



SOCIETÀ
METEOROLOGICA
SUBALPINA



REGIONE
PIEMONTE

CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA MONTAGNA PIEMONTESE



CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA MONTAGNA PIEMONTESE



Autunno presso il Colle delle Finestre (Valle di Susa) il 03.11.2007. Sullo sfondo, il Rocciamelone.

REGIONE PIEMONTE
ASSESSORATO ALLO SVILUPPO DELLA MONTAGNA E FORESTE,
OPERE PUBBLICHE, DIFESA DEL SUOLO



SOCIETÀ METEOROLOGICA SUBALPINA
Sezione Alpi Occidentali della Società Meteorologica Italiana Onlus



Cambiamenti climatici sulla montagna piemontese

© Copyright 2008

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

Coordinamento scientifico:
LUCA MERCALLI

Redazione: DANIELE CAT BERRO, VALENTINA ACORDON,
GENNARO DI NAPOLI

Revisione grafica e informatica: SOFIA MONTUSCHI

Salvo diversa indicazione, tutte le fotografie sono
di Luca Mercalli e Daniele Cat Berro.

Desideriamo esprimere i nostri ringraziamenti per la
fornitura dei dati meteorologici a:

- IRIDE Energia
- Comunità Montana Valle Ossola
- ENEL - Divisione GEM - Unità Business Cuneo
- Gianni Castagneri - Comune di Balme
- Osservatorio Meteo-sismico di Oropa
- Associazione Sviluppo Culturale e Scientifico nel Cuneese

1. CHE COS'E' IL CLIMA

«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

Il clima terrestre dipende da una complessa rete di interazioni tra fattori quali l'energia solare, gli oceani, l'atmosfera, la biosfera.

Qui sotto, banchi di altocumuli al tramonto del 31.10.2007 a Bussoleno, Valle di Susa.



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: a Cuneo il clima di luglio è solare, piuttosto asciutto e ventilato; mediamente si totalizzano 49 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 fresco e temporalesco (come quello del 1993, che a Cuneo ebbe temperatura media di 20 °C e 69 mm di

precipitazione), magari seguito da un luglio caldo e arido (come quello del 1994, con 24 °C e 28 mm). Ecco dunque introdotti i concetti di **variabilità climatica** e di **estremi climatici**, che verranno trattati meglio nel capitolo 3.

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 (mediamente 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'intensità della radiazione solare è media-

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.

mente pari a 1367 W/m^2 : questo valore è definito *costante solare* (cfr. pag. 4).

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.

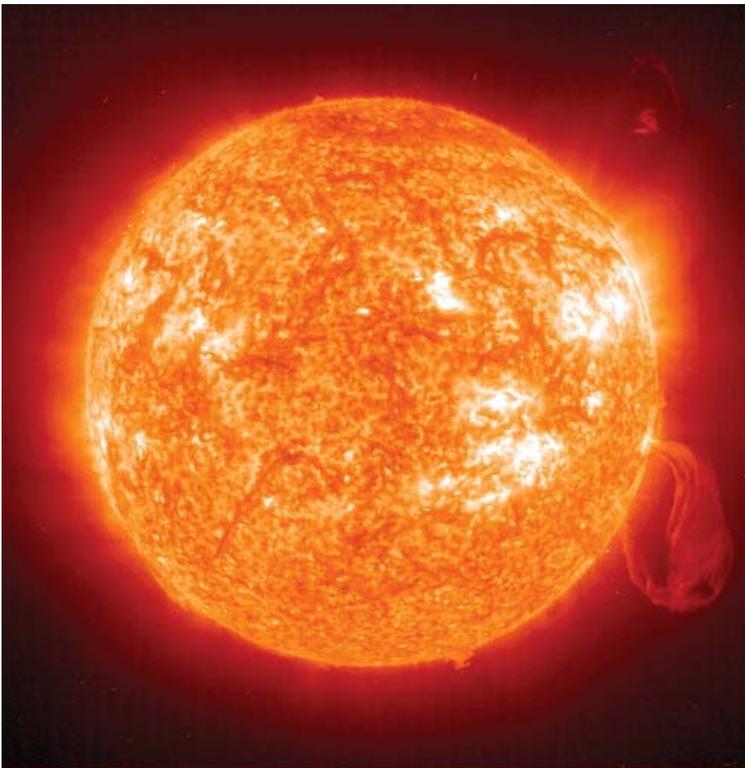
Sono le nubi il principale fattore di controllo dell'albedo terrestre, che globalmente ammonta in media a 0.3: dunque il 30%

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 cambiamenti climatici, in primo luogo un'anoma-

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 $15 \text{ }^\circ\text{C}$.





Il Sole ripreso dalla sonda spaziale SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, <http://sohowww.nascom.nasa.gov>), in orbita a 1.5 milioni di chilometri dalla Terra. A destra è visibile un brillamento, esplosione che genera l'espulsione di materia verso lo spazio, e in grado di scatenare tempeste magnetiche sulla Terra.

lo 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%). Sulle Prealpi del Canavese, ad esempio, ogni anno si totalizza mediamente una radiazione solare globale di circa 4600 MJ/m^2 (MegaJoule per m^2), pari a circa 1277 kWh/m^2 ; il minimo mensile è di circa 150 MJ/m^2 in dicembre ed il massimo è di $590\text{-}660$ in giugno-luglio.

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 km^3 (13.000 volte il volume del Lago Maggiore). Durante i passaggi di stato (evaporazione, condensazione, fusione, solidificazione, sublimazione) che avvengono nell'ambito del ciclo

Mari e 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. Sotto, la costa del Mediterraneo a Ventimiglia, il 01.05.2004.



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

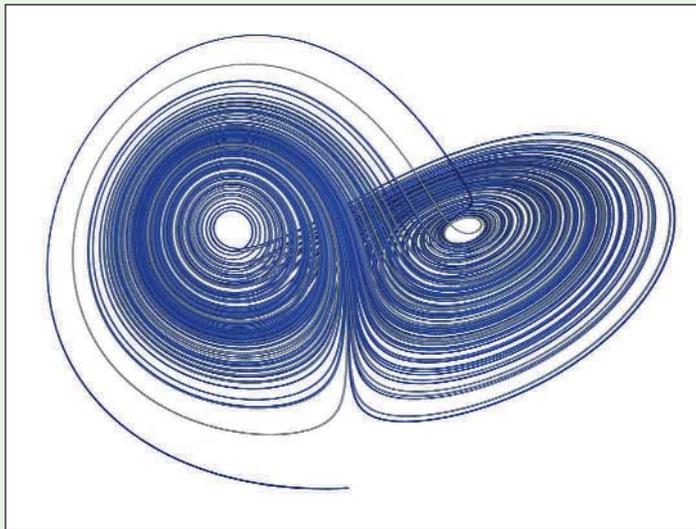
immagazzinamento del carbonio nei tessuti vegetali in crescita. Il taglio di estese porzioni di foresta può portare, specialmente nella fascia equatoriale, a sostanziali alterazioni nei regimi delle piogge, nonché a gravi perdite di suoli per erosione e dilavamento.

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 di diversa 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* enunciato dal meteorologo Edward Lorenz (1917-2008).

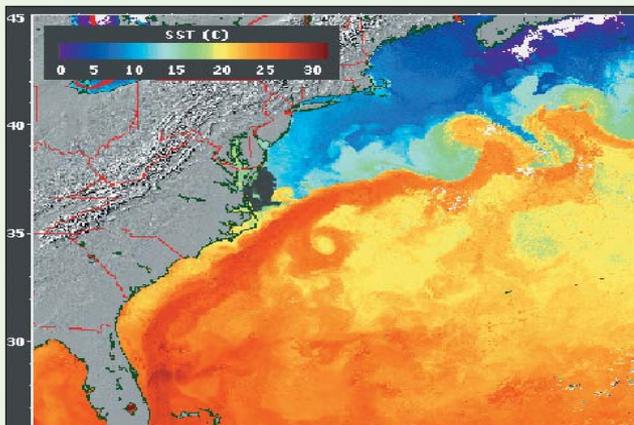
Seguendo LUIGI SERTORIO (2002): «*Complesso include il clima, l'ecosistema, la collettività umana. Qui compaiono il concetto di biforcazione e il concetto di frattale. (...) le equazioni non lineari possono anche ospitare delle biforcazioni, come ad esempio degli scambi di stabilità, il che vuol dire 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?

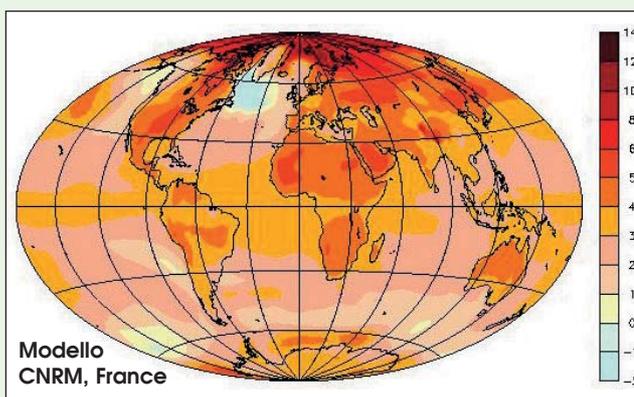
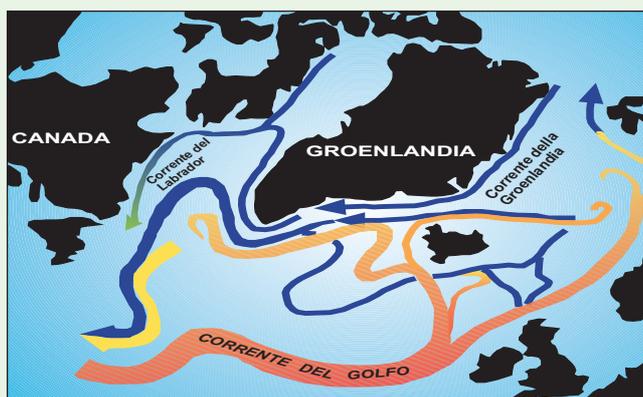
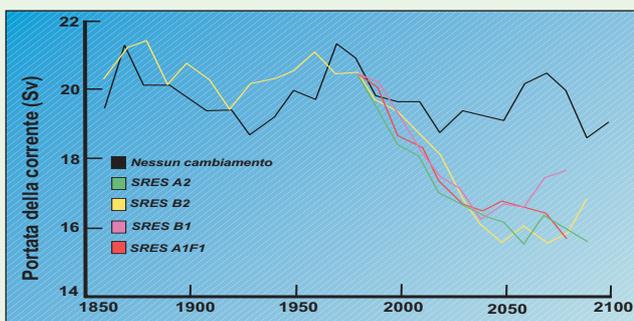
La salinità delle acque del Nord Atlantico gioca un ruolo chiave nel mantenimento della *circolazione termoalina* (pag. 4), di cui la Corrente del Golfo è parte. Questa trasporta acqua calda superficiale dal Golfo del Messico verso l'Europa atlantica, mitigandone gli inverni. L'aumento delle precipitazioni 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.



Sotto a sinistra: schema della Corrente del Golfo. Le acque calde provenienti dal Golfo del Messico (>20 °C) giungono a lambire le coste europee, mentre le fredde correnti della Groenlandia e del Labrador (5-10 °C) discendono lungo le coste dell'Atlantico nord-occidentale. La netta distinzione tra le temperature superficiali del Nord Atlantico è visibile qui sopra (da <http://science.hq.nasa.gov>).

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 m³/s) potrebbe ridursi di circa un quarto rispetto a oggi (fonte: MetOffice).

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. ASPETTI CLIMATICI DELLA MONTAGNA PIEMONTESE

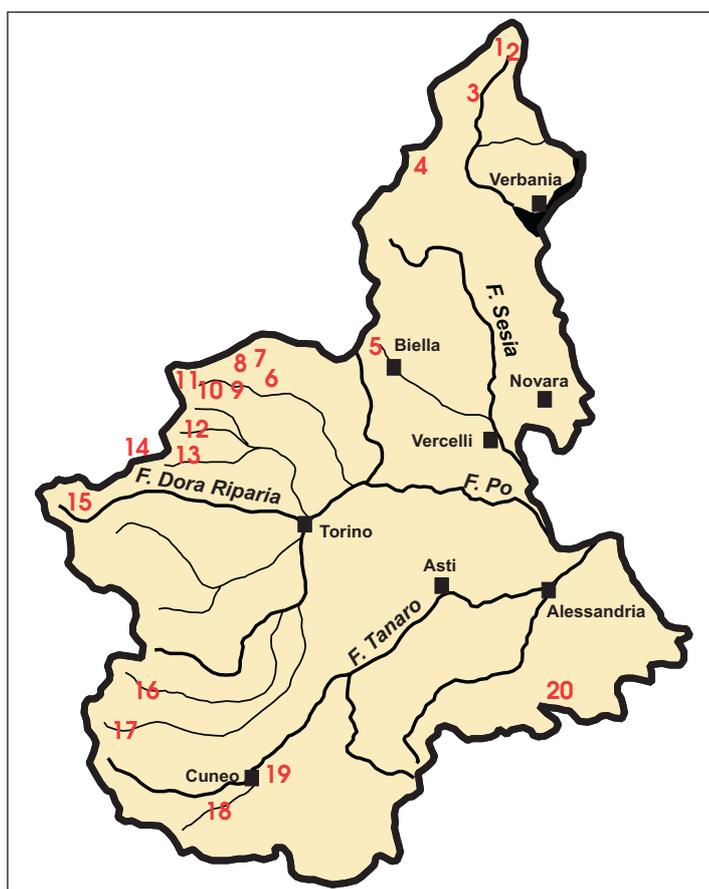
Aspetti geografici del territorio e loro influenza sul clima regionale

L'arco montuoso che cinge il Piemonte su tre lati - Sud, Ovest e Nord - con una superficie complessiva di **13.150 km²** (52% del territorio regionale), determina una grande influenza sullo sviluppo dei fenomeni meteo-climatici di tutta la regione.

I rilievi appenninici al confine con le

Province di Piacenza, Genova e Savona sono relativamente modesti, culminando appena ai 1670 m del Monte Cavalmurone, tuttavia sono ampiamente in grado di arrestare l'influenza mitigatrice del vicino Mar Ligure: ne è testimonianza lo straordinario gradiente di temperatura che - specialmente in inverno - si realizza attraverso questo tratto di Appennino, tra la gelida pianura padana e la mitissima

Elenco e posizione geografica delle stazioni meteorologiche utilizzate per la descrizione del clima della montagna piemontese (dis. V. Acordon).



1. Lago Sabbione (2450 m)
2. Lago Toggia (2200 m)
3. Formazza (1280 m)
4. Lago Alpe Cavalli (1502 m)
5. Santuario di Oropa (1181 m)
6. Lago Eugio (1860 m)
7. Lago Valsoera (2440 m)
8. Lago Teleccio (1917 m)
9. Noasca (1062 m)
10. Ceresole Reale (1579 m)
11. Lago Serrù (2275 m)
12. Balme (1450 m)
13. Lago Malciaussia (1810 m)
14. Lago Moncenisio (2000 m)
15. Lago Rochemolles (1926 m)
16. Lago Castello (1660 m)
17. Lago Saretto (1540 m)
18. Entracque - L. Piastra (900 m)
19. Cuneo (565 m)
20. Ovada (187 m)

riviera ligure. Al contrario, questi rilievi non impediscono l'afflusso di importanti masse di aria umida in arrivo dal Mediterraneo durante gli episodi di vento da Sud (libeccio o scirocco).

Ma l'influenza climatica più importante spetta alle Alpi occidentali, che si ergono più a Ovest oltre il Colle di Cadibona, raggiungendo presto altitudini superiori ai 2500 m in corrispondenza dei massicci del Mongioie (2630 m) e del Marguareis (2651 m). Proseguendo lungo il perimetro regionale, la cresta principale delle Alpi si eleva poi fino ai 3841 m del Monviso, ai 4061 m del Gran Paradiso e ai 4633 della Punta Dufour nel Monte Rosa, per citare

le sommità più rilevanti: una potente barriera orografica che interferisce soprattutto con le vivaci **correnti atlantiche occidentali** e con quelle - più fredde - di provenienza settentrionale. Ragion per cui, se a Torino la temperatura media annua è di circa 13 °C, questa scende già a poco meno di 10 °C a Ginevra, città - appena al di là della catena alpina - più esposta alle discese di aria fredda dall'Artico. In presenza di venti in quota provenienti tra Ovest e Nord, il versante piemontese delle Alpi infatti viene a trovarsi sottovento rispetto alla catena: in queste situazioni solitamente le nubi e le precipitazioni che si sviluppano sul lato francese e svizzero si

La cresta spartiacque tra la Val di Susa e la Savoia vista da Bussoleno, al tramonto di una giornata con regime depressionario e venti umidi da Est (31.10.2007): le precipitazioni sono da poco finite, e sui versanti dei Denti d'Ambin (al centro) persistono residui banchi di nubi stratificate.



In una situazione anticiclonica con debole afflusso di aria umida dalla pianura padana, si formano strati nuvolosi a ridosso delle Alpi occidentali, che tuttavia lasciano al sereno i versanti e le cime più elevate. Qui, al centro, la Rosa dei Banchi (3164 m) in alta Valle Soana (13.10.2007).

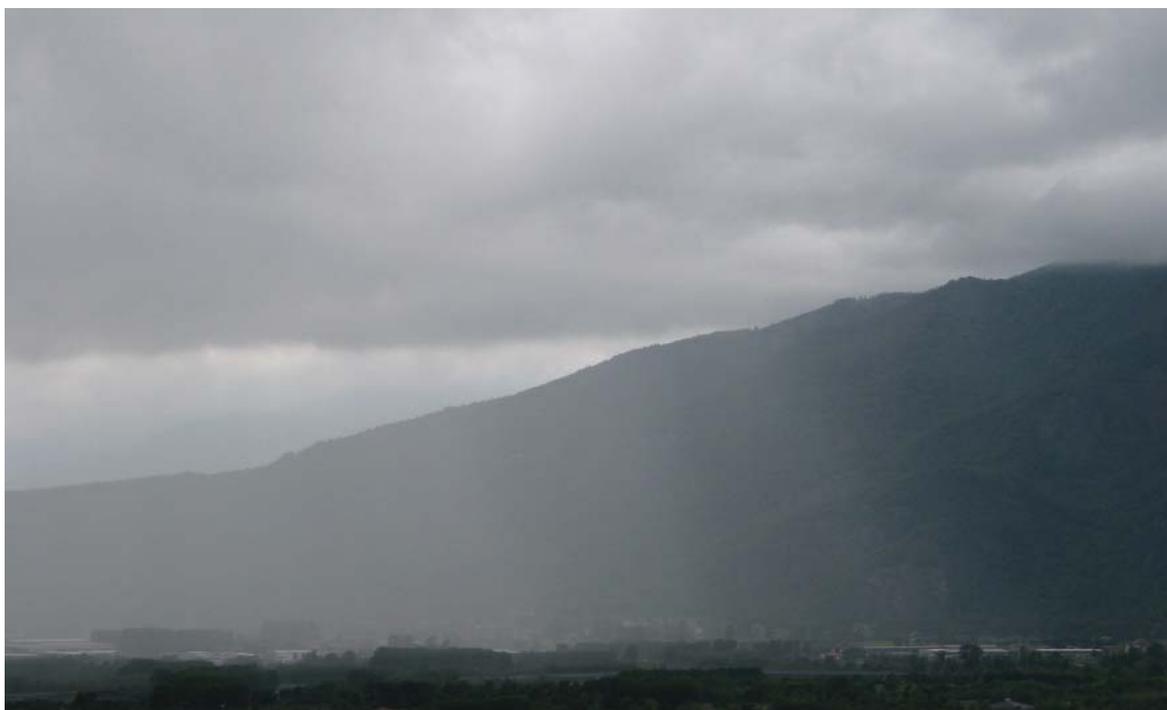


arrestano in prossimità dei confini, lasciando schiarite e tempo asciutto sul lato italiano, dove invece può soffiare il **föhn**, vento secco e talora violento che scende dalla cresta principale delle Alpi verso i fondovalle. Prolungate fasi di predominio dei venti tra Ovest e Nord sono spesso all'origine di siccità in Piemonte tra l'inverno e l'inizio della primavera.

La configurazione orografica del Piemonte lascia invece spazio aperto all'afflusso dei **venti da Est**, che si incanalano lungo la Valpadana per poi trovare uno sbarramento forzato contro le Alpi occidentali. Da Est provengono le fredde correnti orientali che giungono dal cuore del continente eurasiatico, irrompendo attraverso le «porte della bora» del Carso triestino: data la loro origine continentale, il loro contenuto di umidità è relativamen-

te modesto, e talora portano con sé strati nuvolosi bassi sulla pianura e i primi tratti vallivi piemontesi, con associate precipitazioni deboli o moderate che d'inverno possono depositare alcuni centimetri di neve, solo di rado più di 20-30 centimetri. Ma pure da Est si presenta il caldo e umido **scirocco**, che, dopo essersi incanalato lungo l'Adriatico, piega da oriente lungo la pianura padana portando nubi e piogge in abbondanza sul Piemonte: è questa la situazione più favorevole a **precipitazioni intense e prolungate**, esaltate dal sollevamento orografico forzato delle masse d'aria umida lungo i versanti montuosi, specialmente in corrispondenza delle Prealpi, più esposte al flusso di aria marittima carica di vapore. Si tratta di configurazioni legate allo sviluppo di zone di bassa pressione con minimo tra la

Intense precipitazioni sulle Alpi piemontesi il 05.05.2002, qui viste in bassa Valle di Susa. Sul versante sudalpino si è sviluppata una situazione di forte «sbarramento» dei venti umidi provenienti dal Mediterraneo: è la configurazione meteorologica più favorevole ad apporti pluviometrici abbondanti in Piemonte.



Costa Azzurra, la Sardegna e il Mar Ligure, più frequenti in primavera e autunno, non a caso le stagioni più piovose dell'anno in Piemonte.

Nelle settimane centrali dell'estate, invece, tra metà luglio e metà agosto, sono più frequenti le invasioni dell'**anticiclone atlantico delle Azzorre**, oppure di quello - più caldo - **nord-africano**: il tempo è allora in gran parte soleggiato, salvo rapidi passaggi di temporali dovuti allo scorrimento di perturbazioni atlantiche che di tanto in tanto attraversano la regione alpina.

Al fine di delineare le caratteristiche e i regimi dei principali parametri climatici lungo le Alpi piemontesi, si considerano le osservazioni meteorologiche (temperatu-

ra, precipitazioni, innevamento) eseguite nel periodo 1961-2007 presso alcune località significative dei diversi settori geografici e di diverse fasce altitudinali.

Temperatura

Medie annue e regime termico

Sulle Alpi occidentali piemontesi le temperature medie annue decrescono da valori di **11÷12 °C a quota 500 m**, in prossimità della pianura, fino a raggiungere lo **0 °C mediamente a 2300÷2500 m**, secondo un gradiente altitudinale medio di circa **0.6 °C ogni 100 m**, molto vicino al gradiente noto per l'atmosfera standard. Sotto il profilo termico, l'alta montagna conosce un clima analogo a quello che caratterizza le regio-

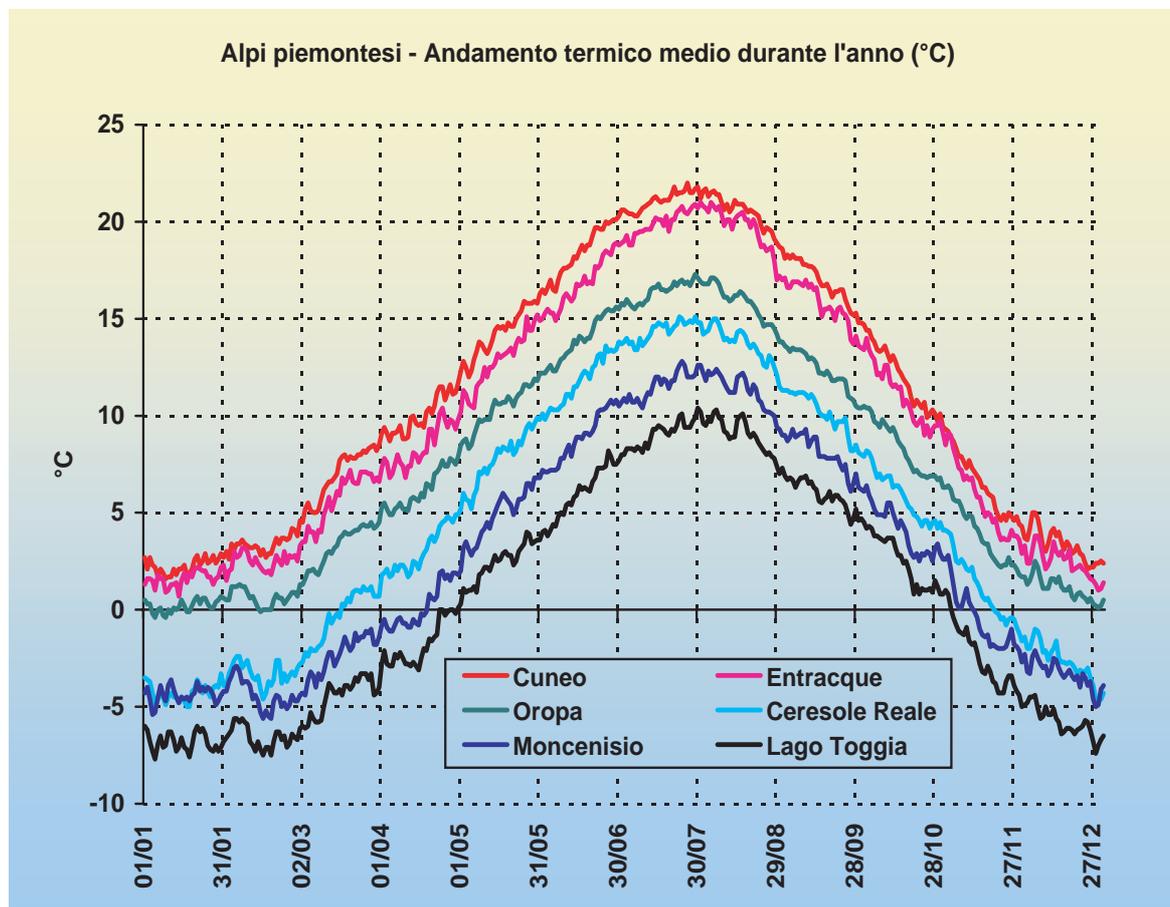
ni artiche o sub-artiche: al livello del mare, in Nord Europa, l'isoterma annuale di 0 °C si colloca grosso modo tra 67° e 70° di latitudine Nord, all'estremo settentrionale della Norvegia continentale e nella Lapponia finlandese.

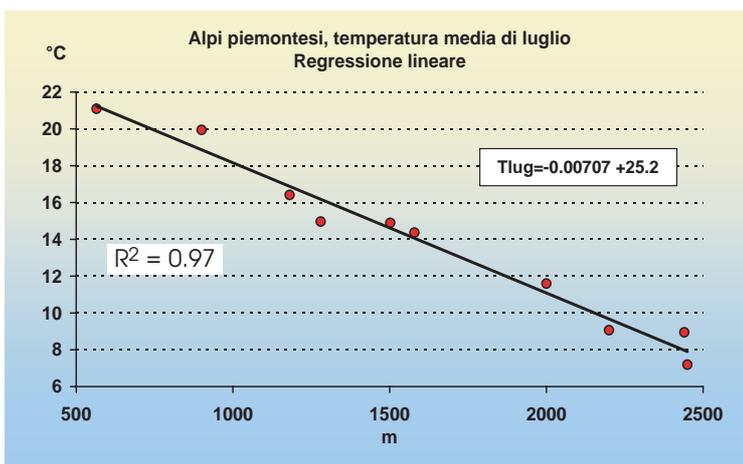
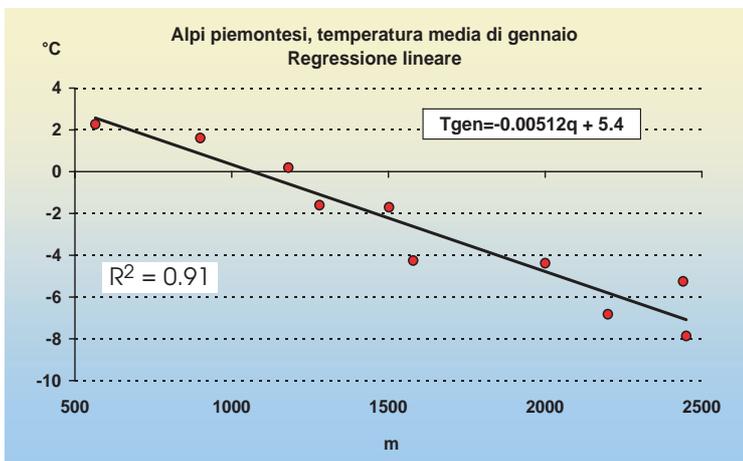
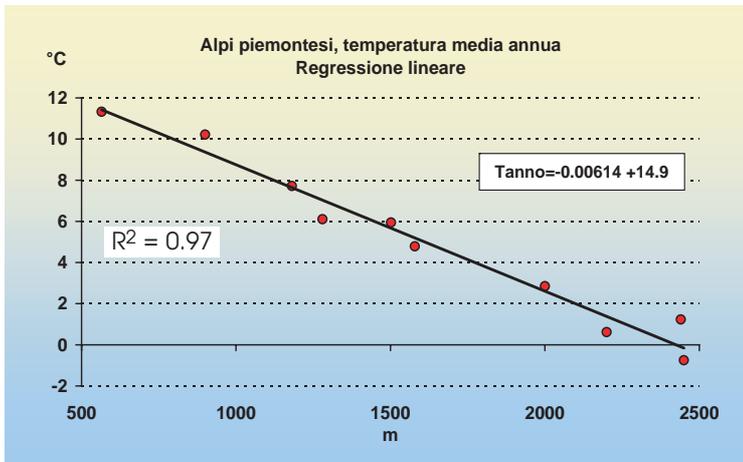
La **Val Formazza** risente di una **maggiore continentalità** rispetto al resto del Piemonte, caratteristica che si evince dal confronto tra le temperature medie annue al Lago Valsoera e al Lago Sabbione, stazioni poste pressoché alla medesima altitudine (2400-2450 m): la prima, sul Gran Paradiso, registra una media di 1.2 °C, la seconda, all'estremità settentrionale della

regione, -0.7 °C, probabilmente in parte anche per l'esposizione più ombreggiata del sito in cui l'impianto idroelettrico si trova.

Pressoché ovunque **il mese più freddo è gennaio**, quando le temperature medie mensili - tra le stazioni qui considerate - variano dai 2.3 °C di Cuneo ai -7.9 °C del Lago Sabbione. L'inverno è la stagione più favorevole alla formazione di persistenti **inversioni termiche** nei bassi strati dell'atmosfera: specialmente durante le fasi di alta pressione, con ventilazione scarsa o assente, l'aria raffreddata all'interno delle valli - più densa e pesante - tende a racco-

Andamento annuale delle temperature medie giornaliere calcolate nel periodo 1961-2007 per diverse località alpine del Piemonte. Il periodo più freddo dell'anno si colloca solitamente attorno alla metà di gennaio, il più caldo negli ultimi giorni di luglio.





Regressioni lineari condotte sui valori di temperatura media annuale e dei mesi di gennaio e luglio rilevati in 10 stazioni alpine piemontesi. L'elaborazione restituisce ottimi coefficienti di correlazione con la quota, specialmente sui valori annui e di luglio ($R^2 = 0.97$), mentre in gennaio - per via delle frequenti inversioni termiche - la correlazione è un po' meno robusta ($R^2 = 0.91$).

I gradienti altitudinali della temperatura media variano da $0.5 \text{ °C} / 100 \text{ m}$ in gennaio a $0.7 \text{ °C} / 100 \text{ m}$ in luglio. Il gradiente medio annuale è di $0.6 \text{ °C} / 100 \text{ m}$, ed è coerente con il valore noto per l'atmosfera standard (circa $0.65 \text{ °C} / 100 \text{ m}$).

gliersi a fondovalle, mentre più in alto sui versanti l'aria è solitamente meno fredda. Un episodio eclatante di inversione termica si sviluppò all'inizio del febbraio 2004: mentre un anomalo afflusso di aria calda veniva spinto verso le Alpi da un anticiclone nord-africano, con isoterma zero vicina a 4000 metri, in pianura e nei fondovalle alpini ristagnava ancora l'aria fredda invernale (fotografia nella pagina seguente); così, all'alba del 4 febbraio, mentre alla centrale idroelettrica di Rosone (715 m, Valle Orco) si misurava 1 °C , il radiosondaggio eseguito all'aeroporto di Cuneo-Levaldigi rilevava una temperatura di 12 °C a 1600 m. Per questo motivo il gradiente termico altitudinale in inverno è mediamente meno marcato, circa 0.5 °C ogni 100 m. Le inversioni termiche solitamente vengono rimosse all'arrivo di una perturbazione sufficientemente intensa da rimescolare l'aria anche a bassa quota.

Il mese più caldo dell'anno è luglio, tuttavia seguito a brevissima distanza da agosto (sovente solo con pochi decimi di grado di differenza). Con il forte surriscaldamento degli strati d'aria più vicini al suolo, e specialmente in prossimità della pianura, il gradiente termico con la quota si intensifica e raggiunge 0.7 °C ogni 100 m. Le temperature medie mensili oscillano dai 21.1 °C di Cuneo ai 7.2 °C del Lago Sabbione.

04.02.2004:
 notte d'inverno sull'altipiano di Mares (1546 m, prealpi Canavesane) con vista sulla pianura illuminata dalle luci cittadine. Sullo sfondo la città di Torino e, in lontananza, il profilo innevato delle Alpi Liguri. In realtà si trattò di una notte insolitamente mite per il mese di febbraio, a causa di un forte anticiclone alimentato da aria calda nord-africana: alle h 00.30, temperatura di 8 °C con vento moderato da Ovest. In pianura, invece, calma di vento e inversione termica, con circa 0 °C. Si noti come le luci artificiali della pianura padana arrivano a illuminare anche i cirrostrati a circa 8-9 mila metri di quota. Anche lo spesso strato di caligine e inquinanti che grava sulla pianura torinese riluce dell'illuminazione cittadina. La luminescenza della neve invece è dovuta alla riflessione della luce del plenilunio.



Estremi termici: -32 °C al Lago Sabbione nel gennaio 1985, 35 °C a Cuneo nell'agosto 2003

In alta quota le temperature più rigide si registrano durante le **irruzioni di aria fredda da Nord o Nord-Est**: in queste situazioni, non è raro osservare valori vicini a -30 °C a 3500 m, e a -20 °C attorno a 2000 m, mentre a fondovalle e sui versanti sottovento più vicini alla pianura, l'effetto-föhn talora contribuisce a smorzare i rigori.

Nella prima decade del **gennaio 1985** si verificò una storica ondata di freddo causata dall'ingente afflusso di aria gelida dalla Siberia: il giorno 6 si misurarono **-32 °C al Lago Sabbione** (2450 m, minimo assoluto dal 1951), il 10 si scese a -30 °C al Lago Serrù (2275 m, anche qui minimo assoluto della serie termometrica dal 1961).

A fondovalle i picchi più bassi si registrano solitamente nelle notti serene che seguono un'irruzione fredda, oppure al cessare del vento. Gli impianti idroelettrici presso cui sono ubicate le stazioni meteorologiche considerate in questo studio occupano conche e fondovalle assai favorevoli al ristagno di aria fredda: ad esempio, Ceresole Reale, a 1579 m in alta Valle Orco, raggiunge di frequente punte inferiori a -20 °C: l'8 gennaio 1985 si arrivò a -25 °C, e così anche l'inverno successivo, il 10 febbraio 1986.

Ai margini della pianura padana, Cuneo registrò un minimo di -16.8 °C l'8 gennaio 1954, pochi giorni dopo una nevicata che totalizzò 97 cm di neve fresca.

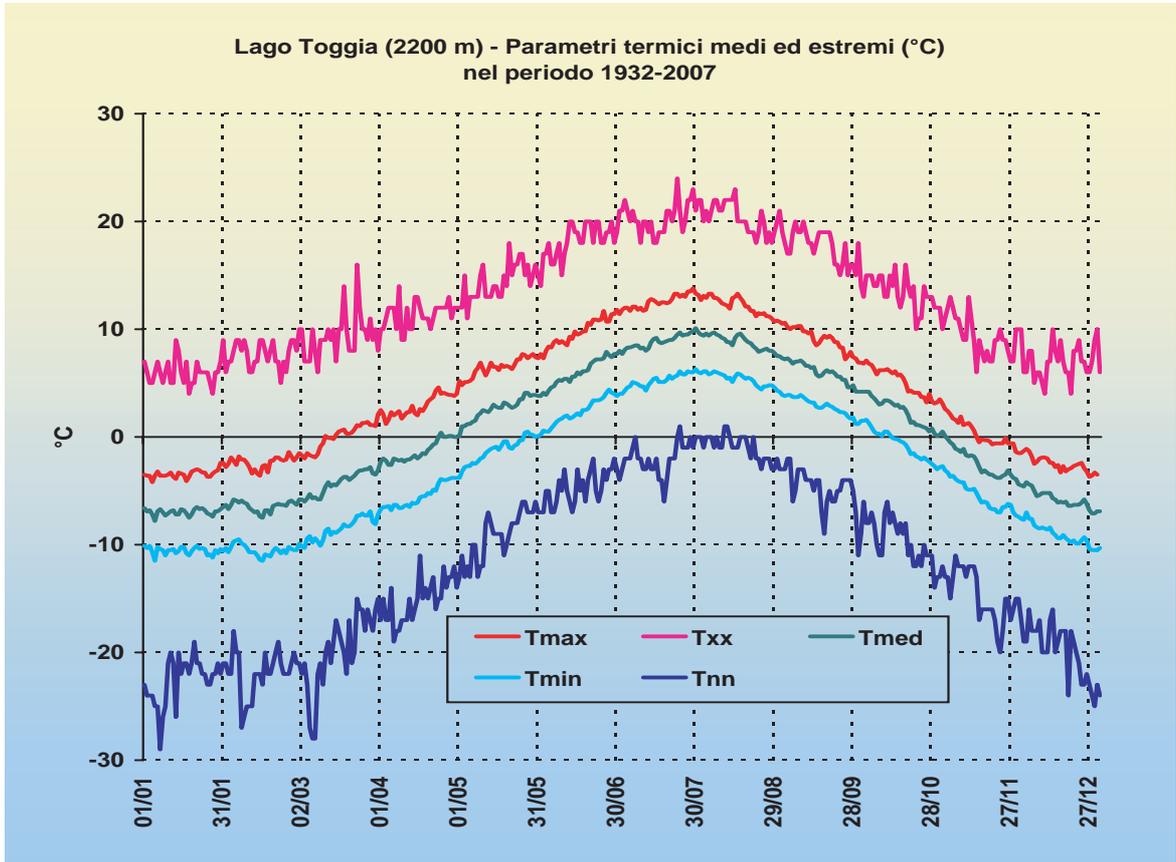
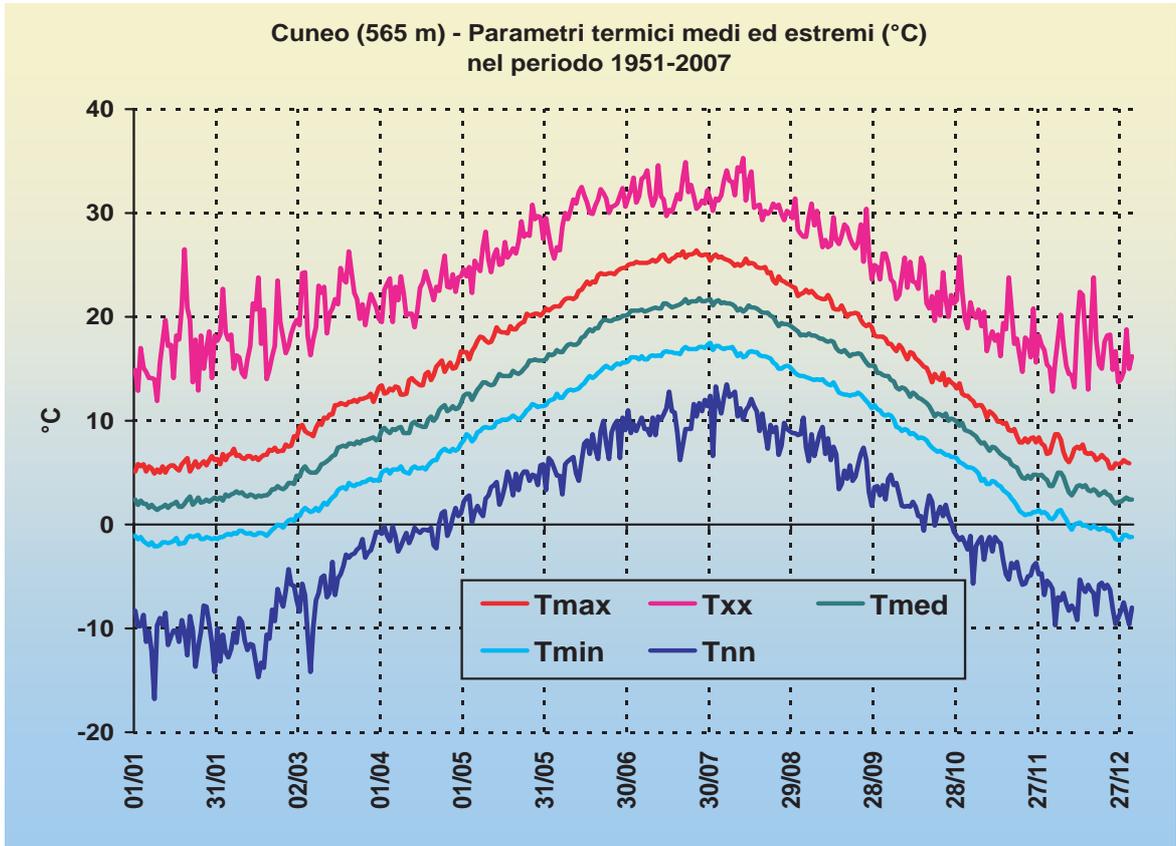
L'ondata di freddo storica che colpì l'Italia

Riepilogo dell'andamento annuale dei parametri termici medi ed estremi a Cuneo (stazione rappresentativa del Piemonte meridionale e della fascia pedemontana e di bassa montagna) e al Lago Toggia (stazione rappresentativa del Piemonte settentrionale e dell'alta montagna).

L'elaborazione è stata estesa a tutta la serie omogenea disponibile (dal 1951 a Cuneo, dal 1932 al Lago Toggia), al fine di rendere più efficace l'analisi dei valori estremi.

Le due stazioni hanno rilevato minimi assoluti rispettivamente di $-16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (8 gennaio 1954) e $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ il 7 gennaio 1985, e massimi di $35.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (11 agosto 2003) e $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (23 luglio 1983).

LEGENDA:
 Tmin: media della temperatura minima
 Tmax: media della temperatura massima
 Tmed: media della temperatura media
 Tnn: temperatura estrema minima
 Txx: temperatura estrema massima.



due anni dopo, nel **febbraio 1956**, fece registrare minimi fino a **-26 °C sulla pianura intorno a Carmagnola** (il valore più basso noto per la pianura piemontese), mentre più in quota lungo le Alpi occidentali non vennero registrati minimi record (punte di -14.7 °C a Cuneo, -21 °C a Ceresole Reale, -24 °C al Moncenisio, -29 °C al Lago Sabbione).

Ma è il caso di segnalare anche i **-41 °C** misurati nell'inverno 1928-29 (probabilmente durante il gelido **febbraio 1929**) dagli strumenti registratori lasciati alla **Capanna Regina Margherita**, a 4554 sul Monte Rosa: si tratta del più basso valore termico finora rilevato da una stazione di superficie in Italia.

Per quanto riguarda i **massimi**, molte le stazioni hanno registrato i valori estremi

più elevati nel mese di **agosto 2003**, al culmine dell'estate più calda mai osservata nelle lunghe serie climatiche ultrasecolari in Europa: in particolare, il giorno 11 agosto si sono registrati **35.3 °C a Cuneo** (massimo dal 1951), 29 °C a Ceresole Reale il 12, 23 °C al Lago Toggia il 14 agosto.

Un'altra ondata di calore estremo si sviluppò a fine **luglio 1983** quando si rilevarono 34.9 °C a Cuneo (valore in seconda posizione tra i più elevati dal 1951, dopo l'episodio del 2003) e 24 °C al Lago Toggia (massimo assoluto dal 1935). Si tratta in tutti i casi di situazioni caratterizzate dalla presenza di un forte area di alta pressione di matrice nord-africana, ben strutturata a tutte le quote, all'interno della quale i lenti moti discendenti dell'aria contribuiscono al suo surriscaldamento.

Uno spesso strato di galaverna ricopre la vegetazione a Ceresole Reale (alta Valle Orco) il 30.12.1996, a seguito di una fase di nebbia con forte gelo per correnti siberiane. La temperatura minima della giornata è scesa a -24 °C, e la massima non è salita oltre i -16 °C.



Durante l'inverno, temperature eccezionalmente elevate si possono osservare con l'arrivo del **föhn**, specialmente quando le Alpi sono raggiunte da aria già in origine temperata, e viene ulteriormente surriscaldata nella discesa lungo il lato sottovento della catena: negli ultimi 20 anni, si ricordano in particolare gli episodi di vento violento e temperature quasi estive del **15 febbraio 1990 (23.8 °C a Cuneo)** e del **19 gennaio 2007** (sempre a Cuneo, **26.5 °C**, massimo assoluto per il trimestre dicembre-febbraio dal 1951). Quest'ultimo evento si è inserito nell'inverno più caldo mai registrato sull'Europa centrale e la regione alpina.

Violento scroscio di pioggia nei pressi di Forno di Coazze (Val Sangone) il 25.05.2002. La fascia prealpina dal Monviso al Lago Maggiore riceve le quantità di precipitazioni più importanti in Piemonte, anche superiori a 2000 mm/anno tra Biellese e Verbano.

Precipitazioni

Quantità annuali (pioggia e neve fusa)

Come illustrato nella carta delle isoiete (linee che uniscono punti con uguale pre-

cipitazione) di pag. 19, in Piemonte i **valori più bassi** di precipitazione sono collocati nelle aree di pianura sul fianco settentrionale dei rilievi appenninici, e in particolare **tra la pianura alessandrina e il Monferrato**, dove mediamente si arriva appena a **650-700 mm (l/m²)** all'anno. L'isoieta dei 1000 mm segue con buona approssimazione il limite tra la pianura e la montagna nel Piemonte occidentale e meridionale (tra Cuneese e Torinese), mentre nel Piemonte settentrionale (Biellese e alto Novarese) l'isolinea comprende anche le aree pedemontane.

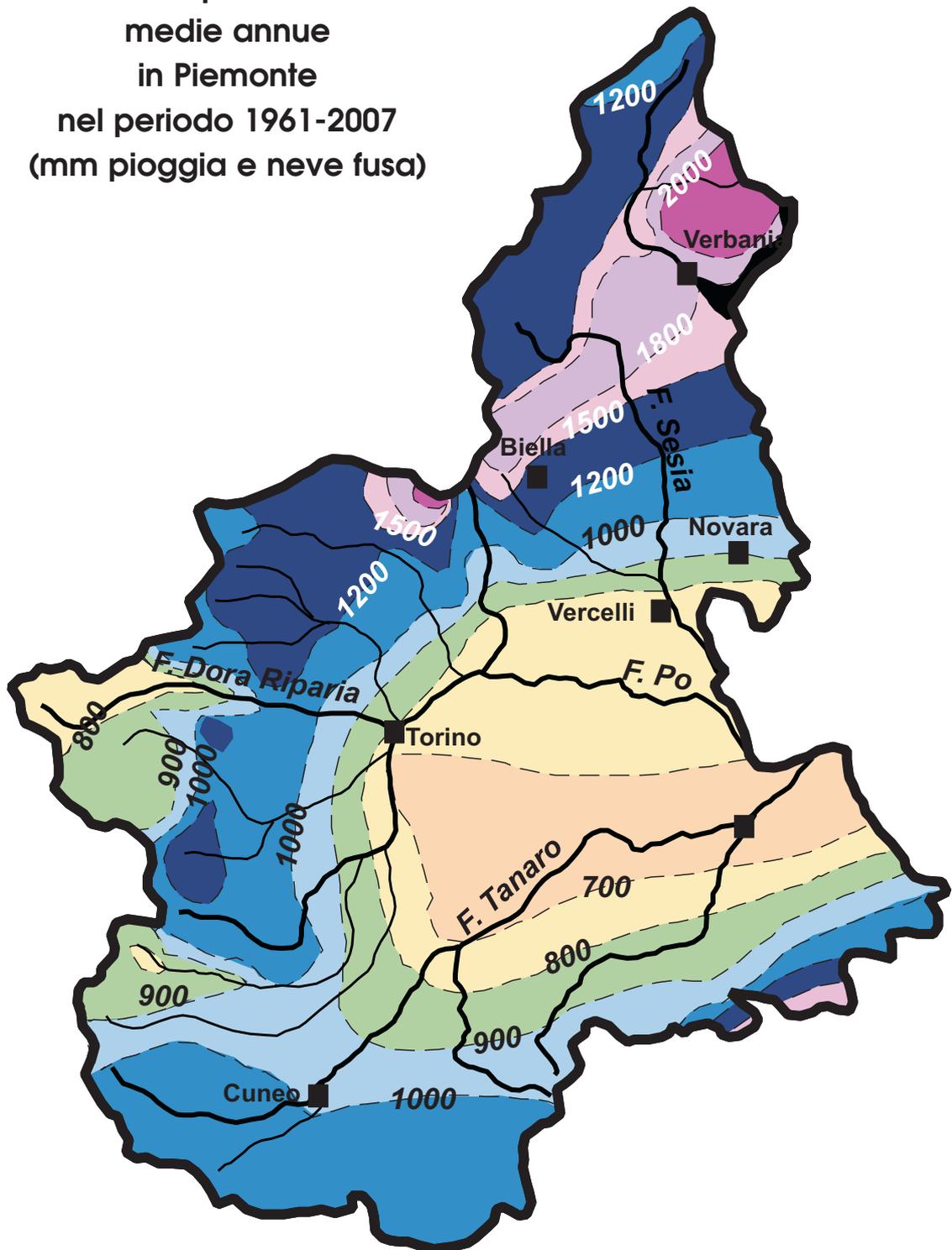
La zona di maggiore piovosità si localizza lungo i **rilievi alpini che vanno dalla Valchiusella, al Biellese, al Sesia-Verbano**, dove numerose stazioni superano i **2000 mm** (la carta delle isoiete pubblicata dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, sulla base dei dati pluviometrici 1921-50, indica perfino un massimo superiore a 3000 mm attorno al Monte Zeda, tra Val Grande e Val Vigizzo). Tra i centri abitati, Falmenta, a quota 662 m in Valle Cannobina risulta quello più piovoso in Piemonte, con una media di ben 2706 mm nel periodo 1921-50, tre volte tanto la quantità rilevata a Torino: ma oggi in questo sito il pluviometro non è più attivo. Su questi primi versanti montuosi affacciati sulla pianura padana le umide correnti mediterranee - provenienti tra Sud e Sud-



Carta delle isoiete annuali (pioggia e neve fusa in mm) in Piemonte, medie del periodo 1961-2007. Dai valori inferiori a 700 mm del Monferrato e dell' Alessandrino si giunge agli oltre 2000 mm dei rilievi presso il Lago Maggiore.

Si notino anche le aree intralpine a minore piovosità, come l'alta Val di Susa e l'alta Val Varaita: quest'ultima è probabilmente dovuta alla forte azione di sbarramento esercitata dalla mole del Monviso sui flussi di aria umida provenienti dalla pianura padana.

Precipitazioni medie annue in Piemonte nel periodo 1961-2007 (mm pioggia e neve fusa)



Est - trovano il massimo **sbarramento orografico** offerto dalla catena alpina, che impone la risalita dell'aria e la rapida condensazione del vapore contenuto in nubi e precipitazioni. Un **secondo massimo** si risconta anche nel **Monregalese**, tra le basse valli Tanaro e Gesso, nonché sul **crinale appenninico al confine con la Liguria**, dove si tornano a sfiorare i **1500 mm** annui.

Invece, procedendo verso l'interno delle valli alpine le precipitazioni riprendono a decrescere per l'effetto di «**ombra pluviometrica**» esercitato dai rilievi circostanti. Ad esempio, l'imbocco della Val di Susa

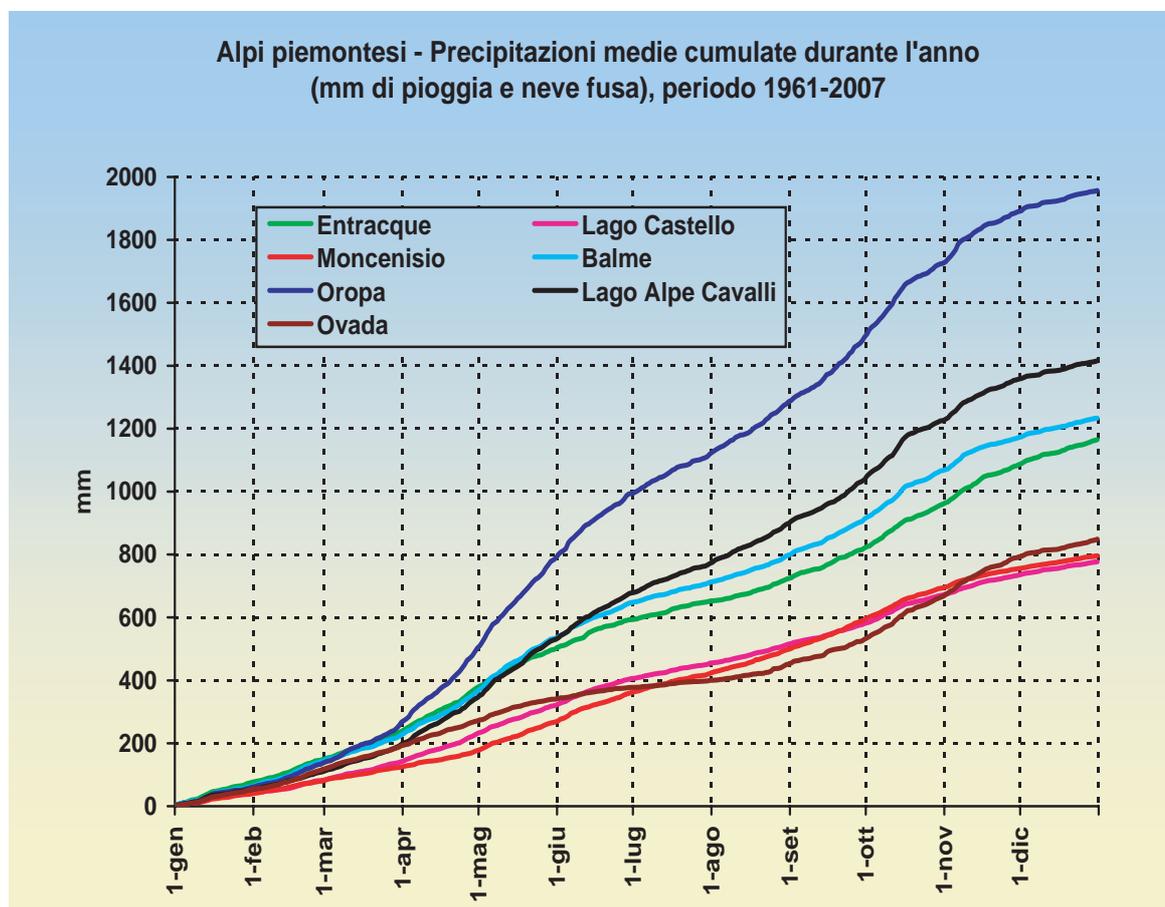
conosce apporti attorno a 1000 mm, ma già oltre Susa si scende sotto i 700 mm.

