

Cambiamenti climatici: le variazioni climatiche e le conseguenze sulle risorse idriche

*Giuseppe Orombelli
Università di Milano-Bicocca*

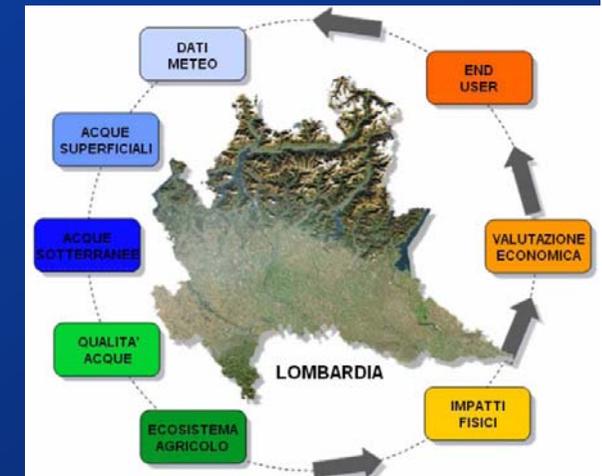
Tempo atmosferico e clima, il sistema climatico

Il cambiamento climatico in atto alla scala globale

Gli effetti del cambiamento climatico

I cambiamenti climatici: la lezione del passato

Impatto dei cambiamenti climatici nel passato sulle società umane



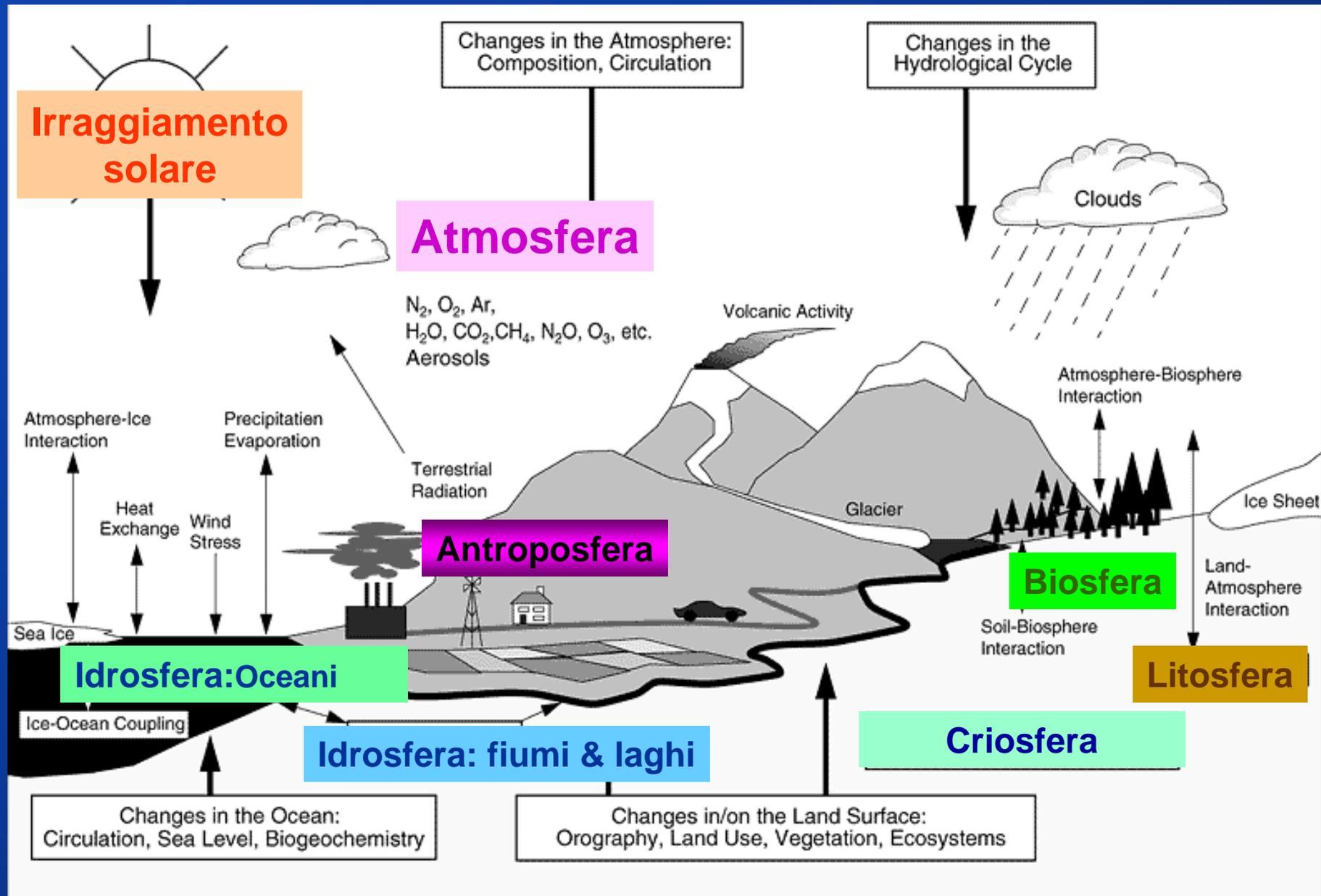
Tempo atmosferico: condizioni fisiche reali dell'atmosfera in un determinato luogo o regione, in un determinato momento. Il tempo atmosferico è continuamente mutevole nel tempo. Del tempo atmosferico e delle sue variazioni ciascuno di noi ha esperienza diretta.

Il clima

Condizioni caratteristiche dell'atmosfera in un determinato luogo o regione, dedotte da sistematiche misure meteorologiche per almeno un decennio, e sintetizzate dai valori medi ed estremi (diurni, mensili ed annui) di temperature, precipitazioni, ecc. Il clima è una generalizzazione e, nel breve periodo, viene assunto come stabile.

In realtà anche il clima è in continua modificazione con diverse scale di ampiezza e dei tempi (da 10 a 10^9 anni). Le variazioni climatiche in generale non vengono direttamente percepite dagli individui, perché spesso risultano unicamente da modeste variazioni di tipo statistico.

Il sistema climatico



Cambiamenti climatici

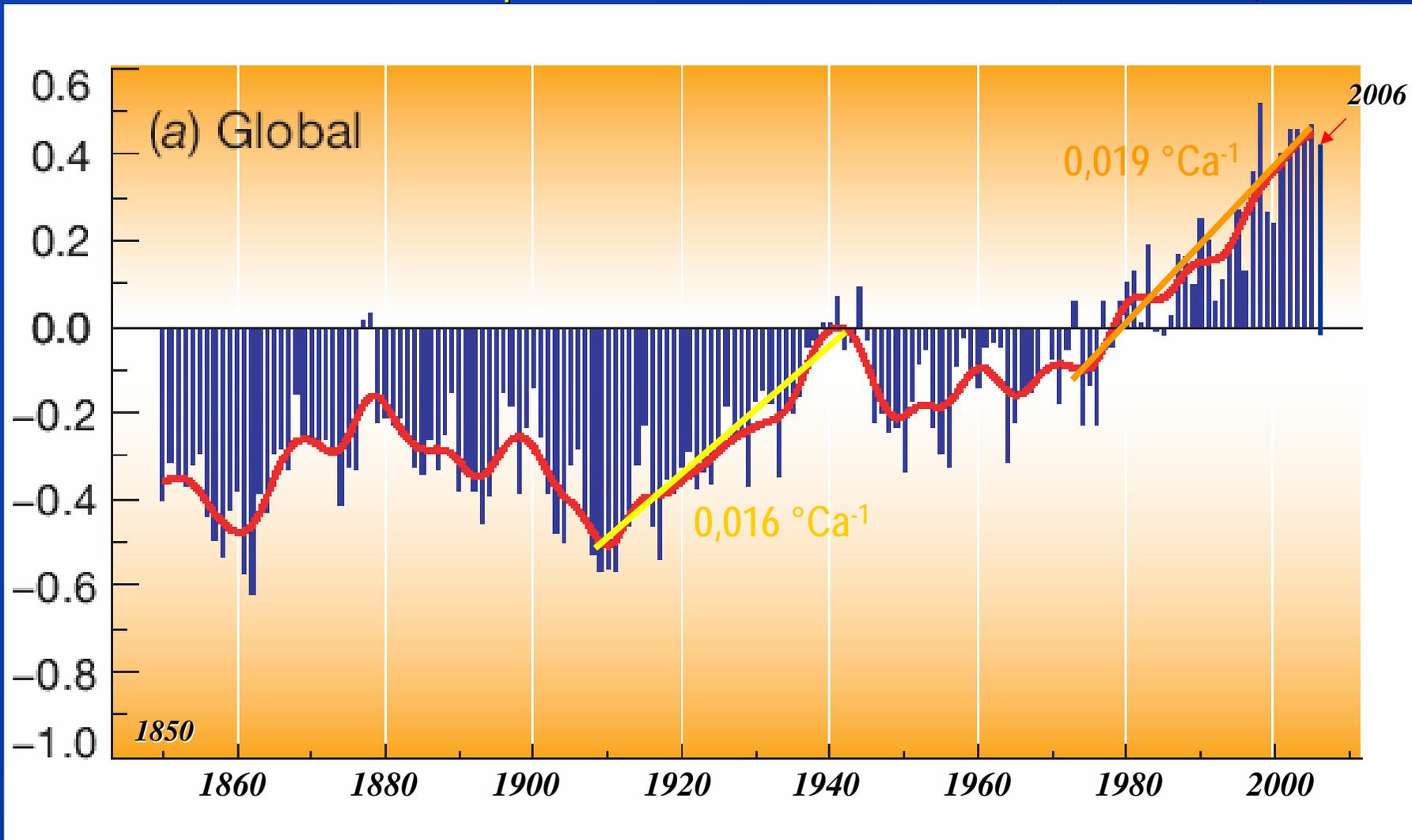
Ogni cambiamento nei componenti del sistema climatico determina un cambiamento climatico. Il clima sulla Terra non è stabile ma soggetto a continui cambiamenti, valutabili, però, solo a posteriori.

