare anche più «larga» e «schiacciata». Oltre ad aumentare la temperatura media, aumenta anche notevolmente la probabilità di avere temperature molto elevate, mentre non ci sono variazioni significative nella frequenza di occorrenza delle temperature basse.



6.3 - Anomalie termiche globali dal 1856 al 2005, rispetto alla media del trentennio di riferimento 1961-90. Evidente il forte riscaldamento successivo agli Anni 1970. L'anno più caldo è stato il 1998, con uno scarto di +0,58 °C dalla media. Fonte: CRU - Univ. East Anglia, UK.



Negli ultimi 100 anni 0.6 °C in più: tanto o poco?

Perché preoccuparsi di un aumento di temperatura che - in fondo - è assai inferiore alle variazioni che di solito si osservano tra un anno e l'altro in una località? In realtà, solo in apparenza si tratta di un cambiamento trascurabile, poiché si parla di una variazione media calcolata su un lungo periodo di tempo e a scala planetaria, già in grado di recare vistosi cambiamenti ambientali, facendo alzare l'isoterma 0 °C di 100 m sulle Alpi, Valle d'Aosta compresa; circa la metà della superficie glaciale presente nella prima metà del XIX secolo (massimo della Piccola Età Glaciale) è infatti scomparsa. Inoltre non si ha riscontro di un cambiamento climatico tanto rapido almeno negli ultimi 2000 anni di storia terrestre (MOBERG & *al.*, 2005). Circa 11.000 anni fa sono bastati circa 6 °C di incremento termico per passare dalle grandi glaciazioni - che ricoprivano ogni valle aostana con un mantello di ghiaccio spesso fino 800÷1000 m - a condizioni temperate simili a quelle attuali.

°C sui cantoni nord-orientali e ben +1.6 °C in quelli occidentali. Questo comportamento particolare sulla regione alpina potrebbe spiegarsi in parte con la retroazione positiva indotta dalla minore permanenza della neve (minore albedo, maggiore assorbimento di radiazione solare), e dalla sovrapposizione di altre fluttuazioni climatiche come la NAO (cfr. approfondimento a pag. 52), e d'altra parte sarebbe in linea con il maggiore riscaldamento previsto nelle zone interne e fredde dei continenti (IPCC, 2001, in AA.VV., 2002).

Il Novecento e gli Anni 1990 sono stati rispettivamente il secolo e il decennio più caldi da 1000, probabilmente 2000 anni (cfr. cap. 4), e il 1998 è stato l'anno più caldo sicuramente almeno dal 1856 a livello planetario. Complessivamente, il riscaldamento osservato finora è stato più intenso nell'emisfero settentrionale e di notte.

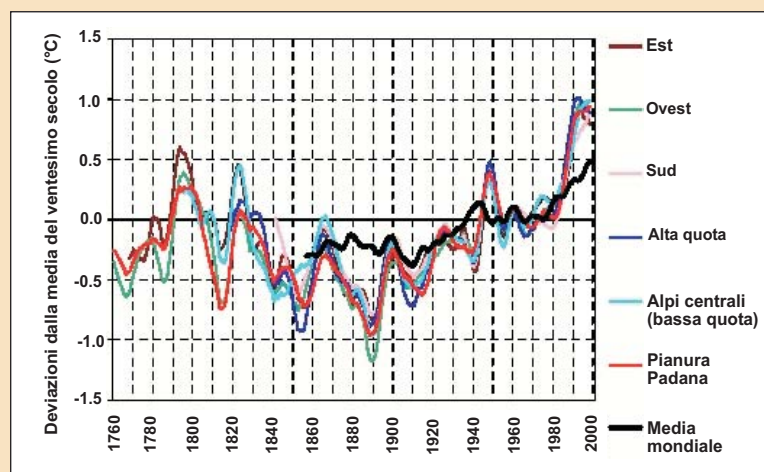
L'incremento termico molto rapido degli ultimi 50 anni non è più spiegabile ricorrendo soltanto alla variabilità naturale del clima, ma — secondo l'IPCC — sarebbe in

gran parte da attribuirsi alle azioni umane; in questo periodo, considerando i soli fattori naturali forzanti il clima, ci si sarebbe dovuti attendere invece un lieve raffred-

L'isola di calore urbana e le disomogeneità nei dati.

Fonti di incertezza sul riscaldamento globale?

Non sempre le serie storiche di dati meteorologici, specialmente quelle di temperatura, sono affidabili e utilizzabili così come sono desunte dai registri degli osservatori: vi sono talora delle disomogeneità che ne compromettono l'utilizzo, dovute a una collocazione degli strumenti non ottimale (termometro investito dalla radiazione solare), a problemi di taratura, a cambiamenti nelle condizioni ambientali intorno alla stazione (crescita di alberi, costruzione di nuovi edifici), a negligenza dell'osservatore, ecc... Il lavoro del climatologo consiste anche nell'analizzare e «filtrare» tali serie climatiche, procedendo a un attento lavoro di correzione e omogeneizzazione, oppure scartandone l'utilizzo qualora i difetti siano gravi. Dunque soltanto le serie climatiche di buona qualità devono rientrare nelle banche dati per lo studio dei cambiamenti del clima. Spesso i detrattori del riscaldamento globale (cfr. p. 18) sostengono che buona parte dell'aumento di temperatura rilevato dagli osservatori meteorologici nel XX secolo in realtà sia dovuto all'intensificazione dell' «isola di calore» urbana, piuttosto che a un reale riscaldamento atmosferico. Ciò non corrisponde al vero, poiché il fenomeno dell'isola di calore era già noto anche nel 1700, e gli strumenti da sempre collocati nei centri cittadini generalmente non hanno subito gravi modificazioni nel loro intorno. Inoltre, l'aumento di temperatura si osserva anche in località rurali (si veda il caso di Vercelli-Cascina Boraso, in CAT BERRO & al., 2005) e di alta montagna, laddove l'influenza disturbatrice della città non si fa sentire. L'aumento di temperatura osservato in superficie d'altra parte è confermato anche da



un aumento misurato dalle radiosonde nell'alta atmosfera (AA.VV., 2006), dalle analisi degli anelli di accrescimento degli alberi e dalla riduzione nell'estensione della copertura nevosa e glaciale.

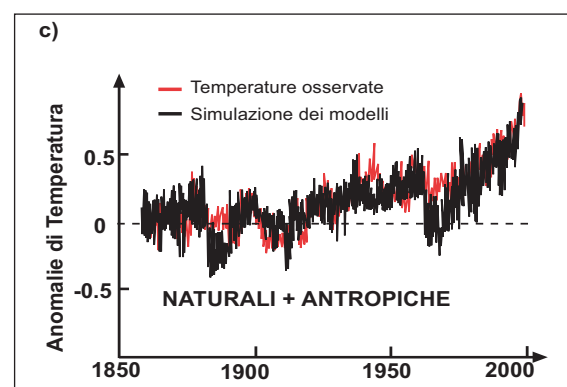
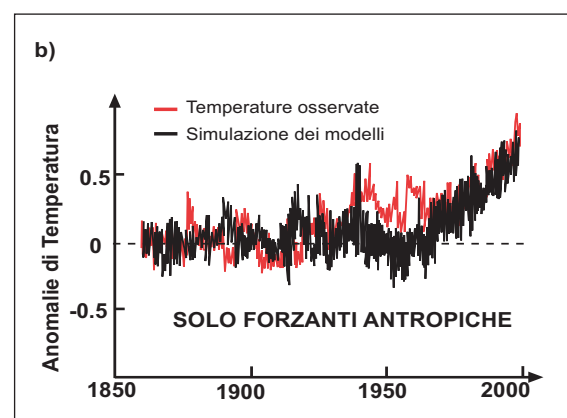
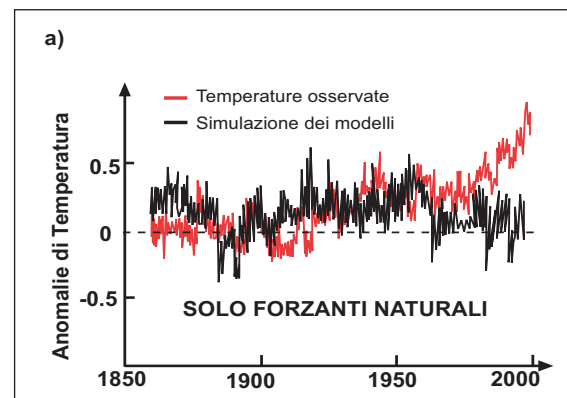
6.4 - Le curve delle anomalie termiche rilevate su diversi settori delle Alpi mostrano negli ultimi decenni un incremento di temperatura del tutto analogo a quello riscontrato nelle città della pianura padana (linea rossa), smentendo le critiche che vorrebbero i dati delle serie storiche inficiati dall'isola di calore urbana (BÖHM & al., 2001).

6.5 a, b, c - Confronti tra le anomalie di temperatura globali osservate e quelle ricostruite tramite i modelli climatici. Le simulazioni sono distinte separando l'evoluzione attesa considerando soltanto le forzanti climatiche naturali (a), soltanto quelle antropiche (b), oppure entrambe (c). Si noti come le sole forzanti naturali avrebbero dovuto addirittura produrre un lieve calo delle temperature nella seconda metà del XX secolo (a), in contraddizione con quanto misurato strumentalmente. Soltanto prendendo in considerazione anche le forzanti antropiche (c) la ricostruzione dei modelli si avvicina molto alla realtà (da HENGEVELD & al., 2002, *ridis.*).

damento a causa della minore attività solare, e dell'intensa attività vulcanica (HENGEVELD & al., 2002).

Contrariamente a quanto si riteneva fino ad alcuni anni fa, l'aumento di temperatura si è fatto sentire non soltanto al suolo, ma a tutti i livelli della troposfera (fino a 10÷12 km di altezza), come indicano le versioni più recenti di tutte le serie di dati ottenuti da satelliti e radiosonde, recentemente oggetto di uno studio da parte dell' U.S. *Climate Change Science Program*, che ne ha finalmente corretto errori e imprecisioni dovuti alle diverse tarature degli strumenti impiegati (AA.VV., 2006). In superficie il riscaldamento più importante ha avuto inizio attorno al 1976: le temperature globali sono aumentate di 0.12 °C per decennio dal 1958, e di 0.16 °C dal 1979, mentre quelle troposferiche sono aumentate di 0.14 °C e di 0.10÷0.20 °C per decennio nei due rispettivi periodi.

Oltre alla coerenza dei dati di temperatura (cfr. approfondimento sull'affidabilità dei dati a p. 46), il riscaldamento in atto è confermato soprattutto dalla riduzione dei ghiacciai, che in circa 150 anni sulle Alpi hanno perso circa la metà della superficie, dall'aumento dei livelli marini di 10÷20 cm, dall'estensione della copertura nevosa, che sull'emisfero Nord è scesa del 10% dagli Anni 1960, e da quella della banchisa artica, ridottasi del 10÷15% dagli Anni



1950 (HENGEVELD & al., 2002).

La situazione in Valle d'Aosta

Le analisi statistiche mostrano le prime evidenze strumentali del riscaldamento climatico in Valle d'Aosta. La base di dati utilizzata comprende tutte le stazioni termometriche della regione, tramite le quali è stato possibile calcolare gli indici di anomalia

standardizzata a livello regionale (SAI = *Standardized Anomaly Index*), ma — data la loro elevata significatività territoriale, e per la loro buona qualità ed omogeneità — maggiore attenzione è stata riservata alle serie termometriche di Aosta-St-Christophe (544 m) e di Gressoney-D'Ejola (1850 m), ben rappresentative delle zone di fondovalle e di media montagna.

Andamento delle anomalie termiche dal 1818 al 2005: fa più caldo

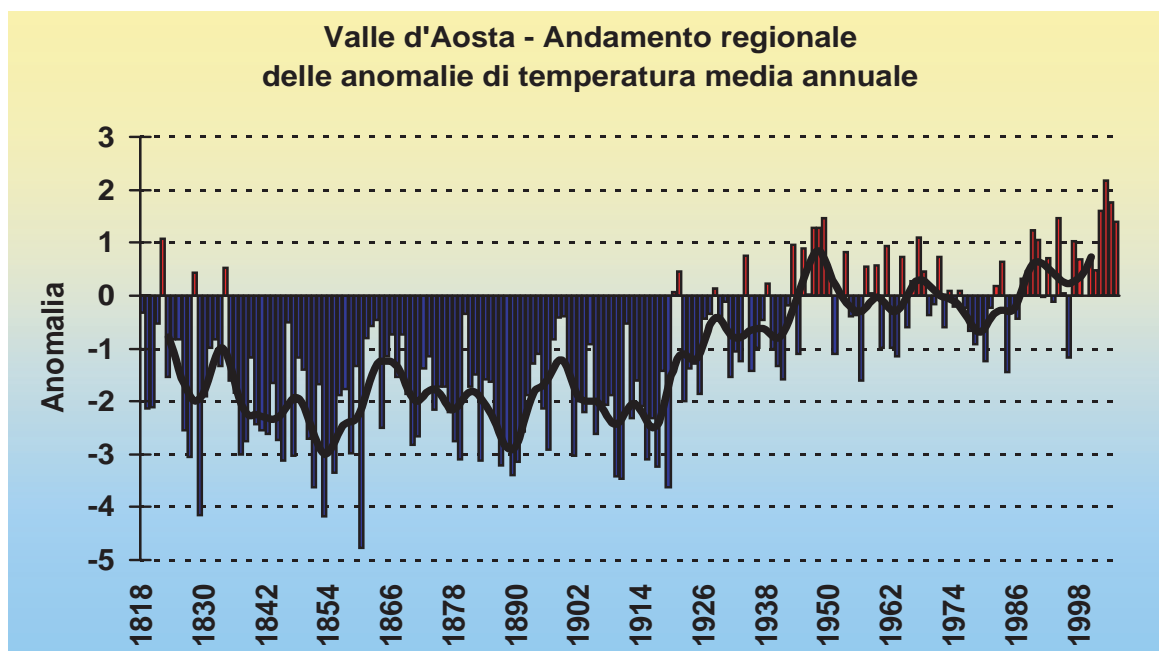
Grazie alla disponibilità di lunghe serie storiche di misura in Valle d'Aosta, è stato possibile elaborare l'indice regionale di anomalia (SAI = *Standardized Anomaly Index*) delle temperature medie (annuale e stagionale) per il periodo dal 1818 al 2005. Si tenga presente però che fino al 1839 era attivo soltanto l'osservatorio del Gran San

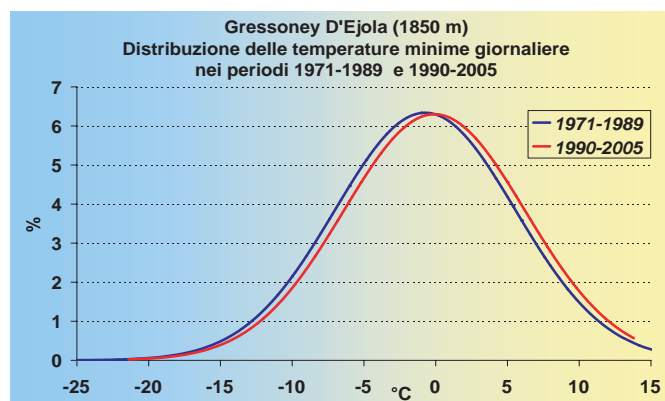
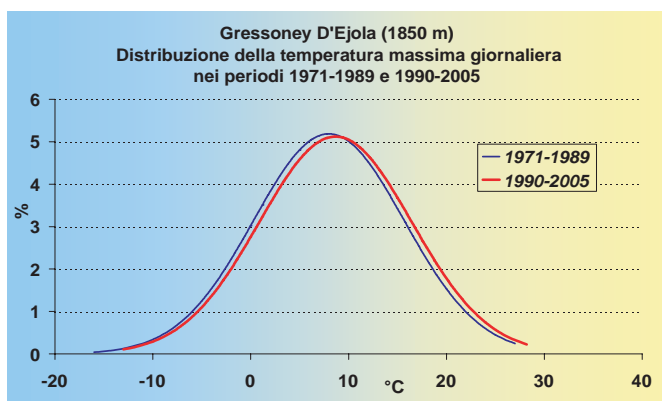
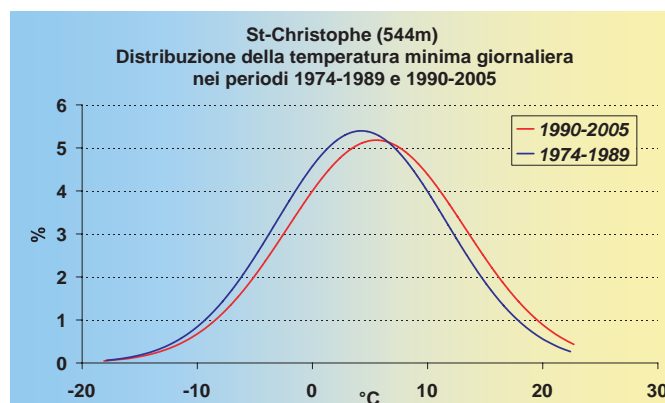
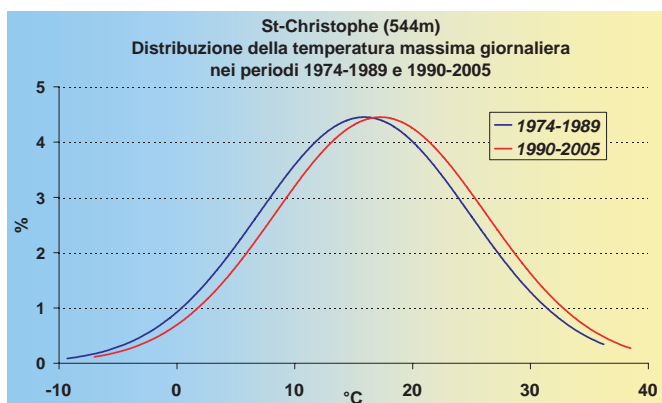
Bernardo, cui si aggiunse quello di Aosta nel 1840, e soltanto dal 1925 il numero di stazioni termometriche disponibili cresce fino a portarsi intorno alle 10-15 unità nell'ultimo trentennio del XX secolo.

L'esame condotto sulle temperature medie annuali di tutte le serie disponibili evidenzia una lunga fase fredda dal 1818 al 1920 circa, con ricorrenti e accentuate anomalie negative rispetto alla media del trentennio di riferimento 1971-2000 (fig. 6.6).

In seguito, gli anni più freddi divengono meno frequenti, e si alternano a sequenze di anni più caldi del normale. L'eccesso termico del periodo 1943-1950, con un picco positivo nel 1949, è comune a molte serie termometriche sia regionali sia europee, ed è particolarmente evidente tra Valle d'Aosta e alto Piemonte. Una nuova

6.6 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature annuali in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Si tenga presente che l'indice è stato calcolato sulla sola stazione del Gran San Bernardo dal 1818 al 1839, cui si è aggiunta quella di Aosta dal 1840, e solo dagli Anni 1920 il numero di stazioni considerate aumenta. Il 2003 è stato l'anno più caldo, il 1860 il più fresco.





6.7, 6.8, 6.9, 6.10 -
Variazione nelle distribuzioni delle temperature minime e massime giornaliere a St-Christophe (tra i periodi 1974-89 e 1990-2005) e Gressoney-D'Ejola (tra i periodi 1971-89 e 1990-2005).

fase più fresca si rileva nel periodo 1968-1980, poi dalla metà degli Anni 1980 ha inizio una marcata tendenza al riscaldamento, tuttora in corso, la più importante nel periodo qui considerato. Oltre agli anni — già assai caldi — di metà XX secolo (1947 e 1948), particolarmente anomali risultano il 1989, 1994 e tutto il periodo 2002-2005; il 2003 è stato l'anno complessivamente più caldo in Valle d'Aosta. Inoltre, nel decennio 1996-2005, solo il 1996 è risultato più fresco del normale.

Distribuzione di frequenza delle temperature minime e massime: verso il caldo

Considerando due stazioni meteorologiche rappresentative della situazione nei

fondovalle e in montagna, rispettivamente St-Christophe (544 m) e Gressoney-D'Ejola (1850 m), e analizzando la variazione della distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere tra i periodi 1971-1989 e 1990-2005 (fig. da 6.7 a 6.10), si evidenzia in entrambi i casi un aumento della temperatura (spostamento della curva verso destra), più evidente nella stazione a bassa quota. Nel caso di Gressoney si nota invece una drastica diminuzione della frequenza dei valori minimi estremi, inferiori cioè a -20°C .

Andamento delle temperature durante l'anno: più caldo, eccetto l'autunno

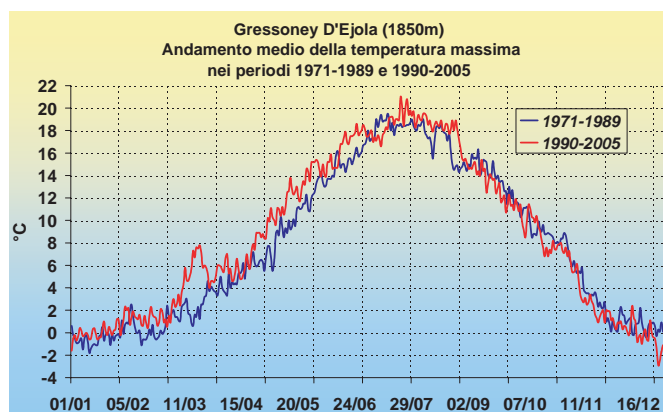
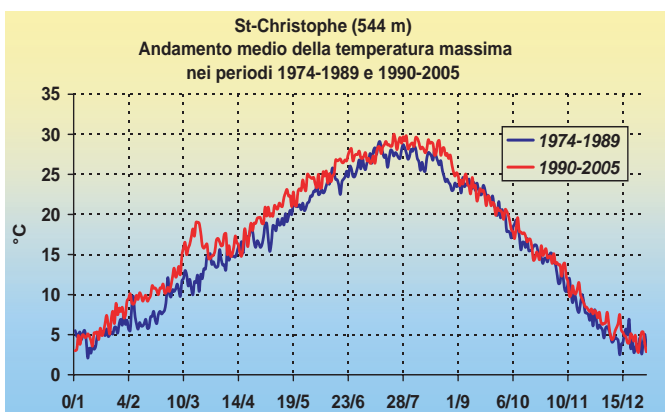
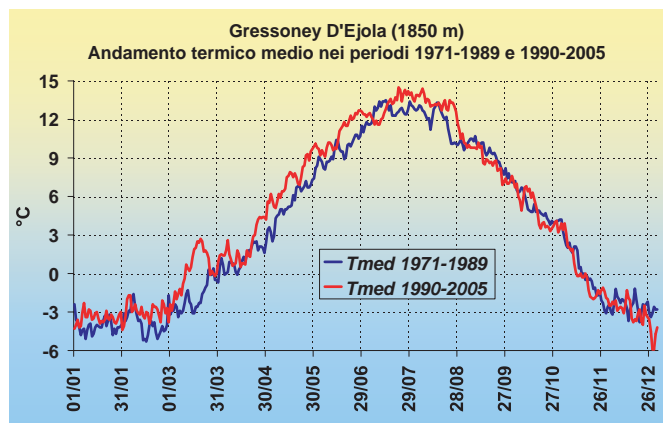
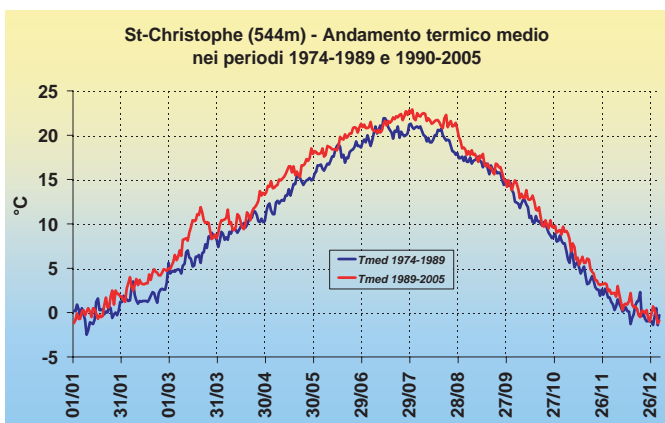
Anche l'andamento medio delle tempera-

6.11, 6.12, 6.13, 6.14 -
 Variazioni nell'andamento medio delle temperature massime e medie giornaliere durante l'anno a St-Christophe e Gressoney - D'Ejola. In entrambi i siti il periodo 1990-2005 è stato più caldo del ventennio precedente, specialmente in primavera ed estate. Si noti in particolare il precoce tepore sopraggiunto intorno alla metà di marzo. Assai meno pronunciato il riscaldamento autunnale.

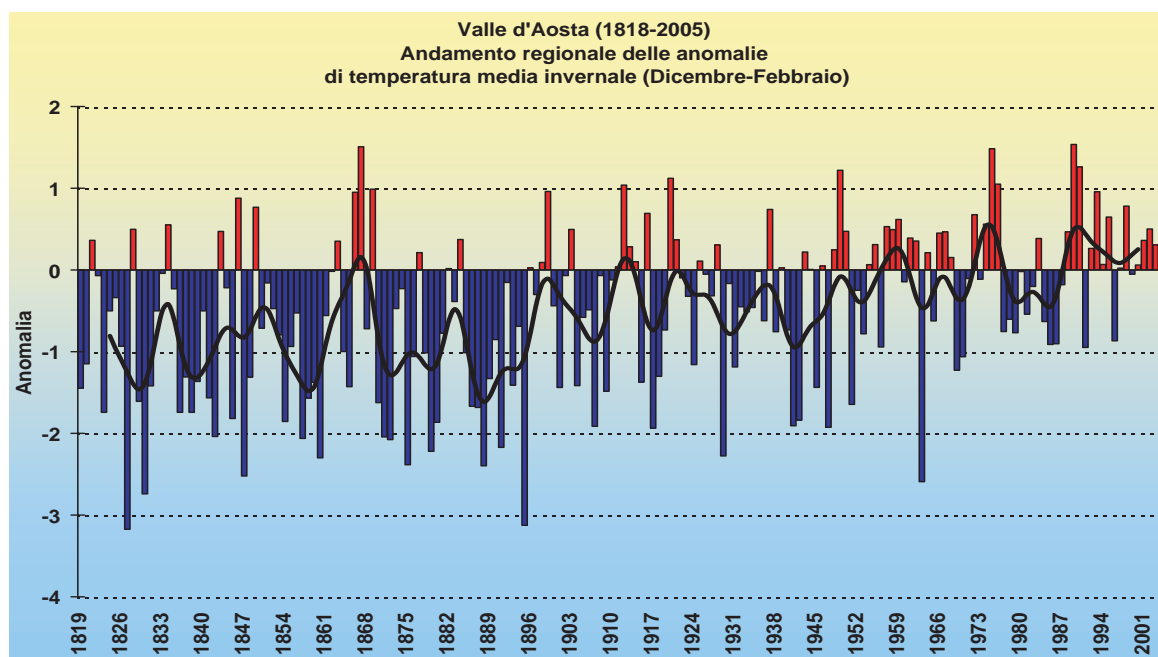
ture nell'arco dell'anno, ottenuto considerando la temperatura media di ciascun giorno dal 1° gennaio al 31 dicembre nei due periodi di riferimento (fino al 1989 e dal 1990 al 2005), mostra come, negli ultimi 15 anni, le giornate siano state mediamente più calde rispetto ai quindici anni precedenti (fig. 6.11 e 6.12). L'aumento è più evidente in primavera ed estate, con un netto riscaldamento a febbraio ed un picco pronunciato nel mese di marzo, sia nelle stazioni in quota sia a fondovalle, mentre in autunno l'incremento della temperatura è stato più contenuto, anzi, nelle stazioni in quota si è registrato perfino un leggero calo.

Analoghe considerazioni si possono trarre osservando l'andamento medio durante l'anno della temperatura massima giornaliera (fig. 6.13 e 6.14).

Inoltre è interessante notare come, nei casi sia delle temperature medie sia delle temperature massime, è sempre presente una brusca transizione dalla stagione estiva a quella autunnale (la cosiddetta «rottura dell'estate»), all'arrivo di temporali e venti più freschi dall'Atlantico: in entrambi i periodi di riferimento, verso la fine dell'estate si registra un calo improvviso della temperatura, mediamente anche di 5-6 °C in pochi giorni. Questo fenomeno, che negli Anni 1970 e 1980 avveniva in media verso



6.15 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie invernali in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. La variabilità interannuale è forte, ma si nota una tendenza al riscaldamento, con inverni miti più frequenti nella seconda metà del XX secolo.



la metà di agosto, di recente sembra essere ritardato di 10-15 giorni, slittando così tra gli ultimi giorni di agosto e i primi di settembre.

Variazioni nelle temperature stagionali

Considerando le serie degli indici di anomalia regionale, il riscaldamento atmosferico durante il XX secolo è pure evidente a livello stagionale, ma risulta più accentuato in primavera e poco significativo in autunno.

Inverno: quasi sempre mite di recente

Stagioni invernali più rigide di quelle recenti si ritrovano soprattutto tra la fine degli Anni 1920 e la metà degli Anni 1950, seguite da una fase più mite fino alla fine degli Anni 1960, ma con una punta di freddo «glaciale» nell'inverno 1962-63 (fig. 6.15).

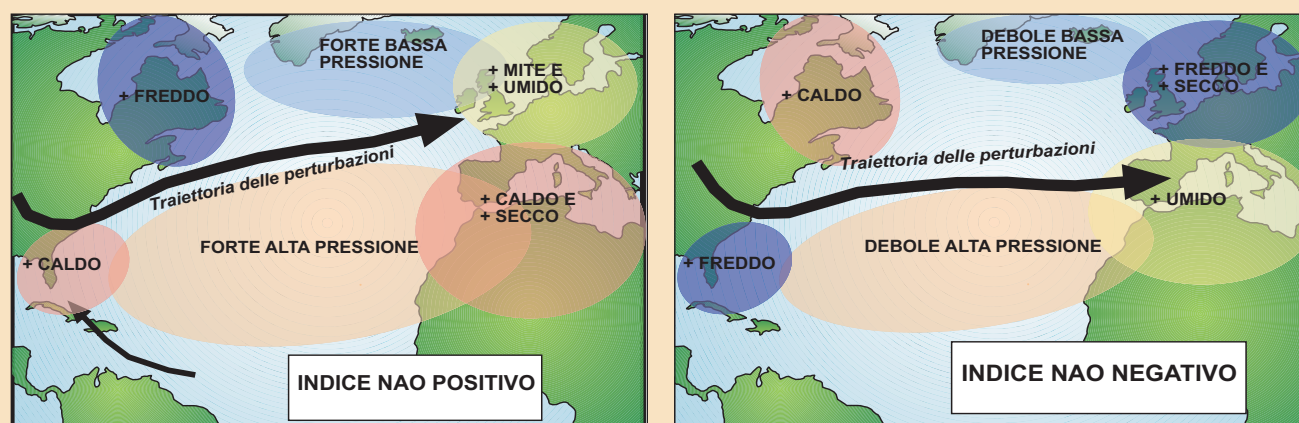
In seguito, dopo un periodo più freddo tra il 1977 e il 1987, gli inverni sono divenuti più temperati: il più mite è stato il trimestre dicembre 1988-febbraio 1989. Negli ultimi quindici anni gli unici inverni più freddi del normale sono stati il 1990-91, il 1995-96 e, benché non ancora incluso in fig. 6.15, il 2005-06.

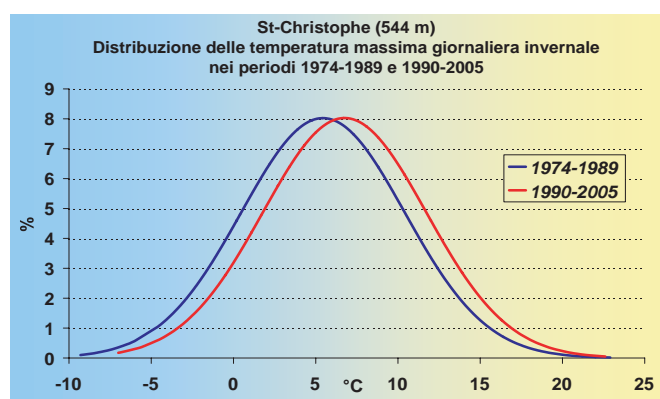
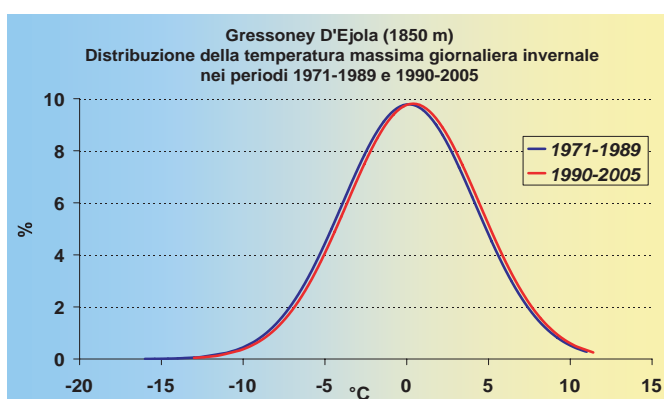
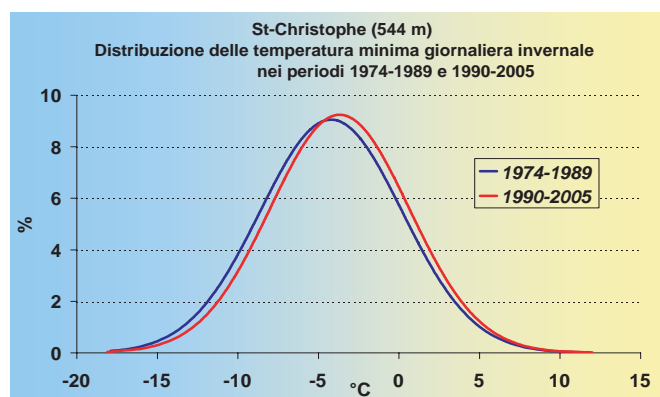
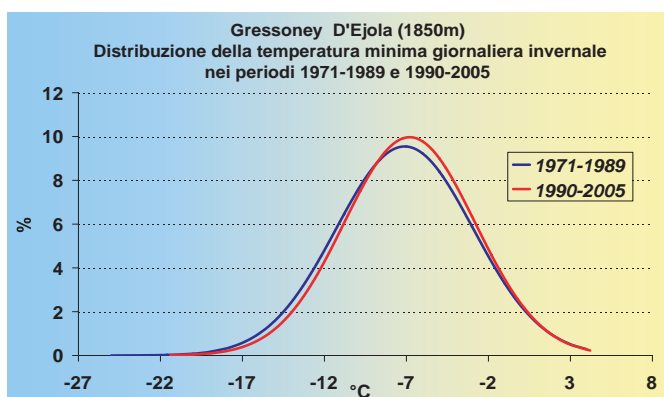
Anche l'analisi della distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere in inverno a Gressoney D'Ejola e a St-Christophe mostra l'aumento termico degli ultimi trent'anni: questo è più sensibile a St-Christophe, mentre nuovamente a Gressoney si evidenzia più che altro il drastico calo della frequenza di giornate invernali con minime estremamente rigide ($< -20^{\circ}\text{C}$) (fig. da 6.18 a 6.21).

Il clima invernale in Valle d'Aosta è strettamente correlato all'andamento della NAO

La North Atlantic Oscillation (NAO)

Nell'emisfero nord, la circolazione sull'Atlantico è caratterizzata dalla presenza di una zona di alta pressione sub-tropicale (anticiclone delle Azzorre), e di una zona di bassa pressione alle latitudini più settentrionali (depressione d'Islanda). Queste due figure bariche presentano spesso un comportamento opposto: nei periodi in cui la pressione alle Azzorre è più alta della media, si osservano valori più bassi della media in Islanda, e viceversa. Questa oscillazione, denominata NAO (*North Atlantic Oscillation*), viene descritta da un indice ottenuto dalla differenza tra la pressione al suolo tra le Azzorre e l'Islanda. L'indice NAO è positivo (fig. 6.16) quando si ha mediamente un forte gradiente di pressione tra l'Atlantico settentrionale e meridionale, cioè quando l'alta pressione subtropicale è più forte ed è estesa più a Nord del normale. In queste condizioni il flusso dei venti da Ovest si accentua sull'Europa centro-settentrionale, dando origine a stagioni miti e umide, mentre l'Europa centro-meridionale, e quindi la regione alpina, rimane sotto l'influenza dell'Anticiclone delle Azzorre, in condizioni prevalenti di clima caldo e secco. L'indice NAO è negativo (fig. 6.17) quando l'anticiclone delle Azzorre e la depressione d'Islanda sono più «deboli» del normale, e l'Europa centro-meridionale rimane maggiormente sotto l'influenza dell'anticiclone Russo-Siberiano, con condizioni di tempo freddo ma secco. La North Atlantic Oscillation è uno dei più importanti fattori di controllo della variabilità climatica a scala decennale e ha una grande influenza sulle temperature e le precipitazioni in Europa occidentale, soprattutto nei mesi invernali. A Zurigo il 56% della varianza della pressione nel periodo 1901-99 è spiegabile attraverso il comportamento NAO, così come il 72% della varianza della temperatura minima nel periodo 1961-99. Il segnale climatico legato a questi fattori a scala continentale è più percepibile in alta quota, mentre nei fondovalle e in pianura tende a essere mascherato da situazioni locali (effetti orografici, presenza di grandi città, ecc...). Secondo WANNER & al. (1997) e BENISTON (1997), l'elevata frequenza di sistemi di alta pressione riscontrata sulle Alpi negli Anni 1980 e all'inizio degli Anni 1990 è da mettere in relazione a un aumento dell'indice NAO.



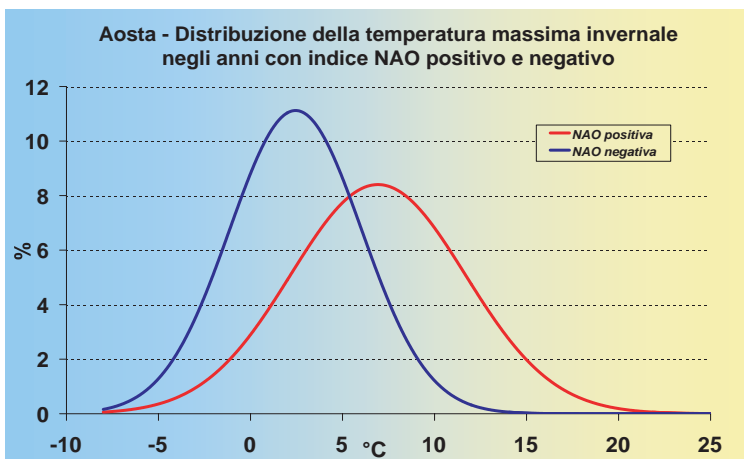
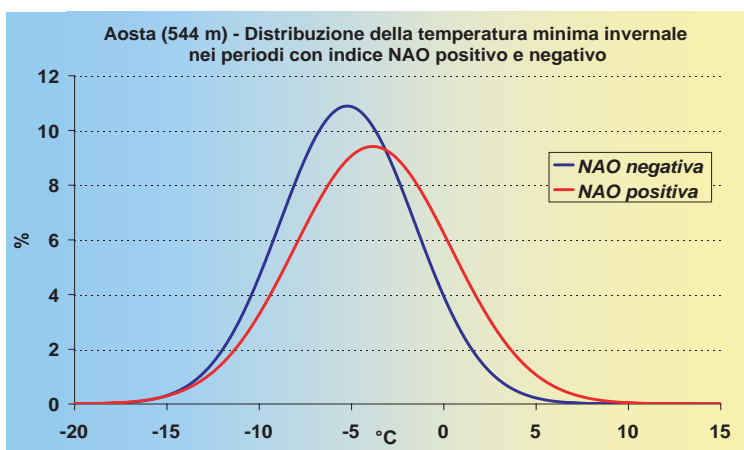
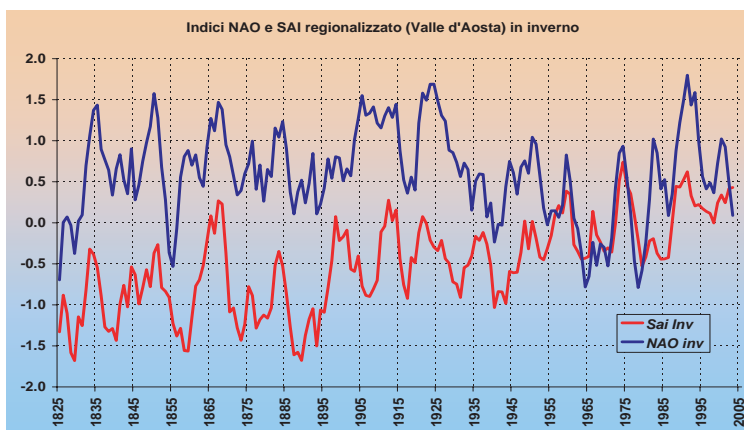


6.18, 6.19, 6.20, 6.21 - Variazioni nella distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere invernali a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. Evidente l'aumento registrato a St-Christophe nelle massime del periodo 1990-2005 rispetto al precedente periodo 1974-89.

(North Atlantic Oscillation): gli inverni con indice NAO positivo tendono ad essere più miti di quelli con indice NAO negativo. Questo è evidente confrontando gli andamenti invernali delle anomalie regionalizzate (SAI) e dell'indice NAO, filtrati con una media mobile di ordine 5 (fig. 6.22). La distanza tra le due curve negli anni anteriori al 1970 deriva dal fatto che il SAI è stato calcolato rispetto al periodo di riferimento 1971-2000, ma l'andamento appare in fase. Anche analizzando la distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere invernali a St-Christophe in inverni con notevole anomalia positiva o negativa dell'indice NAO (indice $NAO < -2$ e > 2.5) si mette in luce come gli inverni con indice NAO positi-

vo abbiano una temperatura sensibilmente più mite (fig. 6.23 e 6.24).

Questo comportamento è particolarmente evidente nel caso della temperatura massima (fig. 6.24), che, negli inverni con NAO fortemente positiva, mostra un aumento di quasi $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto a quelli con NAO fortemente negativa. In particolare, aumenta notevolmente la frequenza di giornate con temperature massime particolarmente elevate per la stagione, superiori a $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, a causa dei più frequenti episodi di föhn caldo associato a flussi occidentali. Anche negli inverni con indice NAO negativo la Valle d'Aosta è soggetta a episodi di föhn, ma questi sono associati a flussi in prevalenza più freddi da Nord, quindi il riscaldamento



6.22 - Correlazione tra gli indici invernali NAO e SAI delle temperature medie stagionali in Valle d'Aosta. A inverni con NAO positivo corrispondono condizioni più miti e viceversa.

6.23, 6.24 - Differenze nella distribuzione delle temperature minime e massime ad Aosta in base all'indice NAO. Molto evidente l'aumento delle massime negli inverni con NAO positivo, dovuto alla frequenza di föhn caldo da Ovest.

to per compressione sul versante sud-alpino in questi casi è più limitato rispetto a quanto avviene con le correnti occidentali oceani-

che, più miti. Studi recenti (SHINDELL & *al.*, 1999) mostrano come, in futuro, ci si attenda una prevalenza di configurazioni con indice NAO positivo, con inverni più miti sulle Alpi valdostane.

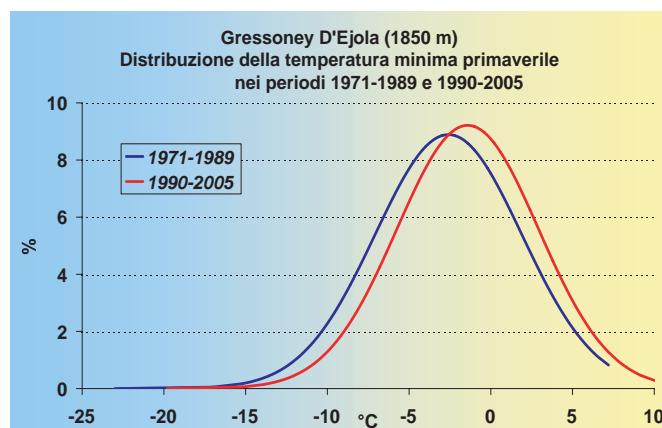
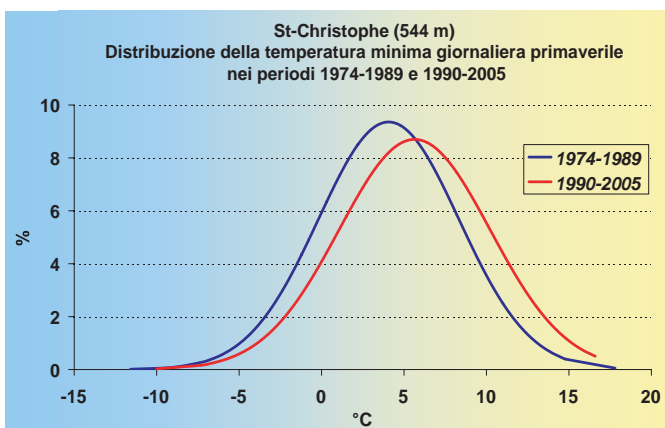
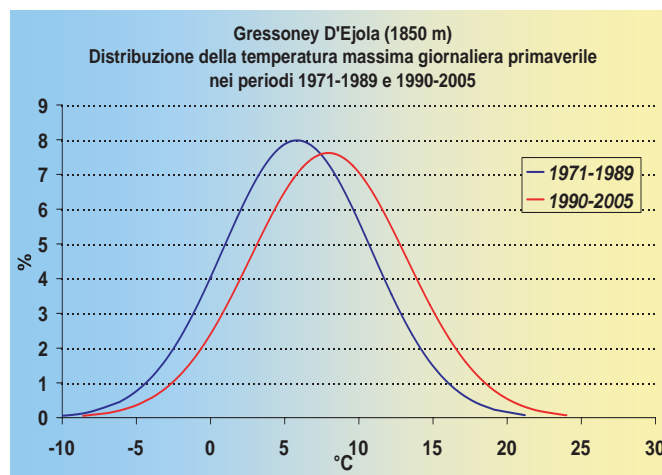
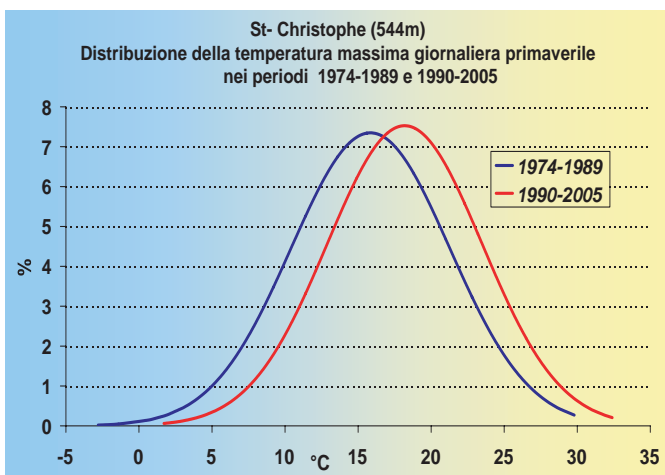
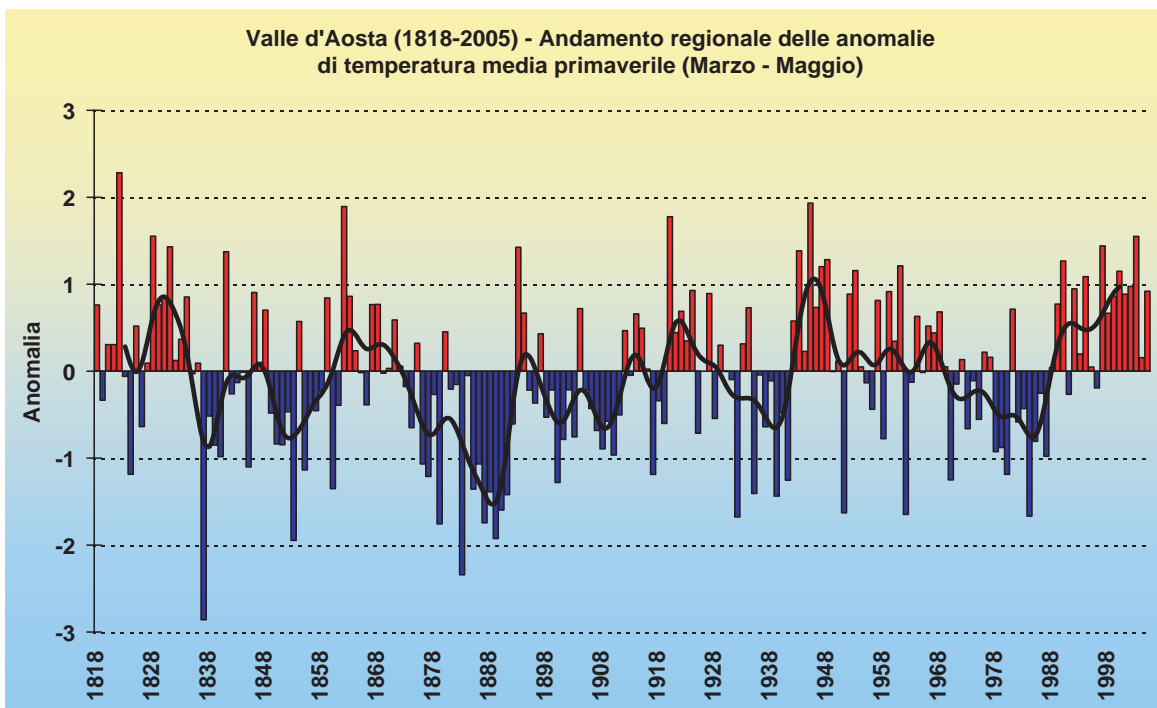
Primavera: brusco riscaldamento da fine Anni 1980

L'andamento delle anomalie termiche primaverili mostra come, anche in questa stagione, negli ultimi 15 anni si siano avute temperature ben superiori alla media, con le sole eccezioni del 1991 e del 1996, le uniche annate che presentano una debole anomalia negativa (fig. 6.25). In precedenza si era avuta un'altra fase con primavere calde, tra il 1942 e il 1968, ma intervallata da alcune stagioni molto più fredde del normale (1951 e 1962).