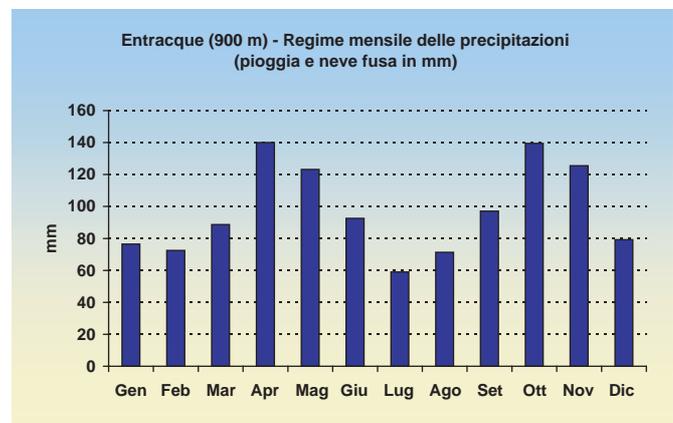
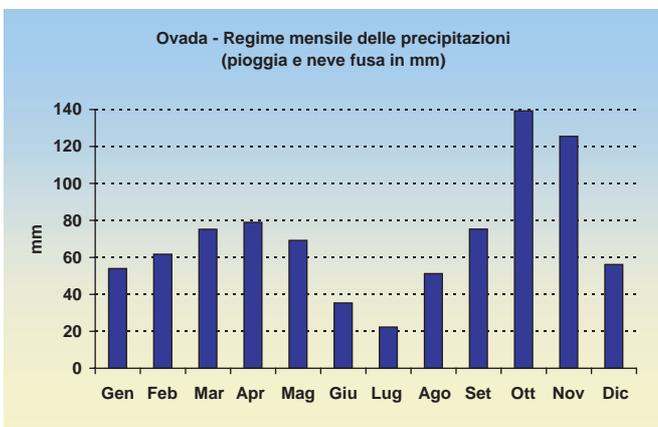
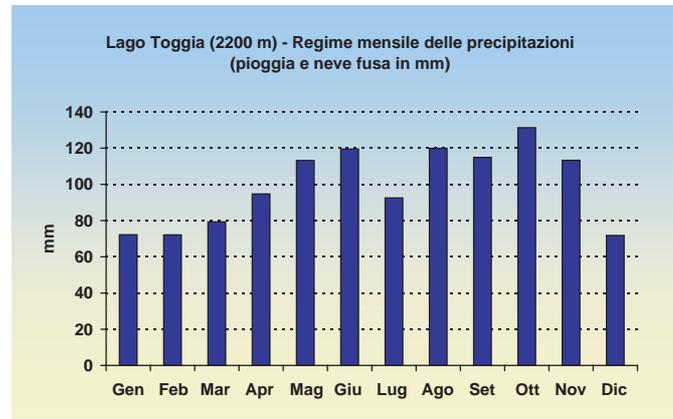
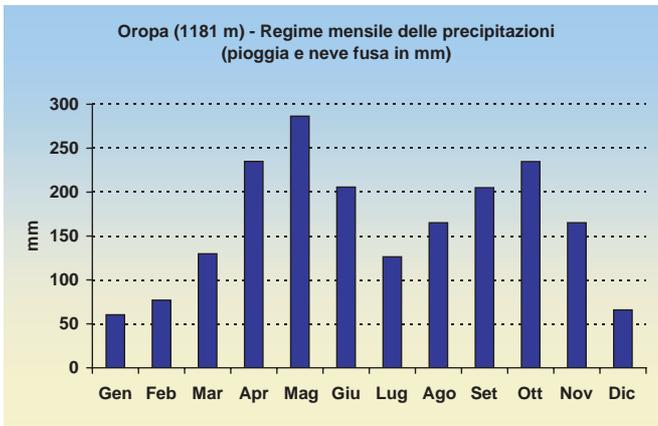
Regimi pluviometrici

La distribuzione annuale delle precipitazioni sulla montagna piemontese (come pure sui settori di pianura e collina) presenta ovunque un andamento bimodale, vale a dire con **due massimi (uno primaverile e uno autunnale) e due minimi (uno invernale e uno estivo)**. In base alla collocazione di questi durante l'anno, e in accordo con le definizioni riportate da MENNELLA (1973), si possono distinguere i seguenti tipi di regime pluviometrico: -

Curve delle precipitazioni medie giornaliere cumulate in alcune località rappresentative della montagna piemontese.

Spicca la forte piovosità di Oropa, che arriva a sfiorare i 2000 mm di totale annuo, in contrasto con i circa 800 mm di Moncenisio e Lago Castello, più interni alla catena alpina, e di Ovada, località appenninica più soggetta a siccità estive.





Sulle montagne piemontesi, pur osservando ovunque un regime pluviometrico a due massimi e due minimi, si riscontrano alcune differenze non trascurabili nell'andamento delle precipitazioni. Al Lago Toggia si manifestano gli effetti dell'influenza continentale, che rende l'estate relativamente piovosa, mentre, procedendo verso Sud, il mese di luglio al contrario diviene via via più secco, fino a superare il minimo di gennaio a Entracque e Ovada.

Sublitoraneo occidentale (Oropa): massimo primaverile nettamente prevalente su quello autunnale, e minimo invernale molto più spiccato di quello estivo. Caratterizza la maggior parte dell'arco alpino occidentale, specialmente le zone prealpine torinesi e biellesi. Maggio è il mese più piovoso, gennaio o febbraio sono i mesi più asciutti.

- **Sublitoraneo alpino** (Formazza - Lago Toggia): il massimo autunnale prevale su quello primaverile, il minimo invernale è nettamente inferiore a quello estivo, tanto che la media dell'estate supera in varie zone quella della primavera. Quest'ultima caratteristica è sintomo di

un'influenza continentale sul clima dell'alta Val Formazza.

- **Sub-litoraneo appenninico** (Ovada): il massimo autunnale prevale su quello primaverile; il minimo principale è estivo (caratteristica tipica del vicino Mediterraneo, che qui estende la sua influenza climatica un po' oltre il crinale appenninico). Si estende sul versante padano dell'Appennino ligure fino alle Langhe e al Monferrato. Luglio è il mese più secco, ottobre-novembre i più piovosi.

Inoltre, l'influenza mediterranea sulla piovosità estiva è da rilevare anche nelle valli cuneesi più meridionali, come a

Entracque, dove luglio è più asciutto di gennaio e febbraio, mentre gli apporti primaverili e autunnali sono pressoché equivalenti.

Complessivamente, le precipitazioni primaverili sono le più importanti sulla gran parte del territorio della montagna piemontese, e mettono a disposizione della vegetazione l'apporto idrico indispensabile per lo sviluppo ed il superamento dei più asciutti mesi estivi, specialmente nelle valli meridionali; ciò vale in particolare nei suoli con una ridotta capacità di immagazzinare l'acqua.

Accumuli di grandine a seguito di un violento temporale notturno, il 10.05.2002 ad Almese (bassa Valle di Susa).

Numero di giorni piovosi e frequenza delle precipitazioni

Gli apporti pluviometrici descritti sopra si distribuiscono in un **numero annuo di gior-**

ni con precipitazione generalmente crescente da Sud verso Nord lungo le Alpi piemontesi e dai fondovalle verso le creste. In questo conteggio vengono considerati i giorni che abbiano accumulato al pluviometro almeno 1 mm di precipitazione (pioggia o neve fusa). Considerando il periodo 1961-2007, nel Cuneese si passa dai 68 giorni/anno di Cuneo agli 86 di Entracque-Lago Piastra e agli 89 del Lago Castello. A Nord del Monviso si superano diffusamente i 100 giorni/anno, specialmente oltre i 1500 m di altitudine e in Val Formazza: 89 giorni a Balme, 96 al Moncenisio, 99 a Ceresole Reale, 104 a Oropa, 105 al Lago Rochemolles, 113 a Formazza e ben 126 al Lago Sabbione. Sull'Appennino, Ovada conta invece solo 67 giorni di precipitazione all'anno, ma talora con alcuni nubifragi autunnali di forte intensità provenienti dal versante ligure.

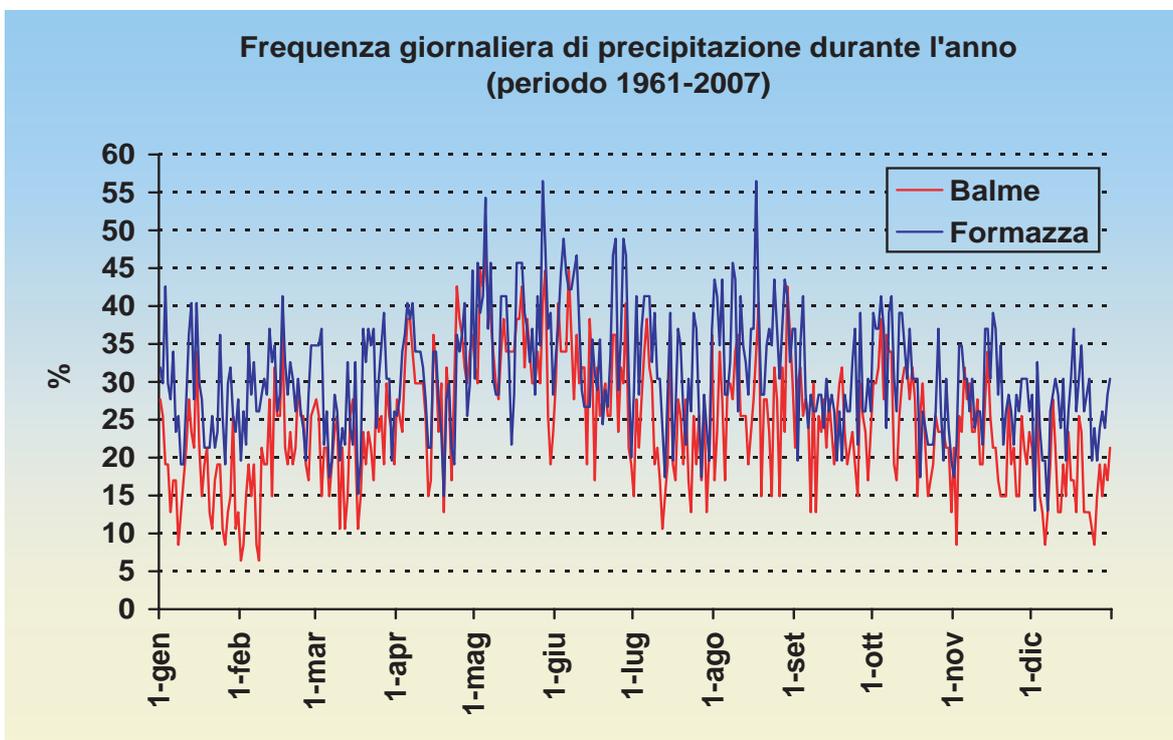
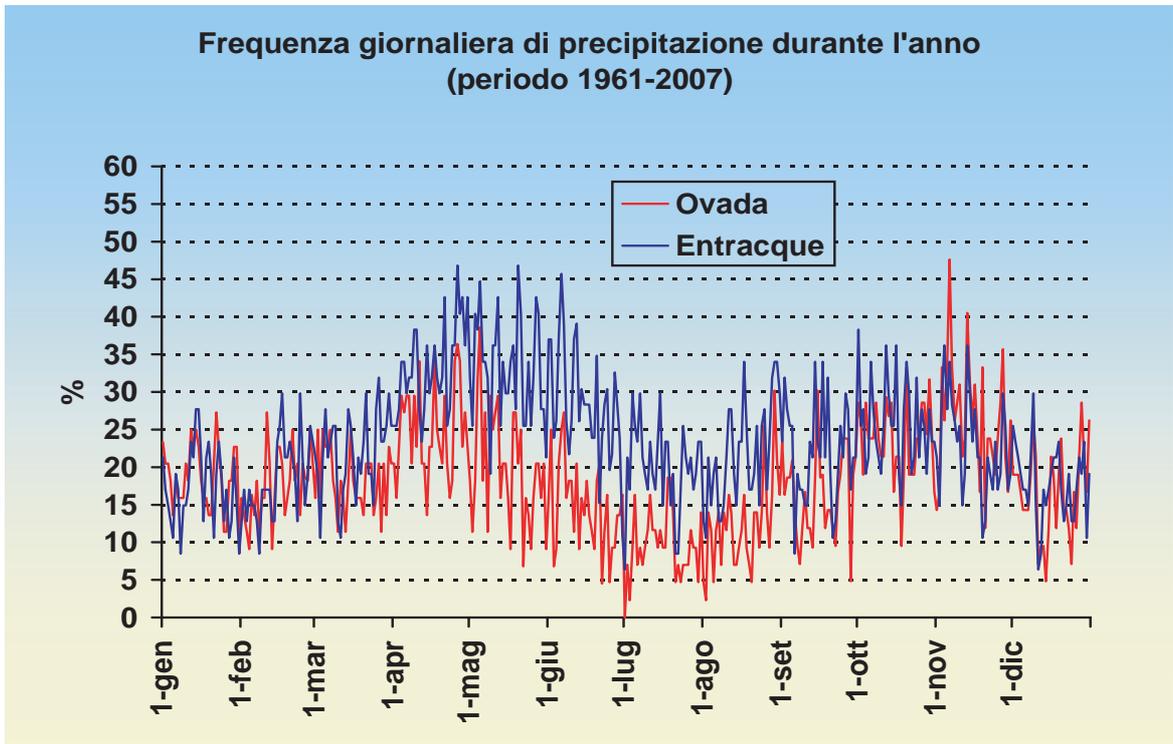
Dalle lunghe serie pluviometriche è possibile calcolare la **frequenza giornaliera di precipitazione**, il cui andamento nelle località di Ovada, Entracque, Balme e Formazza è riassunto nei grafici a pag. 23 (periodo comune 1961-2007).

Le curve rispecchiano il comportamento del regime pluviometrico già illustrato: minimi di frequenza in inverno ed estate, massimi in primavera e autunno. Tuttavia, confrontando la situazione nelle quattro



Frequenza percentuale giornaliera di osservazione di eventi piovosi a Ovada ed Entracque. Sulle Alpi Marittime prevalgono gli episodi primaverili (a Entracque il massimo annuale spetta al 26 aprile e al 20 maggio, giorni che hanno registrato pioggia nel 47% degli anni dal 1961 al 2007), sul tratto appenninico quelli autunnali (a Ovada il 6 novembre è il giorno in media più frequentemente piovoso, nel 48% degli anni), mentre l'estate è piuttosto asciutta (il 1° luglio non è mai piovuto nei 47 anni considerati).

A Balme e Formazza gli andamenti sono simili, ma con precipitazioni invernali più rare in Val di Lanzo ed estive più frequenti nell'Ossola. A Formazza il giorno 17 agosto è stato piovoso nel 57% degli anni, vale a dire più di un anno su due.



località scelte, si nota una maggiore stagionalità delle frequenze sul settore meridionale del Piemonte, con una netta prevalenza degli episodi piovosi autunnali a

Ovada (il 6 novembre - giorno più frequentemente piovoso - ha registrato precipitazioni nel 48% degli anni). Invece sul settore centro-settentrionale della regio-

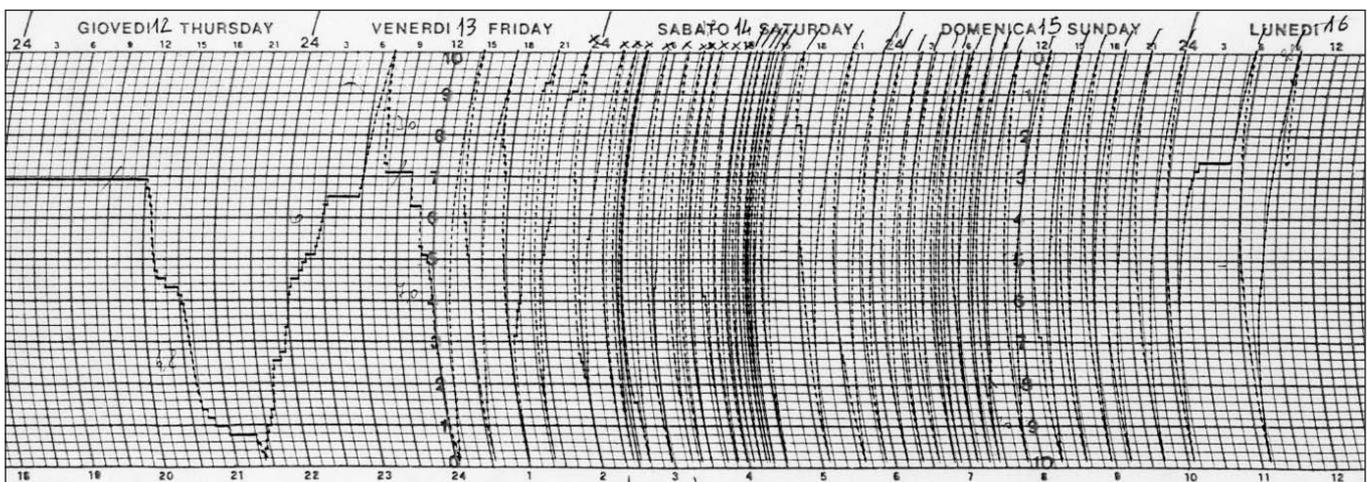
ne (Balme e Formazza) si osserva un andamento più costante, specialmente in Val d'Ossola, dove anche i giorni centrali dell'estate sono frequentemente piovosi (a Formazza il 15 agosto è stato piovoso nel 37% dei casi).

Precipitazioni massime

Pluviogramma tracciato dal pluviografo AEM di Rosone (Valle Orco), relativo alle eccezionali precipitazioni del 12-16 ottobre 2000: il giorno 14 si sono rilevati apporti fino a 60 mm in 1 ora, 130 mm in 3 ore, 194 mm in 6 ore e 307 mm in 12, mentre dalle h 00 alle h 24 lo strumento ha rilevato 414 mm. Il totale dell'evento (7 giorni), pari a 864 mm, è uno dei più abbondanti mai rilevati sulle Alpi.

Giornaliere: le quantità massime di precipitazione note in un giorno si distribuiscono con una certa irregolarità sul territorio per l'effetto di nubifragi localizzati, ma tendenzialmente crescono avvicinandosi dalla pianura alle Alpi. **Vaste aree montuose del Piemonte**, specialmente lungo i tratti prealpini, negli ultimi 80 anni **hanno conosciuto almeno un episodio con precipitazione giornaliera superiore a 200 mm, talora 400 mm tra le Valli di Lanzo e il Gran Paradiso:** è il caso di una località come **Rosone**, che ha ricevuto **414 mm** di pioggia in 24 ore il 14 ottobre 2000 (massimo osservato durante l'alluvione che

colpì le Alpi occidentali), oppure di **Funghera**, nelle basse Valli di Lanzo, il cui pluviometro ha rilevato **455 mm** il 5 novembre 1994. Quantità così elevate sono quasi sempre osservate nei mesi tra settembre e novembre, o - secondariamente - a fine primavera. Altre zone più interne alla catena montuosa, come l'alta Valle di Susa, oppure l'alta Val Varaita, sono assai meno soggette a rilevare apporti giornalieri imponenti: al Lago Rochemolles (Bardonecchia) non è mai piovuto più dei 119 mm del 15 ottobre 2000, quantomeno dall'inizio delle misure nel 1925. Ciò non significa assolutamente che queste ultime valli risentano meno di episodi alluvionali: ogni bacino idrografico mostra infatti una **risposta dei deflussi** commisurata alla sua propria morfologia e piovosità, e dunque possiede **soglie di criticità** che possono essere molto diverse quelle dei bacini attigui. Se per attivare una piena importante nel bacino del



Effetti della disastrosa piena del T. Piantonetto a Rosone (Valle Orco), 14 ottobre 2000. La SS 460 è stata completamente asportata e il detrito ha invaso completamente il pian terreno delle abitazioni e delle officine AEM.



Sesia (molto piovoso) sono necessarie solitamente estese precipitazioni superiori a 150-200 mm in un giorno, la Dora Riparia (il cui bacino ha una piovosità media assai minore) è in grado di esondare anche con apporti giornalieri dell'ordine dei 50-100 mm, in particolari situazioni di persistenza delle piogge e fusione nivale in quota, come peraltro accaduto recentemente il 29 maggio 2008.

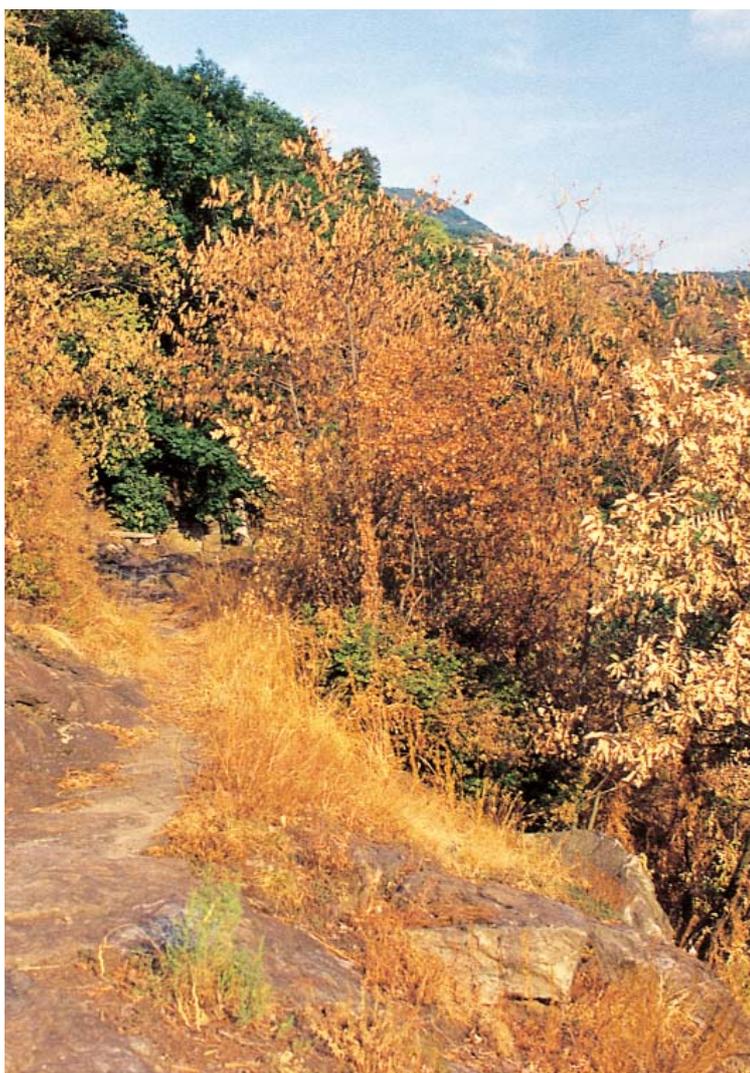
Infine, quantità di pioggia notevoli si possono riversare sulle alte valli appenniniche in occasione di nubifragi provenienti dal vicino versante ligure: è il caso dei 300 mm rilevati a Ovada tra il 13 e il 14 agosto 1935, episodio all'origine del crollo della diga di Sella Zerbino (comune di Molare) e della conseguente catastrofica onda di

piena del T. Orba.

Mensili: diverse località alpine comprese tra le Valli di Lanzo, il Biellese e l'Ossola hanno registrato **apporti pluviometrici massimi in un mese dell'ordine di 1000 mm, esclusivamente in primavera e autunno** in occasione di persistenti e massicci afflussi di aria umida dal Mediterraneo. Tra i mesi storicamente più piovosi dell'ultimo secolo si annoverano in particolare l'aprile 1918 (982 mm a Biella), il novembre 1926 (767 mm a Ovada), l'aprile 1986 (893 mm a Varallo Sesia, 987 mm a Boccioleto e 1160 a Oropa) e l'ottobre 2000 (929 mm a Boccioleto, 964 mm a Rosone): quasi tutti i mesi citati sono ricordati per eventi alluvionali.

Effetti della siccità estiva del 2003 sui boschi intorno a Cesnola, circa 10 km a Nord di Ivrea (29.06.2003). Già alla fine di giugno vaste porzioni di bosco erano rinsecchite, e le condizioni di siccità e caldo eccezionale sarebbero proseguite ancora per due mesi, fino alla fine di agosto.

Annuali: Il Santuario di Oropa, sede di osservatorio meteorologico con registrazioni pluviometriche continue dal 1920, ha rilevato alcuni totali annuali di precipitazione tra i più elevati di tutto il Piemonte, superiori a 3000 mm in 4 casi: 3134 mm nel 1920 (massimo della serie), 3112 nel 1926, 3104 mm nel 1977, 3002 mm nel 2000. Ma vale la pena segnalare anche i **4475 mm** raccolti nel 1925 dal pluviometro di **Falmenta**, località già citata come centro abitato più piovoso del Piemonte.



Precipitazioni minime e siccità

La **scarsità di precipitazioni è più frequente tra inverno e inizio primavera in Piemonte**, o anche nel cuore dell'estate (specialmente sulle Alpi Marittime e lungo l'Appennino). Sulle Alpi è tuttavia difficile osservare sequenze superiori a 30-50 giorni ininterrottamente asciutti, poiché - rispetto alla pianura - qui sono più attivi sia i fronti atlantici invernali sia i temporali estivi. Ad esempio, nei primi mesi del 1997 una drastica siccità emerse da una delle più lunghe sequenze di giorni asciutti mai osservate sulla pianura piemontese, ben 105 giorni a Mazzé (TO) tra fine gennaio e inizio maggio; sulle valli alpine la durata della sequenza si ridusse a 42 giorni senza pioggia né neve a Entracque (dal 24 gennaio al 6 marzo) e a 30 giorni a Oropa (dal 27 gennaio al 24 febbraio). Ma, al di là di questo conteggio che non sempre può dar conto correttamente della reale gravità di una situazione siccitosa, le maggiori siccità invernali degli ultimi decenni si verificarono nelle stagioni 1948-49, 1951-52, 1980-81, 1988-89, 1989-90, 1999-2000: nel semestre ottobre 1989-marzo 1990 i pluviometri raccolsero appena 57 mm a Cuneo (14% della quantità media nel periodo 1961-2007), 150 mm a Ovada (29%), 191 mm a Balme (35%), 195 mm a Entracque (34%), 267 mm a Oropa (29%). Ma, per la salute dei popolamenti foresta-

li, dei pascoli e delle coltivazioni agrarie, siccità anche meno intense possono causare **problemi più gravi, se associate ai calori estivi e dunque a forte evapotraspirazione durante la stagione vegetativa**: è quanto è accaduto a più riprese nelle estati dal 2003 al 2006, quando ripetuti deficit di piovosità - benché non eccezionali - si sono combinati a forti ondate di calore, causando prolungato stress fisiologico e indebolimento delle piante. Testimonianza ne erano estesi ingiallimenti della vegetazione (fin dalla fine di giugno, nel 2003) specialmente lungo i versanti, ove la falda è più lontana dalla superficie.

Innevamento

Quantità di neve

Elemento climatico di spicco sulla montagna piemontese, la neve cade in quantità variabili in base alla configurazione meteorologica dominante. In generale **tutto l'arco alpino piemontese è favorito dagli afflussi invernali di aria umida dal Mediterraneo**, tuttavia con alcune sfumature: un orientamento locale dei venti da Est-Nord-Est a bassa quota favorisce nevicate abbondanti sul Cuneese, da Est sulle Alpi torinesi, da Sud o Sud-Est sui rilievi tra il Biellese e l'Ossola. Complessivamente, **a parità di altitudine**, e soprattutto al di

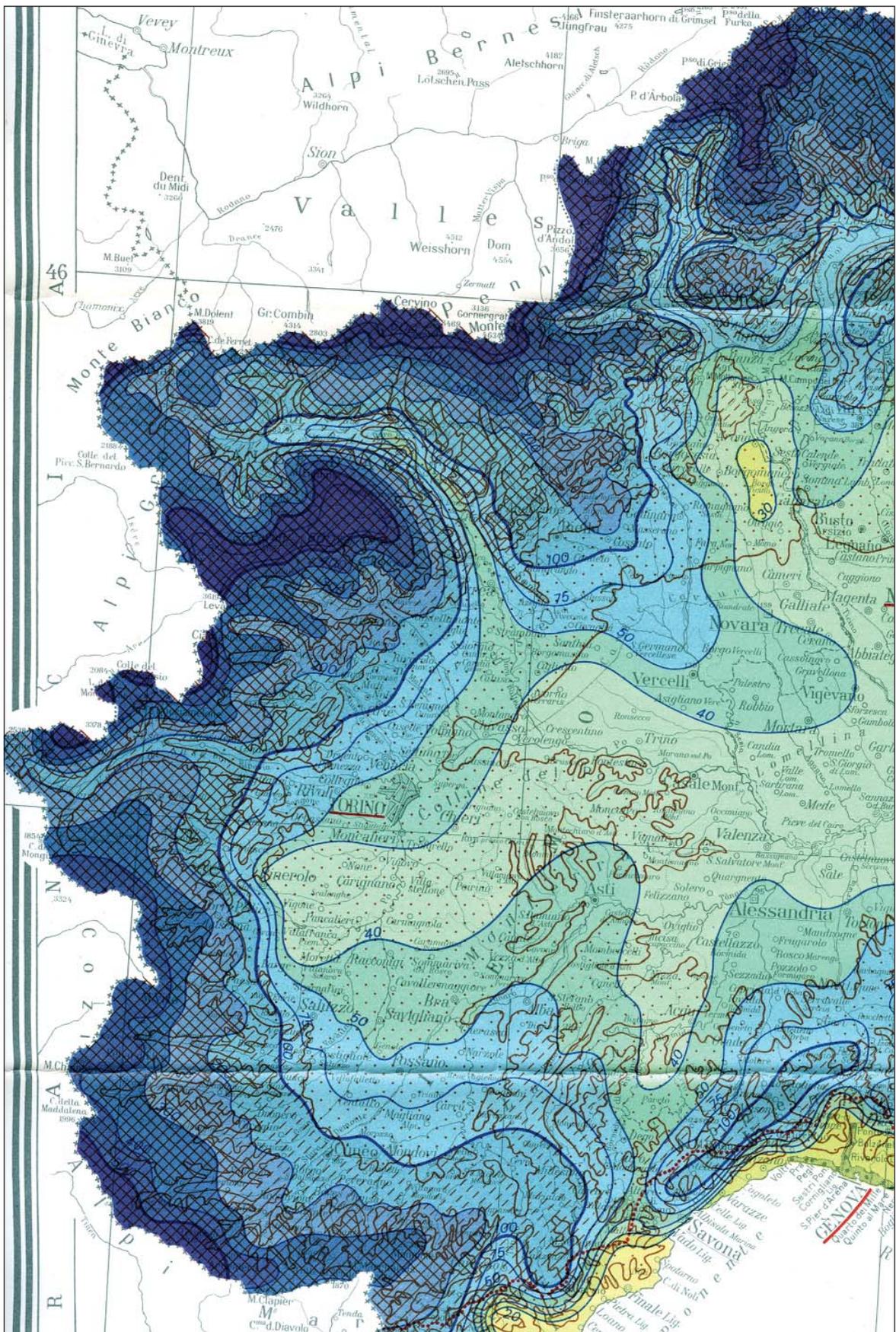
*Colle del Lys
(spartiacque
Val di Viù - Val
di Susa),
17.02.2002,
dopo la nevi-
cata di 1 m dei
due giorni pre-
cedenti.*



Carta delle quantità annue di neve fresca redatta nel 1973 dal Servizio Idrografico Nazionale, sulla base dei dati del periodo 1921-1960 (Min. LL.PP., 1973).

I valori cartografati sono in buon accordo con le medie commentate in questo studio alle quote superiori ai 1000-1500 m, mentre si notano forti sovrastime in diverse zone di fondovalle e pianura pedemontana, più carenti di dati sull'innnevamento.

Ad esempio, il valore superiore a 100 cm/anno assegnato a tutta la bassa Valle di Susa non è realistico, anche prendendo in considerazione i più nevosi decenni che vanno dagli Anni 1920 agli Anni 1950. Il valore effettivo è stimato in circa 30-50 cm nel fondovalle tra Susa e Avigliana.



sotto dei 1500 m, **la nevosità è crescente da Nord verso Sud lungo le Alpi piemontesi**, a motivo della maggiore permanenza di aria fredda nei bassi strati atmosferici durante le precipitazioni invernali sul Cuneese: i 262 cm di quantità media annua di neve fresca rilevati a Entracque-Lago Piastra, a quota 900 m, non sono uguali - nel Biellese - nemmeno ai 1181 m di Oropa, dove - nonostante l'altitudine superiore di quasi 300 m - il totale delle nevicate ammonta a 184 cm. Durante gli episodi mediterranei di precipitazione, l'afflusso di aria mite sciroccale di solito determina la trasformazione della neve in pioggia a partire dai rilievi affacciati sulla pianura novarese e vercellese, i

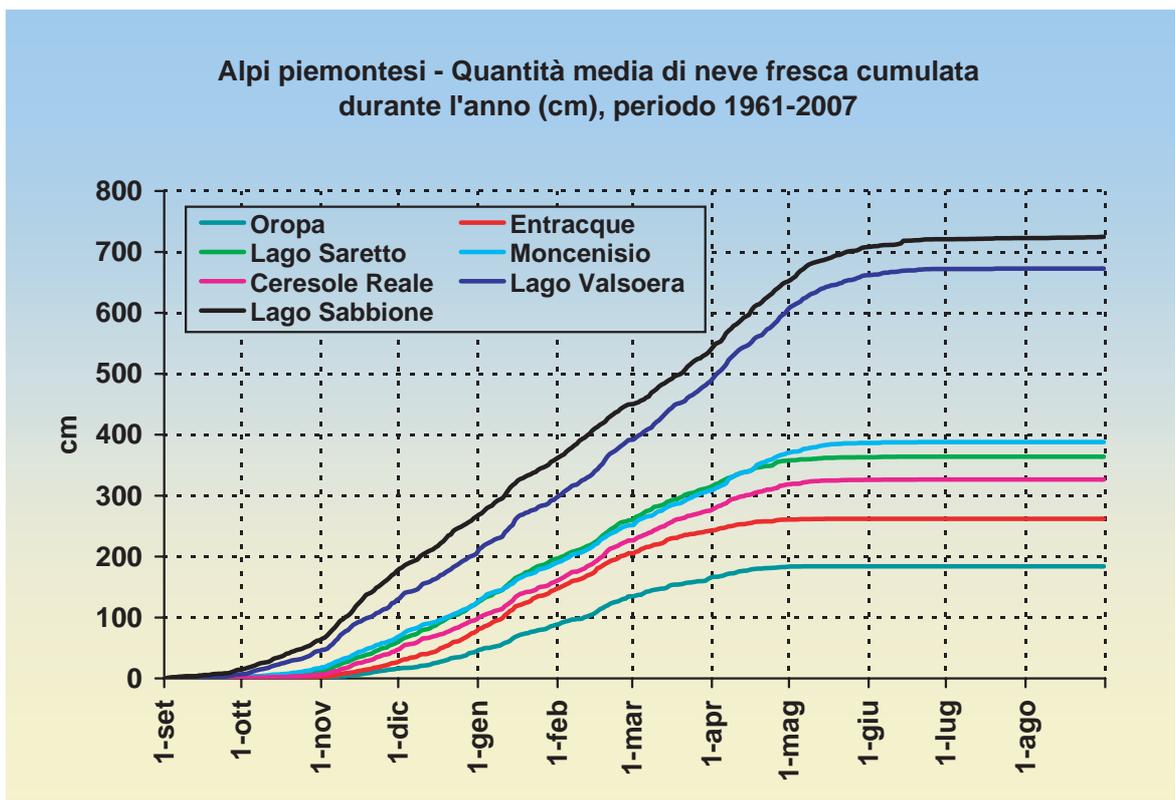
cui versanti sono maggiormente esposti alla risalita dell'aria temperata da meridione, mentre più a Sud, la conformazione orografica del basso Piemonte (un «catino» chiuso tra colline e montagne su tre lati) favorisce un più lungo ristagno di aria fredda che consente una maggiore durata delle nevicate. In queste situazioni, può infatti capitare di osservare pioggia a quota 1000 m sul Biellese, e neve ai 565 m di Cuneo.

Proprio per questo motivo, la città di **Cuneo mostra una nevosità particolare per la sua altitudine modesta**: nel periodo 1961-2007 la media annua ammontava a **109 cm**, con un massimo di 259 cm nel nevosissimo inverno 1977-78; il massimo

Curve cumulative delle quantità medie giornaliere di neve fresca in alcune località rappresentative della montagna piemontese.

Alle quote maggiori di 2000 m (laghi Sabbione e Valsoera) l'accumulo totale annuo è attorno a 7 m di neve fresca.

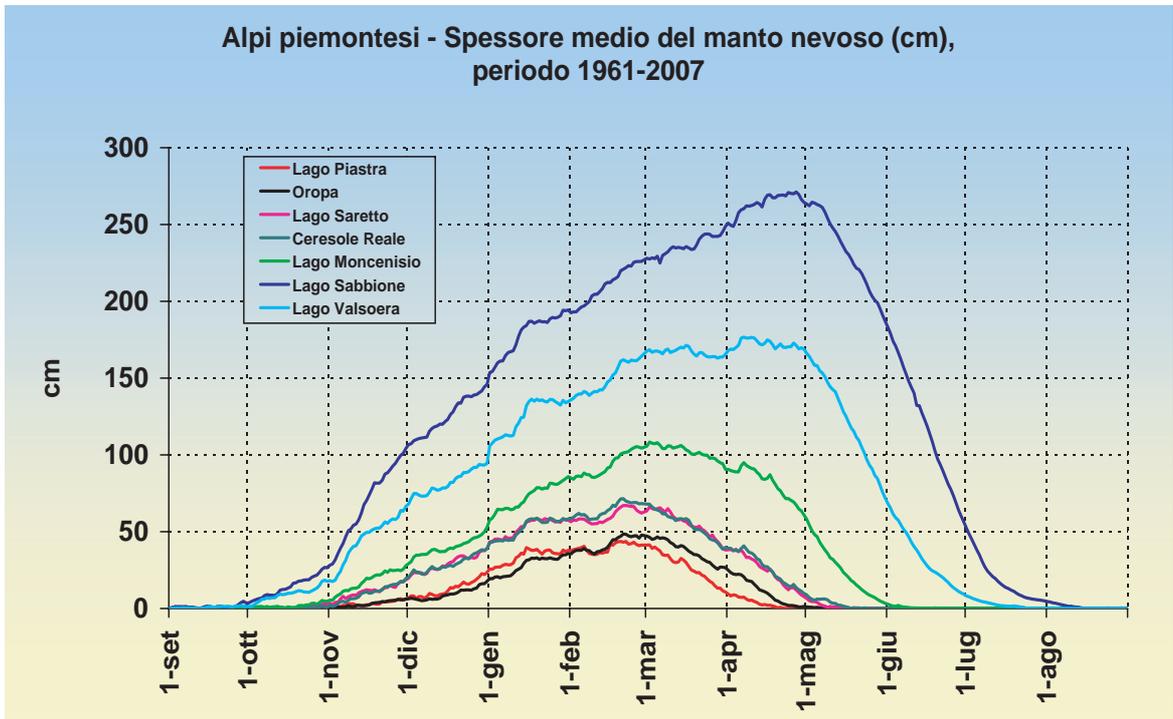
Si noti come a Entracque, a 900 m di quota (linea rossa) nevichi più abbondantemente rispetto a Oropa, a 1181 m di altitudine (linea verde scuro). Durante le fasi di precipitazione il Cuneese registra solitamente temperature inferiori alle altre zone del Piemonte.



Lo spessore medio del manto nevoso raggiunge mediamente i valori maggiori più avanti nella stagione via via che si sale in quota. Se a 1000-1200 m lo strato di neve è più spesso a fine febbraio, a 2500 m il manto continua a crescere fin verso la fine di aprile, a causa del contributo delle importanti precipitazioni primaverili, che in alta montagna avvengono ancora in forma nevosa.

Sotto: regressione lineare delle quantità annue di neve fresca con la quota. Pur con differenze locali nei regimi di temperatura e precipitazioni, l'incremento medio si colloca attorno a **30 cm ogni 100 m**.

Alpi piemontesi - Spessore medio del manto nevoso (cm), periodo 1961-2007

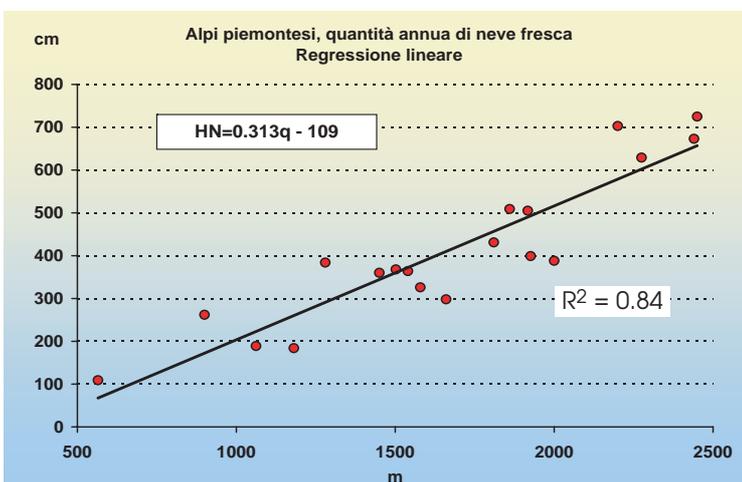


assoluto spetta però all'inverno 1916-17 con 278 cm.

Come già osservato per le precipitazioni nei paragrafi precedenti, **anche l'entità delle nevicate tende a diminuire penetrando verso l'interno della catena montuosa**: così, il Lago Rochemolles, a quota 1926 m, con un totale annuo di 399 cm di neve fresca, ha pressoché le medesima

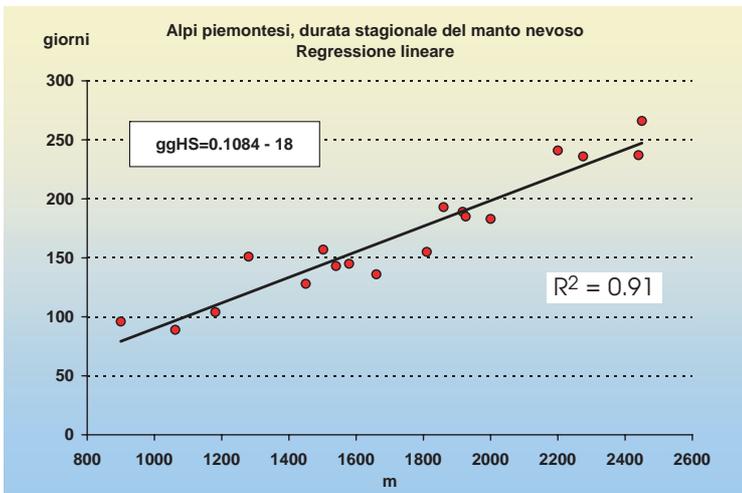
nevosità media di altre località a quota inferiore come il Lago Saretto ad Acceglio (364 cm a quota 1540 m).

A quota 2500 m, dove peraltro la misura della neve diviene difficoltosa per l'azione di disturbo esercitata dal vento, le quantità si allineano su valori dell'ordine di 600-800 cm/anno (673 cm al Lago Valsoera, 725 cm al Lago Sabbione).



Durata del manto

Estremamente variabile in base all'esposizione, alla pendenza dei versanti e all'altitudine, la durata della copertura nevosa al suolo è perfino più significativa della quantità di neve caduta ai fini della gestione di alcuni settori dell'economia montana, come ad esempio il turismo invernale, oppure la pastorizia o l'agricol-



Sopra: regressione lineare della durata del manto nevoso con la quota. Si va dai 96 giorni/anno del Lago Piastra (900 m) ai 266 giorni/anno del Lago Sabbione (2450 m). La correlazione è buona, con coefficiente R^2 pari a 0.91.

A lato: sotto la nevicata di 50 cm del 21.02.2004 ad Almese (bassa Valle di Susa).

In media il manto si conserva per **90-100 giorni a 1000 m, 130-150 giorni a 1500 m, 190-210 giorni a 2000 m e 240-270 giorni (8-9 mesi) a 2500 m.**

Quantità e spessori massimi nei grandi inverni

Per avere un'idea delle massime quantità di neve rilevate sulle Alpi piemontesi negli ultimi 60 anni occorre considerare i valori degli inverni 1950-51 in Val d'Ossola, 1971-72 sulle Alpi torinesi e 1977-78 sul Cuneese. Questi infatti figurano tra gli inverni più ricchi di neve nelle tre zone indicate.

L'inverno **1950-51** è ricordato per le molteplici e rovinose valanghe che hanno interessato nel mese di febbraio soprattutto la Svizzera, ma anche la confinante Val Formazza ricevette quantità di neve



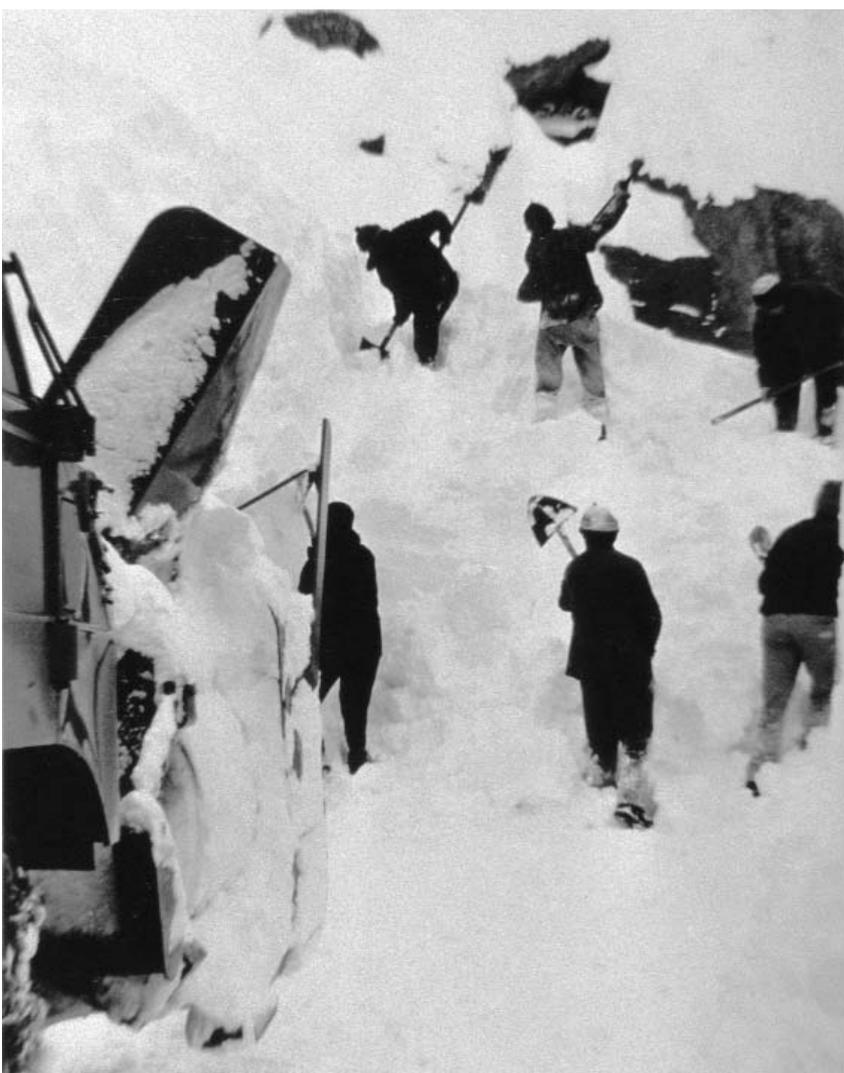
impressionanti: al Lago Toggia (2200 m) l'intera stagione dall'ottobre 1950 al giugno 1951 misurò un totale di 1124 cm di neve fresca (massimo dall'inizio delle misure nel 1932), mentre lo strato al suolo toccò i 600 cm il giorno 13 febbraio 1951 (anche questo è un massimo per l'intera serie di dati); per giungere alla completa fusione del manto stagionale si dovette aspettare fino al 16 luglio.

La stagione **1971-72** riservò i disagi maggiori alle valli di Lanzo e al Gran Paradiso:

per le ripetute nevicate - straordinarie in febbraio-marzo - e le valanghe, la SS n. 460 della Valle Orco rimase interrotta per 44 giorni tra Noasca e Ceresole Reale. Ai 1450 m di Balme l'intero inverno totalizzò ben 871 cm di neve fresca, con massimo al suolo di 405 cm il 22 febbraio. Più in quota, il totale stagionale arrivò a 1554 cm, e i guardiani dello sbarramento AEM (ora IRIDE) misurarono uno spessore del manto di 850 cm il 14 marzo 1972, uno dei massimi mai osservati su tutte le Alpi occidentali.

Infine, gli apporti nevosi più consistenti si concentrarono sul Cuneese nell'inverno **1977-78**: a Cuneo la prima nevicata della stagione si manifestò già il 21 novembre (9 cm), e l'episodio più tardivo si spinse a primavera inoltrata, depositando 14 cm di neve bagnata il 14 aprile. In città si contarono 17 giorni con nevicata, con un totale stagionale di 259 cm. Al Lago Piastra di Entracque i centimetri in tutta la stagione furono 473; notevoli - per una località a 900 m di altitudine - i 230 cm di spessore nevoso registrati il giorno 11 febbraio, e gli ultimi residui di questo imponente strato nevoso si esaurirono del tutto solo il 27 aprile.

Si lavora per rimuovere le masse nevose accumulate dalla valanga del 14.03.1972 a Molino di Forzo (Val Soana), sotto la quale sono rimasti uccisi due bambini (f. archivio SMI).



Riepiloghi dei valori medi ed estremi dei principali parametri climatici sulla montagna piemontese.

Legenda:

Tmed anno, gen, lug = temperatura media annua, di gennaio e di luglio in °C;
Pmm = precipitazione media annua in mm;
N gg P >= 1 mm = giorni con precipitazione >= 1 mm;
HN = quantità media annua di neve fresca;
N. gg HS = numero di giorni con suolo coperto da almeno 1 cm di neve.

Riepilogo dei principali parametri climatici medi sulla montagna piemontese, periodo 1961-2007									
Stazione	Quota (m)	Tmed anno (°C)	Tmed gen (°C)	Tmed lug (°C)	Giorni di gelo (Tmin <= 0 °C)	Pmm	N gg P >= 1 mm	HN (cm)	N. gg HS
Ovada	187	*	*	*	*	848.6	67	*	*
Cuneo	565	11.3	2.3	21.1	67	917.2	68	109	*
Entracque - Lago Piastra	900	*	*	*	120	1165.2	86	262	96
Noasca	1062	*	*	*	*	1171.1	98	189	89
Oropa - Santuario	1181	7.7	0.2	16.4	95	1956.6	104	184	104
Formazza	1280	6.1	-1.6	15.0	156	1201.3	113	384	151
Balme	1450	*	*	*	*	1233.7	89	360	128
Lago Alpe Cavalli	1502	5.9	-1.7	14.9	159	1424.7	108	368	157
Lago Saretto	1540	*	*	*	162	890.7	98	364	143
Ceresole Reale	1579	4.8	-4.3	14.4	178	1131.4	99	326	145
Lago Castello	1660	5.3	-2.4	14.1	177	777.2	88	298	136
Lago Malciaussia	1810	4.0	-3.7	12.7	206	1101.8	100	431	155
Lago Eugio	1860	3.8	-3.3	12.0	187	1312.1	107	509	193
Lago Teleccio	1917	4.2	-2.4	12.1	179	1284.0	113	505	189
Lago Rochemolles	1926	*	*	*	191	803.7	105	399	185
Lago Moncenisio	2000	2.8	-4.4	11.6	195	796.2	97	388	183
Lago Toggia	2200	0.6	-6.8	9.1	240	1197.1	134	703	241
Lago Serrù	2275	1.1	-6.3	9.5	232	1209.5	118	629	236
Lago Valsoera	2440	1.2	-5.2	8.9	237	1284.7	115	673	237
Lago Sabbione	2450	-0.7	-7.9	7.2	260	1016.3	126	725	266

Riepilogo dei principali estremi climatici sulla montagna piemontese												
Stazione	Quota (m)	Tnn (°C)	Data	Txx (°C)	Data	Periodo	Px 24 h (mm)	Data	Periodo	HSx (cm)	Data	Periodo
Ovada	187	*	*	*	*	*	300.0	14.08.1935	1913-2007	*	*	*
Cuneo	565	-16.8	08.01.1954	35.3	11.08.2003	1951-2007	130.0	26.10.1944	1901-2007	*	*	1951-2007
Entracque - Lago Piastra	900	-17	06.03.1971	*	*	1968-2007	177.2	08.10.1996	1916-2007	240	20.02.1972	1926-2007
Noasca	1062	*	*	*	*	*	312.8	15.10.2000	1913-2007	294	05.03.1918	1913-2007
Oropa - Santuario	1181	-15.8	07.01.1985	29	11.08.2003	1961-2007	311.4	05.06.2002	1961-2007	249	21.02.1972	1961-2007
Formazza	1280	-20	07.01.1985	*	*	1933-2007	186.0	03.11.1968	1913-2007	390	13.02.1951	1933-2007
Balme	1450	*	*	*	*	*	410.0	26.09.1947	1913-2007	405	22.02.1972	1929-2007
Lago Alpe Cavalli	1502	-22	07.01.1985	*	*	1929-2007	333.0	14.10.2000	1929-2007	332	13.02.1952	1931-2007
Lago Saretto	1540	-23	20.02.1932	*	*	1929-2007	124.8	25.02.1914	1913-2007	295	21.02.1972	1925-2007
Ceresole Reale	1579	-25	08.01.1985	*	*	1931-2007	288.0	21.05.1937	1914-2007	350	06.03.1936	1914-2007
Lago Castello	1660	-24	30.01.1963	*	*	1943-2007	162.0	31.10.1945	1943-2007	210	20.02.1972	1943-2007
Lago Malciaussia	1810	-26	22.01.1963	*	*	1936-2007	212.2	01.04.1981	1936-2007	390	13.03.1972	1936-2007
Lago Eugio	1860	-26	10.02.1986	26	12.08.2003	1959-2007	273.0	14.10.2000	1959-2007	610	14.03.1972	1959-2007
Lago Teleccio	1917	-24	10.02.1986	27	12.08.2003	1959-2007	197.0	01.04.1981	1959-2007	585	14.03.1972	1959-2007
Lago Rochemolles	1926	-23	10.02.1986	*	*	1970-2007	119.0	15.10.2000	1925-2007	465	25.02.1941	1925-2007
Lago Moncenisio	2000	-26	12.01.1987	*	*	1933-2007	120.0	27.05.1951	1931-2007	470	14.03.1951	1939-2007
Lago Toggia	2200	-29	07.01.1985	24	23.07.1983	1932-2007	175.0	17.09.1960	1932-2007	600	13.02.1951	1932-2007
Lago Serrù	2275	-30	10.01.1985	25	14.08.2003	1955-2007	166.0	08.10.1977	1955-2007	660	14.03.1972	1955-2007
Lago Valsoera	2440	-28	06.03.1971	24	07.07.1982	1959-2007	297.6	15.10.2000	1959-2007	850	14.03.1972	1959-2007
Lago Sabbione	2450	-32	06.01.1985	21	13.08.2003	1950-2007	146.0	25/08/1987	1953-2007	700	15.02.1951	1950-2007

Legenda: **Tnn** = estremo minimo di temperatura; **Txx** = estremo massimo di temperatura; **Px 24 h** = massima precipitazione in 24 ore; **HSx** = massimo spessore della neve.