La documentazione meteorologica strumentale
(2-3 secoli)

La documentazione storica (pochi millenni)

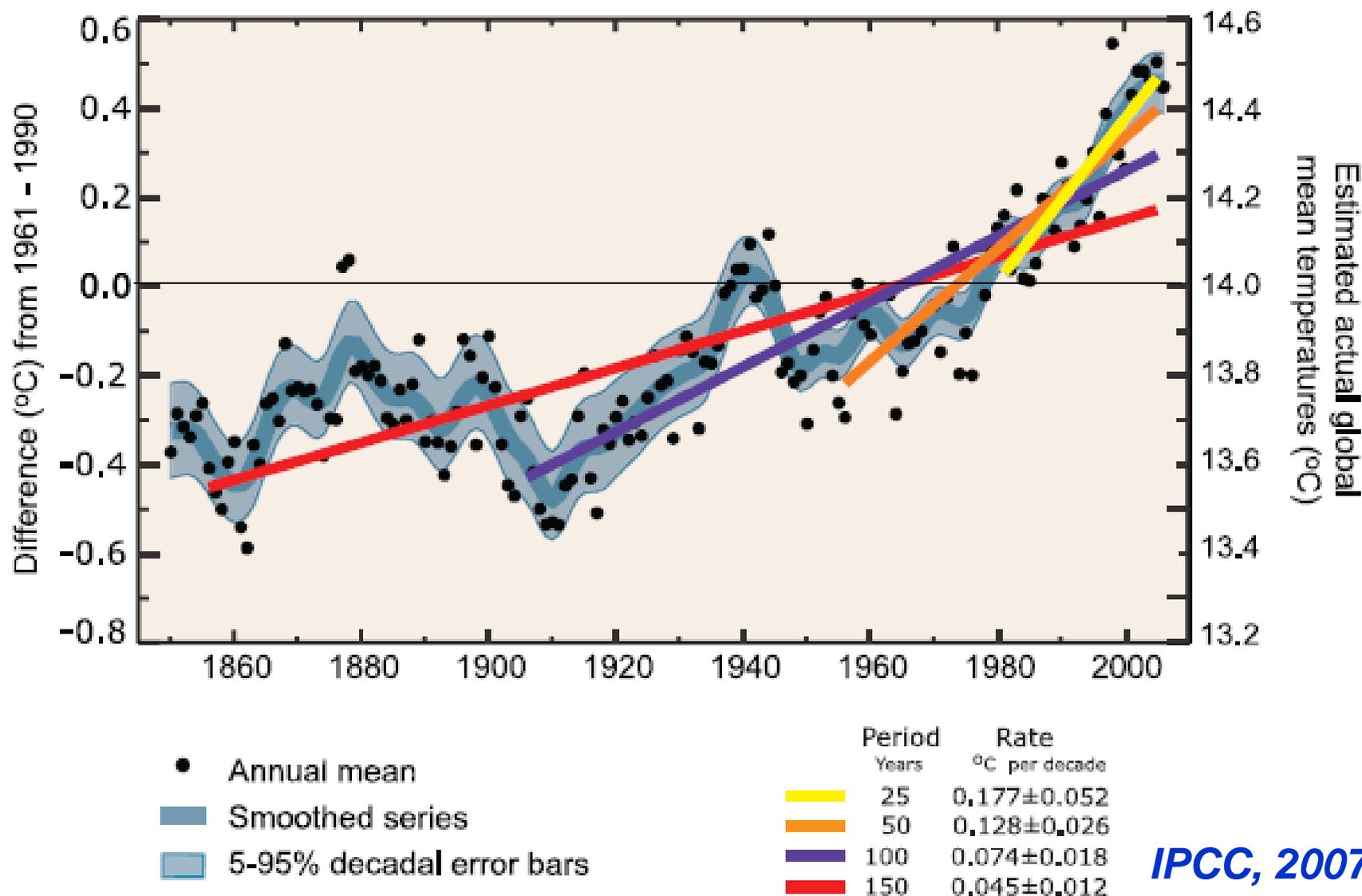
La documentazione geologica (dai secoli ai miliardi di anni)

Variazioni della temperatura media annua globale (Tmag)
dal 1850 al 2006 rispetto alla media 1961-1990 (WMO, 2006)



Dall'inizio del 20° secolo la Tmag è aumentata di $0,76 \pm 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}$, negli ultimi 30 anni di $\sim 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.
11 degli ultimi 12 anni (1995-2006), sono stati i più caldi dal 1850.
L'ultimo ventennio (1986-2005) costituisce la più lunga sequenza continua di anni più caldi della media 1961-1990. Il 2006 è stato il sesto anno più caldo dal 1850.