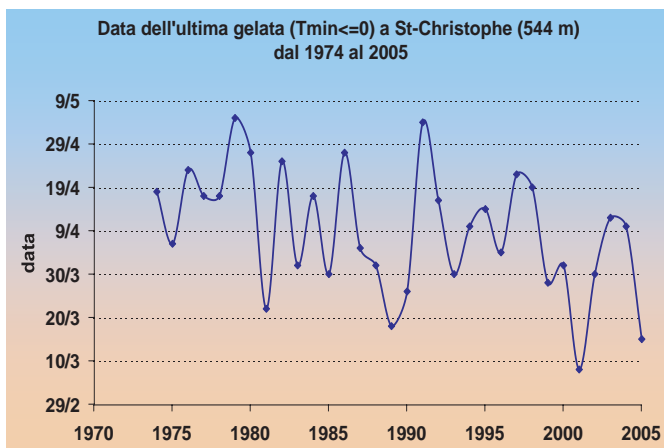
Negli ultimi 30 anni, la primavera è la stagione che presenta la tendenza al maggior aumento di temperatura.

Analizzando la distribuzione delle temperature massime giornaliere nel trimestre marzo-maggio nel periodo 1990-2005 rispetto al quindicennio precedente, si nota (fig. 6.26 e 6.27) come queste siano aumentate di 2.4 °C a St-Christophe e di 2.1 °C a Gressoney-D'Ejola; anche la temperatura minima giornaliera è aumentata, ma in modo più contenuto, rispettivamente di 1.5 °C a St-Christophe e 1.2 °C a Gressoney (Fig. 6.28 e 6.29).

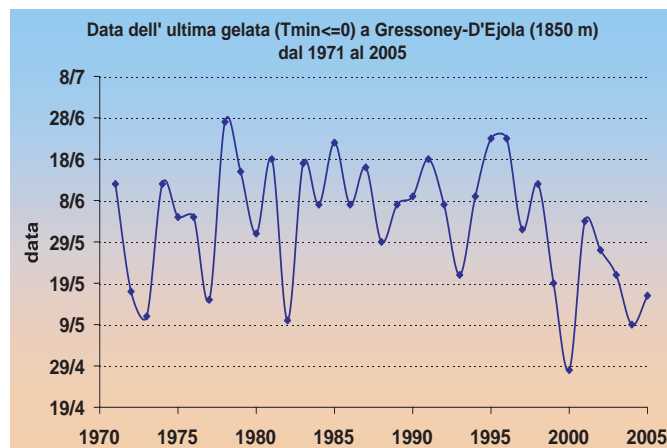
6.25 - Indice standardizzato di anomalia di anomalia (SAI) delle temperature medie primaverili in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Dal 1989 le primavere sono sempre state più miti del normale, salvo lievi anomalie negative nel 1991 e nel 1996.



6.26, 6.27, 6.28, 6.29 - Variazioni nella distribuzione statistica delle temperature minime e massime giornaliere primaverili a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola.



6.30, 6.31 - Evoluzione delle date dell'ultima gelata primaverile a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. La tendenza all'anticipo è un po' più marcata sulla fascia alpina rispetto a fondovalle.



Gelate primaverili meno frequenti

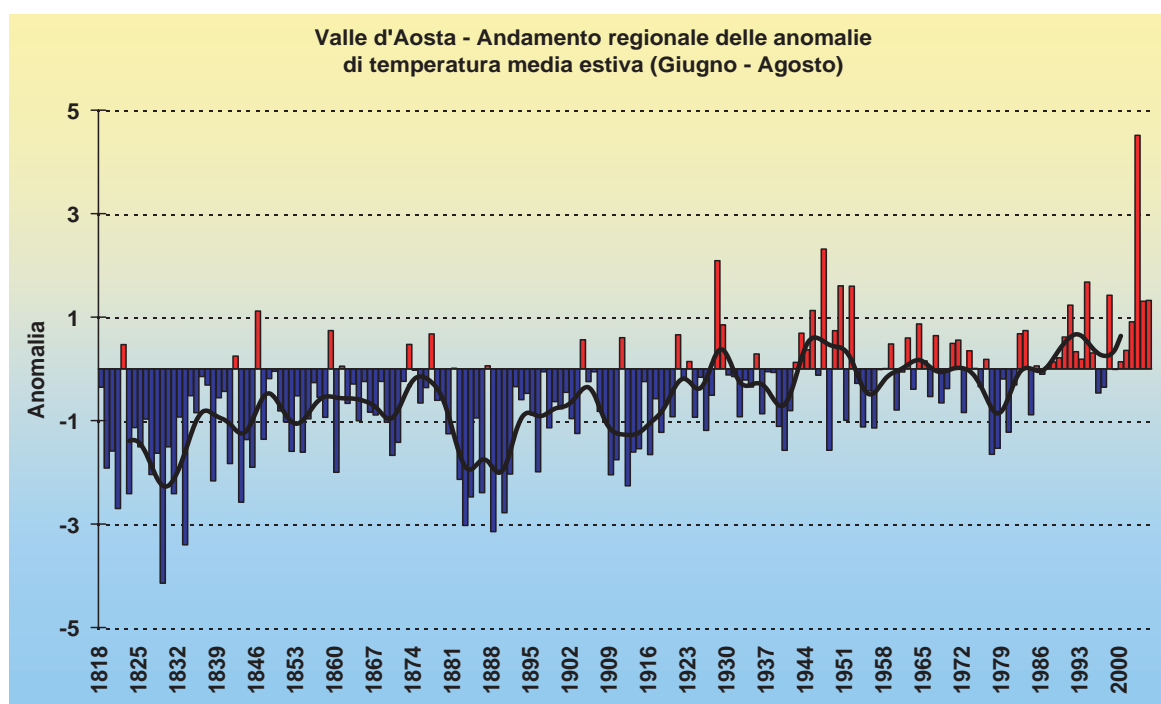
Le fig. 6.30 e 6.31 mostrano la data dell'ultima gelata primaverile a St-Christophe e Gressoney: l'andamento oscillante della curva mostra come, nonostante l'aumento delle temperature, siano ancora possibili gelate tardive, anche se con una frequenza minore rispetto al passato. La diminuzione relativa dei geli primaverili è più evidente in quota, al di fuori dello strato di inver-

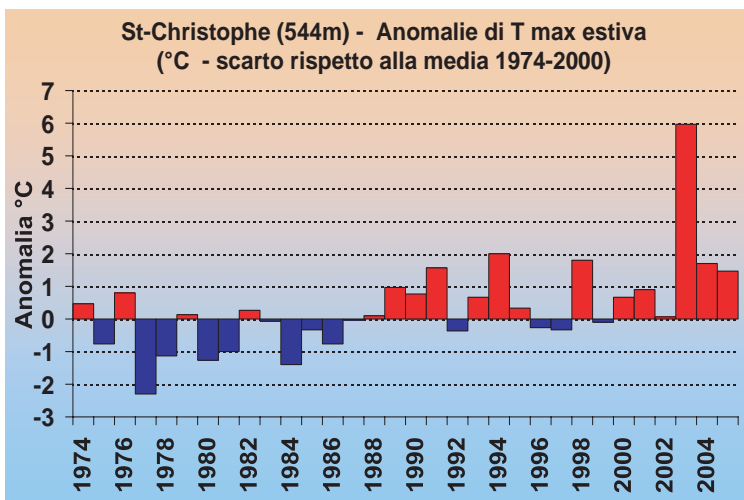
sione termica; in particolare a Gressoney, negli ultimi dieci anni è diminuito sensibilmente il numero delle gelate in giugno, evento in passato piuttosto frequente.

Estate: roventi negli ultimi anni

Anche dall'andamento dell'indice SAI nel trimestre estivo (fig. 6.32) si nota come, negli ultimi decenni, l'unico periodo con frequenti estati fresche si sia collocato

6.32 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie estive in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Le estati calde divengono molto frequenti a partire dalla metà degli Anni 1940 (salvo la tendenza fresca degli Anni 1970, caratterizzata dall'ultima breve avanzata glaciale). Spicca l'anomalia eccezionale dell'estate 2003, con indice SAI regionalizzato = 4.5.





6.33 - Anomalie delle temperature massime estive a St-Christophe rispetto alla media 1974-2000. Dopo le fresche estati degli Anni 1970-inizio 1980, iniziano a prevalere nettamente le stagioni calde, culminate nell'estate 2003 (scarto: + 6 °C).

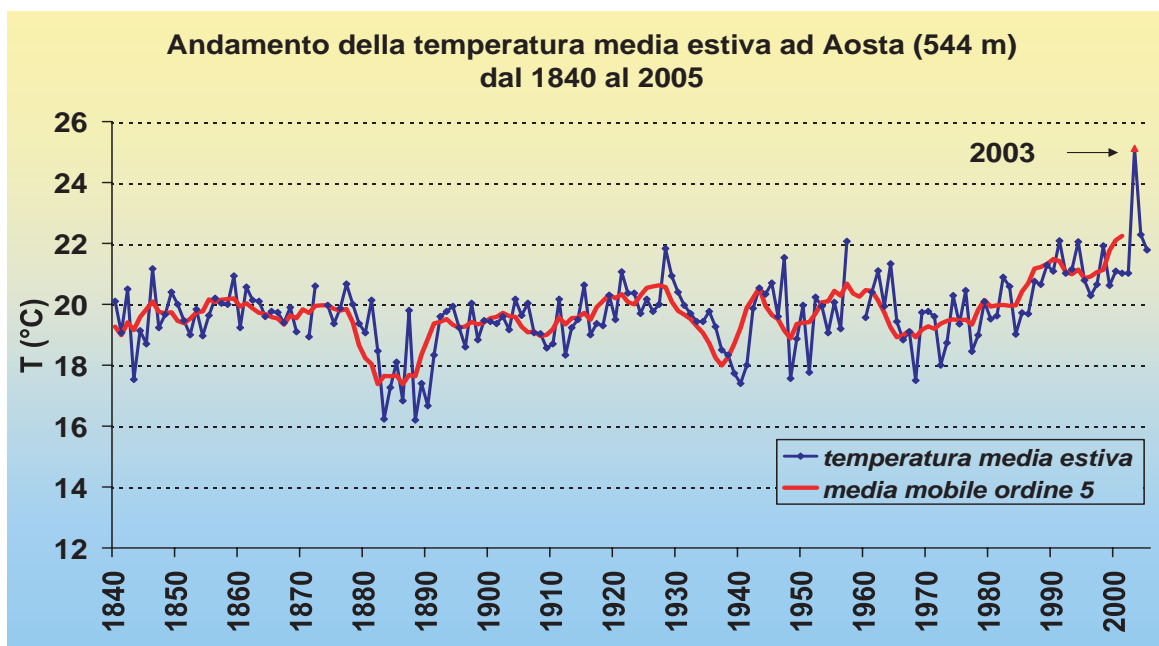
negli Anni 1970, quando infatti si osservò una breve avanzata dei ghiacciai alpini; dopo il 1990, invece, solo le estati del 1996 e del 1997 sono state relativamente più fresche della media, mentre spicca la persistenza di calori anomali nel periodo 2003-2005. In particolare, l'estate 2003 è stata la più calda in assoluto, con un'anomalia doppia rispetto ai massimi precedenti.

La fig. 6.33 mostra gli scarti dalla norma

(°C) delle temperature medie massime estive dal 1974 al 2005 a St-Christophe: dalla metà degli Anni 1980 prevalgono le estati calde, con un picco estremo nel 2003, quando la deviazione rispetto alla media del periodo 1974-2000 ha toccato i 6 °C. Per la Valle d'Aosta, e per le Alpi in generale, si è trattato dell'estate più calda da almeno 500 anni (LUTERBACHER & *al.*, 2004).

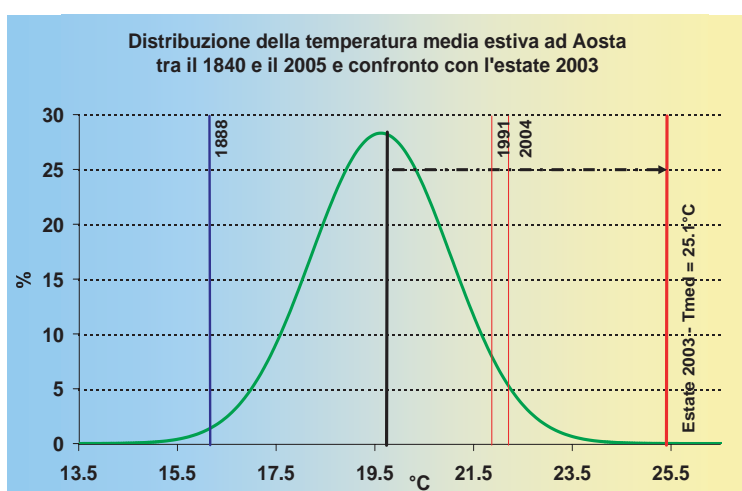
Volendo estendere l'analisi anche a tempi più remoti, si può ricostruire l'andamento delle temperature medie mensili ad Aosta dal 1840, integrando i dati rilevati dagli antichi osservatori cittadini con quelli misurati dal 1974 all'aeroporto di St-Christophe. Dal momento che le due serie non sono direttamente confrontabili, poiché l'una è ottenuta da dati rilevati in città, e l'altra, più recente, da dati rilevati in periferia, per

6.34 - Evoluzione delle temperature medie estive ad Aosta dal 1840 al 2005. Il confronto tra la serie cittadina (1840-1973) e quella aeroportuale (1974-2005) è stato possibile tramite l'applicazione di un fattore di correzione stimato dal confronto tra le stazioni meteo automatiche di St-Christophe e P.za Plouves.



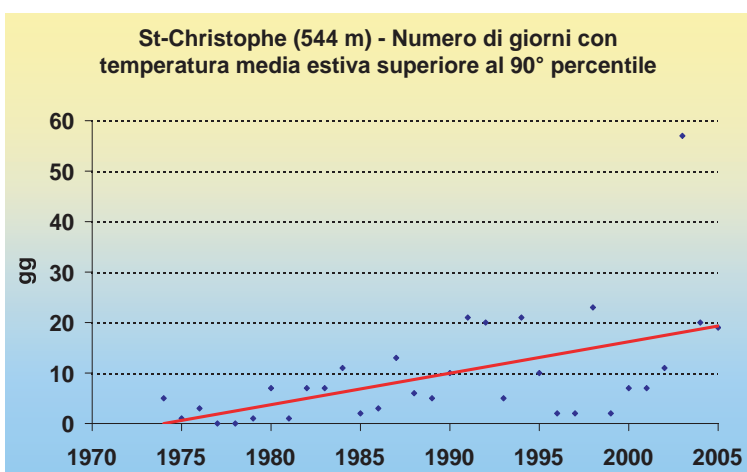
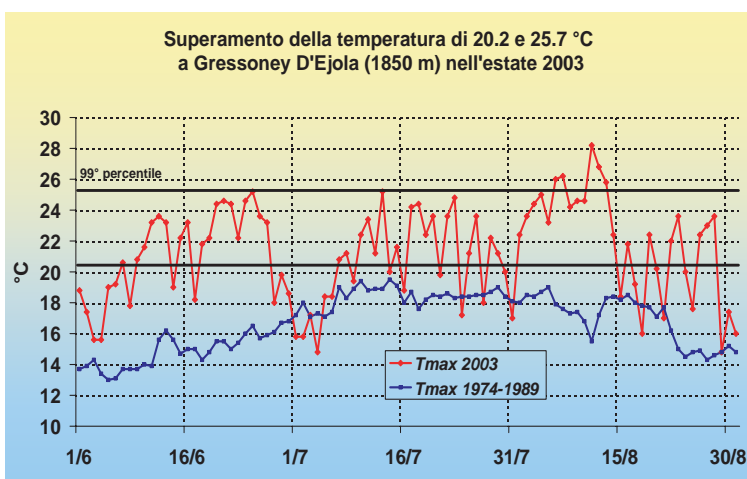
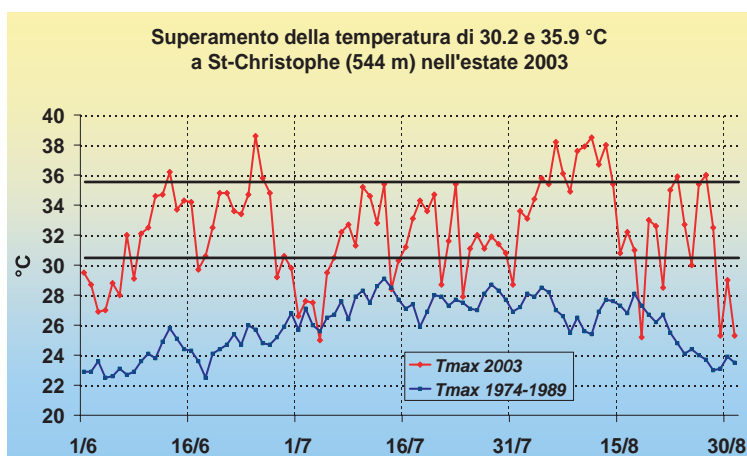
Estate tropicali: il caso del 2003

Nel trimestre giugno-agosto 2003 sull'Europa centro-meridionale si è sviluppata una serie di ondate di calore eccezionali, di entità mai osservata prima, a causa del prolungato dominio di forti anticicloni nord-africani: scarti di almeno 3 °C sulle temperature medie stagionali si sono osservate su un'area che va da dalla Spagna all'Ungheria e dall'Islanda alla Grecia, con anomalie fino a 5 unità di deviazione standard. Valori statisticamente molto improbabili, anche tenendo presente l'attuale riscaldamento (SCHÄR & *al.*, 2004). Secondo LUTERBACHER & *al.* (2004) si è trattato dell'estate più calda da almeno 500 anni. Proprio le Alpi hanno sperimentato le anomalie termiche maggiori: in Svizzera, mediamente, un giorno su due nel trimestre ha avuto temperature superiori al 90° percentile, sia sulle minime sia sulle massime (REBETZ, 2004), ma all'aeroporto di Aosta addirittura nel 63% delle giornate si è superata tale soglia sulle temperature medie. In Valle d'Aosta si sono misurati estremi di 26.3 °C a Pont-Valsavarenche il 13 agosto, 28.2°C a Gressoney-D'Ejola l'11 agosto, 31.0 °C a Cogne-Gimillian il 4 agosto, 38.6 °C a St-Christophe il 28 giugno e 38.5 °C l'11 agosto, valori mai rilevati in precedenza. Si stima che i ghiacciai alpini, specialmente quelli meno estesi, abbiano perso il 5-10% del loro volume durante questa sola estate. Una situazione di questo tipo esula sicuramente dalla naturale variabilità del clima, e per trovarne una spiegazione occorre chiamare in causa il riscaldamento indotto dall'uomo. Secondo le ricostruzioni dei modelli numerici, episodi di questo tipo potrebbero divenire sempre più frequenti, specialmente nella seconda metà del XXI secolo (BENISTON, 2004a; BENISTON & DIAZ, 2004). Per la descrizione degli effetti combinati del caldo e della siccità eccezionali sull'ambiente valdostano, si veda il cap. 7.



6.35 - Aosta, posizione delle temperature medie estive degli anni 1888 (estate più fresca), 1991, 2003 e 2004 nella distribuzione dei valori misurati dal 1840 al 2005. I 25.1 °C del 2003 mostrano una probabilità di accadimento estremamente bassa, e si collocano all'estremità destra della distribuzione statistica. I ricercatori svizzeri attribuiscono questa anomalia ai primi segni significativi del cambiamento climatico.

integrarle è stato necessario individuare dei fattori di correzione, confrontando le misure effettuate a St-Christophe e Piazza Plouves in centro-città tra il 1994 e il 2002: nei mesi da giugno ad agosto lo scarto medio tra i due siti è stato rispettivamente di +0.76 °C, +0.78 °C e +0.72 °C (più caldo in centro-città); così si è ricostruita la serie completa di temperature medie estive utilizzando i dati di Aosta-città dal 1840 fino al 1973 e successivamente i dati di St-Christophe corretti tramite il fattore ricavato. Si tenga presente che si tratta soltanto

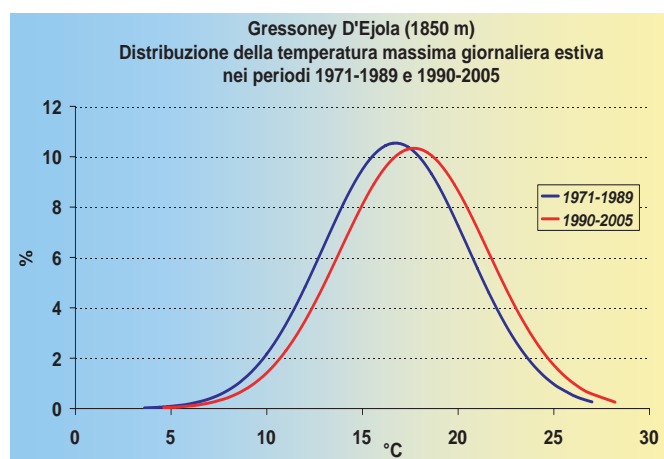
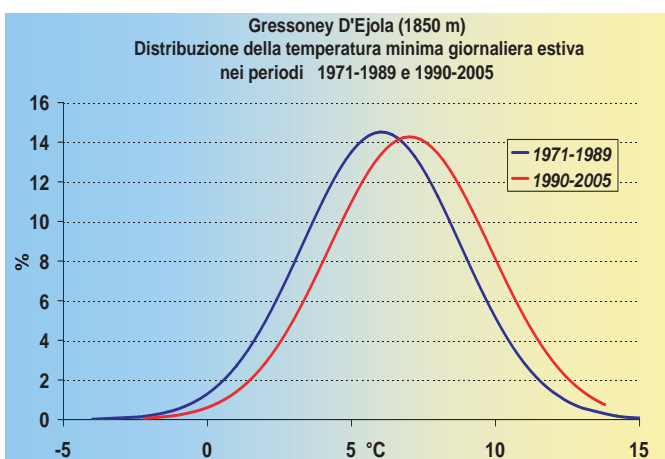
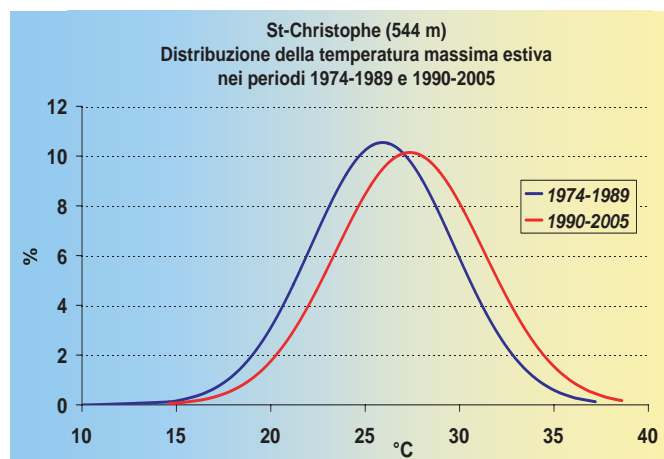
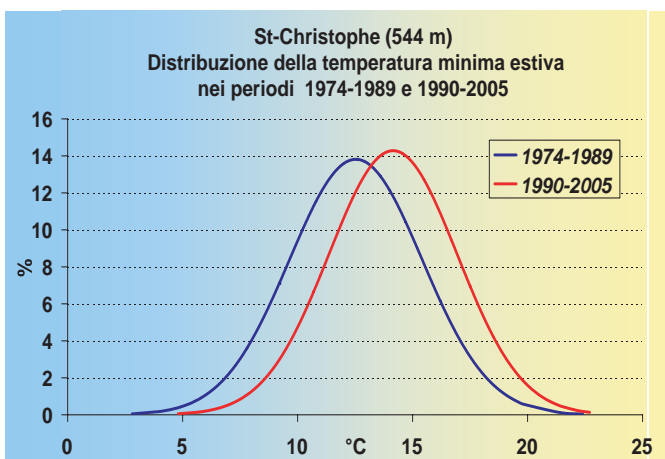
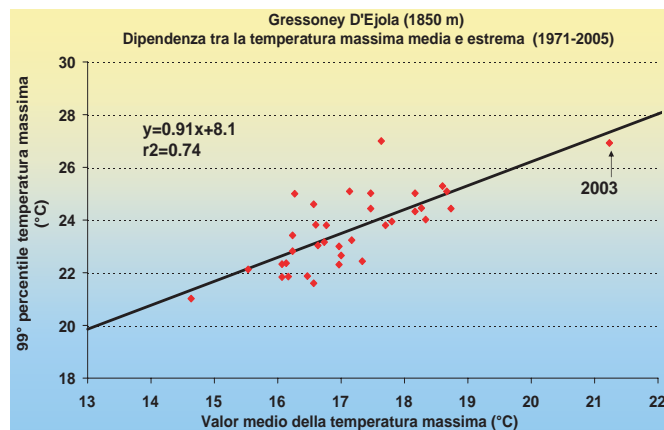
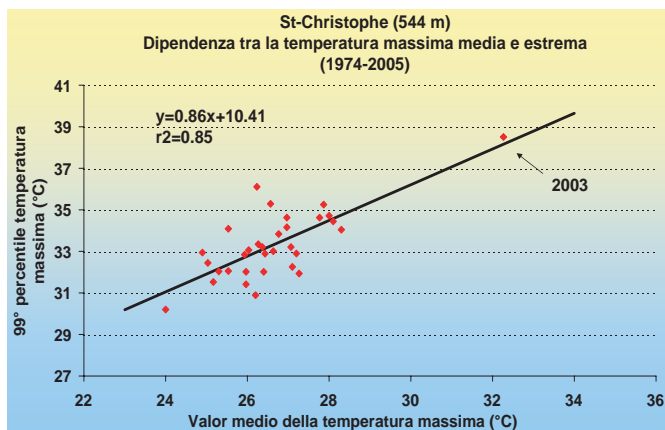


6.36, 6.37 - Andamento delle temperature massime giornaliere a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola nell'estate 2003 (linee rosse), e confronto con i valori normali (linee blu). Le linee rette nere indicano le soglie del 90° e del 99° percentile, valori superati rispettivamente soltanto nel 10% e nell'1% dei casi, in media. Si noti come invece nel 2003 il 90° percentile sia stato superato con grande frequenza durante la stagione, nel 63% dei giorni a St-Christophe e nel 62% dei giorni a Gressoney.

6.38 - Numero di giorni con temperatura media estiva superiore alla soglia del 90° percentile a St-Christophe, dal 1974 al 2005. La tendenza è in aumento, e spiccano in particolare i giorni osservati nel 2003.

di un primo tentativo di omogeneizzazione, ancora troppo semplicistico, qui presentato solo per valorizzare l'informazione derivante dalla lunga serie termometrica di Aosta, ancora oggi attiva presso il sito aeroportuale. L'andamento della temperatura media estiva dal 1840 al 2005 è riportato in fig. 6.34.

Le stagioni estive in assoluto più fresche sono state quelle intorno agli Anni 1880, con valori di poco superiori ai 16 °C, ma anche quelle tra gli Anni 1930 e 1940 e quelle degli Anni 1970. Dagli Anni 1980, invece, si sono succedute estati vieppiù calde, con temperature medie sempre superiori a 20 °C dal 1987 in poi. La più calda di tutte è stata l'estate 2003, con 25.1 °C di temperatura media stagionale, ben 4.7 °C al di sopra della media 1974-2000. L'eccezionalità di tale stagione emerge pure considerando la temperatura media stagionale nell'ambito della distribuzione dei valori del periodo 1840-2000 (fig. 6.35): si nota come il valore del 2003, superiore alla media di circa 4 unità di deviazione standard, si situi nell'estremità destra del grafico, dunque con probabilità di accadimento così bassa da apparire addirittura al di fuori della distribuzione statistica. Le estati del 1991 e del 2004, rispettivamente la seconda e terza più calda ad Aosta, si collocano sempre nella coda destra della distribuzione, con probabilità



6.39, 6.40 (in alto) - Relazione tra le temperature medie ed estreme massime estive a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. All'aumentare di 1 °C della media stagionale anche il valore estremo aumenta di circa 1 °C.

6.41, 6.42 (al centro), 6.43, 6.44 (qui sopra) - Variazioni nella distribuzione statistica delle temperature minime e massime giornaliere estive a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola in due periodi successivi, 1971-1989 e 1990-2005.

di accadimento tra il 5 e il 10%. Al contrario, l'estate più fredda, nel 1888, riportata nella parte sinistra della figura, ha una probabilità di accadimento sempre molto

bassa, ma comunque intorno al 2%.

Le temperature massime giornaliere dell'estate 2003 a St-Christophe (fig. 6.36) sono state spesso > 30.2 °C, e in 8 casi > 35.9 °C;

questi due valori sono rispettivamente il 90° e il 99° percentile della distribuzione di temperatura massima giornaliera estiva tra il 1974 e il 2000, rappresentano cioè i valori-soglia superati rispettivamente nel 10% e nell'1% dei casi che compongono il campione di 26 anni. Sono pertanto valori che si manifestano raramente.

Anche a Gressoney-D'Ejola l'estate 2003 è stata la più calda della serie, con una anomalia positiva di circa 4 °C rispetto alla media 1971-2000, e le temperature massime giornaliere sono state spesso superiori al 90° percentile (20.2 °C), risultando in 4 casi più elevate anche del 99° percentile (25.7 °C) (fig. 6.37).

Le fig. 6.39 e 6.40 mostrano la dipendenza tra il valor medio ed estremo (99° percentile) delle temperature massime estive per

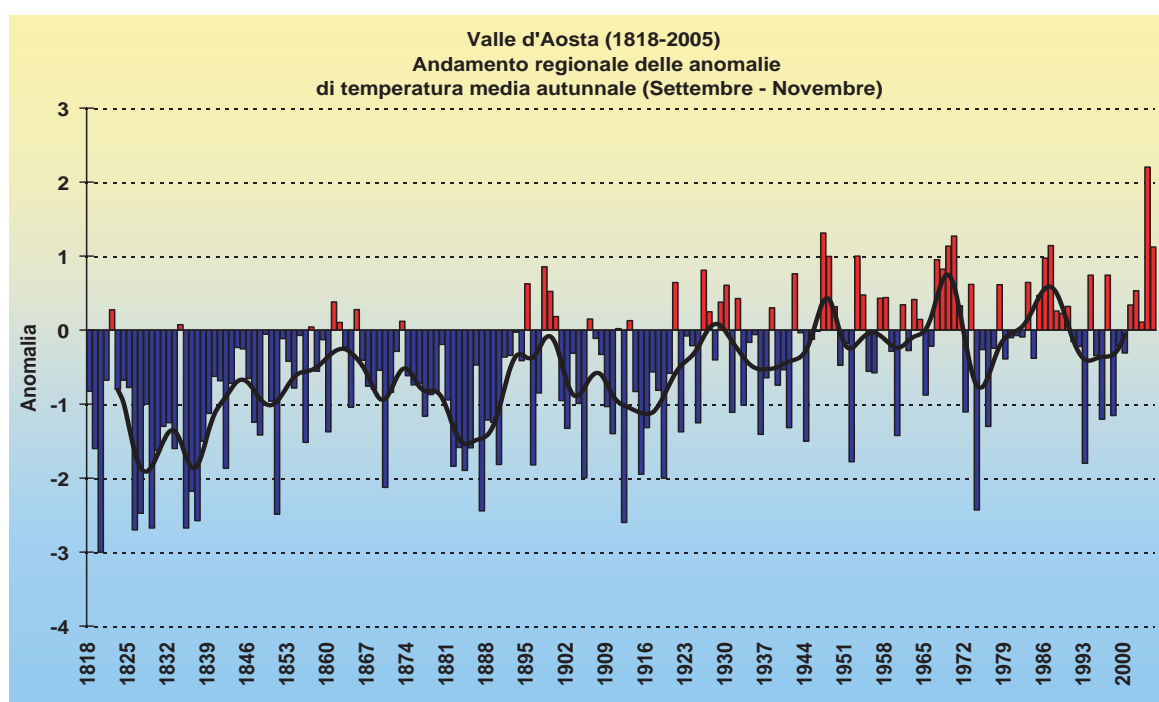
St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. In entrambi i casi, per un aumento di 1 °C nella temperatura media massima ci si attende un aumento di circa un grado anche nei valori estremi massimi, risultato confrontabile con quanto ottenuto da BENISTON (2004).

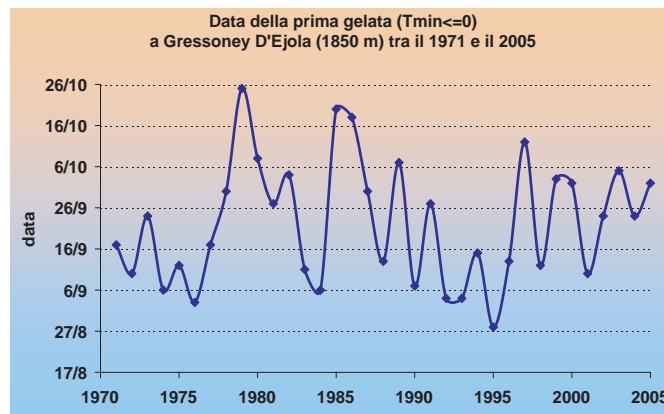
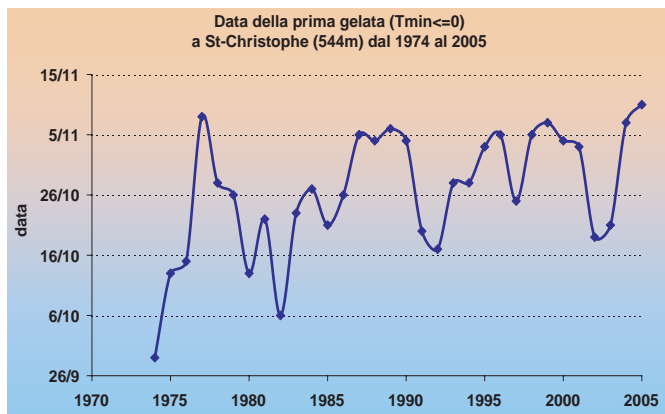
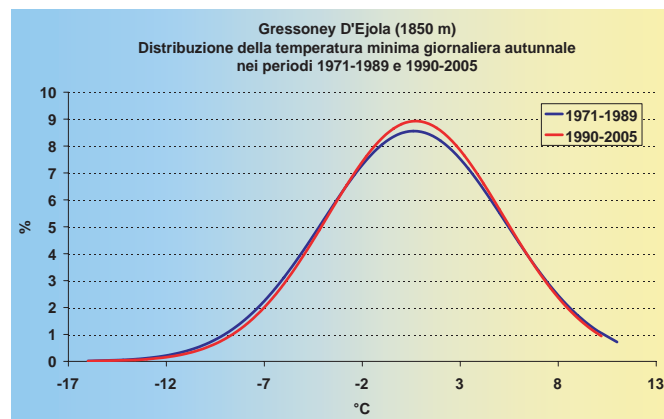
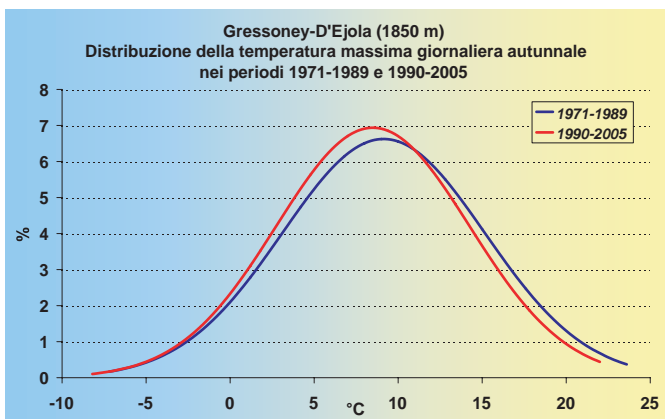
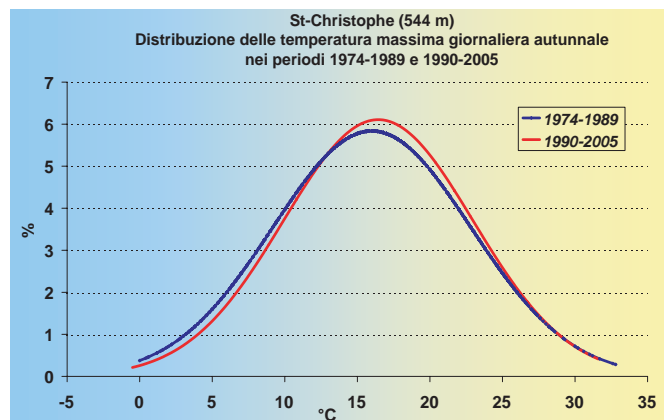
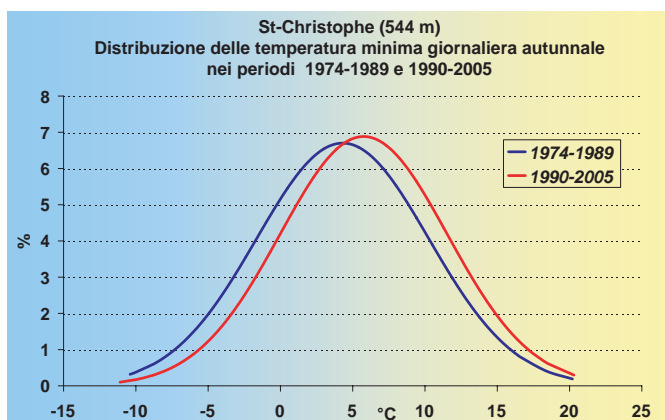
La variazione nella distribuzione delle temperature minime e massime (fig. da 6.41 a 6.44) mette in evidenza a St-Christophe un aumento di quasi 2 °C sia nelle minime sia nelle massime. A Gressoney l'aumento è più contenuto, circa 1 °C.

Autunno: pochi segnali fino al 2000

La stagione autunnale era, fino al 2000, l'unica a mostrarsi di frequente fresca anche negli Anni 1990, dopo la fase calda degli Anni 1980. Spiccavano a tal proposito i

6.45 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie autunnali in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Alcune stagioni fresche si sono presentate negli Anni 1990 (specialmente il 1993), ma poi dal 2001 è iniziata una più netta fase di riscaldamento. L'autunno 2004 è stato il più caldo della serie in Valle d'Aosta.





6.46, 6.47, 6.48, 6.49 - Variazioni nella distribuzione delle temperature minime e massime autunnali a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola.
6.50, 6.51 - Evoluzione delle date della prima gelata autunnale.

freddi e piovosi autunni del 1993 e del 1996, e quello pure freddo — ma più asciutto — del 1998 (specie per i precoci rigori invernali di novembre). Il periodo 2001-05 ha invece mostrato un'inversione di tendenza, presentando cinque stagioni con mitezza anomala, particolarmente pronunciata nell'autunno 2004 (fig. 6.45).

La variazione della distribuzione della temperatura (fig. da 6.46 a 6.49) tra i periodi 1971-1989 e 1990-2005 mostra a St-Christophe un aumento di 0.4 °C nelle temperature massime e di 1.5 °C nelle temperature minime. A Gressoney si ha invece un aumento impercettibile della temperatura media minima (+0.1 °C), e un calo della

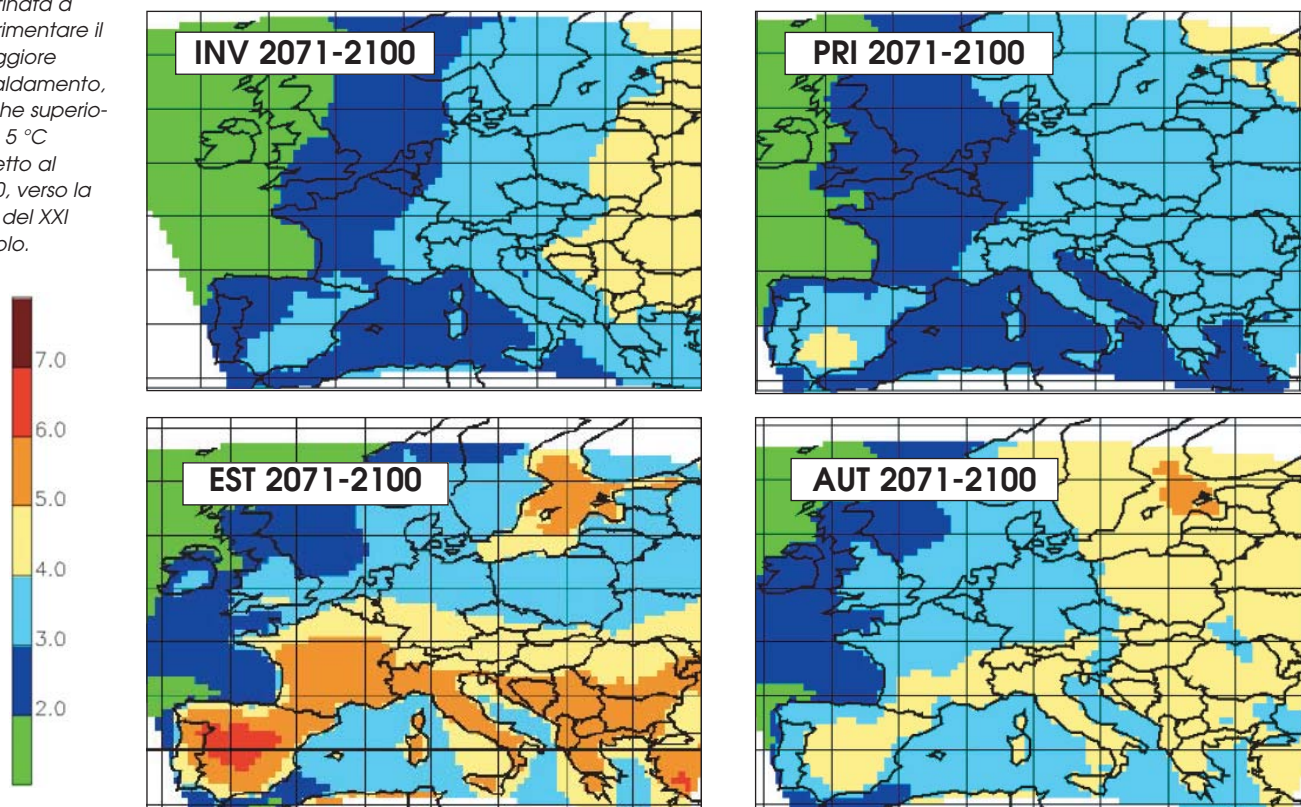
temperatura media massima autunnale di $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, dovuto alla maggiore influenza degli autunni freschi degli Anni 1990 rispetto alle cinque stagioni calde 2001-05. Il fatto che la stagione autunnale sia quella in cui meno è evidente l'aumento di temperatura è confermato anche dalle fig. 6.50 e 6.51, che mostrano la data della prima gelata a Gressoney e a St-Christophe negli ultimi 30 anni; solo all'aeroporto si può evidenziare una lieve tendenza ad avere gelate più tardive negli ultimi anni.

6.52 a, b, c, d - Media dei risultati delle simulazioni condotte nell'ambito del progetto PRUDENCE sugli aumenti stagionali di temperatura previsti in Europa per il trentennio 2071-2100. L'estate sarebbe la stagione destinata a sperimentare il maggiore riscaldamento, anche superiore a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto al 1990, verso la fine del XXI secolo.

Cosa prevedono i modelli climatici per il futuro? Ancora più caldo

L'IPCC ha individuato una famiglia di sce-

nari futuri (cfr. pag. 38, cap. 5) che si traducono in un **aumento di temperatura globale previsto tra $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ entro il 2100**, rispetto al 1990. Tuttavia sono disponibili dati da simulazioni più dettagliate a scala regionale, come quelli ottenuti nell'ambito del progetto europeo **PRUDENCE** coordinato dall'Istituto Meteorologico Danese (<http://prudence.dmi.dk/index.html>), già ripresi da FREI (2004) e da BENISTON (2004), e cui si è fatto riferimento in questo rapporto. In tab. 6.53 sono riportati, secondo diversi livelli di probabilità, i valori di aumento termico medio stagionale previsti per il 2050 nel Sud della Svizzera. Possiamo ritenere che i valori previsti per la Svizzera meridionale siano applicabili anche alla vicinissima



6.53 - Aumenti di temperatura previsti sulla Svizzera meridionale entro il 2050, secondo differenti livelli di probabilità. I dati sono desunti dal progetto PRUDENCE, e riportati in FREI (2004). Lo scenario più probabile ($P = 0.5$) indica aumenti compresi tra 1.8 °C in inverno e primavera, e 2.8 °C in estate. $P=0.975$ indica scenari rari ($\leq 2.5\%$) sulla coda destra della distribuzione.

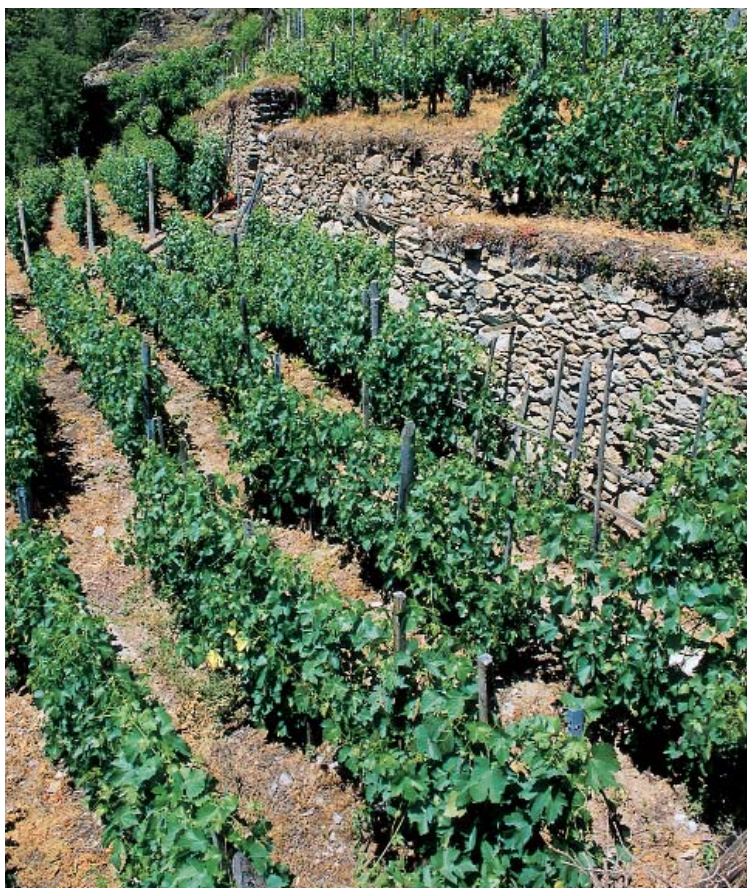
Previsione aumento temperature medie stagionali secondo diversi livelli di probabilità (da Progetto Prudence, in Frei, 2004)								
	Prob.	0.025	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.975
Svizzera Sud	Inv	0.9	1.1	1.3	1.8	2.3	2.6	3.1
	Pri	0.9	1.1	1.3	1.8	2.4	2.8	3.3
	Est	1.5	1.9	2.2	2.8	3.7	4.1	4.9
	Aut	1.2	1.4	1.7	2.2	2.8	3.1	3.7

regione valdostana, pertanto questi sono stati impiegati per le considerazioni riportate in questo studio. Lo scenario più probabile ($P=0.5$) vede incrementi termici di 1.8 °C in inverno e primavera, 2.8 °C in estate e 2.2 °C in autunno. Questi risultati derivano da 16 diverse combinazioni di modelli, ciascuna

contenente un modello globale, un modello regionale e uno scenario di emissione di gas serra. La base modellistica comprendeva quattro modelli globali, e otto modelli regionali con risoluzione di 50 km (FREI, 2004). Per ragioni di praticità si considera qui lo scenario più probabile ($P=0.5$), ma si tenga presente l'esistenza anche di scenari più ottimistici (da $P=0.025$ a $P=0.2$) e più pessimistici (da $P=0.8$ a $P=0.975$); secondo questi ultimi, vi sarebbe il 2.5% di probabilità che l'aumento termico estivo raggiunga i 4.9 °C entro il 2050, mentre lo scenario più ottimistico prevederebbe comunque un aumento non trascurabile di 1.5 °C in estate, dell'ordine di quanto già osservato sulle Alpi finora dalla fine della Piccola Età Glaciale.