Gli estremi massimi di temperatura non sono stati considerati per diverse stazioni in cui - per la collocazione inadeguata del termometro - sono stati rilevati alcuni valori nettamente sovrastimati. Salvo casi particolari (Entracque, Lago Saretto, Lago Rochemolles), delle medesime sono invece stati considerati i valori medi annuali e mensili, non affetti da sovrastime importanti.

3. 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 a Torino la temperatura media del trimestre giugno-agosto ha superato la norma di 4.4 °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 periodiche dell'attività solare, della distanza Terra-Sole, dell'inclinazione e del-

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 (+1.2 °C negli ultimi 100 anni sulle Alpi) e confermato dal forte regresso dei ghiacciai.



Schematizzazione 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 W/m^2 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 vapor 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.

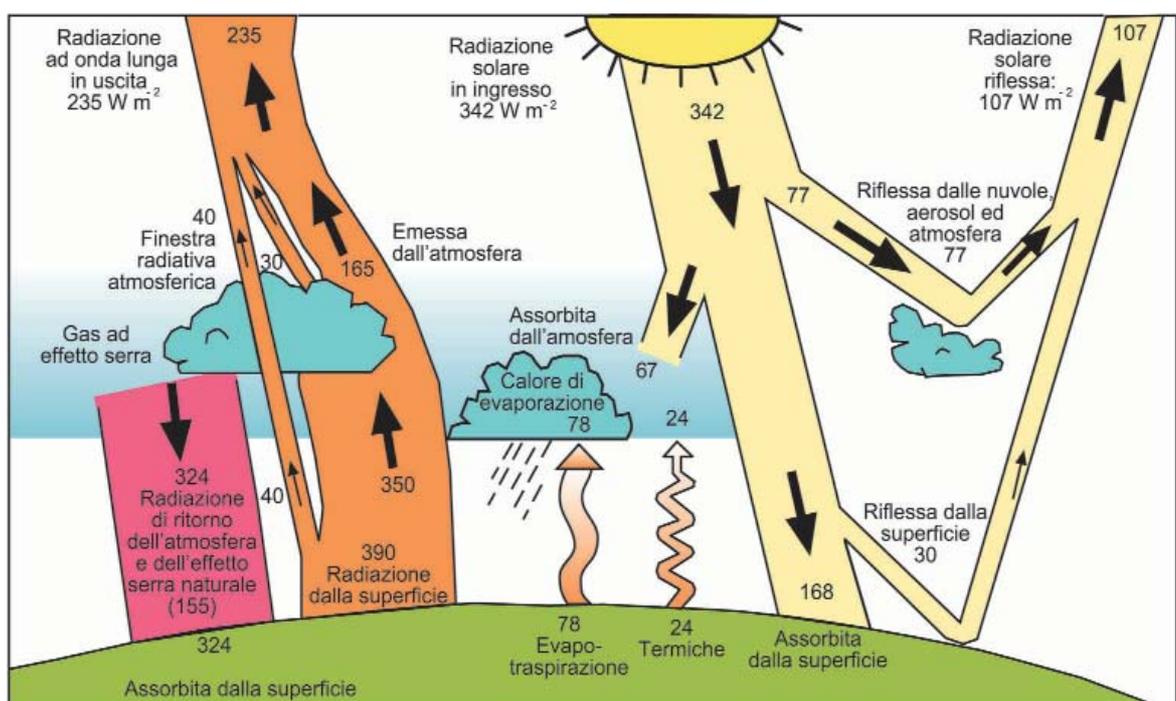
l'orientamento dell'asse terrestre, dell' eccentricità dell'orbita planetaria, tutti fattori che portano a cambiamenti nella quantità di energia ricevuta dal Sole, dunque in grado di dare inizio a una fase glaciale oppure di segnare la fine.

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 costituiscono una considerevole *forzante climatica naturale* interna al sistema ter-

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.



Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ all'Osservatorio del Monte Mauna Loa (Hawaii) nel periodo 1958-2008. La tendenza è in aumento, e attualmente (2008) si è raggiunto il valore di 388 ppmv. Le regolari oscillazioni stagionali sono dovute al temporaneo sequestro estivo di CO₂ da parte della fotosintesi nelle foreste boreali di caducifoglie.

restre, 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.

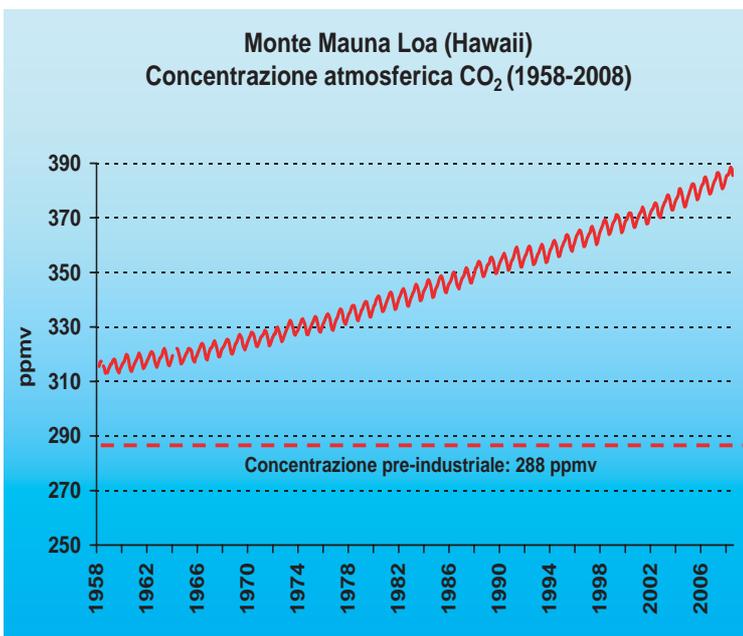
Oggi a questi fattori naturali si sovrappongono però quelli *antropici*, essenzialmente l'emissione di gas che incrementano l'effetto serra, e di aerosol di origine industriale. L'uomo sta alterando la composizione dell'atmosfera e gli equilibri del clima, sistema già di per sé molto complesso e di difficile 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

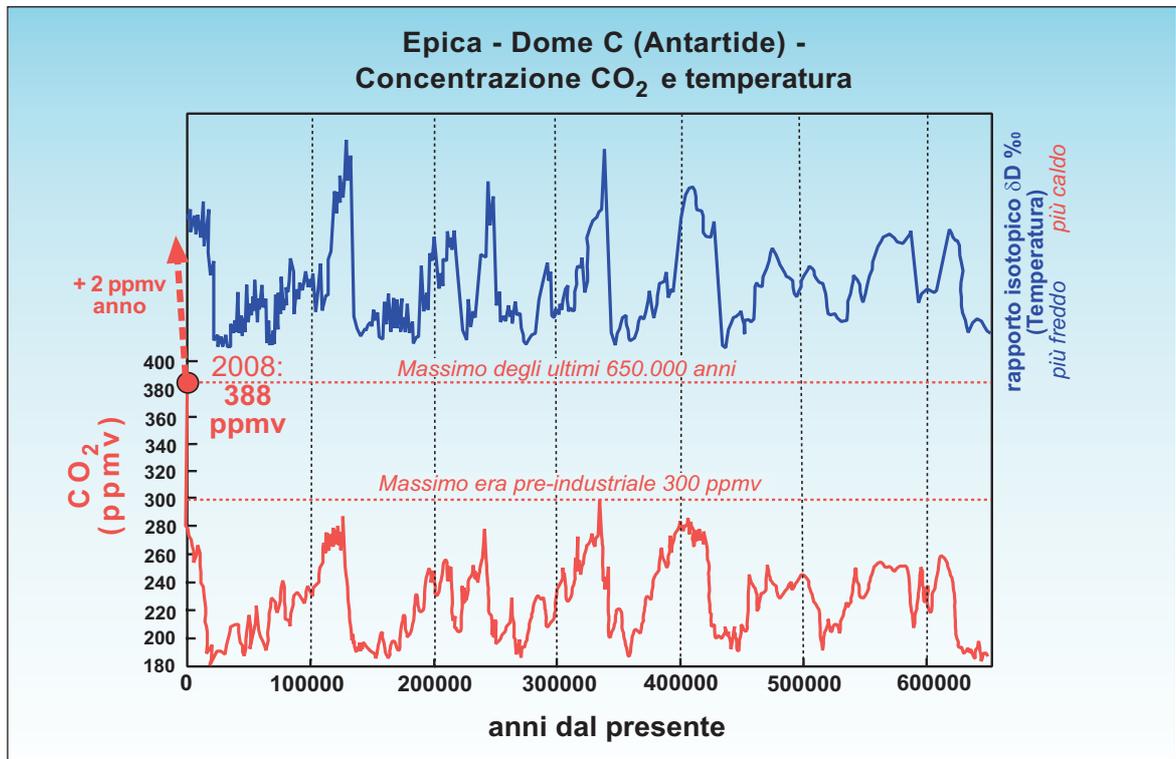
L'effetto serra è anzitutto un fenomeno *naturale* che comporta il trattenimento — all'interno dell'atmosfera terrestre — di una parte della radiazione termica solare che viene ri-emessa dal pianeta sotto forma di *raggi infrarossi a onda lunga* (6÷14 μm). Questa radiazione, in assenza di atmosfera e 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 seconda metà del 1700, l'uomo ha iniziato a utilizzare quantità crescenti di risorse energetiche fossili, prima *carbone*, e poi



L'estrazione della carota glaciale EPICA-DOME C dalla calotta antartica (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 nel maggio 2008 si sono toccate le 388 ppmv (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005).



— 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:

— **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 (63%) 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



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'esafluoruro di zolfo. Il biossido di carbonio, per la sua relativa abbondanza, resta il gas responsabile del maggiore contributo all'effetto serra antropico (63% del totale).

durante gli interglaciali (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005); ma nel corso dell'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 388 ppmv (primavera 2008). 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 18% 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 1774 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 agi-

Caratteristiche di alcuni gas a effetto serra (aggiornamento 2005 da IPCC, 2007)

Gas	Formula	Concentr. pre-industriale	Concentr. attuale (2005)	Variazione 1998-2005	Tempo di permanenza in atmosfera (anni)	Forzatura radiativa, W/m ²	Contributo % riscald. tot.	Effetto potenziale rispetto a CO ₂ in 100 anni
Biossido di carbonio	CO ₂	288 ppm	379 ppm	+13 ppm	120	1.66	63.1	1
Metano	CH ₄	848 ppb	1774 ppb	+11 ppb	12	0.48	18.3	21
Protossido di azoto	N ₂ O	285 ppb	319 ppb	+5 ppb	120	0.16	6.1	310
CFC-11	CCl ₃ F	-	251 ppt	-13 ppt	50-102	0.063	2.4	3800-8100
HCFC-22	CHClF ₂	-	169 ppt	+38 ppt	12	0.033	1.3	1500
Esafluoruro di zolfo	SF ₆	-	5.6 ppt	+1.5 ppt	3200	0.0029	0.1	23900
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	-	2.9 ppt	+0.5 ppt	10000	0.0008	0.03	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.

sce come 310 molecole di CO₂) ma presente in modeste tracce (285 ppbv nell'era preindustriale, 319 ppbv oggi), contribuisce per il 6% al riscaldamento globale.

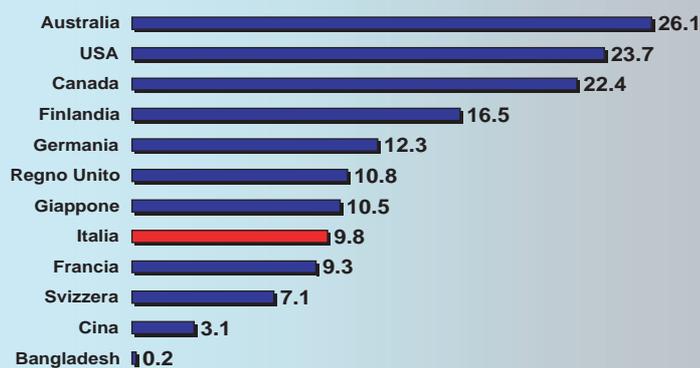
— **Esaffluoruro di zolfo:** di origine artifi-

ziale, è estremamente raro (5.6 ppt, parti per trillione) ma attivissimo come gas serra (24 mila volte più potente della CO₂).

— **CFC:** categoria di composti prodotti artificialmente dagli Anni 1930 e impiegati come refrigeranti, propellenti nelle bombolette spray, ed estinguenti negli impianti antincendio. Sono migliaia di 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 inten-

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



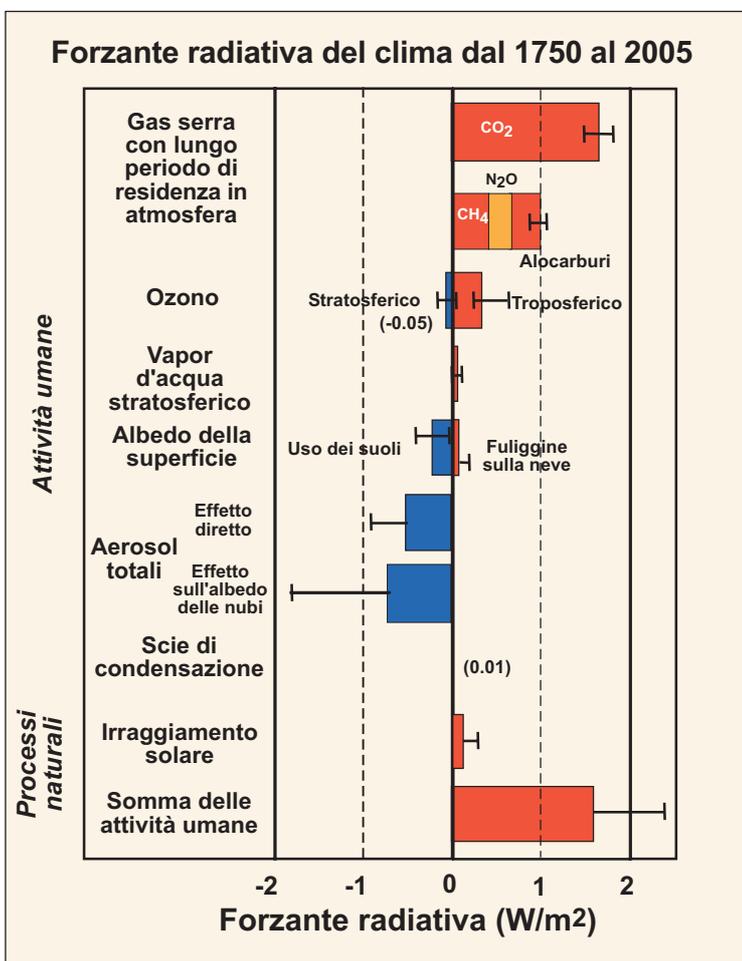
Emissioni pro-capite di gas a effetto serra in alcuni Paesi del mondo, espresse in t di CO₂ equivalente. Sono considerati i seguenti composti: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆. I valori sono tutti riferiti al 2003, eccetto quello del Bangladesh, riferito al 1997 (comunque relativamente stabile nel tempo). 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/fre/17f.pdf>.

sità di emissione pro-capite appartengono ai paesi con elevati livelli di consumi e forte industrializzazione: nel 2003 sono 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

Le questioni aperte: aerosol e nubi

Oltre ai gas a effetto serra, vi sono anche altri agenti di origine antropica che possono alterare il clima, come gli *aerosol*, fini particolati in sospensione nell'atmosfera. Gli *aerosol solfati* (che derivano dal biossido di zolfo, SO_2), 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 (HENGEVELD & *al.*, 2002). Un secondo fattore di incertezza risiede nella microfisica delle nubi, che - cambiando l'albedo media terrestre - potrà influire sul bilancio energetico. Attualmente i modelli non riescono ancora a simulare correttamente gli effetti di questi fenomeni.



Tra le **forzanti radiative** di origine umana sul clima terrestre, alcune hanno un effetto di riscaldamento (come i gas serra), altre hanno un effetto raffreddante (come gli aerosol che aumentano l'albedo delle nubi o schermano parte della radiazione solare). Attualmente però **prevale di gran lunga la forzatura positiva (riscaldamento) indotta dall'aumento antropogenico dei gas serra**, che incide sul bilancio radiativo terrestre con **+2.64 W/m²**. Al netto dell'effetto degli aerosol, che mascherano in parte l'aumento di temperatura, e di altri fattori legati a variazioni di albedo e all'ozono stratosferico, la somma dei contributi di origine umana agisce sul sistema climatico con una forzatura pari a **+1.6 W/m²**. Quanto ai fattori naturali, le variazioni nell'attività solare (solo **+0.12 W/m²**) non possono spiegare l'attuale intenso e rapido riscaldamento della superficie terrestre (Fonte: IPCC, 2007; ridis. V. Acordon - SMI).

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 forzante radiativo sul sistema climatico

Tutti d'accordo sul cambiamento climatico?

Il pensiero degli scettici

Secondo il rapporto IPCC 2007, la pressoché totale 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 «contra-

rio» delle nubi di vapor d'acqua potrebbe nettamente ridurre gli effetti termici derivanti dell'incremento dei gas serra (HENGEVELD & *al.*, 2002), e l'attuale surriscaldamento sarebbe in minima parte attribuibile alle attività umane; queste posizioni trovano talora eco anche in Italia, sebbene l'orientamento dell'Unione Europea sia ormai pienamente volto alle strategie di mitigazione e adattamento a un cambiamento climatico che viene ritenuto reale e pressante.

Per una disamina rigorosa e aggiornata sulle argomentazioni che gli scettici avanzano nei confronti del cambiamento climatico, è recentemente uscito uno studio di Stefano Caserini del Politecnico di Milano (*A qualcuno piace caldo*, Ed. Ambiente). Ulteriori informazioni si trovano sul sito www.realclimate.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, questioni che hanno trovato un'ulteriore conferma nel quarto rapporto pubblicato nel 2007 (www.ipcc.ch).

intervenuta dal 1880 al 2003 è di circa **+1.7 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; IPCC, 2007). 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 aerosol producono un'azione contraria raffreddante pari a -1.4 W/m², 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 W/m² (+0.12 W/m² nel periodo 1750-2005 secondo IPCC, 2007) 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 °C per ogni W/m²: il valore è stato calcolato in base alle forzanti climatiche in gioco durante le ere glaciali, pari a -6.6 W/m², associate a una temperatura inferiore di circa 5÷6 °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 0.74 °C, e i modelli climatici prevedono un ulteriore aumento compreso tra 1.8 e 4.0 °C entro il 2100**, in assenza di politiche di riduzione delle emissioni (fonte: UNFCCC; IPCC, 2007). 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. 40). 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 di circa 17 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 18 e 59 cm è previsto entro il 2100 (IPCC, 2007): questo

aspetto tuttavia non riguarderà direttamente il Piemonte, la cui altitudine minima è di 75 m (Isola Sant'Antonio).

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.

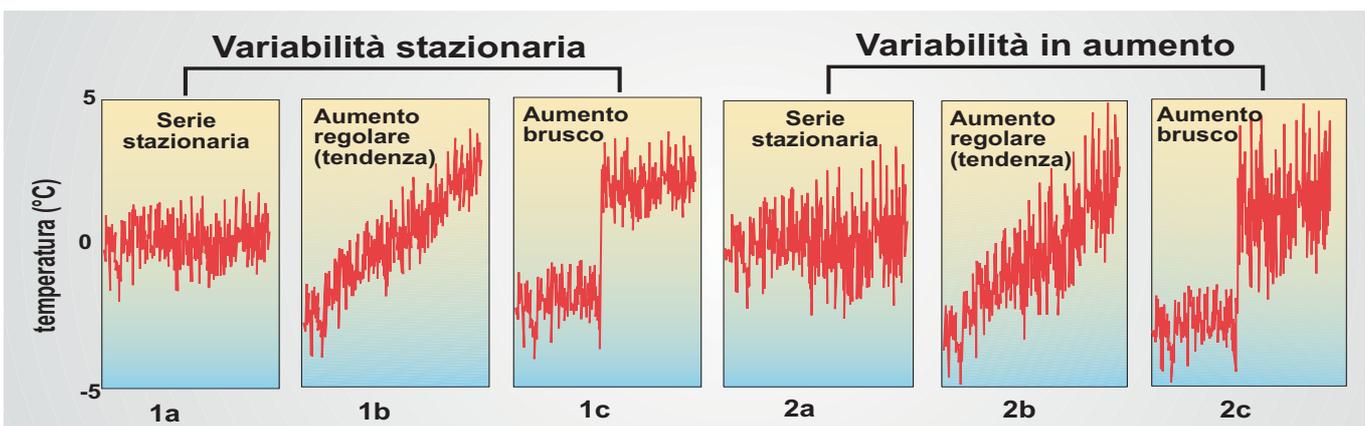
Tendenze, fluttuazioni, variabilità

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 Cuneo 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 certo non lo smentiscono.

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.

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.).



4. LEZIONI DAL PASSATO

Il ghiacciaio Ciardoney (Valle Soana) e l'omonima Grande Uja attorno al 1920 (archivio Fondazione Sella, Biella) e nel 2004: la forte deglaciazione ha liberato buona parte della parete montuosa, con perdite di spessore glaciale dell'ordine di 50-70 m. Si noti pure il drastico aumento del detrito franato dai versanti a seguito della scomparsa del ghiaccio. Negli ultimi 150 anni i ghiacciai alpini hanno perso metà della loro superficie.

«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».

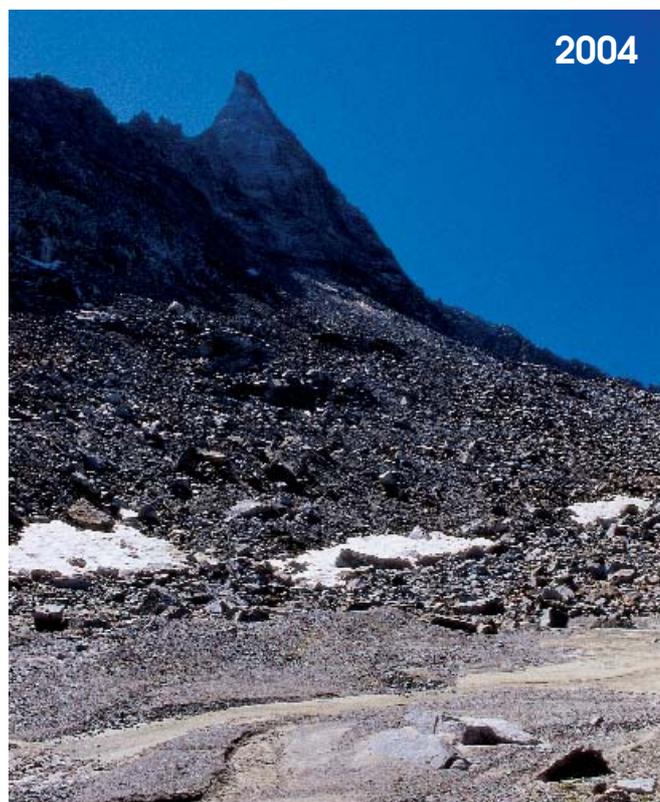
(MARTIN BENISTON, 2004)

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). A Torino il conte Ignazio Somis

iniziò le misure meteorologiche nel 1753, mentre sulle Alpi il primo osservatorio venne istituito nel 1817 al colle del Gran San Bernardo. 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





In alto, sezione di un tronco di castagno. Ampiezza e densità degli anelli di accrescimento forniscono un'indicazione del clima passato. Qui sopra, estrazione di campioni di torba per analisi palinologiche alle Granges de Savine (2250 m, Alpi Cozie), svolti nell'agosto 2007 dall'Università del Molise in collaborazione con la Società Meteorologica Italiana.

più in torbiere, che fornisce un'idea della 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,

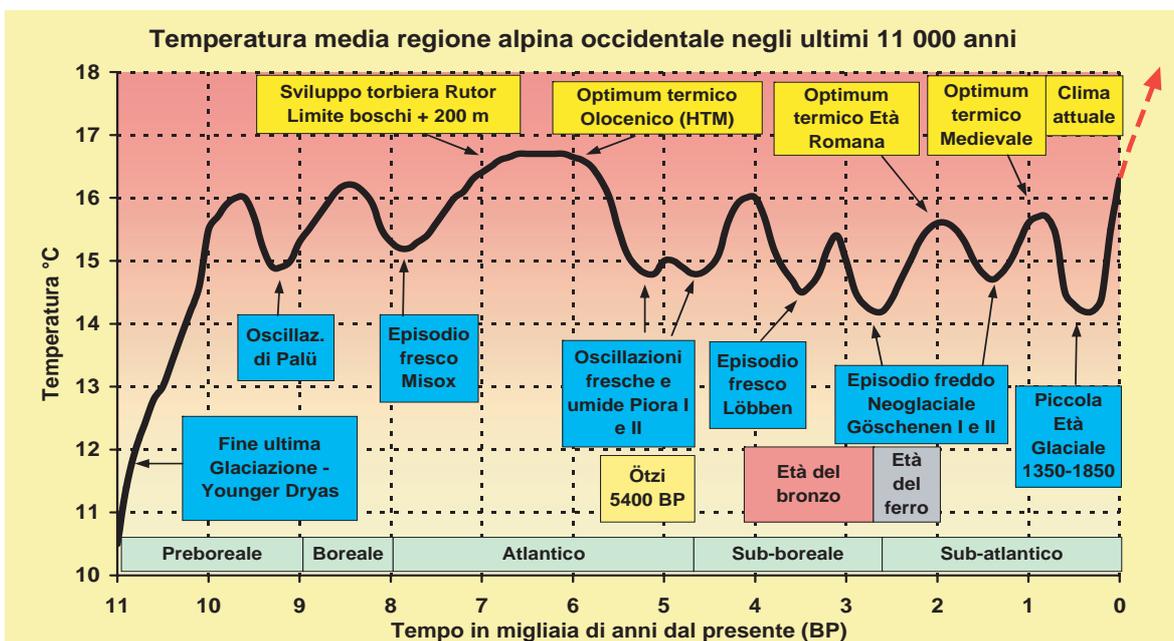
nel caso di carotaggi effettuati in particolari settori delle calotte polari (interno dell'Antartide, *inlandsis* della Groenlandia) in cui non vi è flusso orizzontale che alteri le successioni cronologiche del ghiaccio stratificatosi. Il progetto italo-francese EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*), sviluppato alla base di Dome Concordia (Antartide orientale, 3233 m), ha consentito 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. 37 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 giunti a 387 ppmv, e questo fornisce un'idea dell'importanza del cambiamento ambientale e climatico che oggi stiamo vivendo.

Dalla fine delle glaciazioni a oggi

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 Neogliaciali (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.

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 qui sotto. 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 aumenta 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 Neogliaciale «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 ritrovamenti 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-



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 11.500 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 sui massicci del Monte Bianco e del Monte Rosa, dove le lingue glaciali giunsero a

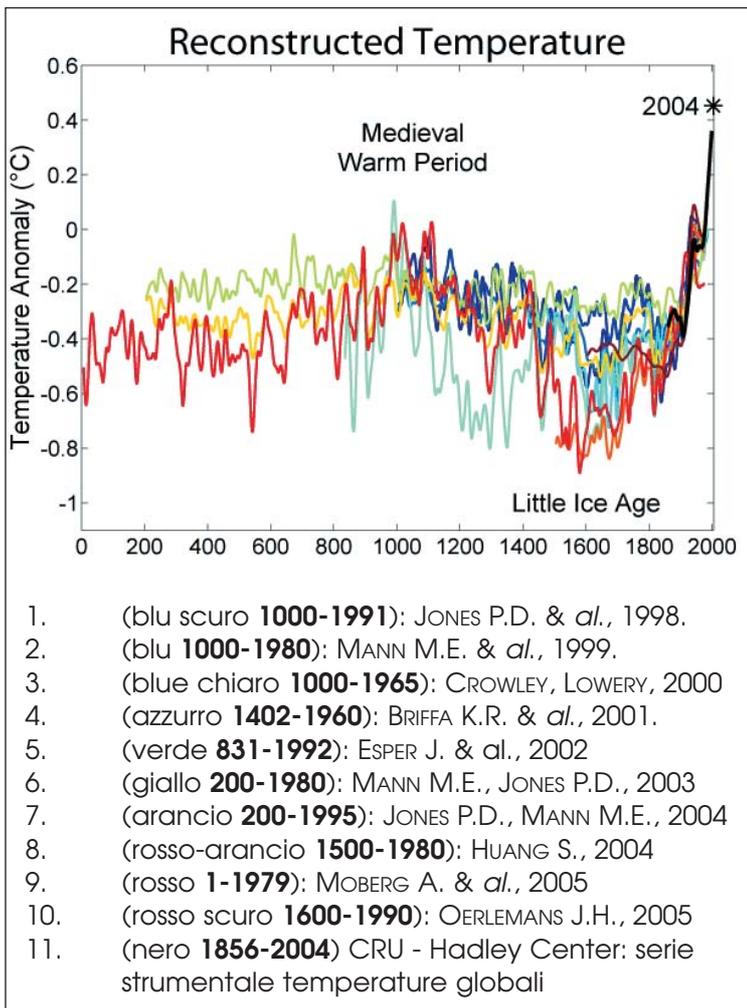
lambire i fondovalle). Si trattò di un periodo di crisi, cui le popolazioni di montagna - avvezze a vivere in un territorio difficile - seppero tuttavia adattarsi. Sulle Alpi l'espansione dei ghiacciai raggiunse l'apice almeno in tre fasi attorno al 1600, al 1820 e al 1850, quando la superficie glacializzata 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 1.2 °C da AUER & al. (2007).

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 ^{14}C 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, collocabile 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 pag. 47). 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 Piemonte, 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 pratica-

bili 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 sulle zone collinari piemontesi e perfino in Valle di Susa e in Ossola).

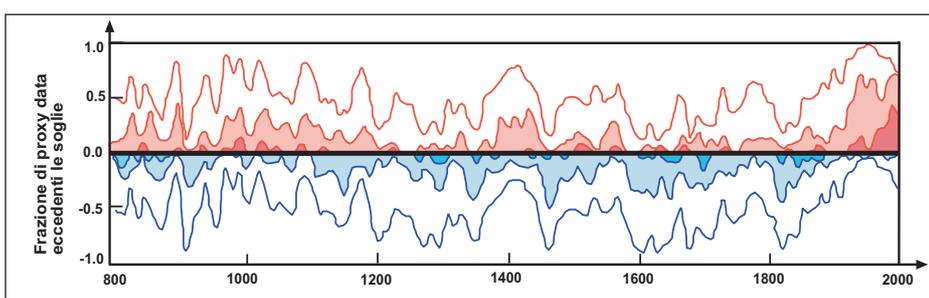
Secondo recenti analisi paleo-climatiche, ad esempio quella condotta da OSBORN & BRIFFA (2006), l'anomalia positiva di temperatura registrata tra l'890 d.C. e il 1170 d.C. è sì in accordo con la definizione di Optimum termico medievale, tuttavia **il riscaldamento osservato nella seconda metà del XX secolo mostra un'intensità, una rapidità e un'estensione spaziale di importanza ancora maggiore, e costituisce la più notevole caratteristica dell'evoluzione climatica negli ultimi 1200 anni** (fig. a pag. 49 in basso), peraltro in fase con le massime concentrazioni di gas serra in atmosfera. Dunque vi sono serie evidenze per ritenere che gli Anni 1990 siano stati i più caldi del millennio, e probabilmente anche degli ultimi 2000 anni, come si evince dal grafico a pag. 49 in alto, che mostra i risultati di diverse ricostruzioni climatiche (JUCKES *et al.*, 2007). Inoltre, un rafforzamento di questo quadro emerge dal ritrovamento della mummia dell'età del rame (Ötzi) sul ghiacciaio del Similaun (Alto Adige) nel settembre 1991, datata circa 5300 anni dal presente: la conservazione dell'ampio corredo di abiti e sup-



pellettili in materiale vegetale e animale estremamente degradabile sembrano confermare che il reperto non sia mai emerso dal ghiaccio per oltre 5 millenni, e che quindi l'attuale tasso di deglaciazione sia il più intenso in questo lasso di tempo. Ulteriori ritrovamenti nel Vallese durante la calda estate 2003 confermerebbero tale ipotesi (GROSJEAN et al., 2007).

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



lin 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).

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).

era già presente come cacciatore-raccogliatore in Europa centro-meridionale, ma il nomadismo e la semplicità dell'organizzazione sociale favoriva in un certo senso l'adattabilità 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 mar-

ginali 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 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 Piemonte non mancano casi di alpeggi a quote molto elevate, ad esempio l'alpe Motta a 2600 m in Valle Orco. Da sempre gli alpigiani piemontesi, come tutti i popoli delle Alpi, si sono trovati 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, specialmente 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 la rete dei canali per l'irrigazione dei versanti più soleggiati e aridi, come in Valle di Susa e in alcune valli cuneesi, 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

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. 52), 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 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

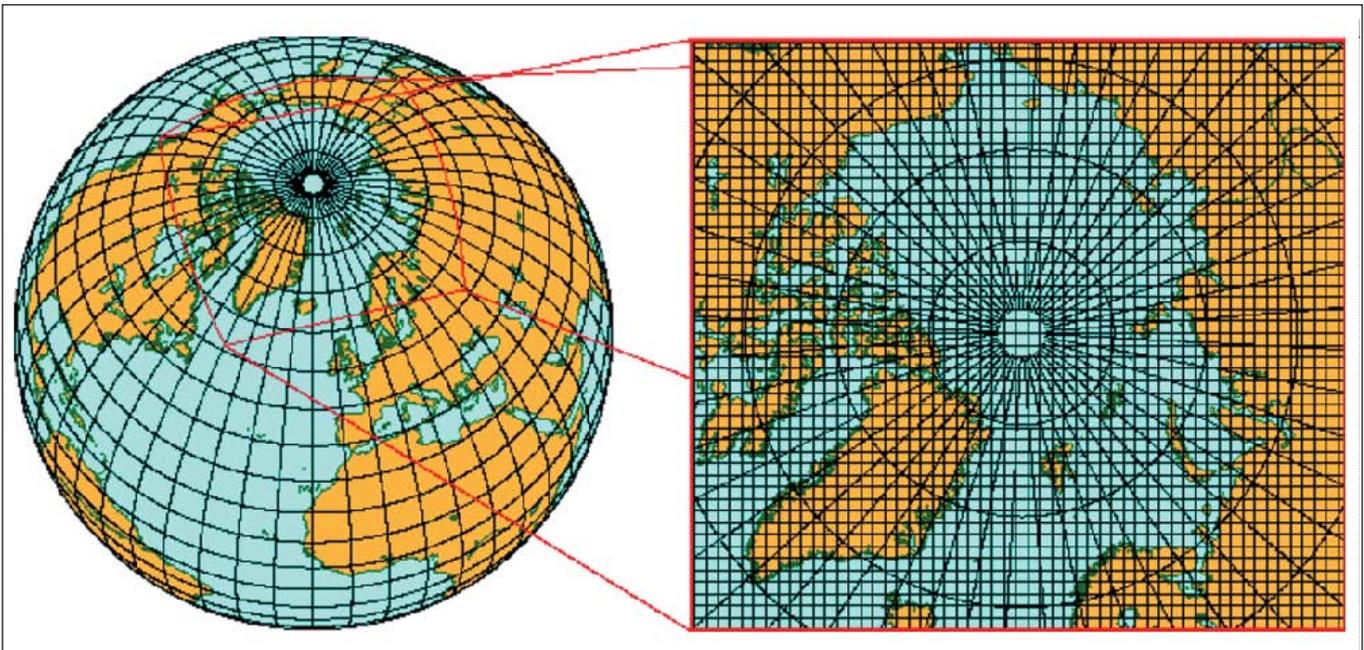
Riepilogo delle caratteristiche delle principali categorie di modelli climatici (Fonte: Hadley Center, Met-Office, UK).

Principali categorie di modelli climatici (fonte: Hadley Center, Met-Office, UK)	
Categoria	Funzione
<i>AGCMs – Atmosphere General Circulation Models (Modelli di Circolazione Generale dell'Atmosfera)</i>	Studio dei processi atmosferici e della variabilità climatica
<i>OGCMs – Ocean General Circulation Models (Modelli di Circolazione Generale dell'Oceano)</i>	Studio della circolazione oceanica, dei processi interni agli oceani e loro variabilità
<i>Modelli del ciclo del carbonio</i>	Comprensione di importanti meccanismi di retroazione (<i>feedback</i>) legati al ciclo del carbonio (fertilizzazione piante da CO ₂ , assorbimento CO ₂ da oceani)
<i>Modelli di chimica dell'atmosfera</i>	Comprensione dei processi chimici che regolano la formazione e distruzione di O ₃ e CH ₄ nella bassa atmosfera.
<i>AOGCMs – Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models (Modelli accoppiati di Circolazione Generale Atmosfera-Oceano)</i>	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).
<i>RCMs – Regional Climate Models (Modelli climatici regionali)</i>	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.



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).

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 pag. 54). Per verificare l'attendibilità delle simulazioni, 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 IV rapporto del 2007, prevede entro il 2100 un ulteriore aumento delle temperature terrestri variabile tra 1.8 e 4.0 °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 proprio per l'elaborazione del IV rapporto IPCC, la cui pubblicazione segue 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, permet-

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>

tendo così di studiare in modo più approfondito l'impatto regionale dei cambiamenti del clima.

Tuttavia, benché la potenza dei calcolatori 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 supercalco-

latori 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

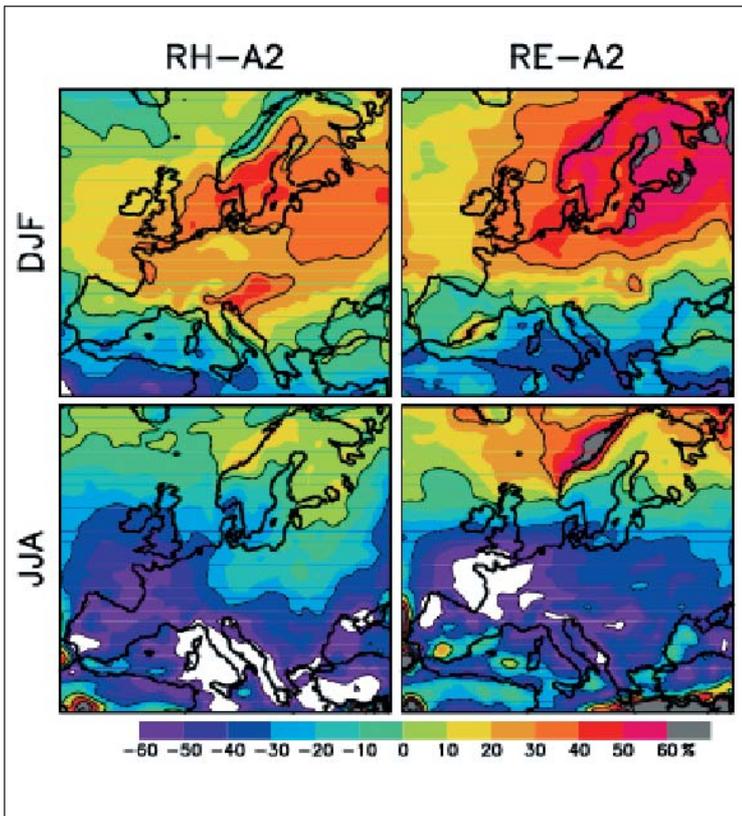
«Nonostante le numerose incertezze e gli aspetti ancora da comprendere, oggi vi è un ampio consenso intorno al reale pericolo che un brusco riscaldamento globale potrebbe costituire per un ampio spettro di sistemi ambientali, sociali ed economici, sia globalmente sia regionalmente, come sulle Alpi».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

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 nuova edizione è soddisfacente, per via del numero di modelli impiegati, dell'investimento in termini di ore di calcolo e del-

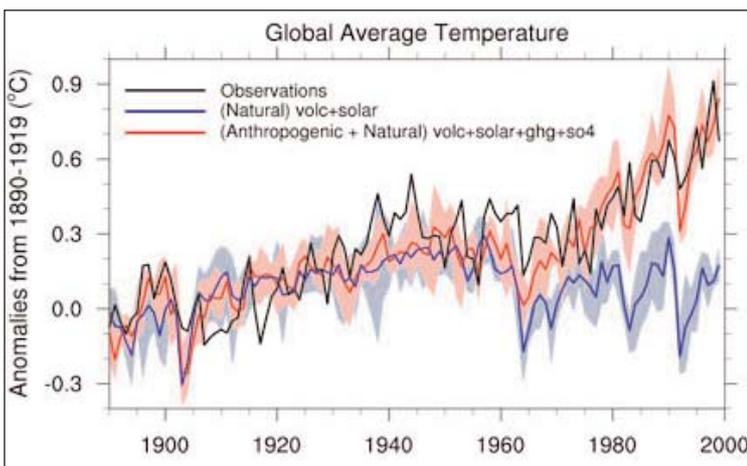
l'ampiezza della base di dati. I risultati si sono tradotti in una migliore comprensione degli impatti a livello regionale, e nella caratterizzazione degli eventi estremi. L'affidabilità dei modelli climatici è in aumento, essendo stati in grado di simulare correttamente l'aumento di temperatura intervenuto nel corso del XX secolo (vedi figura a pag. 56). 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.

Il supercomputer IBM-BlueIce da 12 TeraFlops installato presso l'UCAR di Boulder (University Corporation for Atmospheric Research). 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.





Esempio di uscite di modelli climatici, tratti dall'archivio del progetto Prudence: 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.



I modelli di simulazione del clima globale, pur nella loro estrema complessità e approssimazione, vanno via via affinandosi e producono risultati credibili. Tra i test più significativi della loro affidabilità vi è la ricostruzione del clima del passato. IPCC 2007 presenta la sintesi di tali ricostruzioni, dove è evidente come - senza considerare le emissioni di gas a effetto serra - non sarebbe possibile spiegare il recente rapido aumento termico. Senza il fattore forzante antropogenico (linea rossa), la temperatura globale degli ultimi 20 anni avrebbe infatti mostrato una lieve tendenza alla diminuzione (linea azzurra). La linea nera rappresenta le osservazioni reali, che coincidono in larga misura con la simulazione del modello che include l'attività umana.

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 Piemonte, 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/>.

6. LA TEMPERATURA

La situazione nel mondo

e sulla regione alpina

L'aumento della temperatura dell'aria figura tra le conseguenze più evidenti e meglio documentate del recente cambiamento climatico. **Il riscaldamento a livello globale negli ultimi 100 anni è stato stimato in +0.74 °C**, come indicato nel **IV rapporto dell'IPCC** (*Intergovernmental Panel on climate Change*) pubblicato nella primavera 2007 (IPCC, 2007). Nel

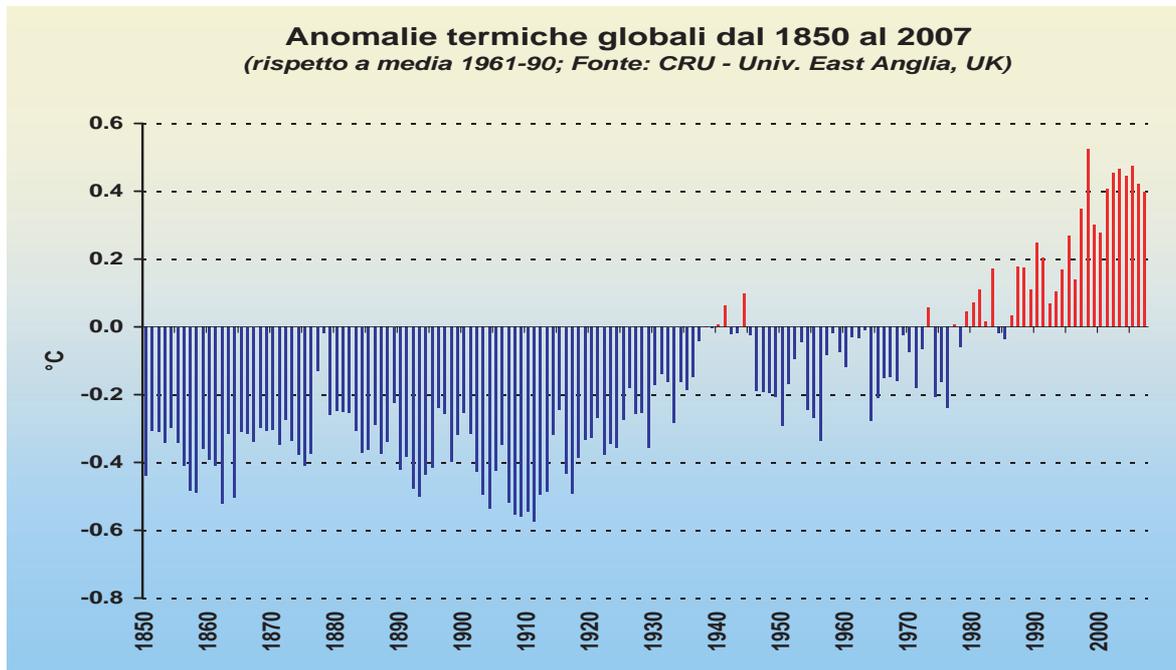
medesimo rapporto si precisa anche come **il riscaldamento attuale sia ormai inequivocabilmente individuato, e sia causato almeno in buona parte dalla crescente emissione antropica di gas a effetto serra**, principalmente biossido di carbonio (CO₂).

L'analisi delle serie meteorologiche storiche della **regione alpina** (GAR = *Greater Alpine Region*) confluite nel database HISTALP, ha consentito di individuare un

Autunno sui vigneti di Chiomonte (Valle di Susa), il 27.10.2002. Per il momento questa è la stagione che ha conosciuto il riscaldamento più moderato sulle Alpi piemontesi, pari a +0.3 °C nel periodo 1990-2007 rispetto agli anni 1961-1989, mentre l'estate si è riscaldata di 1.6 °C.



Andamento delle anomalie termiche annue globali, periodo 1850-2007, rispetto alla media del trentennio standard 1961-90. Evidente il brusco riscaldamento intervenuto dalla fine degli Anni 1980. Per il momento l'anno più caldo a livello planetario è stato il 1998.



Negli ultimi 100 anni 0.7 °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; 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 6÷10 °C di incremento termico per passare dalle grandi glaciazioni - che ricoprivano le valli alpine piemontesi con un mantello di ghiaccio spesso talora 800÷1000 m - a condizioni temperate simili a quelle attuali.

riscaldamento di 1.2 °C durante il XX secolo (BÖHM *et al.*, 2001; BRUNETTI *et al.*, 2006; AUER *et al.*, 2007), con tendenze decennali e secolari identiche in ogni sottoregione della catena. Tale aumento di temperatura appare quasi doppio rispetto a quanto osservato a scala planetaria nel medesimo periodo, e conferma l'elevata sensibilità delle Alpi all'attuale cambiamento climatico.

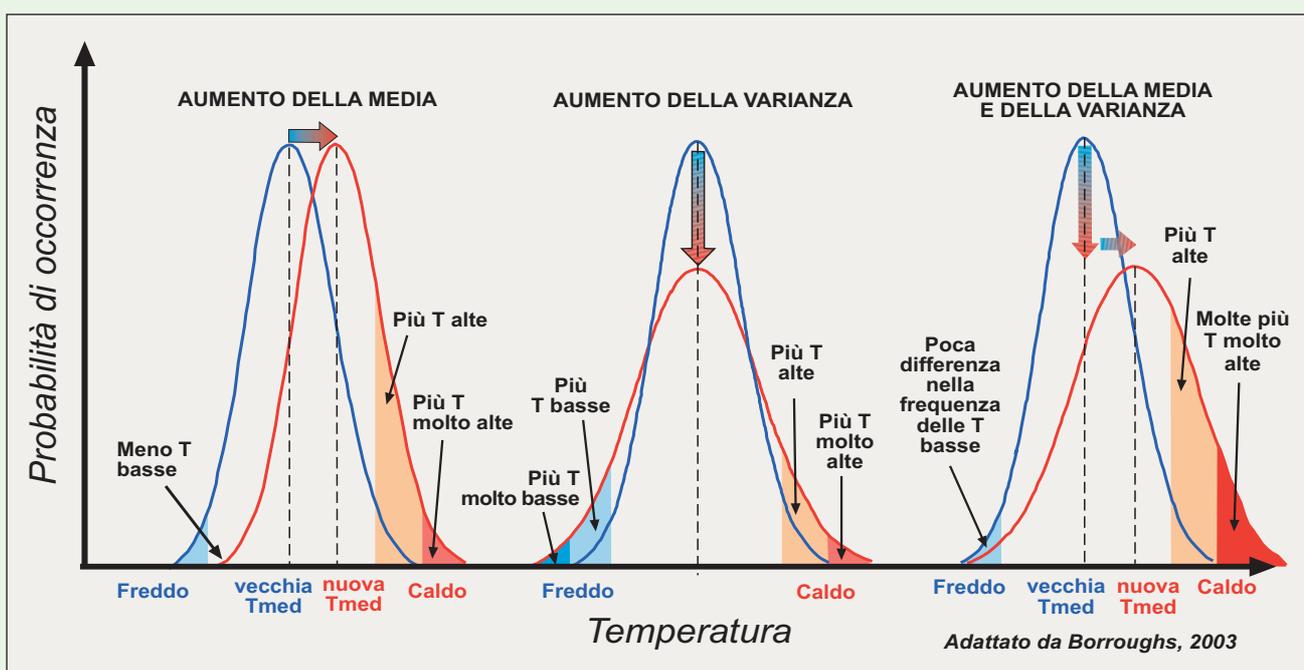
La situazione in Piemonte: temperature medie, aumento di 1.1 °C negli ultimi 50 anni

Sulle Alpi piemontesi le lunghe serie di dati termometrici affidabili e omogenee sono rare, tuttavia alcune stazioni di misura consentono di analizzare con efficacia la situazione termica del periodo 1990-2007, caratterizzato dai maggiori aumenti di temperatura, e di confrontarla con quella

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):

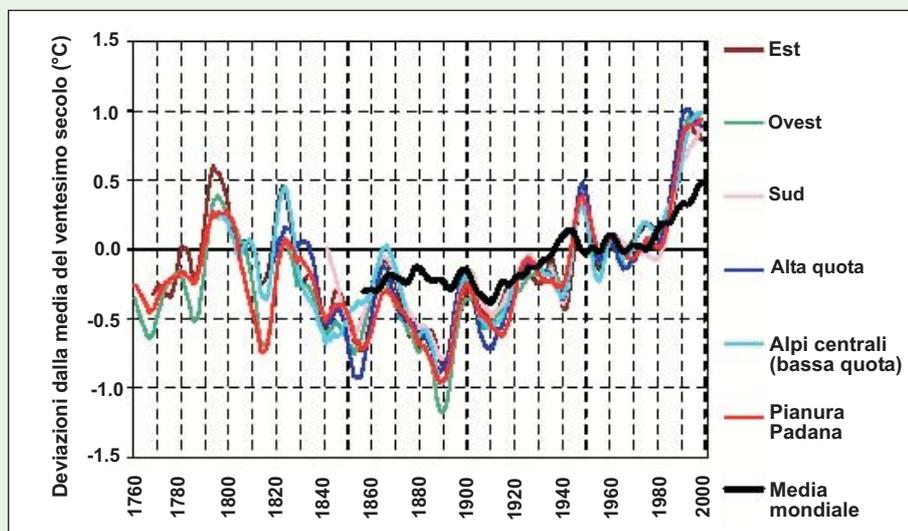
- Aumento della temperatura senza cambiamento nella varianza:** la nuova distribuzione avrà la stessa forma della precedente ma sarà semplicemente tralata verso destra. Ne risulta un aumento nella frequenza delle temperature elevate e molto elevate, mentre diminuisce la frequenza delle temperature molto 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. E' questo lo scenario più probabile (vedi pag. 67-68).