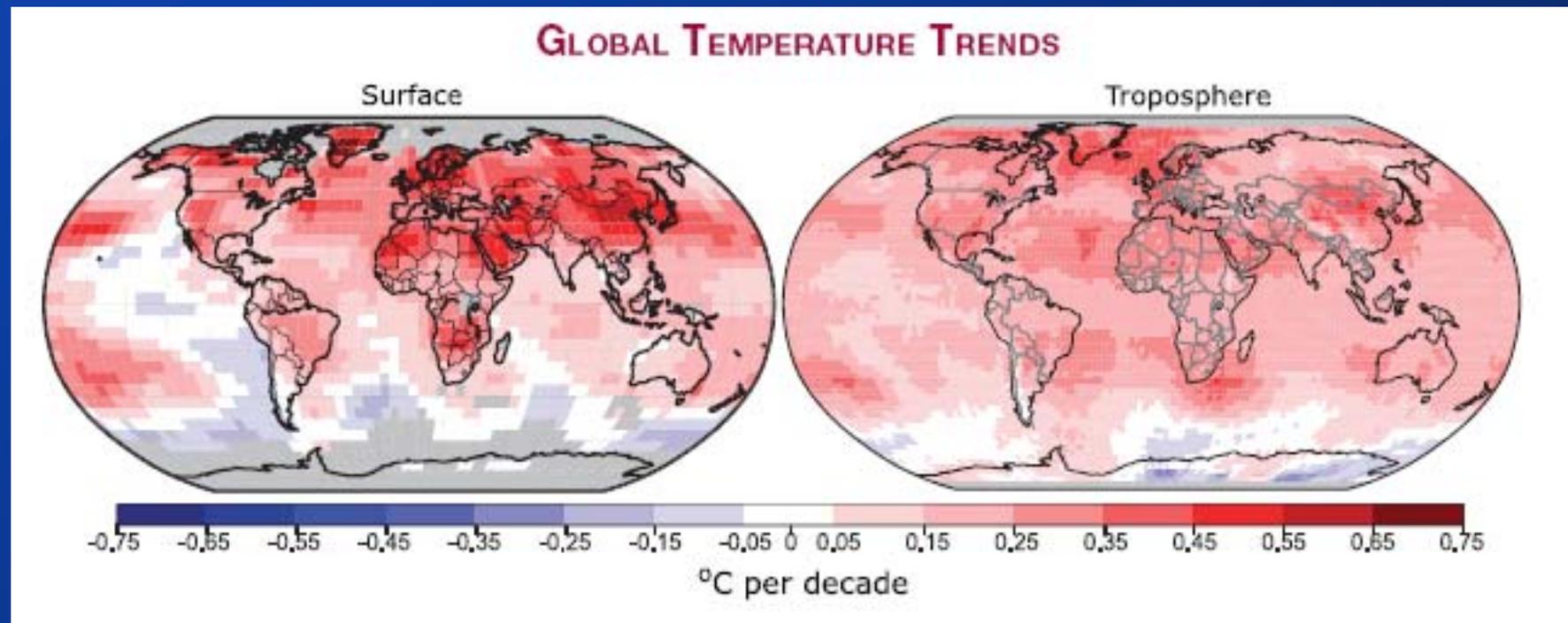
Variazioni della temperatura media annua globale rispetto alla media 1961-90 e tasso di aumento per decennio negli ultimi 150 (0,04°C), 100 (0,07 °C), 50 (0,13°C) e 25 anni (0,18 °C).



Distribuzione geografica ineguale dell'aumento di Tmag per decennio, nel periodo 1979-2005, alla superficie (da misure meteo a terra) e nella troposfera (da misure da satellite).

L'emisfero settentrionale si riscalda più di quello meridionale: alcune aree oceaniche si vanno raffreddando.

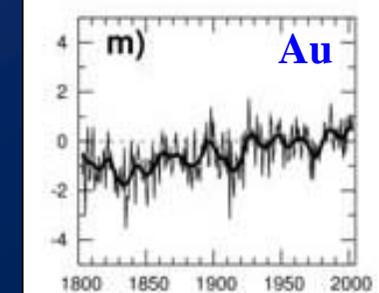
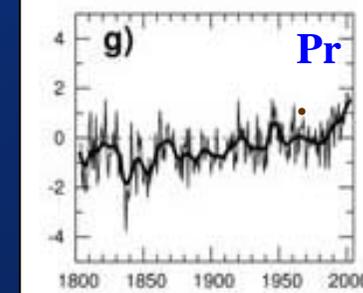
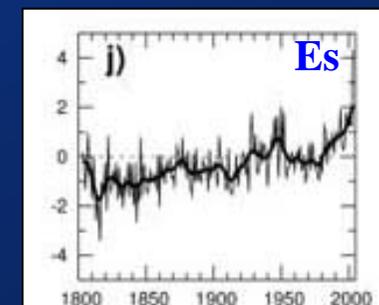
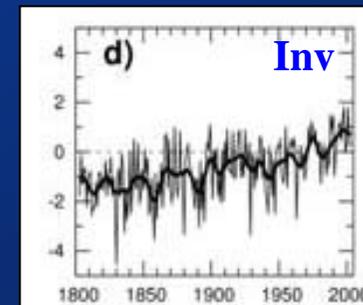
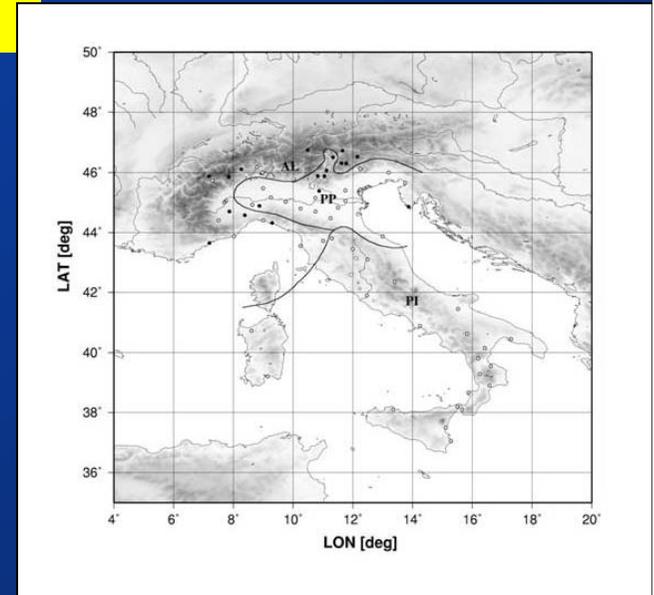
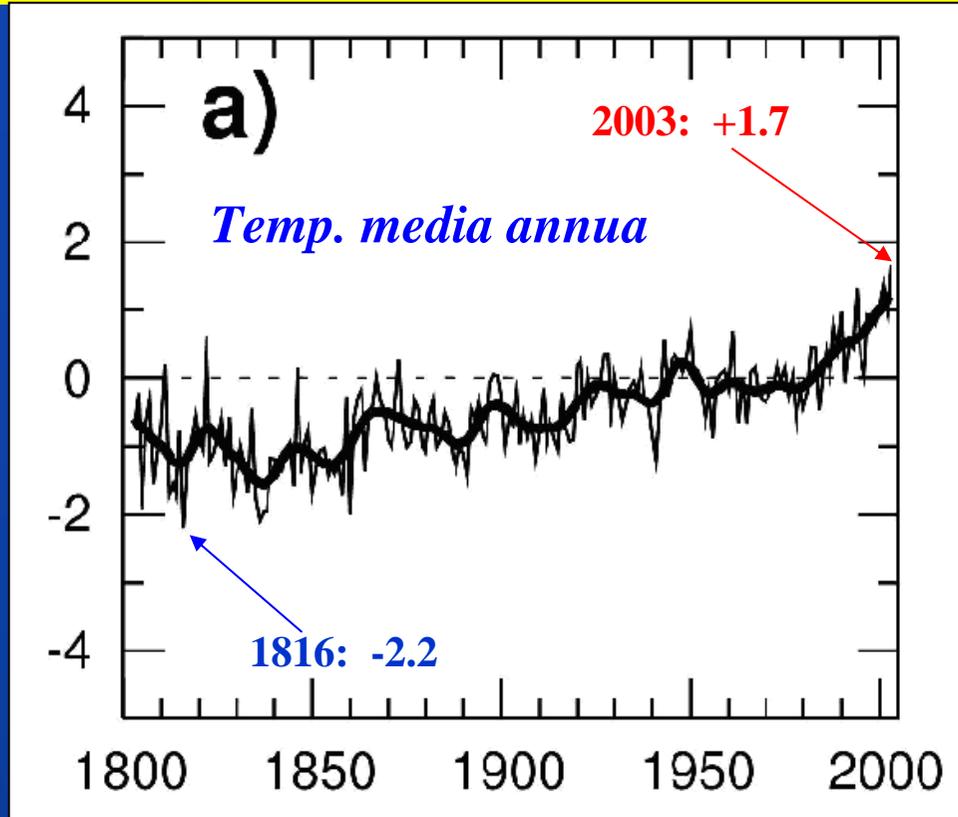
Le aree in grigio non hanno dati sufficienti.