COSA POTREBBE ACCADERE IN VALLE D'AOSTA: EFFETTI, STRATEGIE E OPPORTUNITÀ

Di seguito si illustrano i potenziali effetti che l'aumento delle temperature potrà avere nei diversi settori dell'economia, dell'ambiente e del territorio valdostano. Per ciascuno di questi verranno individuate anche possibili strategie di mitigazione dell'impatto, di adattamento, e anche eventuali oppor-



6.54 - Vigneti su versanti terrazzati ad Avise, sotto il sole del 18.06.2005 (f. D. Cat Berro). La vite, specie termofila adatta ai climi caldi, dovrebbe sopportare bene l'aumento di temperatura previsto, e l'adattamento potrà essere favorito da opportune scelte varietali.

6.55 - Orto di montagna ad Avise, 18.06.2005 (f. D. Cat Berro). In futuro l'agricoltura valdostana potrebbe soffrire soprattutto della combinazione negativa di aumento delle temperature estive e siccità più frequenti. All'incremento dell'evapotraspirazione potrebbe corrispondere un calo nella disponibilità delle risorse idriche, dovuto alla diminuzione delle precipitazioni estive e al cambiamento nei regimi di deflusso torrentizio e fluviale. Una opportuna strategia di consolidamento della rete irrigua potrà mitigare tale scenario.

tunità legate ai nuovi scenari ambientali.

1) Agricoltura: delicato equilibrio tra conseguenze positive e negative

E' certamente tra i settori economici più direttamente legati all'andamento climatico, dunque l'esposizione agli effetti di un suo cambiamento è elevata.

Dati i numerosissimi fattori in gioco, è assai difficile stabilire se un clima più caldo potrà rappresentare complessivamente un beneficio oppure un danno per la produzione agricola valdostana.

Potenziali effetti positivi / opportunità:

- Maggiori rendimenti per il prolungamento della stagione vegetativa e per la maggiore disponibilità di CO₂.
- Estensione della possibilità di coltivare a quote più elevate.
- Gelate. Il rischio di danni da gelo sulle colture orticole potrà diminuire, ma soltanto se le epoche di semina rimarranno inalterate; infatti, l'aumento delle temperature medie primaverili e la minore durata dell'innevamento può indurre gli agricoltori ad anticipare le semine, esponendo così le colture a maggiore rischio in caso di eventi estremi — pur sempre possibili — benché in media il clima sia più mite. Le gelate invernali non hanno importanza per l'agricoltura in Valle d'Aosta, giacché le piante locali sono ben adattate a valori molto bassi durante la fase di quiescenza;



soltanto colture tipicamente mediterranee come l'ulivo e la vite possono soffrire di geli particolarmente intensi, quali ad esempio quelli registrati nel gennaio 1985 (punta di -17.9 °C a St-Christophe). Nemmeno le gelate precoci sono in grado di recare danni importanti, piuttosto sono assai temibili quelle tardive in primavera. L'entità dei danni varia sensibilmente a seconda dello stadio fenologico (il fiore in pieno sviluppo è assai più delicato di una gemma che si appresta appena a schiudersi) e anche della durata dell'episodio.

Per il futuro si può prevedere una diminuzione complessiva della frequenza del gelo, peraltro già individuata in primavera con un anticipo delle date dell'ultimo episodio con T_{min} ≤ 0 °C negli anni recenti (fig. 6.30 e 6.31), ma la situazione è complicata dalla difficile prevedibilità di numerosi fattori determinanti (ad esempio, come evolverà la copertura nuvolosa notturna, che limita il raffreddamento?). Tuttavia, per le ragioni esposte sopra (anticipo del

6.56 - Mandrie al pascolo a Cheneil (Valtournenche) il 22.06.2003. E' solo l'inizio di un'estate caldissima, che ha conosciuto temperature medie stagionali di circa 5 °C superiori alla norma (f. D. Cat Berro).



risveglio vegetativo e delle semine), questo non è sufficiente per stabilire con certezza se in futuro vi saranno meno danni da gelate: inoltre, è sufficiente una sola notte di forte gelo per produrre danni immensi all'agricoltura di un'intera regione. Un recentissimo esempio di gelata dannosa molto tardiva è quello del 1° giugno 2006, quando, a seguito dell'afflusso di aria artica — complice la serenità del cielo e l'aria secca — si è avuta la formazione di brina al suolo a partire dai 600÷800 m circa su molte valli delle Alpi occidentali, con notevole danno alle colture orticole. Temperature così basse nei primi giorni di giugno (minima di 3.1 °C a St-Christophe il giorno 1) non si misuravano da almeno 30 anni. Questo dimostra che, anche in epoca di riscaldamento globale, gli estremi di freddo possono comunque manife-

starsi.

Potenziati effetti negativi:

- Spostamento degli areali di diffusione di malerbe, parassiti e insetti responsabili di fitopatologie per via del clima più caldo, con arrivo di specie prima sconosciute nella regione.
- Diminuzione della qualità dei foraggi all'aumentare della temperatura (IPCC, 2001 - in AA.VV., 2002).
- Necessità di maggiori risorse idriche per l'irrigazione estiva, a causa dell'aumento dell'evapotraspirazione e del calo di precipitazioni.
- Con un precoce risveglio vegetativo delle piante da frutto, dovuto alle temperature mediamente più elevate, aumenta la probabilità di avere danni da gelo nelle settimane successive. In Svizzera, dal 1951 al 1998 si è notato un anticipo

medio di 11.6 giorni delle fasi fenologiche primaverili (cacciata delle foglie, fioritura), ma un ritardo di soli 1.7 giorni delle fasi autunnali (colorazione e caduta delle foglie), in accordo con il maggiore riscaldamento della primavera rispetto all'autunno, riscontrato anche in Val d'Aosta (DEFILA & CLOT, 2001, in AA.VV, 2003).

6,57 - La posizione geografica di Aosta, in un fondovalle alpino solare, ventilato e asciutto, garantisce condizioni climatiche piuttosto salubri rispetto, ad esempio, alla vicina pianura padana, in cui l'atmosfera è più umida e spesso stagnante. Sotto il profilo sanitario questo è senz'altro un vantaggio in vista di futuri cambiamenti climatici. Sotto, sole splendente sui tetti di Aosta il 02.07.1999 (f. L. Mercalli).

Strategie di mitigazione e adattamento:

Appropriate misure di adattamento preventivo, con diversificazione delle colture e introduzione di nuove tecnologie, permetteranno di ridurre la vulnerabilità globale dell'agricoltura valdostana all'aumento delle temperature. Gli effetti negativi potranno essere limitati con opportune scelte colturali e varietali, miglioria e sviluppo dei sistemi di irrigazione, pianificazione dell'utilizzo agricolo dei suoli, ecc...

2) Sanità: disagio da caldo, ma la Valle d'Aosta, è più favorita

La modificazione delle condizioni termiche

«Il problema della salute umana è una delle ragioni più importanti per studiare gli effetti del cambiamento climatico planetario. Le incidenze combinate sull'ambiente fisico, gli ecosistemi, l'economia e la società si riflettono sulla salute...» (OMS, 2000).

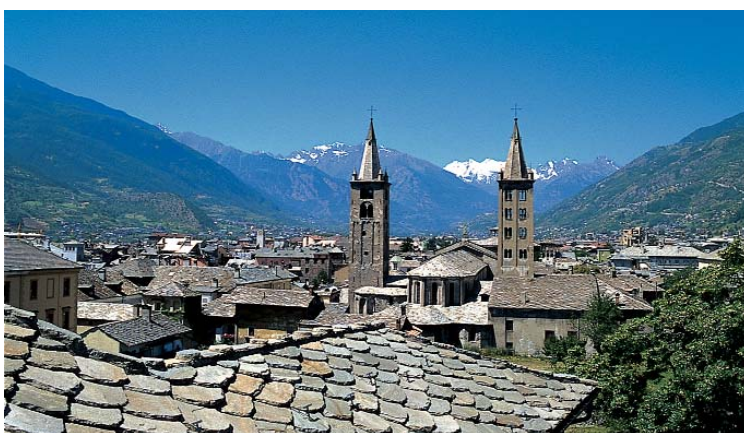
e ambientali potrà avere conseguenze anche nel settore sanitario (qualità dell'aria, benessere fisico, diffusione di patogeni).

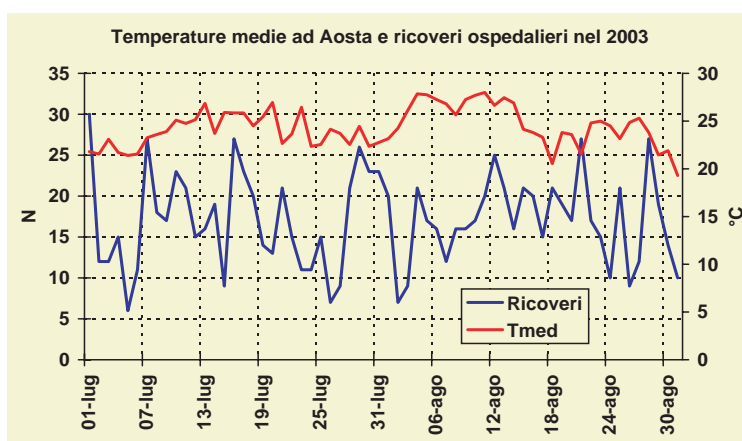
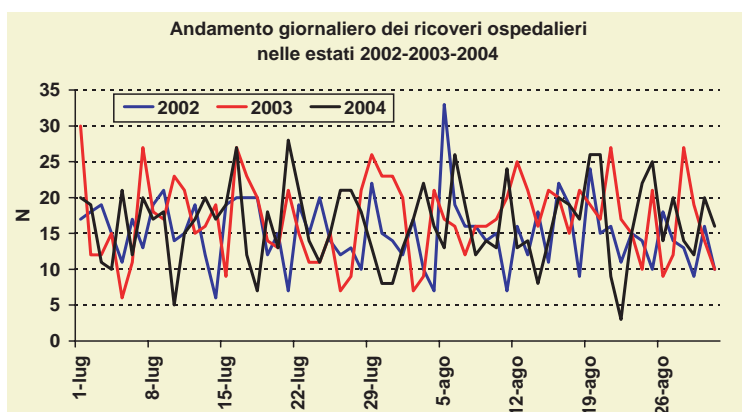
Potenziali effetti positivi / opportunità:

- Minore disagio invernale da freddo.

Potenziali effetti negativi:

- Disagio/mortalità da caldo: è teoricamente prevedibile un aumento dei ricoveri e dei decessi in caso di aumento di frequenza di grandi ondate di calore estive, ma solamente a fondovalle e in città, con maggiore stress su bambini, anziani e persone affette da malattie cardio-vascolari. Aumento dei colpi di calore, insolazioni, spossamenti; aggravamento dei problemi sanitari già esistenti. Tuttavia, è da rilevare come la Valle d'Aosta si trovi in una situazione privilegiata sotto questo aspetto, per l'elevata altitudine media e per la presenza di vivaci brezze termiche pomeridiane (che spirano con velocità talora di 40-50 km/h) in grado di portare ampio sollievo





6,58, 6,59 - In alto, numero di ricoveri ospedalieri estivi ad Aosta nel periodo 2002-2004. Nel 2003 non si nota un comportamento particolare rispetto agli altri anni, meno caldi, e anche dal grafico qui sopra, non emergono correlazioni significative tra ricoveri e temperature. Ciò può essere dovuto anche alla vivace ventilazione, che attenua il disagio fisico da caldo (fonte: Ass. Sanità, Salute e Politiche Sociali, Reg. Aut. Valle d'Aosta).

anche nelle giornate dal caldo più intenso. Ne è dimostrazione l'andamento dei ricoveri osservato ad Aosta durante la tropicale estate 2003: mentre in Europa sono stati osservati oltre 30.000 decessi in più rispetto alle condizioni normali (ROUSSEAU, 2005), e anche nel vicino Piemonte si è registrato un netto aumento della mortalità in corrispondenza dei picchi di caldo (a Torino dal 1° giugno al 31 agosto l'incremento rispetto alla «media» è stato del 33%, con punte del 45% nella categoria degli ultrasettantacinquenni; in IVALDI & al.), in Valle d'Aosta non si è notata una correlazione significativa tra temperature e ricoveri ospedalieri (fig. 6.58 e 6.59), segno che il caldo, ben-

ché intenso e di intensità mai rilevata in precedenza, è stato retto relativamente bene dalla popolazione anche grazie alle favorevoli condizioni ambientali.

— Probabile aumento della concentrazione estiva di ozono a fondovalle, responsabile di problemi respiratori e di irritazione ai polmoni. Aumento degli aerosol durante le più frequenti siccità estive.

— Maggiore esposizione della popolazione ai raggi ultravioletti per allungamento della stagione calda (abiti più leggeri).

— Alterazione delle fasi fenologiche e allungamento della stagione di pollinazione.

— Rischio di diffusione di nuovi patogeni, prima sconosciuti in zona, verso i quali le comunità locali non hanno ancora sviluppato la naturale resistenza; modifica degli areali di diffusione di malattie derivanti da insetti.

Strategie di mitigazione e adattamento:

Nonostante le condizioni ambientali privilegiate della Valle d'Aosta, sarà comunque opportuno prevedere:

— un potenziamento dell'assistenza sanitaria e sociale in caso di forti ondate di calore, attraverso piani di tutela e assistenza dei soggetti deboli (bambini, anziani, persone affette da disturbi respiratori e cardio-vascolari).



6.60 - Le piste per lo sci estivo di Plateau Rosa minacciate dal gran caldo del 12.08.2003 (f. L. Mercalli). Le porzioni di ghiacciaio circostanti sono ormai prive di neve residua ed esposte alla radiazione solare, anche qui a quota 3500 m. Una situazione sempre più frequente.

- Sviluppo di programmi sanitari che prevedano la sorveglianza di nuove malattie in potenziale sviluppo.
- Educazione mirata a corretti comportamenti personali in ambito sanitario, potenziamento del controllo della qualità dell'aria e dell'acqua.

3) Turismo: venite a cercare il fresco in Valle d'Aosta

Anche il turismo potrà risentire notevolmente dell'aumento della temperatura; le destinazioni turistiche che basano la loro attività sulle risorse naturali del territorio, specialmente quelle di montagna, sono soggette a un maggiore impatto rispetto a quelle basate, ad esempio, su attrazioni culturali o storiche. Ma la progressiva conversione di attività potrà rendere maggiormente adattabile il settore in vista di nuovi scenari ambientali.

D'altra parte il turismo stesso contribuisce in maniera non trascurabile, con i trasporti, alle emissioni di gas climalteranti: si stima che in Svizzera il traffico legato alle vacanze rappresenti il 60% dei movimenti totali delle persone (MÜLLER H., in AA.VV., 2002).

Potenziati effetti positivi / opportunità:

- La Valle d'Aosta come «riserva» di frescura. Maggiore afflusso turistico estivo da pianure e città verso le temperature più supportabili dei monti valdostani. Condizioni favorevoli per il lancio di nuovi slogan turistici come: «*Venite a cercare il fresco in Valle d'Aosta!*», oppure «*Il fresco? In Valle d'Aosta lo trovate ancora...!*».
- Possibilità di insediamento temporaneo, in prevalenza estivo, di attività professionali favorite dal telelavoro (giornalisti, artisti, scrittori), alla ricerca di maggiore benessere fisico rispetto all'afosa pianura/città. Importante garantire a tutte le località montane il collegamento alle reti veloci di comunicazione internet, anche *wireless*.
- Necessità/opportunità di sviluppo di soluzioni turistiche alternative nelle località di montagna che in passato avevano puntato in prevalenza sugli sport invernali. Sviluppo di un turismo «*Quattro Stagioni*», più versatile e adatto alle nuove situazioni: promozione dell'escursionismo, agriturismo, equitazione, turismo culturale.

6.61 - Un angolo ridente del villaggio di Ollomont in estate (13.08.2002, f. L. Mercalli). La montagna valdostana potrà offrire opportunità di piacevole villeggiatura, specialmente estiva, in località dal clima più fresco e gradevole rispetto alle città o alle coste arroventate dal riscaldamento climatico.



Non solo soggetti sensibili come bambini e anziani vi potranno trovare piacevole soggiorno, ma anche svariate categorie di professionisti potranno beneficiare di un luogo di lavoro meno oppresso dalla calura estiva, purché tutti i villaggi delle valli laterali vengano dotati di linee veloci per il collegamento a internet, al fine di sviluppare le possibilità di «telelavoro».

— Modificazioni nella stagionalità degli afflussi turistici, con potenziale incremento del turismo di stampo estivo — quanto meno nei fine settimana — in mesi come maggio e settembre, per via delle temperature più elevate.

Potenziali effetti negativi:

— Carezza frequente e prolungata di innevamento sui comprensori sciistici a quota inferiore per nevicate più rare e fusione più rapida del manto (cfr. cap. 8).

— Regresso dei ghiacciai con perdita di attrazione turistica da parte dell'alta montagna (cfr. pag. 74).

— Alterazione e scomparsa del *permafrost* con problemi di stabilità di infrastrutture turistiche in alta quota (piloni di impianti a fune, rifugi, strutture di protezione paravalanghe).

Strategie di mitigazione e adattamento:

— Eventuale mantenimento degli impianti di innevamento programmato, ma soltanto ove questo sia sostenibile economicamente e consenta — con investimenti ragionevolmente contenuti — di attenuare/risolvere le principali le crisi di innevamento. Questa situazione potrebbe realizzarsi soltanto oltre i 1800÷2000 m circa, mentre a quote inferiori l'aumento delle temperature potrebbe spesso compromettere la funzionalità degli impianti anche in pieno inverno. Si tenga tuttavia presente che tale soluzione comporta elevati dispendi energetici con ulteriore incremento delle emissioni climalteranti, pertanto la sua espansione deve essere attentamente valutata anche in termini di *esterneità negativa*.

— Ove non sostenibile/conveniente il

mantenimento degli impianti di innevamento programmato, è necessaria una progressiva conversione delle attività turistiche in vista di nuove condizioni climatiche, slegandosi per quanto possibile dalla «monocultura» dello sci di pista, privilegiando il più possibile approcci di fruizione dell'ambiente invernale non necessariamente innevato in modo ottimale, ma pur sempre ricco di fascino.

4) Foreste: aumento dello stress per caldo e siccità estiva

L'incremento dell'effetto serra sarà certamente in grado di causare importanti conseguenze sulla dinamica degli ecosistemi forestali, tuttavia molte incertezze regnano ancora sull'effetto che un forte incremento

del CO₂ atmosferico e in generale il cambiamento climatico potrebbe avere sulle piante forestali. Diffusamente si ritiene che una maggiore concentrazione di biossido di carbonio favorisca una migliore utilizzazione dell'acqua da parte di alcune essenze (per via della chiusura degli stomi), nonché un maggiore accrescimento di varie specie di pioppi, ma al contrario su altre come l'abete di Douglas e il pioppo tremolo queste conseguenze positive sarebbero assai meno evidenti. E la previsione è resa ancora più complicata dalle possibili interazioni con altri inquinanti di origine antropica: si è visto ad esempio che l'ozono (O₃) reca danni agli alberi, e può compromettere i potenziali effetti positivi sull'accrescimento dati dall'aumento di CO₂ (KARNOSKY

6.62 - Vivaci colori d'autunno sui lariceti di Estoul (Vale d'Ayas) il 04.11.2001 (f. D. Cat Berro). Difficile prevedere gli effetti del futuro aumento di temperatura sulle foreste valdostane. Tutto dipenderà dalla rapidità del cambiamento: se questo sarà troppo veloce rispetto alla capacità degli alberi di adattarsi o migrare, potrebbero instaurarsi condizioni di stress fisiologico con frammentazione degli habitat.



& *al.*, 1999; ISEBRANDS & *al.*, 2001). Ma più che altro, a mettere in difficoltà vaste porzioni di bosco in Valle d'Aosta durante il XXI secolo potrebbero essere il rapido aumento della temperatura e la possibile variazione nel regime delle precipitazioni: lo stress estivo per caldo e siccità (come quello osservato nel 2003, che comportò una preoccupante moria di abete rosso sulle Alpi) potrà divenire più frequente, e in generale il cambiamento dei fattori climatici potrebbe essere superiore alle capa-

«L'aumento di perturbazioni quali le infestazioni di insetti e gli incendi potrebbero scatenare rapidi cambiamenti strutturali e funzionali delle foreste». (GITAY & *al.*, 2001)

cità di adattamento delle piante e alla loro velocità di migrazione verso l'alto lungo i piani altitudinali. A sua volta, la sofferenza fisiologica degli alberi predisporrebbe le condizioni per più frequenti e vasti attacchi di parassiti e insetti. Non è tutto: la stessa migrazione delle piante verso latitudini e altitudini più adatte potrebbe risultare compromessa da difficoltà riproduttive o dalla frammentazione degli habitat, nonché da altri fattori quali la disponibilità di nutrienti e umidità nei suoli di potenziale nuova colonizzazione. E' verosimile che anche gli incendi boschivi, in particolare su conifere, divengano più diffusi durante l'estate per la maggiore siccità del sottobosco. Si può concludere che gli effetti finali potranno essere assai diversi in base alle situazioni locali e alla composizione delle foreste, poiché esistono specie più tolleranti e adattabili, e altre più esigenti e dunque potenzialmente più a rischio. Queste considerazioni, riportate da WARREN & *al.* (2004) nel caso delle foreste canadesi, non sono fuori luogo se estese alla situazione valdostana, sebbene gli aumenti di tem-

6.63 -
Sottobosco di
lariceto a La
Magdeleine, il
07.07.1991 (f. L.
Mercalli).



peratura previsti sulle Alpi siano inferiori a quelli stimati per l'estremo Nord del continente americano.

Occorre esaminare contemporaneamente tutti i fattori citati per stimare la vulnerabilità complessiva degli ecosistemi forestali valdostani. Poiché non esistono previsioni precise sugli effetti futuri sulle foreste, si impone la necessità di intervenire con adeguate politiche di gestione forestale sul lungo periodo che possano mantenere o, anzi, migliorare la resistenza delle foreste al cambiamento.

5) Biodiversità ed ecosistemi: minacce di estinzione

Le regioni montuose in generale sono territori molto delicati ed esposti agli effetti del cambiamento climatico. Sono da



aspettarsi in futuro grandi cambiamenti nella composizione e nella varietà delle comunità viventi, vegetali e animali; l'aumento della temperatura potrà causare la degradazione e la frammentazione degli habitat, nonché la comparsa di specie vegetali esotiche, come già osservato nei boschi del Canton Ticino, Svizzera (GUISAN, 2006). Una specie vivente può reagire al riscaldamento atmosferico in tre modi: *adattandosi, migrando, oppure estinguen-*

dosi qualora l'evoluzione climatica sia più rapida della capacità di adattamento/migrazione, come è probabile che sia in futuro; in questo caso sarebbe probabile la scomparsa soprattutto delle specie alpine «cacuminali», che già oggi si trovano a quote elevate e con l'aumento di temperatura non potrebbero riparare altrove migrando. Durante il XX secolo tassi di migrazione verticale di specie vegetali di 0.5÷4 m per decennio, parallelamente a un arricchimento della flora d'alta quota, sono stati osservati sulle Alpi svizzere, ma in futuro il cambiamento

potrebbe essere troppo veloce per consentire l'adattamento e la migrazione (GUISAN, 2006). La risposta delle specie vegetali a un aumento termico non è lineare, e può manife-

stare un'inerzia fino a 1÷2 °C, ma un aumento di 3÷4 °C nelle temperature medie potrebbe avere profondi effetti a ogni livello di complessità degli ecosistemi, in quanto eguaglierebbe l'ampiezza termica di un'intera fascia vegetazionale, che è dell'ordine di 500 m. Piante alpine endemiche delle vette di montagne piuttosto basse sono minacciate severamente di estinzione per aumenti termici di 3÷4 °C, in quanto verrebbe a mancare un ambiente

6,64 -
Esemplare di
Pulsatilla
sulphurea a
Dondena
(11.05.2003, f.
D. Cat Berro).
Le specie
vegetali cacu-
minali, presenti
in alta quota
oltre i 2200-
2500 m, sono
potenzialmen-
te tra le più
sensibili all'au-
mento delle
temperature,
per il rischio di
scomparsa dei
loro ambienti
di diffusione, e
talora per l'im-
possibilità di
migrare verso
quote più ele-
vate dal clima
più consono
alle loro esi-
genze.



1920



2000

In Europa sarebbe maggiormente a rischio proprio la biodiversità delle zone di transizione dai climi mediterranei a quelli euro-siberiani (LAVOREL S., THUILLER W., ARAÚJO M. B., in AA.VV., 2005).

6) Ghiacciai: riduzione massiccia nei prossimi decenni

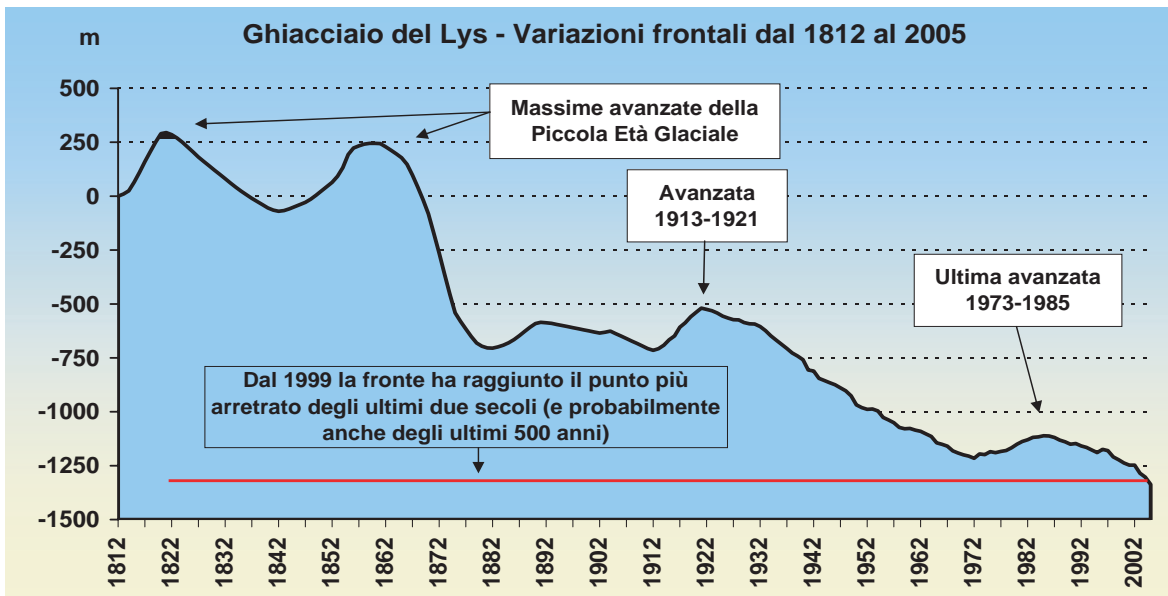
In un territorio alpino come quello valdostano, il regresso dei ghiacciai è senz'altro il fenomeno nell'immediato più appariscente tra quelli scatenati dall'aumento delle temperature. **Sulle Alpi i ghiacciai sono in ritiro dalla metà del 1800, termine della Piccola Età Glaciale (vedi p. 32), e da allora circa la metà della loro superficie è scomparsa.** Temporanee e brevi fasi di progresso si sono avute negli Anni 1920 e 1970-86 (alcuni ghiacciai del Monte Bianco hanno proseguito l'avanzata fino al 1988). La riduzione si è bruscamente accentuata dalla fine degli Anni 1980, e in particolare le stagioni 1990, 1991, 1998 e quelle dal 2003 al 2005 hanno sperimentato imponenti perdite di massa glaciale.

In Valle d'Aosta sono disponibili due lunghe serie di variazioni frontali: quella del ghiacciaio del Lys (Gressoney, Monte Rosa), con inizio dal 1812, frutto in particolare dei lavori di Umberto Monterin, e quella del ghiacciaio di Pré de Bar (Monte Bianco), dal 1820: dalle massime avanzate del XIX secolo, in poco meno di duecento anni, i

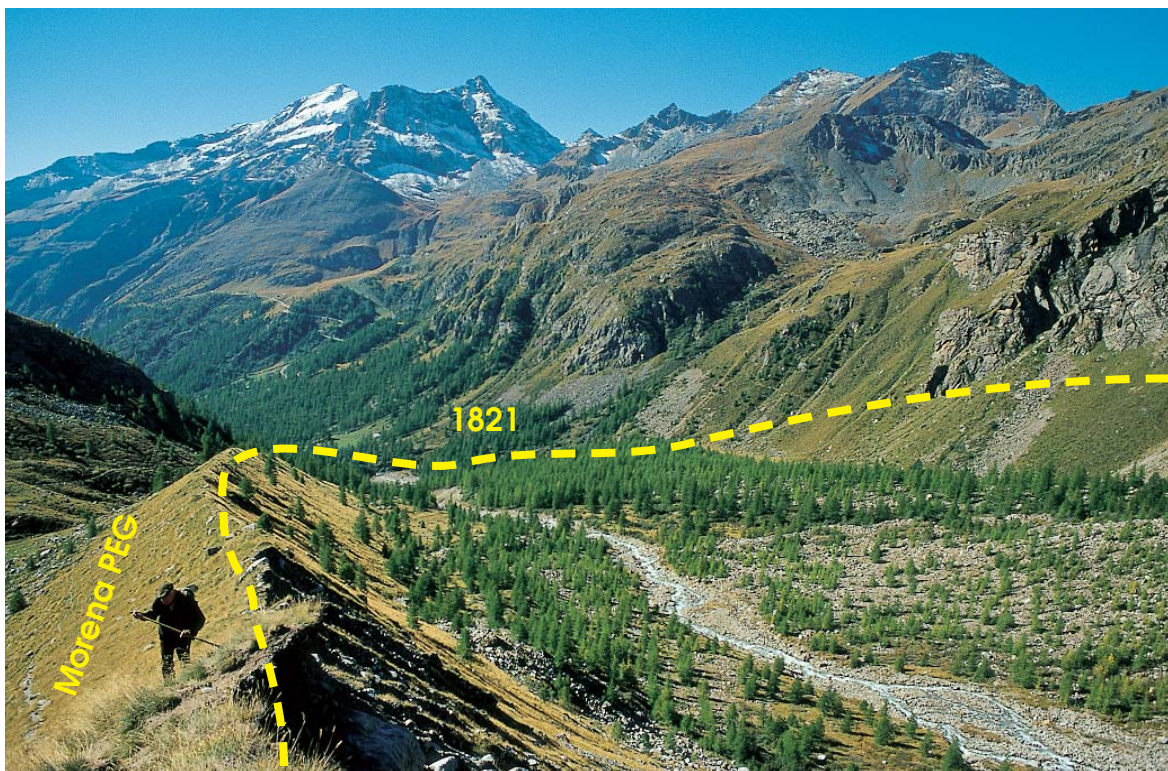
6.65 a, b - La fotografia aiuta a comprendere l'evoluzione del territorio d'alta quota nell'ultimo secolo. Qui il ghiacciaio d'Indren (Gressoney) visto in una cartolina degli Anni 1920 (in alto) e nel settembre 2000 (f. L. Mercalli). In soli 80 anni la perdita di superficie e spessore è stata impressionante.

più freddo a quote superiori quale rifugio per la migrazione (THEURILLAT & al., 1998). Dai risultati del progetto ATEAM (*Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling*) del *Potsdam Institute for Climate Impact Research*, emerge come entro il 2080 — basandosi sullo scenario A1f applicato al modello HadCM3 — sulla regione alpina potrebbe scomparire il 46% delle 2000 specie viventi considerate nello studio (tra cui 1350 piante, 157 mammiferi, 108 rettili e anfibi, 383 uccelli).

6.66 - Variazioni frontali cumulative al ghiacciaio del Lys dal 1812 al 2005. Dalla massima pulsazione della Piccola Età Glaciale, registrata nel 1821, il ghiacciaio è arretrato complessivamente di ben 1630 m, e dal 1999 la fronte ha toccato il punto più arretrato almeno dal 1812, ma verosimilmente anche dall'inizio della Piccola Età Glaciale verso il XV secolo.

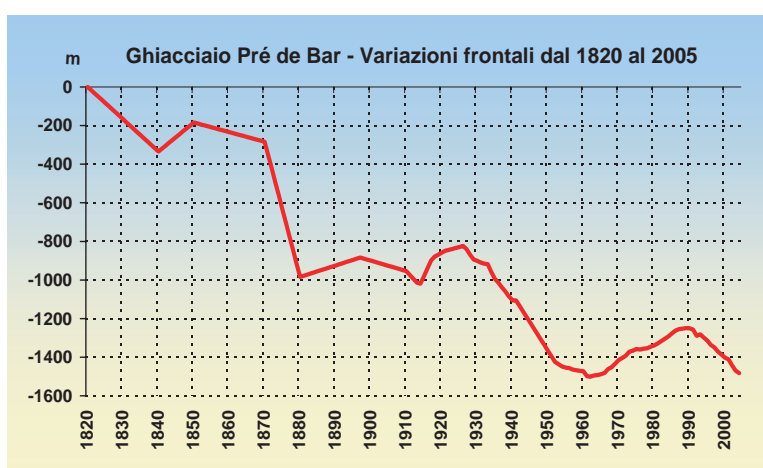
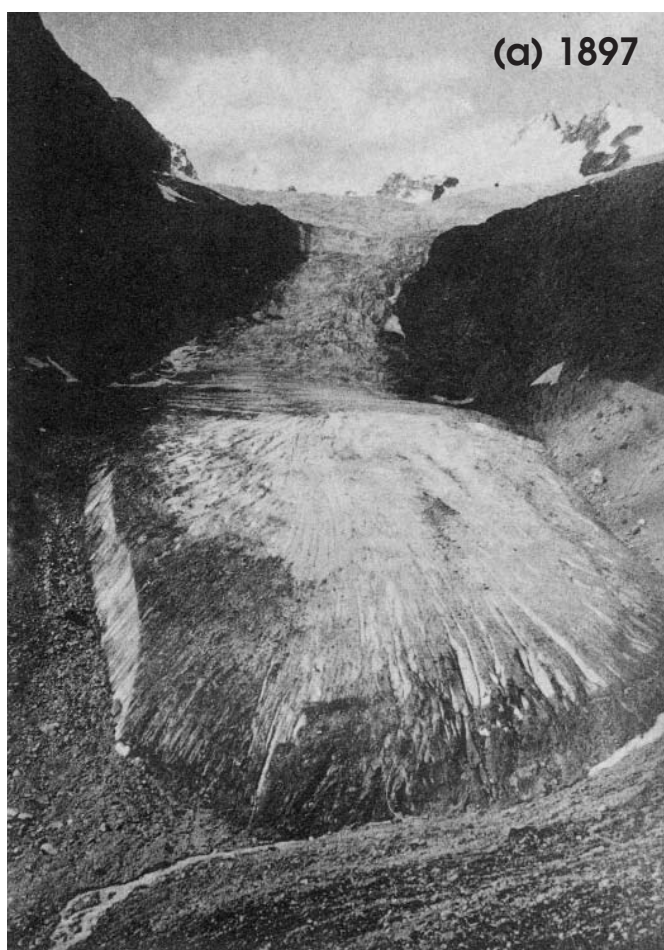


6.67 - Veduta dell'alta Valle del Lys e dell'interno delle morene PEG (Piccola Età Glaciale) dell'omonimo ghiacciaio. La linea tratteggiata indica grosso modo l'estensione del ghiacciaio attorno al 1821. Oggi, in poco meno di due secoli, l'aumento di temperatura di circa 1.5 °C ha determinato non solo la scomparsa del ghiacciaio, ma anche la scomparsa di un rado bosco di larici, a indicare la forte sensibilità degli ambienti d'alta quota al cambiamento climatico (f. L. Mercalli, 23.09.2000).



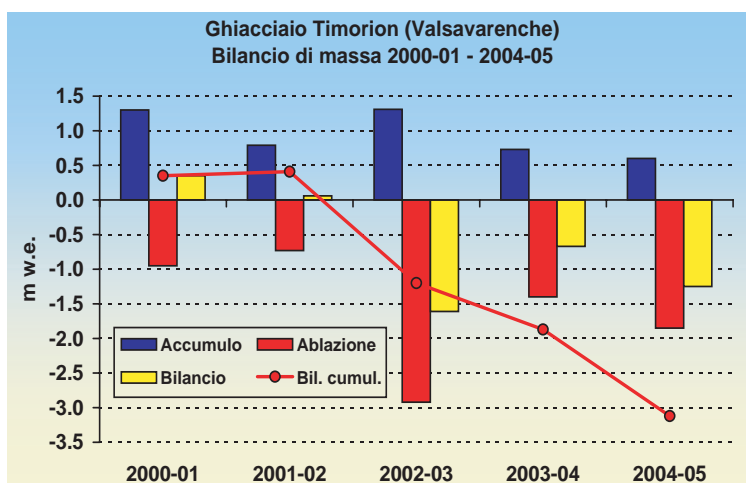
due ghiacciai sono arretrati rispettivamente di 1630 e 1500 m, e le aree che alla metà del XIX secolo erano ancora occupate dai ghiacci oggi sono ricoperte da radi boschi di larici, il tutto a causa di un aumento di temperatura dell'ordine di 1.5

°C. Questo consente di capire come l'ambiente sia particolarmente sensibile a incrementi termici in apparenza modesti. Le annuali campagne di misura delle variazioni frontali sono coordinate dal Comitato Glaciologico Italiano, istituito nel



6.68 a, b, c - Evoluzione del ghiacciaio di Pré de Bar (Courmayeur, Val Ferret) nel corso del XX secolo. In alto, una veduta del 1897, in cui il ghiacciaio si protendeva ancora verso la zona dell'attuale Rifugio Elena con una vasta fronte turgida (f. Druetti). Da allora, fino al 2005 (immagine in alto a destra di L. Mercalli, 16.08.2005) il ghiacciaio è arretrato di circa 600 m. A destra, simulazione di come potrebbe presentarsi il ghiacciaio attorno al 2050: con il ritiro della fronte e il progressivo assottigliamento della seraccata, nei prossimi decenni il ghiacciaio potrebbe rimanere confinato oltre la soglia rocciosa, mentre si avrebbe la colonizzazione delle morene storiche da parte di specie vegetali in migrazione dal fondovalle.

6.69 - Variazioni frontali del ghiacciaio Pré de Bar dal 1820 al 2005. La pulsazione PEG del 1820 è stata superiore a quella del 1850, e in 185 anni la fronte è arretrata di circa 1500 m. Attualmente il tasso di regresso è dell'ordine dei 20-30 m / anno.



6.70 - Bilancio di massa del ghiacciaio Timorion, tra le stagioni idrologiche 2000-01 e 2004-05. L'anno più negativo è stato il 2002-03, con una perdita specifica di massa pari a -1.61 m w.e., mentre il bilancio specifico cumulato nei cinque anni ha raggiunto i -3.12 m w.e. (fonte: ARPA VdA).

6.71 - Il ghiacciaio Timorion dai pressi di Levionna Superiore (12.09.2003, f. D. Cat Berro).

1895 per promuovere le ricerche glaciologiche in Italia.

Recentemente due ghiacciai della Valsavarenche, il Timorion e il Grand Etret, sono stati equipaggiati per le misure di bilancio di massa rispettivamente a cura dell'ARPA Valle d'Aosta e del Parco Nazionale Gran Paradiso: si tratta di una procedura che consente di valutare lo «stato di salute» del ghiacciaio attraverso il bilancio tra l'alimentazione nevosa invernale e la fusione estiva, misurate rispettivamente a inizio giugno (fine dell'inverno alpino alla quota dei ghiacciai, oltre i 3000 m) e a metà settembre. Tra il 2004 e il 2005 anche sul settore orientale del ghiacciaio

del Rutor sono state poste paline ablatometriche per la determinazione del bilancio di massa.

Nel grafico di fig. 6.70 sono riportati i dati annuali di accumulo, ablazione e bilancio di massa rilevati al ghiacciaio Timorion tra le stagioni 2000-01 e 2004-05: salvo il bilancio moderatamente positivo del 2000-01, con +0.36 m di equivalente d'acqua (w.e. = *water equivalent*), e quello sostanzialmente stazionario della successiva stagione 2001-02 (+0.06 m w.e.), in seguito hanno dominato forti perdite di massa, particolarmente pronunciate nella stagione 2002-03, quando in una sola stagione si è persa una quantità specifica di ben 1.61 m w. e. Complessivamente, il bilancio specifico cumulato nei 5 anni di misura ora disponibili ha raggiunto i -3.12 m w.e.; poiché la densità del ghiaccio di ghiacciaio si aggira attorno a 0.87 kg/dm³, ne consegue che la superficie del Timorion ha perso mediamente 3.6 m di spessore in cinque anni; a titolo di confronto, sul ghiacciaio Ciardoney — sito a quota più bassa (tra 2900 e 3140 m) sul versante piemontese del Gran Paradiso — nel medesimo periodo si è misurato un bilancio cumulato di -6.53 m w.e., più che doppio rispetto al ghiacciaio Timorion.

Una valutazione aggiornata delle superfici dei ghiacciai regionali è stata condotta di recente dalla Fondazione Montagna



1895



2000

6.72 a, b -
L'imponente
arretramento
del ghiacciaio
del Rutor avve-
nuto tra il 1895
(in alto, f.
Orioni) e il
2000 (qui
sopra, f. L.
Mercalli).

Sicura - Cabina di Regia dei ghiacciai valdostani, tramite analisi della ripresa ortofotogrammetrica del 1999: ne risulta una **superficie glacializzata complessiva di 156.8 km²**. Nel 1983 il catasto WGI (World Glacier Inventory) censiva un'area glaciale di 202 km² in Valle d'Aosta: dunque il 23% della superficie glaciale valdostana risulta scomparso in appena 16 anni.

Potenziati effetti negativi:

— Ulteriore regresso e probabile scomparsa dei ghiacciai al di sotto dei

3500 m entro il 2050. In Svizzera si prevede che il 70% della superficie glaciale presente nel 1995 potrebbe essere scomparso entro il 2060 (ZEMP & al., 2006; cfr. scenari proposti da M. MAISCH a p. 81). Nel caso dovessero ripetersi per una decina di volte le condizioni estreme dell'estate 2003, questo porterebbe alla pressochè totale scomparsa dei ghiacciai sulle Alpi; infatti, nel 2000 lo spessore medio dei ghiacciai alpini era di circa 30÷35 metri e solo nell'estate 2003 si sono misurate perdite tra 2.5 e 3 metri di ghiaccio. Inoltre il 90% dei ghiacciai alpini ha un'estensione inferiore a 1 km², ed è quindi verosimilmente destinato a scomparire nei prossimi decenni. In Valle d'Aosta potrebbero mantenersi essenzialmente le calotte più elevate del Monte Bianco e del Monte Rosa, e parte dei maggiori apparati del Gran Paradiso-Rutor.

— Minore attrazione dell'ambiente d'alta montagna, calo di frequentazione di alcuni percorsi alpinistici per aumento delle difficoltà; probabile ripercussione sulle presenze nei rifugi del Monte Rosa e del Monte Bianco, la cui attività è basata essenzialmente sull'alpinismo su ghiaccio.

— Maggiore rischio di fenomeni legati alla dinamica glaciale: crolli di ghiacciai pensili, svuotamento di laghi glaciali (epiglaciali o endoglaciali), questi ultimi in rapida formazione, in questi anni, anche a quote elevate, oltre i 3200-3500 m.

Superficie glaciale valdostana (fonte: Fondazione Montagna Sicura)		
Codice bacino (WGI)	Denominazione bacino	Superficie totale 1999 (km²)
4LD1502	Gressoney	14.25
4LD1503	Chamoporcher	0.08
4LD1504	Ayas	13.54
4LD1505	Fenis - Clavalitè	0.10
4LD1506	Valtournenche - Marmore	4.74
4LD1507	Arpisson-Comboè-Laures	0.19
4LD1512	Cogne-Grand Eyvia	18.87
4LD1513	Valsavarenche	8.71
4LD1514	Rhêmes	10.52
4LD1515	Valgrisenche	13.35
4LD1516	La Thuile	13.14
4LD1517	Valli Veny-Ferret	39.42
4LD1521	Buthier-Ollomont-Menouve	2.66
4LD1522	Valpelline	17.22
	Totale Valle d'Aosta	156.79

6.73 -
Aggiornamento
1999 delle super-
fici dei ghiacciai
valdostani
(fonte dati:
Cabina di Regia
dei ghiacciai
valdostani).

— Iniziale effetto benefico della maggiore fusione per il contributo ai deflussi torrentizi e fluviali in estati siccitose, ma in seguito conseguente depauperamento del capitale glaciale con grave perdita di

potenziale idrico.

— Progressiva scomparsa del permafrost e conseguente destabilizzazione dei versanti rocciosi in quota, con aumento del rischio di crolli e frane, come peraltro già osservato nella caldissima estate 2003 (crollo della «Chéminée» lungo la via normale italiana al Cervino, e «chiusura» del percorso). Danni alle infrastrutture edificate sui versanti interessati.

Riscaldamento climatico e fusione nivoglaciale

Studi svolti su alcuni ghiacciai francesi (Saint Sorlin, Gébroulaz, Argentière e Mer de Glace) al fine di determinarne la risposta ai cambiamenti climatici nel XX secolo (VINCENT C., 2002) hanno mostrato una sensibilità dell'ablazione estiva alla temperatura in media di 0.5 m w.e. per ogni °C alla quota di 2900

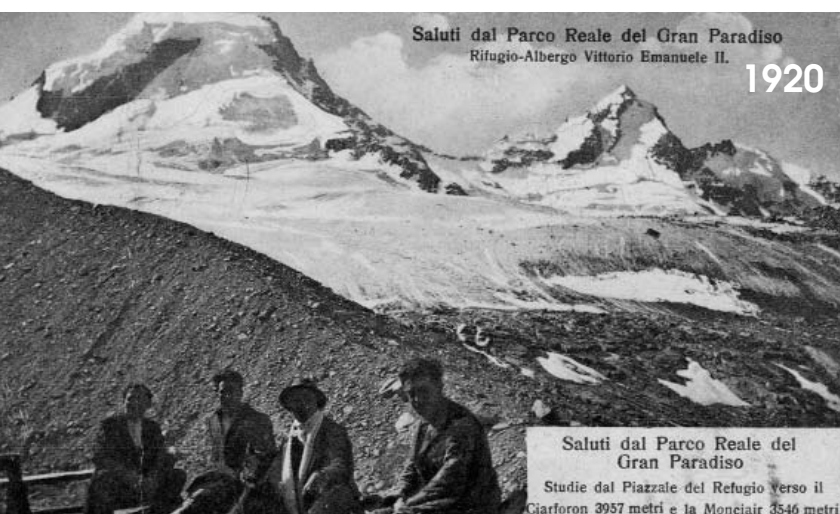


1920



2004

6.74 a, b - Il ghiacciaio grande di Verra (Val d'Ayas) visto dal Palon di Résy intorno al 1920 (qui sotto) e il 24.10.2004 (f. M. Palomba). La grande e sinuosa lingua glaciale valliva è quasi del tutto scomparsa.