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

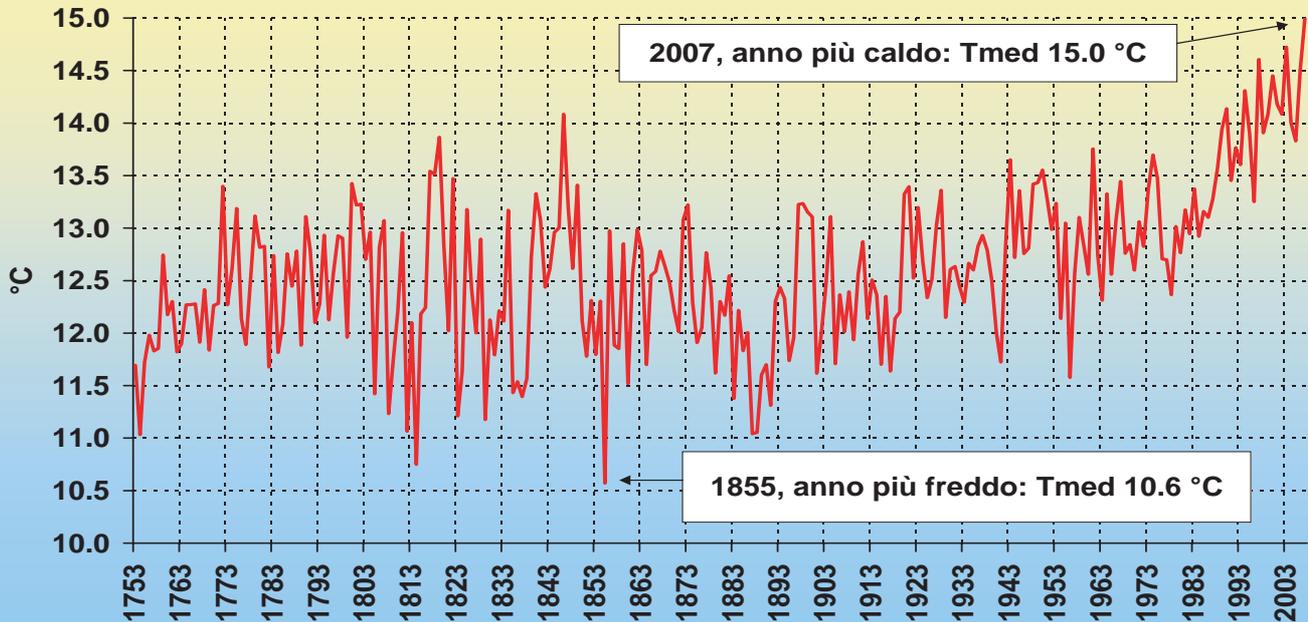
Fonti di incertezza nell'individuazione del riscaldamento globale?

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. pag. 41) 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 (come a Cuneo) generalmente non hanno subito importanti modifiche 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 incremento 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.



Le curve delle anomalie termiche rilevate su diversi settori delle Alpi (inclusi gli osservatori di alta quota, linea blu) 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. Si noti l'aumento di temperatura sulle Alpi, quasi doppio rispetto a quello globale (BÖHM & al., 2001).

Torino - Temperature medie annue (°C) dal 1753 al 2007

(elaborazione dati: Società Meteorologica Italiana, www.nimbus.it)

Sopra: temperature medie annue a Torino dal 1753. Il 2007 risulta l'anno più caldo.

In pianura gli aumenti termici osservati negli ultimi 18 anni rispetto al trentennio precedente appaiono più evidenti da marzo ad agosto (sotto).

del precedente periodo 1961-1989, comune a tutti i siti scelti.

Ma, prima di commentare i risultati per l'area alpina, vale la pena sintetizzare le evidenze generali riscontrate nell'analisi della **lunga serie termometrica di Torino**, che è stata recentemente recuperata, omogeneizzata e analizzata da DI NAPOLI & MERCALI (in stampa). Tale serie di dati

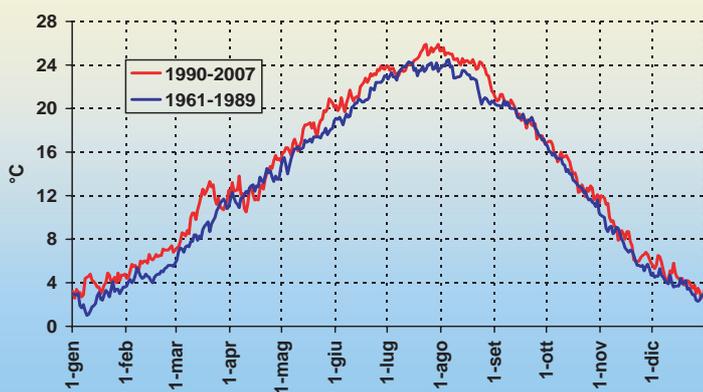
ben si presta a un'analisi dell'attuale riscaldamento atmosferico, data la sua lunghezza (dal 1753) e rappresentatività del territorio regionale. Dall'elaborazione dei dati storici risulta che:

- Le temperature medie mostrano un **netto riscaldamento**, più evidente negli anni successivi al 2000, e valutabile dell'ordine di **+2 °C nell'arco di un secolo**.

- **Il 2007 è stato l'anno più caldo a partire dal 1753**, con una temperatura media di 15.0 °C (+1.9 °C di anomalia rispetto al trentennio standard 1961-90).

- Calcolando, per ciascun giorno dell'anno, le temperature medie del periodo recente 1990-2007, e confrontandole con quelle del precedente periodo 1961-1989, si nota come **specialmente i mesi da gennaio a marzo, e quelli da**

Torino - Confronto tra le temperature medie giornaliere, periodi 1961-89 e 1990-2007



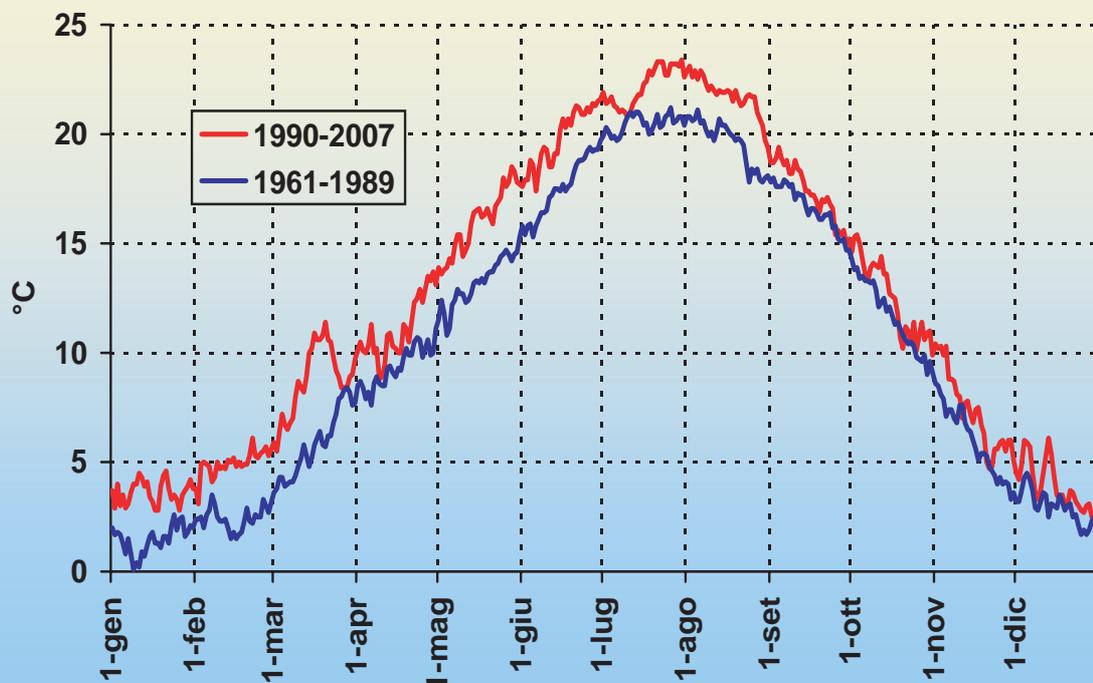
Da pag. 62 a pag. 64, confronti tra le temperature medie giornaliere dei periodi 1961-1989 e 1990-2007.

Il riscaldamento è più evidente in tutte le stazioni analizzate, specialmente a bassa quota, nella seconda parte dell'inverno, in primavera ed estate.

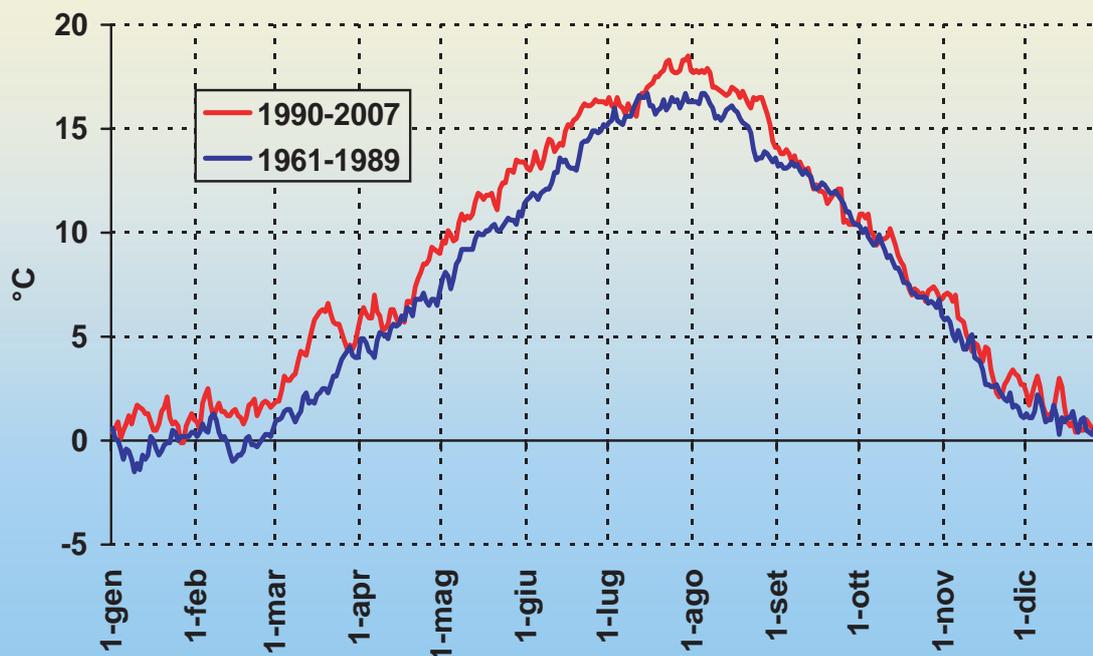
Si notino in particolare i notevoli aumenti di temperatura media registrati nei giorni intorno al 20 marzo e tra la metà di luglio e la fine di agosto, talora superiori a 3÷4 °C.

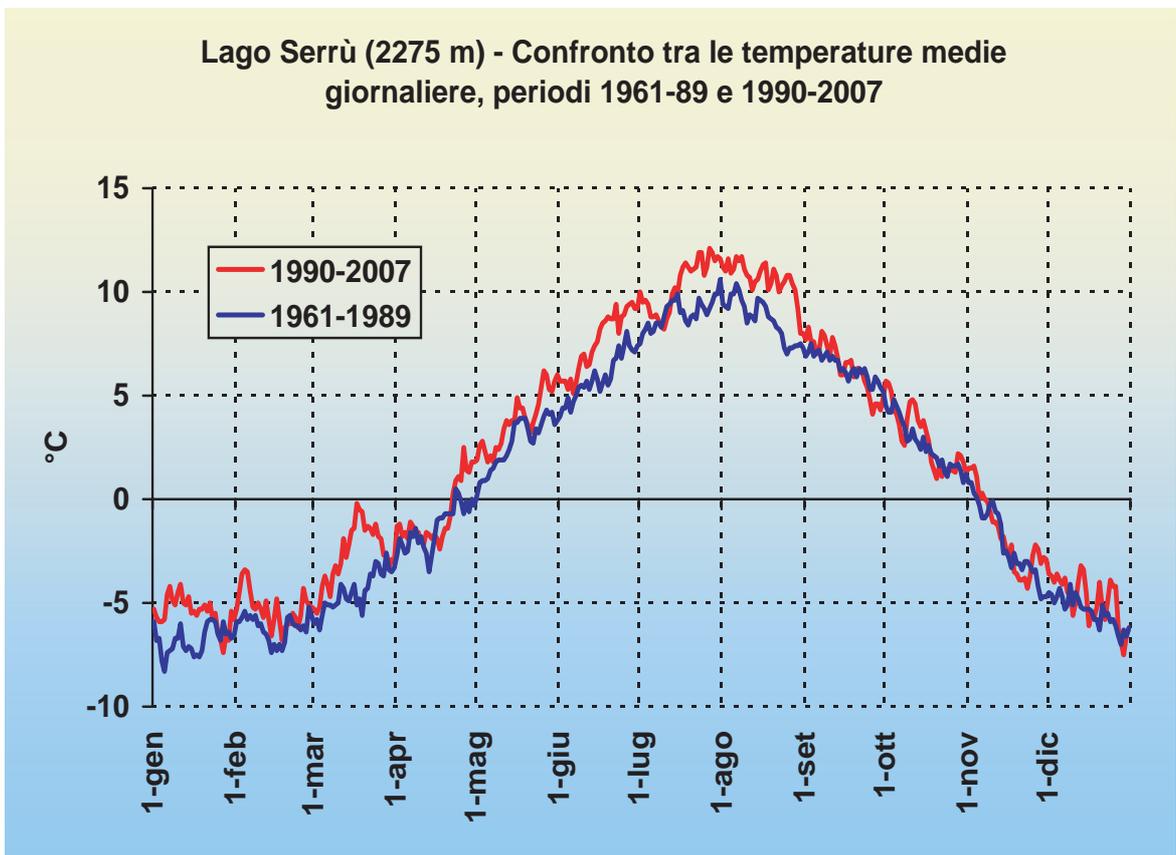
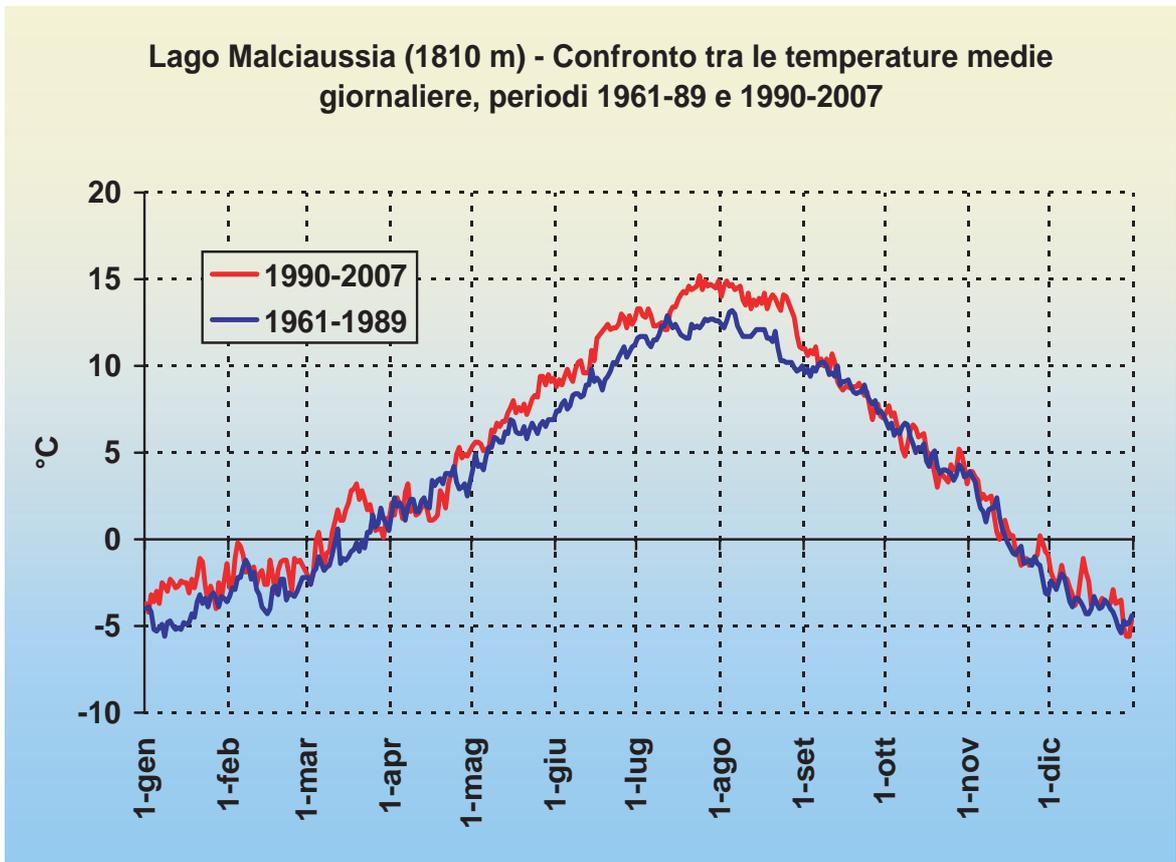
La stagione autunnale è invece quella al momento meno interessata dall'aumento termico.

Cuneo (565 m) - Confronto tra le temperature medie giornaliere, periodi 1961-89 e 1990-2007



Oropa (1181 m) - Confronto tra le temperature medie giornaliere, periodi 1961-89 e 1990-2007





Peschi in fiore a Lagnasco (CN), con il Monviso innevato sullo sfondo, il 06.04.2003, alla vigilia di una forte gelata che ha danneggiato le fioriture su vaste zone della pianura pedemontana saluzzese. Anche in un'atmosfera mediamente più calda, le gelate primaverili pericolose rimangono pur sempre possibili. Pochi mesi dopo si verificò l'estate più calda degli ultimi secoli.

Lago Sabbione (2450 m) - Confronto tra le temperature medie giornaliere, periodi 1961-89 e 1990-2007



maggio ad agosto, abbiamo registrato vistosi aumenti di temperatura rispetto al passato. Invece, per il momento, il riscaldamento appare più moderato in autunno.

Spostando lo sguardo all'area alpina del Piemonte, i risultati non cambiano sostanzialmente, e gli aumenti di temperatura nel periodo 1990-2007 sono confermati ovunque rispetto al 1961-89, specialmente presso le stazioni di Cuneo e Oropa. In particolare, in tutti i siti si notano forti aumenti, talora dell'ordine di 2-3 °C, nei giorni attorno al 20 marzo e tra la metà di luglio e la fine di agosto.



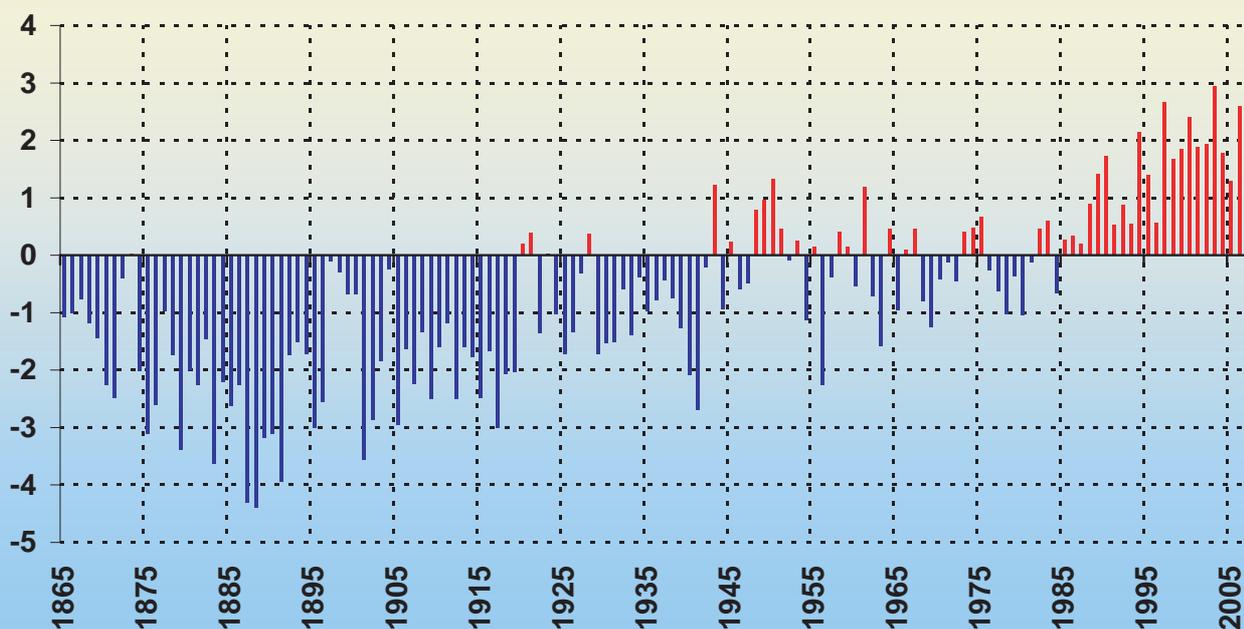
Indice regionale di anomalia termica calcolato utilizzando i dati di una selezione di 6 stazioni termometriche rappresentative del territorio piemontese (Torino, Moncalieri, Cuneo, Orapa, Vercelli). L'andamento è simile a quello riscontrato a livello globale, con il riscaldamento pronunciato dalla fine degli Anni 1980. Come già a Torino, anche nel resto della regione il 2007 si conferma l'anno più caldo della serie.

Selezionando le stazioni meteorologiche con serie termometrica più lunga e affidabile, è stato possibile elaborare l'**indice regionale di anomalia** (SAI = *Standardized Anomaly Index*) delle temperature medie (annuali e stagionali) per il periodo **dal 1865 al 2007**. Si tenga presente però che fino al 1931 erano attivi soltanto gli osservatori di Torino e Moncalieri, cui si aggiunse quello di Vercelli nel 1932 e quello di Cuneo nel 1951 (prima gli strumenti erano collocati in un altro sito non confrontabile). Nell'ultimo trentennio del XX secolo il numero di stazioni termometriche selezionate per questa elaborazione cresce fino a 6 unità. L'esame condotto sulle temperature medie annuali evidenzia una lunga fase fredda fino al 1920 circa, con ricor-

renti e accentuate anomalie negative rispetto alla media del trentennio di riferimento standard 1961-90.

In seguito, gli anni molto freddi divengono meno frequenti, e si alternano a sequenze di anni più caldi del normale, specialmente verso il 1950. L'eccesso termico del periodo 1943-1953, con un picco positivo nel 1950, è comune a molte serie termometriche sia alpine sia europee, ed è particolarmente evidente tra Valle d'Aosta e alto Piemonte. Una nuova fase mediamente più fresca si rileva nel periodo 1954-1984, poi **dalla metà degli Anni 1980 ha inizio una marcata tendenza al riscaldamento, tuttora in corso**, la più importante nel periodo qui considerato. Particolarmente anomali risultano il 1989, il

Piemonte - Indice di anomalia termica (SAI) annuale dal 1865 al 2007



Riepilogo delle variazioni di temperatura media stagionale e annua in alcune località del Piemonte.

L'incremento medio annuo a scala regionale risulta di 1.1 °C nel periodo 1990-2007 rispetto al 1961-1989. I valori registrati al Lago Toggia, più modesti rispetto alle altre stazioni, e tra i quali compare perfino una diminuzione nell'autunno, lasciano supporre una possibile disomogeneità nella serie termometrica. Per le stazioni di Cuneo e Oropa si è proceduto al calcolo delle variazioni anche per le temperature minime e massime: le prime sembrano avere un maggior peso nel riscaldamento a Cuneo, le seconde invece a Oropa.

1994 e tutto il periodo 1997-2007; il 2007 è stato l'anno complessivamente più caldo in Piemonte.

Variazioni stagionali: riscaldamento forte in inverno, primavera, estate; meno evidente in autunno

Nelle tabelle qui sotto sono riassunti gli incrementi medi di temperatura registrati stagione per stagione in alcune località oggetto di analisi, tra quelle ritenute più rappresentative. **L'autunno è la stagione con gli incrementi minori, pari a +0.3 °C a scala regionale** nel periodo 1990-2007 rispetto al 1961-89; al Lago Toggia compare perfino una lieve diminuzione (-0.3 °C), ma si tratta di un caso isolato, che lascia supporre una possibile disomogeneità nei dati. Le altre stagioni mostrano

riscaldamenti pari a +1.1 °C in inverno, +1.3 °C in primavera e +1.6 °C in estate. L'incremento termico primaverile di Cuneo appare come il più elevato: +2.5 °C.

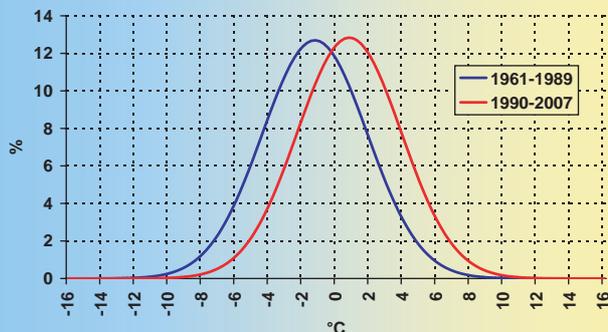
Complessivamente, **a livello annuale e regionale, il riscaldamento medio del periodo 1990-2007 rispetto al 1961-1989 è pari a +1.1 °C.**

Analizzando la variazione della **distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere** tra i periodi 1961-1989 e 1990-2007 a Cuneo e Oropa, si evidenzia in entrambi i casi un **aumento della temperatura in tutte le stagioni** (spostamento della curva rossa verso destra rispetto alla curva blu), **sia sulle minime sia sulle massime**, più evidente nella stazione a bassa quota, salvo il minore contributo dell'au-

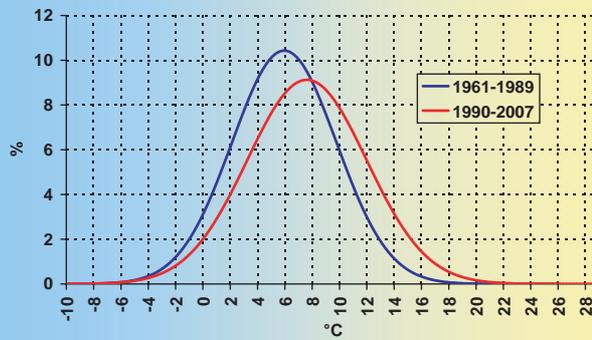
Riepilogo variazioni medie stagionali di temperatura nel periodo 1990-2007 rispetto al 1961-89 (°C)								
	Cuneo	Serrù	Malciaussia	Oropa	Sabbione	Toggia	Torino	Media regionale
INV	+1.9	+1.0	+1.0	+1.0	+1.2	+0.2	+1.1	+1.1
PRI	+2.5	+1.2	+0.9	+1.7	+1.4	+0.4	+1.1	+1.3
EST	+2.1	+1.7	+1.9	+1.3	+1.7	+1.2	+1.2	+1.6
AUT	+1.0	+0.2	+0.3	+0.5	+0.4	-0.6	+0.5	+0.3
ANNO	+1.9	+1.0	+1.0	+1.1	+1.2	+0.3	+1.0	+1.1

Riepilogo delle variazioni termiche stagionali (°C)																		
Stagione	Cuneo									Oropa								
	Tmin			Tmax			Tmed			Tmin			Tmax			Tmed		
	1961-1989	1990-2007	T															
INV	-1.3	0.8	+2.1	5.8	7.5	+1.7	2.3	4.1	+1.8	-2.1	-1.6	+0.5	2.6	4.1	+1.5	0.3	1.2	+0.9
PRI	5.5	8.0	+2.5	13.4	15.9	+2.5	9.5	12	+2.5	3.1	4.2	+1.1	8.7	11.1	+2.4	5.9	7.7	+1.8
EST	14.9	17.1	+2.2	23.5	25.5	+2	19.2	21.3	+2.1	11.7	12.5	+0.8	18.0	19.9	+1.9	14.9	16.2	+1.3
AUT	7.6	9.1	+1.5	15.1	15.7	+0.6	11.4	12.4	+1.0	5.5	5.7	+0.2	10.4	11.1	+0.7	7.9	8.4	+0.5
ANNO	6.7	8.8	+2.1	14.5	16.2	+1.7	10.6	12.5	+1.9	4.6	5.2	+0.7	9.9	11.6	+1.6	7.3	8.4	+1.1

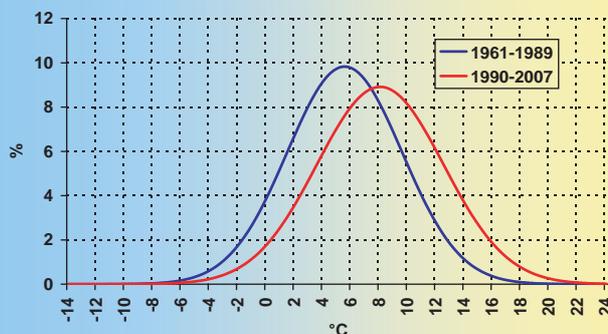
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature minime invernali nei periodi 1961-89 e 1990-2007



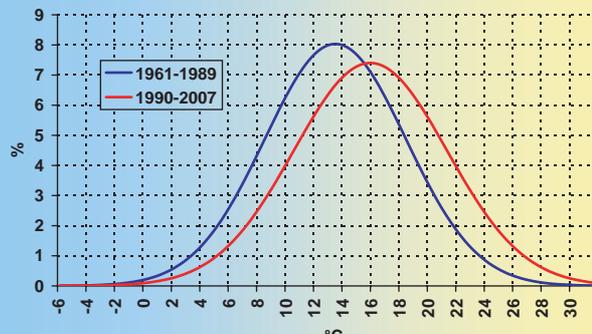
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature massime invernali nei periodi 1961-89 e 1990-2007



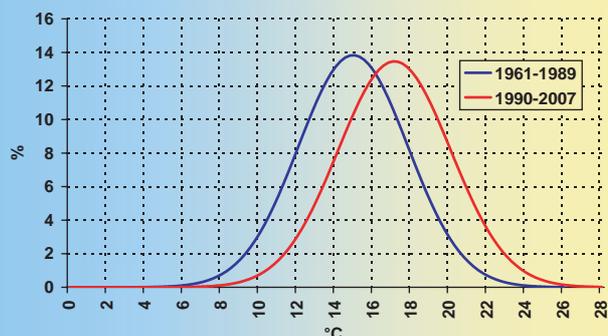
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature minime primaverili nei periodi 1961-89 e 1990-2007



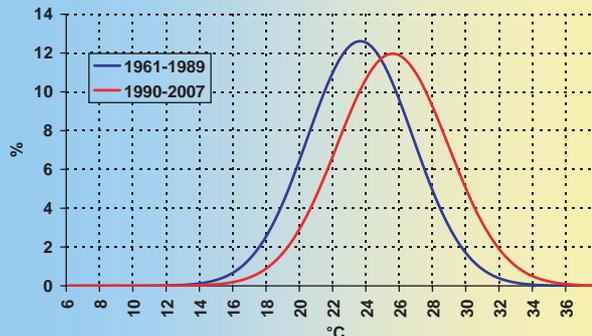
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature massime primaverili nei periodi 1961-89 e 1990-2007



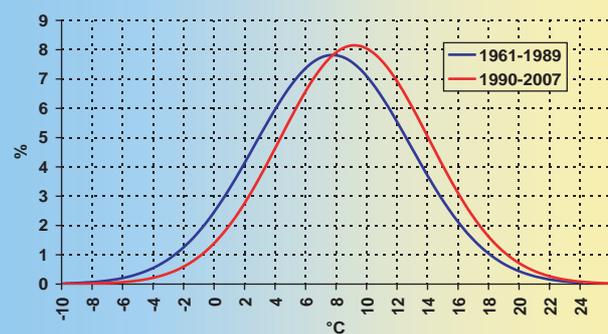
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature minime estive nei periodi 1961-89 e 1990-2007



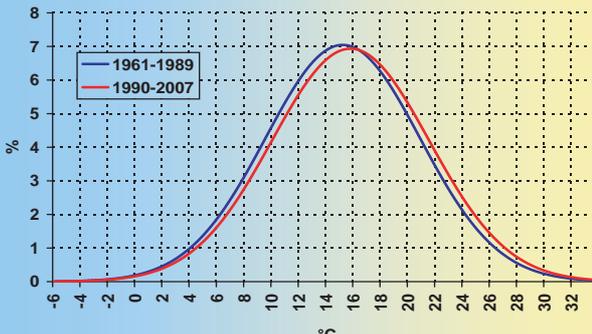
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature massime estive nei periodi 1961-89 e 1990-2007

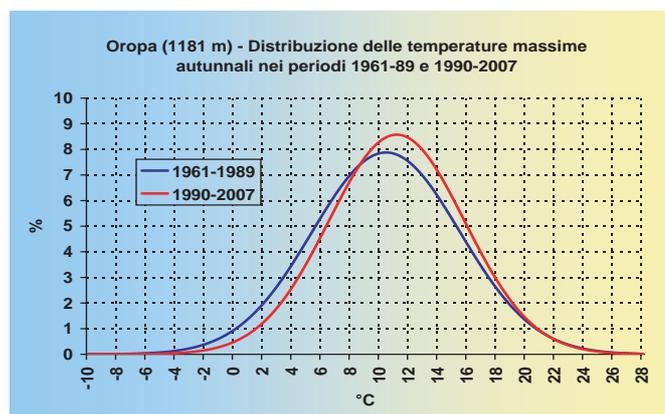
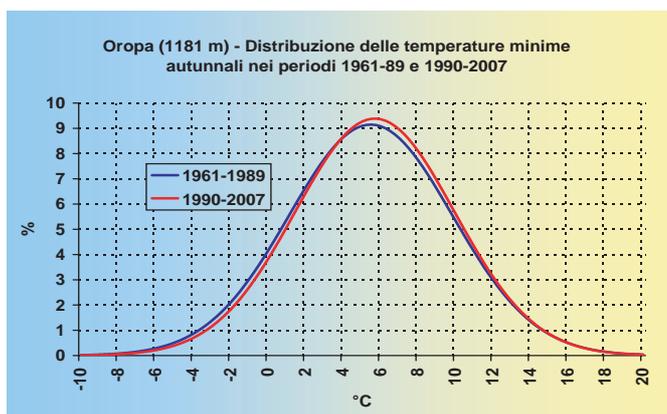
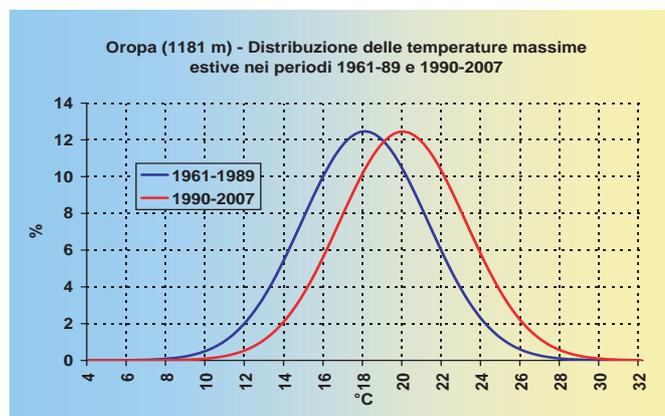
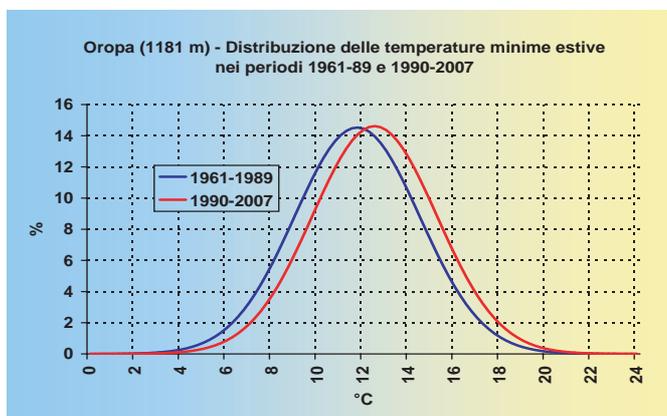
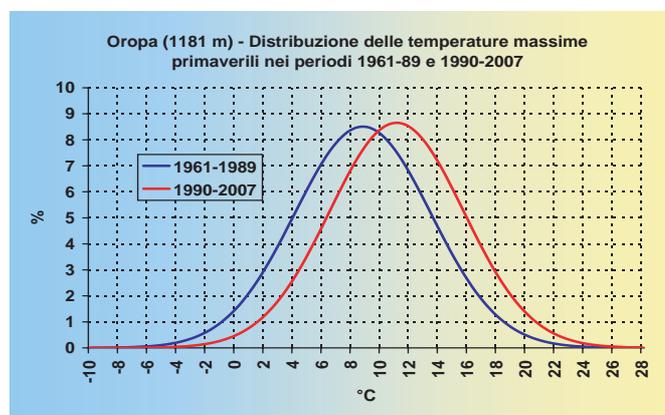
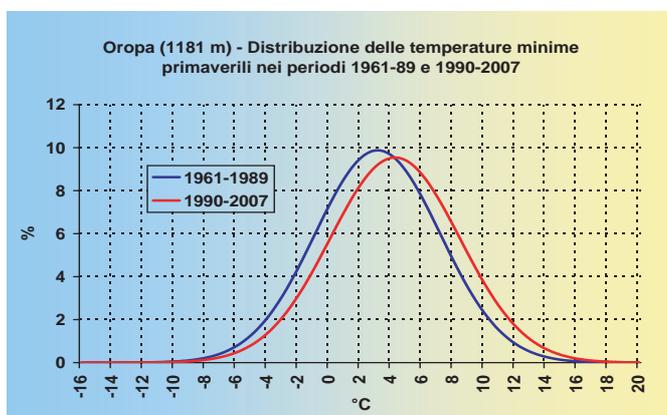
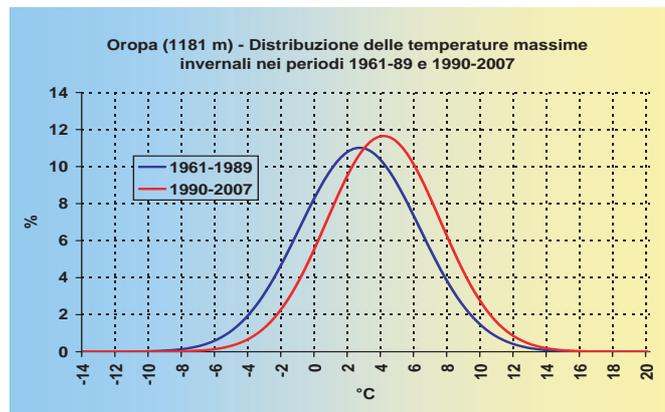
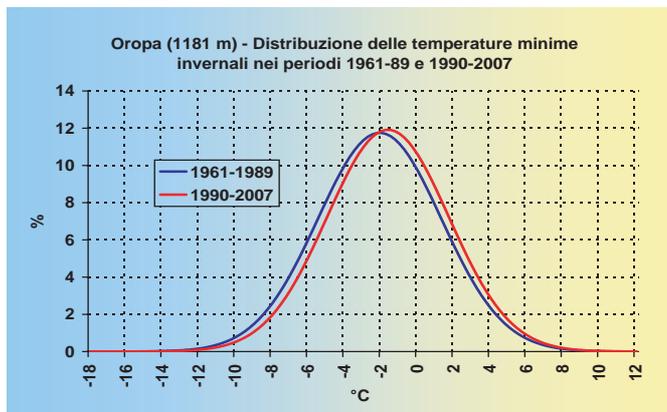


Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature minime autunnali nei periodi 1961-89 e 1990-2007



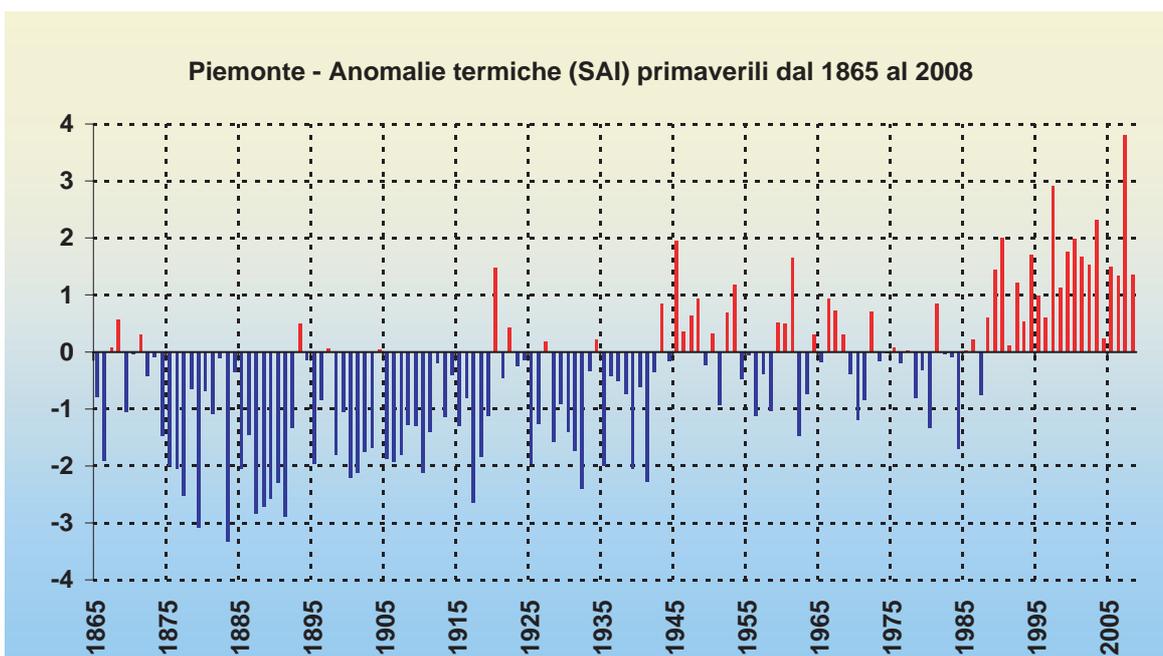
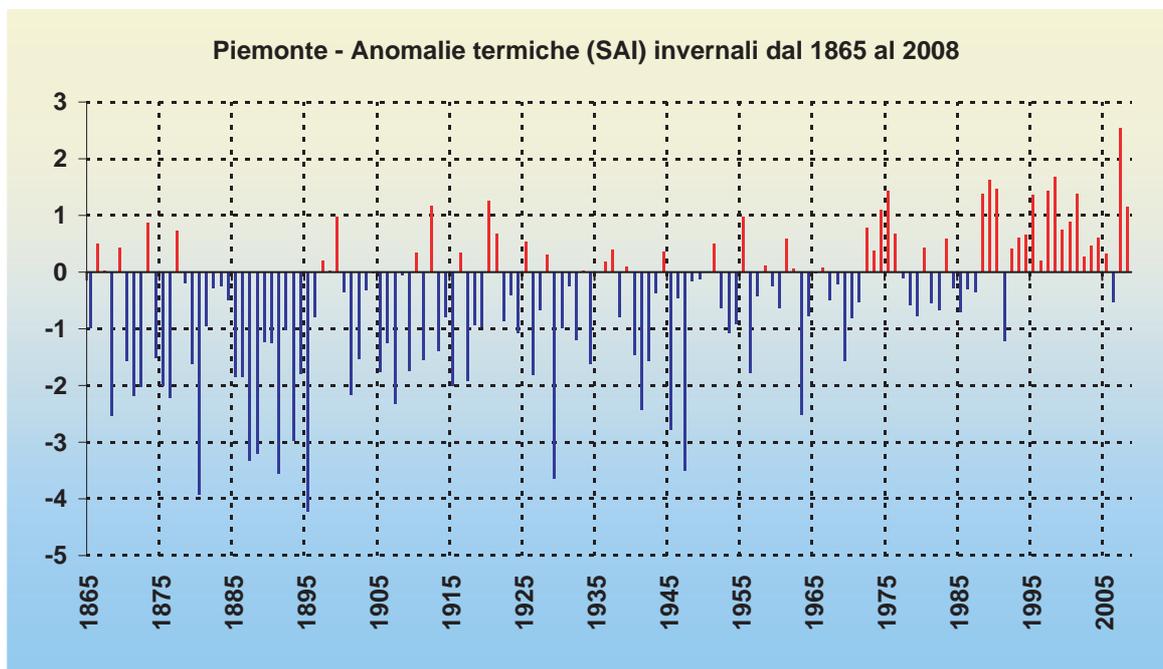
Cuneo (565 m) - Distribuzione delle temperature massime autunnali nei periodi 1961-89 e 1990-2007





Nelle pagine precedenti: grafici della distribuzione di frequenza (%) delle temperature minime e massime giornaliere nelle diverse stagioni, a Cuneo e Oropa, periodi 1961-1989 e 1990-2007. Ovunque si è registrato un aumento dei valori medi (spostamento della linea rossa verso destra), e in alcuni casi si è avuto anche un aumento della varianza del campione di dati (linea rossa più schiacciata), come ad esempio nelle temperature minime primaverili a Cuneo: ciò indica una maggiore dispersione dei valori, con forte aumento delle notti molto miti, ma senza la scomparsa delle notti primaverili fredde (nonostante la riduzione del numero di giorni di gelo).

A lato, indice regionale di anomalia delle temperature medie invernali e primaverili in Piemonte. Si conferma la tendenza già individuata a scala annuale. L'inverno più caldo di tutti è stato il 2006-07, subito seguito dalla primavera più calda (2007).



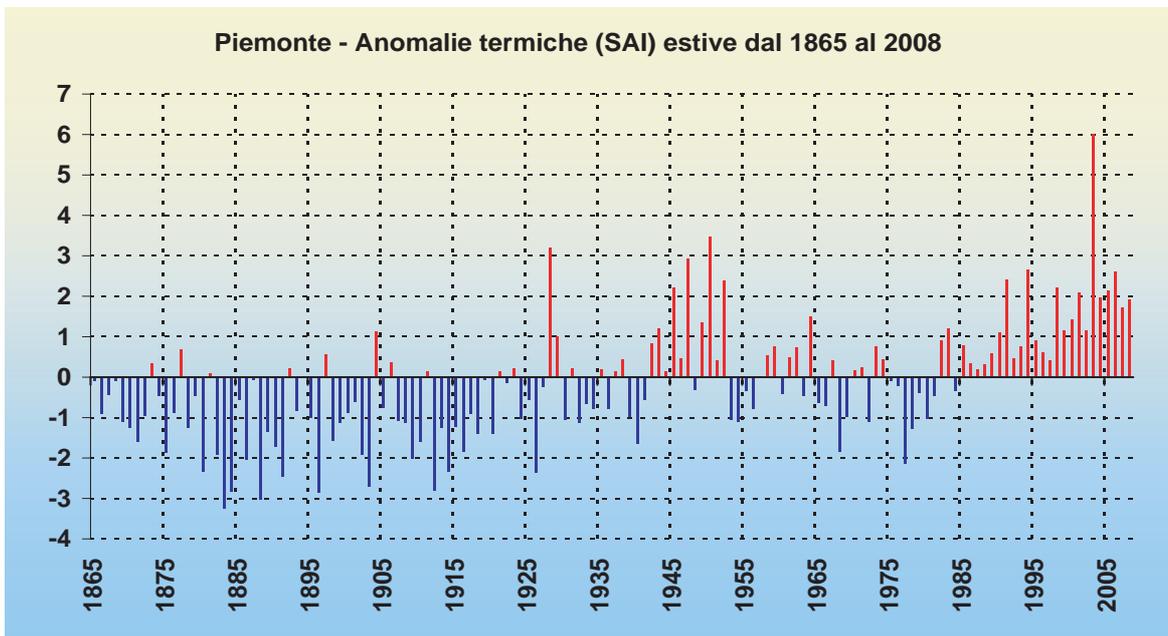
tunno che - come già indicato - per il momento mostra aumenti meno marcati.

A Cuneo gli aumenti più vistosi coinvolgono le temperature minime (dai +1.5 °C dell'autunno ai +2.5 °C della primavera), mentre **a Oropa sono le massime ad essersi riscaldate maggiormente** (dai +0.7

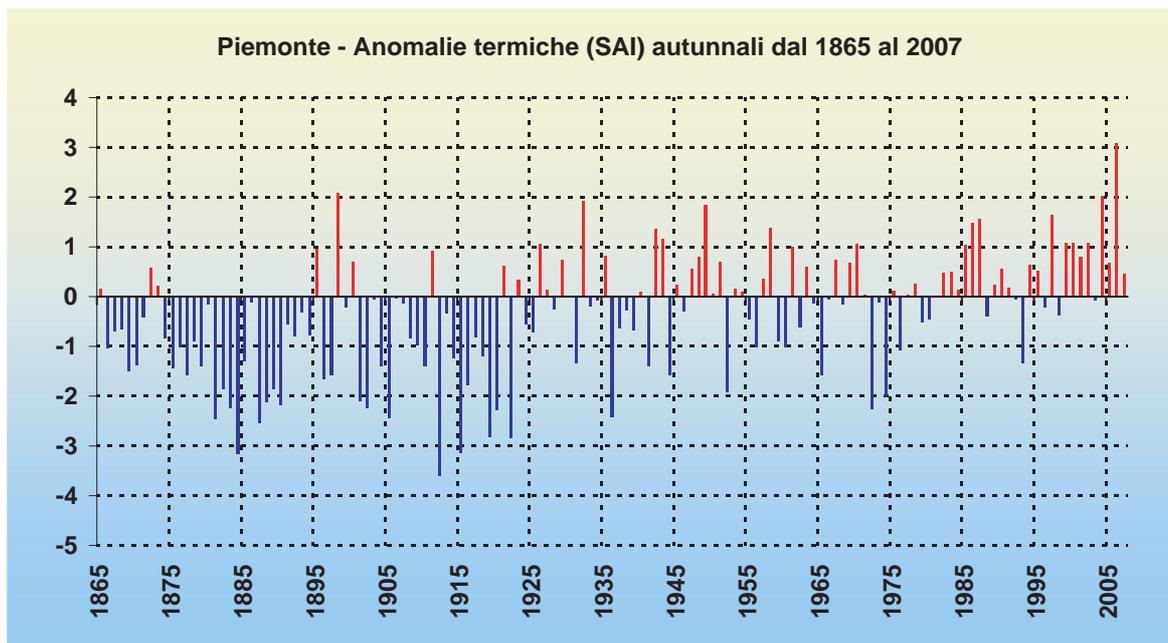
°C dell'autunno ai 2.4 °C della primavera). Interessante il caso della primavera. A Cuneo la temperatura media minima è cresciuta di 2.5 °C, dunque mediamente le notti primaverili sono più calde, tuttavia allo stesso tempo anche la **varianza** è aumentata, quindi la variabilità e la



Indice regionale di anomalia delle temperature medie estive e autunnali in Piemonte. Verso la metà del XIX secolo furono osservate alcune estati molto calde (1928, 1947, 1950, 1952), ma si trattò di casi relativamente isolati, alternati a stagioni più fresche. La tendenza al riscaldamento invece è netta dagli Anni 1990, ed è culminata per ora nell'eccezionale estate 2003.



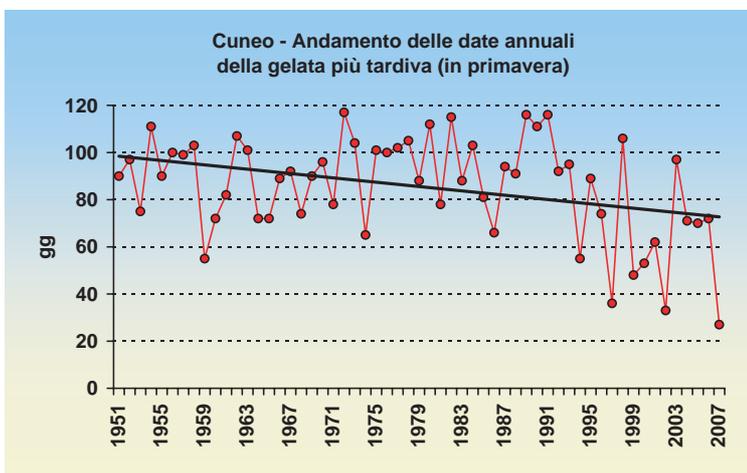
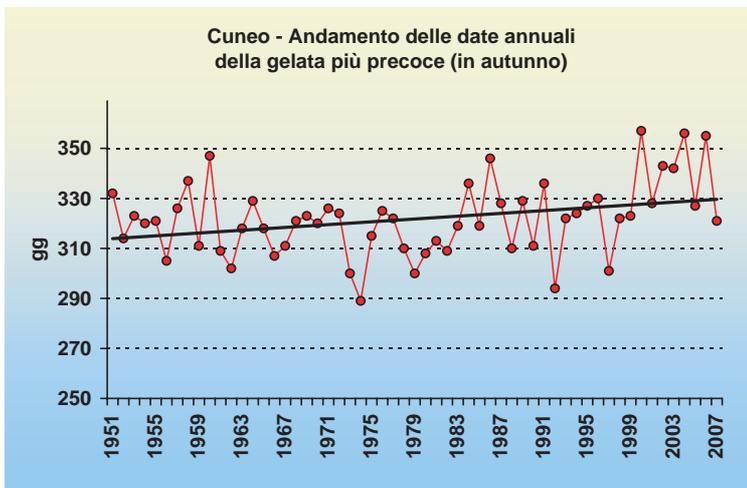
Anche in autunno la tendenza al riscaldamento è individuata, ma in modo più blando. Quello del 2006 è risultato il più mite dall'inizio della serie qui considerata, e anche su buona parte d'Europa tale stagione è stata eccezionale (LUTERBACHER et al., 2007; VAN OLDENBORGH, 2007).



dispersione dei valori che compongono il campione di dati (si noti la curva rossa, più «schacciata» di quella blu): ciò significa che, se **da un lato è aumentato nettamente il numero di notti miti** (settore destro della linea rossa), **dall'altro non sono scomparse le notti fredde con gelate** (settore sinistro della linea rossa), **ben-**

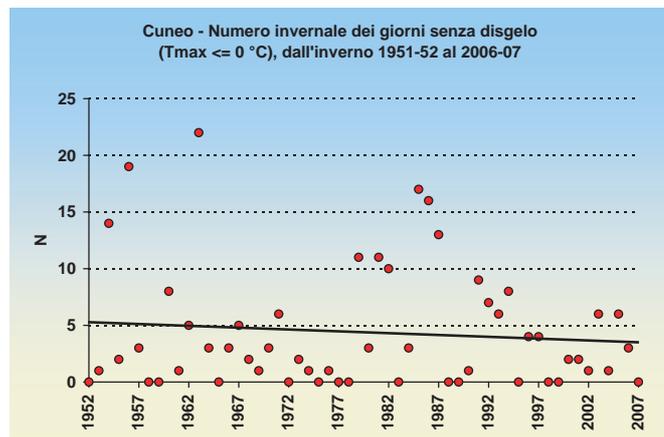
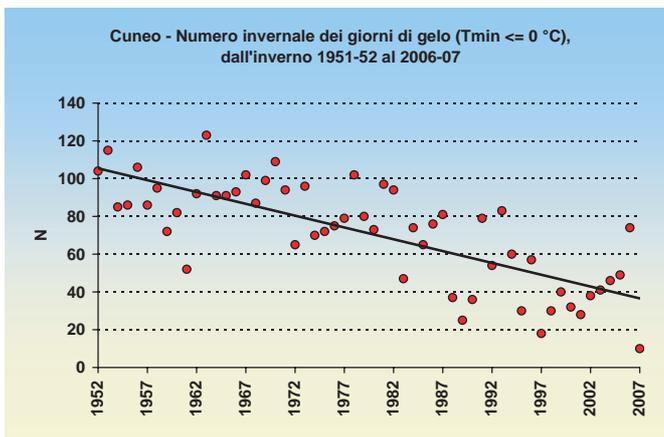
chè la loro frequenza sia comunque calata; questo fatto è da tenere presente in ambito agricolo, nella quantificazione del rischio gelo per le colture (vedi pag. 67-68).