IPCC, 2007

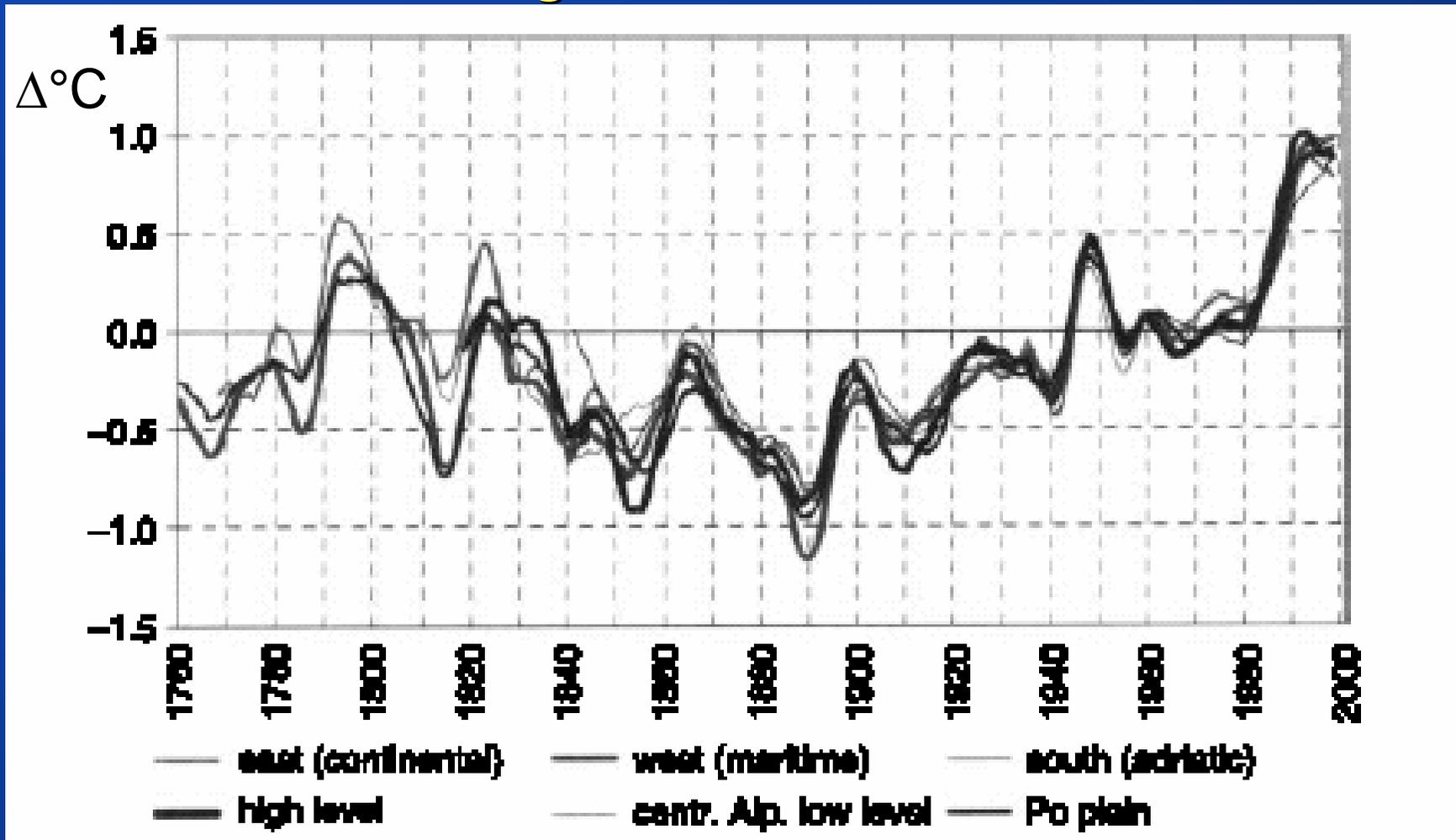
Temperatura media annua e T_m stagionali in Italia dal 1800

Brunetti, Maugeri, Monti & Nanni (2006)



Dal 1800 al 2003 la T_{ma} in Italia è aumentata di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per secolo. La stessa tendenza si osserva nelle diverse macroregioni e stagioni. Le temp. min. sono aumentate più delle max. salvo nella pianura padana. L'escursione term. diurna è diminuita, salvo negli ultimi 50 anni

Anomalie della temperatura media annua nelle Alpi negli ultimi 240 anni



Nel 20° sec. la temperatura media annua nelle Alpi è aumentata di 1,2 °C, quasi il doppio del valore medio globale

Boehm et al., 2001

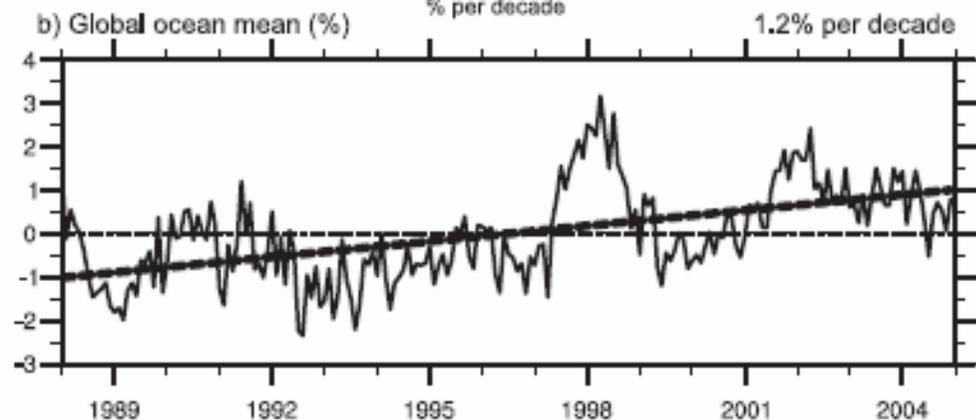
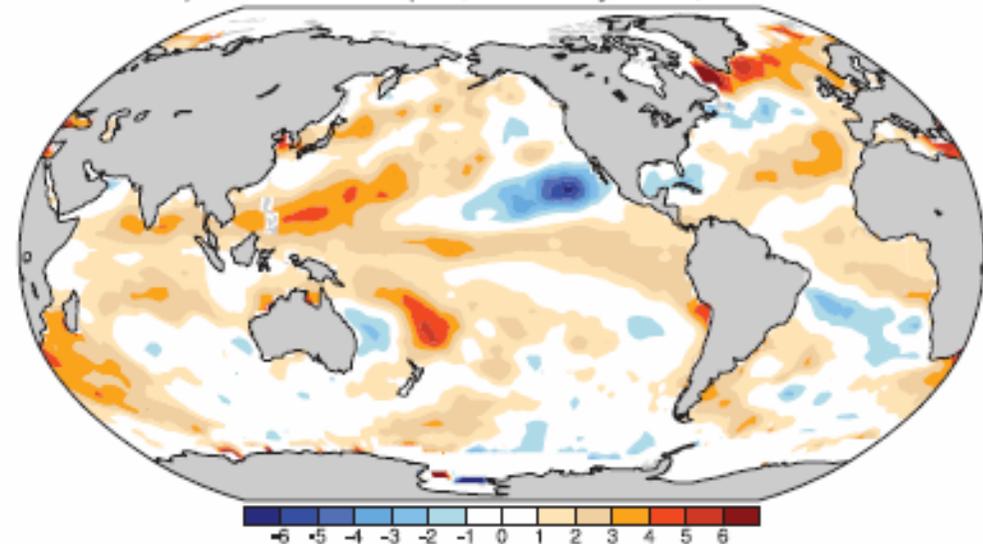
Cambiamenti nel ciclo idrologico

L'umidità specifica ($\text{kg}_w / \text{kg}_a$) è aumentata dal 1976 insieme all'aumento della temperatura globale.

L'acqua precipitabile sopra gli oceani è aumentata di $1,2 \pm 0,3$ % per decennio dal 1988 al 2004.