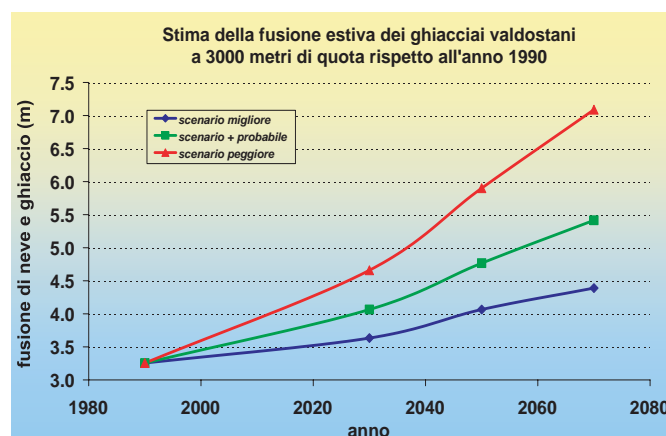
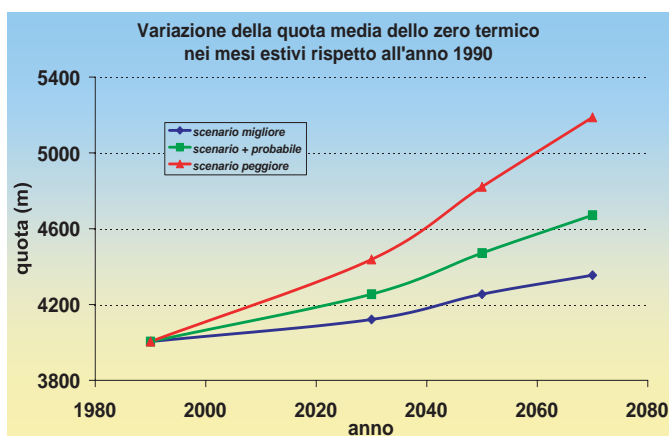


6.75 a, b - Il Ciarforon (3642 m) e la Becca di Monciair (3544 m) con il ghiacciaio di Moncorvè visti dal Rifugio Vittorio Emanuele II in una cartolina degli Anni 1920 (in alto) e il 25.08.2000 (qui sopra, f. D. Cat Berro). Si noti, oltre all'arretramento frontale, l'assottigliamento del ghiaccio sulla parete NW del Ciarforon.

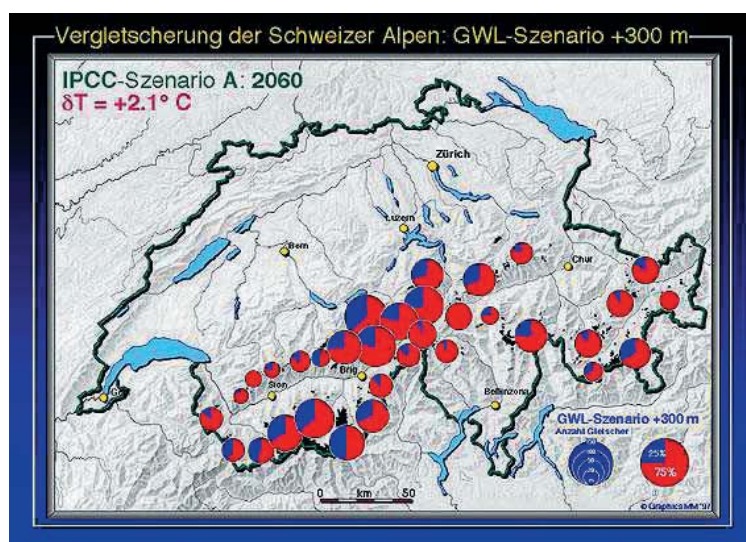
m, vale a dire una perdita di spessore di 0.4 m di neve e ghiaccio per ogni grado di temperatura media estiva maggiore di zero. Gli stessi calcoli applicati ai dati di bilancio di massa del Ghiacciaio Ciardoney in Valle Soana (Gran Paradiso) hanno determinato una sensibilità di 0.43 m w.e. per °C a 3050 m. Data la vicinanza geografica, si possono estendere questi risultati ai ghiacciai valdostani e affermare che oggi, durante la stagione estiva, a 3000 m viene perso in media uno spessore di 0.4 m di neve e ghiaccio per

ogni grado di temperatura media maggiore di zero. Utilizzando la quota media dello zero termico nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto) come indicatore della quota al di sotto della quale avviene la fusione, si può stimare (dati di Plateau Rosa) che questa nel trentennio 1961-1990 avveniva in media al di sotto dei 3500 m. Dal momento che la temperatura media estiva a 3000 m nel trentennio 1961-1990 era di 3.0 °C, si può calcolare che in quel periodo a questa quota si aveva in media una perdita di spessore di neve e ghiaccio di $0.4 \times 3 = 1.2$ m per stagione estiva. Nel 1990 la quota media dello zero termico nella stagione estiva è stata di 4005 m, con una temperatura media a 3000 m di 6 °C; secondo questo modello in quell'anno la perdita di neve e ghiaccio a 3000 m nella stagione estiva è stata di $0.4 \times 6 = 2.4$ m.

I modelli climatici basati su un approccio probabilistico prevedono sulle Alpi occidentali come scenario più probabile un aumento di temperatura media estiva di 2.8 °C nel 2050 e di 4 °C nel 2070 rispetto al valore del 1990; questo farebbe innalzare la quota dello zero termico nei mesi estivi fino a circa 4470 m nel 2050 e a 4670 m nel 2070. Altri scenari meno probabili prevedono, sempre rispetto al 1990, un aumento di temperatura estiva di 2.1 °C (scenario migliore) o di 7.1 °C (scenario peggiore) nel 2070; in questo secondo caso la quota media dello zero termico nei mesi estivi si porterebbe addirittura



6.76, 6.77 - Stime della fusione nivoglaciale annua a quota 3000 m e della variazione di quota del livello medio dello zero termico sulle Alpi valdostane secondo tre differenti scenari di evoluzione climatica.



Evoluzione glaciale nel XXI secolo (scenario IPCC-A)

Anno	T °C	ELA m	% area (da 1995)
2015	+0.7 °C	+100 m	-19%
2035	+1.4 °C	+200 m	-56%
2060	+2.1 °C	+300 m	-70%
2080	+2.8 °C	+400 m	-84%

I diagrammi sulla cartina sopra (fig. 6.78) mostrano in rosso la frazione di superficie glaciale che potrebbe scomparire nei massicci alpini svizzeri entro il 2060 (-70%). Qui riportiamo anche i previsti valori di aumento di temperatura, della quota della linea di equilibrio (ELA = Equilibrium Line Altitude) e della perdita di area glaciale riferiti ad altri orizzonti temporali del XXI secolo. Le informazioni sono desunte dalle ricerche di MAX MAISCH, del Dipartimento di Geografia dell'Università di Zurigo.

www.geo.unizh.ch/phys/research/groupA/szenariench.html

fino a 5190 m nel 2070 (fig. 6.76). A 3000 m di quota, nello scenario più probabile, si passerebbe quindi da una temperatura media estiva di 6 °C nel 1990 a 9 °C nel 2050 e 10 °C nel 2070, che comporterebbe rispettivamente una perdita annua di spessore di neve e ghiaccio di 3.6 m e 4 m. Considerando invece l'aumento di temperatura previsto dallo scenario meno probabile, ma peggiore, la temperatura media estiva a 3000 metri passerebbe da 6 °C a 11 °C nel 2050 e a 13 °C nel 2070, determinando una perdita di spessore di neve e ghiaccio rispettivamente di 4.4 m e 5.2 m all'anno (fig. 6.77). In tali condizioni i ghiacciai valdostani sarebbero destinati alla scomparsa pressoché totale.

7) Produzione idroelettrica: via via meno acqua d'estate

Con l'aumento delle temperature estive, la produzione idroelettrica potrà inizialmente beneficiare di maggiori afflussi d'acqua di

6.79 - La diga di Place Moulin, in Valpelline, è il più grande invaso idroelettrico valdostano, con una capienza massima di 105 milioni di m³. Le sue acque provengono in gran parte dai ghiacciai di Tsa de Tsan e delle Grandes Murailles. La produzione idroelettrica potrebbe risentire in futuro dell'alterazione dei regimi di deflusso dovuta all'aumento delle temperature, con fusione nivale più precoce e afflussi estivi via via meno abbondanti per il regresso dei ghiacciai (f. L. Mercalli, 13.08.2002).

fusione negli invasi sottesi a bacini di origine glaciale (es. Place Moulin, Beauregard), utile specialmente durante le estati siccitose. Tuttavia, questo effetto progressivamente verrà meno con il regresso e la scomparsa dei ghiacciai, lasciando emergere le conseguenze negative del modificato regime dei deflussi in quota (cap. 8).

8) Edilizia e consumi: imporre risparmio ed efficienza energetica

Difficile prevedere quale effetto complessivo avrà, in Valle d'Aosta, il riscaldamento climatico sui consumi energetici: se da un lato la domanda per il riscaldamento degli edifici diminuirà con inverni più miti (in Europa i tiepidi inverni dal 1988 al 1990 hanno comportato un calo di consumi del 2%), dall'altra quella per la climatizzazione potrà aumentare in estate.

Potenziali effetti positivi / opportunità:

- minori consumi invernali per il riscaldamento degli edifici.

Potenziali effetti negativi:

- maggiori consumi estivi per la climatizzazione.
- perdita di stabilità di infrastrutture in aree soggette all'alterazione del *permafrost*.

Strategie di mitigazione e adattamento:

Molto si potrà fare per limitare l'impatto dei cambiamenti climatici su consumi ed efficienza energetica. Il comfort estivo potrà essere migliorato attraverso opportune scelte in ambito edilizio, architettonico e urbanistico, come l'installazione di protezioni solari, di isolamenti termici in pareti e soffitti, lo sviluppo di aree verdi. Sconsigliabile la costruzione di edifici a superficie vetrata, suscettibili di eccessivo surriscaldamento estivo e dispersione invernale (AA.VV., 2003).

9) Trasporti

L'aumento delle temperature avrà almeno un paio di effetti diretti anche sulla rete dei trasporti stradali.

Potenziali effetti positivi / opportunità:

- Minore presenza invernale di neve e ghiaccio sulla rete stradale per le temperature più elevate; minori costi per lo sgombero della neve e per la salatura contro il gelo. Apertura primaverile più anticipata e chiusura autunnale più tardiva dei valichi del Piccolo e Gran San Bernardo.



7. LE PRECIPITAZIONI

«Le conseguenze del cambiamento climatico sulle risorse idriche dipendono non solo dalle possibili variazioni della risorsa stessa... ma anche dalle variazioni nei consumi da parte degli esseri umani e dell'ambiente.» (ARNELL & LIU, 2001)

Quali segnali di cambiamento?

Sulle precipitazioni i segnali del cambiamento climatico in atto sono meno chiari e distinguibili rispetto alle temperature, e si presentano irregolari nello spazio. Le osservazioni condotte da oltre un secolo indicano che globalmente gli apporti pluviometrici sono aumentati dell'1% circa sulle terre

emerse — probabilmente per l'intensificazione del ciclo dell'acqua conseguente all'aumento delle temperature — e fino all'8% in alcune regioni tra il 40° e l'80° parallelo N, mentre sarebbero diminuite nella fascia subtropicale (SCHÄR C., OHMURA A., in AA.VV, 2003). Sul Nord-Ovest d'Italia gli ultimi due secoli hanno visto un calo della piovosità, confermato in ogni stagione (AUER & *al.*, 2005a, BRUNETTI & *al.*, 2006). Grande interesse e dibattito suscita l'evoluzione delle piogge estreme; tuttavia, per l'esiguità del campione di dati a disposizione, gli episodi rari mal si prestano a una significativa analisi statistica. Sul versante

7.1 -
Un
Cumulonim-
bus incus si
erge sui cieli
del Lago
d'Arpy (presso
il Colle San
Carlo, La
Thuile) nel
tardo pome-
riggio del
09.08.1998. Sta
per scoppiare
un temporale
di calore (f. D.
Cat Berro).



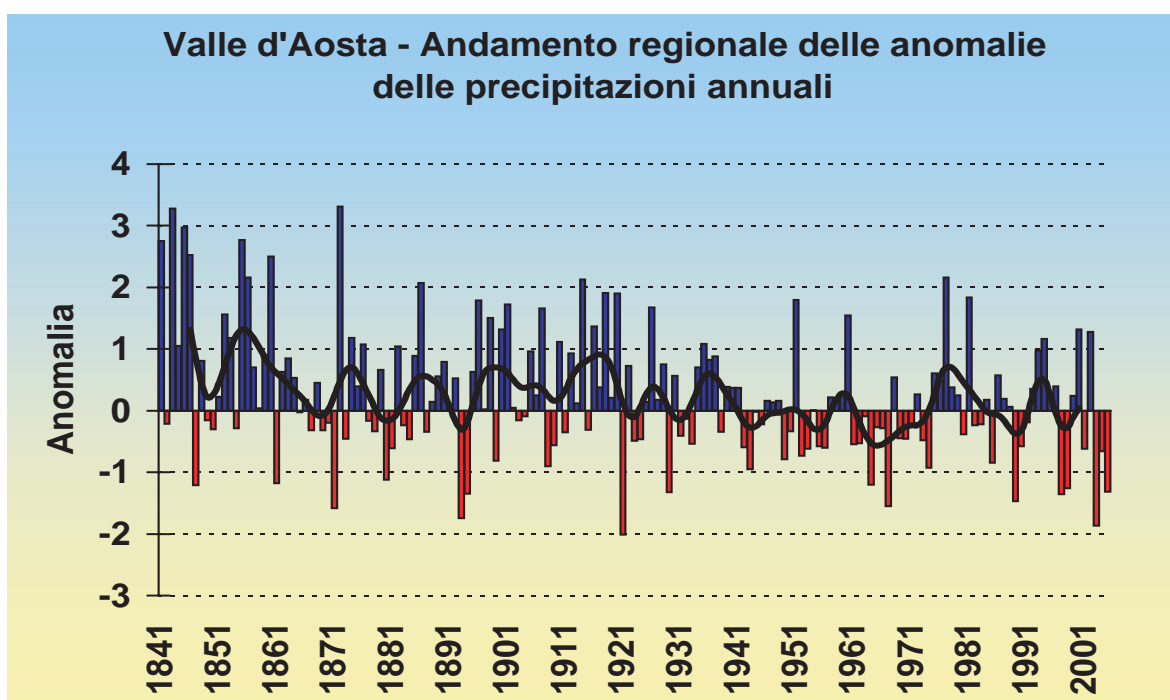
nord-alpino, i climatologi svizzeri hanno individuato tendenze all'aumento di frequenza delle quantità di piogge giornaliere che hanno tempo di ritorno di un mese sul lungo periodo (FREI & SCHÄR, 2001); la tendenza è significativa nel 30% delle stazioni considerate, e gli aumenti si collocano tra il 20 e l'80% in un secolo; e a conclusioni simili si è giunti per le precipitazioni intense della durata di 2÷5 giorni; nessuna tendenza è stata individuata invece sul versante sud-alpino della Svizzera.

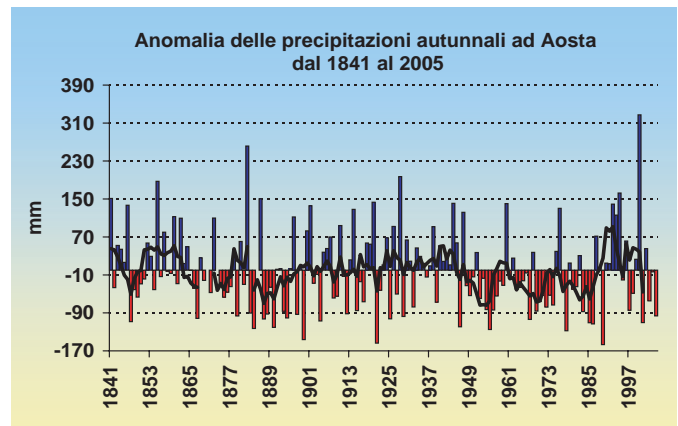
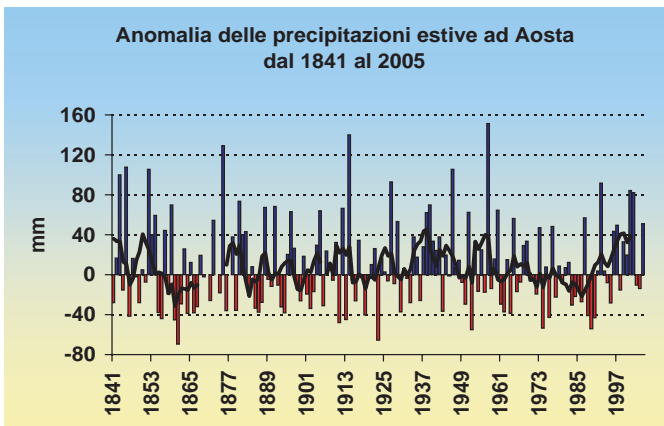
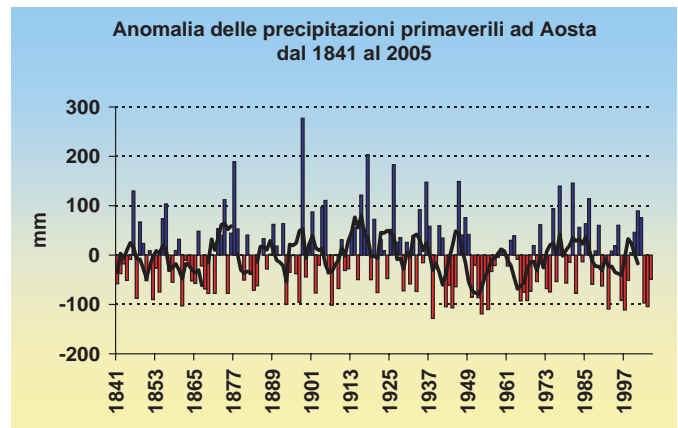
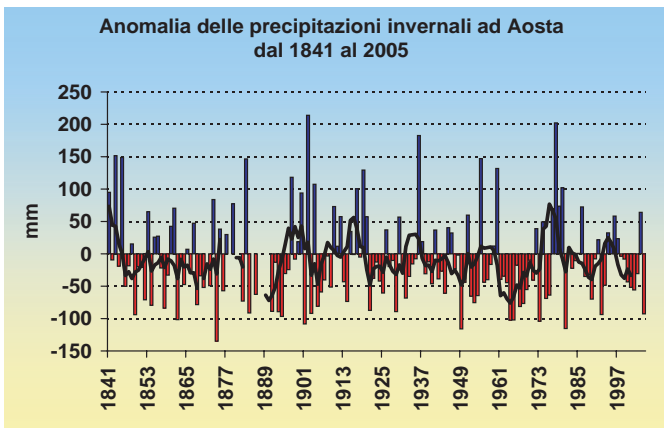
La situazione in Valle d'Aosta: nel 1800 pioveva di più

Anche per le precipitazioni si è calcolato l'indice di anomalia regionalizzato (SAI) per evidenziare l'evoluzione nel tempo del parametro (Fig. 7.2).

Il periodo di indagine comincia nel 1841, anno di inizio della serie pluviometrica di Aosta, ma soltanto dal 1913 - con l'istituzione dell'Ufficio Idrografico del Po - il numero di stazioni disponibili cresce rapidamente, fino a superare le 40 unità tra il 1930 e il 1970. Dall'analisi delle anomalie regionalizzate si **individua una lieve tendenza al calo nella quantità di precipitazione**, a conferma di quanto osservato altrove al Nord Italia. Si riscontra un lungo periodo, dalla seconda metà del 1800 fin verso il 1940, segnato da apporti spesso superiori alla media. In seguito si instaura un'alternanza irregolare di periodi più o meno piovosi, senza alcuna periodicità significativa, comunque gli anni piovosi divengono meno frequenti, a vantaggio di quelli più asciutti del normale. Una fase di relativo

7.2 - Evoluzione dell'indice standardizzato di anomalia (SAI) delle precipitazioni annue in Valle d'Aosta, dal 1841 al 2005. Per quasi tutto il XIX secolo la curva è stata ottenuta dalla sola stazione di Aosta. Solo nel 1913, con la fondazione dell'Ufficio idrografico del Po, la disponibilità di dati continuativi aumenta considerevolmente. Si nota una lieve tendenza alla diminuzione degli apporti di pioggia e neve fusa, specie dalla metà del XX secolo.

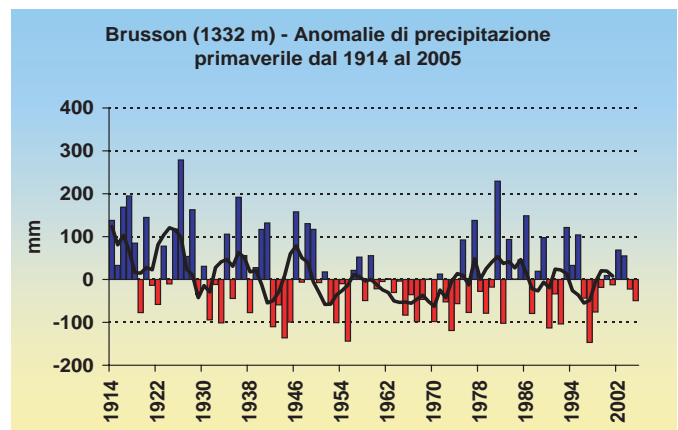
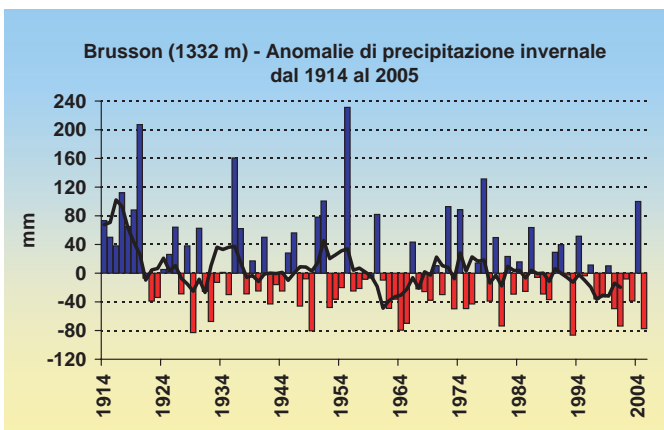


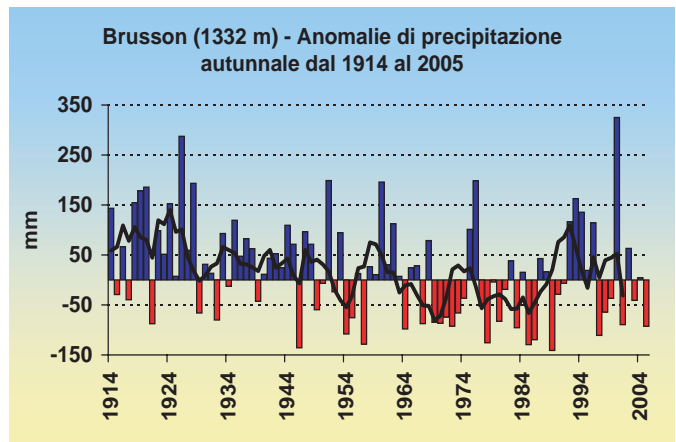
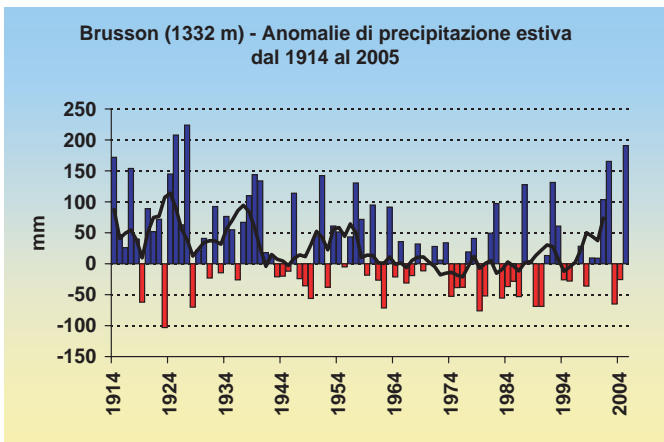


7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 - Aosta e Brusson. Serie degli scarti (mm) delle precipitazioni stagionali dalla media del periodo 1971-2000.

deficit pluviometrico interessa il trentennio 1940-1970, mentre nel decennio successivo le precipitazioni tornano a essere più abbondanti. All'interno di questo periodo si colloca il 1977, l'anno più piovoso dal 1900 a scala regionale (si rilevano 1525 mm a Lillaz, 1800 mm al Lago Gabiet, 1877 mm a

Bard e 2419 mm a Pont Boset). Forti anomalie negative di piovosità si ripresentano dal 1982 al 1991 e — in seguito — dal 1997; in particolare gli ultimi anni, con l'eccezione del 2000 e del 2002, sono stati tutti siccitosi, tendenza confermata anche dai primi mesi del 2006.





7.9, 7.10 - Brusson, serie degli scarti (mm) delle precipitazioni estive e autunnali dalla media del periodo 1971-2000.

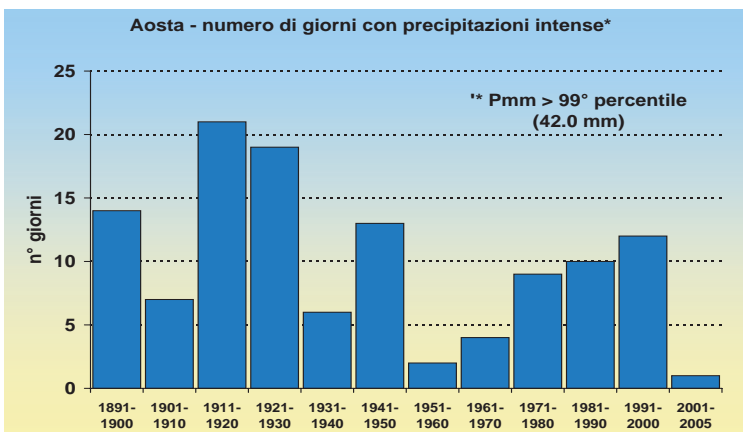
A livello stagionale, invece, sia nella serie pluviometrica di Aosta (fig. da 7.3 a 7.6), sia in quella di Brusson (fig. da 7.7 a 7.10), non si notano tendenze significative nella quantità di precipitazione, ma soltanto fluttuazioni irregolari tra gruppi di anni più piovosi e altri più asciutti. Tra le stagioni autunnali, spicca quella del 2000, la più piovosa della serie in entrambe le località considerate per via delle precipitazioni eccezionali di metà ottobre.

7.11 - Conteggio dei giorni con precipitazione giornaliera intensa, superiore al 99° percentile ad Aosta, per decenni. Ancora non si manifestano segnali rilevanti di cambiamento.

Piogge intense: per ora nessuna tendenza significativa

La ricerca di tendenze nella distribuzione

degli eventi pluviometrici rari e di forte intensità è estremamente complessa e soggetta a delicati problemi di interpretazione statistica. Si è deciso di considerare come evento di precipitazione intensa quello in cui si è accumulato un quantitativo giornaliero di pioggia pari almeno al 99° percentile della distribuzione nel trentennio 1971-2000. Il 99° percentile è la soglia al di sopra della quale si trova solo l'1% dei dati (giornalieri, in questo caso) della serie di misura. Considerando la sola serie di Aosta, ottenuta dall'unione della serie storica del centro-città (1841-1973) con quella di St-Christophe (1974-2005), le soglie di precipitazione intensa sono 46.7 mm/giorno per la stagione primaverile, 26.2 mm/giorno per la stagione estiva, 55.1 mm/giorno per la stagione autunnale, 39.6 mm/giorno per la stagione invernale e 42.0 mm/giorno per l'anno solare. Le figure da 7.11 a 7.15 mostrano la variazione nel numero di giorni con piogge intense nei decenni dal 1891 al 2005 per le diverse stagioni.



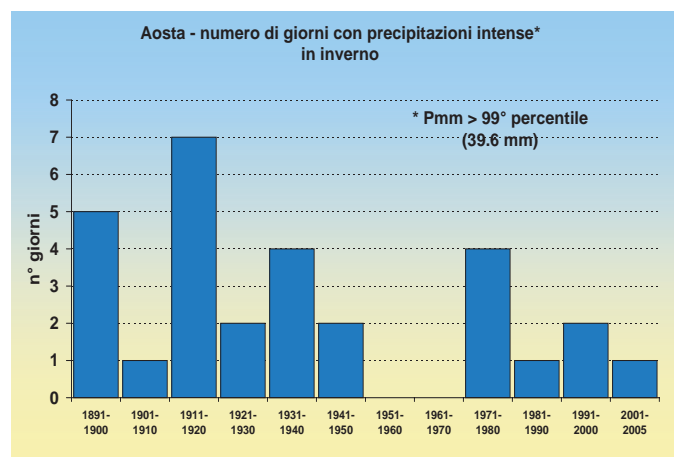
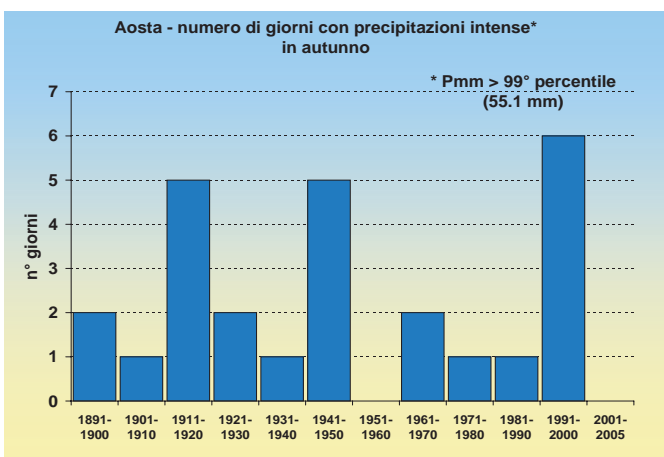
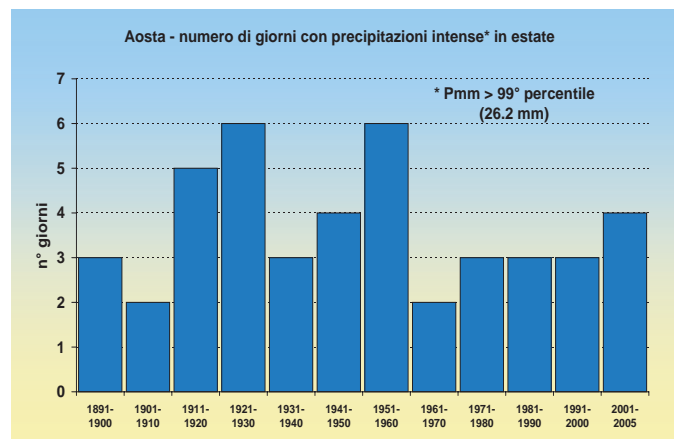
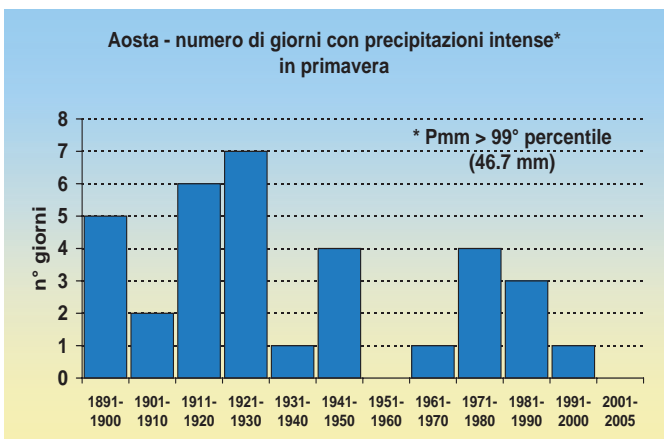
In generale, gli eventi intensi erano più frequenti prima del 1920, in seguito la loro frequenza è diminuita, con un minimo piuttosto pronunciato tra gli Anni 1950 e 1960. Tale andamento è molto evidente a livello annuale, in inverno e primavera, mentre l'autunno presenta un picco nel decennio 1990-2000, dovuto ai numerosi eventi alluvionali (24 settembre 1993, 5-6 novembre 1994, 13-15 ottobre 2000). L'estate, pur mostrando complessivamente una tendenza ad una diminuzione nella frequenza degli eventi di precipitazione intensa dopo il 1920, presenta un andamento più omogeneo nel tempo.

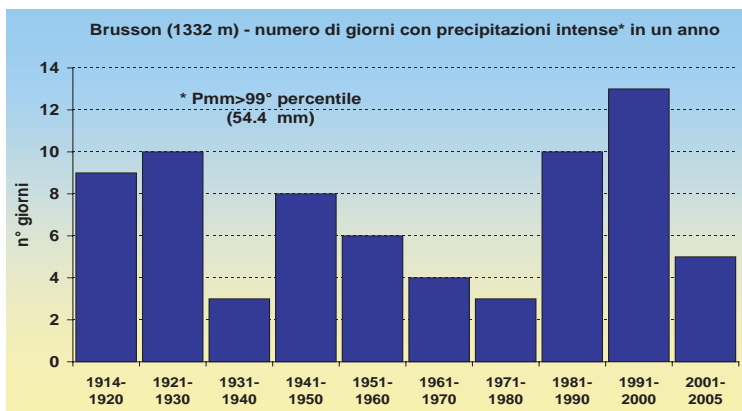
Eseguendo le stesse analisi sulla serie di Brusson (periodo 1914-2005, quindi manca in gran parte il periodo più piovoso tra la fine del 1800 e i primi vent'anni del 1900), si trovano risultati in parte differenti.

Le soglie di precipitazione intensa (99° percentile della distribuzione tra il 1971 e il 2000) sono rispettivamente 52.9 mm/giorno in primavera, 45.0 mm/giorno in estate, 65.0 mm/giorno in autunno, 43.1 mm/giorno in inverno e 54.4 mm/giorno per l'anno solare.

A livello annuale è sempre evidente il periodo con precipitazioni intense meno frequenti tra gli Anni 1940 e 1960, ma

7.12, 7.13, 7.14, 7.15 -
Conteggi stagionali dei giorni con precipitazione giornaliera intensa, superiore al 99° percentile ad Aosta, per decenni. Non si individuano tendenze all'aumento di frequenza di piogge intense.



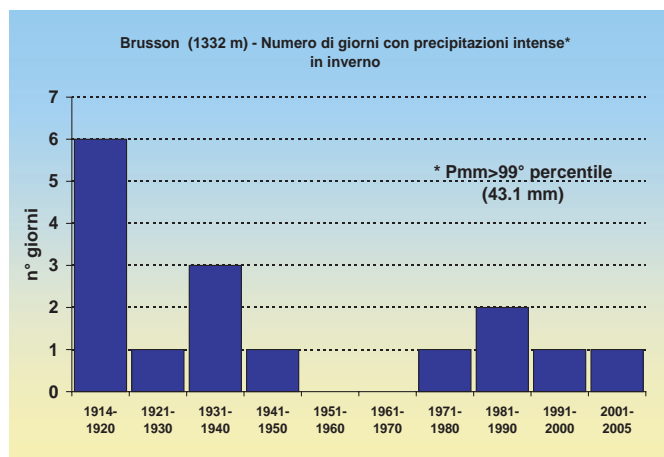
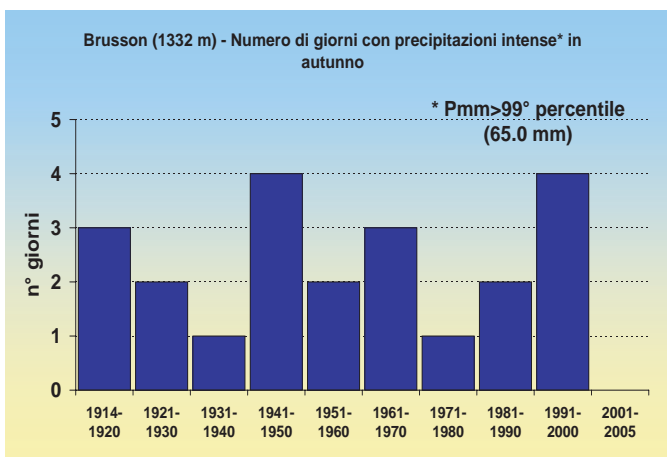
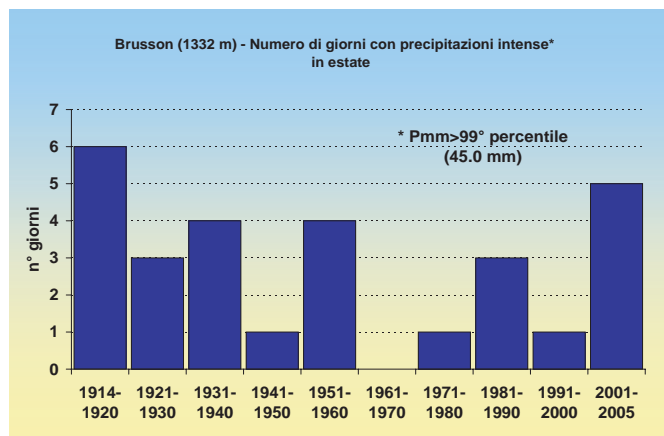
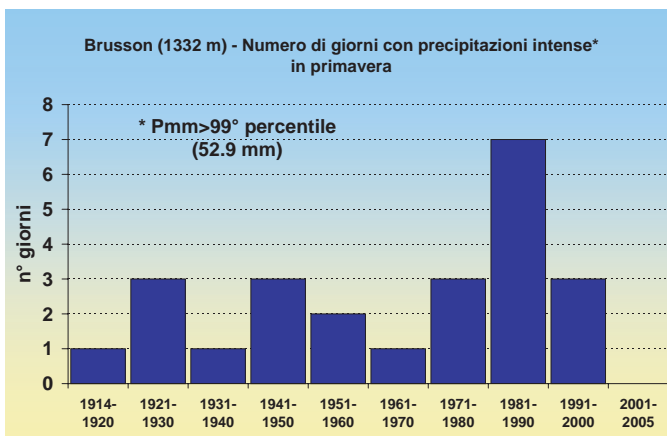


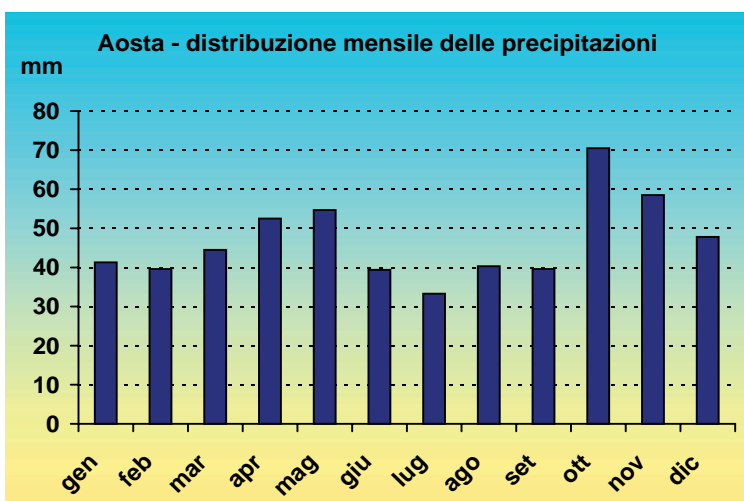
mato costante, con l'eccezione di un picco isolato negli Anni 1980 (fig. 7.17, 7.20). In estate e in autunno non vi è alcuna tendenza significativa: nella stagione autunnale non solo non appare il minimo degli anni 1940-1960, ma, al contrario, la frequenza degli eventi intensi è relativamente alta (fig. 7.18, 7.19).

Da 7.16 a 7.20 - Conteggio annuale stagionale dei giorni con precipitazione superiore al 99° percentile a Brusson, per decenni.

appare una nuova fase con precipitazioni più intense negli ultimi 20 anni (fig. 7.16). Analizzando gli andamenti delle singole stagioni si nota come, in inverno, dopo gli anni 1920 si sia drasticamente ridotta la frequenza degli eventi intensi, mentre in primavera questa si sia mantenuta tutto som-

In sostanza, attualmente, in base ai dati rilevati in Valle d'Aosta nell'ultimo secolo, non è possibile individuare tendenze significative nella frequenza delle piogge intense, benché non sia da escludere un loro incremento futuro, secondo gli scenari a scala europea.





7.21 - Regime mensile delle precipitazioni ad Aosta. La stagione più piovosa è l'autunno, in particolare il mese di ottobre con 70 mm. Dei due minimi, l'estivo è quello più pronunciato, sul capoluogo come su buona parte del settore occidentale della Valle d'Aosta.

7.22 - La fusione nivale garantisce importanti deflussi torrentizi e fluviali anche durante l'estate in Valle d'Aosta, di primaria importanza per l'irrigazione a fondo-valle. A lato, nel Vallone del Breuil (La Thuile) il 04.07.2004 (f. D. Cat Berro).

Regime delle precipitazioni: siccità estiva e invernale, piogge in primavera e autunno

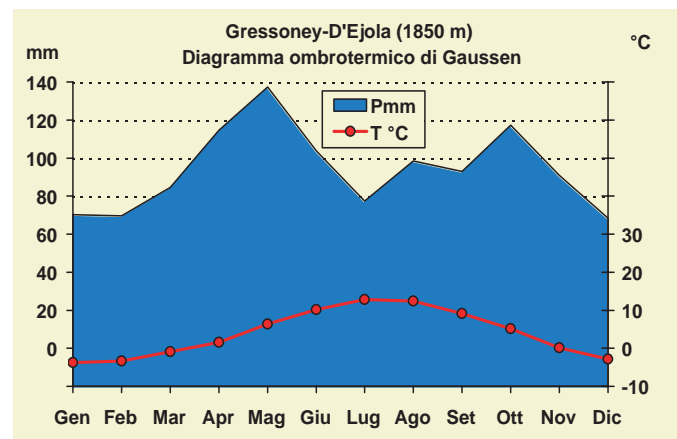
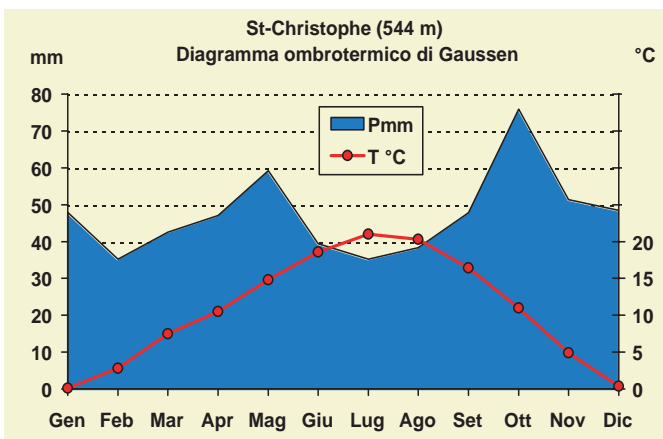
Su tutta la Valle d'Aosta **le precipitazioni più abbondanti si misurano solitamente nelle stagioni intermedie**, primavera e autunno, mentre inverno ed estate conoscono in genere una flessione negli apporti: si tratta di un regime pluviometrico di tipo *sub-litoraneo alpino* (AA.VV., 2003a). Alcune sfumature però si individuano entro i confini regionali: sulla metà occidentale della Vallée prevalgono il massimo pluviometrico autunnale e il minimo estivo, mentre sulla metà orientale prevalgono il massimo primaverile e il minimo invernale. Ad Aosta il mese più piovoso è ottobre, che, mediamente, nel trentennio di riferimento 1971-2000, ha ricevuto 77 mm di precipitazione. Quello più secco è invece luglio, con 33 mm in media (Fig. 7.21).

La siccità: aridità estiva nella valle centrale

Se la carenza invernale di precipitazioni preoccupa gli operatori turistici legati alla

pratica dello sci, quella estiva può divenire un problema per l'agricoltura, specialmente lungo i versanti soleggiati della valle centrale, in cui l'evapo-traspirazione è più intensa, i temporali estivi sono meno frequenti e parallelamente la disponibilità di acqua (meteorica e di fusione) per l'irrigazione è minore. Per identificare l'eventuale esistenza di una stagione arida, si può usare il metodo del diagramma ombrotermico di *Gausson & Bagnouls*, che riporta in ordinata l'andamento medio mensile delle precipitazioni (P, in mm) e delle temperature (T, in °C) su due scale diverse, tali per cui $P=2T$. L'intersezione tra le curve dei due parametri (con $P<2T$) segnala la presenza di aridità, come infatti si verifica a St-Christophe in luglio e agosto, mesi in cui ai massimi calori estivi si associa





7.23, 7.24 - Diagrammi ombrotermici di Gausson & Bagnouls per St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. Nel fondo valle si evidenzia una situazione di leggera aridità in luglio e agosto (intersezione delle curve di temperatura e precipitazioni), mentre ciò non si verifica alle falde del Monte Rosa, dove il clima estivo è più fresco e umido.

una drastica flessione nelle precipitazioni (Fig. 7.23). Nelle stazioni in quota, soggette a temperature più fresche, minore evaporazione e, soprattutto, temporali estivi più frequenti, non si individua una stagione arida, come visibile dal diagramma ombrotermico di Gressoney-D'Ejola (Fig. 7.24).

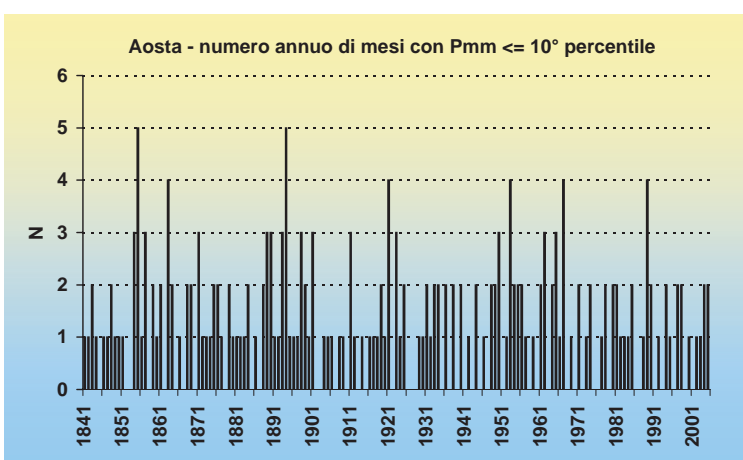
Il grafico 7.25 mostra, per la serie pluviometrica di Aosta dal 1841 al 2005, il numero annuale di mesi in cui la precipitazione è rimasta al di sotto del 10° percentile (la soglia al di sotto della quale si trova il 10%

del campione di dati); questo consente di conteggiare i mesi siccitosi in modo molto anomalo. **L'evoluzione delle siccità non mostra tendenze di sorta.**

Tuttavia, si deve rilevare come negli ultimi anni — a partire dal 2003 — si sia susseguita una serie di siccità anomale a inizio estate, associate a forti ondate di calore, intensa evaporazione e dunque precoce ingiallimento di prati e pascoli, con conseguenze negative sulla pastorizia, importante risorsa economica per la Valle d'Aosta. Il periodo è ancora troppo breve per distinguere se si tratti di una combinazione «casuale», oppure di un primo effetto del cambiamento climatico, ma è certo che un comportamento di questo tipo ben si inquadra nei futuri scenari previsti dai modelli.

Il caso del 2003: eccezionale combinazione di calura e siccità

L'eccezionale calura dell'estate 2003 (cfr. cap. 6) è stata associata a una prolunga-



7.25 - Il conteggio del numero annuo di mesi con precipitazione inferiore alla soglia del 10° percentile è uno dei diversi modi per quantificare le situazioni di siccità più importanti. Nonostante i timori fondati per un aumento delle siccità future, per ora ad Aosta non si intravedono tendenze sul lungo periodo.



7.26, 7.27 - Nell'estate 2003 la combinazione tra caldo estremo e prolungata carenza di precipitazioni ha prodotto un grave e inusuale stress idrico su pascoli e boschi valdostani. In queste immagini, ingiallimento precoce dei pascoli di By (Ollomont) il 20 luglio (in alto), e degli arbusti intorno a Carema, poco oltre il confine con il Piemonte (29.06.2003, f. D. Cat Berro, qui sopra).
 7.28, 7.29 - La prolungata aridità viene evidenziata dal diagramma ombrotermico di St-Christophe, nei mesi marzo-giugno e agosto-settembre 2003. In luglio temporali anche intensi hanno smorzato la siccità, ma solo a livello temporaneo e molto locale. A Gressoney, in virtù delle temperature più moderate, non si è manifestata vera e propria aridità.