Elaborando le serie delle **anomalie termiche stagionali** mediate su tutto il Piemonte dal 1865 al 2007, si nota il mede-



Via via che l'atmosfera si riscalda, il primo episodio di gelo della stagione tende a ritardare, mentre la fine dei geli a primavera anticipa. Tale tendenza è ben visibile dalle date della prima e dell'ultima gelata stagionale a Cuneo. Nel mitissimo inverno 2006-07, l'ultimo giorno con temperatura minima inferiore a 0 °C fu il 27 gennaio, caso più precoce di fine della stagione del gelo.

Sempre a Cuneo, è in diminuzione il numero annuo sia di giorni con gelo (temperatura minima <= 0 °C) sia di giorni senza disgelo (temperatura massima <= 0 °C). Dall'inverno 1986-87 non è più accaduto di registrare più di 10 giorni senza disgelo, fatto piuttosto frequente prima di allora.



simo andamento di fondo già descritto per le anomalie annue. Precisiamo soltanto che, a livello regionale, **l'autunno più caldo di tutti è stato quello del 2006, seguito pure dall'inverno (2006-07) e dalla primavera più caldi (2007)**: si è trattato di una sequenza di anomalie di eccezionale portata, che ha interessato tra la fine del 2006 e la metà del 2007 buona parte dell'Europa. Nel dicembre 2006 si sono osservate fioriture di tarassachi e rododendri sulle Alpi, talora fino a quota 1500 m, e l'inverno 2006-07 è stato pure il meno nevoso da quasi un secolo sulle Alpi occidentali.

Per quanto riguarda l'**estate**, si conferma invece il **primato assoluto del 2003**, seguito dai casi del 1950, 1928, 1947 e 1994 (CASSARDO et al., 2007).

Si riduce la stagione dei geli

E' possibile mettere in luce il recente riscaldamento analizzando anche, per ciascun anno, le **date della gelata più precoce** (in

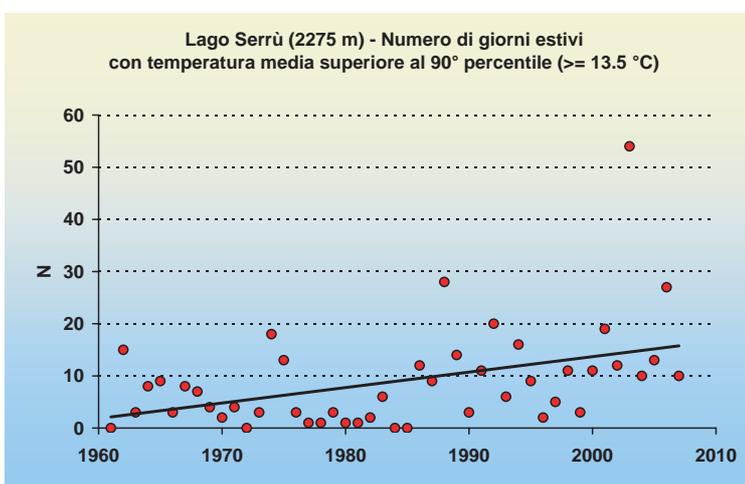
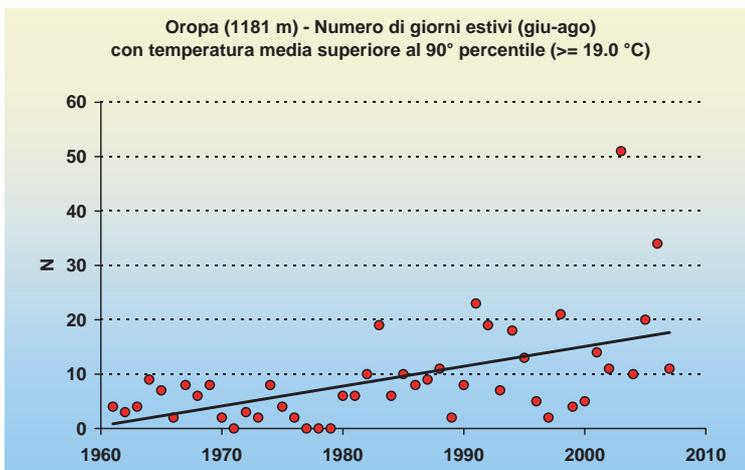
autunno) e **più tardiva** (in primavera). Un giorno viene considerato come «di gelo» qualora abbia registrato una temperatura minima pari o inferiore a 0 °C.

Prendendo come riferimento la stazione di **Cuneo**, le variazioni sono marcate: fino all'inizio degli Anni 1990 le date di prima e ultima gelata della stagione hanno oscillato irregolarmente senza delineare alcuna tendenza, dopodiché si è osservato un progressivo **ritardo nell'avvio dei geli autunnali, e un anticipo nella fine dei geli primaverili**. Nel periodo considerato, dal 1951 al 2007, la gelata più precoce in

assoluto è stata quella del 16 ottobre 1974, mentre quella più tardiva si è verificata il 26 aprile 1972, a seguito dell'anomala nevicata di 5 cm del giorno 25. Si tenga presente però la posizione dell'osservatorio, che - nel periodo omogeneo 1951-2007 - è sempre stato collocato in cima ad alti edifici in centro città, dove le temperature minime possono essere anche di 2÷4 °C più elevate rispetto alle basse campagne circostanti. E' quindi verosimile che, fuori città, si siano verificate gelate anche al di fuori dei periodi qui indicati.

09.03.2008, formazione ghiaccio e galaverna a Ceresole Reale (Valle Orco) a seguito dell'afflusso di aria fredda dal Nord Europa.





Oltre all'aumento della temperatura media, si è osservata anche una maggiore frequenza dei giorni estivi estremamente caldi, individuati dalla soglia del 90° percentile applicata alle temperature medie giornaliere (valore al di sopra del quale si trova il 10% dei dati che compongono il campione di misure).

Viceversa, in anni più recenti si sono avute sia la prima gelata autunnale più tardiva (22 dicembre 2000), sia l'ultima primaverile più anticipata (27 gennaio 2007, in realtà ancora in pieno inverno, almeno teoricamente...).

Anche il **numero dei giorni di gelo** ($T_{\min} \leq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) è **nettamente diminuito**, ancora una volta **soprattutto a bassa quota**. A Cuneo si è passati dai circa 90 giorni di gelo degli Anni 1950, ai circa 40 degli Anni 2000. **Più in quota tale evoluzione**, pur presente, è **meno vistosa**: a Oropa la media

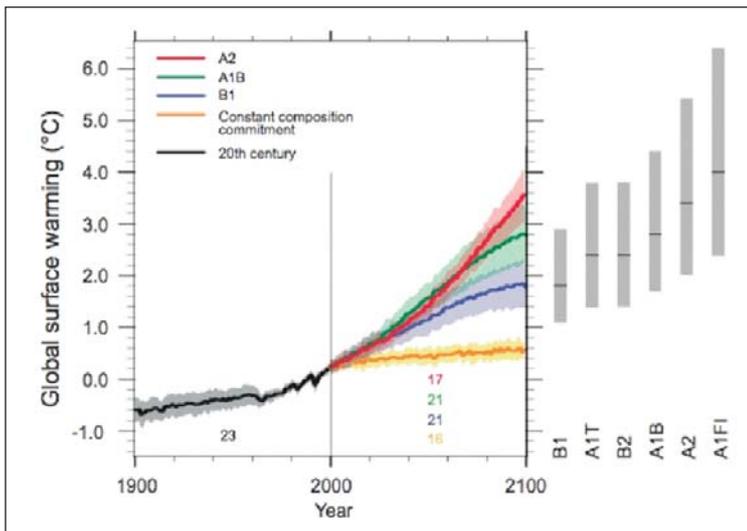
è scesa da 115 giorni di gelo/anno negli Anni 1960 a circa 80 giorni/anno nelle stagioni più recenti.

Frequenza delle temperature estreme massime

All'aumento delle temperature medie appena descritto, si accompagna anche una **maggiore frequenza di temperature molto elevate**. Questa tendenza, più avvertita dalla popolazione in estate in occasione di intense ondate di caldo, in realtà è diffusa in tutte le stagioni (di meno, come già detto, in autunno).

Si sono conteggiati, per le stazioni di Oropa (1181 m) e Lago Serrù (2275 m), i giorni estivi la cui temperatura media (calcolata come $(T_{\min} + T_{\max})/2$) ha raggiunto o superato la **soglia del 90° percentile**, ovvero il valore di temperatura oltre il quale si trova soltanto il 10% dei casi che compongono il campione di dati, e che in sostanza rappresenta il sottoinsieme degli episodi di caldo molto anomalo. Tali soglie sono rappresentate dai valori di temperatura media giornaliera di $19.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a Oropa e $13.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ al Lago Serrù.

La distribuzione dei casi nell'ambito del periodo 1961-2007 mostra, in entrambe le località, un **vistoso aumento delle giornate estive molto calde**. Sia a Oropa, sia al Serrù, il massimo stagionale di episodi è stato raggiunto nel 2003, con rispettiva-



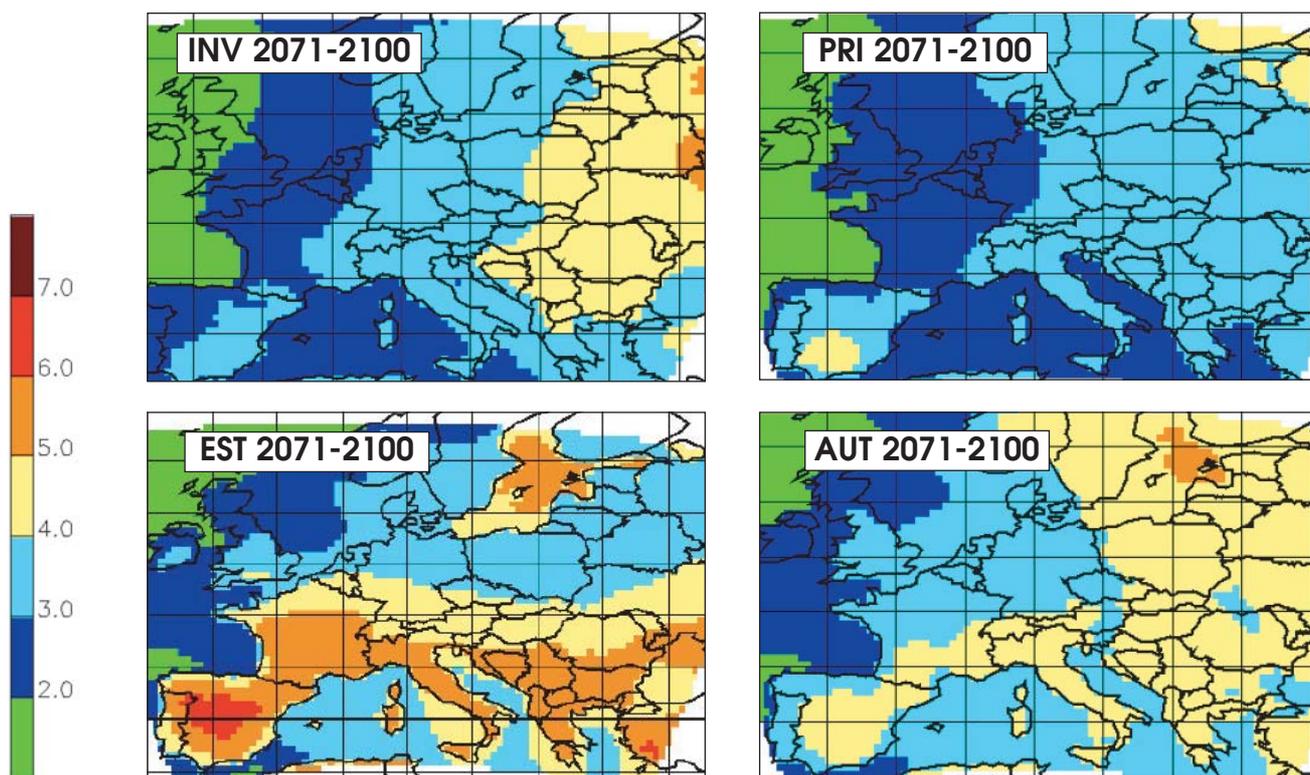
Sopra: le previsioni sul clima futuro sono basate su differenti scenari di emissione di gas serra, che tengono conto dello sviluppo tecnologico e socio-economico dell'umanità. Secondo il IV rapporto IPCC (2007), che costituisce attualmente la fonte più aggiornata e autorevole sul tema dei cambiamenti climatici, la temperatura media globale potrebbe aumentare, entro il 2100, di 1.8 ÷ 4.0 °C rispetto ai livelli del 1990, a seconda degli scenari di emissione considerati. Tuttavia, non si può escludere l'eventualità che il riscaldamento possa essere più intenso, fino a 6 °C.

Sotto: 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 °C rispetto al 1990, verso la fine del XXI secolo.

mente 51 e 54 giorni che hanno superato la soglia termica del 90° percentile. E, a breve distanza di tempo, l'estate 2006 si è collocata rispettivamente in seconda e terza posizione, con 34 e 27 giorni, specialmente per il contributo di un mese di luglio eccezionalmente caldo. E' il caso di segnalare come in diverse stagioni estive tra gli Anni 1960 e 1980 la soglia non venisse raggiunta, come ad esempio nel 1971, 1977, 1978 e 1979 a Oropa, e nel 1961, 1972, 1984 e 1985 al Lago Serrù. Recentemente non è mai più accaduto.

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

L'IPCC, nel quarto rapporto del 2007, ha individuato una famiglia di **scenari futuri**

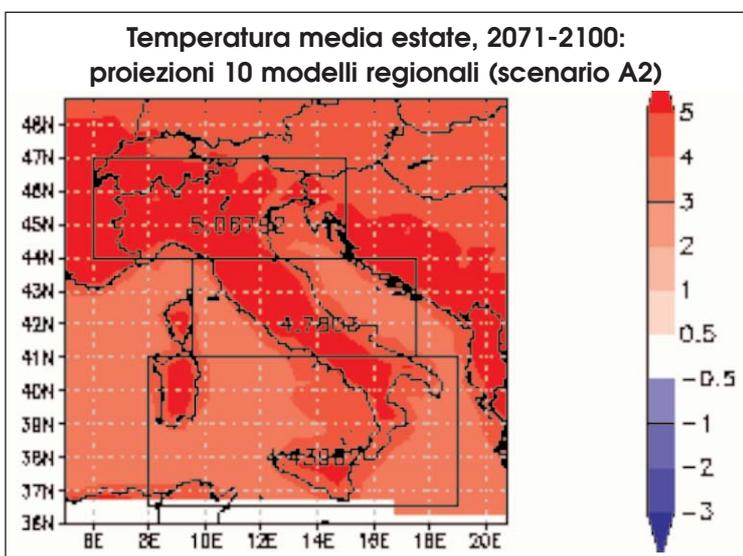
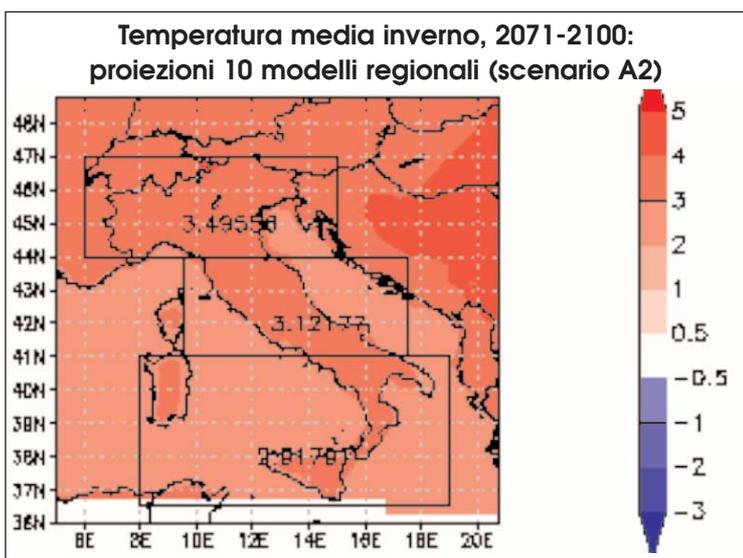


Previsione aumento temperature medie stagionali secondo diversi livelli di probabilità (da Progetto Prudence, in Frei, 2004)

	Prob.	0.025	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.975
Svizzera Sud	<i>Inv</i>	0.9	1.1	1.3	1.8	2.3	2.6	3.1
	<i>Pri</i>	0.9	1.1	1.3	1.8	2.4	2.8	3.3
	<i>Est</i>	1.5	1.9	2.2	2.8	3.7	4.1	4.9
	<i>Aut</i>	1.2	1.4	1.7	2.2	2.8	3.1	3.7

Sopra: 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.

Sotto: le proiezioni di 10 modelli a scala regionale basati sullo scenario A2 prospettano evoluzioni analoghe, con ulteriore riscaldamento verso la fine del secolo (2071-2100): sul Nord Italia, circa +3.5 °C in inverno e +5 °C in estate (fonte: Abdus Salam ICTP/Trieste - cortesia Filippo Giorgi).



che si traducono in un **aumento di temperatura globale previsto tra 1.8 °C e 4.0 °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. Nella tabella in alto 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 il Canton Ticino siano applicabili anche alla vicinissima regione piemontese, che è influenzata dai medesimi regimi climatici, 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

Vigneti ad Anzuno, presso Domodossola (19.10.2002). La coltura della vite potrebbe trovare sulle Alpi condizioni future più favorevoli.



Solo in parte l'aumento delle temperature potrà favorire maggiori produzioni agricole, poiché l'aumento della siccità estiva e l'arrivo di nuovi parassiti potranno al contrario penalizzare i raccolti.

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'au-

mento 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 POTRÀ CAMBIARE SULLA MONTAGNA PIEMONTESE: 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 montano del Piemonte. Per ciascuno di questi verranno individuate anche possibili strategie di mitigazione dell'impatto, di adattamento, e anche eventuali opportunità 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 delle Alpi piemontesi.

Potenziali effetti positivi / opportunità:

- Maggiori rese 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

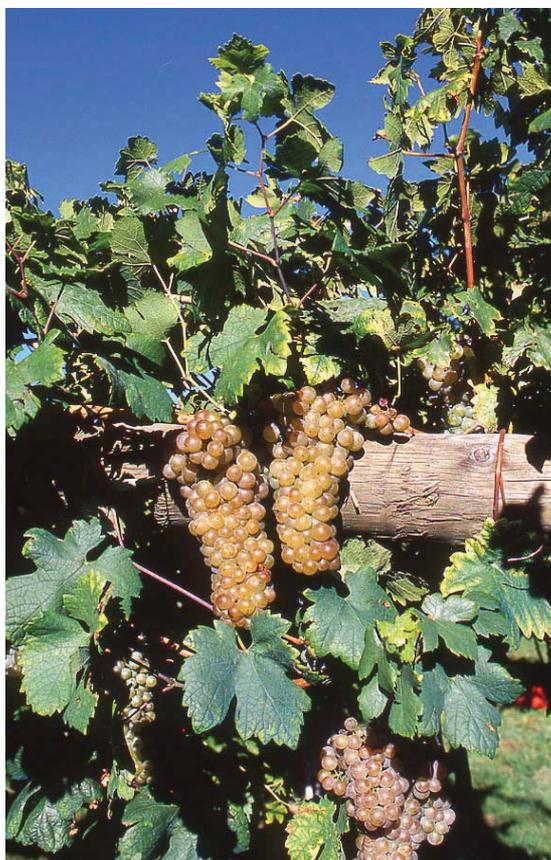
agricoltori ad anticipare le semine, esponendo così le colture a maggiore rischio in caso di eventi estremi - pur sempre possibili - benché in media il clima sia più mite. Le gelate invernali non hanno importanza per l'agricoltura alpina, giacché le piante locali sono ben adattate a valori termici molto 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 -16 °C a Oropa). Nemmeno le gelate precoci sono in grado di recare danni importanti, piuttosto sono assai temibili quelle tardive in primave-

ra. 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

Grappoli di uva «Erbaluce» sulle colline di Sant'Anna dei Boschi, presso Castellamonte (TO), durante la vendemmia del settembre 2004.





La produzione estiva di foraggio potrebbe risentire in futuro della minore disponibilità estiva di acqua, aggravata dalle temperature più elevate e dalla maggiore evapotraspirazione. Inoltre, alcuni studi prospettano una diminuzione della qualità dei foraggi all'aumentare della temperatura.

Sopra: vacche al pascolo a Bussoleno, Valle di Susa.

con un anticipo delle date dell'ultimo episodio con $T_{min} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ negli anni recenti (pag. 71), ma la situazione è complicata dalla difficile prevedibilità di numerosi fattori locali. Tuttavia, per le ragioni esposte sopra (anticipo del 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 recente 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 non si misurava-

no da almeno 30 anni; a Rosone in Valle Orco la temperatura minima è scesa fino a $1 \text{ } ^\circ\text{C}$, non era mai accaduto in giugno dal 1938. Questo dimostra che, **anche in epoca di riscaldamento globale, gli estremi di freddo possono comunque manifestarsi.**

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 Piemonte (DEFILA & CLOT, 2001, in AA.VV, 2003).

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 alpina 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 le valli alpine sono più favorite

La modificazione delle condizioni termiche 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 **montagna piemontese** si trovi in una **situazione privi-**

Nonostante il previsto aumento di frequenza di ondate di calore estremo, dal punto di vista sanitario le valli montane piemontesi potranno trovarsi in una situazione più avvantaggiata in futuro rispetto alla pianura, grazie alla quota più elevata e alla vivace ventilazione tipica dei pomeriggi estivi. A lato, i rilievi delle Alpi Liguri in alta Valle Tanaro, il 23.05.2003.



legiata sotto questo aspetto, **per l'elevata altitudine media e per la presenza di vivaci brezze termiche pomeridiane** (che lungo le valli spirano con velocità talora di 30÷40 km/h) in grado di portare ampio sollievo anche nelle giornate dal caldo più intenso.

- 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 (allergie)**.

- L'aumento termico previsto potrà favorire lo spostamento verso Nord e verso quote più elevate degli areali di **insetti parassiti e vettori di patogeni** prima sconosciuti in zona, verso i quali le comunità locali non hanno ancora sviluppato la naturale resistenza.

Già negli ultimi anni si è registrato un forte aumento dei casi di **leishmaniosi del cane**, parassitosi causata da un protozoo (*leishmania*) trasportato dai flebotomi (pappataci), insetti amanti del caldo in passato pressoché assenti in Piemonte, e ora frequentemente segnalati anche

Il fondovalle del Toce presso Domodossola visto da Anzuno, il 19.10.2002.



nelle valli alpine.

Strategie di mitigazione e adattamento:

Nonostante le condizioni ambientali privilegiate del settore montuoso, 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).
- 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 montagna!

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).

Potenziali effetti positivi / opportunità:

- La montagna piemontese come «riserva» di frescura. **Maggiore afflusso turistico estivo da pianure e città verso le temperature più sopportabili dei rilievi.** Condizioni favorevoli per il lancio di nuovi slogan turistici come: *«Venite a cercare il fresco sulle montagne del Piemonte!»*.
- Possibilità di insediamento temporaneo, in prevalenza estivo, di attività professionali favorite dal **telelavoro** (giornalisti, artisti, scrittori, progettisti, professionisti in genere), 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'escursio-



Anzuno, presso Domodossola, autunno nei boschi il 19.10.2002.

nismo, agriturismo, equitazione, turismo culturale.

- 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:

- **Carenza frequente e prolungata di innevamento sui comprensori sciistici** a quota inferiore per nevicata più rare e fusione più rapida del manto (cfr. cap. neve).
- **Regresso dei ghiacciai** con perdi-

ta di attrazione turistica da parte dell'alta montagna (ma al tempo stesso, luoghi dove i processi di deglaciazione sono particolarmente significativi, come sulla parete Est del Monte Rosa, a Macugnaga, si aprono potenzialità di turismo scientifico e didattico proprio dedicate al riscaldamento globale).

- **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 esternalità negative.

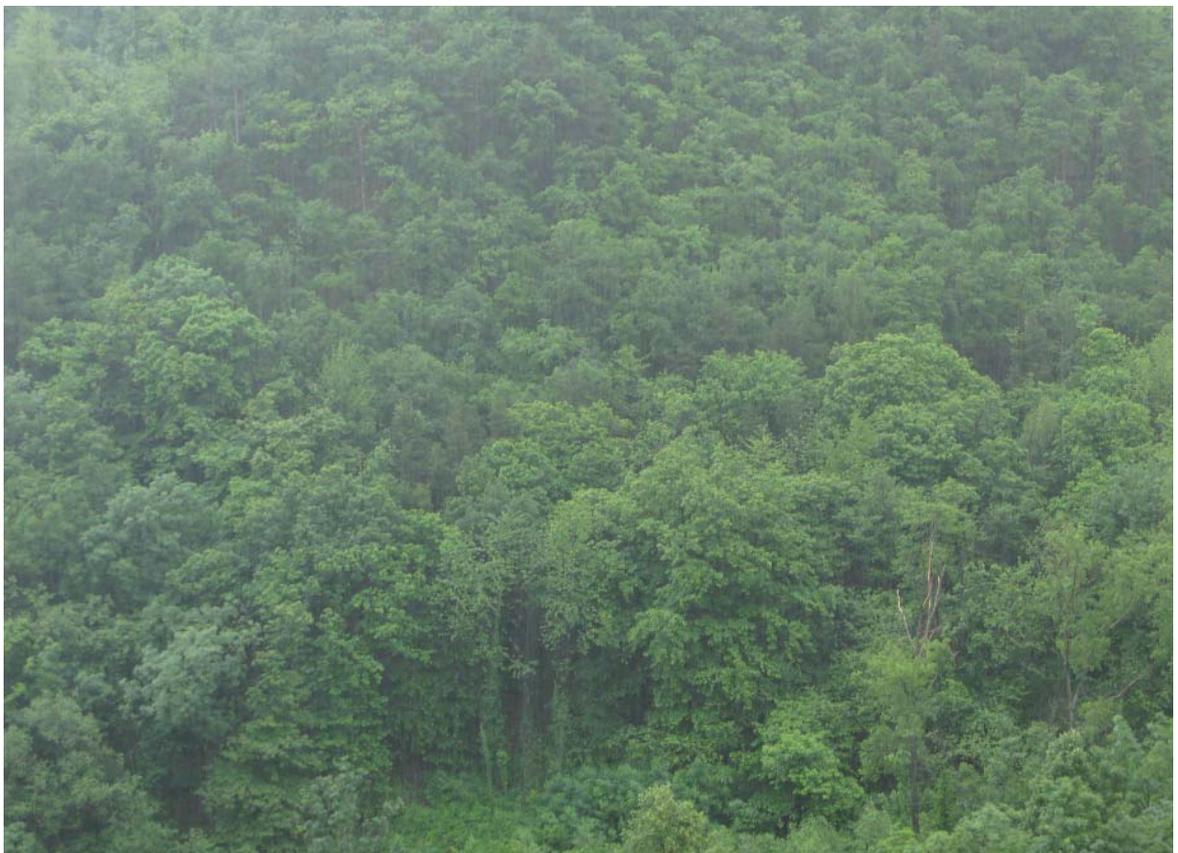
- Ove non sostenibile/conveniente il mantenimento degli impianti di innevamento programmato, è necessaria una progressiva **conversione delle attività turistiche** in vista di nuove condizioni climatiche, slegandosi per quanto possibile dalla «monocultura» dello sci di pista, privilegiando il più possibile 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 di temperatura 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 indurre sulle piante forestali. 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 complica-

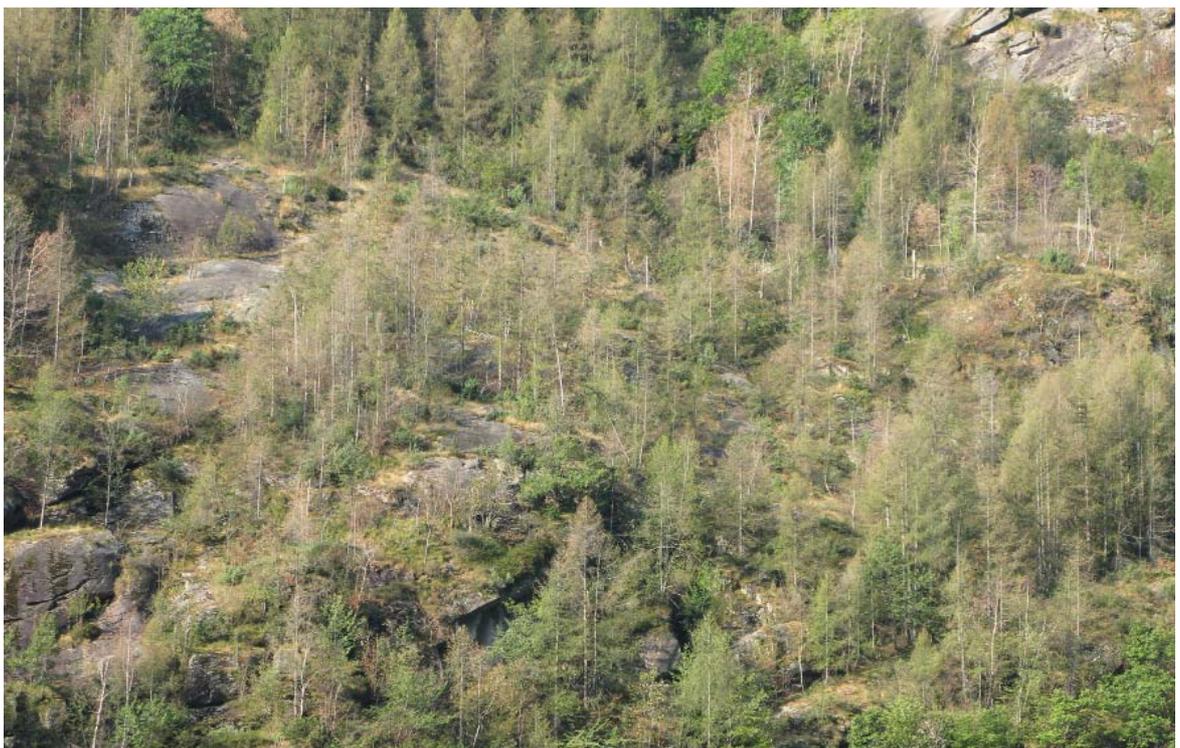
I boschi dell'Inverso di Bussoleno (Val di Susa), 30.05.2008. Lo stress fisiologico dovuto a eccesso di calore e scarsa disponibilità idrica estiva potrà mettere in crisi vaste porzioni di foresta alpina, come peraltro già osservato in Piemonte durante le recenti estati - molto calde - del 2003 e del 2006. Abete bianco, frassino, betulla e farnia sono alcune tra le specie più sensibili.



ta dalle possibili interazioni con altri inquinanti di origine antropica: si è visto ad esempio che l'ozono (O_3) reca danni agli alberi, e può compromettere i potenziali effetti positivi sull'accrescimento dati dall'aumento di CO_2 (KARNOSKY & al., 1999; ISEBRANDS & al., 2001). Ma più che altro, a mettere in difficoltà vaste porzioni di bosco in Piemonte 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**

capacità 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 (CESTI & CONEDERA, 2007). Si può concludere che gli

Effetti della siccità estiva su bosco misto di latifoglie e larice in Valle Orco, presso Noasca, visti il 15.08.2007.





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 piemontese, sebbene gli aumenti di temperatura 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 della montagna piemontese. 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 e 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 aliene, 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 estinguendosi 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 manifestare 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

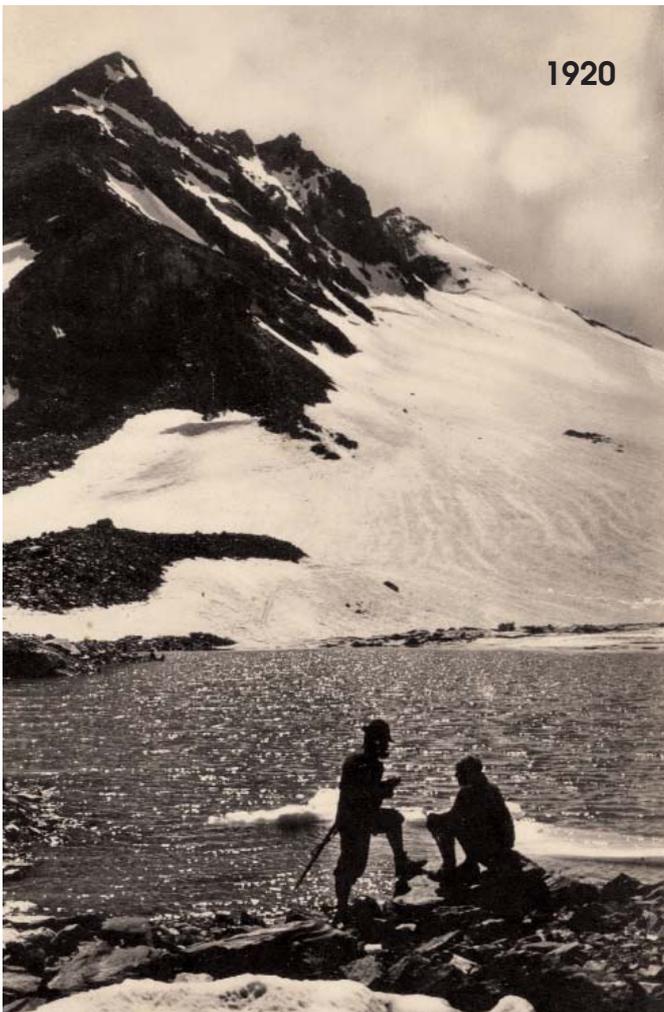
minacciate severamente di estinzione per aumenti termici di 3÷4 °C, in quanto verrebbe a mancare un ambiente più freddo a quote superiori quale rifugio per la migrazione (THEURILLAT & al., 1998). Dai risultati del progetto ATEAM (*Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling*) del *Potsdam Institute 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). In Europa sarebbe maggiormente a rischio proprio la biodiversità delle zone di transizione dai climi mediterranei a quelli euro-siberiani (LAVOREL S., THULLER W., ARAÚJO M. B., in AA.VV., 2005; LOH J., 2008).

Lo straordinario regresso del ghiacciaio dell'Agnello (Valle di Susa) tra il 1920 (a sinistra, coll. Casserin) e il 2003 (a destra, f. M. Tron).

6) Ghiacciai: riduzione massiccia nei prossimi decenni

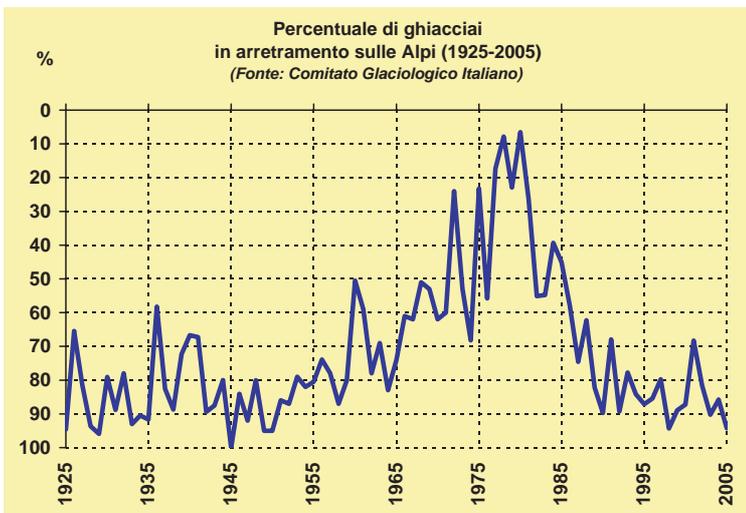
Sulle Alpi, il forte arretramento dei ghiacciai costituisce uno degli effetti più visibili del riscaldamento atmosferico, ed è diret-



1920



2003



Sopra: percentuale di ghiacciai italiani in regresso dal 1925 al 2005. Salvo la temporanea fase di avanzata degli Anni 1970 - inizio Anni 1980 (solo 7% dei ghiacciai in ritiro nel 1980), dovuta a estati fresche e nevose in alta quota, dominano di gran lunga gli arretramenti, che nel 2005 hanno riguardato il 94% dei ghiacciai osservati dagli operatori del Comitato Glaciologico Italiano.

A lato: serie delle variazioni frontali annue e cumulate al ghiacciaio Ciardoney (Val Soana, Gran Paradiso): dal 1971 al 2007 la fronte si è ritirata di 315 m, con regresso fino a 28 m nel 2003.

tamente percepito dalla popolazione e dai frequentatori della montagna.

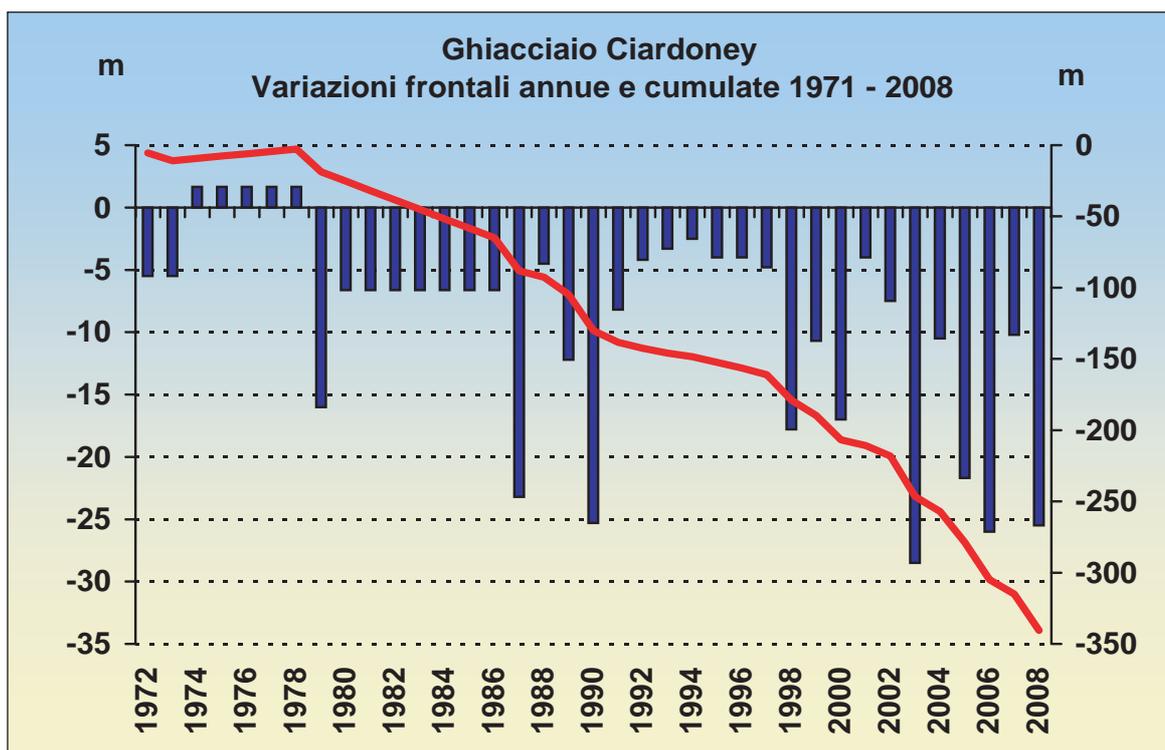
Tra il 1820 e il 1850 sulle Alpi culminava la Piccola Età Glaciale, un periodo fresco e nevoso iniziato attorno al 1350. In questa fase, ben documentata dalle cronache storiche e dalle opere d'arte, i ghiacciai hanno raggiunto la loro massima estensio-

ne degli ultimi 10.000 anni.

In seguito, l'aumento delle temperature e la diminuzione della nevosità invernale ha avviato un **forte arretramento glaciale, tuttora in corso e in fase di accelerazione proprio in questi anni.**

Nel 1850 la totalità dei ghiacciai alpini copriva circa 4500 km² di territorio, mentre nel 2000 tale superficie era scesa a circa 2270 km², con una **perdita areale pari al 50%** circa. Da studi effettuati in Canavese e in Valsesia (MERCALLI & CAT BERRO, 2005; PICCINI, 2007), anche sulle Alpi piemontesi sono confermate riduzioni del medesimo ordine di grandezza.

In Italia i ghiacciai sono poco meno di 1000 (uno solo in Appennino, il piccolo ghiacciaio del Calderone, sul Gran



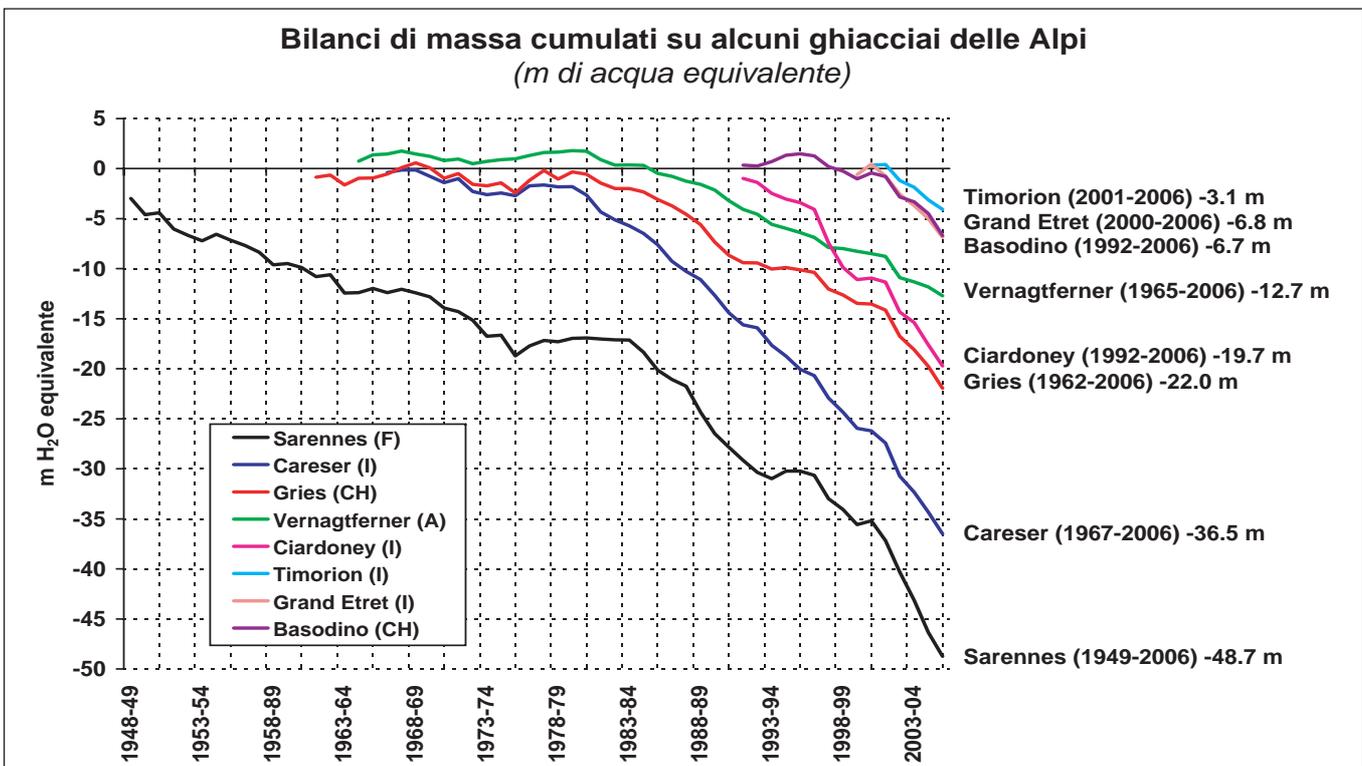


Sopra, misure di spessore e densità del manto nevoso a fine primavera sul ghiacciaio Ciardoney, tramite il prelievo e la pesatura di campioni di neve con tubo carotiere (maggio 2002). Misure SMHRIDE Energia.

Sasso), e - di questi - ogni anno circa 200 vengono controllati dagli operatori del Comitato Glaciologico Italiano (istituito nel 1895). Il grafico a pag. 87 in alto mostra la percentuale annua dei ghiacciai in regresso dal 1925 al 2005 in Italia: salvo la temporanea fase di avanzata

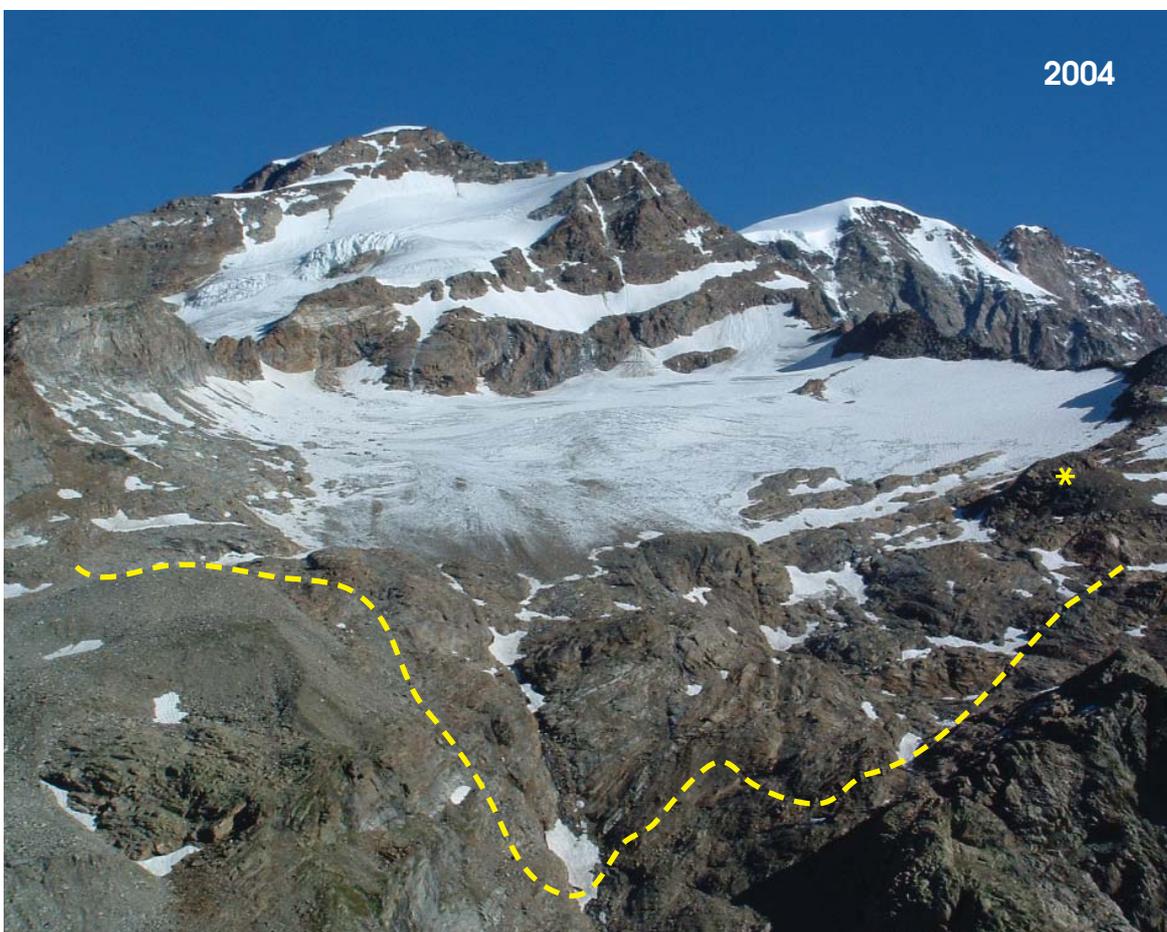
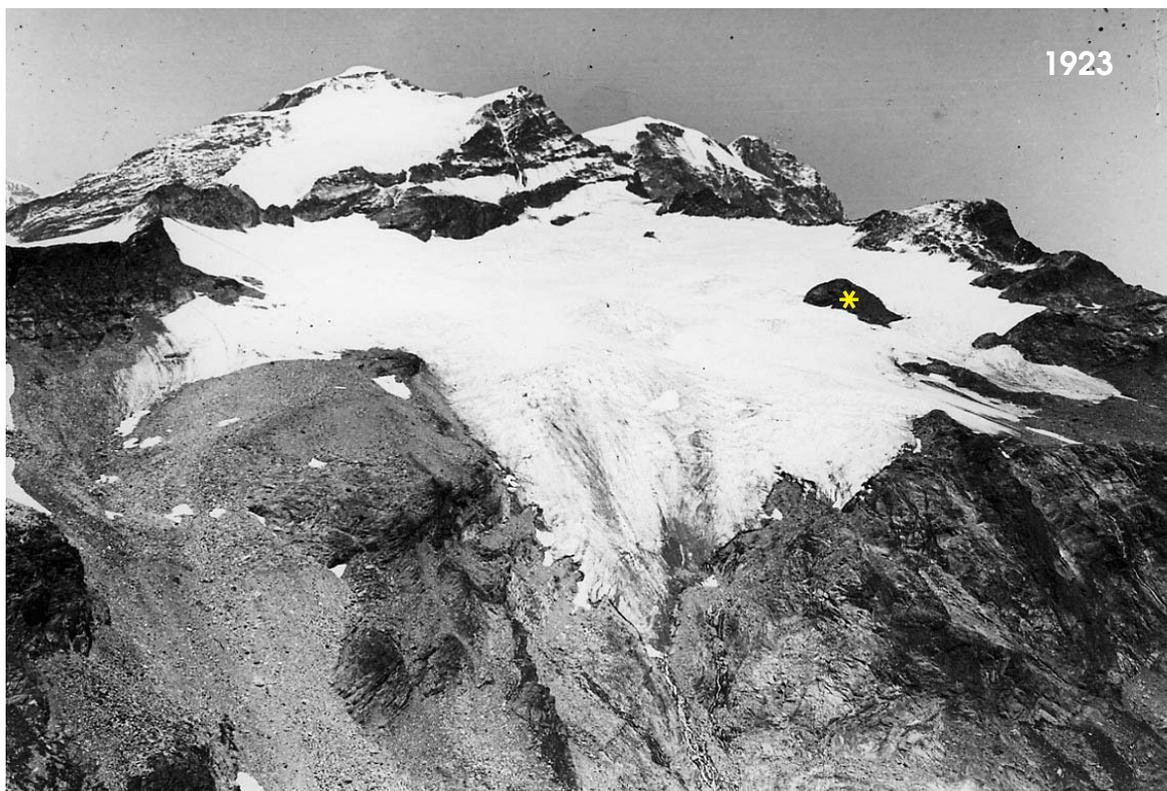
degli Anni 1970-80 (nel 1980 solo il 7% delle unità controllate era in ritiro, mentre il 96% avanzava o era stazionario), durante il XX secolo hanno dominato i regressi delle fronti (94% nel 2005).

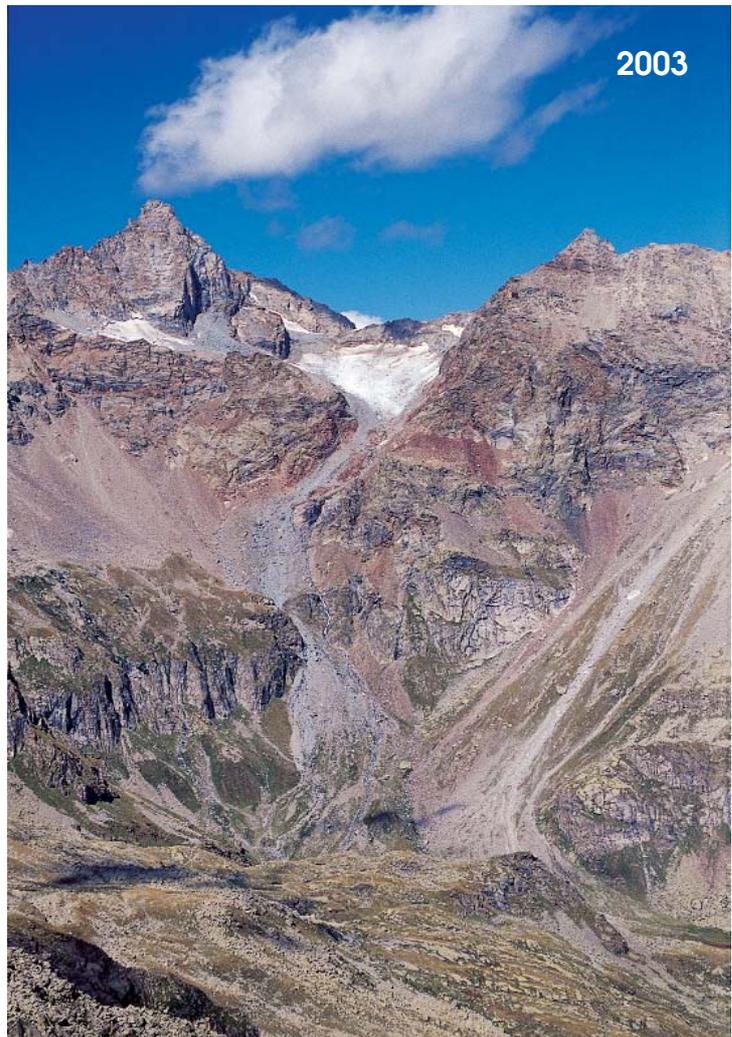
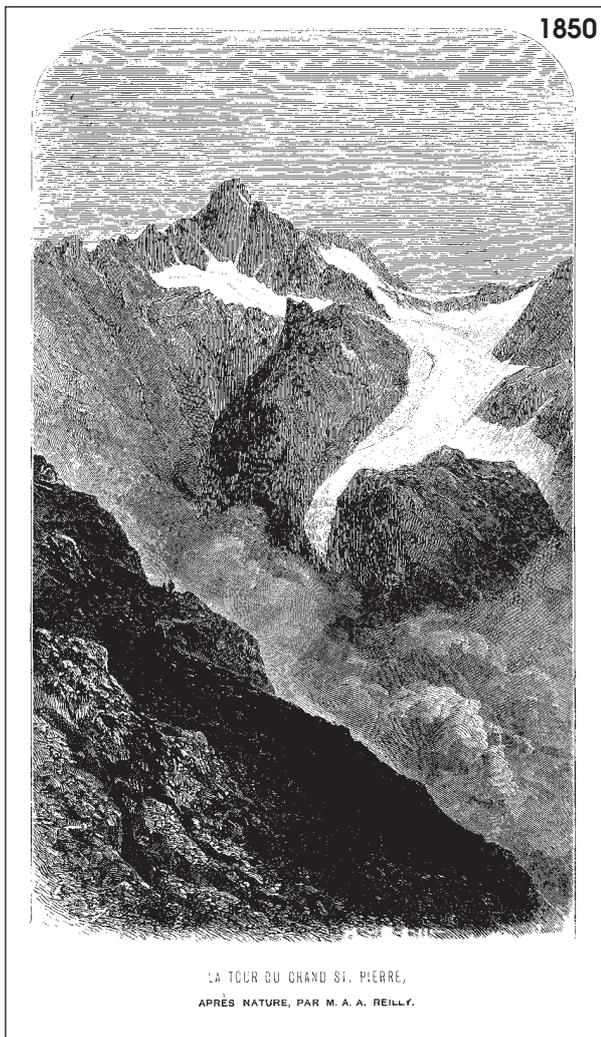
In Piemonte, il ghiacciaio Ciardoney (Valle Soana, Gran Paradiso) dispone di **misure di variazione frontale** dal 1971, riassunte nel grafico di pag. 87 in basso. In 38 anni, fino al 2008, la fronte del ghiacciaio è arretrata di 341 m. Ma questo è anche l'unico apparato glaciale del Piemonte sul quale vengano condotte con continuità misure di **bilancio di massa**, una procedura che consente di seguire l'evoluzione del ghiacciaio attraverso la misura del-



Confronto tra alcune serie cumulate di bilancio di massa sulle Alpi: il tasso di riduzione appare più intenso sulle Alpi centro-occidentali (Ciardoney, Sarennes, Careser) rispetto ad alcuni settori orientali (Vernagferner), meno soggetti a forti ondate di calore estivo.