ATMOSPHERIC WATER VAPOUR

a) Column Water Vapour, Ocean only: Trend, 1988-2004



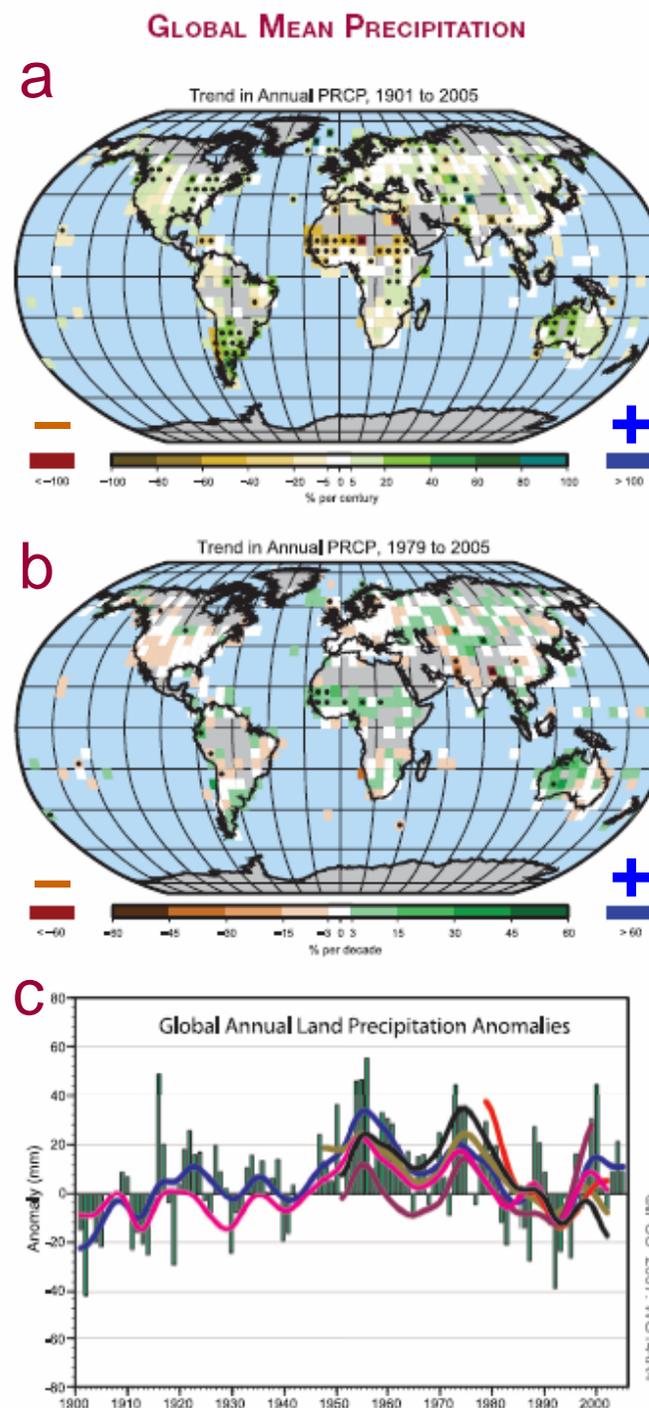
a) Distribuzione geografica della variazione (% per decennio) dell'acqua precipitabile sopra gli oceani dal 1988 al 2004.

b) Medie globali delle anomalie mensili dell'acqua precipitabile sugli oceani.

Precipitazioni medie annue globali

- a) Distribuzione geografica delle tendenze lineari delle precipitazioni medie annue sopra i continenti dal 1901 al 2005 (% per secolo).
- b) Idem dal 1979 al 2005 (% per decennio).
verde: aumento
bruno: diminuzione.
grigio: dati insufficienti
- c) Anomalie delle precipitazioni medie annue sui continenti dal 1900 al 2005, rispetto la media del trentennio 1961-1990

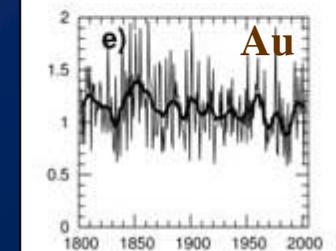
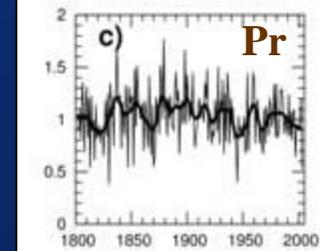
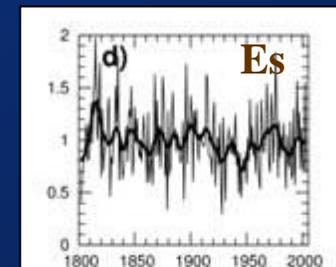
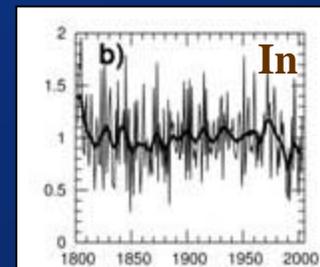
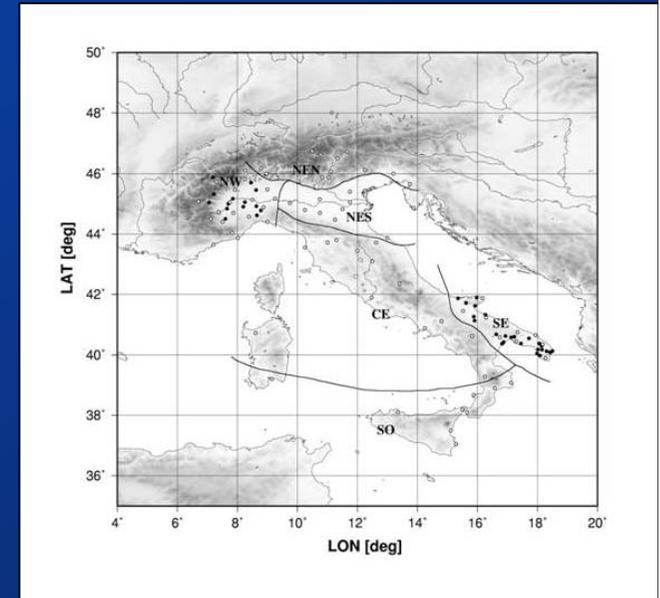
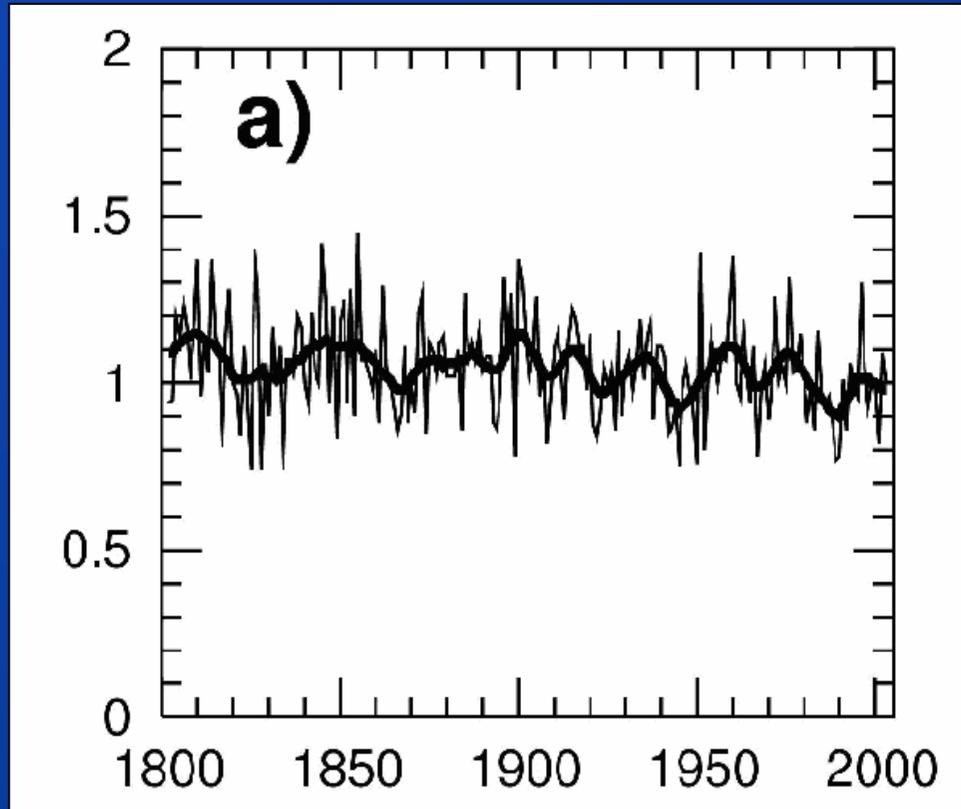
IPCC, 2007