Valle d'Aosta: la siccità del 2003 in cifre

Aziende agricole danneggiate: 2378

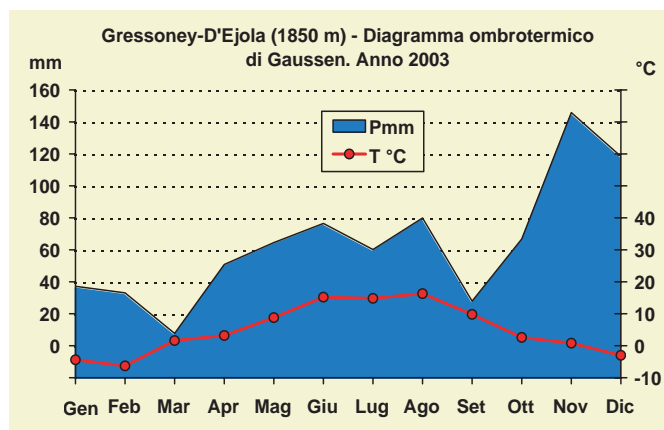
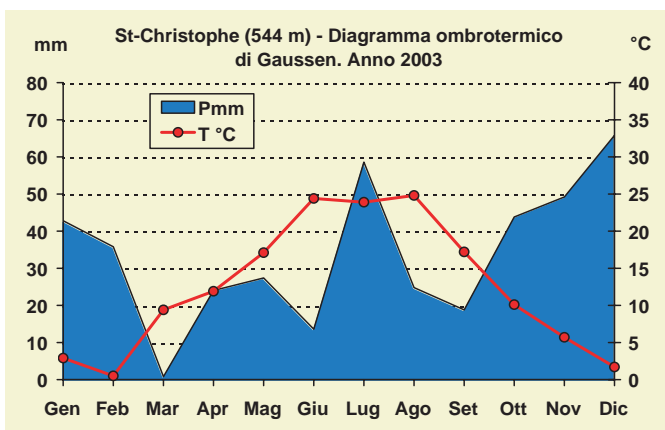
Danno medio per azienda: 26.5%

Superficie a prato interessata: 9.870 ha

Perdita di fieno: 17.693 t

Danno economico (fieno): 2.503.620 Euro

ta carenza di piogge: a St-Christophe, dal 5 febbraio al 19 ottobre 2003 si sono totalizzati appena 176 mm di precipitazione, quantità pari al 44% del normale (periodo 1974-2000). Si può ragionevolmente affermare che pascoli, boschi e giardini valdostani non avessero mai sperimentato una combinazione climatica così sfavorevole almeno dall'inizio delle misure termo-pluviometriche verso la metà del XIX secolo. Già a fine giugno, sui versanti della bassa Valle d'Aosta, si è osservato un grave stress fisiologico delle popolazioni forestali, con esteso ingiallimento e talora disseccamento e morte di alberi e arbusti. Tuttavia, dall'esame dendrocronologico condotto sulle



Superfici agricole in Valle d'Aosta

(fonte: Ass. Agricoltura e Risorse
Naturali, dati 2005)

Vigneto DOC: 231,58 ha
 Vigneto da tavola: 209,86 ha
 Prato irriguo: 8.669,61 ha (82% del totale)
 Prato asciutto: 1.868,63 ha
 Prato arborato: 148,90 ha
 Pascolo fertile: 9413 ha
 Pascolo magro: 30.787 ha
 Superficie agricola utilizzata totale:
 51.951 ha

7.30 -
 Andamento
 delle precipi-
 tazioni giorna-
 liere cumulate
 a St-
 Christophe nel
 2003 e con-
 fronto con la
 media del
 periodo 1974-
 2000.
 Nell'anno si
 sono totalizzati
 405 mm di
 pioggia e
 neve fusa, pari
 ad appena il
 70% del nor-
 male.

colline intorno a Ivrea (PIDORÌ & al., 2006),
 risulta come non tutte le specie considera-
 te abbiano manifestato una significativa
 alterazione dell'accrescimento radiale, e
 come gli effetti più evidenti si siano limitati
 a ciliegio, castagno, rovere e roverella. Più
 immediate e importanti le perdite econo-
 miche nel settore agricolo e dell'alleva-
 mento: nel riquadro della pagina prece-

dente sono riportate alcune cifre sui danni
 censiti, desunte dal Piano di Sviluppo
 Rurale 2000-2006 della Valle d'Aosta (fonte:
 Ass. Agricoltura e Risorse Naturali).

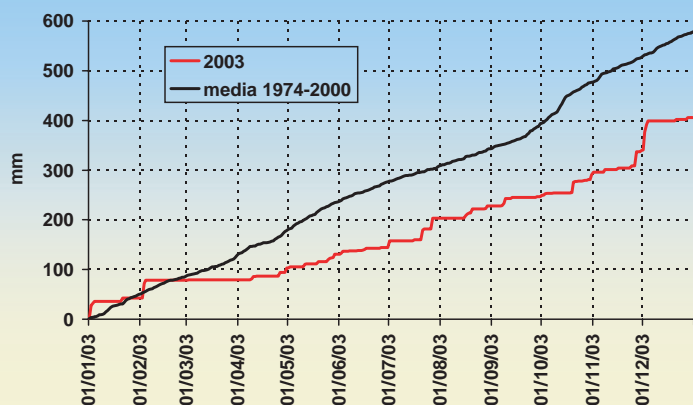
Quantomeno le temperature elevate
 hanno messo a disposizione delle reti di irri-
 gazione importanti deflussi d'acqua di
 fusione glaciale, tali da contenere almeno
 in parte — anche se a costi elevati — le
 perdite alle produzioni foraggere.

Cosa prevedono i modelli climatici per il futuro? Più siccità estive in Valle d'Aosta.

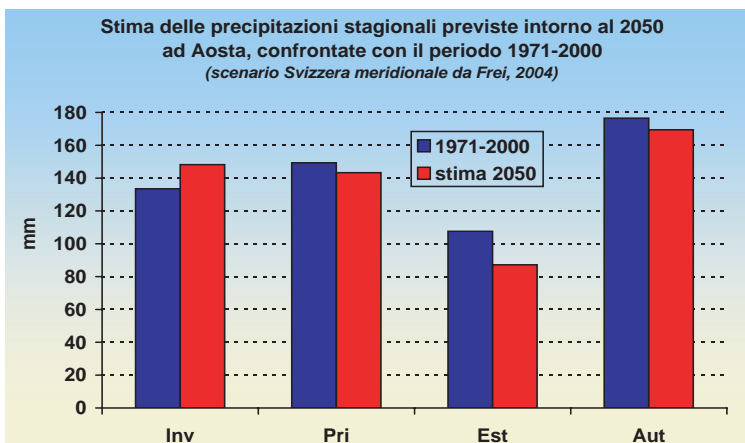
L'ulteriore aumento futuro delle temperatu-
 re originerà verosimilmente un'intensifica-
 zione del ciclo dell'acqua, un aumento
 dell'umidità complessivamente contenuta
 in atmosfera e, dunque, un incremento
 delle precipitazioni medie ed estreme, ma
 con modalità e caratteristiche molto ir-
 regolari da una regione all'altra del pianeta:
 in alcune zone pioverà di più, in altre pio-
 verà di meno.

Inoltre, nuovi assetti nelle configurazioni
 bariche a grande scala potranno modifi-
 care i regimi pluviometrici, ovvero la distri-
 buzione della pioggia durante le stagioni:
 le precipitazioni invernali potrebbero
 aumentare alle medie ed alte latitudini
 boreali e in Antartide, mentre quelle estive
 potrebbero diminuire nelle zone continen-
 tali delle medie latitudini (IPCC, 2001 - in
 AA VV, 2003).

Precipitazioni cumulate nel 2003 a St-Christophe e
 confronto con la norma

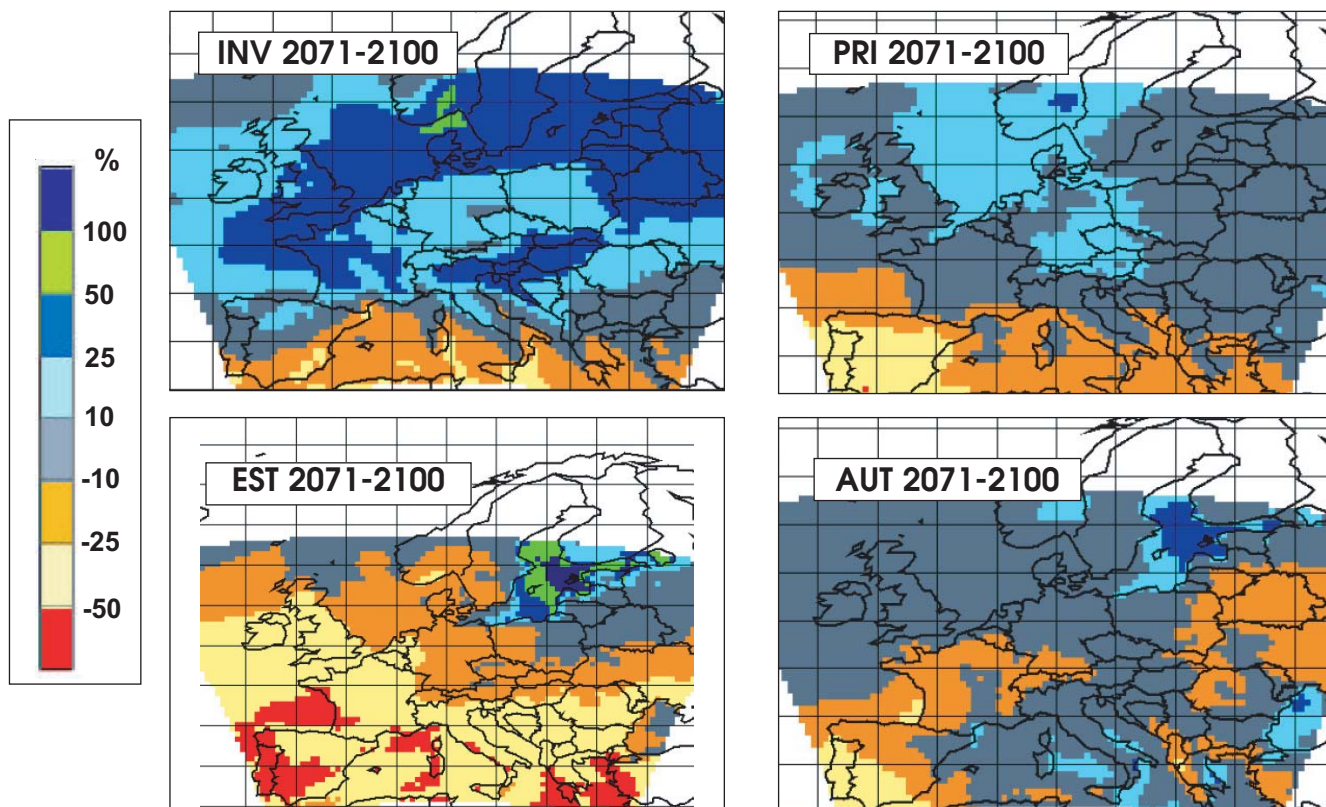


Previsione precipitazioni medie stagionali intorno al 2050, secondo diversi livelli di probabilità (da Progetto Prudence, in Frei, 2004)								
	Prob.	0.025	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.975
Svizzera Sud	Inv	+1%	+4%	+6%	+11%	+17%	+20%	+26%
	Pri	-15%	-12%	-9%	-4%	0%	+4%	+5%
	Est	-36%	-30%	-26%	-19%	-13%	-10%	-6%
	Aut	-14%	-10%	-8%	-4%	-1%	+1%	+4%



7.31, 7.32 - Variazioni delle precipitazioni stagionali previste sulla Svizzera meridionale all'orizzonte temporale del 2050, secondo differenti livelli di probabilità, ottenute dal progetto PRUDENCE (FREI, 2004), Il grafico riporta le variazioni più probabili (P=0.5) applicate alla situazione attuale di Aosta. 7.33 a, b, c, d - Variazioni delle precipitazioni stagionali in Europa previste dalle simulazioni del progetto PRUDENCE per il trentennio 2071-2100. Significative le riduzioni attese in estate sull'Europa centro-meridionale.

Anche per le precipitazioni, in questo studio sono stati utilizzati i risultati dei modelli climatici regionali emersi nell'ambito del progetto PRUDENCE per la Svizzera meridionale, e riportati in FREI, 2004 (fig. 7.31). Da questi emerge come, **a Sud delle Alpi, le precipitazioni potranno aumentare soltanto in inverno, e per lo più diminuire nelle altre stagioni, specialmente in estate.** Lo scenario più probabile (P= 0.5) prevede, all'orizzonte temporale del 2050, aumenti dell'11% in inverno e diminuzioni del 4% in primavera e autunno. L'estate potrebbe mostrare le variazioni più importanti rispetto alla situazione odierna, con un calo più probabile degli apporti del 19%; però, tenendo presenti anche gli scenari più pes-



simistici, vi è un 2.5% di probabilità ($P=0.025$) che le piogge estive decrescano anche del 36%, e anche considerando lo scenario di probabilità più ottimistico, sarebbe comunque da attendersi un calo degli apporti estivi del 6% almeno. Nel grafico 7.32 le variazioni stagionali previste dal progetto PRUDENCE sono state applicate ai

«L'agricoltura è naturalmente sensibile alle condizioni climatiche. Senza adattamento, la produzione agricola e le economie e le società agricole hanno generalmente dei problemi di fronte al cambiamento climatico; per contro, queste possono divenire meno vulnerabili se si adottano strategie di adattamento.» (SMIT & SKINNER, 2002)



7.34, 735 - I regimi pluviometrici si riflettono in modo incisivo sull'aspetto del paesaggio. Il rapido ingiallimento dei pascoli domina al prevalere del minimo pluviometrico estivo, come a La Magdeleine (in alto, 17.11.1990, f. L. Mercalli), mentre a Gressoney, più bagnata dai temporali, l'erba resta di solito verde (qui sopra, 01.07.1990, f. L. Mercalli). E' la distinzione tra le «Alpi gialle» e le «Alpi verdi», classificazione climatica diffusa nelle Alpi francesi.

valori medi di Aosta del periodo 1971-2000.

COSA POTREBBE ACCADERE IN VALLE D'AOSTA: EFFETTI, STRATEGIE E OPPORTUNITÀ

1) Agricoltura

Potenziali effetti positivi/opportunità:

— Insorgenza meno frequente di attacchi fungini per la minore umidità del suolo e durata della bagnatura fogliare.

Potenziali effetti negativi:

— Accentuazione delle siccità estive, con cali della produttività foraggera e agricola in generale, specie se in concomitanza con stagioni estive particolarmente calde.

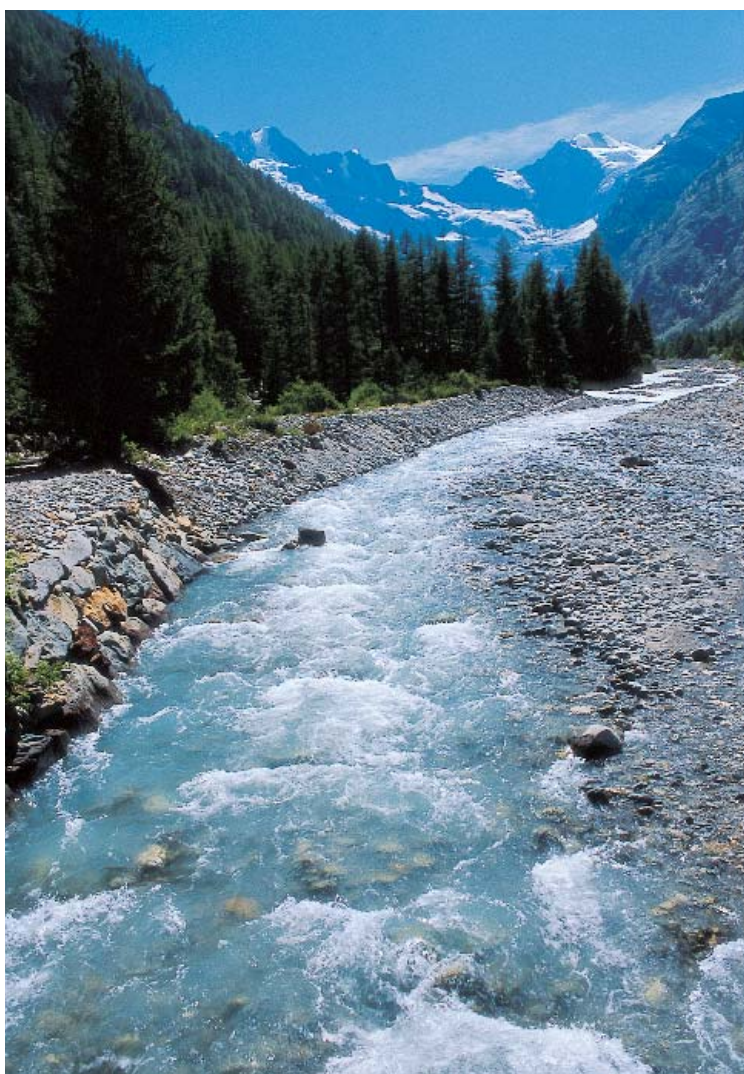
Strategie di mitigazione/adattamento:

— Potenziamento degli impianti di irrigazione, con mantenimento e ripristino della preziosa rete di antichi canali (*ru*) al

fine di ottimizzare la distribuzione dell'acqua disponibile. D'altra parte il potenziale di irrigazione dei prati valdostani è elevato, poiché l'82% di questi è irriguo.

- Riduzione al minimo degli sprechi, ove possibile, attraverso impianti di irrigazione «goccia a goccia».
- Raccolta delle acque meteoriche dai pluviali in cisterne per l'irrigazione di orti e giardini. Questo consentirebbe di garantire una certa autonomia alle singole unità familiari/aziendali, allentando al tempo

7.36 - II
Torrente
Valnontey a
monte di
Cogne
(08.09.2004, f.
D. Cat Berro).



stesso i prelievi di preziosa acqua potabile (cfr. approfondimento a p. 96).

- Appropriata selezione di varietà colturali più resistenti al secco.

2) Sanità

Potenziali effetti negativi:

- Possibile maggiore sollevamento di polveri per azione del vento su suoli disseccati, dispersione dei fumi di incendi, ecc...
- Maggiore presenza di aerosol atmosferico in conseguenza del minore abbattimento da parte delle precipitazioni, specialmente in estate.

Strategie di mitigazione/adattamento:

- Frequenti controlli della qualità dell'aria e dell'acqua.
- Limitazioni al traffico cittadino nei periodi ostinatamente secchi e caldi (formazione di smog fotochimico, es. O₃) e nelle ore più calde, sebbene la vivace ventilazione diurna del fondovalle aostano già favorisca l'attivo rimescolamento dell'aria.

3) Turismo

Potenziali effetti positivi:

- Incidenza positiva della minore frequenza delle precipitazioni estive sulla fruibilità dell'ambiente naturale e montano (escursioni, gite, manifestazioni e attività all'aperto).

Contro la siccità l'operazione «Acqua dai tetti»

Un rimedio semplice e molto efficace per affrontare le siccità estive, in probabile aumento in futuro, consiste nell'installazione di capienti cisterne per la raccolta delle acque meteoriche dai pluviali di abitazioni, industrie, capannoni, ecc... Si tenga presente che 1 mm di precipitazione corrisponde a 1 litro/m²: un breve temporale estivo che scarichi ad esempio 10 mm di pioggia su un tetto di medie dimensioni - 100 m² - consente già di raccogliere in pochi minuti ben 1000 litri, pari a un metro cubo d'acqua. Ma immaginiamo un impianto «modello»: un tetto di 120 m², e precipitazione media prevista per il 2050 ad Aosta durante la fase di riposo vegetativo, tra autunno e inverno, pari a circa 310 mm. Ipotizzando di disporre di un adeguato serbatoio di raccolta, in tale situazione si potrebbero accumulare circa 37.2 m³ d'acqua (un cubo dal lato di 3.34 m): utilizzando questa riserva idrica tra primavera ed estate, lungo un arco di 180 giorni da aprile a settembre, e immaginando - molto pessimisticamente - che non vi siano ulteriori precipitazioni, la disponibilità d'acqua corrisponderebbe a 206 l/giorno, una quantità sufficiente a irrigare un orto-giardino di medie dimensioni (circa 70÷100 m²) per produzione familiare. E' pertanto auspicabile istituire regolamenti edilizi che prevedano obbligatoriamente l'installazione di sistemi di raccolta dell'acqua piovana su edifici di nuova costruzione ed eventuali incentivi per la realizzazione su quelli già esistenti.

Potenziati effetti negativi:

- Disagio per i turisti in villeggiatura in caso di razionamento dell'acqua potabile, ipotesi peraltro relativamente remota in una regione come la Valle d'Aosta.
- Minore disponibilità di acqua per l'innevamento programmato.

Strategie di mitigazione/adattamento:

- Educazione dei turisti al consumo responsabile dell'acqua.
- Scelta di attività a basso consumo di acqua potabile; nei periodi siccitosi valutare l'opportunità di mantenere o meno in funzione piscine, fontane artistiche e giochi d'acqua.

4) Foreste, biodiversità ed ecosistemi

Potenziati effetti negativi:

- Stress fisiologico per le comunità vegetali in caso di siccità prolungate, come accaduto nell'estate 2003 (cfr. approfondimento), con indebolimento o moria di alberi, e frammentazione dei popolamenti forestali e degli ecosistemi. Predisposizione all'attacco di parassiti (es. scolitidi), a seguito dell'indebolimento fisiologico delle piante.
- Frequenza degli incendi. I roghi di boschi in Valle d'Aosta, come quasi ovunque sulle Alpi occidentali, sono più frequenti tra inverno e inizio primavera, quando — in assenza di pioggia o nevicata — la

7.37 -
 Conteggio
 delle alluvioni
 censite in Valle
 d'Aosta (da:
 «Atlante clima-
 tico della Valle
 d'Aosta»,
 AA.VV.,
 2003a). La
 concentrazione
 di episodi
 successiva al
 1850 è da
 attribuirsi al
 miglioramento
 nella qualità
 delle informa-
 zioni d'archivio
 disponibili. La
 disomogeneità
 nella base
 informativa e
 le variazioni
 nella vulnera-
 bilità del terri-
 torio rendono
 molto difficile,
 se non quasi
 impossibile,
 distinguere
 reali tendenze
 di natura fisica
 nell'evoluzione
 degli episodi
 alluvionali.

lettiera conserva molto materiale secco combustibile, e quando il föhn può favorire la propagazione delle fiamme. Effettuare previsioni sul futuro andamento degli incendi boschivi è piuttosto azzardato, ma se — come indicano i modelli numerici — le precipitazioni invernali sono destinate ad aumentare moderatamente durante il XXI secolo, è lecito immaginare un calo nel potenziale sviluppo di incendi. Al contrario, le maggiori siccità estive potrebbero favorire l'innescò di roghi in mesi in cui ora questi sono piuttosto rari, come ad esempio in luglio e agosto. I versanti spogliati della vegetazione a seguito di un incendio possono subire più facilmente dissesti, come accaduto in Canton Ticino nel 1997: in luglio un vasto incendio interessò l'80% del bacino del riale Buffaga presso Ronco sopra Ascona, e nel successivo mese di agosto una pioggia di intensità decennale scatenò una piena torrentizia secolare, con una colata di fango del

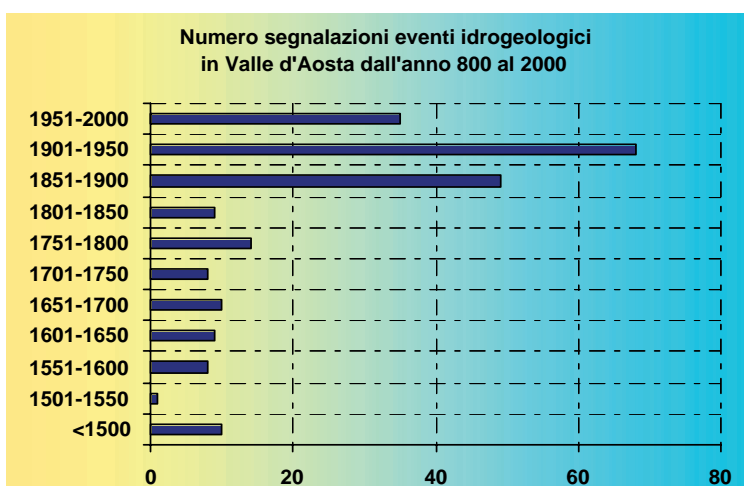
volume di 4000 m³ (AA.VV., 2003).

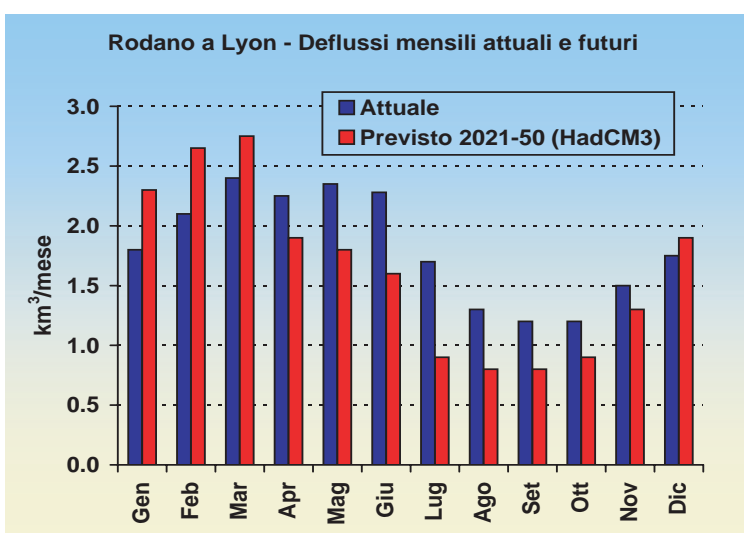
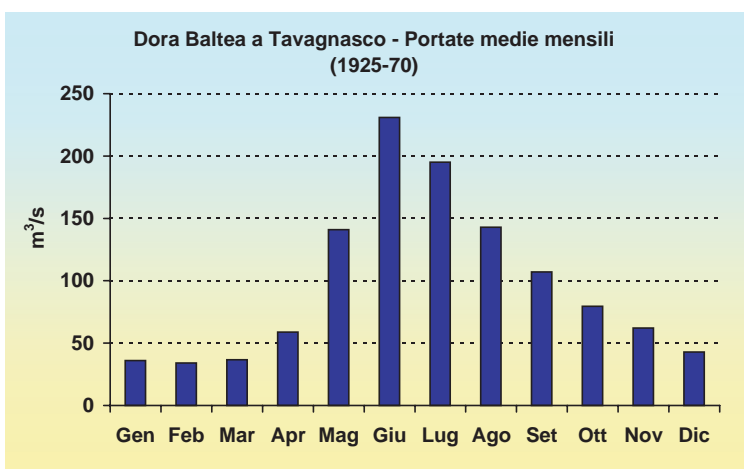
Strategie di mitigazione/adattamento:

— Adozione di misure preventive contro gli incendi boschivi: educazione della popolazione e dei turisti, divieto assoluto di accensione dei fuochi all'aperto durante le siccità (da indicare anche nei bollettini meteorologici regionali, come già fanno i meteorologi di www.meteosvizzera.ch)

5) Deflussi fluviali, alluvioni e dissesti

Difficile e azzardato pronunciarsi in merito all'evoluzione futura di eventi estremi come piene torrentizie, alluvioni e dissesti. L'intensità dei picchi di piena non sempre è legata direttamente alla quantità di precipitazione, poiché intervengono anche altri fattori, quali la temperatura (caduta o meno di neve nei bacini imbriferi, fusione nivale), la saturazione dei suoli all'arrivo delle piogge, interazioni particolarmente sfavorevoli tra i contributi di diversi affluenti. Né in Svizzera né in Baviera si sono individuate tendenze nell'entità/frequenza dei deflussi di piena durante il XX secolo, e crisi simili a quella di fine XX — inizio XXI secolo (alluvioni nel 1987, 1993, 1999, 2000, 2002) in realtà si erano verificate anche nell'Ottocento (AA.VV., 2003). In Valle d'Aosta l'apparente concentrazione degli episodi tra Ottocento e Novecento (fig. 7.37) è imputabile quasi





7.38, 7.39 - Attualmente i deflussi della Dora Baltea seguono un andamento con massimo in giugno-luglio, tipico dei fiumi a regime nivo-glaciale. In futuro l'anticipo della fusione potrebbe causare uno spostamento della «morbida» ai mesi di inizio primavera, come visibile nella simulazione per il Rodano a Lyon (AA.VV., 2005).

certamente al miglioramento della quantità e qualità dell'informazione utilizzata per effettuare il conteggio degli eventi.

Potenziati effetti:

— *Accelerazione dei deflussi invernali e diminuzione di quelli estivi.* Con l'aumento delle temperature verosimilmente aumenterà pure la probabilità di avere precipitazioni forti e/o prolungate sotto forma di pioggia — anziché neve — sui bacini di media-bassa montagna, anche durante l'inverno e a inizio primavera.

Tuttavia, proprio la tendenza alla concentrazione invernale delle piogge potrebbe in parte mettere al riparo la Valle d'Aosta da un aumento preoccupante delle piene, poiché in quella fase dell'anno il limite pioggia-neve — benché in aumento — garantirebbe pur sempre uno stoccaggio parziale delle precipitazioni sotto forma di neve negli alti bacini montani. Immaginando invece una situazione di fine estate-inizio autunno, spesso già oggi critica per l'elevata quota delle nevicate in caso di forti precipitazioni, uno spostamento del limite pioggia-neve da 3000 a 3500 m aggiungerebbe il contributo ai deflussi derivante da oltre 200 km² di territorio valdostano in più (dati di superficie da Assessorato Agricoltura e Risorse Naturali), contribuendo così all'aumento delle portate di piena.

— *Spostamento della «morbida» fluviale da giugno-luglio a marzo-aprile* per l'anticipo nella fusione primaverile, nonché per il previsto aumento invernale delle precipitazioni. Deflussi ridotti invece durante l'estate, per la diminuzione del contributo di fusione nivo-glaciale, proprio nel momento di maggiore richiesta per l'irrigazione.

Negli ultimi decenni la Dora Baltea ha mostrato uno spiccato massimo di portata in giugno (fig. 7.38), mese in cui alla stazione idrometrica di Tavagnasco (TO) si è misurato un deflusso medio di 231 m³/s nel

periodo 1925-78, ma anche durante l'estate le portate si sono mantenute abbondanti grazie al contributo di fusione glaciale (ancora 143 m³/s in agosto). In assenza di modelli idrologici locali, per illustrare come potrebbe evolvere in futuro la portata del fiume valdostano, prendiamo come esempio lo scenario previsto per un altro corso d'acqua alpino non distante, il Rodano a Lyon nel trentennio 2021-50 (AA.

VV., 2005): in questo caso le portate previste aumenterebbero da dicembre a marzo, mentre diminuirebbero fortemente da aprile a novembre con la riduzione dei contributi nivo-glaciali, o quanto meno con il loro picco più precoce (fig. 7.39).

— *Maggiore mobilitazione di detriti in alta quota durante le piene estive o d'inizio autunno* (quando il terreno è scoperto dalla neve) per il ritiro dei ghiacciai e del permafrost (deposito di detriti morenici incoerenti, facilmente erodibili e trasportabili a valle).

Strategie di mitigazione/adattamento:

— Soluzioni di protezione e ingegneria idraulica e naturalistica compatibili con la naturale dinamica del territorio.

— Opportuna localizzazione delle eventuali nuove infrastrutture, tenendo sempre presente però che la vulnerabilità del territorio cresce all'aumentare dei beni esposti, e che anche il rischio di precipitazioni aventi modalità di sviluppo differenti rispetto al passato potrebbe contribuire a generare situazioni inattese e difficilmente prevedibili con gli strumenti attualmente a disposizione.

— Eventuale rilocalizzazione di attività e infrastrutture oggi in aree a rischio di esondazione/dissesto (es. industrie, discariche, campeggi), come già da decenni si usa fare in paesi come il Canada.



7.40 - I terreni liberati dai ghiacciai e dal permafrost in ritiro per l'aumento delle temperature si presentano incoerenti e soggetti a facile erosione in caso di piogge intense. Qui sopra, le profonde incisioni prodottesi sui depositi a valle del ghiacciaio di Ormelune (Valgrisenche) durante l'alluvione del 24.07.1996 (f. M. Tron).

6) Riserve idriche

In generale, ogni azione volta al risparmio nei consumi idro-potabili, in ogni settore, potrà contribuire a ridurre le carenze d'acqua nei periodi siccitosi.

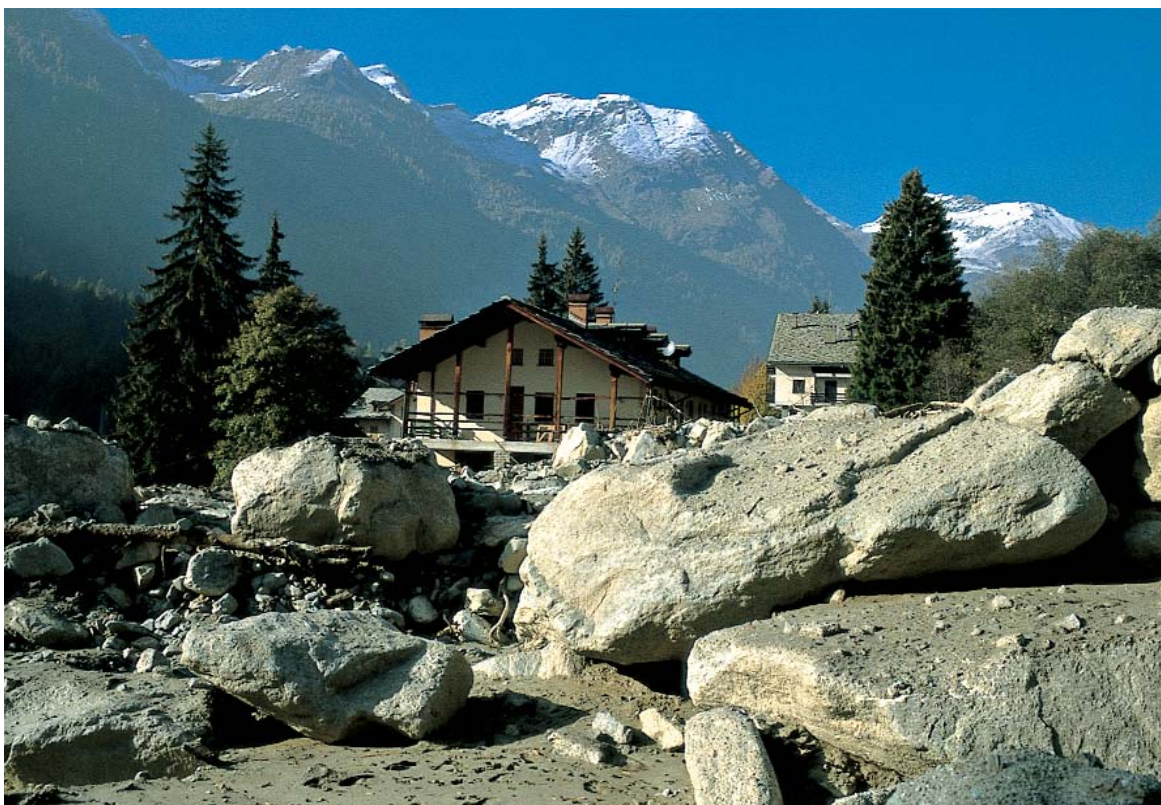
- Grande importanza riveste l'educazione dei cittadini alla sobrietà nei consumi d'acqua.
- Se necessarie, limitazioni all'utilizzo di acqua potabile per attività non indispensabili, quali ad esempio il lavaggio delle automobili e l'irrigazione dei campi da golf, specialmente durante le siccità importanti.
- Sviluppo di piani di protezione della qualità delle acque, procedure per garantire l'equa distribuzione delle risorse idriche.

Si tratta in ogni caso di misure «no regret», che apporterebbero comunque dei vantaggi ai valdostani, anche in assenza di siccità (WARREN & *al.*, 2004).

7) Produzione idroelettrica

Il settore della produzione idroelettrica potrà risentire principalmente delle alterazioni nei regimi dei deflussi dalle alte quote (cfr. cap. 8). Le siccità estive più frequenti potranno rendere più critico l'invaso delle acque, e questo andamento potrà solo in parte essere compensato dalla maggiore fusione glaciale durante estati calde, anche per la progressiva riduzione dei ghiacciai stessi.

7.41 - Effetti della piena del 14-15 ottobre 2000 a Gressoney-St-Jean: gli enormi blocchi depositi dalle colate detritiche contro le case di Bòsmattò (f. L. Mercalli).



8. LA NEVE

«La neve è una componente essenziale del sistema fisico terrestre, sia ad elevate altitudini, sia ad elevate latitudini, e ogni cambiamento nell'entità, durata e regime del manto può determinare conseguenze ambientali ed economiche sul lungo periodo».

(MARTIN BENISTON, 2004)

Quali segnali di cambiamento? Meno neve sull'emisfero Nord

Gli effetti del cambiamento climatico sono ormai evidenti anche sulla copertura nevosa, sia a scala planetaria, sia sulle Alpi. Per l'aumento delle temperature, **dal 1972 al 2005 la superficie continentale coperta da neve nell'emisfero Nord è dimi-**

nuita del 5.7% (1.46 milioni di km² in meno), secondo i dati NOAA ottenuti da satellite, ed elaborati dal *Global Snow Lab* (<http://climate.rutgers.edu/snowcover/>). Nel grafico 8.2 è riportata l'estensione media annua della superficie innevata sul continente eurasiatico, dal 1972: il minimo appartiene al 1990, e la tendenza generale è al calo.

La situazione in Valle d'Aosta

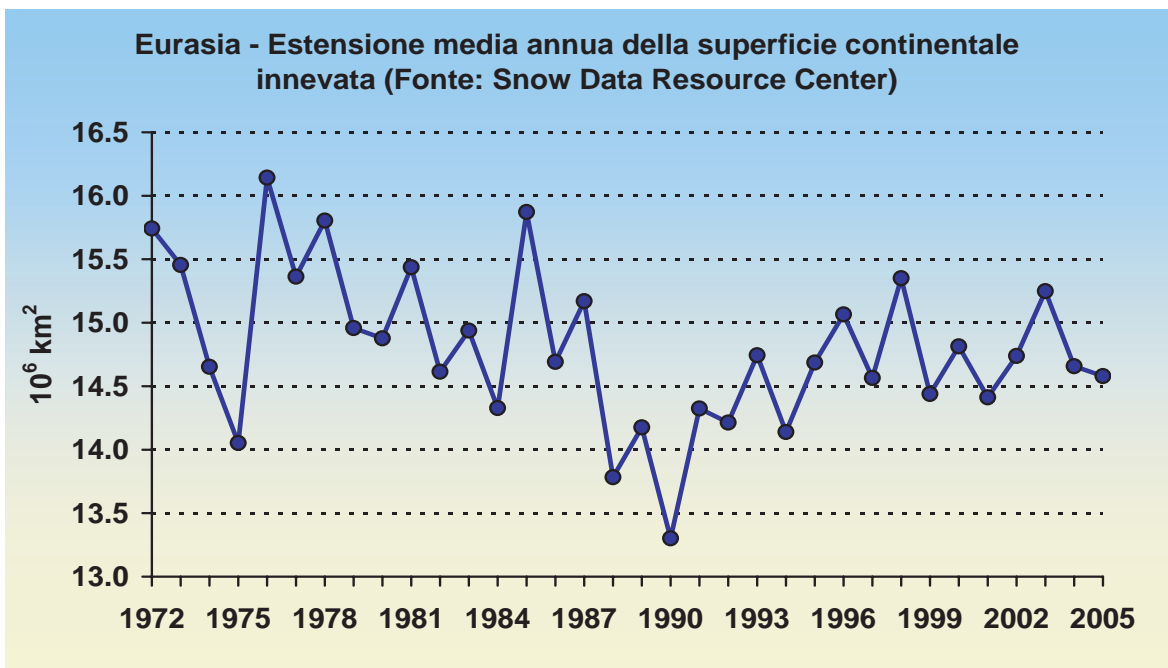
Anche in Valle d'Aosta sono apprezzabili i primi segnali di riduzione della quantità totale di neve fresca, ma soprattutto della durata del manto nevoso, fuso più rapidamente dalle temperature più elevate.

8.1 - Neve e sole sul villaggio di Promiod (bassa Valtournenche) il 04.01.2004 (f. D. Cat Berro).



8.2 - Estensione media annua della superficie continentale innevata in Eurasia (milioni di km²), in base ai dati desunti dallo Snow Data Resource Center. Il minimo è stato raggiunto nel 1990, e la tendenza generale è alla diminuzione.

8.3 - Esempio di una carta che rappresenta la copertura nevosa media mensile nell'emisfero Nord, in base alle osservazioni da satellite. E' riferita al gennaio 2006, quando a livello emisferico l'estensione della superficie innevata sfiorava i 48 milioni di km². (fonte: <http://climate.rutgers.edu/snowcover>).

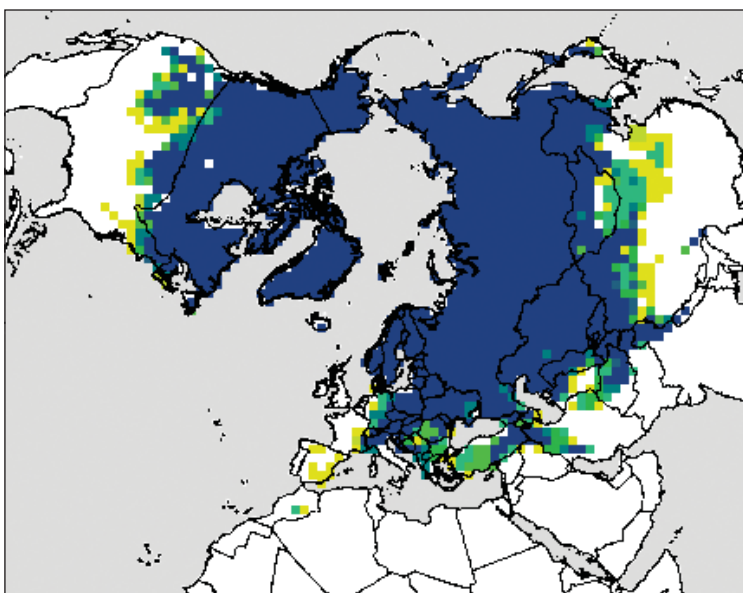


Nelle analisi statistiche sulla nevosità si farà riferimento all'anno idrologico, che decorre dal 1° ottobre al 30 settembre dell'anno successivo: questo per evitare di interrompere l'unità climatologica dell'inverno, che si sviluppa a ridosso di due anni civili (es. stagione 1977-78, dal 1° ottobre 1977 al 30 settembre 1978).

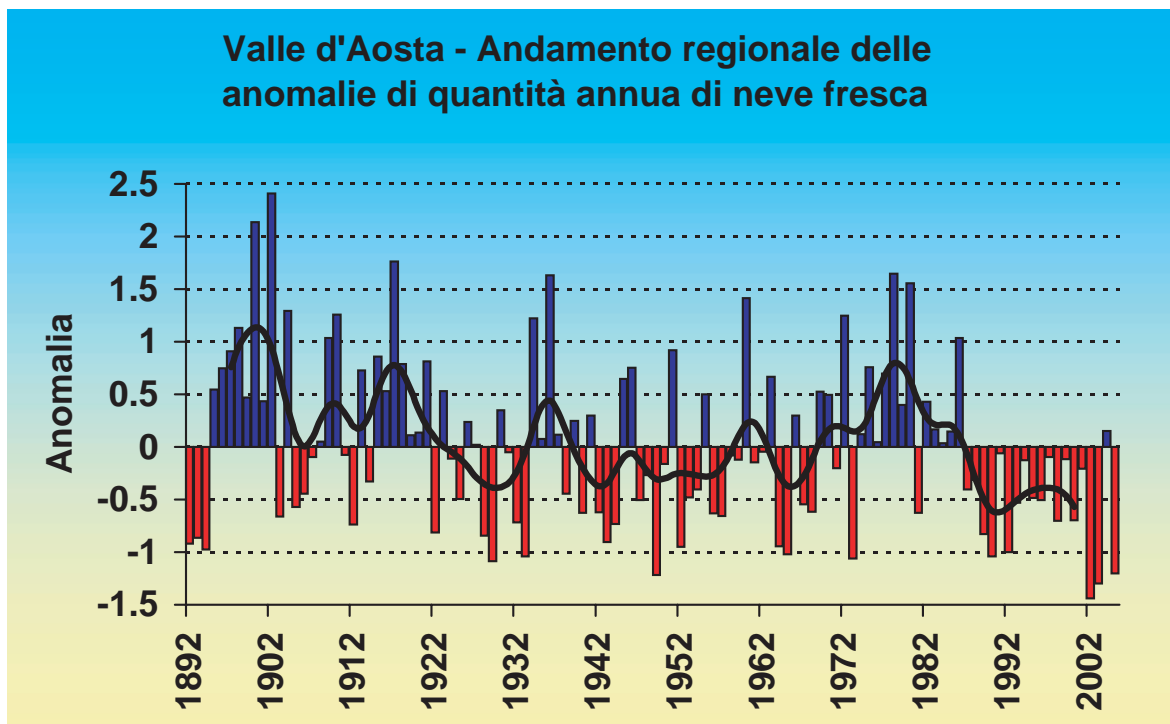
Quantità di neve fresca: deficit persistente dal 1987

Ad Aosta le misure dell'altezza di neve fresca sono disponibili dal 1892, ma solo dal 1926 si dispone di un maggior numero di stazioni sull'intero territorio. Secondo l'indice regionalizzato (fig. 8.4) gli apporti più abbondanti si sono rilevati nel periodo 1895-1923, mentre negli anni seguenti si registra un'alternanza di moderati eccessi e scarsità, ad eccezione degli abbondanti apporti del 1935-36.

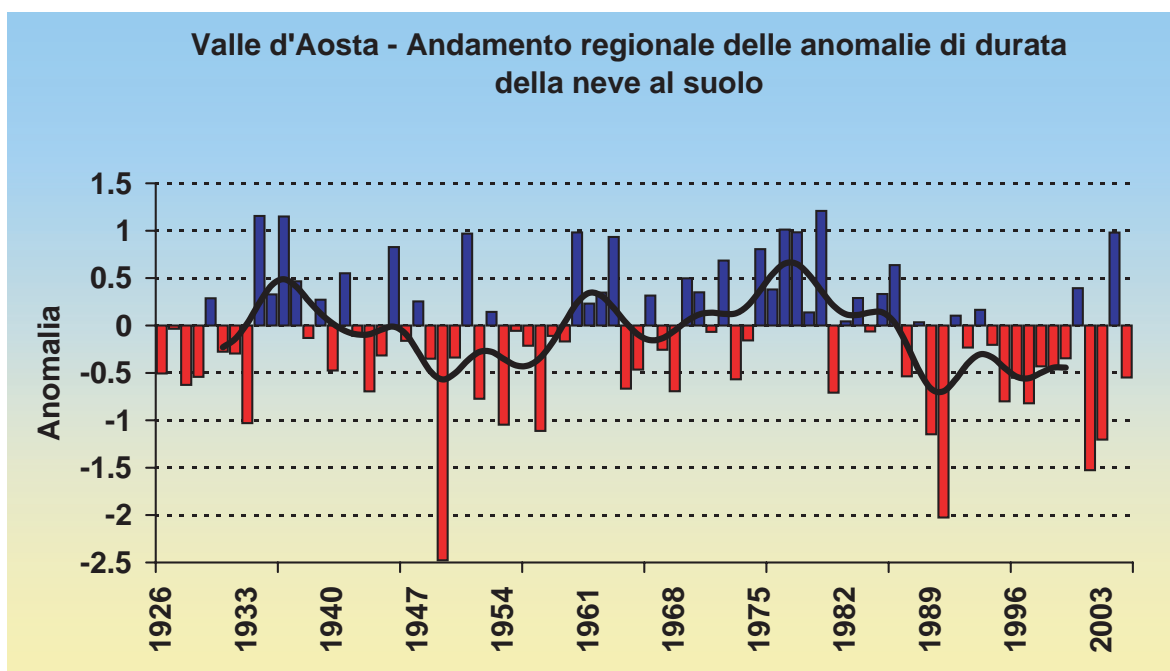
Salvo brevi intervalli di deficit, dal 1968-69 le quantità di neve tornano di frequente sopra media, specialmente negli inverni 1971-72, 1977-78, 1979-80 e 1985-86. In seguito, dal 1986-87 si osserva una brusca riduzione degli apporti, che perdura ancora oggi, con la sola eccezione dell'inverno 2003-04, l'unico negli ultimi 19 anni a pre-



8.4 -
Andamento regionalizzato delle anomalie di quantità annua di neve fresca (SAI) in Valle d'Aosta dal 1892 al 2005. Spicca la prolungata carenza di neve successiva all'inverno 1985-86, appena interrotta da una temporanea e debole ripresa nel 2003-04. L'inverno 2001-02 è stato il meno nevoso di tutti.