A lato, il ghiacciaio di Bors (Val Sesia) il 07.09.1923 (f. Umberto Mònterin). Sotto, la stessa inquadratura quasi un secolo dopo (f. P. Piccini, 14.08.2004). Anche da questo confronto appare evidente l'enorme massa di ghiaccio perso nell'ultimo secolo.





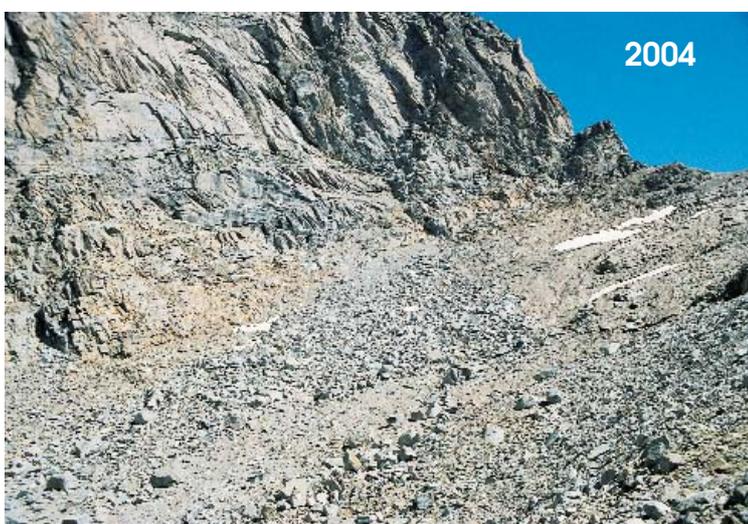
Confronto che mostra lo straordinario ritiro del ghiacciaio di Teleccio (Valle Orco) intervenuto tra la fine della Piccola Età Glaciale e oggi.

A sinistra, incisione di M.A.A. Reilly, tratta da una veduta del 1850. A destra, veduta del 31.08.2003 (archivio SMI). La lingua glaciale che si protroneva pensile nel 1850, oggi è del tutto scomparsa.

l'alimentazione nevosa invernale e della fusione estiva. Se la fusione estiva è minore dell'accumulo invernale (anni freschi e/o nevosi), il bilancio di massa è positivo, e il ghiacciaio aumenta di volume, e se questo avviene per alcuni anni consecutivi, può dare avvio a una fase di avanzata.

Se invece la fusione estiva è maggiore dell'alimentazione invernale (anni caldi e/o poveri di neve), il bilancio di massa è negativo, così il ghiacciaio perde ghiaccio e arretra.

Il grafico a pag. 88 mostra l'andamento cumulato di anno in anno di alcuni bilanci di massa sulle Alpi, espresso in metri di acqua equivalente (le variazioni di spessore del ghiaccio vengono convertite, in base alla sua densità di circa 900 kg/m^3 , in spessore di acqua): la **tendenza generale è negativa ovunque, ma con velocità di riduzione più forti sulle Alpi sud-occidentali**. Sul **ghiacciaio Ciardoney** (Gran Paradiso), il bilancio di massa è condotto dal 1992 dalla Società Meteorologica Italiana in collaborazione con AEM/IRIDE

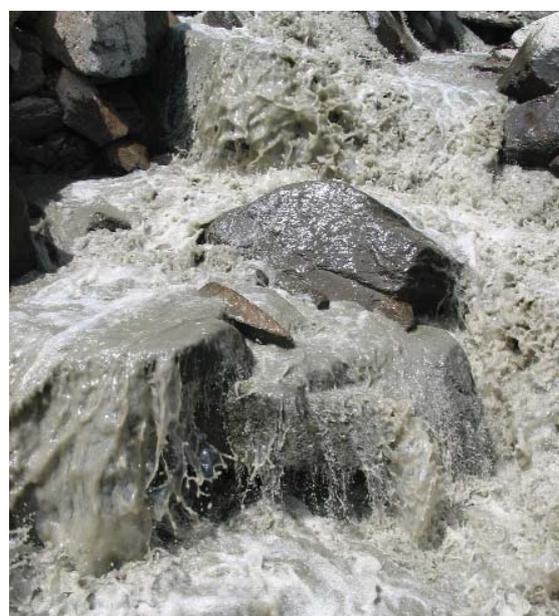


Il ghiacciaio occidentale della Porta (Valle Orco) si è completamente estinto nell'ultima fase del XX secolo. In alto, il ghiacciaio ancora turgido il 07.08.1929 (f. L. Peretti), benché già molto ritratto all'interno delle morene storiche. Il 02.09.2000 (qui sopra) del ghiacciaio non restava più nulla, soltanto alcune misere chiazze di nevato stagionale, non permanenti.

Energia: in 17 anni il ghiacciaio mediamente ha perso uno spessore di ben 26 m di ghiaccio, equivalenti a circa 23 m di acqua (attualmente lo spessore di ghiaccio rimanente è attorno ai 30÷40 m). Tra i ghiacciai compresi nel grafico, questo è uno dei più esposti al regresso (linea porpora) per la posizione soleggiata e la quota relativamente bassa (2850-3150 m), mentre altri del versante settentrionale delle Alpi, come il Vernagtferner (Austria), perdono massa meno velocemente (linea verde).

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 pag. 95). Nel caso dovessero ripetersi con maggiore frequenza condizioni estreme come quelle dell'estate 2003, si avrebbe la pressoché totale scomparsa dei ghiacciai a quota inferiore ai 3500 m; 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



Torbide acque di fusione, cariche di limo glaciale, provenienti dal ghiacciaio della Losa in alta Valle Orco il 10.08.2003, durante la più intensa ondata di caldo mai registrata sulle Alpi. La fusione glaciale può alimentare le portate torrentizie durante stagioni estive calde e siccitose, favorendo l'irrigazione a fondovalle, ma in futuro il suo contributo potrà divenire via via più marginale con l'ulteriore regresso dei ghiacciai alpini.

Rischi glaciali: dal ghiacciaio Coolidge al Belvedere, diversi episodi sono piemontesi

Con il riscaldamento globale e il regresso dei ghiacciai emergono nuovi elementi di rischio in alta montagna: primo fra tutti, la formazione di **laghi temporanei** (anche detti «effimeri») sopra i ghiacciai oppure ai loro margini, suscettibili di svuotamenti improvvisi per la rottura dei fragili sbarramenti di ghiaccio o morena che li contengono. Ma compaiono spesso anche **crolli di fronti glaciali sospese**, o **erosione di sedimenti morenici** per piogge intense in alta quota, più frequenti in un'epoca di riscaldamento atmosferico. In Europa questi fenomeni (recenti e passati) sono stati studiati e catalogati, tra il 2001 e il 2003, nell'ambito del progetto **Glaciorisk**, volto a conoscere e prevenire il rischio glaciale. Ne è scaturita una banca dati sul rischio glaciale sulle montagne europee, Gridabase, che contiene anche diversi casi avvenuti sulle Alpi piemontesi in anni

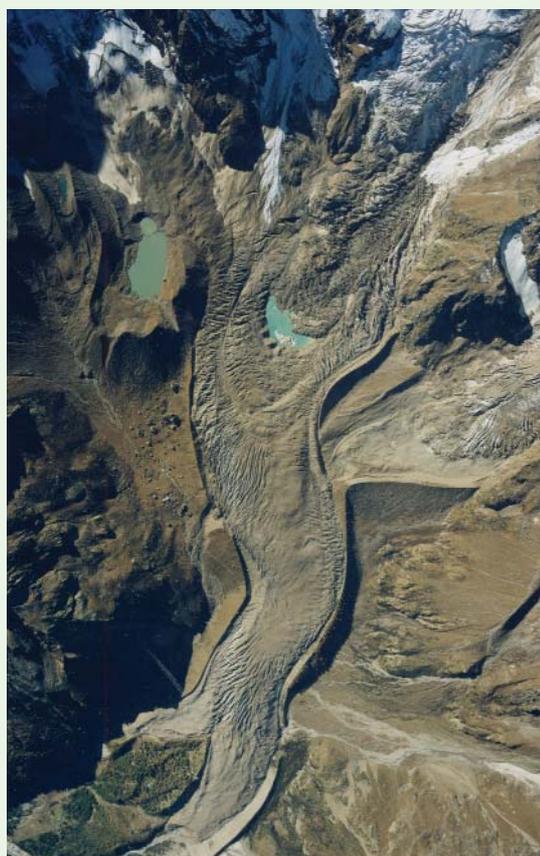


Il ghiacciaio superiore di Coolidge (Monviso) come si presentava dopo il distacco di 250.000 m³ di ghiaccio la sera del 6 luglio 1989. L'evento, che non ha provocato danni a persone, è stato innescato molto probabilmente dall'abbondante infiltrazione di acqua tra il ghiaccio e il substrato roccioso sottostante.

recenti. La sera del 6 luglio 1989, 250.000 m³ di ghiaccio del **ghiacciaio superiore di Coolidge** (i 2/3 dell'intero apparato) precipitavano a valle lungo la parete Nord del Monviso: la valanga di ghiaccio e roccia, probabilmente innescata dall'infiltrazione di acqua meteorica e di fusione al contatto tra il ghiacciaio e il substrato roccioso, ha raggiunto il lago Chiaretto, 1000 m più in basso, intercettando parte del sentiero per il Rifugio Quintino Sella, fortunatamente deserto data la tarda ora serale. Solo per questa fortuita coincidenza l'evento non ha causato vittime. Sul **ghiacciaio del Rocciamelone**, sulle Alpi Graie al



Il lago glaciale del Rocciamelone, visto al culmine dell'invaso il 17 settembre 2004 (a sinistra), e dopo lo svuotamento controllato, nell'agosto 2005 (a destra, f. M. Palomba). L'operazione è stata condotta dalle autorità francesi dapprima abbassando il livello dell'acqua di circa 5 m con l'utilizzo di un sifone (autunno 2004), e poi scavando un canale nello sbarramento di ghiaccio per completare l'evacuazione dell'acqua rimanente (estate 2005). Lo stesso canale, la cui funzionalità è controllata annualmente, impedisce il nuovo accumulo dell'acqua di fusione.



Qui sopra, una fase delle misure di profondità (batimetria) del Lago «Effimero» di Macugnaga, nella fase di massimo invaso nell'estate 2002. La profondità massima risultò essere di 57 m. A lato, una veduta aerea dell'ottobre 2001 (archivio CNR-IRPI): si nota la grande lingua valliva del ghiacciaio del Belvedere, in gran parte coperto da detrito; a sinistra il lago delle Locce, e al centro, il Lago Effimero in formazione.

confine tra Italia e Francia, dagli Anni 1960 si è formato un lago glaciale che, via via ingranditosi, nel 2004 era profondo quasi 30 metri, e conteneva circa 600.000 m³ d'acqua. Per scongiurare l'imminente tracimazione, che avrebbe causato una piena lungo la Valle dell'Arc, in Savoia, le autorità francesi ne hanno disposto lo svuotamento controllato tra l'ottobre 2004 e il luglio 2005. L'operazione ha comportato un costo totale di 390.000 Euro. Ma già nel 2002 le cronache si erano molto occupate del **Lago «Effimero»** comparso sul **ghiacciaio del Belvedere** a Macugnaga (parete Est del M. Rosa). Forse a causa dell'aumento termico ad alta quota, questo ghiacciaio ha subito un'evoluzione anomala, con un rapido scorrimento del ghiaccio verso valle e l'incremento di volume della sua lingua valliva (raro fenomeno chiamato «surge»). Tra le conseguenze: crolli di ghiaccio e roccia sui sentieri circostanti, e formazione di una grossa depressione riempitasi con 3 milioni di m³ di acqua di fusione. Nel luglio 2002 una complessa operazione di protezione civile è stata organizzata per mitigare il rischio di svuotamento del lago, il cui livello si è poi abbassato lentamente per cause naturali (MORTARA & MERCALLI, 2002; MORTARA & TAMBURINI, in stampa). Oltre ai ghiacciai, ad essere minacciato dal riscaldamento globale è anche il **permafrost**, strato costituito da terreno sempre gelato in profondità, oppure da «lenti» di ghiaccio profondo, ad alta quota sulle Alpi come nelle regioni artiche. La sua alterazione destabilizza i versanti montuosi e favorisce le frane e il danneggiamento di infrastrutture che poggiano su questo tipo di substrato (rifugi, impianti di risalita...). Nella caldissima estate 2003 molti crolli di roccia hanno interessato la via alpinistica italiana al Cervino, che è stata chiusa dalle autorità locali. Ma un po' in tutto l'arco alpino si segnalano episodi di questo tipo.

Una veduta aerea del ghiacciaio pensile della Croce Rossa, sulle alte Valli di Lanzo al confine con la Savoia, il 29.07.2003. Il ghiacciaio è sorvegliato dal 1998 a causa della sua posizione sovrastante l'invaso idroelettrico ENEL del Lago della Rossa. Il monitoraggio è stato avviato in seguito alla formazione di due laghetti marginali, potenzialmente responsabili di infiltrazioni d'acqua al contatto roccia-ghiaccio. La formazione di specchi d'acqua sui ghiacciai si sta moltiplicando in questi anni di riscaldamento. I due laghetti si sono tuttavia svuotati naturalmente nell'estate 2004, senza provocare effetti rilevanti.

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 Piemonte potrebbero mantenersi le porzioni più elevate e ombreggiate dei ghiacciai a ridosso del Monte Rosa e dell'alta Val Formazza, mentre i minuscoli apparati delle Alpi Marittime, del Monviso e della Val di Susa sono destinati a scomparire nel volgere di una decina di anni**, anche con il perdurare delle condizioni climatiche attuali, senza considerare gli ulteriori aumenti di temperatura previsti per i prossimi decenni.

- Minore attrazione dell'ambiente d'alta montagna, calo di frequentazione di alcuni percorsi alpinistici per **aumento delle difficoltà** a seguito del ritiro dei ghiacci (emersione di detrito mobile e di fasce di rocce instabili e pericolose); probabile ripercussione sulle presenze nei rifu-

gi d'alta quota.

- 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 (vedi riquadro a pag. 92-93).

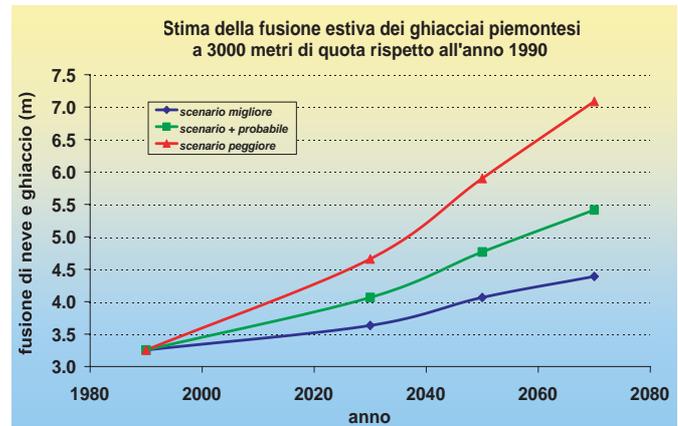
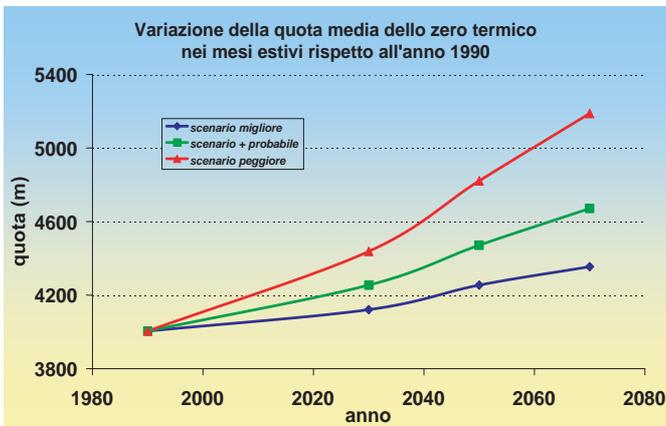
- Iniziale effetto benefico della maggiore fusione per il contributo ai deflussi torrentizi e fluviali in estati siccitose, ma in seguito conseguente depauperamento del capitale glaciale con grave perdita di potenziale idrico.

- Progressiva **scomparsa del permafrost e conseguente destabilizzazione dei versanti** rocciosi in quota, con aumento del **rischio di crolli e frane**.

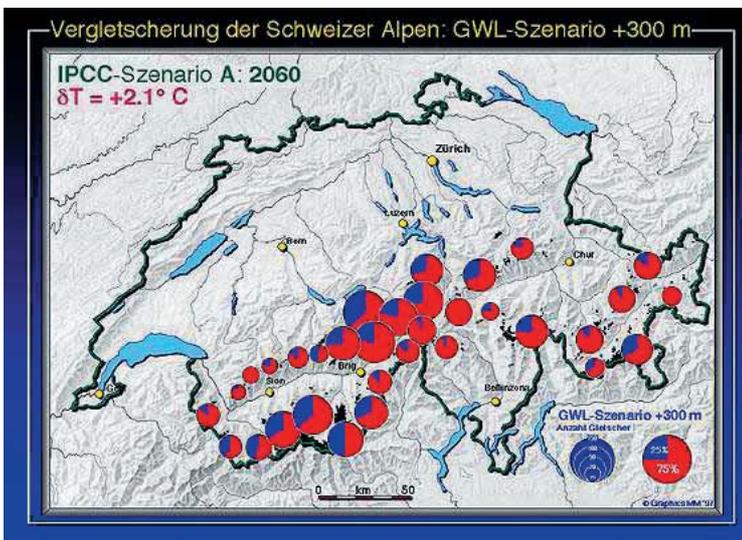
Riscaldamento climatico e fusione nivoglaciale

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 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





Stime della fusione nivoglaciale annua a quota 3000 m e della variazione di quota del livello medio dello zero termico sulle Alpi piemontesi 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 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, rispetto al 1995. 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

massa del Ghiacciaio Ciardoney in Valle Soana (Gran Paradiso) hanno determinato una sensibilità di 0.43 m di equivalente d'acqua per °C a 3050 m. Dunque si può 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 dell'osservatorio valdostano d'alta quota di Plateau Rosa, 3488 m) 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 $0.4 \cdot 6 = 2.4$ 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 fino a 5190 m nel 2070 (pag. 95). 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

Lo sbarramento che dà origine all'invaso idroelettrico AEM/IRIDE del Serrù, in alta Valle Orco (2275 m). Il sito è sede di stazione meteorologica con misure continue dal maggio 1961, utilizzate anche in questo studio. Nei prossimi decenni i gestori di impianti idroelettrici dovranno far fronte a una variazione nei regimi di afflusso delle acque ai bacini: fusione primaverile più anticipata, temporaneo aumento delle portate estive di origine glaciale in stagioni molto calde, seguito da una netta riduzione successiva alla scomparsa dei ghiacciai.



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. In tali condizioni i ghiacciai piemontesi sarebbero destinati alla scomparsa 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 fusione negli invasi sottesi a bacini di origine glaciale (es. Ceresole Reale, Lago Sabbione), 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.

8) Edilizia e consumi: imporre risparmio ed efficienza energetica

Difficile prevedere quale effetto complessivo avrà, sulla montagna piemontese, il riscaldamento climatico sui consumi energetici: se da un lato la domanda per il riscaldamento degli edifici diminuirà con inverni più miti, 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.

9) Trasporti

L'aumento delle temperature avrà effetti diretti anche sulla rete dei trasporti stradali: **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 del valichi del Moncenisio (Val di Susa) e dell'Agnello (Val Varaita).

7. LE PRECIPITAZIONI

La situazione nel mondo

e sulla regione alpina

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 **diminuiti nella fascia subtropicale** (SCHÄR C., OHMURA A., in AA.VV, 2003). **Sul Nord-Ovest d'Italia gli ultimi due secoli hanno visto un moderato 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

Prati e boschi di Forzo (Valle Soana:) sotto la pioggia temporalesca del 22.05.2005.

Sulla montagna piemontese l'evoluzione recente delle precipitazioni è irregolare, tuttavia nell'ultimo secolo si individua complessivamente una moderata tendenza alla diminuzione degli apporti pluviometrici.



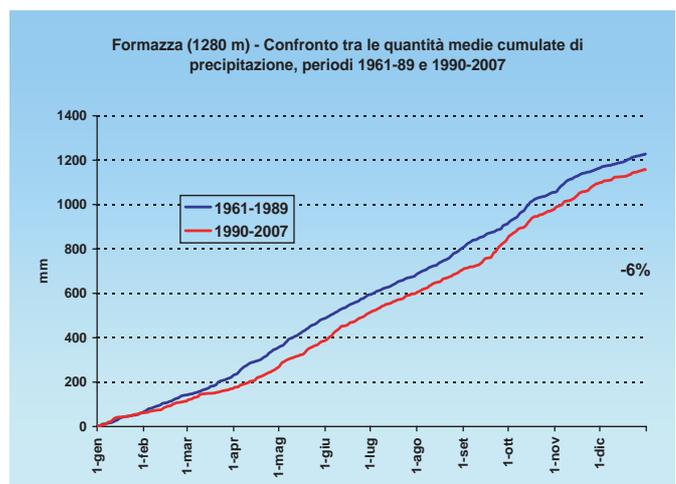
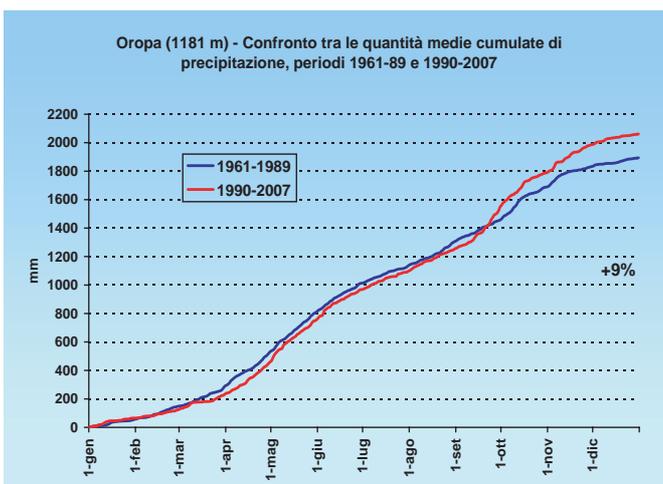
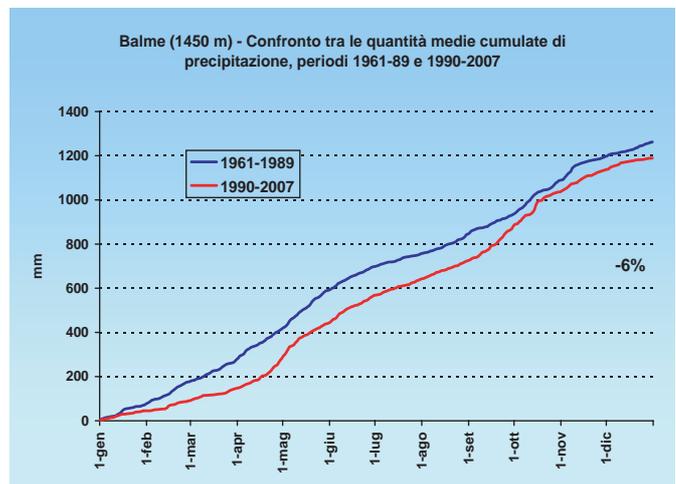
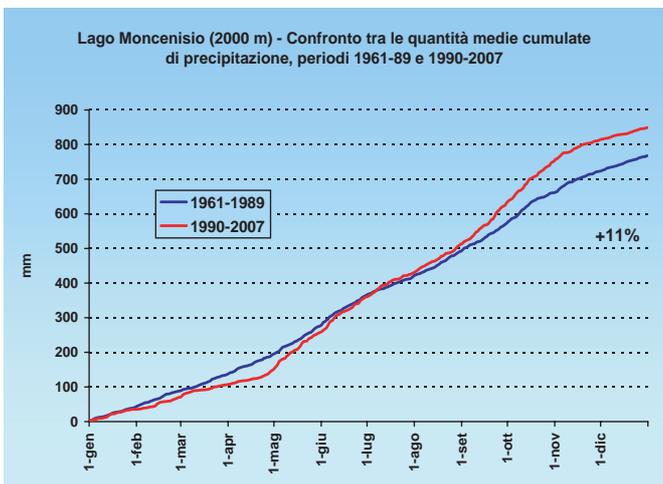
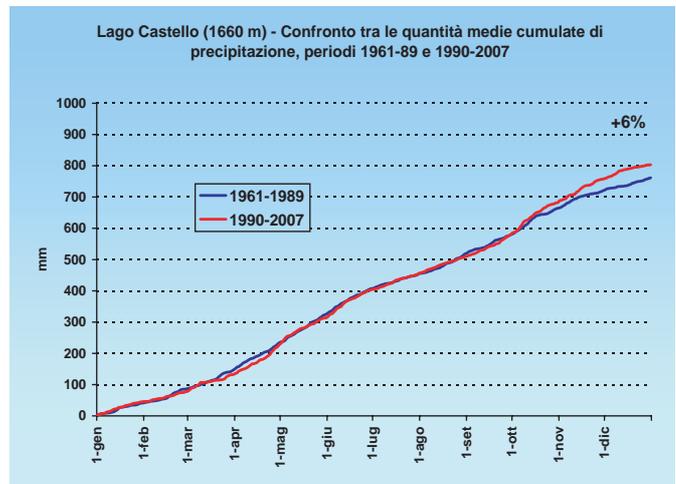
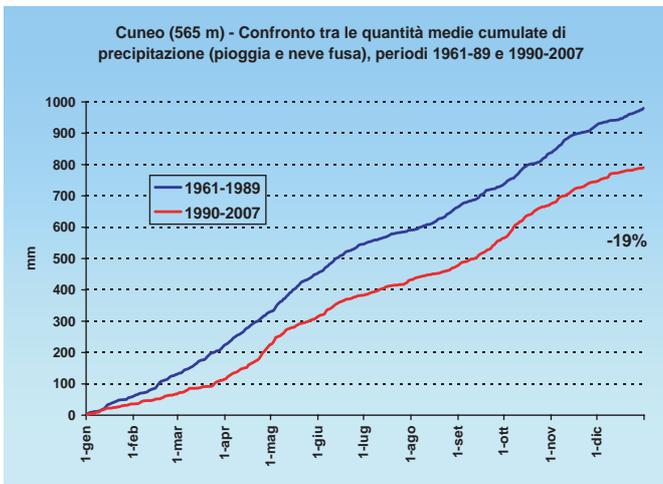
significativa analisi statistica. **Sul versante nord-alpino, i climatologi svizzeri hanno individuato tendenze all'aumento di frequenza delle quantità di piogge giornaliere che hanno tempo di ritorno di un mese sul lungo periodo** (FREI & SCHÄR, 2001); la tendenza è significativa nel 30% delle stazioni 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, situazione coerente con i risultati ottenuti per il Nord Italia e le Alpi occidentali piemontesi.**

La situazione sulla montagna piemontese: variazioni irregolari, ma nel complesso moderata tendenza alla riduzione

A differenza delle temperature, le montagne del Piemonte dispongono di una buona copertura di stazioni di misura delle precipitazioni, molte delle quali con serie giornaliera di almeno 70-80 anni. Sebbene nel corso degli ultimi decenni, e soprattutto a partire dagli Anni 1960, sia avvenuto un progressivo deterioramento della rete di strumenti manuali e meccanici del Servizio Idrografico Nazionale, nonché la definitiva chiusura dell'ente nel 2003, l'installazione di nuovi strumenti automatici (in particolare a cura di ARPA

Piemonte) ha garantito la continuità delle misure in molti siti dotati di lunga serie storica, garantendo comunque una soddisfacente rappresentatività della situazione pluviometrica sul territorio regionale. Strumenti elettronici hanno affiancato o sostituito quelli tradizionali anche presso gli impianti idroelettrici ENEL e IRIDE, siti da cui proviene gran parte dell'informazione relativa alle precipitazioni che avvengono sulla montagna piemontese. Tuttavia va precisato che talora il passaggio dalla strumentazione manuale-meccanica a quella automatica non è esente dall'aver introdotto disomogeneità nelle misure. L'analisi dell'evoluzione della pluviometria condotta sui periodi 1961-89 e 1990-2007 mostra **segnali moderati e irregolari a seconda delle zone**, dunque **non è possibile individuare una tendenza significativa a livello regionale. In alcune località nel periodo 1990-2007 è piovuto un po' di più rispetto al trentennio precedente**, come ad esempio al Lago Castello (+6%), al Lago Moncenisio (+11%), a Oropa (+9%), **in altre invece la piovosità si è ridotta**, ed è il caso di Cuneo (-19%), Balme e Formazza (-6%). Non è possibile riconoscere elementi geografici e orografici comuni tra le stazioni che mostrano il medesimo segnale.

Sebbene l'andamento degli apporti sia piuttosto irregolare, e gruppi di anni più

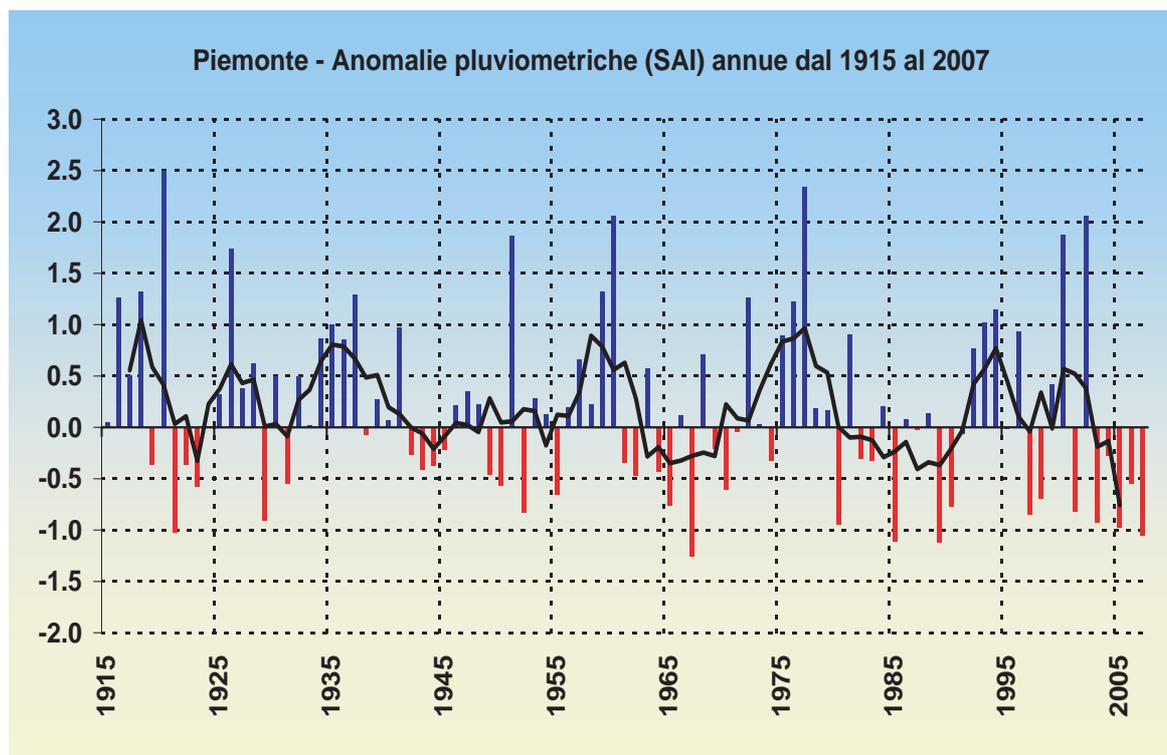


Confronto tra le quantità medie cumulate di precipitazione (pioggia e neve fusa) nei periodi 1961-1989 e 1990-2007 in alcune stazioni rappresentative della montagna piemontese.

Le variazioni sono irregolari: alcune località alpine, come Lago Castello, Lago Moncenisio, Oropa, hanno rilevato un aumento delle precipitazioni medie nel 1990-2007 rispetto al trentennio precedente, altre hanno invece registrato delle riduzioni, come Cuneo, Balme, Formazza.

La serie delle anomalie pluviometriche regionali mostra, a scala annua, una lieve tendenza al calo delle precipitazioni nel corso degli ultimi 90 anni circa.

Il 1967 è l'anno in assoluto più secco dal 1915, ma la media mobile (linea nera) individua come più critica la persistenza di anni asciutti tra il 2003 e il 2007.



piovosi si alternano ad anni più asciutti, si può tuttavia affermare che, nel complesso, **durante il XX secolo la piovosità sia leggermente calata in Piemonte a livello annuale**, come peraltro attestato da AUER & al., 2005a, BRUNETTI & al., 2006 anche per il resto dell'Italia nord-occidentale. Questa tendenza appare più evidente se si considerano anche i dati ottocenteschi, che tuttavia sono stati esclusi dai grafici qui presentati, poiché soltanto attorno al 1915 la copertura regionale di pluviometri diviene sufficientemente estesa.

Osservando la serie dell'indice di anomalia pluviometrica annua, si nota come il **1920 sia stato l'anno più piovoso a scala regionale** nel periodo 1915-2007, seguito dal 1977, 1960 e 2002, tutti anni contraddi-

stinti da uno o più episodi alluvionali.

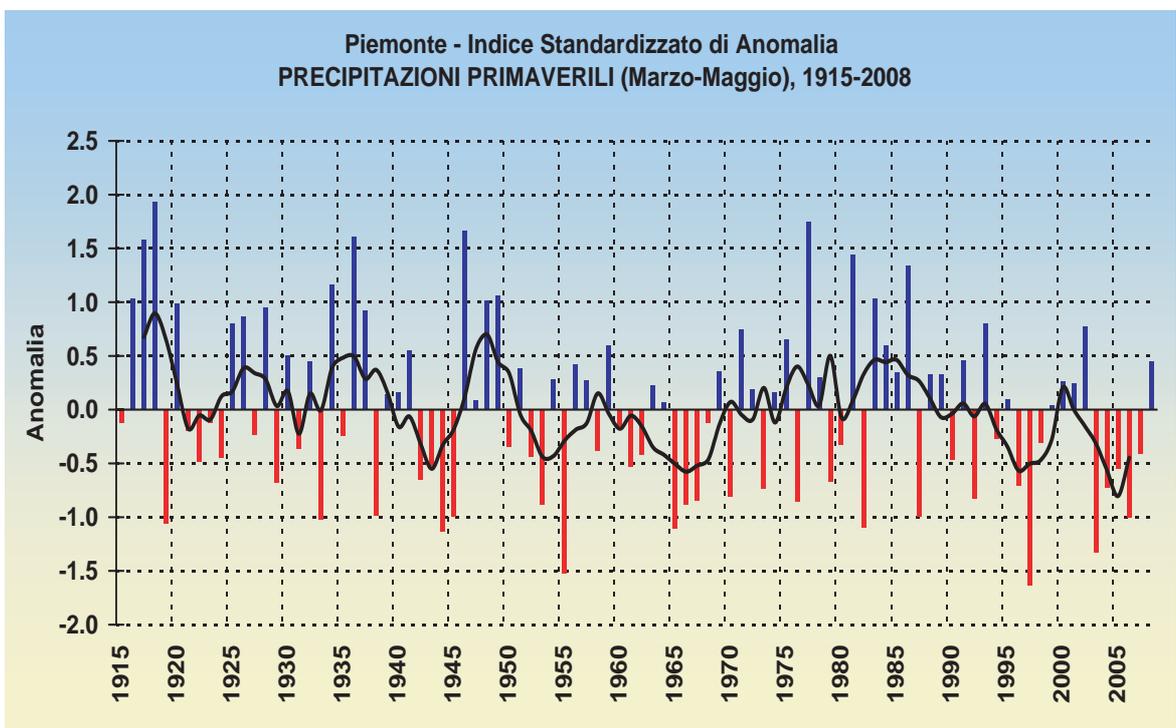
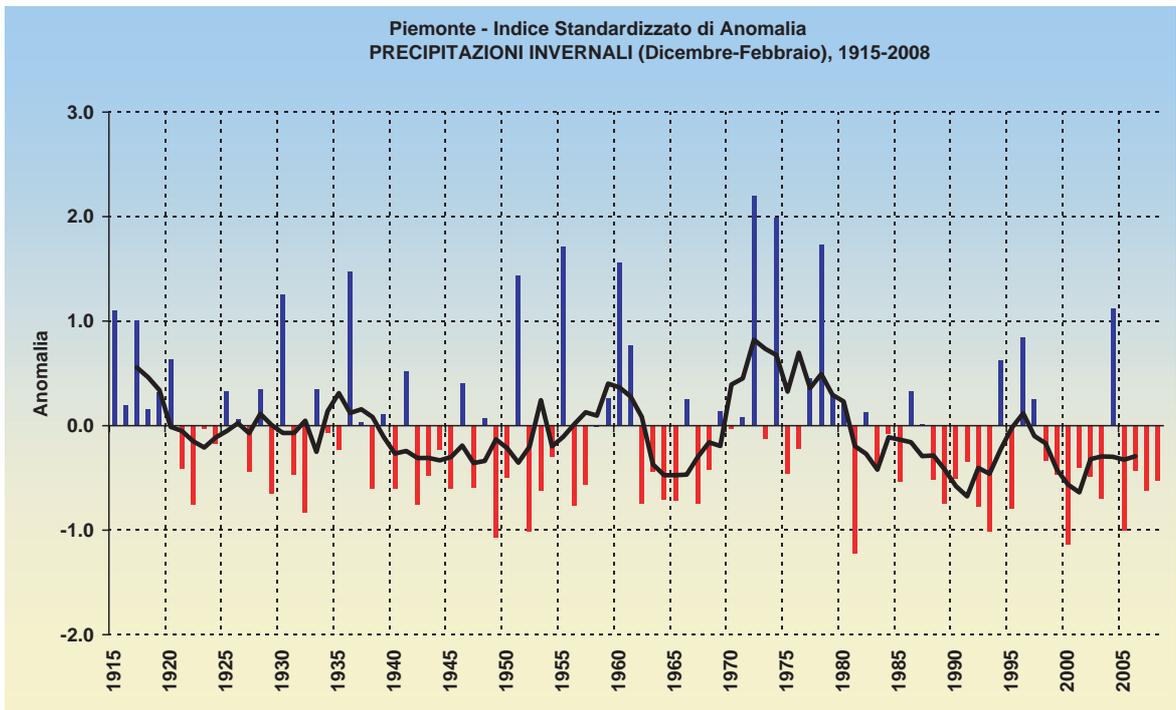
Il 1967 risulta l'anno più asciutto, ma - pur senza raggiungere minimi assoluti di piovosità nei singoli anni - **la media mobile di ordine 5** (calcolata considerando anche i valori dei due anni precedenti e dei due successivi) **indica come più critico il recente periodo 2003-2007 per la carenza persistente e prolungata di precipitazioni**.

Una tendenza analoga al moderato calo nelle quantità di pioggia e neve fusa è quasi sempre confermata dal dettaglio stagionale. **Anche in inverno, primavera e autunno la piovosità è un po' diminuita nel corso del XX secolo, mentre al momento l'estate sembrerebbe evidenziare una modesta tendenza all'aumento delle precipitazioni, ma soprattutto per il contributo di poche stagioni estive molto piovose**

Anche l'inverno e la primavera mostrano una tendenza al moderato calo nelle precipitazioni.

Negli anni recenti l'inverno 2003-04 si è collocato nel gruppo dei più ricchi di precipitazioni, ma poi è stato seguito da 4 stagioni povere di pioggia e neve. Il 1980-81 è stato l'inverno più asciutto.

Per quanto riguarda la primavera, quelle del 1955 e del 1997 sono state le più secche, e anche in questo caso si individua una persistenza di stagioni asciutte tra il 2003 e il 2007. Le primavere più piovose sono invece state quelle del 1918, 1977, 1936 e 1946.

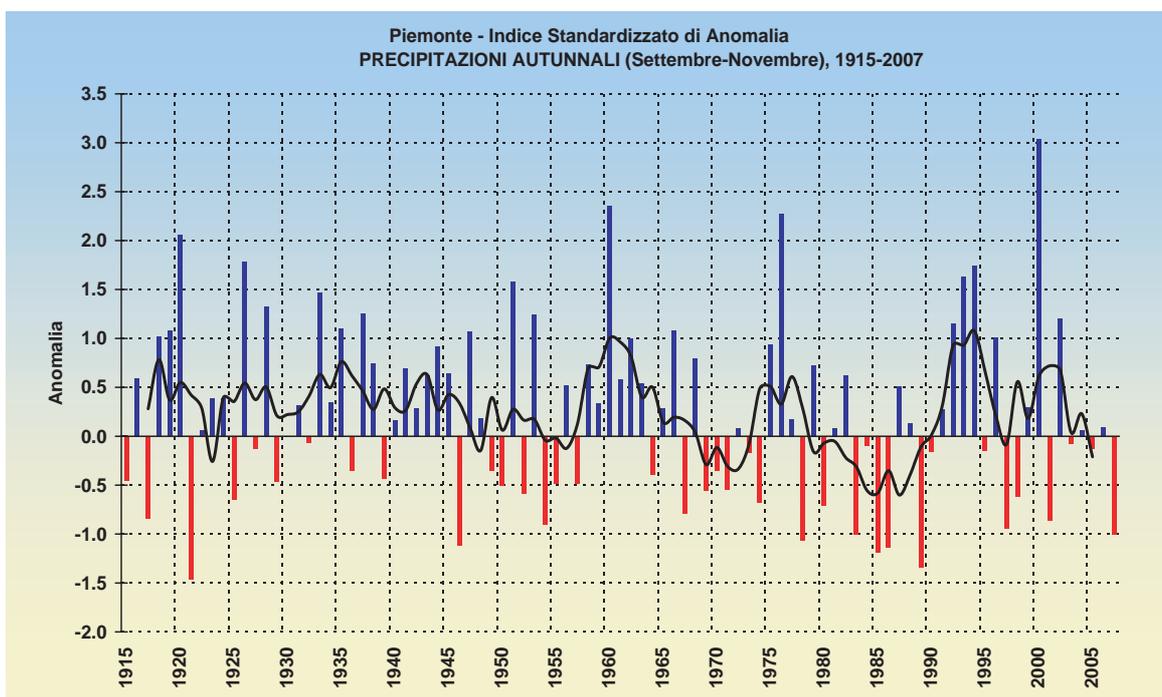
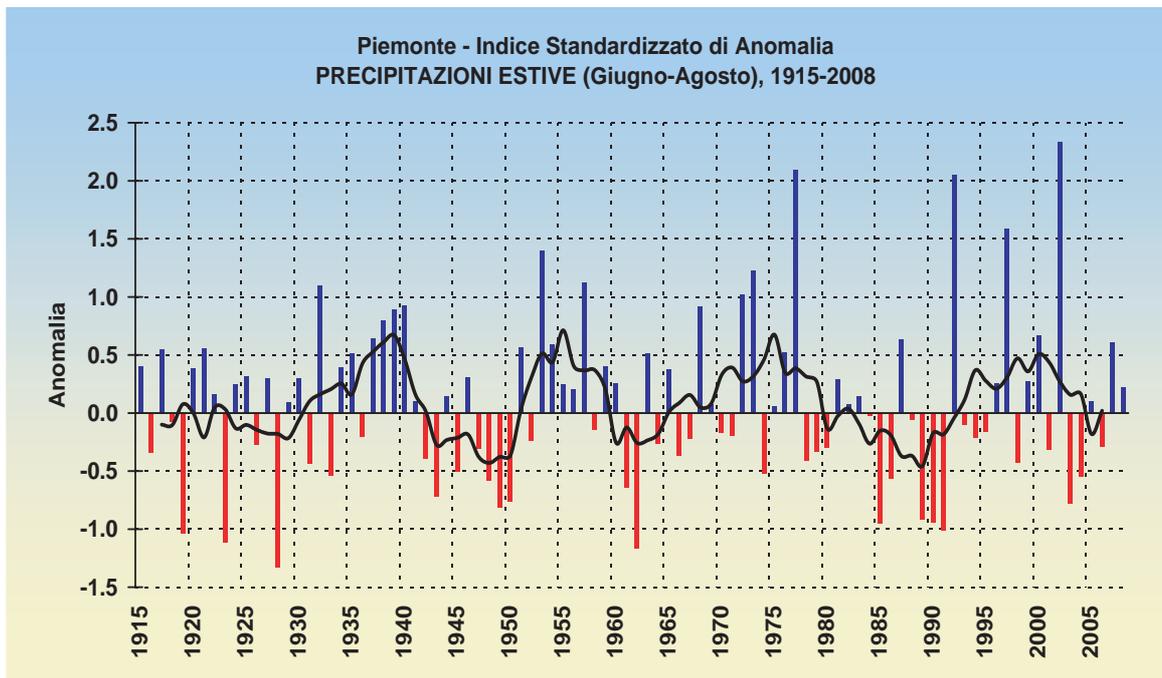


registrate negli ultimi 30 anni, come ad esempio quelle del 1977, 1992, 1997 e 2002. Questo elemento risulterebbe per ora in controtendenza rispetto ai timori generalizzati per un futuro estivo più arido

nel bacino del Mediterraneo, Italia settentrionale compresa, scenario sul quale la maggioranza dei modelli numerici di simulazione climatica è concorde. Evidentemente i segnali di questa evolu-

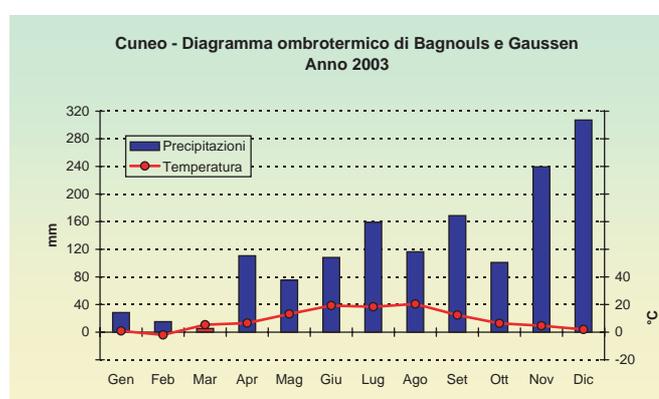
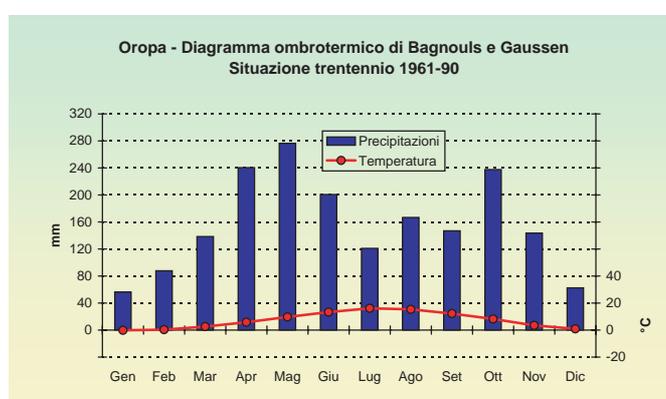
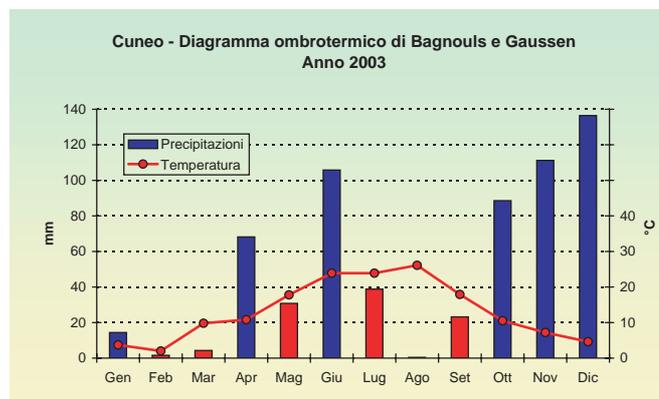
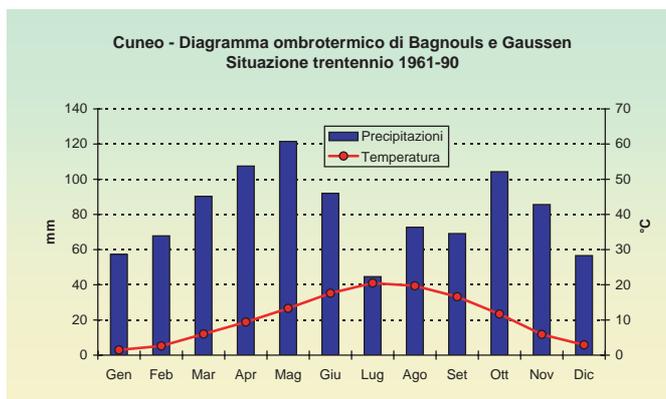
L'estate mostra nel complesso un lieve segnale di aumento della piovosità a scala regionale, dovuto non tanto a un aumento di frequenza delle stagioni estive più piovose del normale, ma al contributo di alcune estati estremamente ricche di pioggia, come quelle del 1977, 1992, 1997 e 2002, pur sempre intervallate a stagioni talora decisamente asciutte. L'estate 2003 è stata certamente avara di pioggia, ma la situazione è stata resa straordinaria soprattutto dalla combinazione sfavorevole con le temperature molto elevate. Altre estati asciutte sono state quelle del 1919, 1923, 1928, 1962, 1991.

L'autunno conferma invece una lieve tendenza al calo delle precipitazioni, benché la stagione più piovosa di tutte si sia registrata nel 2000 (alluvioni nel bacino del Po). L'autunno più asciutto si verificò invece nel 1921.



zione attesa per i prossimi decenni non sono ancora così palesi, sebbene - recentemente - abbiano destato preoccupazione le **siccità estive del 2003, 2004 e 2006, i cui effetti sono stati amplificati dalle temperature insolitamente elevate e**

dalla conseguente forte evapotraspirazione. Si tratta di un primo assaggio delle estati che verranno? Forse, ma occorrerà raccogliere altri dati nei prossimi anni per comprendere meglio la situazione in atto.



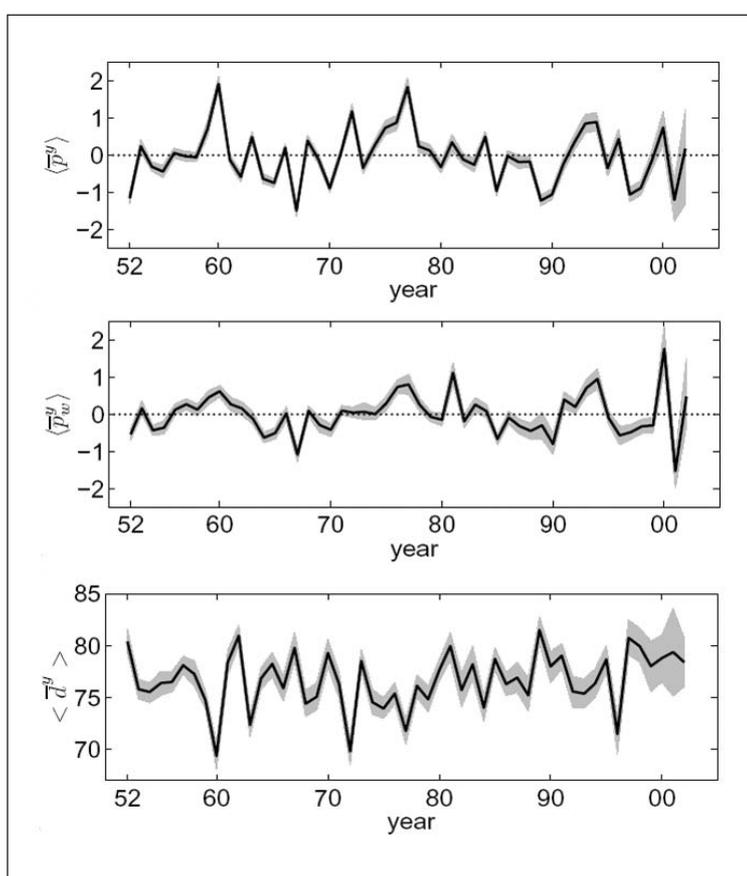
Per identificare l'eventuale esistenza di una stagione arida, si può usare il metodo del diagramma ombrotermico di Bagnouls & Gausson, che riporta in ordinata l'andamento medio mensile delle precipitazioni (P , in mm) e delle temperature (T , in $^{\circ}\text{C}$) su due scale diverse, tali per cui $P=2T$. L'intersezione tra le curve dei due parametri (con $P < 2T$) segnala l'eventuale aridità, solitamente non presente sulle Alpi piemontesi (salvo in alcune zone della Valle di Susa, del Cuneese e dell'Appennino ligure). Nel 2003 invece le condizioni di aridità furono manifeste in diversi settori specialmente di bassa montagna o pianura pedemontana, come a Cuneo nei mesi di febbraio, marzo, maggio, e da luglio a settembre (colonne rosse), mentre a Oropa le temperature estive più basse e la maggiore frequenza di temporali locali mantennero una situazione meno critica per la vegetazione.