Precipitazioni medie in Italia

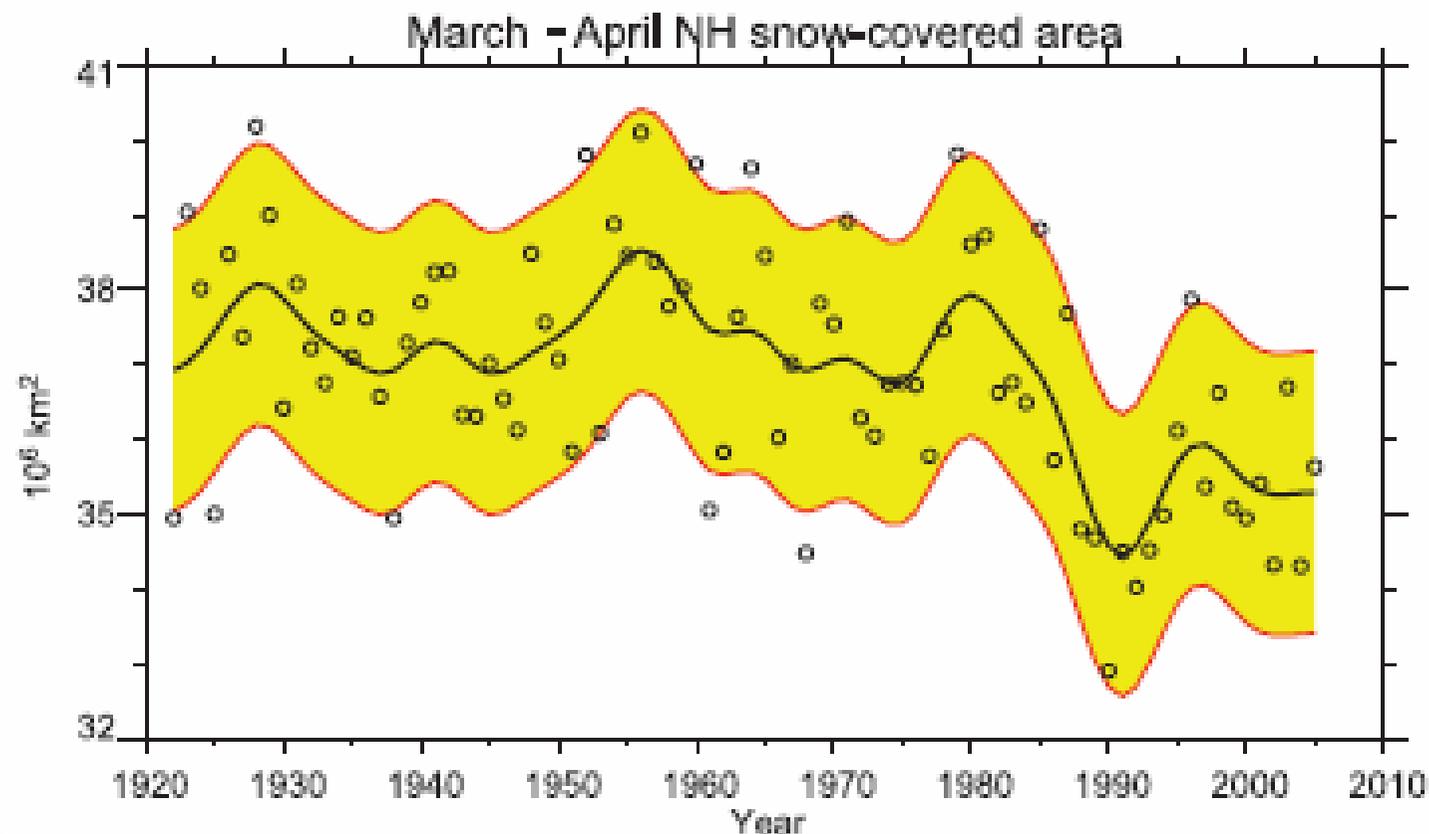
Brunetti, Maugeri, Monti &
Nanni (2006)

ANDAMENTI ANNUALE E STAGIONALE



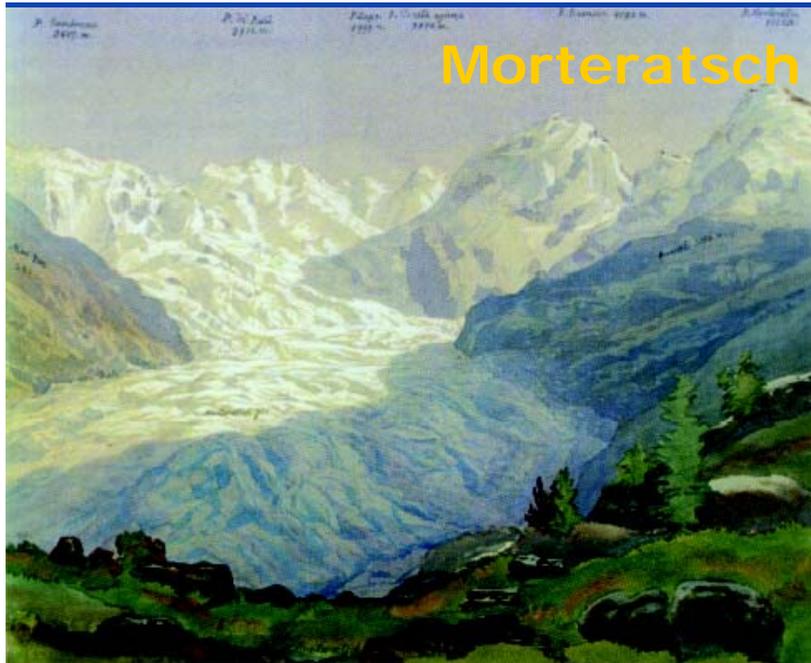
Le precipitazioni medie annue in Italia dal 1800 sono diminuite del 5% al secolo. Il decremento maggiore si è avuto in primavera (- 9%)

Riduzione
del manto
nevoso
nell'emisfero
Nord dal 1922



Superficie media annua coperta
dalla neve (Marzo-Aprile)
nell'emisfero Nord
(dal 1922 al 1972 da dati al suolo,
dal 1972 da satellite).
Si noti la riduzione dal 1980 (~8%).

(IPCC, 2007)



Morteratsch

Morteratschgletscher mit Piz Bernina (1874).

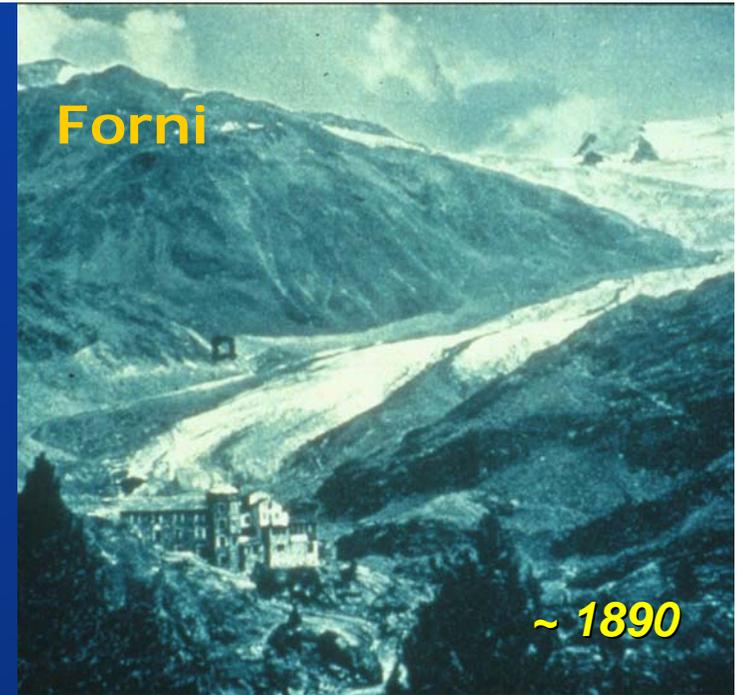
Aquarell von G. Meyer-Zimmermann, 1814-1895



(Maisch, 2004)