8.5 -
Andamento regionalizzato delle anomalie di durata del manto nevoso (SAI) in Valle d'Aosta dal 1926 al 2005. Anche in questo caso si conferma la diminuzione dell'innevamento dalla fine degli Anni 1980. Spicca tuttavia l'inverno 2003-04, tra i pochi recenti a mostrare una durata del manto superiore al normale, in virtù delle copiose nevicate seguite da una primavera relativamente fresca.

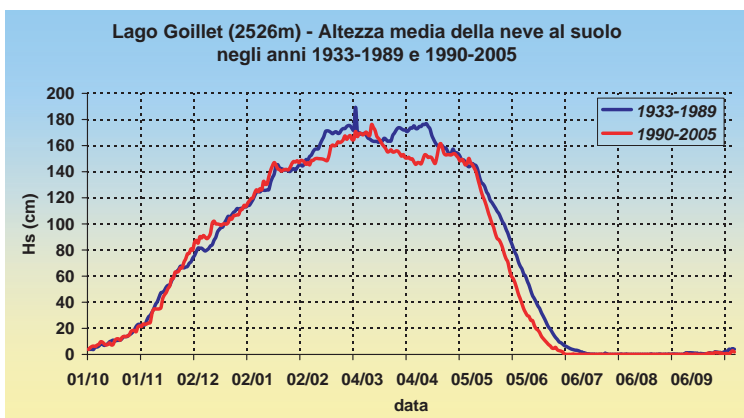
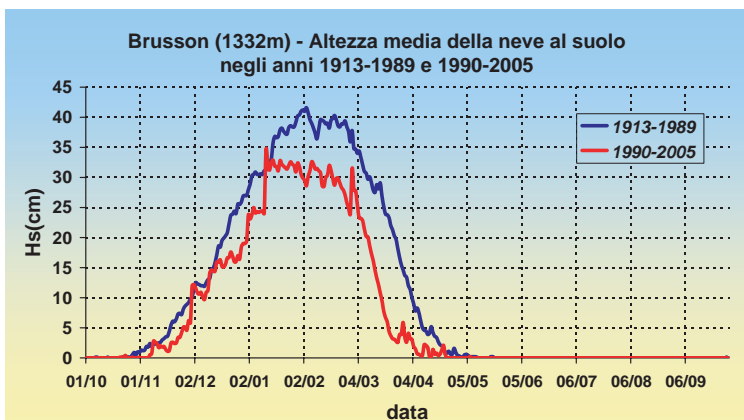


sentare una modesta anomalia positiva.

Durata dell'innevamento: scomparsa primaverile più rapida

Per quanto riguarda la durata dell'innevamento al suolo, i dati sono disponibili in

modo rappresentativo per le diverse quote ed esposizioni della regione a partire dal 1926 (fig. 8.5). **La minore durata della neve al suolo nel periodo recente in parte è legata alla riduzione della neve fresca caduta, ma il riscaldamento intervenuto**



8.6, 8.7 - Variazioni dell'andamento medio giornaliero dello spessore nevoso a Brusson e Lago Goillet, confronto tra il periodo 1990-2005 e il resto delle serie di misura. In entrambe le località negli ultimi 15 anni lo spessore nevoso è stato più ridotto e la sua scomparsa primaverile più precoce.

negli ultimi 15 anni e la maggiore frequenza di ondate di calore primaverili, ha indubbiamente contribuito ad accentuare la tendenza. Ciò è molto evidente nell'andamento nivometrico delle stagioni 1995-96 e 1996-97, in cui i consistenti apporti nel trimestre invernale, con valori medi dello spessore al suolo molto elevati, non si sono tradotti in una maggiore durata del manto. La figura 8.6 mostra l'andamento medio dello spessore nevoso durante l'anno a **Brusson** (1332 m) nei periodi 1913-1989 e 1990-2005; si nota come **negli ultimi 15 anni — oltre a una sensibile diminuzione del manto — si assista ad un anticipo di circa 15 giorni della fusione primaverile,**

mentre è meno evidente una tendenza al ritardo delle prime nevicate autunnali, anche se queste recano comunque apporti inferiori rispetto al periodo precedente. Questi comportamenti sono meno evidenti nelle stazioni in quota (figura 8.7 - Lago Goillet, 2526 m).

Cosa prevedono i modelli climatici per il futuro?

Il cambiamento climatico in futuro continuerà a produrre notevoli effetti sull'evoluzione del manto nevoso, come sui sistemi naturali ed economici che ne dipendono (produzione di energia idroelettrica, turismo, agricoltura).

Variazioni nei regimi termici e pluviometrici potranno cambiare in modo significativo il comportamento della coltre nevosa in montagna, dunque la stagionalità dei deflussi e il periodo di massima portata torrentizia e fluviale.

Scenari di innevamento futuro

Al fine di comprendere la possibile evoluzione futura del manto nevoso a differenti altitudini in Valle d'Aosta, secondo diversi scenari di cambiamento di temperatura e precipitazioni, è stato elaborato un modello di simulazione fisica ed energetica della neve, che opera a partire dai dati meteorologici che controllano dinamica e comportamento del manto.

Cenni di fisica del manto nevoso

Il manto nevoso è costituito da ghiaccio, aria ed eventualmente acqua liquida, in proporzioni variabili: la sua densità può variare da un minimo di 30÷50 kg/m³ (neve molto fredda pochi minuti dopo la caduta) a 500 kg/m³ e oltre (manto di vecchia formazione). Il ghiaccio presente nel manto ha infatti una struttura porosa simile a quella di una spugna, che con il passare dei giorni si compatta gradualmente aumentando di densità.

L'evoluzione nel tempo del manto nevoso, dalla formazione fino alla completa fusione, è soggetta ad una fisica sorprendentemente complessa, che abbraccia molti campi della termodinamica. In sintesi, lo

studio richiede la conoscenza, per ogni intervallo di tempo, dei bilanci di massa e di energia del manto, ossia la somma degli scambi di acqua (liquida e solida) e di energia che avvengono tra il manto e l'ambiente circostante.

Il bilancio di massa consiste nelle variazioni dell'equivalente in acqua del manto dovute a:

- *fusione e drenaggio* della relativa acqua dalla base del manto;
- *sublimazione* della superficie della neve; può avvenire in entrambi i sensi: con aria secca è negativa (il ghiaccio sublima in vapore), con aria umida è positiva (deposito di brine superficiali sulla neve);
- *aumento per caduta di precipita-*

8.8 - Nel Vallone di Nana, a monte di St-Jacques (Ayas) il 04.02.2001 (f. D. Cat Berro).



zioni atmosferiche liquide o solide sul manto.

Analogamente, il bilancio di energia è la somma dei flussi di calore scambiati dalla superficie del manto con l'atmosfera e dalla sua base con il suolo, ossia in ordine di importanza:

- *radiazioni* (solare e atmosferica in entrata, irraggiamento dal manto in uscita);
- *calore sensibile*, scambiato per convezione tra la superficie del manto e l'atmosfera, flusso che aumenta in presenza di vento;
- *calore latente*, scambiato con l'atmosfera quando il vapore acqueo sublima sulla superficie del manto (in entrambi i sensi: brina o ablazione),
- *calore apportato dalle precipitazioni* (pioggia o neve) sul manto,
- *flusso di calore scambiato con il suolo*, presente alla base del manto.

Un valore negativo del bilancio di energia causa il raffreddamento del manto e il rigelo dell'acqua liquida eventualmente presente nella neve. Viceversa un bilancio di energia positivo ne innalza la temperatura e, quando questa raggiunge 0°C, causa la fusione della neve.

Caratteristiche del modello numerico impiegato

Si è predisposto un modello unidimensionale (verticale) che suddivide il manto nevoso in un massimo di due strati, e contempla due strati di suolo (superficiale e profondo). I parametri meteorologici indispensabili consistono in almeno due osservazioni giornaliere di temperatura, umidità dell'aria, copertura del cielo (o, in alternativa, radiazione solare) e quantità giornaliera di precipitazione atmosferica in acqua equivalente. La disponibilità ulteriore della velocità del vento aumenta l'attendibilità delle stime, in quanto il vento accelera gli scambi di calore tra la superficie del manto e l'atmosfera, oltre ad essere elemento con forte variabilità temporale e territoriale.

Il modello opera con passo temporale orario anzitutto ricostruendo in base ai dati immessi l'andamento dei parametri meteorologici inclusa la quantità oraria e la forma di precipitazione. La quantità di acqua caduta viene ripartita in pioggia,

8.9 - Nevai primaverili in fusione a Dondena (Champorcher) l'11.05.2003 (f. D. Cat Berro).



8.10 - Vallone del Breuil (La Thuile, Piccolo San Bernardo), 04.07.2004 (f. D. Cat Berro).

pioggia mista a neve o neve in base alla temperatura e all'umidità dell'aria al momento della precipitazione. Al verificarsi di precipitazioni nevose, procede a calcolare i bilanci di massa ed energia del manto, attraverso la stima della temperatura superficiale e quella interna media degli strati di neve e del suolo. Il tempo trascorso, la temperatura dell'aria e gli apporti di neve fresca incidono su albedo, densità e conduttività termica del manto. Dell'eventuale acqua di fusione formatasi nel manto, viene drenata la parte che supera la sua capacità di ritenzione (il manto ha non solo la struttura, ma anche il comportamento di una spugna), capacità che si riduce all'aumentare della densità della neve. La simulazione necessita di numerosi altri parametri e processi fisici, tra cui proprio il processo di assestamento del manto, che gradualmente ne aumenta la densità e ne riduce lo spessore anche in assenza di fusione. La radiazione solare e i flussi di radiazione infrarossa sono simulati assumendo un orizzonte piano.

Per il progetto del modello di calcolo, si è attinto principalmente al modello UEB (Utah Energy Balance) creato da *TARBOTON & LUCE* (1996) e migliorato da *KOIVUSALO & al.* (2001). La stima della radiazione solare utilizza le formule del MODIS (*CARDER & al.* 2002) e di *GUEYMARD* (1995). Le proprietà fisiche del manto nevoso e del suolo sono



tratte dal *Community Land Model* (*OLESON, 2004*) del NCAR di Boulder (Colorado, USA).

Scenari di cambiamento globale considerati

Nell'ambiente alpino, gli effetti di un aumento della temperatura globale sono in genere più evidenti rispetto alle pianure temperate. Pochi decimi di grado riducono la frazione di precipitazioni che cade sotto forma di neve e di conseguenza l'altezza dell'accumulo di neve al suolo, inoltre, risulta anticipata e accelerata la fusio-

ne primaverile del manto nevoso.

Scopo dell'analisi è quantificare queste riduzioni in diversi scenari di cambiamento del clima, in particolare ipotizzando, rispetto alla norma del trentennio 1961-1990:

- a) *un aumento della temperatura media di 1°C;*
- b) *un aumento della temperatura media di 2°C;*
- c) *un aumento della temperatura media di 2 °C e un contestuale aumento delle precipitazioni annue del 20%.*

Si tenga presente che un aumento della temperatura invernale di 2°C ricade entro gli scenari più probabili delineati dal progetto PRUDENCE all'orizzonte del 2050.

Nelle ipotesi prescelte di cambiamento climatico il modello termodinamico è in

grado di stimare la riduzione dell'apporto di neve fresca e le modifiche nelle caratteristiche e nell'evoluzione del manto nevoso. Per garantire l'aderenza della simulazione alla realtà è opportuno condurla su siti dotati di rilevamenti meteorologici il più possibile completi e frequenti. Inoltre una lunga serie di osservazioni permette di individuare gli andamenti «normali» degli elementi meteorologici nel corso dell'anno e di scegliere un anno-tipo per le simulazioni, rappresentativo delle condizioni climatiche attuali.

Va sottolineato che la temperatura dell'aria non è l'unico né il principale tra i fattori responsabili della fusione primaverile del manto nevoso. L'incidenza maggiore in questo processo attiene ai flussi radiativi, e

8.11 - Nel pomeriggio del 09.07.2005 la neve è scesa in modo piuttosto anomalo fino a 2500 m presso il Colle della Bettaforca (Gressoney-Champoluc). Anche in epoca di riscaldamento globale, l'aumento delle temperature medie non esclude il verificarsi di nevicate o brinate in periodi dell'anno inusuali (f. D. Cat Berro).



8.12 - Aosta, 06.03.2006, neve in Piazza Chanoux a seguito della nevicata di 44 cm dei giorni 3 e 4, la più intensa da un secolo in marzo sul capoluogo valdostano. La precipitazione è stata apportata da un forte flusso di aria umida occidentale, responsabile anche di valanghe in alta valle e sulla zona del Monte Bianco (f. L. Mercalli).

si può affermare che la scomparsa della neve al procedere della stagione è essenzialmente dovuta al più intenso soleggiamento. L'aumento di temperatura incide comunque sui flussi di calore sensibile e latente (quest'ultimo ha un ordine di grandezza inferiore al primo) del bilancio di energia del manto, in misura proporzionale alla velocità del vento. Gli scenari del clima futuro qui prospettati sono necessariamente schematici, non contemplando variazioni nella nuvolosità o nella velocità del vento, tuttavia già in grado di fornire indicazioni intorno alle ripercussioni in ambiente alpino.

Stazioni impiegate e metodo di calcolo

Oggetto dell'analisi sono stati tre livelli altimetrici distanziati di circa 500 m, rappresentati dalle stazioni meteorologiche di Gressoney-St-Jean (1370 m), Gressoney D'Ejola (1850 m) e Lago Gabiet (2340 m). Le analisi sono state condotte sugli anni idrologici (periodo dal 1° ottobre al 30 settembre dell'anno civile successivo) trascorsi con andamento stagionale privo di anomalie, specie per quanto riguarda gli apporti nivometrici. Quali anni normali sono stati individuati il 1995-1996 e, per Gressoney-St-Jean, il 2004-2005 (la stazione meteorologica automatica è stata installata nel 2002). Si è impostata anche un'analisi su un anno fortemente anomalo come il



1977-1978, dalle precipitazioni largamente superiori alla norma, utilizzando la preziosa serie di Gressoney D'Ejola, l'unica a comprendere osservazioni triggiornaliere anche della nuvolosità, fondamentali nella stima dei flussi radiativi.

Per ogni stazione ed anno idrologico sono state lanciate 4 simulazioni del modello, la prima corrispondente allo scenario climatico attuale e le successive agli scenari del possibile mutamento climatico. I dati meteorologici immessi nelle quattro simulazioni differiscono unicamente nei seguenti parametri:

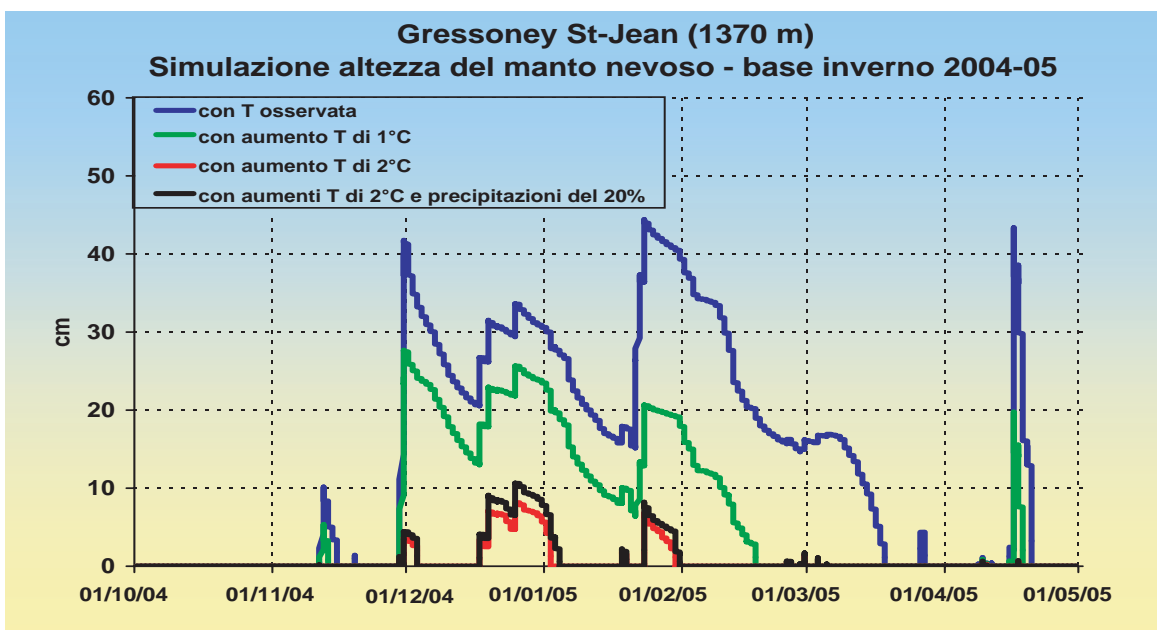
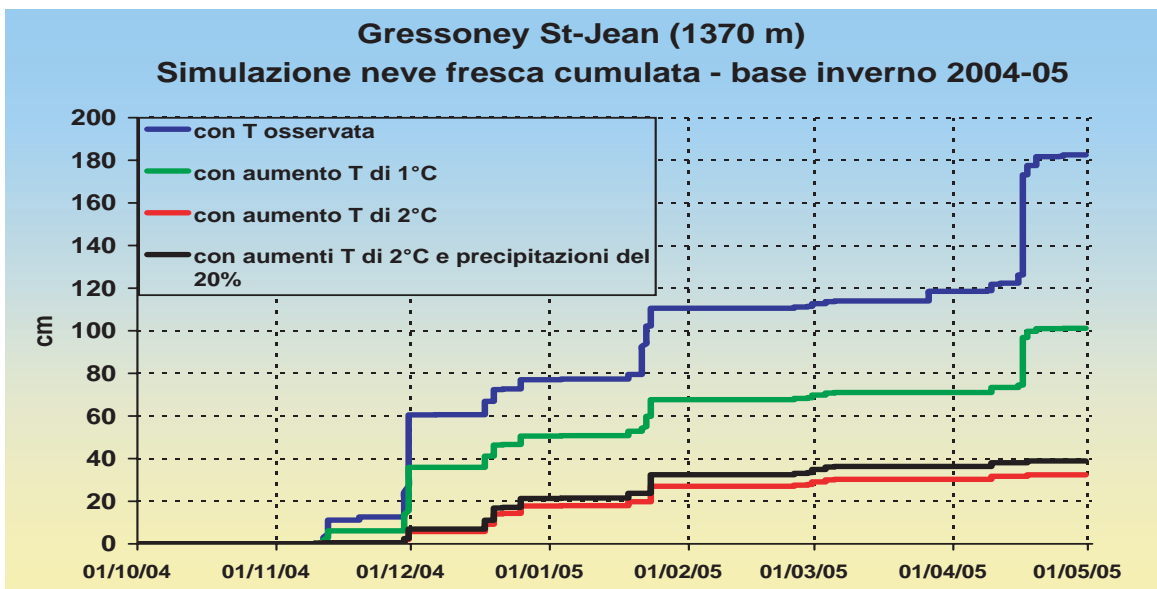
1) *temperatura dell'aria uguale a quella rilevata ($T=$);*

8.13, 8.14 - Simulazioni delle quantità cumulate di neve fresca e dello spessore nevoso al suolo per la stazione di Gressoney-St-Jean, ottenute modellizzando il clima attuale, un aumento di 1 °C, di 2 °C e di 2 °C con incremento del 20% delle precipitazioni.

Le simulazioni sono state condotte sulla base di un inverno «reale» dal comportamento simile a quello medio, ovvero la stagione 2004-05.

La riduzione della quantità di neve fresca rispetto alle condizioni attuali sarebbe rispettivamente del 45% con T +1°C, dell'82% con T +2°C; anche un aumento del 20% delle precipitazioni non consentirebbe di migliorare più di tanto la situazione nell'ipotesi di T +2 °C.

Per quanto riguarda l'altezza della neve al suolo, nell'ipotesi di T +2 °C, il manto diverrebbe discontinuo anche in pieno inverno, e presente in totale appena 29 giorni.



- 2) temperatura aumentata di 1°C (T+1);
- 3) temperatura aumentata di 2°C (T+2);
- 4) temperatura aumentata di 2°C ed equivalente in acqua delle precipitazioni aumentato del 20%. (T+2,P+20).

Dati utilizzati e responso delle simulazioni

Gressoney-St-Jean (1370 m)

E' la più bassa tra le stazioni considerate,

quella in cui un eventuale aumento di temperatura produrrebbe gli effetti più rilevanti sul manto nevoso. **Un incremento di 1°C è sufficiente a decurtare del 45% la neve fresca caduta nell'anno (Fig. 8.13) e a ridurre di un mese il periodo in cui il suolo è coperto di neve, anticipandone la fusione.** Il manto nevoso è drasticamente ridotto in altezza, soprattutto alla fine dell'inverno, e

raggiunge uno spessore massimo di 28 cm a fronte dei 44 cm simulati con temperatura effettivamente osservata (Fig. 8.14). Poiché la stazione attiva in questo sito non misura lo spessore nevoso, per un riscontro indicativo dei dati ottenuti dal modello nella simulazione con temperatura invariata si ricorre ai dati della stazione CVA di Ussin (1322 m) distante 20 km, che nel periodo in oggetto rilevò un'altezza massima del manto di 54 cm il 26 dicembre e una durata stagionale del manto quasi identica a quella stimata dal modello per Gressoney-St-Jean.

Con un aumento di 2°C l'altezza della neve caduta si riduce dell'82%; l'innevamento collassa divenendo discontinuo (il manto fonde completamente anche in pieno inverno), **per una durata complessiva di**

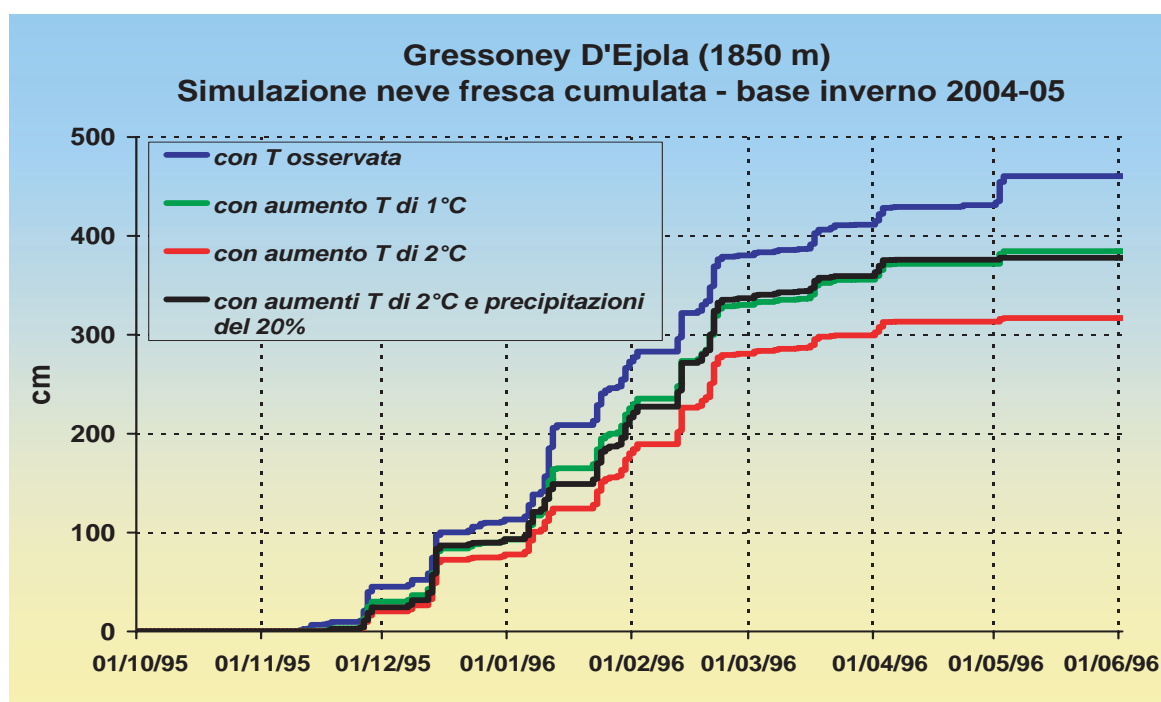
appena 29 giorni, toccando un massimo irrisorio di 8 cm. Questo radicale mutamento non verrebbe scongiurato neppure se l'aumento termico fosse accompagnato da un incremento del 20% delle precipitazioni.

Gressoney-D'Ejola (1850 m)

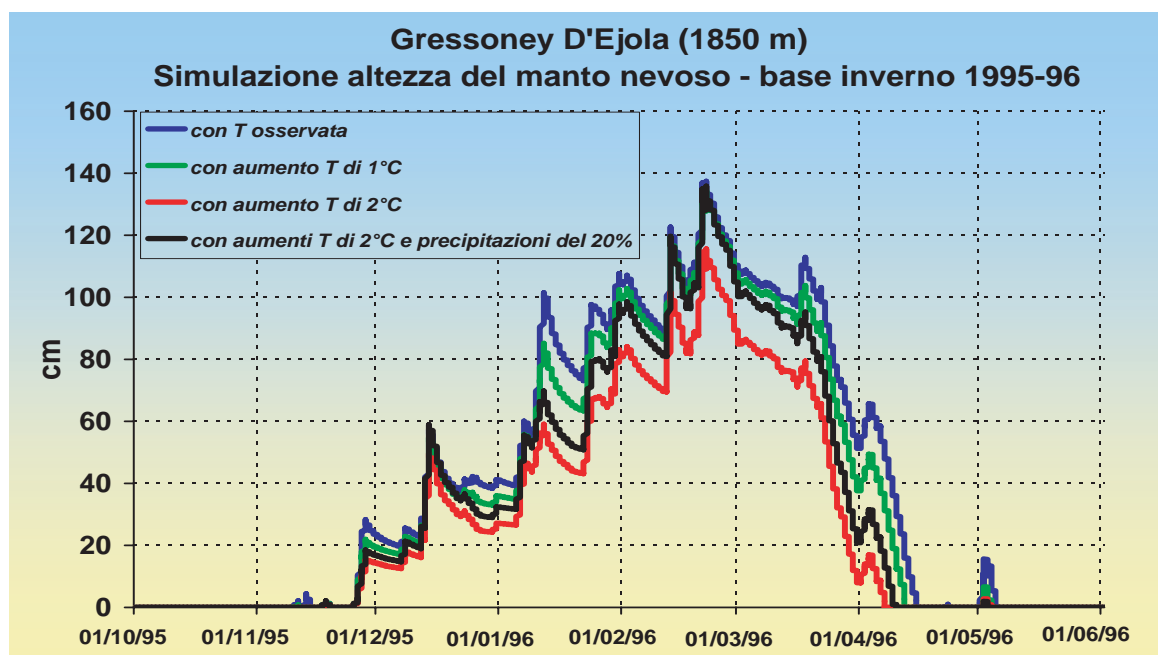
La situazione nel complesso appare meno drastica rispetto alla quota inferiore prima esaminata. **L'altezza di neve fresca cumulata** (Fig. 8.15) **si riduce — rispetto alla simulazione del clima presente (T=) — del 17% con un aumento di 1°C e del 31% se l'aumento raggiunge i 2°C. Le altezze del manto, confrontate in Fig. 8.16, prospettano una diminuzione media del 9% per T+1, mentre con T+2 la riduzione raggiunge il 31%. Con un aumento termico di 2°C, un**

8.15 - Simulazioni delle quantità cumulate di neve fresca per la stazione di Gressoney-D'Ejola, ottenute come in fig. 8.13.

In questo caso si avrebbero riduzioni rispettivamente del 17 e del 31% con T +1 °C e T +2 °C. Se all'aumento termico di 2 °C dovesse associarsi un incremento del 20% delle precipitazioni, si ristabilirebbe la situazione descritta nello scenario T +1°C.



8.16 -
 Simulazioni
 dello spessore
 nevoso al
 suolo per la
 stazione di
 Gressoney-
 D'Ejola, otte-
 nute come nel
 caso della fig.
 8.14.
 A 1850 m l'e-
 voluzione risul-
 terebbe meno
 drastica, ma
 pur sempre
 importante,
 con riduzioni di
 spessore
 medio del 9%
 con T +1°C, e
 del 31% con T
 +2°C.



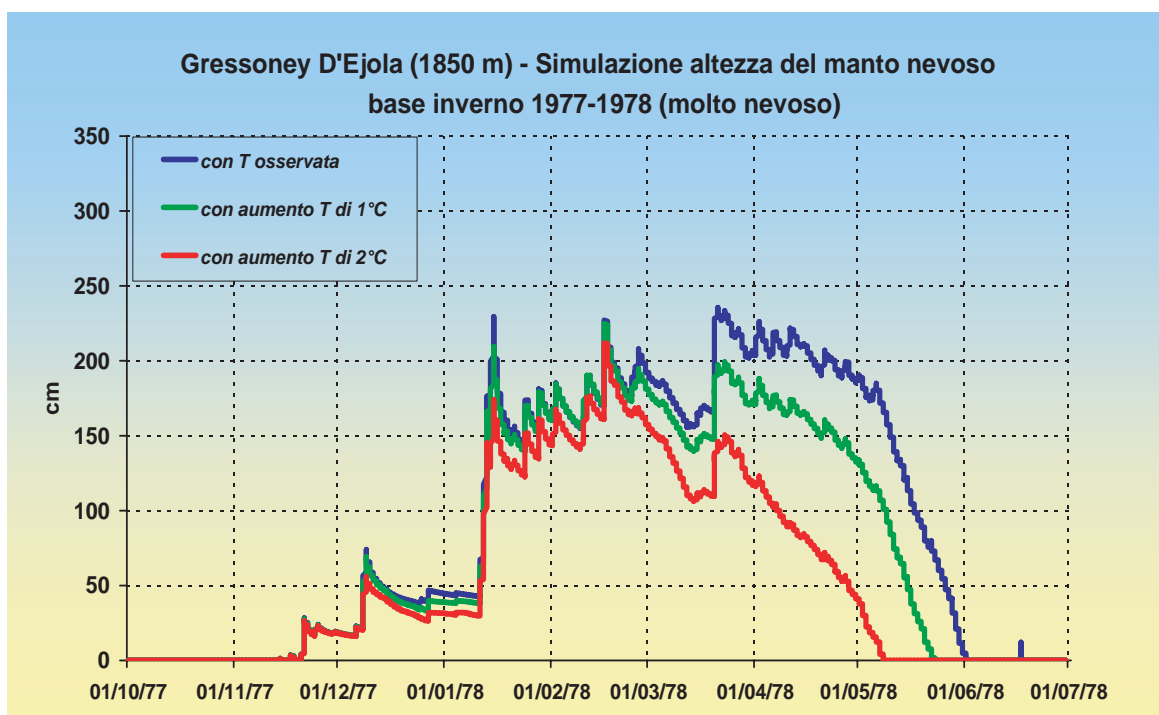
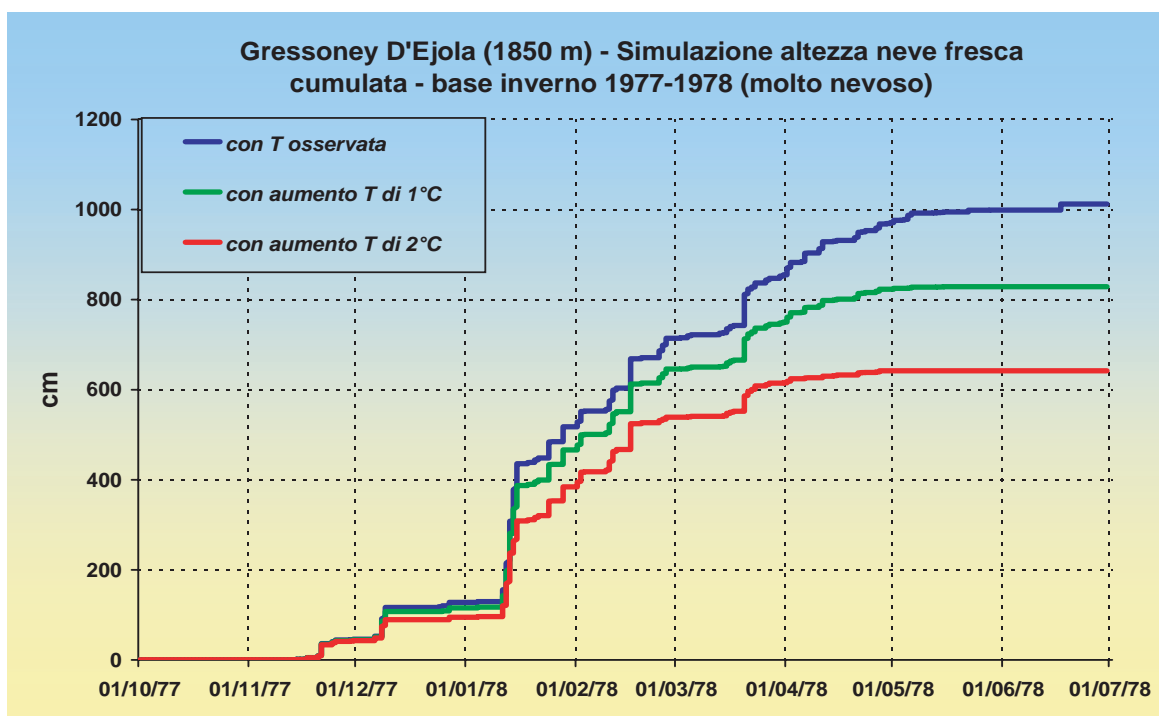
incremento del 20% nella quantità di precipitazione riesce a ristabilire la quantità massima di neve fresca caduta nell'ipotesi dell'aumento di 1°C (Fig.8.15), ma non ha lo stesso effetto sul manto, che permane inferiore per altezza e durata a quello simulato con T+1 e precipitazioni normali (Fig. 8.16). La durata del manto si riduce di una settimana per ogni °C di aumento termico.

Abbiamo ripetuto le simulazioni su un anno eccezionale per quantità di precipitazioni, quale il 1977-78: i risultati sono indicati in Fig. 8.17 e 8.18. L'aumento termico conduce in queste condizioni ad una più netta diminuzione in tutti i parametri nivometrici: ogni °C di incremento nella temperatura riduce del 18% la neve caduta e del 19% l'altezza media del manto. La permanenza

stagionale della neve al suolo risulterebbe abbreviata di 8 giorni con T+1 °C e di ben 24 giorni con T+2 °C, riduzione dovuta per intero all'anticipo della fusione primaverile.

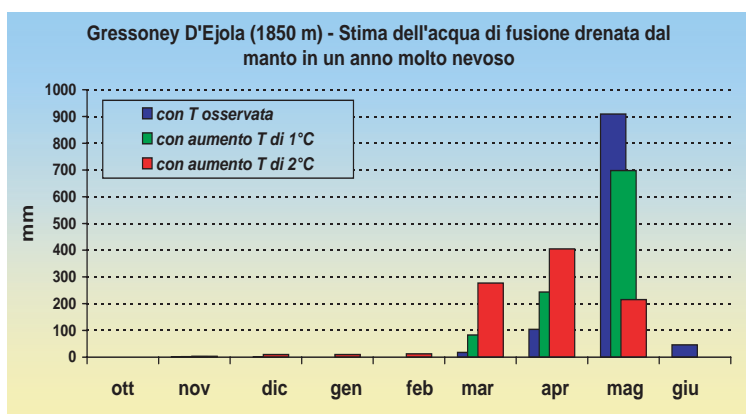
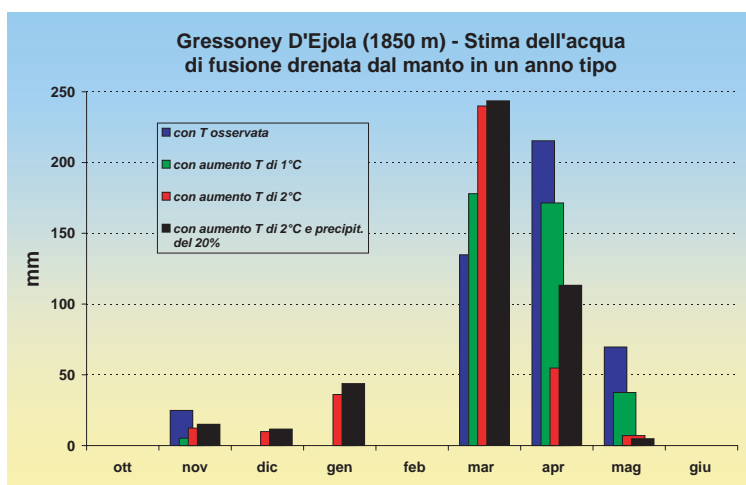
L'effetto del mutamento climatico è dunque più incisivo sul processo di fusione che su quello di accumulo autunnale della neve, come indica la data di formazione del manto conservatasi immutata in tutte le simulazioni. Nell'anno-tipo 1995-96 si è in presenza di un rapido rialzo termico decorso dal 22 marzo che causa l'inizio della fusione il giorno 23 nelle simulazioni T= e T+1, mentre con T+2 l'inizio è di poco anticipato e coincide con il 18 marzo. Successivamente, l'ablazione del manto, che con il clima attuale è concentrata nel mese di aprile (Fig. 8.19), all'aumentare della temperatura si svolgerebbe sempre

8.17, 8.18 - In questi casi le stesse simulazioni sono state condotte su un inverno «reale» tipicamente molto nevoso, quello 1977-78. La diminuzione dei parametri nivometrici è ancora più netta: per ogni °C di aumento termico, -18% nella neve fresca e -19% nello spessore medio del manto. La fusione primaverile anticiperebbe di 8 giorni con T +1°C e di 24 giorni con T +2°C.



più rapidamente, segnando il massimo apporto idrico nel mese di marzo. La modifica nella distribuzione è molto più marcata in un anno molto nevoso e dall'andamento termico primaverile privo di repenti-

ni riscaldamenti quale il 1977-78, come mostra la Fig. 8.20: nel mese di maggio si hanno 909 mm di acqua drenata con T=, 698 mm con T+1 °C e appena 215 mm con T+2 °C.



8.19, 8.20 - Stime dell'acqua di fusione drenata dal manto in un anno mediamente nevoso (in alto) e in un anno molto nevoso (qui sopra). La simulazione mostra un anticipo del drenaggio via via più pronunciato considerando gli scenari di aumento termico più importante, fino ad arrivare a circa un mese con $T + 2^{\circ}\text{C}$.

Lago Gabiet (2340 m)

L'effetto dei mutamenti climatici alla quota di 2340 m del lago Gabiet è riassunto nelle Fig. 8.21 e 8.22. **Il modello indica che l'incidenza del riscaldamento globale sarebbe meno vistosa (ma comunque presente) in alta montagna rispetto alle quote inferiori; per ogni grado di aumento della temperatura, l'altezza della neve fresca si riduce infatti del 10% e quella media del manto del 12%.** Come nelle altre simulazioni viste in precedenza, anche in questo caso l'aumento termico non incide sulla data di formazione del manto, che — nel caso impiegato per la modellizzazione — rimane

costante al giorno 11 novembre, ma **ne anticipa la scomparsa di 8 giorni con $T+1^{\circ}\text{C}$ e di ben 32 giorni con $T+2^{\circ}\text{C}$.** Quest'ultima elevata decurtazione dell'innnevamento si deve alla temporanea scomparsa prima dell'ultima consistente nevicata del 2 maggio, presente nel caso reale utilizzato nel modello.

In questa fascia altimetrica, un eventuale aumento delle precipitazioni del 20% avrebbe l'effetto di incrementare rispetto al presente l'accumulo massimo di neve alla fine dell'inverno, anche se contestuale ad un riscaldamento di 2°C . L'aumento delle precipitazioni avrebbe, tuttavia, effetto quasi nullo nel contrastare la precoce fusione primaverile (Fig. 8.22).

Conclusioni

La fig. 8.23 e la tabella di fig. 8.24 compendiano gli effetti previsti dal modello sulla durata e l'altezza della neve al suolo in presenza di un mutamento climatico.

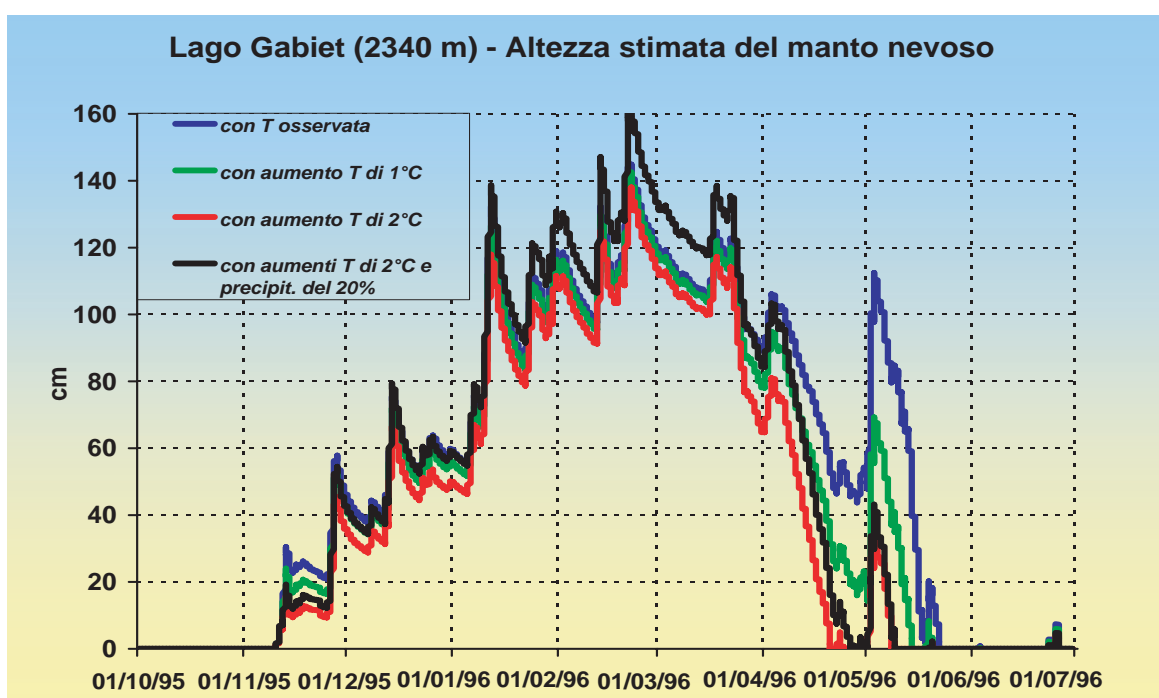
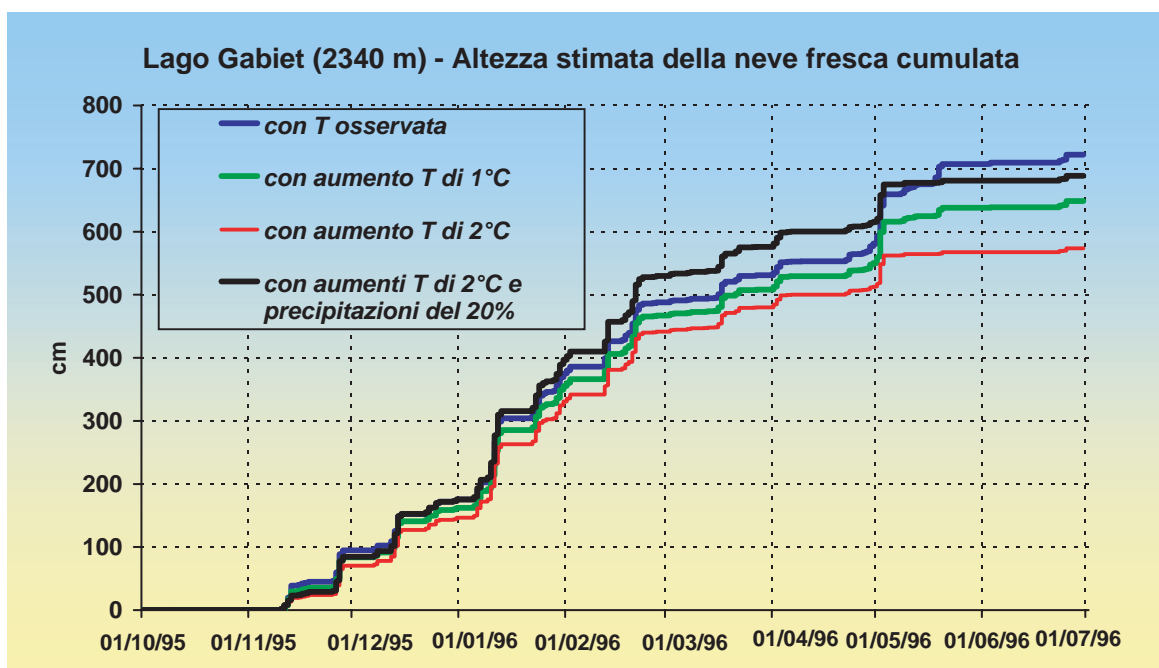
Un clima più caldo rispetto alla media degli ultimi decenni avrebbe, nelle aree di montagna, conseguenze vistose a quote inferiori ai 1400 m circa, abbattendo drasticamente lo spessore del manto e riducendo la durata dell'innnevamento del 35% circa per ogni $^{\circ}\text{C}$ di aumento della temperatura. La bassa montagna si rivela quindi un'area molto sensibile nei confronti dei mutamenti climatici, e la virtuale scompar-

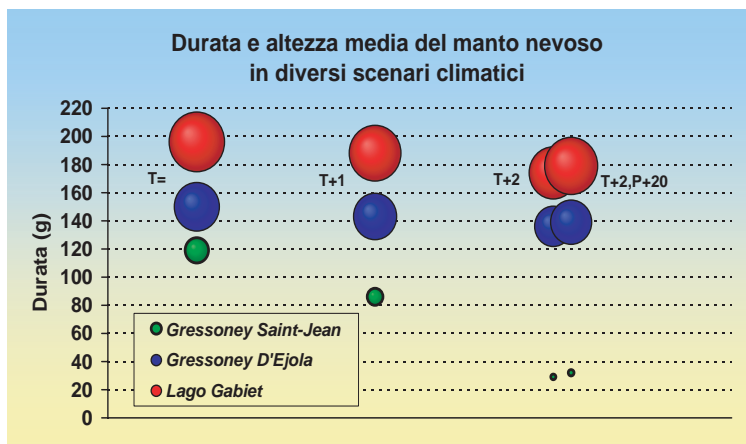
sa del paesaggio innevato non sarebbe scongiurata neppure da un eventuale contemporaneo aumento delle precipitazioni.

Effetti meno eclatanti, ma comunque presenti, si produrrebbero a quote superiori,

con una perdita nello spessore medio del manto pari al 15% a 1850 m e al 12% a 2340 m per ogni °C in più nella temperatura dell'aria. La durata parrebbe risentirne esclusivamente in primavera a causa degli anticipi nell'inizio e nel completamento della

8.21, 8.22 - Simulazioni delle quantità cumulate di neve fresca e dello spessore nevoso al suolo per la stazione di Lago Gabiet. Si conferma la minore sensibilità dei siti elevati rispetto alla media-bassa montagna. Qui, con lo scenario peggiore tra quelli considerati, T +2°C, la durata del manto nevoso passerebbe da 205 a 174 giorni e la neve fresca cumulata si ridurrebbe del 21%.