L'aridità estiva del 2003

L'eccezionale calura dell'estate 2003 è stata associata a una prolungata carenza di precipitazioni: dal 1° febbraio al 31 agosto 2003 si sono rilevati appena 245 mm di pioggia e neve fusa al Lago Castello (51% del valore normale), 250 a Cuneo (41%), 316 a Formazza (43%), 433 a Balme (56%), 590 a Oropa (47%). Si può ragionevolmente affermare che pascoli, boschi e giardini piemontesi non avessero mai sperimentato una combinazione climatica di calura e caldo così sfavorevole

almeno dall'inizio delle misure termo-pluviometriche. Già a fine giugno su alcuni versanti prealpini 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 colline intorno a Ivrea (PIVIDORI & *al.*, 2006), risulta come non tutte le specie considerate abbiano manifestato una significativa alterazione dell'accrescimento radiale, e come gli effetti più evidenti si siano limitati a ciliegio, casta-

A destra, furiosa piena del T. Cervo a Biella nel tardo pomeriggio del 5 giugno 2002, la maggiore da circa un secolo (f. S. Maffeo). Al momento non si individuano significative tendenze all'aumento di precipitazioni intense e alluvioni sulle Alpi occidentali italiane (vedi pag. 106). Sotto: evoluzione delle precipitazioni annue, dell'intensità pluviometrica e della percentuale annua di giorni asciutti sull'Italia NW dal 1952 (da CICCARELLI et al., in stampa).

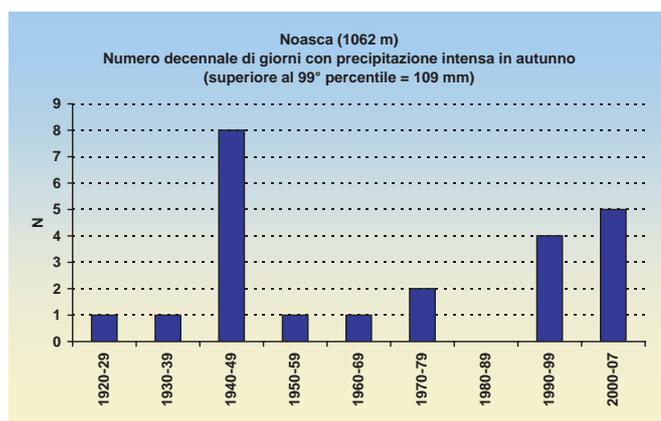
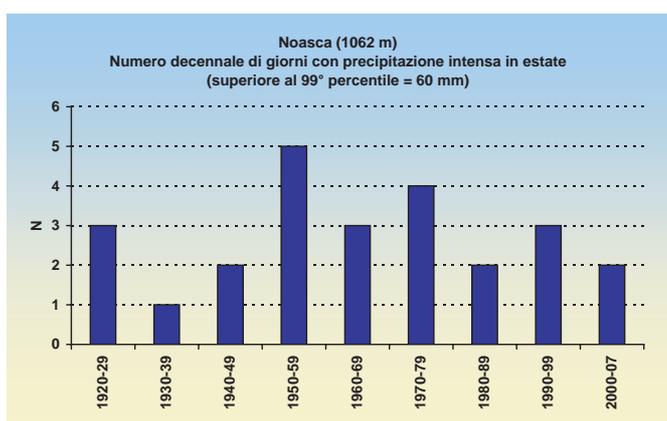
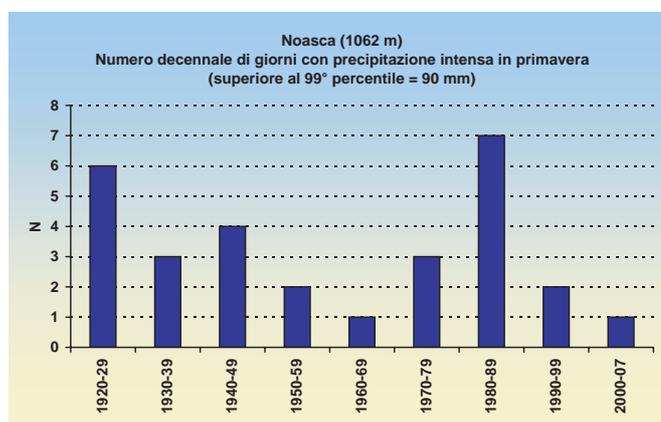
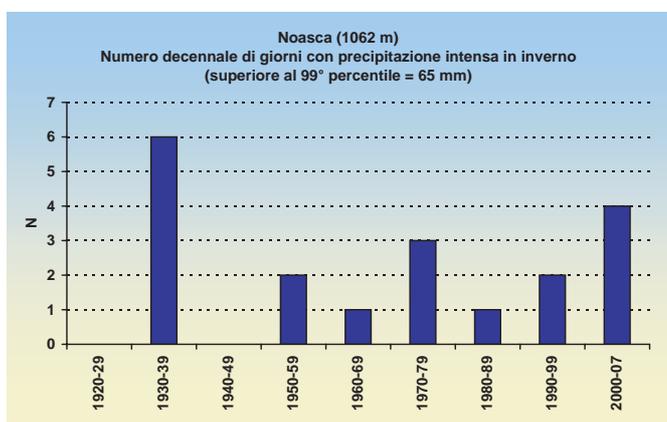
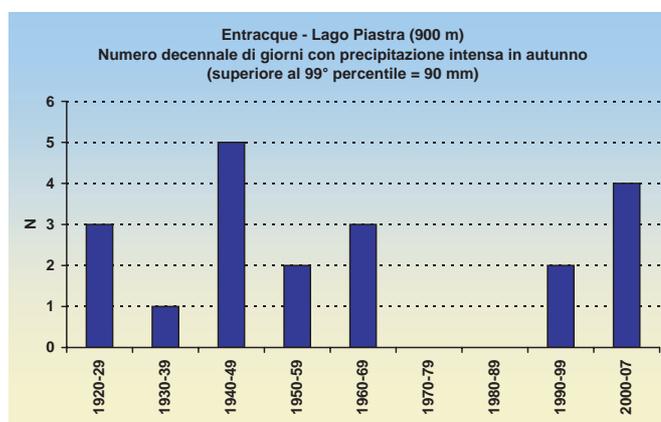
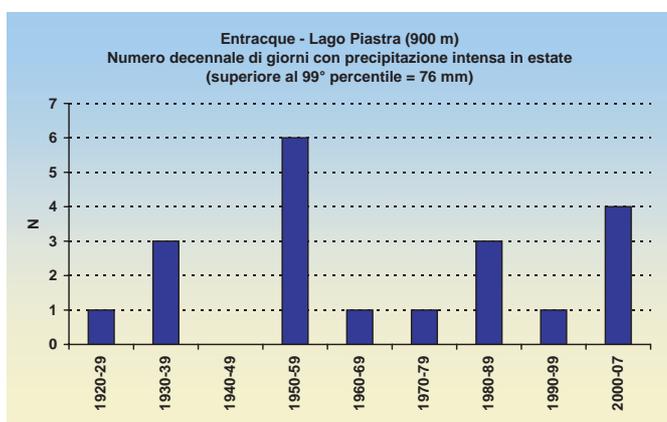
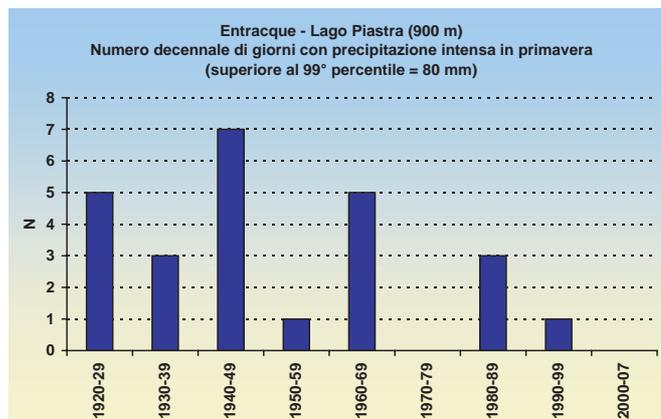
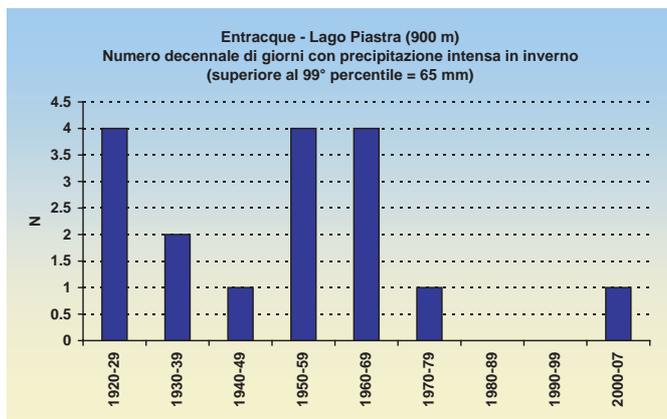


gno, rovere e roverella. Più immediate e importanti le perdite economiche nel settore agricolo e dell'allevamento.

Quantomeno - nelle valli tra il Gran Paradiso e l'Ossola - le temperature elevate hanno messo a disposizione delle reti di irrigazione importanti deflussi d'acqua di fusione glaciale tali da contenere almeno in parte - anche se a costi elevati - le perdite alle produzioni di cereali e foraggio.

Le piogge intense: in Piemonte, per ora, nessuna tendenza evidente

Uno studio eseguito presso il CNR-ISAC di Torino (CICCARELLI et al., in stampa) rivela che per il momento **non si riscontrano variazioni significative nelle caratteristi-**



che della piovosità sul Nord-Ovest d'Italia, e conferma dunque le conclusioni ottenute per l'Italia da BRUNETTI et al. (2006). I grafici a lato mostrano l'evoluzione media regionale, dal 1952 al 2002, delle quantità annue di precipitazione (in alto), dell'intensità delle precipitazioni (al centro) e della percentuale annua di giorni asciutti (in basso).

Effetti della piena del 15.07.2002 a Entracque, Valle Gesso (f. G. Scanavino). L'aumento dei beni e delle infrastrutture sul territorio si riflette in un maggiore potenziale distruttivo delle alluvioni rispetto al passato, anche in assenza di un reale incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi pluviometrici.

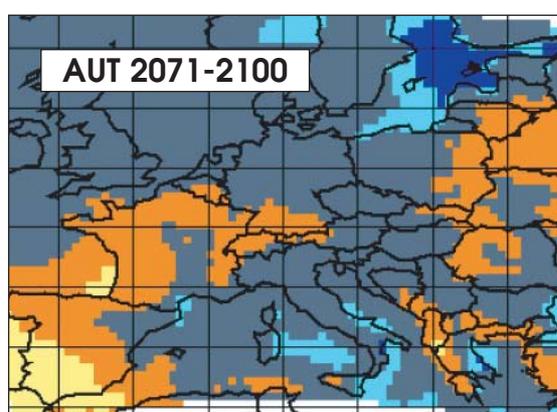
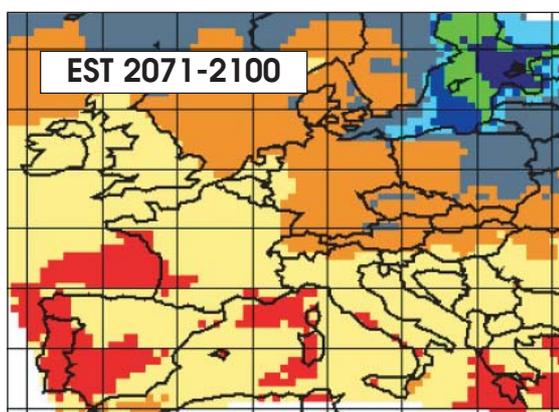
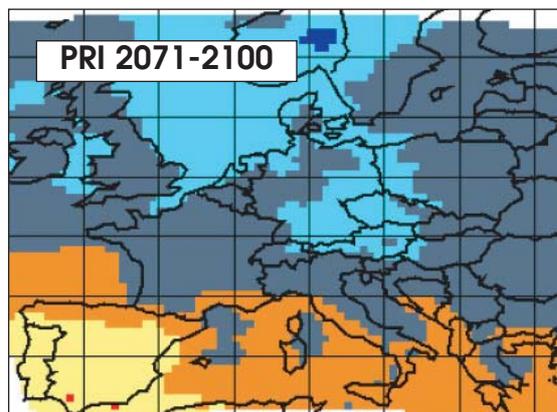
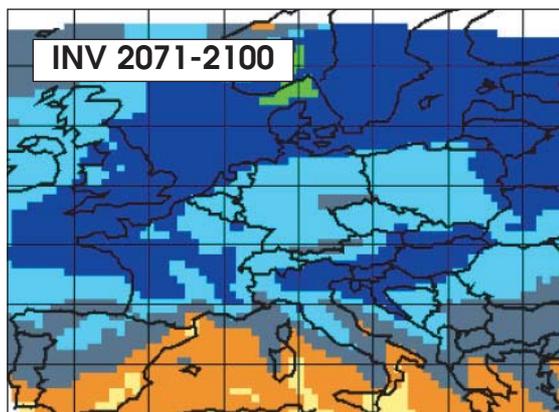
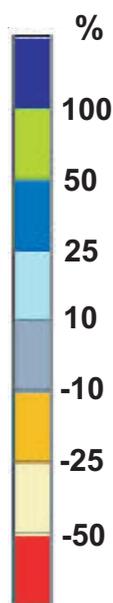
L'assenza di segnali nell'evoluzione delle piogge intense si coglie anche dall'analisi del numero decennale di giorni piovosi che - sulla montagna piemontese - abbiamo superato la soglia di quantità di precipitazione del **99° percentile** (al di sopra della quale ricade soltanto l'1% dei giorni piovosi nel campione di dati disponibile, soglia variabile di località in località e di stagione in stagione). A tal proposito sono state analizzate le serie pluviometriche di Entracque, Balme e Noasca, siti in cui le

registrazioni hanno avuto inizio tra il 1913 e 1916 (per tutte il primo decennio interamente disponibile è quindi il 1920-29): **il numero stagionale di episodi pluviometrici intensi è fortemente irregolare e variabile di decennio in decennio, e in nessun caso si individuano tendenze significative.**

Solo a Noasca l'autunno mostra un aumento degli eventi dagli Anni 1980 a oggi: nessun episodio nel decennio 1980-89, 4 nel 1990-99, 5 nel 2000-2007, ma il periodo è ancora piuttosto breve, e resta comunque insuperato il massimo di 8 eventi del periodo 1940-49.

Dunque **l'aumento delle precipitazioni intense, previsto a scala globale come effetto dell'intensificazione del ciclo dell'acqua, è documentato per alcune regioni europee a Nord delle Alpi, ma non ancora sul versante italiano della catena montuosa.** L'evoluzione dipenderà dai regimi delle configurazioni meteorologiche a scala continentale: l'aumento di frequenza delle piogge invernali abbondanti sulla Svizzera settentrionale (legate a flussi umidi tra Ovest e Nord) sembra essere in fase con la debole riduzione osservata al Sud delle Alpi, regione che infatti si trova in condizioni sottovento e più asciutte se predominano venti in quota dal Nord-Atlantico, e se al contempo si riducono gli episodi mediterranei con forte trasporto di aria umida da Sud.





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.

Variazioni delle precipitazioni stagionali previste sulla Svizzera meridionale all'orizzonte temporale del 2050, secondo differenti livelli di probabilità, ottenute dal progetto PRUDENCE (Frei, 2004). L'inverno potrebbe vedere un moderato aumento degli apporti, l'estate una netta riduzione.

Cosa prevedono i modelli climatici per il futuro? Più siccità estive in Piemonte.

L'ulteriore aumento futuro delle temperature potrà originare verosimilmente un'intensificazione 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 irregolari da una regione all'altra del pianeta: in alcune zone poverà di

più, in altre poverà di meno.

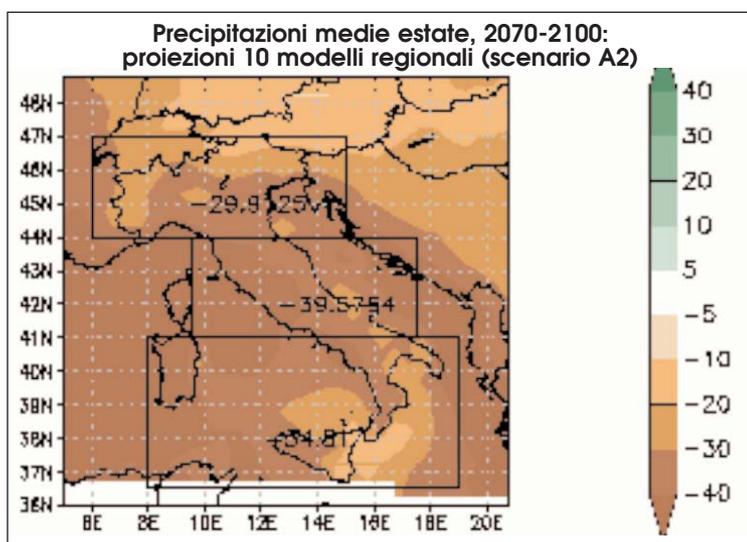
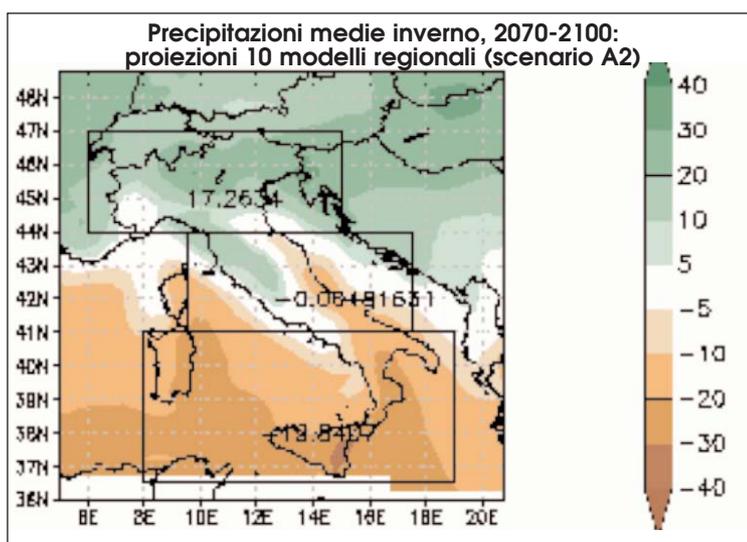
Inoltre, nuovi assetti nelle configurazioni bariche a grande scala potranno modificare i regimi pluviometrici, ovvero la distribuzione della pioggia durante le stagioni: le precipitazioni invernali potrebbero aumentare alle medie ed alte latitudini boreali e in Antartide, mentre quelle estive potrebbero diminuire nelle zone continentali delle medie latitudini (IPCC, 2007). Anche per le precipitazioni, in questo stu-

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%

Le proiezioni di 10 modelli a scala regionale basati sullo scenario IPCC A2 prospettano per il trentennio 2071-2100 un moderato aumento delle precipitazioni invernali sul Piemonte (+17% sull Nord Italia), mentre l'estate potrebbe vedere una forte riduzione degli apporti (-30%). Fonte: Abdus Salam ICTP/Trieste-cor-tesia Filippo Giorgi.

diò sono stati utilizzati i risultati dei modelli climatici regionali emersi nell'ambito del progetto **Prudence** per la Svizzera meridionale, e riportati in FREI, 2004 (tabella sotto). Da questi emerge come, **a Sud delle Alpi, le precipitazioni potranno in parte aumentare soltanto in inverno**, per una probabile accentuazione dei regimi di venti tra Sud-Ovest e Ovest, configurazioni che tuttavia tendono a lasciare in «ombra pluviometrica» le valli tra il

Cuneese e il Torinese. Infatti in queste situazioni, a risentire del previsto aumento di precipitazione potrebbero essere più che altro il Piemonte orientale, la zona Biellese-Sesia-Ossola, oltre alle creste di confine con Savoia e Svizzera più esposte ai venti d'oltralpe. Al contrario, **gli apporti potrebbero 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 pessimistici, 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.



COSA POTREBBE ACCADERE IN PIEMONTE:

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** al fine di ottimizzare la distribuzione dell'acqua disponibile.
- **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 stesso i prelievi di preziosa acqua potabile.
- Appropriata selezione di **varietà colturali più resistenti al secco.**

Arcobaleno in bassa Valle di Susa a seguito di un forte temporale la sera del 27.07.2003. Le tendenze relative a fenomeni meteorologici intensi e rari sono difficili da cogliere per l'esiguità del campione statistico.

2) Sanità**Potenziali effetti negativi:**

- Possibile maggiore sollevamento di polveri per azione del vento su suoli disseccati, dispersione dei fumi di incendi, pollini allergenici ecc...
- Maggiore presenza di aerosol atmosferico in conseguenza del minore

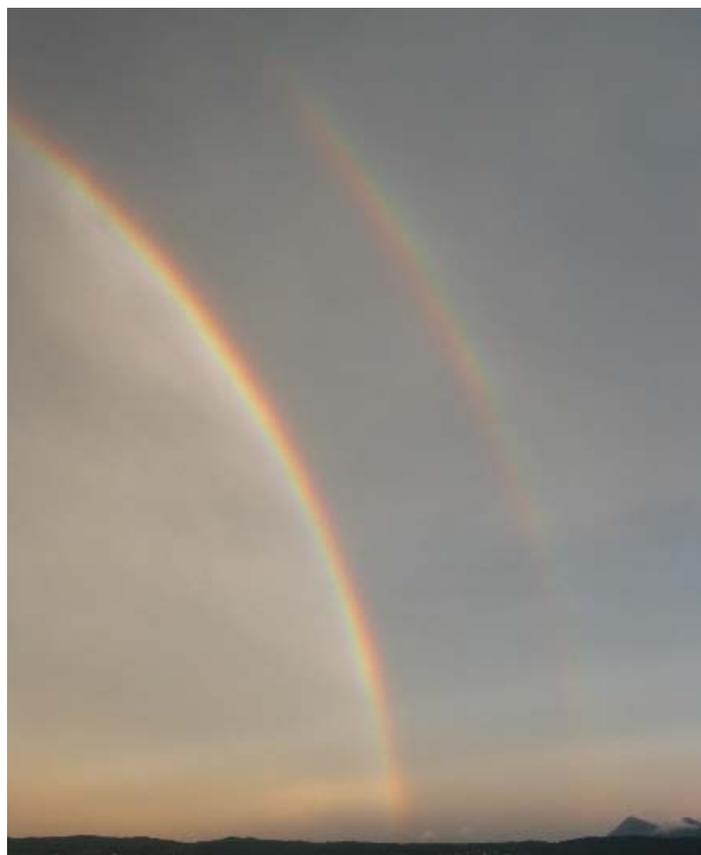
abbattimento da parte delle precipitazioni, specialmente in estate.

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 dei fondovalle già favorisca l'attivo rimescolamento dell'aria.

3) Turismo**Potenziali effetti positivi:**

- Incidenza positiva della minore fre-



quenza delle precipitazioni estive sulla fruibilità dell'ambiente naturale e montagna (escursioni, gite, manifestazioni e attività all'aperto).

Violento incendio sui boschi di Mompantero (Valle di Susa), marzo 2000 (f. L. Giunti). La combinazione di minori precipitazioni estive e accresciuta evapotraspirazione nei prossimi decenni potrà rendere via via più frequenti situazioni favorevoli agli incendi boschivi nei mesi da giugno a settembre, finora marginali nelle foreste di montagna piemontesi.

Potenziali effetti negativi:

- Disagio per i turisti in villeggiatura in caso di razionamento dell'acqua potabile.
- 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

Potenziali 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 Piemonte, come quasi ovunque sulle Alpi occidentali, sono più frequenti tra inverno e inizio primavera, quando - in assenza di pioggia o nevicata - la 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 almeno in parte 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'innescio di roghi in mesi in cui ora questi sono piuttosto rari, come ad esempio in luglio e agosto**. I versanti spogliati della vegeta-

29.08.2003,
Entracque
(CN), incendio
sul Monte La
Piastra al termi-
ne di un'estate
straordinaria-
mente calda e
asciutta (f. G.
Scanavino).

zione 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).

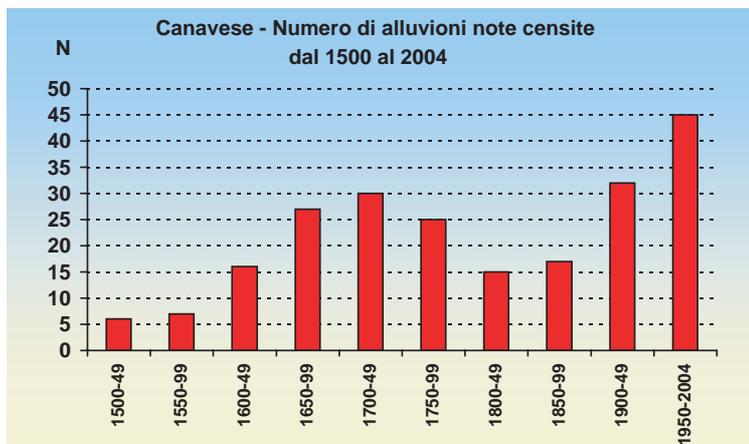
Strategie di mitigazione/adattamento:

- 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 **saturatione dei suoli** all'arrivo delle piogge, **interazioni particolarmente sfavorevoli tra i contributi**





Conteggio del numero di alluvioni in Canavese censite a partire dal 1500 e suddivise per intervalli di 50 anni. Un primo picco di eventi si evidenzia tra il 1650 e il 1800, periodo effettivamente contraddistinto da un marcato peggioramento climatico nell'ambito della «Piccola Età Glaciale» e da una probabile influenza negativa dell'eccessivo disboscamento. Il consistente aumento del numero di eventi censiti dopo il 1900 verosimilmente è imputabile in buona parte alla maggiore disponibilità di fonti di informazione. Si tenga presente pure la maggiore vulnerabilità del territorio attuale, fortemente antropizzato, rispetto alle condizioni dei secoli passati. E' comunque evidente come un eventuale aumento di frequenza dovuto al riscaldamento globale incrementerebbe la criticità di un sistema già assai fragile.

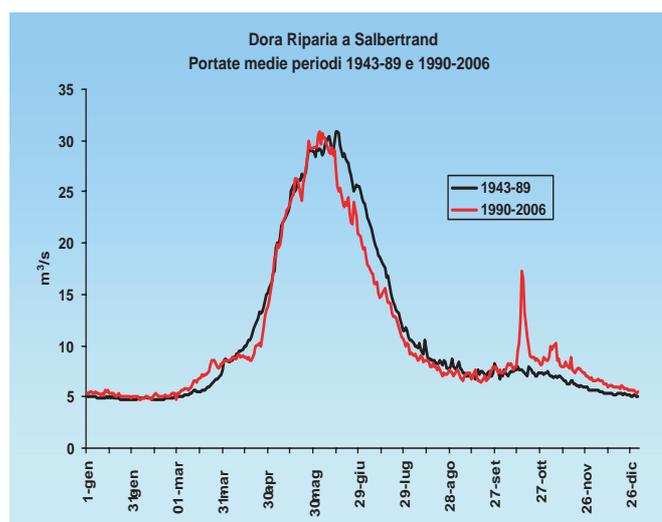
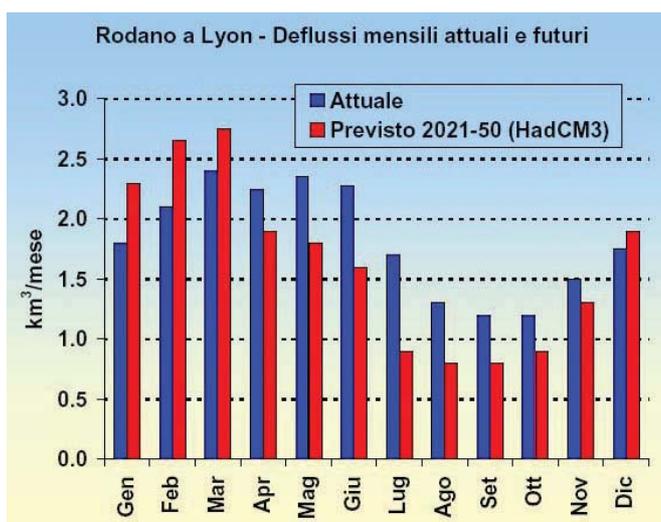
di diversi affluenti. Né in Svizzera né in Baviera si sono individuate tendenze nell'entità/frequenza dei deflussi di piena durante il XX secolo, e crisi simili a quella di

fine XX - inizio XXI secolo (alluvioni nel 1987, 1993, 1999, 2000, 2002) in realtà si erano verificate anche nell'Ottocento (AA.VV., 2003).

In Piemonte l'apparente concentrazione degli episodi nella seconda metà del Novecento (grafico in alto) è imputabile quasi certamente al miglioramento della quantità e qualità dell'informazione utilizzata per effettuare il conteggio degli eventi.

Potenziali effetti:

- **Accelerazione dei deflussi invernali** (fusione più rapida della neve per temperature più elevate, parziale aumento delle precipitazioni), **diminuzione di quelli estivi**. Con l'aumento delle temperature verosimilmente **aumenterà pure la**



Per il Rodano a Lyon, nel trentennio 2021-50, si prevedono aumenti di portata nei mesi tra dicembre e marzo (quando si raggiungerebbero i massimi deflussi annuali), e una marcata diminuzione da aprile a novembre, proprio quando l'acqua sarà più preziosa e fini irrigui.

Fonte: progetto ATEAM, www.pik-potsdam.de/ateam

Già oggi, confrontando i deflussi medi giornalieri della Dora Riparia a Salbertrand nel periodo 1990-2006 con quelli del periodo 1943-89, si intravede una tendenza alla riduzione delle portate tra giugno e luglio, e un anticipo di circa 15 giorni nel massimo annuale della tarda primavera. Il recente picco di ottobre è attribuibile al peso della grave alluvione del 2000 nella media di soli 16 anni.

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 le valli piemontesi da un parallelo 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 critica già oggi per l'ele-

vata quota delle nevicate in caso di forti precipitazioni, **uno spostamento del limite pioggia-neve verso altitudini ancora più elevate aggiungerebbe il contributo dei deflussi derivanti da ulteriori porzioni di territorio d'alta montagna, contribuendo così all'aumento delle portate di piena.**

- **Spostamento della «morbida» fluviale da maggio-giugno 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.

La Dora Riparia in piena nel centro storico di Bussoleno (Valle di Susa) il 29.05.2008. L'episodio è stato causato da forti rovesci di pioggia fino a quota insolitamente elevata per il periodo, 3000-3200 m, successivi a due settimane di piogge moderate ma frequenti che hanno saturato i suoli. L'intenso flusso di sciocco ha pure intensificato la fusione della neve in alta quota, incrementando ulteriormente i deflussi.



Estrazione del detrito accumulato nell'alveo del Rio Gerardo a Bussoleno (Valle di Susa) durante la piena del 29.05.2008. Il probabile aumento futuro di piogge intense in alta quota potrà intensificare il trasporto di materiale solido in sospensione proveniente da suoli morenici durante episodi alluvionali.

Analizzando le portate medie giornaliere della **Dora Riparia a Salbertrand**, si nota come nel periodo 1990-2006 si sia già osservato un **anticipo di circa 15 giorni nel picco di portata** rispetto al precedente periodo 1943-1989: pur mantenendosi invariato intorno a 30 m³/s, il massimo annuale si è spostato dai giorni intorno al 20 giugno a quelli intorno al 5 giugno.

In assenza di modelli idrologici locali, per illustrare come potrebbe evolvere in futuro la portata dei fiumi piemontesi, 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 l'anticipo del massimo annuale dei deflussi (pag. 113 in basso).

- Maggiore **mobilizzazione 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 la degradazione 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 **rilocazione 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.

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 a cittadini e turisti, 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**. 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.

Si evidenzia inoltre il positivo ruolo di **contenimento delle acque di piena** da parte degli invasi in caso di episodi alluvionali, apprezzato durante l'evento del 14-15 ottobre 2000, e ancor più durante la recente piena del 29-30 maggio 2008, allorquando i laghi artificiali avevano ancora livelli molto bassi dopo la stagione invernale. Il bacino di Ceresole Reale, gestito da IRIDE Energia, invasava 15.9 milioni di m³ alla mezzanotte del giorno 28 maggio 2008, ed è arrivato all'invaso completo di 33.1 milioni di m³ nel pomeriggio del 1° giugno, trattenendo così durante le fasi più critiche della piena oltre 17 milioni di m³ d'acqua, che altrimenti sarebbero defluiti a valle incrementando ulteriormente i livelli fluviali già elevati. Tale volume corrisponde infatti a una riduzione media dei deflussi a valle lungo l'Orco di circa 50 m³/s.

8. LA NEVE

La situazione nel mondo e sulla regione alpina

Gli effetti del recente cambiamento climatico sono ormai evidenti anche sulla copertura nevosa, sia a scala planetaria, sia sulle Alpi. Per l'aumento delle temperature, **dal 1972 al 2007 la superficie continentale mediamente coperta da neve nell'emisfero Nord è diminuita del 6.4%** (1.63 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 di pag. 118 è riportata l'estensione media annua della superficie innevata sul continente eurasiatico, dal 1972: la tendenza generale è al calo, e il minimo appartiene al 1990, subito seguito dal caso del 2007.

La situazione in Piemonte: nevica meno, il manto è meno spesso e fonde precocemente

Sulle Alpi piemontesi è possibile studiare l'evoluzione recente del manto nevoso grazie a numerose stazioni nivometriche

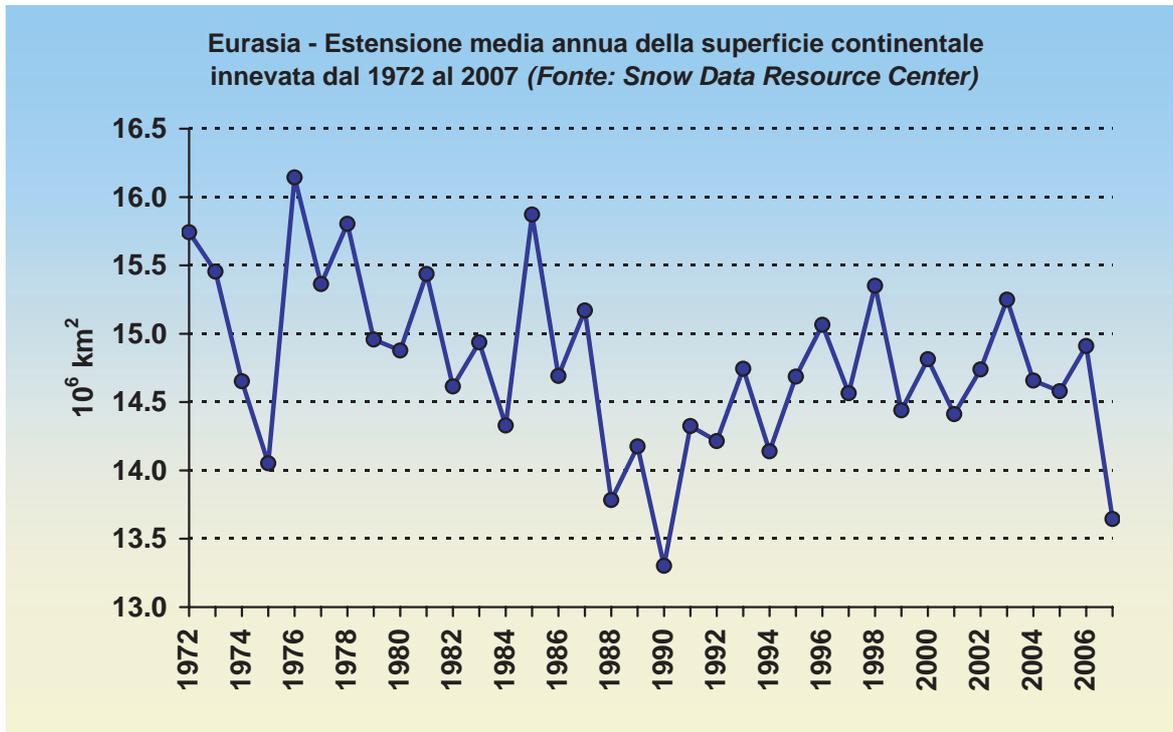
L'abitato di Roccasparvera, a 674 m di quota in Val Maira (CN), sotto la nevicata tardiva del 10.04.2003 (f. B. Terzolo).

In aprile gli episodi nevosi a bassa quota sono divenuti via via più rari per l'aumento della temperatura media, ma rimangono pur sempre possibili.



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.

Esempio di una carta che rappresenta la copertura nevosa media mensile nell'emisfero Nord, in base alle osservazioni da satellite. È riferita al gennaio 2008, quando a livello emisferico l'estensione della superficie innevata ammontava a 50 milioni di km². (fonte: <http://climate.rutgers.edu/snowcover>).

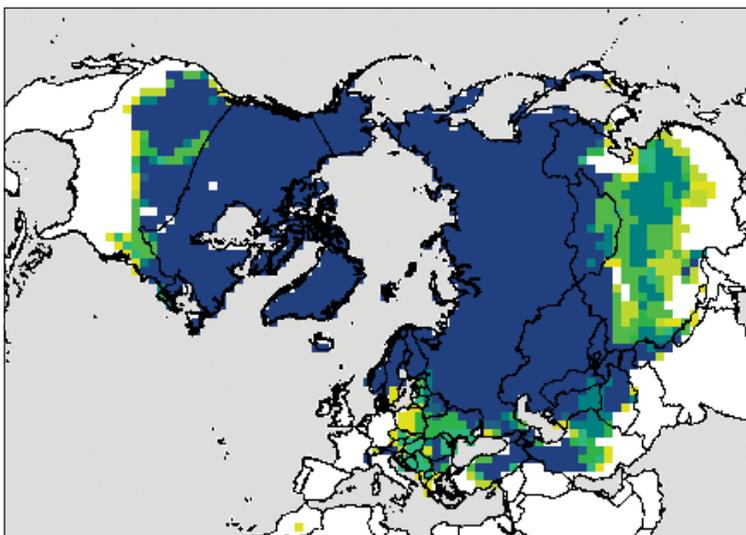


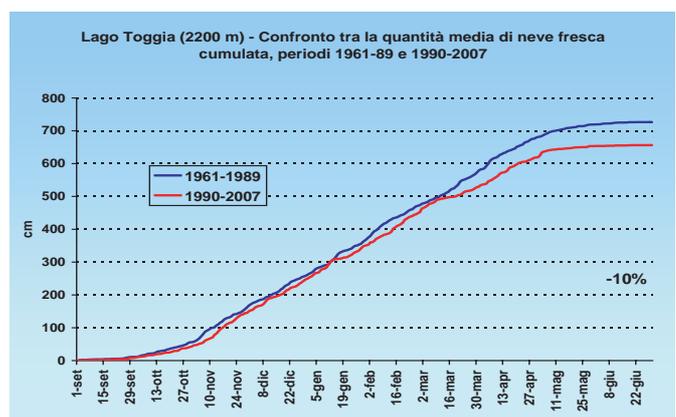
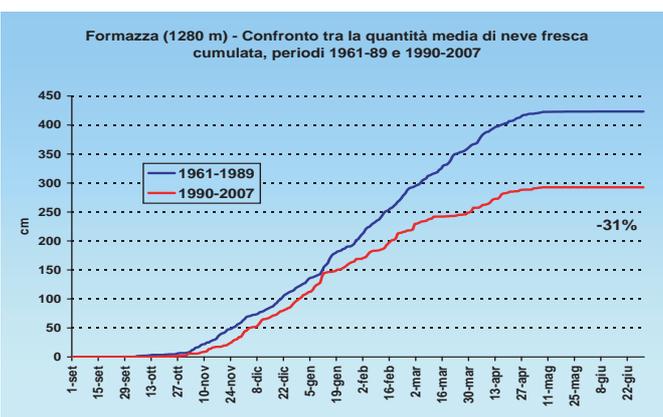
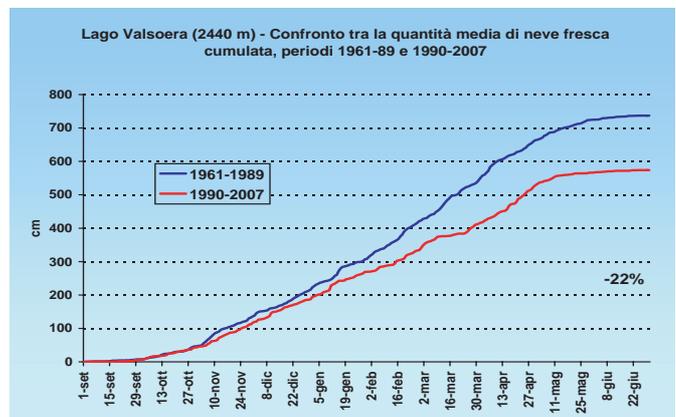
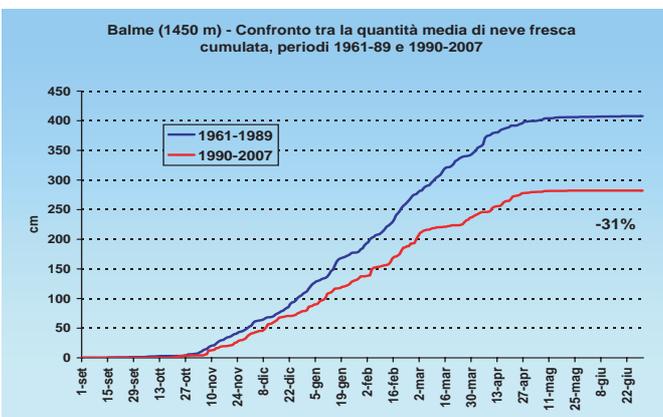
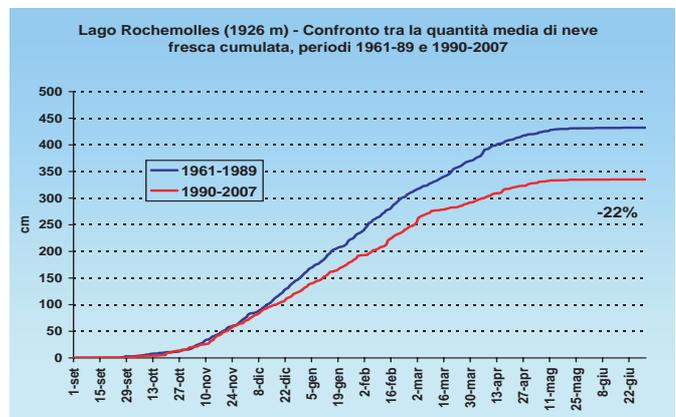
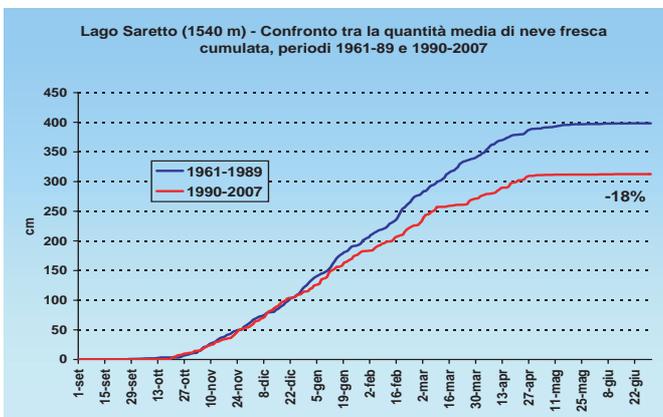
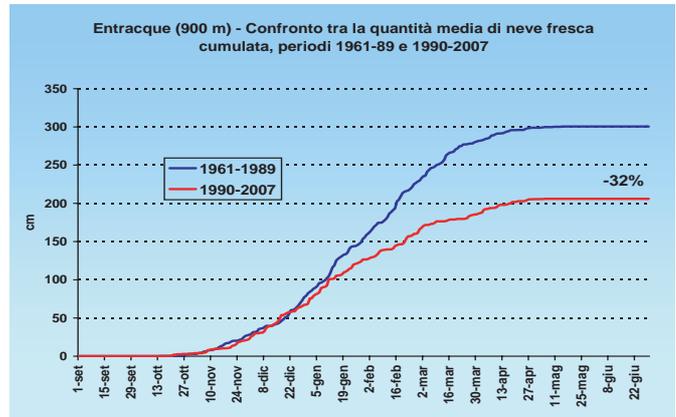
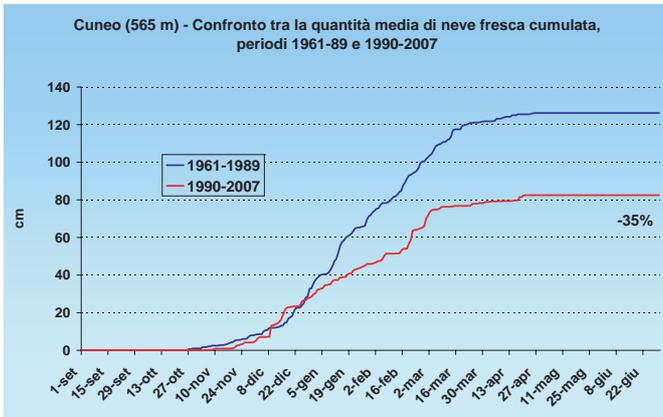
dotate di oltre 70 anni di misure giornaliere continuative, in gran parte ubicate presso impianti idroelettrici del gruppo ENEL e di IRIDE Energia.

Anche qui emerge come, **a causa del riscaldamento, siano in diminuzione l'entità delle nevicate, lo spessore medio del manto nevoso e la sua durata.**

Di seguito si propongono grafici e tabelle che descrivono l'entità delle variazioni intervenute nella quantità di neve fresca e nello spessore medio del manto nevoso nel periodo recente 1990-2007 rispetto al precedente periodo 1961-1989, comune a tutte le stazioni considerate, e rappresentativo della fase di maggiore sviluppo dei comprensori per la pratica degli sport invernali.

In conseguenza dell'aumento della temperatura invernale, **la quantità media di neve fresca è fortemente diminuita ovunque in Piemonte, ma in modo più evidente al di sotto dei 1000÷1500 m di altitudine.** Vale la pena segnalare anche le impressionanti riduzioni osservate in pianura: a **Torino**, dove le misure nivometriche sono



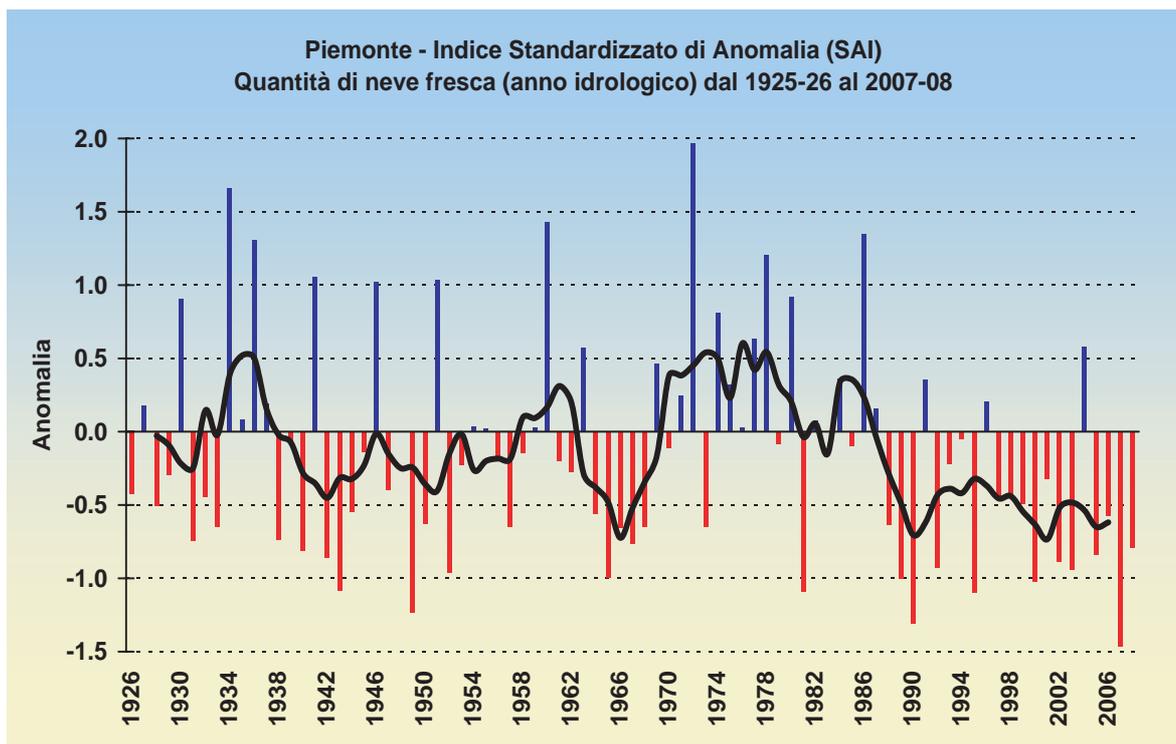


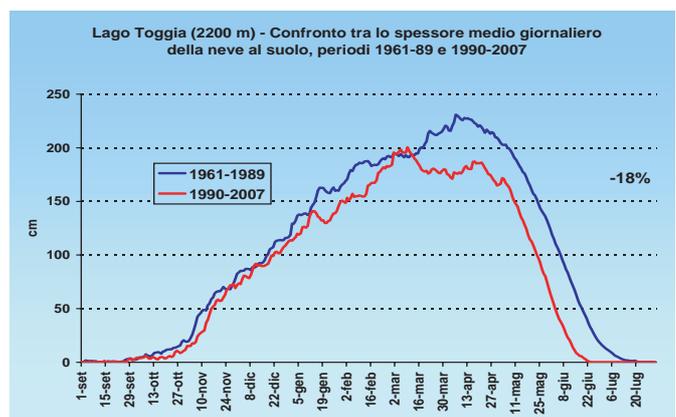
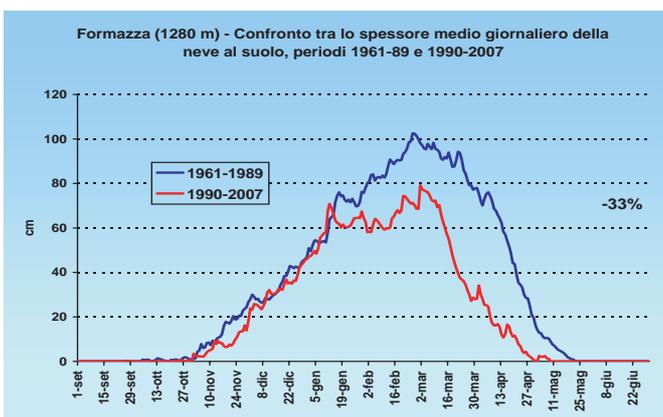
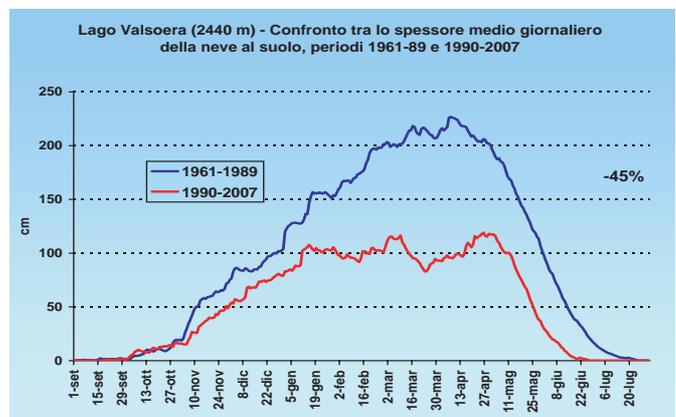
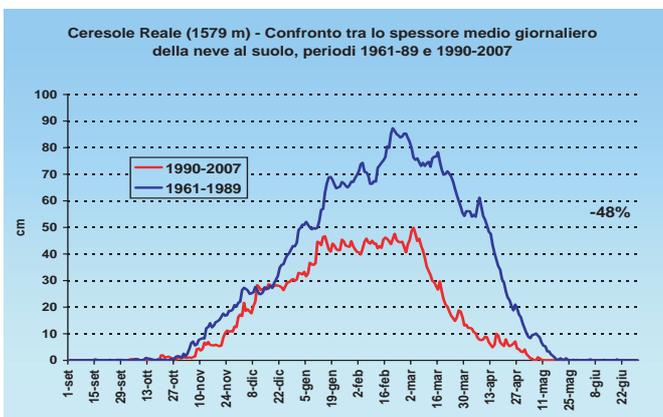
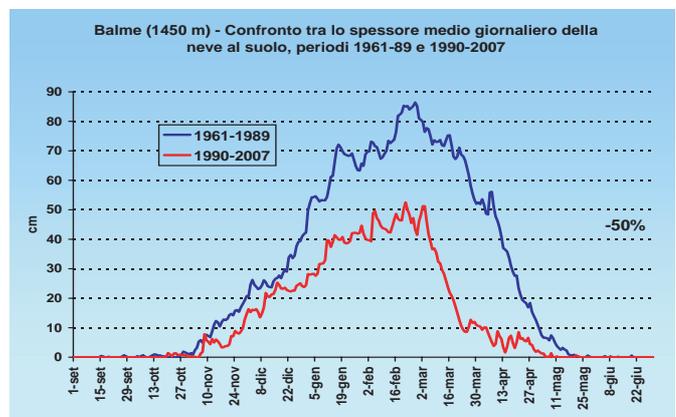
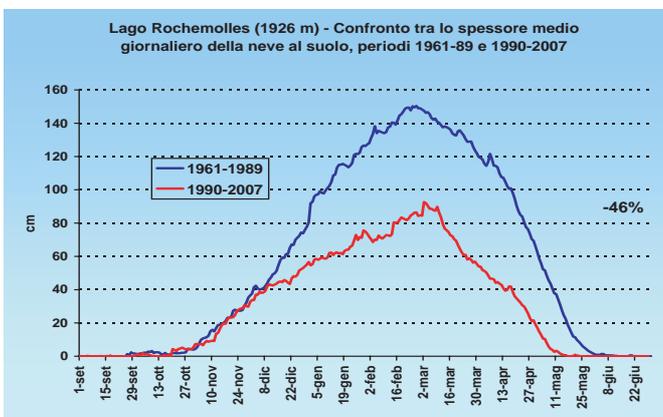
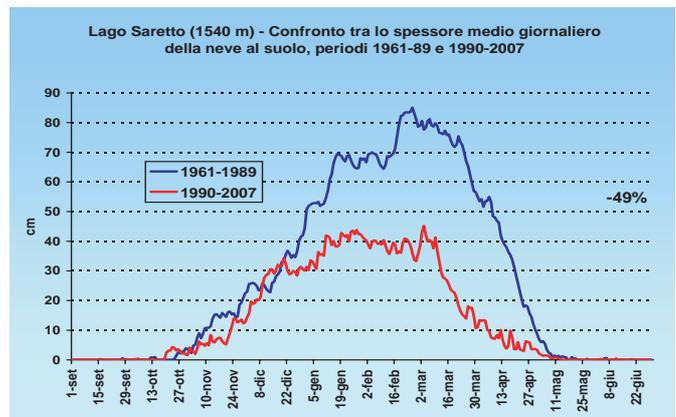
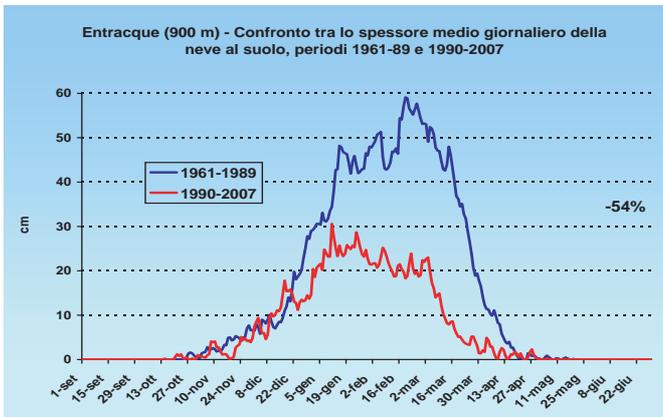
iniziate al 1787, **nel periodo recente 1990-2007 si è registrata una quantità media annua di neve fresca di 17 cm, -36% rispetto ai 27 cm del periodo storico di riferimento 1961-89.** Anche **Cuneo** ha fatto registrare un a forte riduzione, pari a **-35%.**

In montagna, benché meno pronunciata in termini percentuali, la riduzione della nevosità è stata comunque molto importante, quasi ovunque variabile da **-18% al Lago Saretto** (1540 m, alta Valle Maira) a **-32% a Entracque** (900 m, Valle Gesso). Solo la stazione del **Lago Toggia** (2200, Val Formazza), probabilmente per la sua posizione settentrionale esposta anche alle neviccate provenienti da Nord e Nord-Ovest, mostra un calo più modesto, pari a **-10%.**

La tendenza alla riduzione degli apporti nevosi è messa in evidenza anche dalla serie delle **anomalie regionali nella quantità annua di neve fresca.** In questo caso viene considerato non l'anno civile, bensì l'**anno idrologico** (che decorre dal 1° ottobre al 30 settembre successivo), al fine di considerare la stagione invernale nella sua interezza. Benché già nei decenni passati si siano osservati diversi gruppi di inverni poco nevosi, spicca la **persistenza e l'intensità delle anomalie negative registrate dopo la metà degli Anni 1980.** Negli ultimi 10 anni, soltanto l'inverno 2003-04 ha mostrato neviccate superiori al normale, mentre **l'inverno 2006-07, mitissimo e asciutto, è stato in assoluto il meno nevoso**

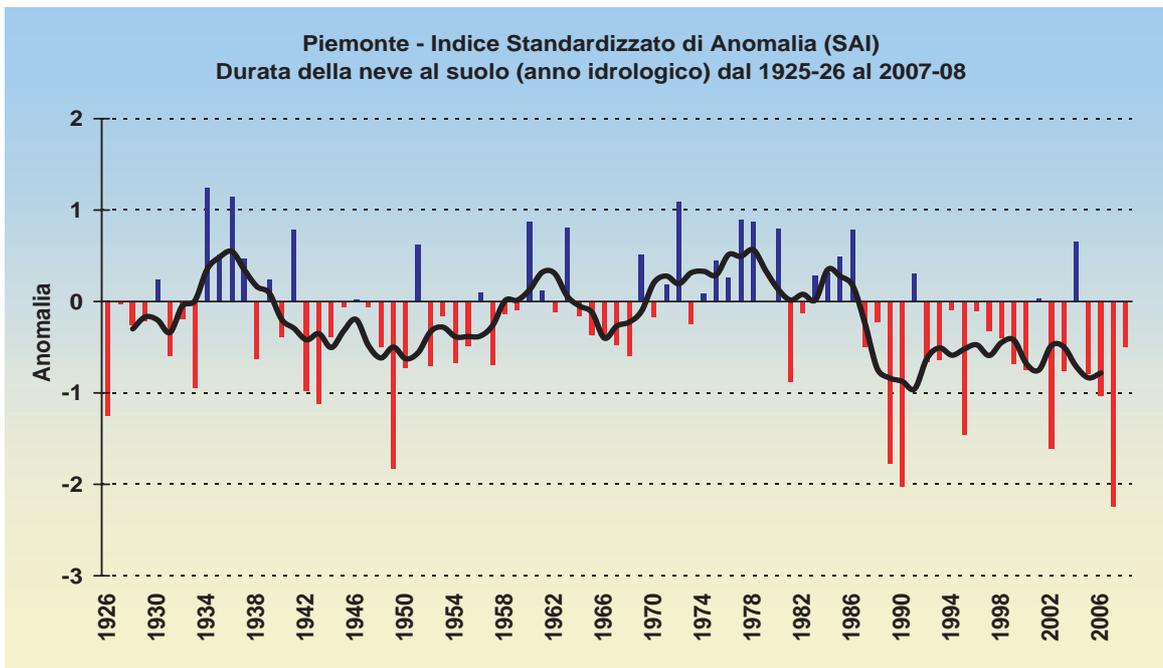
In Piemonte, l'anomalia negativa di innevamento (barrette rosse) registrata dalla fine degli Anni 1980 è la più pronunciata dal 1925-26, e l'inverno 2006-07 è stato in assoluto il meno nevoso di tutti.