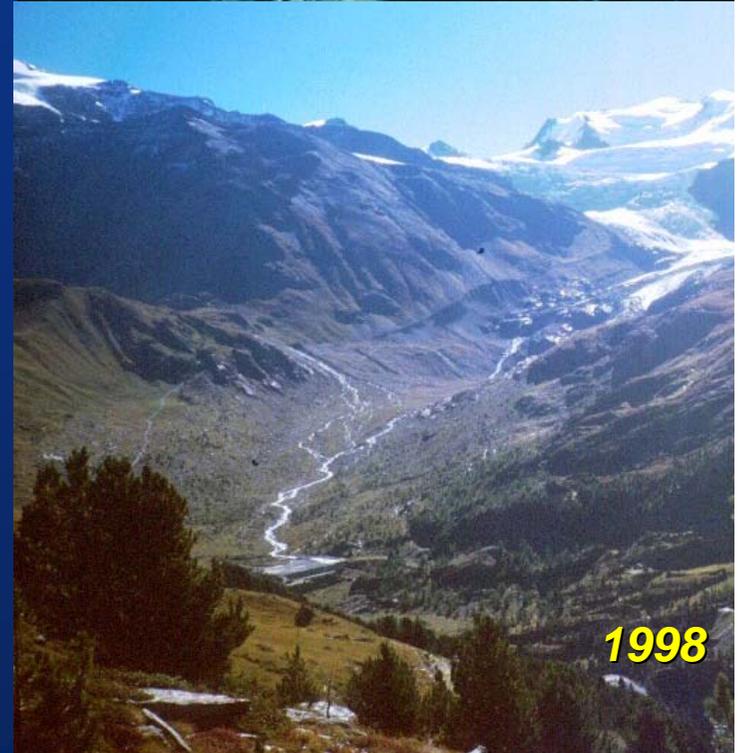
Morteratschgletscher mit Piz Bernina.

Vergleichsaufnahme von der «Chünetta» aus (2003)