8.23 - Grafico riepilogativo dell'evoluzione di durata e altezza media del manto nevoso nelle tre località e per gli scenari considerati.

fusione, laddove la formazione del manto durevole non ritarda neppure con aumenti di 2°C. Tuttavia il numero delle simulazioni condotte non è ancora sufficiente ad accreditare con certezza quest'asimmetria temporale nella riduzione dei giorni con neve al suolo. L'anticipo dell'ablazione primaverile è risultato contenuto in 4 giorni per °C di aumento a D'Ejola e più marcato (8÷15 giorni/°C) alla quota più elevata. Questo anticipo nel deflusso dell'acqua di fusione dalle parti più elevate dei bacini inciderebbe sulle portate dei corsi d'acqua, che verrebbero a concentrarsi durante i mesi di aprile e maggio riducendosi in giugno e luglio. La prima variazione (T +1°C) accrescerebbe in misura modesta le portate nel caso di precipitazioni alluvio-

8.24 - Riepilogo dei risultati più significativi ottenuti dal modello: durata del manto e data della sua scomparsa in base agli scenari proposti.

nali, non infrequenti in primavera, poiché il contributo della fusione della neve in casi consimili è limitato a 1÷2 mm/ora. Viceversa, la riduzione delle portate fluviali all'inizio dell'estate potrebbe riflettersi negativamente sulla disponibilità di acqua per uso irriguo in tutto il bacino padano. I risultati ottenuti tramite questo modello di simulazione sono confrontabili con quanto indicato da BENISTON & al. (2003), secondo cui per ogni grado °C di incremento termico nella media delle temperature invernali la durata del manto nevoso si ridurrebbe mediamente di circa 15÷20 giorni. Sulle vicine Alpi svizzere, un incremento di 4 °C nelle medie invernali delle temperature minime entro il trentennio 2071-2100 (risultati modello regionale HIRHAM4, scenario IPCC-A2, impiegati anche nel progetto EU PRUDENCE) potrebbe comportare una riduzione della quantità di neve caduta dell'ordine del 90% intorno a quota 1000 m, del 45÷60% a quota 2000 m (a seconda di come evolverà il regime delle precipitazioni) e del 30÷40% a quota 3000 m. Inoltre, la scomparsa primaverile del manto anticiperebbe di 50÷60 giorni sopra i 2000-2500

Variazione della durata del manto nevoso e sua estinzione primaverile in diversi scenari climatici	Gressoney St-Jean (1370 m)		Gressoney D'Ejola (1850 m)		Lago Gabiet (2340 m)	
	Durata Hs (giorni)	Estinzione primaverile	Durata Hs (giorni)	Estinzione primaverile	Durata Hs (giorni)	Estinzione primaverile
Anno di riferimento	119	18-mar	150	15-apr	196	22-mag
Simulazione T+1	86	17-feb	143	12-apr	188	14-mag
Simulazione T+2	29	-	136	07-apr	174	20-apr
Simulazione T+2, P+20	32	-	139	10-apr	179	26-apr

m. La riduzione della stagione nevosa sarebbe più manifesta alla sua fine (primavera), che non al suo inizio (autunno), con conseguente accelerazione e anticipo dei deflussi primaverili.

COSA POTREBBE ACCADERE IN VALLE D'AOSTA: EFFETTI, STRATEGIE E OPPORTUNITÀ

1) Agricoltura, vegetazione e suoli

Potenziali effetti positivi/opportunità:

— Allungamento della stagione colturale nei campi/orti di montagna, anticipo di semine e trapianti per la precoce scomparsa del manto nevoso (ma attenzione alle gelate tardive, sempre possibili!).

Potenziali effetti negativi:

— Minore disponibilità estiva di acqua per l'irrigazione, per la minore presenza nevosa stagionale.

Strategie di mitigazione/adattamento: vedi sezione «Agricoltura» nei cap. 6 e 7.

Inoltre, è da rilevare che una minore presenza del manto nevoso invernale favorirebbe l'alternanza dei cicli di gelo e disgelo nei suoli, nonché — secondo le ricerche effettuate dal *Laboratorio-Centro di Saggio della Neve e dei Suoli Alpini (LNSA)* della Facoltà di Agraria di Torino — un signifi-

cativo aumento della mineralizzazione netta dell'azoto (FREPPAZ & *al.*, 2005).

Per quanto riguarda le fasi fenologiche, secondo KELLER & *al.* (2005) la fusione anticipata del manto non comporterebbe necessariamente anche una più precoce fioritura delle piante alpine, in quanto alcune specie sono fortemente legate al fotoperiodo. Questo, aggiungiamo, metterebbe parzialmente al riparo la vegetazione dal rischio di gelate primaverili, che potrebbe divenire importante in caso di fioritura precoce indotta dall'assenza di neve.



8.25 - La Dora a Courmayeur gonfia per la straordinaria fusione nivoglaciale sul Monte Bianco il 03.08.2003 (f. L. Mercalli).

La fusione di neve e ghiaccio porta sollievo alla carenza d'acqua nelle estati calde e siccitose a fondovalle, proprio come accaduto nel 2003, ma in futuro, con la scomparsa primaverile più anticipata del manto e l'ulteriore riduzione glaciale, questo contributo verrà meno, esacerbando gli effetti del previsto calo estivo di piovosità.

2) Turismo: innevamento programmato, un investimento opportuno?

In merito al settore turistico, alla luce dei cambiamenti climatici in vista, è lecito domandarsi se il mantenimento o l'ulteriore sviluppo degli impianti di innevamento programmato costituiscano o meno una strada accettabile per risolvere il problema della carenza di neve sulle piste. Attualmente (stagione sciistica 2005-06), in Valle d'Aosta, il 50% dei 1306 ettari di piste attive è dotato di impianti per l'innevamento programmato (Fonte: Ass. Turismo, Commercio e Trasporti, Reg. Aut. Valle d'Aosta). Se si considerano i costi economici, nonché quelli ambientali, la strategia appare poco sostenibile a media-lunga scadenza, tenendo presente l'enormità di

risorse finanziarie, energetiche e idriche necessarie per il funzionamento degli impianti, a fronte di una prevedibile perdita di redditività dello sci alpino a seguito del riscaldamento globale, specialmente nelle stazioni di media e bassa montagna. Ecco qualche dato (fonte CIPRA - HAHN, 2004):

Consumi d'acqua: 1 m³ per ottenere 2÷2.5 m³ di neve programmata. Si calcola che, per ricoprire tutte le piste innevabili delle Alpi, circa 23.800 ha di superficie, in una stagione occorrerebbero 95 milioni di metri cubi d'acqua, pari al consumo annuo di una città di 1.5 milioni di abitanti.

Consumi energetici: in Francia nell'inverno 2001-02, si è stimato un dispendio di circa **25.400 kWh per ettaro di pista innevata** (3.5

8.26 - Impianto per l'innevamento programmato in azione sulle piste di Champorcher.

In futuro i costi economici ed energetici per il funzionamento potrebbero divenire insostenibili sulle Alpi, anche in relazione al prevedibile calo di redditività dello sci alpino in conseguenza del cambiamento climatico, quanto meno al di sotto dei 1300-1800 m (18.02.2006, f. D. Cat Berro).



8.27 - Champorcher, impianto per l'innervamento programmato, come in 8.26.

Per ogni metro cubo di neve prodotta si consumano circa 3.5 kWh di energia elettrica, con costi complessivi per i gestori dell'ordine dei 3-5 Euro.



8.28 - Dati sull'estensione delle superfici adibite a pista da sci alpino in Valle d'Aosta, e frazione di queste innevabile in modo programmato (complessivamente, quasi il 50% dei 1306 ha totali).
Fonte dati: Ass. Turismo, Sport, Commercio e Trasporti, Reg. Aut. Valle d'Aosta.

Superficie dei comprensori sciistici valdostani e frazione innevabile in modo programmato			
Comprensorio	Superficie totale		Innevabile (%)
	ha	ha	%
Ayas-Antagnod	37.7	25.0	66.4
Ayas-Champoluc	73.1	57.1	78.2
Brusson	16.6	11.1	67.1
Cervino	247.1	93.1	37.7
Chamois	27.0	25.9	96.1
Champorcher	41.0	17.3	42.2
Cogne	10.7	1.5	14.3
Courmayeur	151.9	82.1	54.0
Dolonne	2.9	2.9	100.0
Gressoney LT	86.0	53.2	61.9
Gressoney S.J.	24.4	12.7	51.9
La Magdeleine	11.1	1.6	14.1
La Thuile	210.3	92.0	43.7
Nus	1.2	1.2	100.0
Ollomont	2.4	2.4	100.0
Pila	184.1	102.3	55.6
Rhêmes ND	13.3	6.5	49.2
Saint Oyen	3.7	3.7	100.0
St-Rhèmy	54.2	24.5	45.3
St-Vincent	9.3	7.4	79.7
Torgnon	31.2	27.4	87.9
Valgrisenche	11.2	2.0	18.2
Valsavarenche	4.1	4.1	100.0
Valtournenche	89.0	14.9	16.8
Totale	1305.7	647.2	49.6

kWh per m³ di neve prodotta). Estendendo questo dato alla Valle d'Aosta si otterrebbe un consumo totale annuo di 16.4 GWh, pari a circa il 9% dell'intero consumo elettrico per uso domestico degli abitanti della Valle d'Aosta.

Costi complessivi al gestore: mediamente da 3 a 5 Euro per metro cubo di neve programmata, incluso l'ammortamento degli impianti, i costi energetici, gli stipendi del personale.

Costi di investimento: circa 140.000 Euro per ha di superficie innevabile.

Questi numeri suggeriscono come, in futuro, l'innervamento programmato possa divenire un'operazione dai costi insostenibili, una dispendiosa soluzione «tampon» perfino in contrasto con la pressante esigenza di ridurre i consumi di combustibili fossili e acqua.



8.29 - In alto, sulle piste del Piccolo Cervino, nel comprensorio internazionale di Cervinia-Zermatt (30.04.2006, f. D. Cat Berro).
8.30 - Qui sopra: Cervinia, partenza del XVI Trofeo Mezzalama di sci-alpinismo (03.05.2003, f. L. Mercalli).

Secondo BÜRKI (2000), nel periodo 2030-2050, soltanto le località sciistiche sopra i 1600÷2000 m potranno fare affidamento su una quantità di neve sufficiente per la pratica dello sci, affermazione in accordo con quanto emerso dallo scenario T +2 °C presentato a pag. 111, che mostra come, in una località come Gressoney-St-Jean, la quantità di neve fresca si ridurrebbe dell'82%. A questo si aggiunge la difficoltà

nel produrre neve programmata se le temperature non sono almeno $< -4^{\circ}\text{C}$, salvo impiegare additivi batterici in grado di favorire la formazione dei nuclei di ghiaccio.

Alla luce di queste considerazioni, appare inopportuno utilizzare il cambiamento climatico come argomento a favore dello sfruttamento delle zone di alta montagna e della costruzione di impianti di innevamento, restando fedeli a tutti i costi a un turismo invernale di tipo tradizionale. Piuttosto, un'opportuna conversione dell'offerta turistica verso attività alternative quali l'escursionismo, l'equitazione, il turismo culturale e l'agriturismo, che tenga conto di modi più maturi di vivere il paesaggio invernale e la cultura alpina, potrebbe garantire la sopravvivenza e la rivitalizzazione del settore, anche di fronte

Le Alpi... dovranno porsi come regione modello per far fronte a questo problema, proprio in considerazione delle conseguenze che l'aumento delle temperature potrà avere sul territorio alpino. Molto dipenderà dalla scelta, da parte delle popolazioni alpine, di uomini politici in grado di esporsi in questa direzione, dalla loro capacità di pensare globalmente e di agire localmente. (GIORGIO DAIDOLA, 2006).



8.31 - L'invaso idroelettrico del Goillet (2526 m) in alta Valtournenche può contenere fino a 11,8 milioni di m³, ed è sede della più elevata stazione meteorologica della rete CVA, la cui serie storica risale al 1933 (12.08.2003, f. L. Mercalli).

a nuovi assetti ambientali della montagna valdostana.

3) Deflussi fluviali e produzione idroelettrica: monitoraggio degli accumuli nevosi invernali

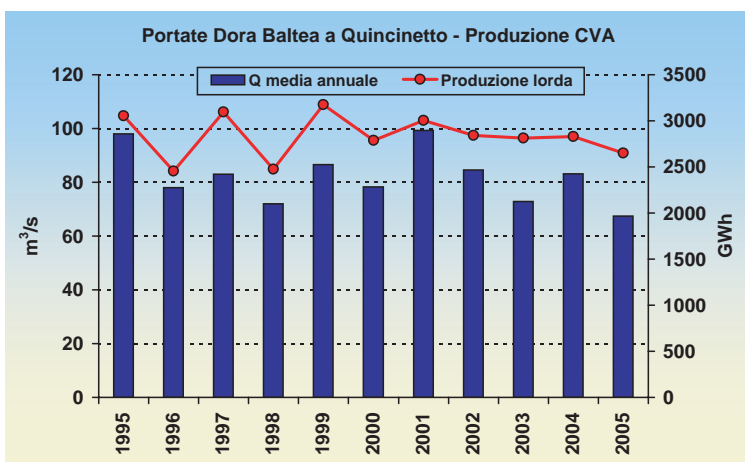
La produzione idroelettrica valdostana, attualmente gestita da CVA S.p.A. per una produzione lorda attorno a 2800 GWh

annui (circa il 6% della produzione idroelettrica nazionale), trae ricchezza proprio dagli abbondanti deflussi di origine nivale. Ma l'aumento delle temperature e il calo nella quantità e nella durata dell'innevamento porteranno inevitabilmente con sé conseguenze nei regimi di produzione energetica. Il grafico 8.32 mostra l'andamento della produzione annua lorda di energia idroelettrica da parte di CVA, confrontato con le portate medie annue della Dora Baltea a Quincinetto, per il periodo 1995-2005. Si noti come il 2005, terzo anno asciutto consecutivo, abbia registrato la minore portata media nel gruppo di anni considerati.

Potenziati effetti negativi: alterazione nei regimi di afflusso delle acque agli invasi, con anticipo primaverile della fusione, e riduzione estiva dei volumi in ingresso per via del più rapido esaurimento delle nevi stagionali (unito peraltro a un probabile calo di piovosità in estate).

Strategie di mitigazione/adattamento:

attento monitoraggio dell'andamento climatico della stagione di accumulo nevoso attraverso la raccolta di dati meteorologici e di equivalente d'acqua del manto negli alti bacini, al fine di calcolare il potenziale idrico della stagione e quindi di procedere a opportune modulazioni nell'invaso e nel-



8.32 - Produzione idroelettrica lorda annua CVA e portata media della Dora Baltea a Quincinetto nel periodo 1995-2005 (fonte dati: Compagnia Valdostana Acque S.p.A.). In accordo con l'andamento delle precipitazioni e della fusione nivale, le portate maggiori si sono avute nel 1995 e nel 2001, le più scarse in anni asciutti e poco nevosi come il 1998 e il 2005. La produzione idroelettrica e la portata della Dora risultano moderatamente correlate ($r^2 = 0,7$).



8.33 - Il valico stradale del Gran San Bernardo rimane chiuso ogni anno da fine ottobre a fine maggio per l'imponente innevamento. Presso lo storico osservatorio meteorologico, il più antico delle Alpi (1817), si misurano mediamente circa 17 m di neve fresca/anno (25.05.2005, f. D. Cat Berro).

l'utilizzo delle acque.

4) Trasporti: meno disagi da neve

La minore durata dell'innevamento non potrà che riflettersi positivamente sul settore dei trasporti: la percorribilità invernale delle strade sarà più agevole e si ridurrà la fase di chiusura invernale dei passi del Grande e del Piccolo San Bernardo; vi saranno, inoltre, costi minori per lo sgombero della neve e la salatura dell'asfalto.

5) Valanghe: non è detto che diminuiscano

Attualmente non è possibile conoscere

con ragionevole affidabilità le conseguenze che il cambiamento climatico potrà avere sull'entità e sulla frequenza delle valanghe, fenomeno storicamente assai presente in una regione montuosa come la Valle d'Aosta, e che tanto ha influenzato lo sviluppo dei nuclei abitati, delle comunicazioni nelle valli laterali e la vita degli alpigiani in generale. Tuttavia, è possibile effettuare alcune considerazioni qualitative. Da un lato, l'aumento delle temperature ridurrà la durata dell'innevamento invernale in montagna, con potenziale riduzione dell'incidenza valanghiva, ma è pur vero che dall'altro potrebbe favorire lo slittamento di masse nevose fortemente umidificate, o poggianti direttamente sul suolo per la mancanza di un manto preesistente (valanghe di fondo). Inoltre, se le precipitazioni invernali aumenteranno anche a Sud delle Alpi — come suggeriscono i risultati di molti modelli climatici — allora le neviccate abbondanti potrebbero addirittura divenire più frequenti in pieno inverno ad alta quota, oltre il limite superiore del bosco (> 1800÷2200 m), dove peraltro la morfologia del terreno è più favorevole al distacco di valanghe. Dunque, in un sistema così complesso, la semplice e intuitiva relazione *più caldo = meno neve = meno valanghe* potrebbe risultare tutt'altro che scontata e realistica... (AA.VV., 2003).

9. ALTRI EVENTI INTENSI

«Gli eventi estremi sono episodi durante i quali le condizioni del tempo deviano fortemente dalla media a lungo termine, ben oltre le fluttuazioni ordinarie per il luogo e la stagione. Questi fanno parte del clima di una regione e ne influenzano il paesaggio e le condizioni di vita».

(CHRISTOPH FREI, 2003)

Un'analisi difficile

Per evento meteorologico (o climatico) estremo si intende un fenomeno o un'anomalia rari, che deviano fortemente dalla media statistica, ma che non sono necessariamente legati a danni importanti.

Sembra che, a livello planetario, sia in corso un incremento di diversi fenomeni estremi, ma la loro distribuzione irregolare nel tempo e nello spazio, e l'insufficiente base statistica a disposizione, non consentono ancora di dimostrare oppure escludere scientificamente delle tendenze in atto nella loro frequenza/intensità, né di attribuirne la responsabilità a fattori naturali piuttosto che umani, oppure a un concorso dei due. L'analisi statistica degli eventi estremi è complicata dal fatto che l'«accumulo» casuale di eventi all'inizio o al termine di una serie di osservazione può indurre a identificare tendenze solo appa-

9.1 -
L'alluvione del 15.10.2000 a Gressoney-St-Jean (f. Studio Guindani). L'individuazione di tendenze in eventi estremi o rari è soggetta a delicati problemi di interpretazione statistica, e nel caso delle alluvioni è complicata dalla disomogeneità delle informazioni storiche e da alterazioni degli effetti indotte da variazioni nella vulnerabilità del territorio.





renti, che in realtà non esistono. Benché al momento non vi siano ancora solide prove scientifiche che consentano di attribuire questi eventi al cambiamento climatico, molti di questi possono essere esempi di ciò che in futuro potrebbe accadere più di frequente rispetto a oggi: «*a shape of things to come*»... per dirla con MARTIN BENISTON (2004). Eventi di questo tipo derivano da risposte complesse a diversi fattori, in modo tale che prevedere la loro reazione a un cambiamento dell'assetto climatico è molto difficile, inoltre gli effetti potranno essere assai diversi a seconda delle regioni del globo. In fondo, le catastrofi naturali da sempre fanno parte del territorio di montagna e della storia alpina, ma ora il timore è che la loro frequenza possa aumentare per il cambiamento climatico. Inoltre, non si dimentichi che la vulnerabilità del territorio

— accresciutasi negli ultimi decenni con l'urbanizzazione diffusa del fondovalle — è in grado di esaltare gli effetti di un fenomeno intenso. Per questo, almeno parte dell'incremento recente di danni da catastrofi climatiche potrebbe essere spiegata con l'aumento demografico e dei beni materiali nelle regioni esposte.

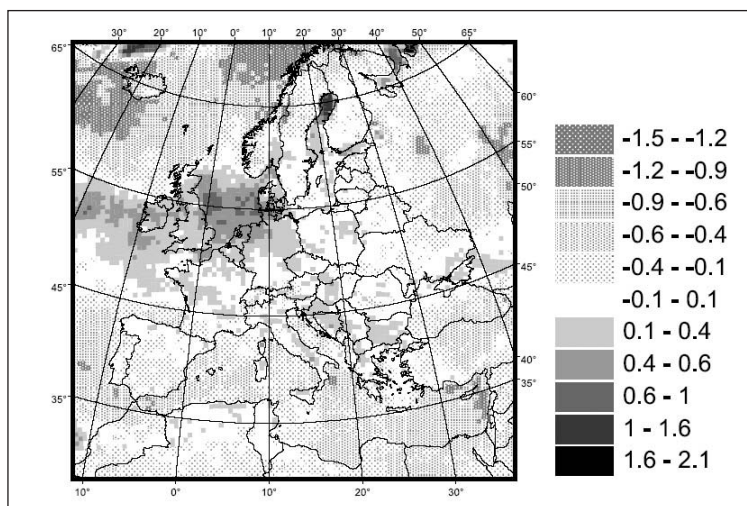
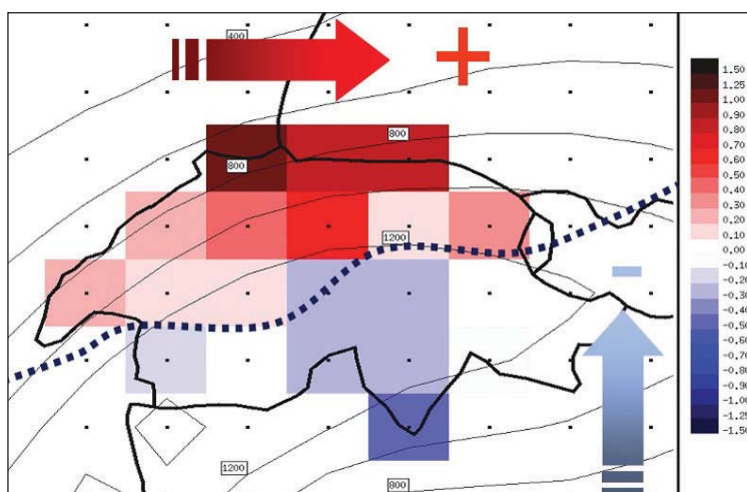
Le tempeste di vento: incertezze, pochi dati in Valle d'Aosta

Il 26 e il 28 dicembre 1999 anche la Valle d'Aosta ha risentito parzialmente del transito delle violente depressioni atlantiche «Lothar» e «Martin», sebbene con effetti ampiamente meno devastanti rispetto ad altri paesi europei — soprattutto Francia, Svizzera e Germania — dove le raffiche superiori a 200 km/h (241 km/h il 26 dicembre sull'Üetliberg presso Zurigo) hanno generato in totale 110 vittime (PANGALLO, 2002); nella sola Svizzera, i danni recati dalle due tempeste hanno raggiunto i 31 miliardi di franchi (AA.VV., 2003). L'entità di queste devastazioni ha riacceso il dibattito sulle eventuali tendenze in atto nei fenomeni meteorologici estremi, e sulla loro possibile evoluzione futura sull'Europa continentale e le Alpi.

Studi statistici sulle depressioni atlantiche formatesi tra il 1958 e il 1999 hanno dimostrato come i sistemi deboli siano divenuti più rari e abbiano spostato la traiettoria più

9.2 - La piena del 24.09.1993 travolge il campeggio di Lillaz (Cogne), asportando alcune roulotte. Non di rado strutture turistiche come queste vengono allestite in posizione esposta ad esondazioni, senza tenere conto dei rischi connessi a situazioni meteo-climatiche straordinarie (f. V. Bertoglio).





9.3 (in alto) - Variazioni nei regimi dei venti sulla Svizzera e le regioni attigue previste entro il trentennio 2071-2100. Il versante nord-alpino potrebbe risentire di una maggiore esposizione a tempeste invernali provenienti dall'Atlantico, mentre sul lato italiano della catena si osserverebbe un calo di frequenza dei flussi umidi mediterranei. Tale evoluzione potrebbe suggerire un possibile aumento dei casi di föhn da ovest molto mite in Valle d'Aosta. (fonte M. Beniston, Università di Ginevra, CH).

9.4 (qui sopra) - Variazioni previste della velocità massima giornaliera del vento nel periodo ottobre-aprile (m/s) riferita alla soglia del 95° percentile (raggiungimento nel 5% dei casi osservati). Previsione per il periodo 2070-2099, sulla base dello scenario A2a (IPCC-SRES / Hadley Center). Secondo questa analisi sarebbe da attendersi un incremento delle velocità specialmente tra Regno Unito, Mare del Nord, Germania e Francia, mentre per il versante sudalpino verrebbero segnalate perfino leggere diminuzioni (LECKENBUSCH & ULBRICH, 2004). Tuttavia si tenga presente la difficoltà dei modelli numerici nel distinguere segnali climatici dovuti a peculiarità geografiche locali, come ad esempio gli effetti di una catena montuosa. Per questo l'eventualità di un incremento dei venti di föhn sulla Valle d'Aosta, legato a un'intensificazione dei flussi tra Ovest e Nord-Ovest sulla regione alpina, è comunque da tenere presente.

9.5 (a lato) - Estesi stradicamenti di larici presso il Pian di Verra (alta Val d'Ayas) a seguito delle tempeste di föhn del 15 e 27 febbraio 1990 (f. L. Mercalli). Durante tali episodi ad Aosta si rilevò una massima raffica di 91 km/h, ma sulle creste alpine più esposte si superarono addirittura i 200 km/h, con una punta di 268 km/h al Gran San Bernardo (27 febbraio), tra i massimi sulle Alpi.

di frequente verso Nord, e come invece i sistemi intensi si siano rafforzati sull'Atlantico settentrionale, ma pure spostando la loro traiettoria verso settentrione. E in Svizzera nord-orientale il numero di giorni con forte vento è stato maggiore tra il 1880 e il 1930 che in seguito (AA.VV., 2003). Da queste informazioni dunque sembrerebbe che l'incidenza delle tempeste di vento sia diminuita negli ultimi decenni sulla regione alpina. Tuttavia i timori per un incremento futuro di tali fenomeni sono giustificati e realistici: molti modelli climatici segnalano come possibile un aumento dell'attività ciclonica sull'Atlantico Nord-orientale e in Europa occidentale durante il XXI secolo, e un incremento delle tempeste atlantiche invernali dai settori Ovest e Nord-Ovest sull'Europa centrale (BENISTON, 2004; LECKENBUSCH & ULBRICH, 2004) (fig. 9.3, 9.4).

In Val d'Aosta non esistono serie anemometriche sufficientemente longeve e affi-



dabili da consentire un'analisi statistica significativa alla ricerca di tendenze nella frequenza dei venti forti. All'aeroporto di St-Christophe il vento è misurato con buona continuità dal 1974, ma dal conteggio annuale dei giorni con raffica pari almeno alla forza 8 della *Scala Beaufort* (> 62 km/h) emerge un drastico calo a partire dagli Anni 1990, che fa sospettare piuttosto una netta disomogeneità nei dati (da valori di 40÷60 giorni/anno con raffica > 62 km/h si passa a meno di 5 negli anni più recenti, dopo il 1998).

Quanto all'incidenza futura del föhn in Valle d'Aosta, in assenza di simulazioni specifiche, si può soltanto argomentare — a livello indicativo e qualitativo — che un aumento delle burrasche atlantiche da Ovest sulle Alpi e l'Europa centrale potrebbe tradursi in una maggiore frequenza/intensità degli episodi. Il legame tra NAO e tempeste invernali sull'Europa centrale non è ancora stato dimostrato, tuttavia uragani come *Vivian* (27-28 febbraio 1990) e *Lothar* (26 dicembre 1999), causa di forti ondate favoniche in Val d'Aosta, si sono verificati in situazioni di NAO fortemente positiva (AA.VV., 2003), con apporto di aria mite oceanica responsabile di mitezza anomala, specie sul versante sottovento delle Alpi.

Poiché i modelli di simulazione prevedono in futuro un aumento delle situazioni di

NAO positiva, non è fuori luogo immaginare — in via cautelativa — un incremento dei casi invernali di föhn molto mite nei prossimi decenni.

Estremi di temperatura: onde di calore più frequenti, ma forti geli sempre possibili

Con l'aumento delle temperature medie, in futuro potranno aumentare di pari passo anche le temperature estreme. Come mostrato nei grafici 6.39 e 6.40 (p. 60), che rappresentano la dipendenza osservata tra temperature medie e massime estreme annuali, all'aumentare di 1 °C del valor medio, si nota un aumento di pari entità degli estremi massimi; affermazione solo in apparenza banale, poiché con il cambiamento climatico l'incremento della media potrebbe essere accompagnato anche da un incremento nella variabilità. Dunque, più grandi ondate di calura, e forse minore frequenza dei forti geli, che tuttavia rimarrebbero pur sempre possibili anche in un «mondo serra».

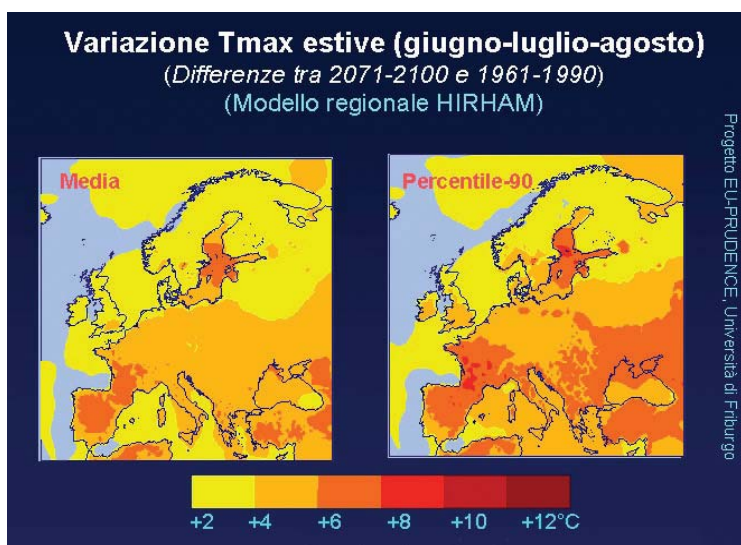
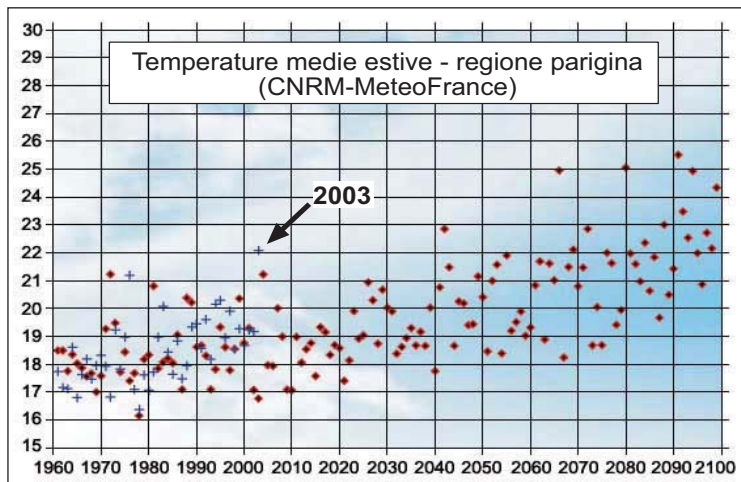
La straordinaria ondata di caldo del 2003 dà un'idea delle condizioni che potrebbero divenire più abituali specialmente nella seconda metà del XXI secolo (fig. 9.6), quando sull'Europa occidentale, all'interno dell'aumento di temperatura media, le ondate di caldo potranno divenire più intense, lunghe e frequenti (BENISTON & STEPHENSON, 2004; MEEHL & TEBALDI, 2004).

Estati con temperature medie massime tra 6 e 8 °C superiori a quelle normali del periodo 1961-90 potrebbero intervenire almeno un anno ogni dieci in media (fig. 9.7). Tale

evoluzione è confermata da una ricerca condotta da CNRM-Météo France, secondo cui stagioni estive canicolari come quella del 2003 potrebbero divenire ricorrenti verso la fine del XXI secolo (Fig. 9.6).

Precipitazioni intense e alluvioni: per ora nessun segnale in Valle d'Aosta. Ma attenzione in futuro

Sulle Alpi, incrementi significativi delle precipitazioni giornaliere intense durante il XX secolo sono stati osservati in autunno e inverno su vaste zone del versante nordalpino svizzero, dove pure le precipitazioni medie invernali sono aumentate del 20÷30% (AA.VV., 2003). Per contro, nessun segnale di cambiamento si intravede per ora sul lato meridionale delle Alpi, in Valle d'Aosta (cfr. cap. 7) come sul Canton Ticino. Tuttavia, è importante non sottovalutare la questione. Secondo FREI & al. (2006) proprio a partire dal 45° parallelo verso Nord si potrà avere in futuro un ulteriore aumento degli estremi di precipitazione invernale. Dunque, da un lato la prevista intensificazione del ciclo idrologico potrà — secondo i modelli climatici — scatenare un incremento delle precipitazioni intense e concentrate, dall'altro altri fattori potrebbero contribuire ad esacerbare gli effetti di forti scrosci anche di entità non così inusuale: si pensi alla caduta di precipitazioni liquide, conseguenti al riscalda-



9.6 (in alto) - Distribuzione prevista delle temperature medie estive nella regione di Parigi fino al 2100 (rombi rossi). La simulazione al computer (Modello Arpège-Climat, scenario IPCC-SRES A2) è stata condotta anche sul periodo passato 1960-2003, ottenendo dati coerenti con la situazione effettivamente osservata (crocette blu): questo conferma la bontà dell'analisi. La freccia indica la posizione del valore medio dell'estate 2003: si noti come in futuro, specialmente nella seconda metà del XXI secolo, valori di questo tipo - oggi eccezionali - potrebbero divenire assai più ricorrenti. (fonte: Dossier CNRM-Météo France, <http://www.cnrm.meteo.fr>)

9.7 (qui sopra) - Risultati del modello regionale HIRHAM, che indicano l'aumento delle temperature medie massime nel trimestre estivo previsto entro la fine del XXI secolo in Europa. In Valle d'Aosta sono attesi incrementi dell'ordine dei 4÷6 °C. Nel 10% degli anni potranno registrarsi temperature di 6÷8 °C superiori a quelle del trentennio di riferimento 1961-90. (cortesia M. Beniston, Università di Ginevra, CH)

9.8 - Lavori di ripristino sull'alveo del T. Prà Moulin, presso La Palud (Courmayeur), interessato da una colata torrentizia ad elevato carico solido la sera del 12.06.2003, quando un violento temporale con temperature elevate si abbattè sul Monte Bianco (28.06.2003, f. D. Cat Berro).

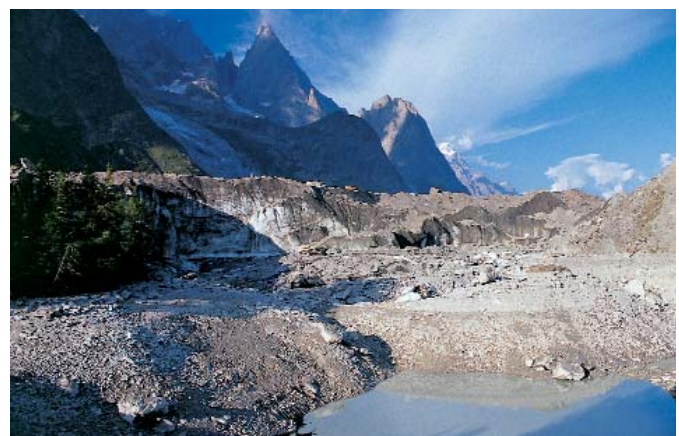


mento atmosferico, anche ad alta quota, e su terreni morenici sciolti e incoerenti, da poco liberati dai ghiacciai in regresso, potenziale luogo di innesco di colate detritiche o piene torrentizie ad elevato carico solido (fig. 9.8); oppure l'interferenza di

piene fluviali e dissesti con opere e infrastrutture di recente costruzione, che aumentano la vulnerabilità del territorio anche in assenza di una reale intensificazione fisica dei fenomeni atmosferici.

Anche l'individuazione di tendenze storiche nella frequenza delle piene è soggetta a delicati problemi di interpretazione statistica dei dati a disposizione, cui si aggiunge la difficoltà derivante dall'incompletezza delle fonti anteriori al 1700-1800, nonché a fattori economici e sociali che alterano gli effetti degli eventi sul territorio e ne modificano la percezione da parte della collettività.

A questo proposito, si sottolinea l'importanza di ristrutturare la rete di misura delle portate della Dora Baltea, unico strumento capace di fornire informazioni fisicamente omogenee nel tempo e nello spazio sull'evoluzione e la dinamica dei deflussi.



9.9 a, b - In una regione montuosa come la Valle d'Aosta sono da tenere presenti pure i rischi glaciali. Il riscaldamento atmosferico porta con sé soprattutto la formazione di molti nuovi laghi epiglaciali anche oltre i 3200-3500 m, suscettibili di improvviso svuotamento. Qui sopra, il lago del Miage visto il 12.08.1998, e dopo lo svuotamento di inizio settembre 2004 (05.09.2004, f. D. Cat Berro). Per conoscere gli eventi storici di instabilità glaciale in Valle d'Aosta si veda il sito del progetto europeo **GLACIORISK**, dove è consultabile la banca dati **GRIDABASE**: <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>.

Programmare, agire, adattarsi



La produzione di energia idroelettrica sarà in futuro determinante per venire incontro all'esigenza di ridurre le emissioni di gas a effetto serra in atmosfera. Qui sopra, il coronamento della diga del Goulet, alta Valtournenche (f. L. Mercalli).



«C'è ancora tempo per evitare
un cambiamento climatico disastroso?

Sì, ma:

- 1) Lo scenario alternativo, benché praticabile,
attualmente non è perseguito.
- 2) E' necessario agire immediatamente: mantenere le
condizioni attuali per un altro decennio elimina la possibilità
di realizzare lo scenario alternativo.
- 3) La speranza: la gente deve informarsi e arrabbiarsi.»

JIM HANSEN, 2006

«E' più intelligente agire con prudenza oggi piuttosto che
domani, quando potremo essere certi di ciò che sta acca-
dendo, ma potrebbe essere troppo tardi.»

GIAN-RETO PLATTNER, OcCC (*Organe consultatif sur les
changements climatiques, Suisse*)

«Gli scienziati dibatteranno e faranno ricerche ancora per
decenni sulle cause esatte dei cambiamenti climatici.
Ma i decisori sono chiamati a prendere fin da subito
delle misure preventive.»

KATHY RIKLIN, OcCC (*Organe consultatif sur les changements
climatiques, Suisse*)

«Bisogna aggiungere un pollice verde alla mano invisibile
del mercato dell'economista Adam Smith.»

ERIC LAMBIN, 2004

10. COSA SI FA IN VALLE D'AOSTA

Nell'ambito dell'Amministrazione regionale valdostana, già oggi sono molte le attività — promosse e sostenute da svariate strutture regionali — volte a comprendere l'evoluzione dell'attuale cambiamento climatico e a valutarne gli effetti sull'ambiente e il territorio. Ecco una sintesi schematica delle attività sviluppate.

1) ARPA Valle d'Aosta/Direzione ambiente

- a) **Distribuzione potenziale del permafrost sul territorio regionale** e suo monitoraggio come indicatore del cambiamento climatico. Installazione di un sito di osservazione al Colle Nord di Cime Bianche (Cervinia); in collaborazione con l'Università degli Studi dell'Insubria di Varese e con la società Cervino S.p.A.
- b) **Progetto PERMADATAROC**, nell'ambito del Programma Interreg III A ALCOTRA Italia-Francia: caratterizzazione termica di pareti rocciose per lo studio delle instabilità (Cervino, Monte Bianco). In collaborazione con Fondazione Montagna Sicura, Università de Savoie-Laboratoire Edytem e CNR-IRPI di Torino.
- c) **Analisi morfo-strutturale e caratterizzazione termica di pareti rocciose** per lo studio delle instabilità di versanti recentemente deglaciati in Valle d'Aosta.
- d) **Monitoraggio del profilo termico di un sito d'alta quota** (Punta Helbronner).
- e) **Bilancio di massa del ghiacciaio Timorion** come indicatore del cambiamento climatico.
- f) **Stima della risorsa idrica nivo-glaciale in alta Valpelline**.
- g) **Progetto Interreg III A ALCOTRA «COGEVA-VAHSA»** (monitoraggio degli habitat caratteristici degli ambienti glaciali del M. Bianco).
- h) **Autorità di Bacino del Po: sistemi informativi e monitoraggio risorsa idrica**.
- i) **Progetto AWARE** (*A tool for monitoring and forecasting available water resource in mountain environment*): stima delle risorse idriche nivali.
- l) **Progetto REPHLEX**: immagini satellitari per l'analisi del ciclo fenologico della vegetazione.
- m) **Progetto GLORIA** (*Global Observations Research Initiative in Alpine Environments*): effetto dei cambiamenti climatici sulla vegetazione d'alta quota.
- n) **Monitoraggio della radiazione solare UV**.
- o) **Progetto Interreg III MEDOCC-Mercurio**: gestione sostenibile delle opere in pietra a secco.

2) **Fondazione Montagna Sicura - Direzione ambiente**

Attività della Cabina di Regia dei Ghiacciai Valdostani (CRGV), ente che riunisce i responsabili del Soccorso Alpino e delle Guide d'Alta Montagna, nonché referenti istituzionali quali il CGI (Comitato Glaciologico Italiano, il CNR e l'ARPA Valle d'Aosta).

- a) **Monitoraggio dei ghiacciai valdostani.**
- b) Costituzione di un **centro di documentazione sui ghiacciai regionali** presso la sede di Villa Cameron a Courmayeur.
- c) Iniziative di **aggiornamento e ricerca** sulle dinamiche glaciali e periglaciali.

3) **Progetti Interreg che coinvolgono la Direzione Ambiente**

- a) **Progetto Interreg III B Spazio Alpino «Climate change, impacts and adaptations strategies in the Alpine space»**, 2006-07. Obiettivo è la stima delle **conseguenze del cambiamento climatico sui rischi naturali**, per poter fondare efficaci decisioni a livello politico e amministrativo.
- b) Progetti Interreg III A in corso: **PRINAT, ROCKSLIDEDETECT, RISKHYDROGEO** (in collaborazione con ARPA e Fondazione Montagna Sicura).

4) **Servizio Operativo Protezione Civile - Ufficio Meteorologico**

- a) **Progetto Interreg III B «METEORISK»** - ZAMG Austria (Programma Spazio Alpino): collaborazione tra centri meteorologici delle regioni alpine; fornitura a ZAMG di alcune serie climatologiche valdostane rappresentative. **Previsione del rischio meteo a breve termine**, compilazione di una pagina internet per la segnalazione dello stato di rischio. www.meteorisk.info.
- b) **Progetto FORALPS / Politecnico Torino** (Programma Spazio Alpino): sviluppo e test di **miniradar portatile** in banda X per monitoraggio delle precipitazioni in montagna. <http://www.unitn.it/foralps>.
- c) Installazione di **«Synergie»**, sistema evoluto di ricezione e visualizzazione di dati meteorologici.
- d) Emissione del bollettino meteorologico tradizionale e, dal febbraio 2005, anche del **«Bollettino Vigilanza»**, prodotto destinato al Centro Funzionale della Regione per la stima delle precipitazioni nelle diverse aree di allertamento.
- e) **Bollettino speciale durante le ondate di calore**, in collaborazione con l'AUSL.

- 5) **Consolidato sistema di prevenzione degli incendi boschivi** nell'ambito dell'Assessorato Agricoltura e Risorse Naturali (CESTI, 1996, 1999).



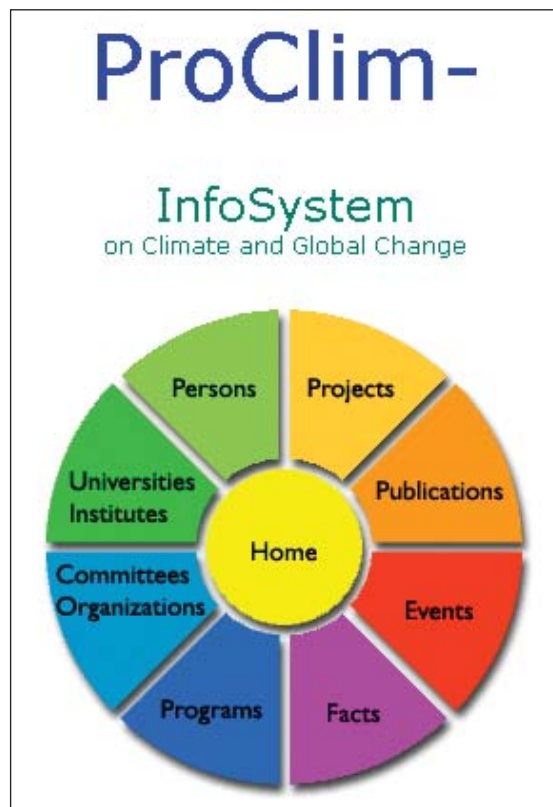
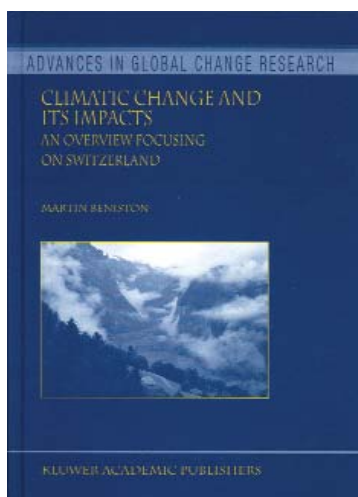
11. COSA FANNO GLI ALTRI

Il problema del cambiamento climatico è stato affrontato con grande impegno da molti paesi del mondo, in particolare quelli europei e nord-americani, sia a livello di ricerca scientifica, sia di divulgazione delle conoscenze verso il pubblico, anche con la diffusione gratuita di approfonditi rapporti scientifici o brochure sui vari temi del cambiamento climatico.

L'Italia, invece, non ha mai sviluppato una profonda e organica consapevolezza del problema, lasciando all'iniziativa di singoli istituti di ricerca o amministrazioni locali l'attività di ricerca e sensibilizzazione verso la cittadinanza, con il risultato di impedire la formazione di un'ampia e omogenea coscienza condivisa, alimentando invece confusione, dubbi e contraddizioni. Anche a livello politico, l'interesse per tali problemi è sempre stato episodico e frammentario.

La fondamentale opera di Martin Beniston (Università di Ginevra) «Climatic change and impacts - An overview focusing on Switzerland», la cui metodologia, essendo centrata sulla regione alpina, è stata seguita nella redazione di questo rapporto.

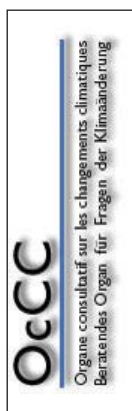
La necessità di ottemperare ai vincoli imposti dal Protocollo di Kyoto è stata affrontata più a livello burocratico centrale che come obiettivo corale e coinvolgente l'intera struttura sociale, economica e produttiva del paese. Si illustreranno di seguito alcune iniziative rilevanti in



paesi di area francofona.

La **Svizzera** è sicuramente la nazione alpina che più ha preso in seria considerazione i problemi climatici. Nel 1996 il Dipartimento

Federale dell'Interno e il Dipartimento Federale dell'Ambiente, Trasporti, Energia e Comunicazioni ha costituito l'OcCC: *Organ Consultatif sur les changements climatiques*. Il mandato per la creazione di questo organo consultivo è stato affidato all'Accademia



Svizzera di Scienze Naturali, affiancata in seguito dall'Ufficio Federale dell'Ambiente, Foreste e Paesaggio

(www.umwelt-schweiz.ch/buwal/fr/index.html). La

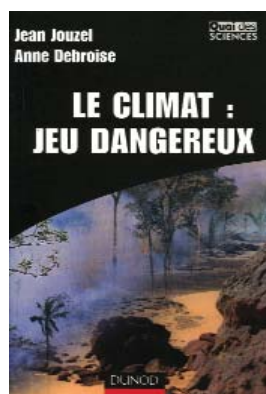


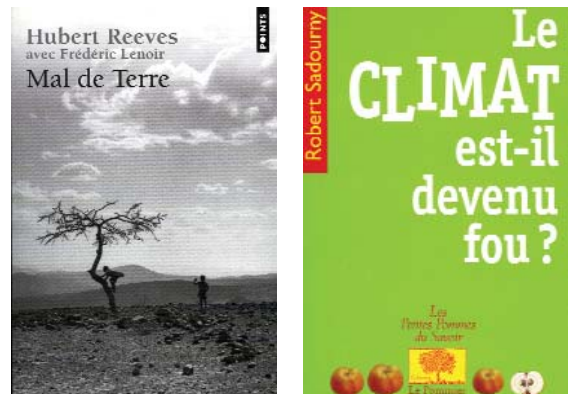
«climatico» NCCR-Climatic (www.nccr-climate.unibe.ch) da parte del Fondo Nazionale Svizzero per la Scienza (rete di

segreteria dell'OcCC è stata delegata a PROCLIM (www.proclim.ch), il forum sul clima e il cambiamento globale che ha unito e creato sinergie tra le realtà scientifiche elvetiche. L'idea di questa struttura è stata quella di sollecitare un dialogo continuo tra il settore della ricerca scientifica, quello economico e l'amministrazione federale, al fine di elaborare strategie e soluzioni ai problemi del cambiamento climatico. L'OcCC funziona come una cerniera tra scienza, autorità federali e cantonali, e il pubblico. È stato perfino costituito un gruppo parlamentare sul cambiamento climatico, nonché il centro di competenza nazionale «Variabilità climatica, predicibilità e rischio

gruppi di ricerca delle Università di Berna, Friburgo, Ginevra, ETH Zurigo, varie agenzie federali, e la compagnia di reassicurazione SwissRe).