Anche la durata del manto nevoso al suolo mostra le anomalie negative più evidenti e prolungate dopo la metà degli Anni 1980. Il 2006-07 si conferma come l'inverno meno nevoso dal 1925-26, per quanto riguarda la permanenza della neve. Al contrario, la maggiore durata del manto a scala regionale venne osservata nella stagione 1933-34.

A questa tendenza contribuisce sia la riduzione delle nevicate, sia la più rapida fusione primaverile.



a scala regionale dal 1925-26.

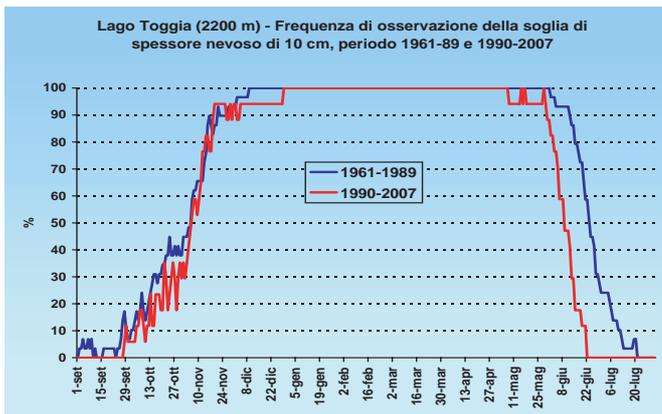
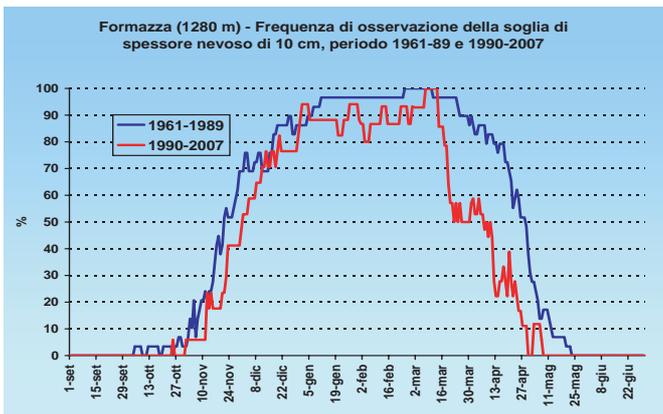
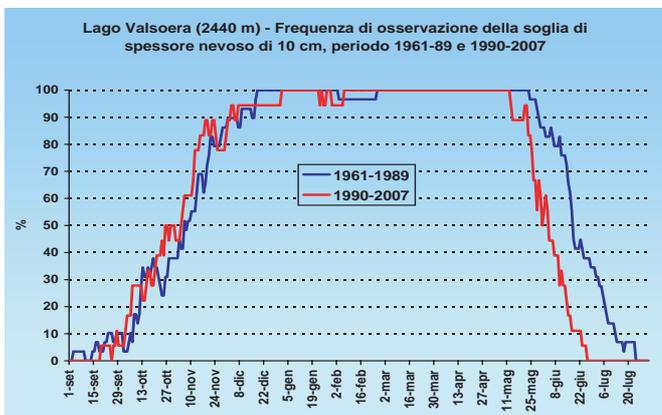
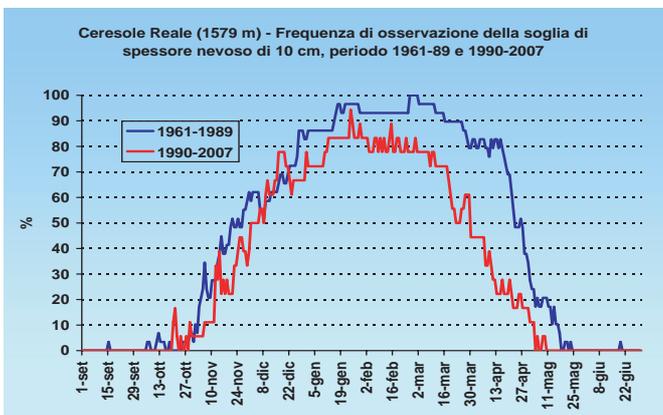
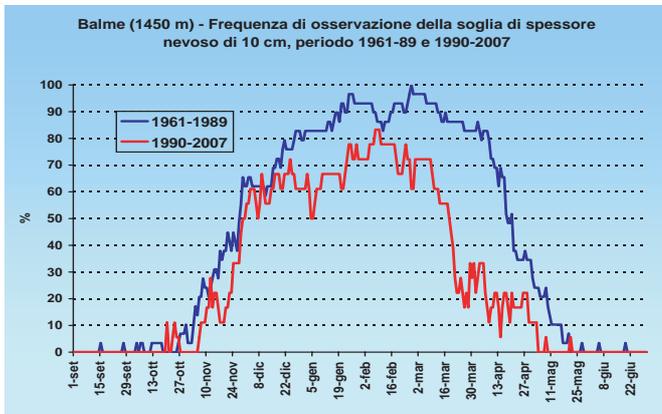
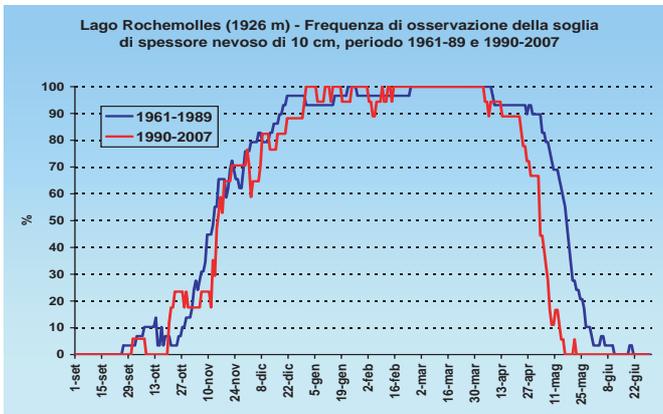
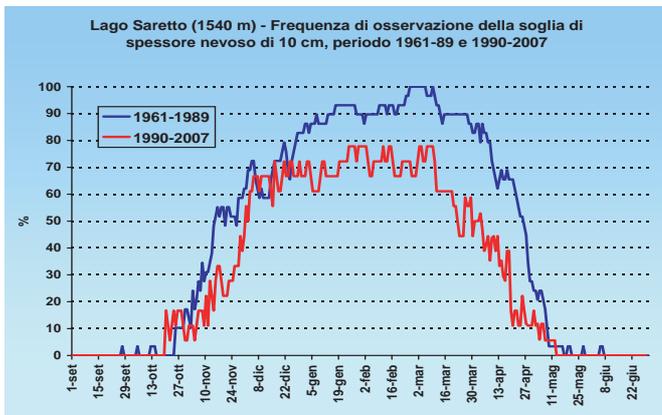
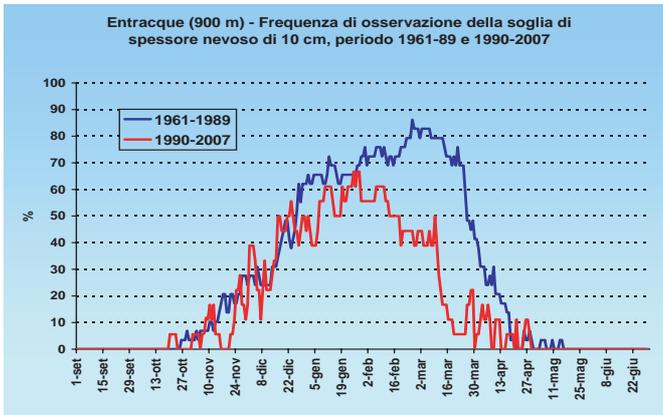
Ancora più drastica appare la riduzione degli spessori medi della neve al suolo. In questo caso, infatti, agli effetti della diminuzione delle cadute di neve fresca, si sommano quelli della **fusione più accelerata del manto dovuta alle temperature invernali e primaverili più elevate.**

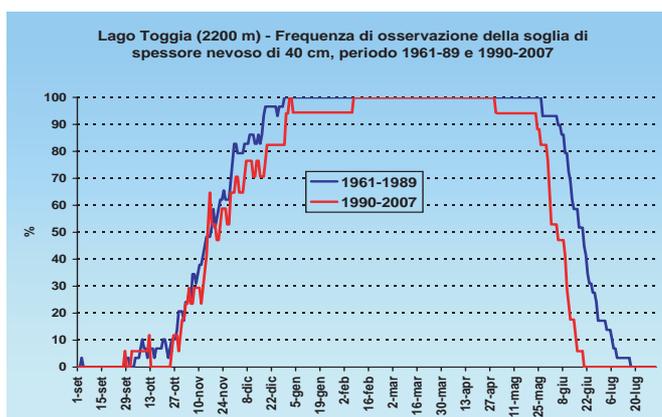
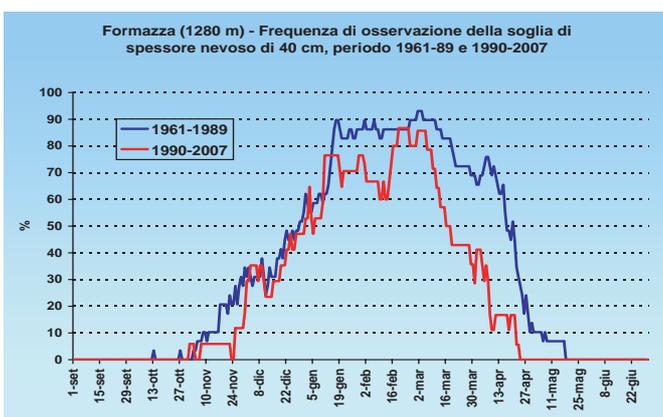
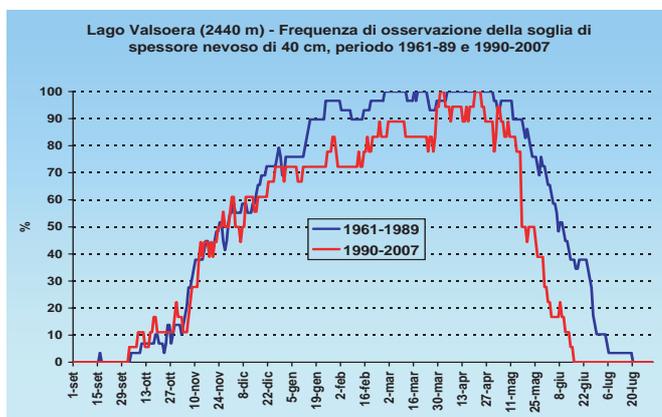
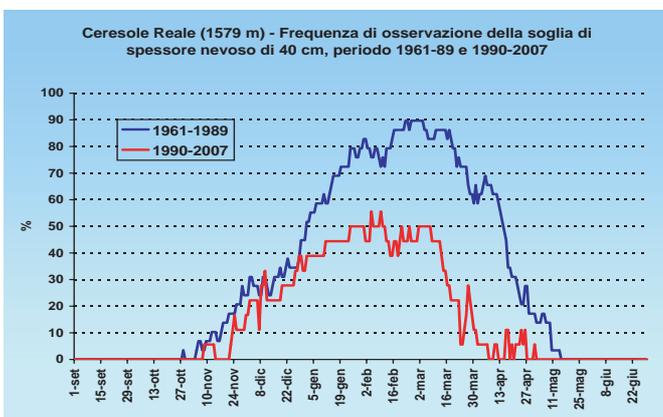
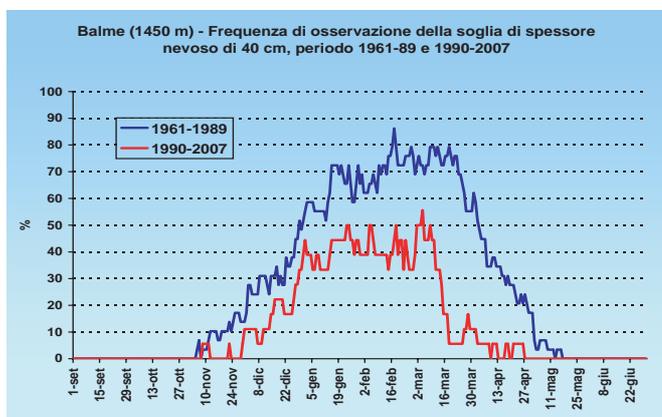
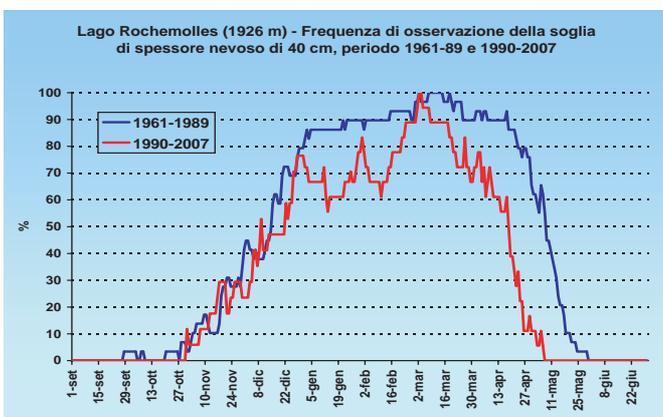
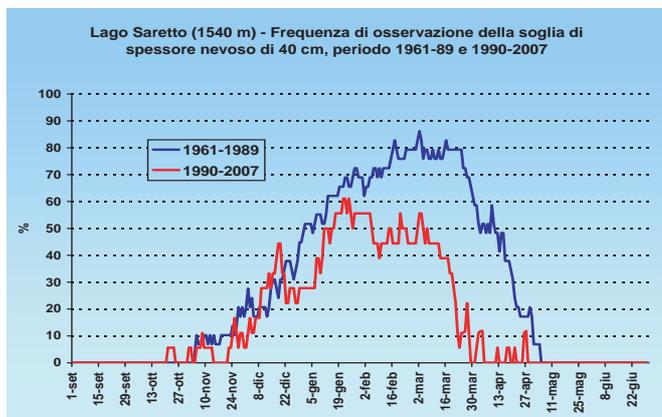
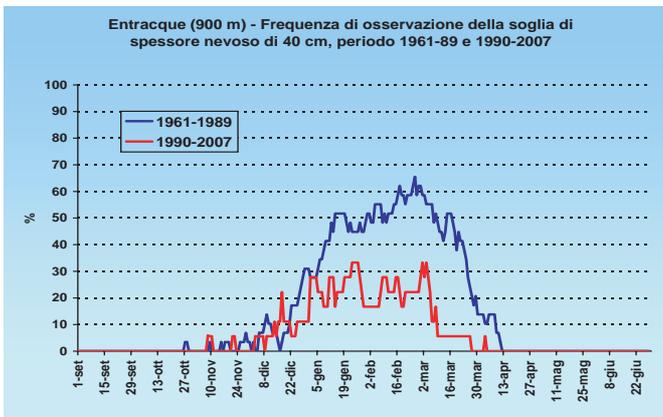
Pressoché ovunque sulle zone montuose piemontesi, nel periodo 1990-2007 i **valori medi annui di spessore nevoso al suolo si sono circa dimezzati** rispetto al precedente periodo 1961-1989, con riduzioni per lo più comprese tra **-45% al Lago Valsoera** (2440 m, Valle Orco) e **-54% a Entracque** (900 m, Valle Gesso). Come già evidenziato per la quantità di neve fresca, solo le stazioni più settentrionali di **Formazza** (1280 m) e **Lago Toggia** (2200 m) mostrano dimi-

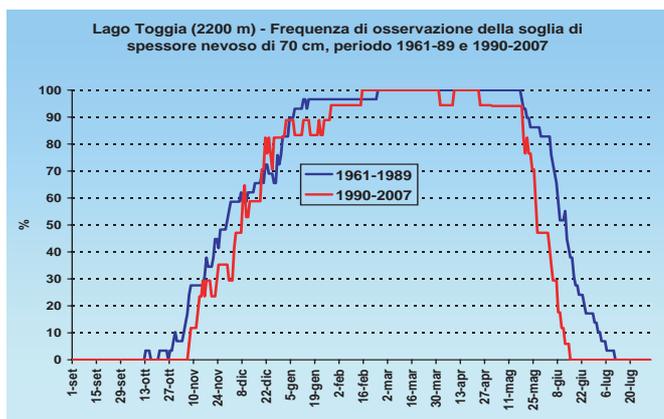
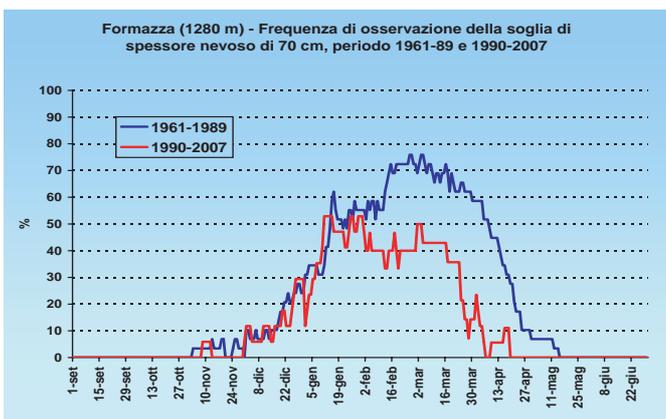
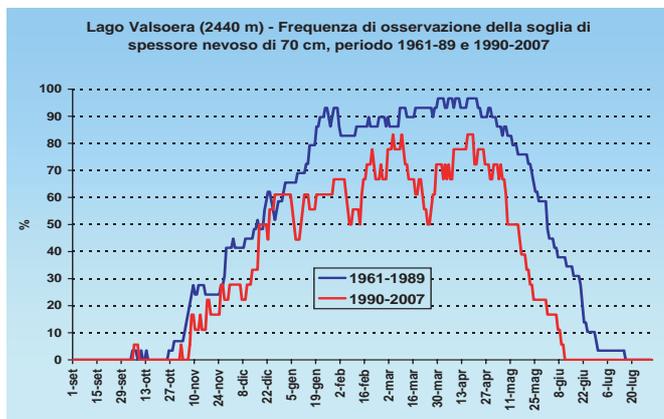
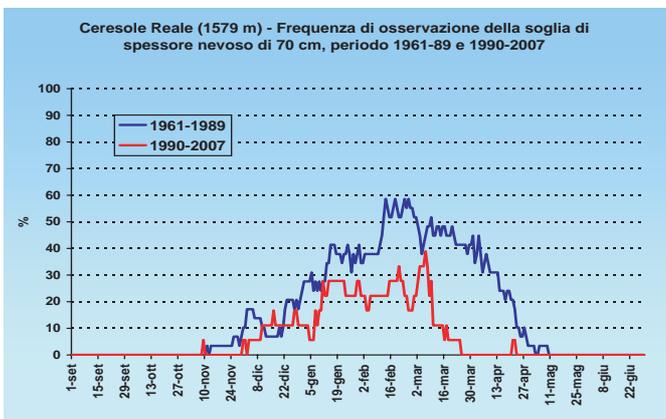
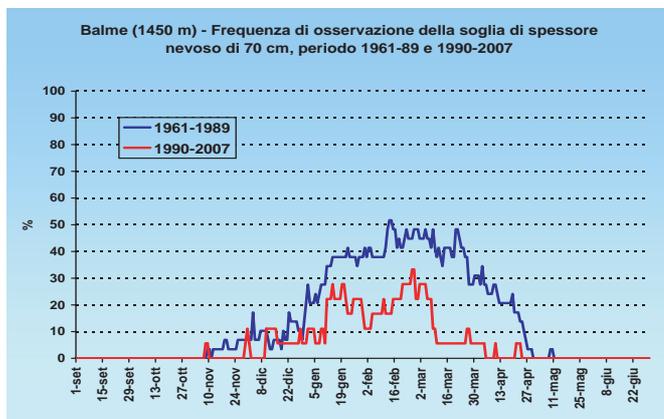
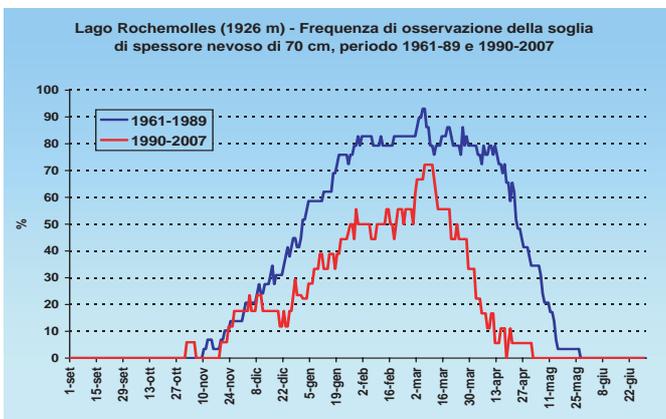
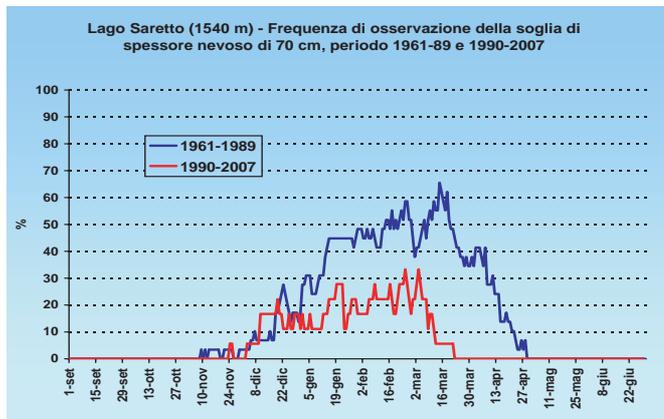
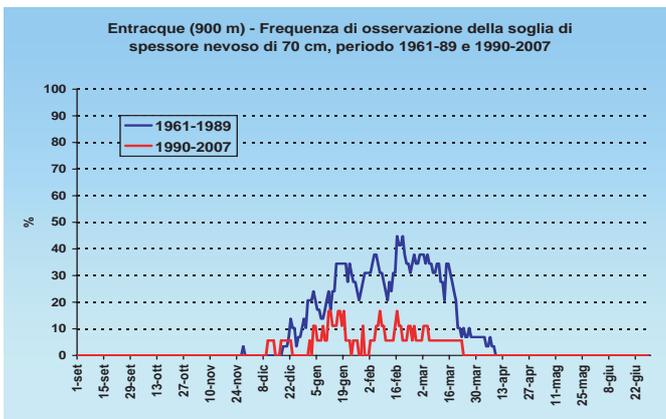
nuzioni di spessore più contenute, seppure ancora notevoli, rispettivamente pari a **-33%** e **-18%**.

Di conseguenza, **la durata stagionale del manto si è nettamente ridotta**, come visibile dalla serie delle anomalie regionali di permanenza della neve al suolo (si considera in questo caso il numero di giorni con altezza della neve pari ad almeno 1 cm). Si conferma la **prolungata anomalia negativa successiva alla metà degli Anni 1980**, nonché il **minimo assoluto dell'inverno 2006-07**.

La minore durata della neve al suolo nel periodo recente in parte è legata alla riduzione della neve fresca caduta, ma il riscaldamento intervenuto negli ultimi 15 anni e la maggiore frequenza di ondate di calore primaverili, ha indubbiamente contribuito ad accentuare la tendenza verso







In alto: riepilogo dei valori medi annui della quantità di neve fresca, dello spessore e della durata del manto nevoso, calcolati sui periodi 1961-1989 e 1990-2007.

Al centro: riepilogo delle variazioni percentuali osservate nei totali annui di neve fresca, nelle medie annue dello spessore nevoso, e nel numero annuo di giorni con suolo innevato, nel periodo 1990-2007 rispetto al precedente periodo 1961-1989. Le riduzioni più importanti della quantità di neve fresca caduta riguardano la pianura e i settori alpini centro-meridionali del Piemonte, mentre diminuzioni più contenute si sono osservate in Val Formazza.

Quanto agli spessori medi, questi si sono pressoché dimezzati quasi ovunque, salvo sul Piemonte settentrionale, dove le variazioni sono state dell'ordine di -20 ÷ -35%. Infine, il numero di giorni con presenza di neve al suolo si è ridotto maggiormente al di sotto dei 1600 m, e in misura minore al di sopra.

In basso: riepilogo del numero annuo di giorni con spessore nevoso pari o superiore alle soglie di 10, 40 e 70 cm nei periodi 1961-1989 e 1990-2007, e relativa variazione percentuale.

Per tutte le tre soglie considerate, le variazioni intervenute nel periodo 1990-2007 rispetto al 1961-1989 sono ovunque negative, ma in modo nettamente più marcato alle quote medio-basse. Soprattutto la soglia di 70 cm mostra le diminuzioni più importanti, pari a -73% ai 900 m di Entracque. Invece oltre i 1900 m le riduzioni nell'osservazione della soglia di 10 cm sono ancora molto modeste, poiché in alta montagna - nonostante le forti diminuzioni dello spessore medio - per gran parte dell'inverno l'altezza della neve rimane ancora al di sopra di tale soglia.

Riepilogo statistico dei principali parametri medi di innevamento sulle Alpi piemontesi nei periodi 1961-1989 e 1990-2007

Località	Quota (m)	Totale annuo neve fresca (cm)		Media annua spessore neve al suolo (cm)		Numero annuo giorni con suolo innevato	
		1961 - 1989	1990 - 2007	1961 - 1989	1990 - 2007	1961 - 89	1990 - 2007
Torino	250	27	17	*	*	*	*
Cuneo	565	126	83	*	*	*	*
Entracque (Valle Gesso, CN)	900	301	206	13	6	104	81
Formazza (Val Formazza, VB)	1280	423	293	29	20	157	136
Balme (Valli di Lanzo, TO)	1440	408	282	24	12	142	105
Lago Saretto (Val Maira, CN)	1540	398	313	24	12	156	118
Ceresole Reale (Valle Orco, TO)	1579	359	273	24	13	152	133
Lago Rochemolles (Val di Susa, TO)	1926	432	335	49	27	188	177
Lago Toggia (Val Formazza, VB)	2200	726	656	97	80	247	231
Lago Valsoera (Valle Orco, TO) (*)	2440	737	574	92	50	243	226

Riepilogo delle variazioni di innevamento osservate sulle Alpi piemontesi tra i periodi 1961-1989 e 1990-2007

Località	Quota (m)	Totale annuo neve fresca	Media annua spessore neve al suolo	Numero annuo giorni con suolo innevato
Torino	250	-36%	*	*
Cuneo	565	-35%	*	*
Entracque (Valle Gesso, CN)	900	-32%	-54%	-22%
Formazza (Val Formazza, VB)	1280	-31%	-33%	-14%
Balme (Valli di Lanzo, TO)	1440	-31%	-50%	-26%
Lago Saretto (Val Maira, CN)	1540	-18%	-49%	-24%
Ceresole Reale (Valle Orco, TO)	1579	-24%	-48%	-13%
Lago Rochemolles (Val di Susa, TO)	1926	-22%	-46%	-6%
Lago Toggia (Val Formazza, VB)	2200	-10%	-18%	-7%
Lago Valsoera (Valle Orco, TO)	2440	-22%	-45%	-7%
Media		-26%	-43%	-15%

Variazione del numero di giorni con spessore nevoso pari o superiore alle soglie di 10, 40 e 70 cm

Località	Quota (m)	10 cm			40 cm			70 cm		
		1961-1989	1990-2007	%	1961-1989	1990-2007	%	1961-1989	1990-2007	%
Entracque (Valle Gesso, CN)	900	85	55	-35	47	20	-57	26	7	-73
Formazza (Val Formazza, VB)	1280	147	111	-24	106	74	-30	70	39	-44
Balme (Valli di Lanzo, TO)	1440	134	88	-34	85	39	-54	45	17	-62
Lago Saretto (Val Maira, CN)	1540	139	100	-28	87	48	-45	51	19	-63
Ceresole Reale (Valle Orco, TO)	1579	140	104	-26	97	47	-52	51	20	-61
Lago Rochemolles (Val di Susa, TO)	1926	178	163	-8	141	106	-25	105	55	-48
Lago Toggia (Val Formazza, VB)	2200	239	219	-8	215	193	-10	191	172	-10
Lago Valsoera (Valle Orco, TO)	2440	230	227	-1	187	164	-12	161	118	-27

la fusione anticipata

Anche la **frequenza** giornaliera di osservazione di **spessori nevosi al suolo di almeno 10, 40 e 70 cm** è ovunque in diminuzione, come visibile dai grafici e dalle tabelle delle pagine precedenti.

Pure in questo caso si confermano **tendenze meno evidenti oltre i 1800÷2000 m e in alta Val Formazza**, mentre **a bassa quota**, e specialmente per quanto riguarda la soglia dei 70 cm, **le riduzioni sono molto marcate** (-73% di giorni con almeno 70 cm a Entracque).

Entracque (CN) sotto i 53 cm di neve presenti il 1° gennaio 2004 (f. G. Scanavino). L'inverno 2003-04 è stato l'unico tra quelli recenti a mostrare un innevamento al di sopra del normale sulle montagne piemontesi.

Cosa prevedono i modelli climatici per il futuro? Ancora meno neve

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**.

Grazie all'applicazione di un **modello di simulazione fisica ed energetica della neve**, che opera a partire dai dati meteo-

rologici che controllano dinamica e comportamento del manto, è possibile stimare la possibile evoluzione futura del manto nevoso a differenti altitudini e secondo diversi scenari di cambiamento di temperatura e precipitazioni.

Considerando uno scenario ottimistico di aumento termico entro la fine del secolo, pari a **+ 1 °C**, si nota come questo sarebbe già sufficiente – a quote intorno a **1300 m** – a decurtare del **45%** circa la neve fresca caduta nell'anno e a ridurre di **un mese** il periodo in cui il suolo è coperto di neve,



anticipandone la fusione. Alla medesima altitudine, con un aumento di **2°C** (scenario peraltro tra i più probabili verso la fine del XXI secolo) l'altezza della neve caduta si ridurrebbe dell'**80%** circa, e la copertura nevosa diverrebbe **discontinua** con ripetute fusioni complete anche in pieno inverno. Questo radicale mutamento non verrebbe scongiurato neppure se l'aumento termico fosse accompagnato da un incremento del **20%** delle precipitazioni.

Le **riduzioni sarebbero meno marcate a**

quote intorno ai 1800 m, dove la neve fresca annuale diminuirebbe del **17%** circa con uno scenario di **T +1 °C** e del **30%** circa con **T +2 °C**, mentre le altezze del manto prospetterebbero una diminuzione media del **9%** per **T +1 °C**, e del **31%** con **T +2 °C**.

COSA POTRÀ CAMBIARE SULLA MONTAGNA PIEMONTESE: 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*

Alagna
Valsesia, circa
40 cm di neve
al suolo il
11.03.2004.



Temperature alle stelle, cannoni fermi: la stagione non è partita
Senza neve, il Frais piange
 Trattative per la società degli impianti

«Luna Nuova»,
 12 gennaio 2007.

Saggio della Neve e dei Suoli Alpini (LNSA) della Facoltà di Agraria di Torino — un significativo **aumento della mineralizzazione netta dell'azoto** (FREPPAZ & *al.*, 2005).

Per quanto riguarda le fasi fenologiche, secondo KELLER et *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.

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.

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.

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

Sestriere, ottimo innevamento il 03.01.2004. Ma le situazioni favorevoli alla pratica degli sport invernali sono in progressiva diminuzione, specialmente al di sotto dei 1500 m di quota: nevica meno, il manto al suolo in media è meno spesso e scompare prima in primavera.



quanto emerso dagli scenari presentati poc' anzi.

A questo si aggiunga la **difficoltà nel produrre neve programmata se le temperature non sono almeno $< -4^{\circ}\text{C}$** (si veda in proposito lo studio realizzato da ARPA/SMS, 2008).

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 a nuovi assetti ambientali della montagna piemontese.

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

L'aumento delle temperature e il calo nella quantità e nella durata dell' innevamento porteranno inevitabilmente con sé conseguenze nei regimi di produzione

In futuro i costi economici ed energetici per il funzionamento degli impianti di innevamento programmato 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 di quota.



idroelettrica.

Potenziali 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 nell'utilizzo delle acque.**

4) Trasporti: meno disagi da neve

La minore durata dell'innevamento potrà 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 Moncenisio e dell'Agnello; 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

Sgombero della neve a Limone Piemonte (CN) il 22.02.2004, a seguito di un'imponente nevicata che ha depositato fino a un metro e mezzo di neve fresca sulle Alpi cuneesi. In futuro l'influenza della neve sul sistema dei trasporti diverrà meno importante anche sulle Alpi, con minori costi per le operazioni di salatura e sgombero delle strade. Ciò non esclude che possano mantenersi situazioni propizie alla formazione di valanghe, anche di forte intensità, per effetto dell'atteso aumento di precipitazioni soprattutto lungo le creste spartiacque con i versanti nordalpini (f. B. Terzolo).



presente in una regione montuosa come il Piemonte, e che tanto ha influenzato lo sviluppo dei nuclei abitati, delle comunicazioni nelle valli laterali e la vita degli alpini 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).

Nel 1986 si verificò l'ultima diffusa situazione valanghiva sulle montagne piemontesi. A lato, la strada per Carcoforo (Val Sesia) appena riaperta dopo la caduta di grandi valanghe nell'aprile 1986.



Sintesi delle tendenze e degli scenari attesi di alcuni indicatori climatici in Europa e in Piemonte (1a parte)

<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 34% dall'età pre-industriale, con una accelerazione nella crescita dal 1950. Attualmente il valore è di 388 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. Il biossido di carbonio contribuisce per il 64%, 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 0.74 °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 1.2 °C dal 1900. L'aumento di temperatura è stato più sensibile in inverno che in estate (ma sulle Alpi piemontesi si è osservata una situazione opposta, con maggiore riscaldamento estivo).
	In Piemonte il 2007 è stato l'anno più caldo, seguito dal 2003, dal 1997 e dal 2006
	A livello globale tra il 1990 e il 2100 si prevede un aumento di temperatura tra 1.8 e 4.0 °C. 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 Piemonte negli ultimi 90 anni si è manifestata nel complesso una moderata tendenza alla diminuzione delle precipitazioni, ma i segnali sono piuttosto deboli e irregolari.
	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, compreso il Piemonte (dal periodo 1961-89 al 1990-2007: -25 ÷ -50% sotto i 1000 m; -5 ÷ -10% attorno a 2000 m), mentre sono aumentati il numero di giorni con temperature superiori a 30 °C a bassa quota 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 Piemonte al momento non si evidenziano variazioni significative nel numero di episodi di pioggia intensa.
	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 sia gli episodi di precipitazioni intense diventeranno più frequenti

Sintesi delle tendenze e degli scenari attesi di alcuni indicatori climatici in Europa e in Piemonte (2° parte)	
Indicatori	Punti chiave
Neve e ghiacciai	
<i>Ghiacciai</i>	Dal 1850 al 2000 i ghiacciai alpini hanno perso la metà della loro superficie complessiva, passando da circa 4500 km ² a circa 2270 km ² . Studi effettuati sui ghiacciai del Canavese e della Val Sesia confermano per il Piemonte una riduzione del medesimo ordine di grandezza.
	La fusione dei ghiacciai alpini ha raggiunto oggi livelli superiori a quelli degli ultimi 5000 anni (come testimonia il ritrovamento della mummia Oetzi in Alto Adige).
	Si stima che nel 2050 il 75% dei ghiacciai svizzeri sarà scomparso. La situazione in Piemonte potrebbe essere perfino più critica, date le quote inferiori e l'esposizione più soleggiata e calda.
<i>Neve</i>	Nell'emisfero nord l'estensione della copertura nevosa annuale è diminuita del 6% dal 1972 al 2007.
	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 Piemonte nel periodo 1990-2007 si è assistito ad un anticipo di circa 15 giorni della fusione primaverile rispetto al periodo 1961-1989.
	La copertura nevosa nell'emisfero nord diminuirà ulteriormente nel corso del XXI secolo. In Piemonte 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 addizionale 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.
	Gli effetti positivi dell'incremento termico sulla vegetazione saranno probabilmente vanificati da un aumento del rischio di siccità in Europa meridionale.
<i>Sopravvivenza dell'avifauna</i>	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.

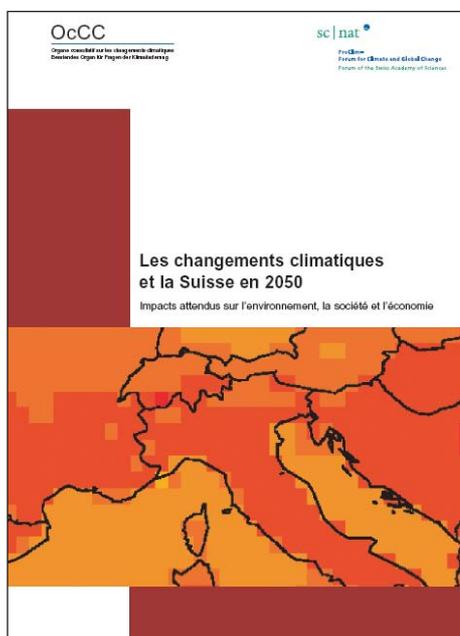
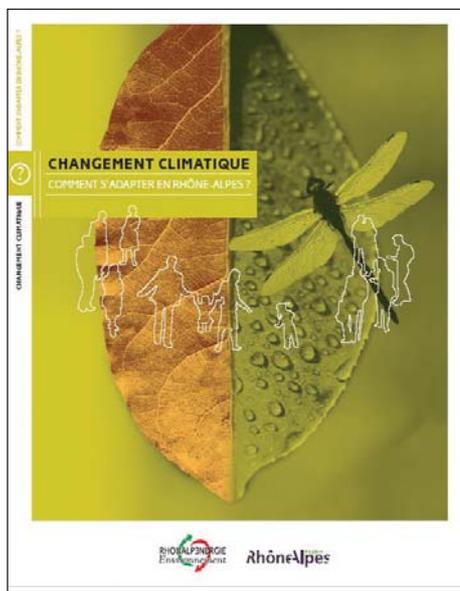
Sintesi delle tendenze e degli scenari attesi di alcuni indicatori climatici in Europa e in Piemonte (3° parte)	
Indicatori	Punti chiave
Acqua	
<i>Deflusso fluviale annuale</i>	Il deflusso annuale dei fiumi europei è cambiato negli ultimi decenni: in alcune regioni è aumentato, mentre in altre, come 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 Piemonte 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%. Anche in Piemonte le colture di cereali hanno subito perdite importanti per la siccità (minori nelle aree la cui irrigazione è favorita da abbondanti deflussi glaciali).
	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 35.000 vittime, in particolare tra la popolazione anziana, sono attribuibili all'ondata di caldo che ha investito l'Europa nell'estate 2003.
	Nell'estate 2003 a Torino si è registrato un aumento del 33% della mortalità a causa del caldo estremo.
	Le ondate di calore sono previste diventare più frequenti e intense nei prossimi decenni con aumento nel numero di decessi dovuti al caldo; le valli montane del Piemonte potrebbero 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>	Nelle valli alpine si rileva la recente diffusione di insetti vettori di parassitosi prima sconosciute (es. leishmaniosi del cane), imputabile all'aumento delle temperature.

**Indicazioni per la programmazione politica nei confronti
dei cambiamenti climatici nelle zone montane**

- | |
|--|
| 1) Potenziamento reti irrigue |
| 2) Risparmio idrico e cisterne domestiche per raccolta acqua piovana |
| 3) Massimo isolamento termico edifici secondo standard Casaclima (BZ), Minergie (Svizzera) o Itaca |
| 4) Massima incentivazione dell'uso di energia solare, termica e fotovoltaica |
| 5) Utilizzo energetico della biomassa legnosa attentamente dimensionato secondo le potenzialità forestali |
| 6) Stabilizzazione impianti innevamento programmato senza nuove espansioni, specie sotto i 1500 m |
| 7) Minimizzazione della produzione di rifiuti e massima quota riciclabile |
| 8) Economia di filiera corta dove possibile (minimo trasporto) |
| 9) Salvaguardia reti di osservazione meteoroidrologica per un pronto monitoraggio dei cambiamenti e allerta eventi estremi |
| 10) Educazione e sensibilizzazione della cittadinanza al consumo critico e al rispetto dei limiti fisici del territorio |

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 il Piemonte.

BIBLIOGRAFIA



La regione francese Rhône-Alpes ha recentemente pubblicato l'opuscolo «Changement climatique: comment s'adapter en Rhône-Alpes?» (in alto), in piena sintonia con la Regione Piemonte (AA.VV., 2007); contemporaneamente anche in Svizzera l'OcCC - Organe consultatif sur les Changements Climatiques - (qui sopra) ha realizzato un volume dedicato agli scenari climatici, sociali, economici attesi all'orizzonte del 2050 nella Confederazione (AA.VV., 2007a).

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 - *Événements 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.

AA.VV., 2007 - *Changement climatique: comment s'adapter en Rhône-Alpes?* Rhônealpeénergie - Environnement, 40 pp.

http://www.raee.org/docs/ACTUALITE/chgt_clim_synthese.pdf

AA.VV., 2007a - *Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Impacts attendus, sur l'environnement, la société et l'économie.* OcCC, Organe consultatif sur les Changements Climatiques, Berne. 172 pp.

www.occ.ch/products/ch2050/CH2050-rapport.html

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.

ARPA PIEMONTE - SOCIETÀ METEOROLOGICA SUBALPINA, 2008 - *L'innevamento naturale delle Alpi piemontesi e le condizioni meteorologiche favorevoli alla produzione di neve programmata.* Rapporto tecnico.

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.

AUER I., BÖHM R., JURKOVIC A., LIPA W., ORLIK A., POTZMANN R., SCHÖNER W., UNGERSBOECK M., MATULLA C., BRIFFA K., JONES P.D., EFTHYMIADIS D., BRUNETTI M., NANNI T., MAUGERI M., MERCALLI L., MESTRE O., MOISSELIN J.M., BEGERT M., MÜLLER-WESTERMEIER G., KVETON V., BOCHNICEK O., STASTNY P., LAPIN M., SZALAI S., SZENTIMERY T., CEGNAR T., DOLINAR M., GAJIC-CAPKA M., ZANINOVIC K., MAJSTOROVIC Z., NIEPLOVA E., 2007 - *HISTALP - Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater*

- Alpine Region*. «International Journal of Climatology» 27:17-46.
- 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., SHIYATOV 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., MEARN S.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.
- CASSARDO C., ACORDON V., MERCALLI L., CAT BERRO D., 2007 - *Caldo eccezionale dell'estate 2003 in Europa: cause ed effetti*. Nimbus 43-44:6-21. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno.
- CASTELLANO C., MERCALLI L., 1997 - *La neve in Valle di Susa: analisi climatologica*. Nimbus 10:5-29. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Torino.
- 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.
- CESTI G., 2007 - *Incendi boschivi da fulmine nel 2003 in Valle d'Aosta e Ticino*. Nimbus 43-44:22-28. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno.
- CICCARELLI N., VON HARDENBERG J., PROVENZALE A., RONCHI C., VARGIU A., PELOSINI R. (in stampa) - *Climate Variability in North-Western Italy during the Second Half of the 20th Century*. Global and

Planetary Change.

- 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.
- CRUZEN 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.
- 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 chimicofisiche 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.
- GOODISON 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.
- GROSJEAN M., SUTER P. J., TRACHSEL M., WANNER H. 2007. *Ice-borne prehistoric finds in the Swiss Alps reflect Holocene glacier fluctuations*. *J. Quaternary Sci.*, Vol. 22 pp. 203-207. ISSN 0267-8179.
- 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., MÜLLER 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.
- IPCC, 2007 - *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- 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.
- JUCKES M. N., ALLEN M. R., BRIFFA K. R., ESPER J., HEGERL G. C., MOBERG A., OSBORN T. J., WEBER S. L., 2007 - *Millennial temperature reconstruction intercomparison and Evaluation*. Climate of the Past, 3, 591-609, 2007 - www.clim-past.net/3/591/2007/
- 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: CEBON P. (eds), 1998 - *Views from the Alps - Regional perspectives on climate change*. The MIT Press.
- LOH J. (ed.), 2008 - *2010 and beyond. Rising the biodiversity challenge*. World Wildlife Found, Gland (Switzerland), 16 pp.
- 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.
- LUTERBACHER J., LINIGER M. A., MENZEL A., ESTRELLA N., DELLA-MARTA P. M., PFISTER C., RUTISHAUSER T., XOPLAKI E. - *The exceptional European warmth of Autumn 2006 and Winter 2007: historical context, the underlying dynamics and its phenological impact*. Geophys. Res. Lett., accepted, 2007.
- 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.
- MERCALLI L., ACORDON V., CAT BERRO D., DI NAPOLI G., 2006 - *Cambiamenti climatici in Valle d'Aosta. Opportunità e strategie di risposta*. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno. X+159 pp.
- MÉTÉO FRANCE, CNRS, CEA, 2005 - *Réchauffement climatique : les nouveaux résultats des modèles français*. Conférence de presse. Paris, 2 juin 2005.
- MIN. LL. PP., 1973 - *La nevosità in Italia nel quarantennio 1921-1960 (gelo, neve e manto nevoso)*. Servizio Idrografico, pubblicazione n. 26. Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.
- 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.
- MORTARA G., MERCALLI L., 2002 - *Il lago epiglaciale «Effimero» sul ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga, Monte Rosa*. Nimbus 23-24:10-17. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Torino.
- MORTARA G., TAMBURINI A. (a cura di), in stampa - *Il ghiacciaio del Belvedere e l'emergenza del Lago Effimero*. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno.
- MUSEO REGIONALE DI SCIENZE NATURALI, 2008 - *I tempi stanno cambiando. Come varia il clima: conoscenze attuali e scenari futuri*. Catalogo della mostra (Torino, 18 marzo - 31 ottobre 2008). Ed. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno. X + 118 pp.
- NESJE A., DAHL S.O., 2003 - *The «Little Ice Age» - only temperature?* The Holocene 13(1):171-177.
- NORTH N., KLJUN N., KASSER F., HELDSTAB J., MAIBACH M., REUTIMANN J., GUYER M., 2007 - *Il cambiamento climatico in Svizzera. Indicatori riguardanti cause, effetti e misure*. Stato dell'ambiente n. 0728. Ufficio federale dell'ambiente, Berna. 77 p.
- OLESON K.W., DAI Y., 2004 - *Technical description of the Community Land Model (CLM)*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Co.
- ONERC, 2008 - *Changements climatiques dans les Alpes: impacts et risques naturels*. Rapport technique n. 1 de l'ONERC, mars 2008. Pole Grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention des Risques Naturels. 88 pp.
- <http://www.risknat.org/docs/Rapport%20Technique%20N%b01.pdf>.
- OERLEMANS 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.
- PASINI A. (a cura di), 2006 - *Kyoto e dintorni. I cambiamenti climatici come problema globale*. Franco Angeli.
- PICCINI P., 2007 - *Ghiacciai in Valsesia*. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno. X + 133 pp.
- PIVIDORI 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.

ROMANO F., MERCALLI L., 1994 - *L'Osservatorio Meteorologico di Cuneo: dal 1877 «sentinella» della Granda*. Nimbus 3:8-15. Ed. Società Meteorologica Subalpina, Torino.

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., HAEBERLI 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 climatechange 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., KÜPPER 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.

UNEP - WGMS, 2008 - *Global Glacier Changes: facts and figures*,

www.unep.org/pdf/ClimateChange/GlobalGlaciersChanges_20080831_en.pdf

VAN OLDENBORGH G.J., 2007 - *How unusual was autumn 2006 in Europe?* Clim. Past Discuss., 3: 811-837.

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*. Boringhieri 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.

ZEMP M., PAUL F., HOELZLE M., HAEBERLI W., 2007 - *Alpine glacier fluctuations 1850-2000: An overview and spatio-temporal analysis of available data and its representativity*. In: Orlove, B., Wiegandt, E. and Luckman, B. (eds.): *The Darkening Peaks: Glacial Retreat in Scientific and Social Context*, Berkeley, University of California Press.

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

1.	Che cos'è il clima	1
2.	Aspetti climatici della montagna piemontese	9
3.	Variabilità climatica ed effetto serra	34
4.	Lezioni dal passato	44
5.	La previsione del clima futuro	51
6.	La temperatura	57
7.	Le precipitazioni	98
8.	La neve	117
	Sintesi delle tendenze e degli scenari attesi di alcuni indicatori climatici in Europa e in Piemonte	133
	Bibliografia	137