Da segnalare l'utile pagina dedicata alla protezione dalle piene sul sito dell' Ufficio Federale dell'Ambiente (www.bwg.admin.ch/themen/natur/i/hws.htm), la rete CENAT - Centro di Competenza Pericoli Naturali (www.cenat.ch), e la Piattaforma Nazionali Pericoli Naturali - PLANAT (www.planat.ch). Ha sede in Svizzera, a Berna, anche la comunità scientifica «PAGES» (Past Global Changes), un gruppo di ricerca fondato nel 1991 dall'International Geosphere Biosphere Program (IGBP), e



In **Francia** si assiste a una grande vivacità culturale nel settore del clima, che si esprime in particolare con la pubblicazione di numerosissimi titoli, sia per specialisti, sia rivolti al grande pubblico, in continuo aggiornamento. Dal punto di vista governativo, l'impegno per lo studio dei cambiamenti climatici è portato avanti, in particolare, da organismi del CNRS e dai centri di calcolo di Météo France, con una responsabile azione informativa proposta da orga-

finanziato da USA-NOAA e dal Fondo Nazionale Svizzero (www.pages-igbp.org).

Per una visione generale delle attività in campo climatologico in Svizzera è anche disponibile il portale www.climate-change.ch.

Ruolo attivo nella previsione degli eventi meteo-climatici è infine svolto dall'Ufficio Federale di Meteorologia e Climatologia, www.meteosvizzera.ch.





Environnement Canada / Environment Canada

Canada

English	Contactez-nous	Aide	Recherche	Site du Canada
Quoi de neuf À notre sujet	Thèmes	Publications	Météo	Accueil
La nature de l'eau	Politiques et lois relatives aux eaux	La gestion de l'eau	L'eau et la culture	Ressources et services d'information

[La neige et la glace](#)
[Les cours d'eau](#)
[Les lacs](#)
[Les terres humides](#)

[L'eau et le climat](#)
[Les eaux souterraines](#)
[Les propriétés de l'eau](#)

[Le pergélisol](#)
[Les écosystèmes aquatiques](#)
[Les sédiments](#)

Site Web sur l'eau douce

Liens éclairés

Index des mots-clés

Allez

Environnement Canada / Environment Canada

Canada

English	Contactez-nous	Aide	Recherche	Site du Canada
Quoi de neuf À notre sujet	Thèmes	Publications	Météo	Accueil

[Accueil](#)
[Aperçu](#)
[L'action concrète](#)
[Salle de la presse](#)
[Plan du site](#)
[Communiqués avec nous](#)
[Version imprimable](#)

Changements climatiques

Le gouvernement du Canada est déterminé à élaborer et à mettre en œuvre un plan spécifiquement canadien pour réduire les gaz à effet de serre et assurer à la population canadienne de l'air, de l'eau, des sols et de l'énergie propres. L'approche canadienne sera efficace et réaliste. Elle misera sur des réductions durables de nos émissions tout en assurant la vitalité de notre économie. Le gouvernement adoptera des solutions qui auront des avantages environnementaux concrets pour le pays et qui amélioreront notre capacité de commercialiser de nouvelles technologies sur le marché international.

Environnement Canada / Environment Canada

Canada

English	Contactez-nous	Aide	Recherche	Site du Canada
Quoi de neuf À notre sujet	Thèmes	Publications	Météo	Accueil

Passons à l'action

Air Changement climatique Les faits Transport Bénévoles Eau

Les petits changements font de grandes différences

Vous êtes une personne influente ! Ce que vous faites peut aider à assainir l'air et à économiser l'énergie. Vous pouvez conserver l'eau et l'énergie et prévenir la pollution.

Le site Web **Passons à l'action** est un endroit où vous trouverez des renseignements et des conseils qui vous aideront à agir de manière à rendre l'environnement plus propre et plus sain.

Ce site regroupe divers conseils destinés à vous inciter à prendre des mesures écologiques dans votre vie de tous les jours. Ces conseils concernent des endroits particuliers (votre maison, votre école et plus) et sont classés en fonction de sujets précis (le changement climatique, l'eau, l'air, etc.)

VOUS-MÊME pouvez faire une différence ! Et dès maintenant !

ni governativi (www.ecologie.gouv.fr/sommaire.php3; www.effet-de-serre.gouv.fr). Si è, tra l'altro, costituita anche una rete delle associazioni attive nel campo del cambiamento climatico (*Réseau d'Action Climat France*, www.rac-f.org).

In **Canada** l'aspetto più rilevante della politica di ricerca e informazione sui cambiamenti climatici è una forte connotazione governativa nei settori della ricerca e dell'educazione dei cittadini, effettuata ad ampio raggio in maniera capillare ed estremamente omogenea attraverso la struttura di *Environment Canada* (www.ec.gc.ca). Il vantaggio di tale impostazione consiste nella creazione di una solida fiducia nelle strutture dello Stato e in una diffusione di informazioni chiare e condivise.

Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada

English	Contactez-nous	Aide	Recherche
Accueil	Carte du site	Version texte	Version imprimante

Liens

L'Office de l'efficacité énergétique (OEE)

Nous aimerions vous montrer comment économiser l'énergie, réduire les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent aux changements climatiques et économiser de l'argent à la maison, au travail et sur la route.

Énergie consommée à des fins personnelles

Secteur résidentiel : Habitation, électroménagers et équipement

Secteur des transports: Achat d'un véhicule, conduite du véhicule, carburants de remplacement

12. INFORMARE LOCALMENTE

«Lo studio dei rischi climatici necessita di un'ampia apertura di pensiero, che permette di considerare con serenità e molta prudenza i fatti, fisici e umani, i ragionamenti, le idee, e — con distacco — gli interessi non scientifici che possono affermarsi». (DENIS LAMARRE, 2005).

Creare consapevolezza e sconfiggere l'allarmismo

L'informazione è un elemento fondamentale per creare le condizioni di un corretto approccio ai cambiamenti climatici e

alle azioni conseguenti per ridurli, mitigarli o adattarsi. Troppo spesso l'informazione scientifica è superficiale/contraddittoria oppure, incomprensibile/complexa. Le reazioni divengono così, il più delle volte, quelle dell'allarmismo temporaneo o dell'indifferenza. Entrambe queste reazioni hanno un denominatore comune: non producono alcun miglioramento o atto concreto apprezzabile nel quadro della prevenzione delle possibili crisi. Ciò di cui si ha bisogno è invece un vero e proprio processo educativo, che

12.1 -
L'informazione e l'educazione del pubblico è di fondamentale importanza per far nascere la consapevolezza sul problema del cambiamento climatico e sulla necessità di una sua mitigazione.

A lato, lezione su meteorologia e clima rivolta ai turisti al Colle del Nivolet, Valsavarenche, nel quadro delle iniziative culturali del Parco Nazionale Gran Paradiso (f. D. Cat Berro).



formi una consapevolezza serena, fornisca alcuni strumenti critici, mantenga un'attenzione costante all'argomento, traducendosi infine in scelte quotidiane accettate e condivise con naturalezza, nonché nella capacità di riconoscere immediatamente i rari momenti di emergenza, assumendo comportamenti appropriati e positivi.

Cosa fare in Valle d'Aosta?

La dimensione geografica e demografica della regione valdostana può costituire un vantaggio e un privilegio per sperimentare forme di comunicazione e formazione efficaci verso i propri cittadini.

La prima fase è quella dell'informazione, attuabile con:

- incontri pubblici a livello comunale;
- distribuzione di sintetiche brochures dalle quali si evinca l'esistenza del problema climatico e si propongano i principali ambiti di intervento, con l'indicazione delle fonti di approfondimento;
- costituzione di una sezione del sito web regionale contenente ciò che si sa sul cambiamento climatico, gli aggiornamenti a scala mensile di quanto accade, con ampio uso di materiale grafico, in modo da avere sempre il polso della situazione, e i suggerimenti o le norme dell'Amministrazione per affron-

tare i nuovi problemi. Una sorta di *vademecum* del cambiamento climatico locale;

- salvaguardare e diffondere la memoria della storia climatica locale (alluvioni, valanghe.), in grado di costituire un punto di riferimento anche per quanti si muovono sul territorio privi di una conoscenza a lungo termine come quella di chi vi è radicato da generazioni.

La seconda fase è quella dell'azione, tramite proposte di leggi o attuazione di processi volti a mettere in pratica quanto ormai recepito da parte della cittadinanza. In questo ambito è opportuno non dimenticare anche la popolazione turistica, la quale, pur frequentando occasionalmente la *Vallée*, deve poter trovare sempre un «clima» di fiducia, una visione che un organo tecnico preparato e lungimirante veglia sulle proprie vacanze in modo trasparente, comunicando scelte e criticità. Lo strumento della pagina web si conferma come quello principale per la diffusione delle informazioni, coadiuvato da una campagna di pubblicizzazione sugli altri mezzi di promozione turistica.

13. PROGRAMMARE E AGIRE

«Le strategie e le decisioni intraprese per la riduzione dell'inquinamento, del cambiamento climatico, della deforestazione e della desertificazione potranno costituire un'opportunità e una sfida sia per il settore privato sia per quello pubblico. Una serie di reazioni nazionali e internazionali accuratamente individuate e mirate alla mitigazione, all'adattamento e al miglioramento delle conoscenze può ridurre i rischi posti dai cambiamenti ambientali alle risorse idriche e ai rischi naturali».

(MARTIN BENISTON, 2005)

L'impianto fotovoltaico di potenza 60 kWp installato presso gli uffici della Compagnia Valdostana Acque a Châtillon, ottimo esempio che concilia una gradevole soluzione architettonica con lo sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili (cortesia CVA SpA).

Il problema del cambiamento climatico e della conseguente riduzione di emissioni di gas climalteranti pone un'enorme sfida all'attuale assetto economico della società umana. Infatti, da un lato la riduzione delle



www.urmwelt-schweiz.ch/buwal/ft

emissioni passa attraverso gli stili di vita individuali, con la riduzione dei consumi e l'aumento dell'efficienza, dall'altro, via via che le variazioni climatiche si riveleranno, sarà necessario assecondarle e mettere in pratica tutte le possibili strategie di adattamento per limitare i danni. Pertanto risulta fondamentale, accanto all'informazione e all'educazione della cittadinanza, **avviare un serio processo di confronto e di condivisione con le realtà produttive locali** che porti all'elaborazione di normative, incentivanti e/o cogenti, per l'introduzione di buone pratiche, e disincentivanti per i processi energivori e dissipativi nei confronti delle risorse non rinnovabili. Pur nella complessità





La campagna svizzera «Minergie» dell'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) è volta alla diffusione di soluzioni edilizie ad alto rendimento energetico, in analogia con quanto la Provincia Autonoma di Bolzano ha intrapreso con il Progetto CasaClima. www.minergie.ch.

di tale scenario, si rammentano di seguito i principali ambiti di azione, ricordando che i tempi di attuazione di tali strategie e l'ottenimento dei primi risultati sono talora lunghi, e pertanto **è assolutamente indispensabile iniziare questo cammino nel più breve tempo possibile**, come del resto già fanno da decenni i paesi a Nord delle Alpi.

Risparmio energetico

E' il primo passo per abbattere i consumi e quindi le emissioni di gas a effetto serra. I **margini di azione sono ampi, in genere valutati attorno al 30÷40%**, un risultato di gran lunga più importante di qualunque altra azione percorribile a breve termine.

Il risparmio energetico non è una strategia perdente, anzi, oltre ai benefici effetti sull'ambiente e sul clima può creare nuovi posti di lavoro e costituire un elemento di sicurezza in un futuro nel quale l'approvvigionamento energetico si farà via via più incerto e costoso. In Italia, l'esempio da seguire è la Provincia Autonoma di Bolzano,

che ne ha fatto un fiore all'occhiello e una procedura standardizzata ed emulata a livello nazionale. In accordo a quanto realizzato nell'ambito del Progetto CASACLIMA (www.provinz.bz.it/umweltagentur/2902/klimahaus/index_i.htm) vi sono pure le iniziative svizzere MINERGIE (www.minergie.ch) e COSTRUIRE BENE (www.costruire-bene.ch). In questi casi, la proposta è quella di **giungere a fabbisogni energetici dell'ordine di 70÷80 kWh/m² anno per edifici già esistenti**, tramite il miglioramento dell'isolamento termico di pareti e soffitti, la sostituzione degli infissi, caldaie più efficienti, ed a **valori inferiori a 40 kWh/m² anno per gli edifici di nuova realizzazione**, fino alla possibilità di un impiego non superiore a **15 kWh/m² anno per la tecnologia della casa «passiva»**. Un attuale edificio in Valle d'Aosta, non particolarmente curato sotto il profilo termico, può avere un dispendio di circa **250 kWh/m² anno!** Questo può dare un'idea degli straordinari margini di azione possibili. Significativo è anche il fatto di come la normativa svizzera per il risparmio energetico consiglia ormai la sostituzione dei vetri doppi con vetri tripli a bassa emissività, mentre in Valle d'Aosta è ancora comune trovare gran parte degli edifici con infissi a vetro semplice. Anche l'incentivo di **metodi di illuminazione a risparmio energetico** può far raggiungere ulteriori importanti risparmi nell'uso dell'energia elettrica (sostituzione delle lampade a

5689 edifici sono stati certificati MINERGIE®, 79 MINERGIE-P®. Superficie utile riscaldata: 5,01 Mio m² in edifici nuovi e rinnovati.

MINERGIE®

Maggiore qualità di vita, minore consumo d'energia
Mehr Lebensqualität, tiefer Energieverbrauch

MERCEO: Deutsch, Français, Italiano, English

PORTALE DEGLI INDIRIZZI: Nel nostro portale degli indirizzi trovate gli specialisti MINERGIE® della vostra regione! In questa branca dati sono raccolti tutti i recapiti significativi riguardanti il tema MINERGIE®.

I nostri partner: **ENERGIEPARTNER**, **RAIFFEISEN**, **costruire-bene.ch**

MARCHIO STANDARD MERCATO SERVIZI CONTATTI



incandescenza con quelle fluorescenti).

La Svizzera ha sicuramente il primato per l'ampiezza delle azioni intraprese sul risparmio energetico domestico, che porta avanti attraverso il programma «SvizzeraEnergia», programma cooperativo per l'efficienza energetica e le energie rinnovabili (www.svizzeraenergia.ch). SvizzeraEnergia gode di un finanziamento pubblico federale e cantonale di circa 80 milioni di franchi dall'anno, e di una somma simile proveniente dal settore privato, tuttavia genera progetti energetici sui quali viene investita una somma pari a 800 milioni di franchi all'anno. A dispetto dei luoghi comuni, fantasia e creatività non mancano agli svizzeri, che hanno saputo creare campagne di sensibilizzazione di grande impatto fino alla proposta di messaggi pubblicitari patrocinati dall'ente federale e rivolti alle industrie che operano nel settore.

La Regione Valle d'Aosta si sta dotando di un piano energetico regionale, che sarà

una valida base per sviluppare progetti di risparmio ed efficienza energetica, in analogia a quanto ormai operativo da decenni in Svizzera.

Energie rinnovabili

Al di là del potenziale idroelettrico, già ampiamente sfruttato in Valle d'Aosta, e di quello eolico, scarsamente sfruttabile per le velocità medie del vento troppo basse — anche nel settore di valle soggetto alle vivaci brezze diurne — **il potenziale di gran lunga più promettente è quello dell'energia solare, termica e fotovoltaica.** Un'opportuna politica di incentivazione potrà favorire l'impianto dei dispositivi per la produzione di acqua calda sanitaria o, per



integrazione, da riscaldamento, e quelli di produzione fotovoltaica di energia elettrica. La Compagnia Valdostana Acque del resto ha già recepito tale opportunità installando sulla propria sede di Châtillon un impianto da 60 kW di picco che rappresenta anche una gradevole soluzione architettonica. In ambito svizzero, si segnalano ancora l' *Agenzia per le energie rinnovabili e l'efficienza energetica* (www.rinnovabili.ch), e il Centro di informazioni sull'energia solare (www.swissolar.ch).

La Svizzera è tra i paesi più all'avanguardia nel risparmio energetico. Ecco uno slogan di SvizzeraEnergia per la promozione della coibentazione dei tetti. La differenza non si vede... ma c'è! E la differenza con le pressoché inesistenti politiche di educazione promozione e incentivazione appena oltre il confine, è pure abissale...

Trasporti

Da solo il sistema dei trasporti contribuisce a circa un terzo delle emissioni di gas serra (il 35% in Svizzera, WOKAUN A., in AA.VV., 2002). E' necessario promuovere la razionalizzazione degli spostamenti, la scelta di vetture di piccole dimensioni a basso consumo, il potenziamento dei trasporti pubblici e l'educazione del pubblico al loro utilizzo. Utili pure le limitazioni di velocità e al traffico cittadino, nonché pianificazioni urbanistiche

favorevoli a pedoni e ciclisti.

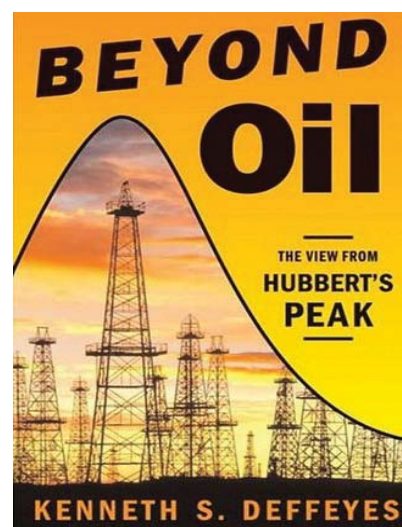
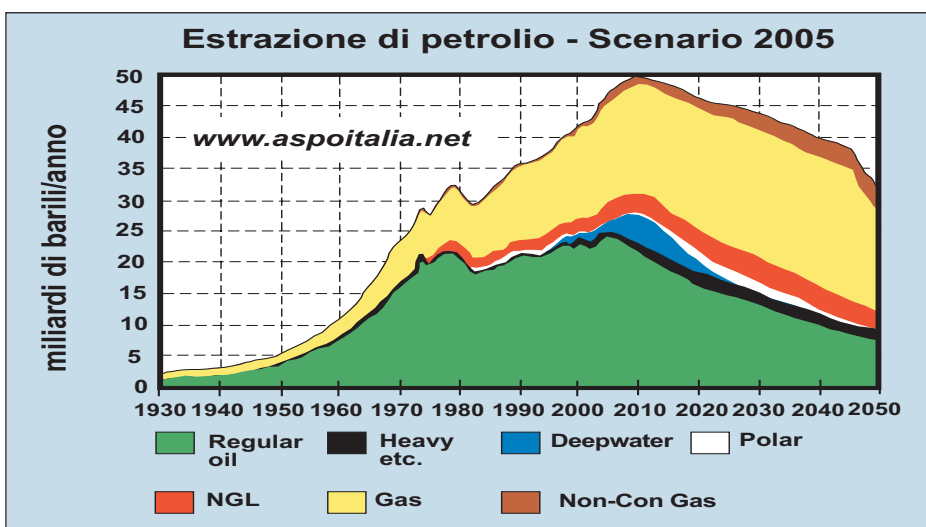
Ottimizzazione dell'uso dell'acqua

Come indicato nel cap. 7, per ridurre l'uso di acqua potabile, per l'irrigazione di orti e giardini, lavaggio auto o impieghi simili, sarebbe opportuno favorire la diffusione di cisterne domestiche per l'accumulo dell'acqua piovana, quantomeno negli edifici di nuova costruzione.

Gestione dei rifiuti

Ogni rifiuto costituisce un elemento dissipatore di energia ed emettitore di gas climalteranti, sia nella fase di produzione, sia in quella di trasporto, che di smaltimento. Anche i rifiuti devono essere mobilizzati con mezzi che consumano combustibili fossili, e la parte organica di questi, qualora conferita in discarica senza trattamento, libera metano, potente gas a effetto serra. Oltre a portare avanti un incisivo programma di riduzione e di riciclo dei rifiuti, è importante favorire la differenziazione della frazione organica, al fine di **diffondere il più possibile la pratica del compostaggio domestico**, che — in un territorio come quello valdostano in cui dominano le abitazioni familiari — può validamente contribuire alle necessità del ciclo produttivo di giardini e orti; solo le zone più urbanizzate, con grandi condomini, avrebbero la necessità del trasporto in impianti di compostaggio.





Kenneth Deffeyes: un valdostano tra i teorici della fine del petrolio

Il declino delle riserve petrolifere determinato dai massicci prelievi dell'ultimo secolo - e di recente anche dal grande sviluppo economico dei paesi asiatici - porterà probabilmente entro brevissimo termine a raggiungere il «Picco di Hubbert», vale a dire il massimo della curva di estrazione, previsto intorno al 2007-2008 (www.aspoitalia.net). Questo sarà seguito da un calo di produzione e verosimilmente da un aumento dei prezzi causato dal divario tra la crescente richiesta dei paesi industrializzati e in via di sviluppo e le minori potenzialità estrattive. La riduzione della disponibilità di combustibili fossili, non solo petrolio ma anche carbone e gas, imporrà in tempi brevi una revisione del modello di sviluppo economico, un abbattimento dei consumi e l'aumento di produzione energetica da fonti rinnovabili (specialmente energia solare e biomassa, nel caso valdostano). Tra i ricercatori che hanno studiato l'esaurimento delle risorse petrolifere mondiali, figura pure il geologo di origine valdostana (Etroubles) KENNETH DEFFEYES, professore emerito all'Università di Princeton (New Jersey), autore del libro «Beyond the oil» (Dopo il petrolio).

Economia di filiera corta

Ogni prodotto trasportato su lunga distanza emette CO₂. E' necessario diffondere l'abitudine di **utilizzare quanto più possibile generi prodotti a breve distanza**, in particolare quelli alimentari, che possono tra l'altro garantire la sopravvivenza dei settori agricoli tipici. Anche in altri comparti commerciali si può fornire un segnale forte, come, ad esempio, nel campo delle **acque minerali da tavola**: non è raro, sulle tavole dei ristoranti valdostani, veder servire bottiglie di acqua che arrivano dalla pianura veneta o addirittura dall'Appennino Centrale! Su un percorso di circa 800 km, ogni bottiglia d'acqua ha un carico di emissione dell'ordine dei 70 g di CO₂. Se, invece, si scegliesse-

ro acque ampiamente disponibili sul mercato locale, che percorrono distanze di poche decine di chilometri, oltre che un beneficio economico, si avrebbe anche una riduzione dell'emissione di gas a effetto serra. Questa potrebbe essere un'occasione per proporre una politica concreta ad elevato valore simbolico, dove le amministrazioni pubbliche potrebbero concertare, insieme con i ristoratori e i distributori, un programma di razionalizzazione dei consumi a basso impatto ambientale. Questo sarebbe solo l'inizio, se si pensa che vi sono paesi ormai molto più avanti, come la Danimarca, che ha vietato l'utilizzo delle latine di alluminio, o la Germania, che scoraggia in tutti i modi l'uso di bottiglie di pla-

stica a perdere, promuovendo il consumo di bottiglie di vetro a rendere.

Turismo sostenibile

Puntare sulla qualità e non sulla quantità può sembrare uno slogan ormai banale, invece per i territori alpini è sempre più un imperativo. La fragilità dell'ecosistema, i nuovi scenari climatici, lo spazio fisico ridotto, rendono fondamentale quantificare delle **soglie massime di carico antropico** — con i relativi rifiuti ed emissioni — da non superare al fine di non compromettere i caratteri di qualità del territorio sui quali si basa la tenuta a lungo termine di tale sistema economico.

Emissione di CO₂ e Protocollo di Kyoto

Il Protocollo di Kyoto è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, e **vincola l'Italia a diminuire del 6.5% il proprio carico emissivo rispetto a quello del 1990** entro il periodo 2008-12; tuttavia, la mancata applicazione di una politica energetica nazionale, ha fatto sì che negli ultimi anni le emissioni non solo non siano diminuite, ma addirittura siano costantemente cresciute (+12% nel 2004 rispetto al 1990, EEA, 2006) al punto che oggi il raggiungimento dell'obiettivo richiederebbe la riduzione di circa il 18%. **Nel 2003 l'Italia emetteva circa 570 milioni di t di CO₂ equivalente, pari a un'emissione pro capite di 9.8 t** (fonte: UNFCCC).

Nonostante la rilevante produzione idroelettrica (attorno a 2800 GWh/anno), la Valle d'Aosta dipende ancora fortemente dai combustibili fossili, e soltanto per il comparto dell'energia elettrica risulta autosufficiente: il consumo regionale complessivo di elettricità nel 2003 è stato di 942.5 GWh (fonte: ISTAT), pari al 33% della produzione idroelettrica CVA del medesimo anno. Ma FRASSY (2006) calcola per l'anno 2000 un consumo lordo regionale — comprensivo di tutti i fabbisogni civili, industriali e di mobilità — pari a 4790 GWh, che porta dunque il carico emissivo **attorno alle 9 t/CO₂ pro-capite**, valore non distante dal carico medio nazionale (9.8 t CO₂ pro-capite). È opportuno rilevare che da un punto di vista dei consumi elettrici relativi per uso domestico, l'utente medio valdostano si colloca comunque in testa alla classifica dei consumi nazionali, con 1528 kWh/anno pro capite (la media italiana è di circa 1100 kWh/anno pro capite), probabilmente anche a causa del rigido clima invernale. Attualmente l'84% dei fabbisogni energetici regionali è coperto dai combustibili fossili; del restante 16% assicurato dalle fonti rinnovabili, soltanto lo 0.0003% deriva dal fotovoltaico, tecnologia che — opportunamente sviluppata — garantirebbe interessanti margini di autonomia dai combustibili fossili e un minore impatto sul clima.

14. BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2002 - *Le climat change. En Suisse aussi. Les points principaux du troisième rapport du GIEC sur l'état des connaissances, du point de vue de la Suisse*. OcCC, Organe consultatif sur les Changements Climatiques. Berne.
- AA.VV., 2003 - *Evénements extrêmes et changements climatiques*. OcCC, Organe consultatif sur les Changements Climatiques. Berne.
- AA.VV., 2003a - *Atlante Climatico della Valle d'Aosta*. SMS, Torino. 416 pp.
- AA.VV., 2004 - *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment*. EEA report 2/2004. European Environment Agency, Copenhagen. www.eea.eu.int.
- AA.VV., 2005 - *ATEAM project - Final report 2004*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- AA.VV., 2006 - *Temperature trends in the lower atmosphere. Steps for understanding and reconciling differences*. U.S. Climate Change Science Program.
- AA.VV., 2006a - *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2000 Years*. Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years, National Research Council. 196 pp.
- ABLER D., SHORTLE J., ROSE A., OLADOSU G., 2000 - *Characterizing regional economic impacts and responses to climate change*. Global and Planetary Change, vol. 25(1-2):67-81.
- APAT, 2006 - *Annuario dei dati ambientali. Estratto edizione 2005-2006*. SISTAN, Sistema Statistico Nazionale.
- ARNELL N., LIU C., 2001 - *Hydrology and water resources*. In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, MCCARTHY J.J., CANZIANI O. F., LEARY N. A., DOKKEN D. J., WHITE K.S. (éd.), 2001. Contribution du Groupe de travail II au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, pp. 191-233.
- AUER I. & al., 2005 - *Histalp - Historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region 1760-2003*. Int. J. of Climatology.
- AUER I., BOEHM R., JURKOVIC A., ORLIK A., POTZMANN R., SCHOENER W., UNGERSBOECK M., BRUNETTI M., NANNI T., MAUGERI M., BRIFFA K., JONES P., EFTHYMIADIS D., MESTRE O., MOISSELIN J-M, BEGERT M., BRAZDIL R., BOCHNICEK O., CEGNAR T., GAJIC-CAPKA M., ZANINOVIC K., MAJSTOROVIC Z., SZALAI S., SZENTIMERY T., MERCALLI L., 2005a. *A new instrumental precipitation dataset for the greater alpine region for the period 1800-2002*. Int. J. of Climatology 25:139-166.
- BARETTI M., 1879 - *Studi geologici nelle Alpi Graie Settentrionali*. R. Acc. Lincei, a. CCLXXVI, 104 pp.
- BENISTON M., DIAZ H.F., BRADLEY R.S., 1997 - *Climatic change at high-elevation sites: an overview*. Climatic Change 36:233-251.
- BENISTON M., 1997 - *Variations of Snow Depth and Duration in the Swiss Alps over the last 50 Years: Links to Changes in Large-scale Climatic Forcings*. Climatic Change, 36:281-300.
- BENISTON M., KELLER F., KOFFI B., GOYETTE S., 2003 - *Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions*. Theor. Appl. Climatol., 76:125-140.
- BENISTON M., 2004 - *Climatic Change and its Impacts. An overview focusing on Switzerland*. Kluwer Academic Press. 287 pp.
- BENISTON M., 2004a - *The 2003 heat wave: a shape of things to come?* Geophysical Research Letter, 31(2), L02202.
- BENISTON M., STEPHENSON D.B., 2004 - *Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions*. Global and planetary change, 44:1-9.
- BENISTON M., DIAZ H.F., 2004 - *The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland*. Global and Planetary Change, 44:73-81.
- BENISTON M., 2005 - *Mountain climates and climatic change: an overview of processes focusing on the European Alps*. Pure Appl. Geophys., 162:1587-1606.
- BÖHM R., AUER I., BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., SCHÖNER W., 2001 - *Regional temperature variability in the European Alps: 1760-1998 from homogenised instrumental time series*. Int. J. of Climatology 21:1779-1901.
- BORROUGHS W., 2003 - *Climate Into the 21st Century*. Cambridge University Press, 240 pp.
- BRIFFA K.R., OSBORN T.J., SCHWEINGRUBER F.H, HARRIS I.C., JONES P.D., SHYATOV S.G., VAGANOV S.G. AND E.A., 2001 - *Low-frequency temperature variations from a northern tree-ring density network*. J. Geophys. Res. 106:2929-2941.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., 2000 - *Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995*. Theor. Appl. Climatol., 65:165-174.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., 2001 - *Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in Northeastern Italy*. Int. J. Climatol. 21: 861-871.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., MONTI F., NANNI T., 2006 - *Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series*. Int. J. Climatol. 26:345-381.
- BURGA, C.A., 1995 - *Végétation et paléoclimatologie de l'Holocène moyen d'une ancienne tourbière située au front di Glacier Rutor, 2510 m (Vallée d'Aoste, Italie)*. Ecologie et Biogéographie alpines - Actes du Colloque 1990, p. 143-149. Revue de Géographie Alpine, 1.

- BÜRKI R., 2000 - *Klimaänderung und Anpassungsprozesse im Wintertourismus*. Publikation der Ostschweizerischen Geographischen Gesellschaft, Neue Folge, Heft 6.
- CARDER K., CHEN R., HAWES S., 2002 - *Instantaneous Photosynthetically Available Radiation and Absorbed Radiation by Phytoplankton*. MODIS Ocean Science Team.
- CARTER T.R., LA ROVERE E.L., JONES R.N., LEEMANS R., MEARNES L.O., NAKICENOVIC N., PITTOCK A.B., SEMENOV S.M., SKEA J. - *Developing and applying scenarios; in Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, MCCARTHY J.J., CANZIANI O.F., LEARY N.A., DOKKEN D.J., WHITE K.S. (éd.), 2001. Contribution du Groupe de travail II au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, pp. 145-190.
- CAT BERRO D., RATTI M., MERCALLI L., LUPOTTO E., 2005 - *Il clima di Vercelli dal 1871*. Ed. Mercurio, Vercelli. 144 pp.
- CESTI G., 1996 - *Parametri meteorologici e incendi boschivi in Valle d'Aosta*. Nimbus 9:13-24.
- CESTI G., 1999 - *Particolarità degli incendi boschivi in Valle d'Aosta durante il 1997*. Nimbus 15-16:21-32.
- CROWLEY, LOWERY, 2000 - *Northern Hemisphere Temperature Reconstruction*. Ambio 29: 51-54. Modified as published in CROWLEY, 2000 - *Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years*. Science 289: 270-277.
- CRUTZEN P., 2005 - *Benvenuti nell'Antropocene!* Mondadori.
- DATEC - DIPARTIMENTO FEDERALE DELL'AMBIENTE, DEI TRASPORTI, DELL'ENERGIA E DELLE COMUNICAZIONI. *Comunicato stampa del 28 dicembre 1999 sui danni recati dall'uragano Lothar*.
- DAVIS B.A.S., BREWER S., STEVENSON A.C., GUIOT J., 2003 - *The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data*. Quaternary Science Reviews 22:1701-1716.
- DEFILA C., CLOT B., 2001 - *Phytophenological trends in Switzerland*. Int. J. of Biometeorology, 45:208-211.
- DIAMOND J., 2005 - *Collasso. Come le società scelgono di vivere o morire*. Einaudi, Torino, 566 pp.
- EEA, 2006 - *Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2004 and inventory report 2006*. EEA technical report n.6/2006.
- ESPER J., COOK E.R., SCHWEINGRUBER F.H., 2002 - *Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability*. Science 295 (5563): 2250-2253.
- FRASSY L., 2006 - *Energia: problema od opportunità?* L'Informatore Agricolo, 2:40-42.
- FREI C., SCHÄR C., 2001 - *Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region*. J. of Climate 14:1568-1584.
- FREI C., 2004 - *Die Klimazukunft der Schweiz - Eine probabilistische projection*. Risultati progetto Prudence.
- FREI C., SCHÖLL R., FUKUTOME S., SCHMIDL J., VIDALE P.L., 2006 - *Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models*. J. of Geophys. Research, Vol. 111, D06105, doi: 10.1029/2005JD005965.
- FREPPAZ M., MARCHELLI M., CAIMI A., ZANINI E., 2005 - *Cambiamenti climatici e innevamento: influenza sulle proprietà chimico-fisiche di un suolo a prato-pascolo*. Poster presentato al Workshop del progetto Climagri «Agricoltura e cambiamento climatico», Ancona, 27-28 giugno 2005.
- GIACOSA G., 1886 - *Novelle e paesi valdostani*. Casanova, Torino.
- GITAY H., BROWN S., EASTERLING W., JALLOW B. - *Ecosystems and their goods and services*, in *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, MCCARTHY J.J., CANZIANI O.F., LEARY N.A., DOKKEN D.J., WHITE K.S. (éd.), 2001. Contribution du Groupe de travail II au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, pp. 735-800.
- GOODSON B. E., LOUIE P. Y. T., YANG D., 1998 - *WMO solid precipitation measurement intercomparison*. WMO/TD 872, Instruments and observing methods, 67. Geneva.
- GREGORY J.M., MITCHELL J.F.B., 1995 - *Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation in the current and 2XCO₂ climates of the UKMO climate model*. Q. J. Royal Met. Soc., 121:1451-1476.
- GUEYMARD C., 1995 - *SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: algorithms and performance assessment*. University of Central Florida.
- GUISAN A., 2006 - *Impact of climate change on biodiversity and ecosystems. With a special focus on terrestrial ecosystems in Europe and particularly on mountain floras*. Presentazione al Congresso FEDRE, Ginevra, 23 gennaio 2006.
- HAHN F., 2004 - *Innevamento artificiale nelle Alpi*. AlpMedia, dicembre 2004. CIPRA
- HANSEN J., NAZARENKO L., RUEDY R., SATO M., WILLIS J., DEL GENIO A., KOCH D., LACIS A., LO K., MENON S., NOVAKOV T., J. PERLWITZ, RUSSELL G., SCHMIDT G.A., TAUSNEV N., 2005 - *Earth's energy imbalance: Confirmation and implications*. Science, 308:1431-1435.
- HENGEVELD H. G., BUSH E., EDWARDS P., 2002 (a cura di) - *Questions fréquemment posée au sujet de la science du changement climatique*. Service météorologique du Canada, Environnement Canada. Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux.
- HOLZHAUSER H., MAGNY M., ZUMBÜHL H. J., 2004 - *Glacier and lake-level variations in west central Europe over the last 3500 years*. The Holocene, 15(6):789-801.
- HORMES A., MULLER B., SCHLÜCHTER C., 2001 - *The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the central Swiss Alps*. The Holocene, 11(3):255-265.
- HUANG S., 2004 - *Merging Information from Different Resources for New Insights into Climate Change in the Past and*

- Future. *Geophys. Res Lett.* 31: L13205. DOI:10.1029/2004GL019781
- HULME M., HENKINS G., 1998 - *Climate Change Scenarios for United Kingdom*. Scientific Report. UK Climate Impact Programme. Technical Report. No. 1.
- IMBODEN M., 1962 - *Die politischen Systeme*. Helbing & Lichtenhahn. Basel.
- IPCC, 2001 - *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Cambridge University Press. 881 pp.
- IPCC, 2001a - *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press. 1032 pp.
- IPCC, 2001b - *Climate Change 2001. Mitigation*. Cambridge University Press. 752 pp.
- ISEBRANDS J.G., McDONALD E.P., KRUGER E., HENDREY G., PERCY K., PREGITZER K., SOBER J., KARNOSKY D.F., 2001 - *Growth responses of Populus tremuloides to interacting elevated carbon dioxide and tropospheric ozone*. *Environmental Pollution*, 115(3), pp. 359.
- KARNOSKY D.F., MANKOVSKA B., PERCY K., DICKSON R.E., PODILA G.K., SOBER J., NOORMETS A., HENDREY G., COLEMAN M.D., KUBISKE M., PREGITZER K.S., ISEBRANDS J.G., 1999 - *Effects of tropospheric O₃ on trembling aspen and interaction with CO₂: Results from an O₃-gradient and a FACE experiment*. *Water, Air and Soil Pollution*, 116(1-2):311-322.
- KELLER F., GOYETTE S., BENISTON M., 2005 - *Sensitivity analysis of snowcover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain*. *Climate Change*, 72:299-319.
- KOIVUSALO H., HEIKINHEIMO M., KARVONEN T., 2001 - *Test of a simple two-layer parameterisation to simulate the energy balance and temperature of a snow pack*. *Theor. Appl. Climatol.* 70.
- IVALDI C., CADUM E., COFFANO E., DEMARIA M., FUBINI L., MAROCCO C., VISENTIN P., VALENZANO C. - *Le misure preventive in caso di temperature elevate. Raccomandazioni per il personale sanitario*. Da: www.ministerosalute.it.
- JONES P.D., BRIFFA K.R., BARNETT T.P., TETT S.F.B., 1998 - *High-resolution Palaeoclimatic Records for the last Millennium: Interpretation, Integration and Comparison with General Circulation Model Control-run Temperatures*. *The Holocene* 8: 455-471.
- JONES P.D., MANN M.E., 2004 - *Climate Over Past Millennia*. *Reviews of Geophysics* 42: RG2002. DOI:10.1029/2003RG000143
- LAMARRE D., 2005 - *Les risques climatiques*. Belin, Paris. 224 pp.
- LAMBIN E., 2004 - *La Terre sur un fil*. Le Pommier, Paris.
- LECKENBUSH G.C., ULBRICH U., 2004 - *On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change*. *Global and Planetary Change* 44:181-193.
- LECKENBUSCH G.C., KOFFI B., ULBRICH U. PINTO J.G., SPANGHELL T., ZACHARIAS S., 2006 - *Analysis of frequency and intensity of winter storm events in Europe on synoptic and regional scales from multi-model perspective*. *Climate Research Special Issue (MICE project)*, in stampa.
- LISTER G., LIVINGSTON D., AMMANN B., ARIZTEGUI D., HAEBERLI W., LOTTER A., OHLENDORF C., PFISTER C., SCHWANDER J., SCHWEINGRUBER F., STAUFFER B., STURM M., 1998 - *Alpine paleoclimatology*. In: CEON P. (eds), 1998 - *Views from the Alps - Regional perspectives on climate change*. The MIT Press.
- LUTERBACHER J., DIETRICH D., XOPLAKI E., GROSJEAN M., WANNER H., 2004 - *European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500*. *Science* 303:1499-1503.
- MANN M.E., BRADLEY R.S., HUGHES M.K., 1999 - *Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations*. *Geophysical Research Letters* 26 (6): 759-762.
- MANN M.E., JONES P.D., 2003 - *Global Surface Temperatures over the Past Two Millennia*. *Geophysical Research Letters* 30 (15): 1820.
- MARINUCCI M. R., GIORGI F., BENISTON M., WILD M., TSCHUCK P., BERNASCONI A., 1995 - *High Resolution Simulations of January and July Climate over the Western Alpine Region with a Nested Regional Modeling System*. *Theor. Appl. Clim.*, 51:119-138.
- MATTHEWS J.A., BRIFFA K.R., 2005: *The «Little Ice Age»: reevaluation of an evolving concept*. *Geogr. Ann.*, 87 A (1):17-36.
- MEEHL G. A., TEBALDI C., 2004 - *More intense, more frequent and longer lasting heat-waves in the 21st century*. *Science*, 305:994-997.
- MERCALLI L., 2000 - *Effetto serra e riscaldamento globale: conoscenze attuali, strategie future*. *Nimbus* 17-18:17-43.
- MERCALLI L., CAT BERRO D., 2005 - *Climi, acque e ghiacciai tra Gran Paradiso e Canavese*. SMS, Bussoleno, 755 + XII pp.
- MÉTÉO FRANCE, CNRS, CEA, 2005 - *Réchauffement climatique : les nouveaux résultats des modèles français*. Conférence de presse. Paris, 2 juin 2005.
- MOBERG A., SONECHKIN D.M., HOLMGREN K., DATSENKO N.M., KARLÉN W., 2005 - *Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data*. *Nature*, 433(7026):613-617.
- MONTERIN U., 1932 - *Le variazioni secolari del clima del Gran San Bernardo: 1818-1931 e le oscillazioni del Ghiacciaio del Lys: 1789-1931*. *Boll. Com. Glac. It.*, 12:59-188.
- MUNICH-RE, 2002 - *Winter storms in Europe (II) - Analysis of 1999 losses and loss potentials*. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München. www.munichre.com.
- MUNICH Re, 2006 - *Annual review: Natural catastrophes 2005*. *Topics Geo*. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft.
- NESJE A., DAHL S.O., 2003 - *The «Little Ice Age» - only temperature?* *The Holocene* 13(1):171-177.
- OLESON K.W., DAI Y., 2004 - *Technical description of the Community Land Model (CLM)*. National Center for

- Atmospheric Research, Boulder, Co.
- OEERLEMANS J.H., 2005 - *Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records*. Science 308: 675-677. DOI:10.1126/science.1107046.
- OROMBELLI G., 1998 - *Le torbe del Rutor: una successione significativa per la storia olocenica dei ghiacciai e del clima nelle Alpi*. Mem. Soc. Geogr. It., 55:153-165
- OSBORN T. J., BRIFFA K.R., 2006 - *The Spatial Extent of 20th-Century Warmth in the Context of the Past 1200 Years*. Science, 311:841-844.
- PAHL-WOSTL C. & al., 1998 - *Regional integrated assessment and the problem of indeterminacy*. In: CEBON P. (eds), 1998 - *Views from the Alps - Regional perspectives on climate change*. The MIT Press.
- PALMER T.N., RÄISÄNER J., 2002 - *Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate*. Nature, 415:512-514.
- PANGALLO E., 2002 - *Le tempeste del dicembre 1999 sull'Europa occidentale: «Lothar» e «Martin»*. Nimbus 25-26:32-37.
- PASINI A. (a cura di), 2006 - *Kyoto e dintorni. I cambiamenti climatici come problema globale*. Franco Angeli.
- PIVODORI M., LINGUA E., FORNERO MONIA M., 2006 - *2003, un anno significativo? Uno studio di dendrocronologia nel Canavese (TO)*. Sherwood. Foreste ed alberi oggi. 121:37-41.
- REBETZ MARTINE, 2004 - *Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3300 m altitudinal range in the Alps*. Climate Research, 27:45-50.
- REGIONE TOSCANA, 2006 - *Cambiamenti climatici e sostenibilità: il problema e le soluzioni in Toscana*. Ibimet, Firenze.
- ROTACH M., WILD M., TSCHUCK P., BENISTON M., MARINUCCI M. R., 1997 - *A Double CO₂ Experiment over the Alpine Region with a Nested GCM-LAM Modeling Approach*. Theor. Appl. Clim. 57:209-227.
- ROUSSEAU D., 2005 - *Analyse fine des surmortalités pendant la canicule 2003*. La Météorologie, 51:16-22.
- SCAFETTA N., WEST B.J., 2006 - *Phenomenological solar contribution to the 1900-2000 global surface warming*. Geophys. Res. Lett., 33, L05708, DOI:10.1029/2005GL025539.
- SCHÄR C., VIDALE P.L., LUTHI D., FREI C., HABERLI C., LINIGER M.A., APPENZELLER C., 2004 - *The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves*. Nature, 427:332-336.
- SCHERRER S.C., APPENZELLER C., LINIGER M.A., SCHÄR C., 2005 - *European temperature distribution changes in observations and climate change scenarios*. Geophys. Res. Lett., 32, L19705, doi:10.1029/2005GL024108.
- SCHORER M., 2000 - *La sécheresse en Suisse*. OcCC, Organe consultatif sur les Changements Climatiques. Berne.
- SECRETARIAT OF THE CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY, 2006 - *Global Biodiversity Outlook 2*. Montreal, 81 + VII pp.
- SERTORIO L., 2002 - *Storia dell'abbondanza*. Bollati Boringhieri.
- SHÄR C., DAVIES T., FREI C., WANNER H., WIDMANN M., WILD M., DAVIES H., 1998 - *Current alpine climate*. In: CEBON P. (eds), 1998 - *Views from the Alps - Regional perspectives on climate change*. The MIT Press.
- SHINDELL D.T., MILLER R. L., SCHMIDT G.A., PANDOLFO L., 1999 - *Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing*. Nature 399, 452 - 455 (03 June 1999); doi: 10.1038/20905.
- SIEGENTHALER U. & al., 2005 - *Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene*. Science, Vol. 310:1313-1317.
- SMIT B., SKINNER M.W., 2002 - *Adaptation options in agriculture to climate change: a typology*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol. 7:85-114.
- SPAHNI R. & al., 2005 - *Atmosphere methane and nitrous oxide of the last Pleistocene from Antarctic ice cores*. Science, Vol. 310:1317-1321.
- TARBOTON D.G., LUCE C.H., 1996 - *Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB)*. Utah Water Research Laboratory, Utah State University and USDA Forest Service Intermountain Research Station.
- THEURILLAT J. P., FELBER F., GEISSLER P., GOBAT J. M., FIERZ M., FISCHLIN A., KÜPFER P., SCHLÜSSEL A., VELLUTI C., ZHAO G. F., WILLIAMS J., 1998 - *Sensitivity of plant and soil ecosystems of the Alps to climate change*. In: CEBON P. (eds), 1998 - *Views from the Alps - Regional perspectives on climate change*. The MIT Press.
- VINCENT C., 2002 - *Influence of climate change over 20th century on four French glacier mass balances*. Journal of geophysical research, vol. 107, d19.4375.
- VISCONTI G., 2005 - *Clima Estremo*. Boroli Editore, Milano.
- WANNER H., RICKLY R., SALVISBERG E., SCHMUTZ C., SCHUEPP M., 1997 - *Global Climate Change and Variability and its Influence on Alpine Climate-Concepts and Observations*. Theor. Appl. Climatology, 58:221-243.
- WARREN F.J., BARROW E., SCHWARTZ R., ANDREY J., MILLS B., RIEDEL D., 2004 - *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques: perspective canadienne*. Gouvernement du Canada.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2000 - *Climate change and human health: impact and adaptation*, 2000. Documento HO/SDE/OEH/004, Genève-Roma, 48 p.
- WWF, 2006 - *Scenari clima per l'Europa: un futuro da «via col vento»*. Comunicato stampa, 2 marzo 2006.
- ZEMP M., HAEBERLI W., HOELZLE M., PAUL F., 2006 - *Alpine glaciers to disappear within decades?* Geophys. Res. Lett., 33, L13504, doi:10.1029/2006GL026319.
- ZUMBÜHL H. J., STEINER D., NUSSBAUMER S.U., 2006 - *19th century glacier perception and fluctuations in the central and western European Alps: an interdisciplinary approach..* Global and Planetary Change (Special Issue). Submitted.

Indice

Presentazione, prefazione, introduzione	III
Sintesi delle criticità	VII
IL CLIMA E I SUOI CAMBIAMENTI	
1. Che cos'è il clima	3
2. La variabilità naturale e quella indotta dalle attività umane	11
3. Il concetto di rischio e di mitigazione	21
4. Lezioni dal passato: clima e uomini delle Alpi	27
5. La previsione del clima futuro	35
CALDO, FREDDO, PIOGGIA, NEVE: COSA È CAMBIATO E COSA CAMBIERÀ	
6. La temperatura	43
7. Le precipitazioni	83
8. La neve	101
9. Altri eventi meteorologici intensi	123
PROGRAMMARE, AGIRE, ADATTARSI	
10. Cosa si fa in Valle d'Aosta	131
11. Cosa fanno gli altri	133
12. Informare localmente: creare consapevolezza, sconfiggere l'allarmismo	137
13. Programmare e agire	139
14. Bibliografia	145