Forni

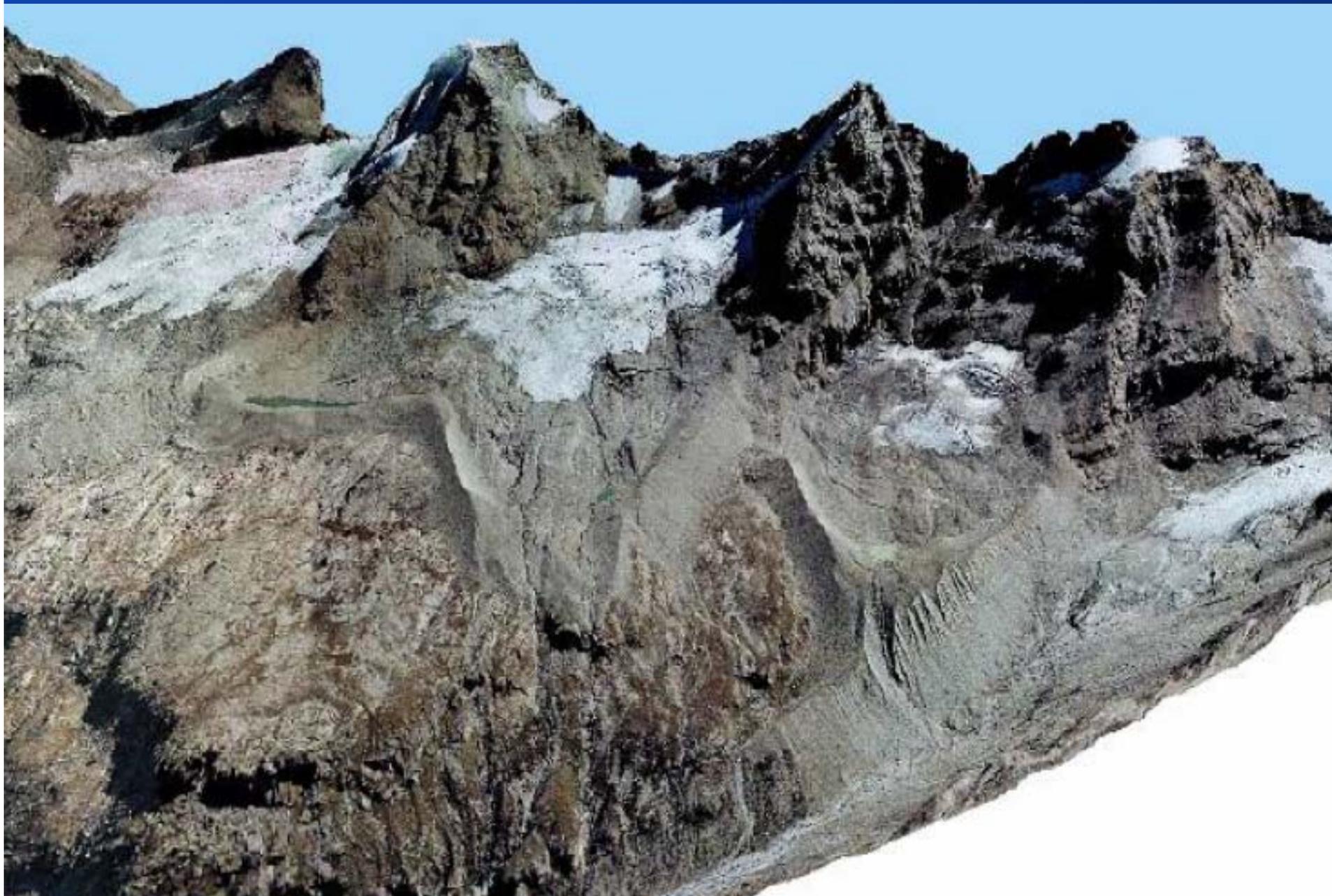
~ 1890



1998

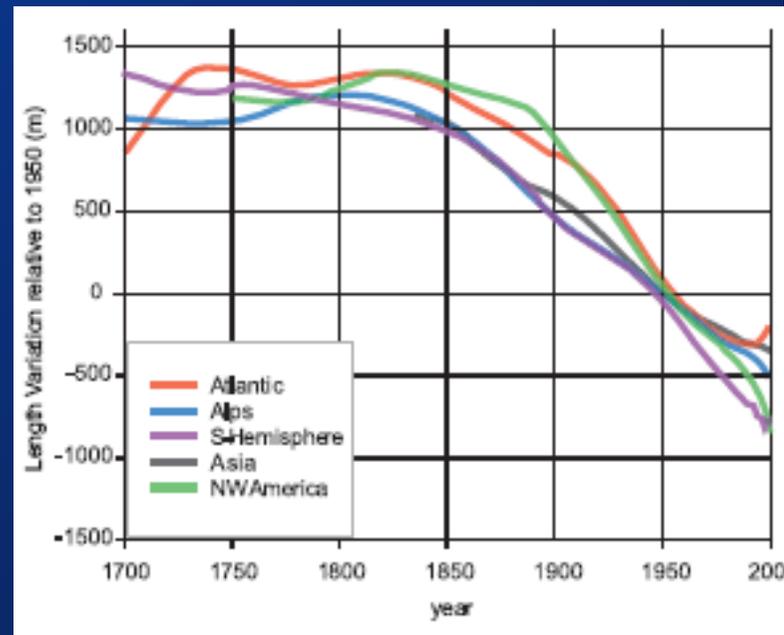
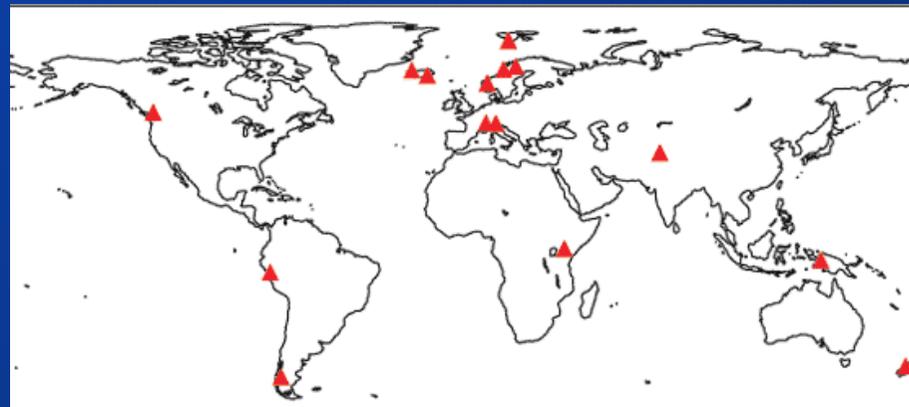
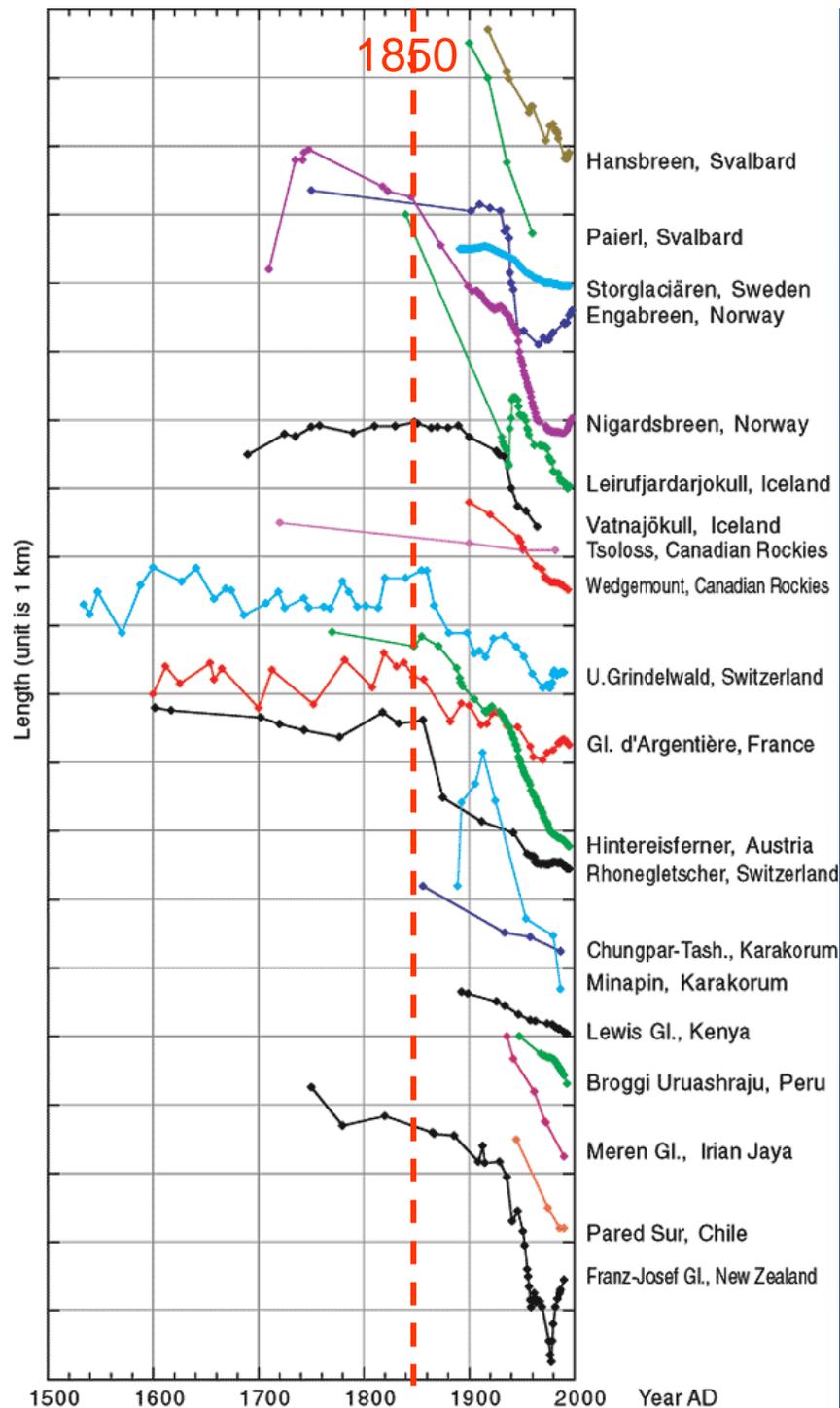
I ghiacciai della Valsavaranche (Ao) nell' anno 2000

Modello fotorealistico da fotografia aerea - CNR IRPI - Torino



Variazioni di lunghezza in 20 ghiacciai montani nei due emisferi

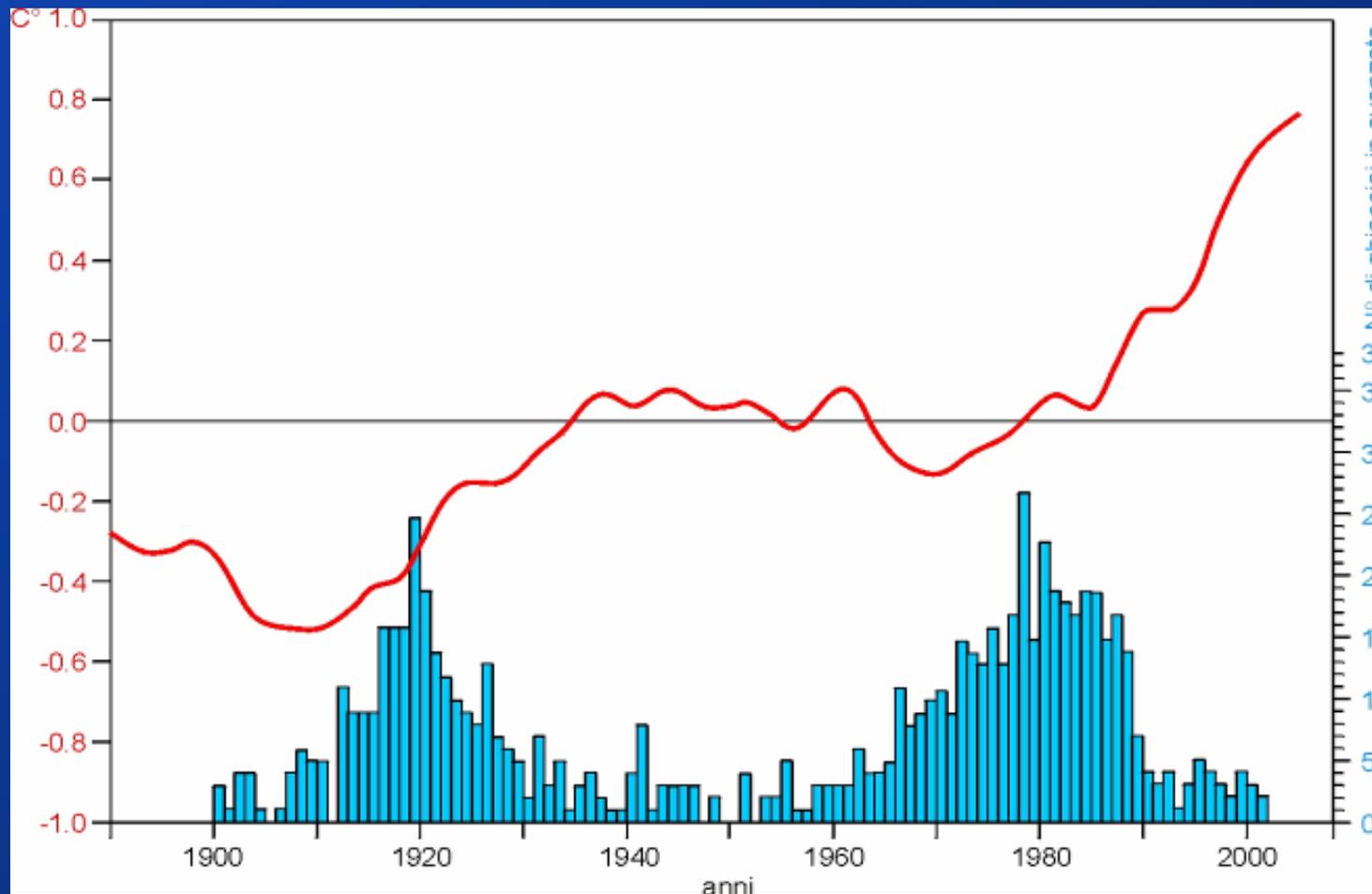
IPCC, 2001



Var. lungh. medie regionali (IPCC, 2007)

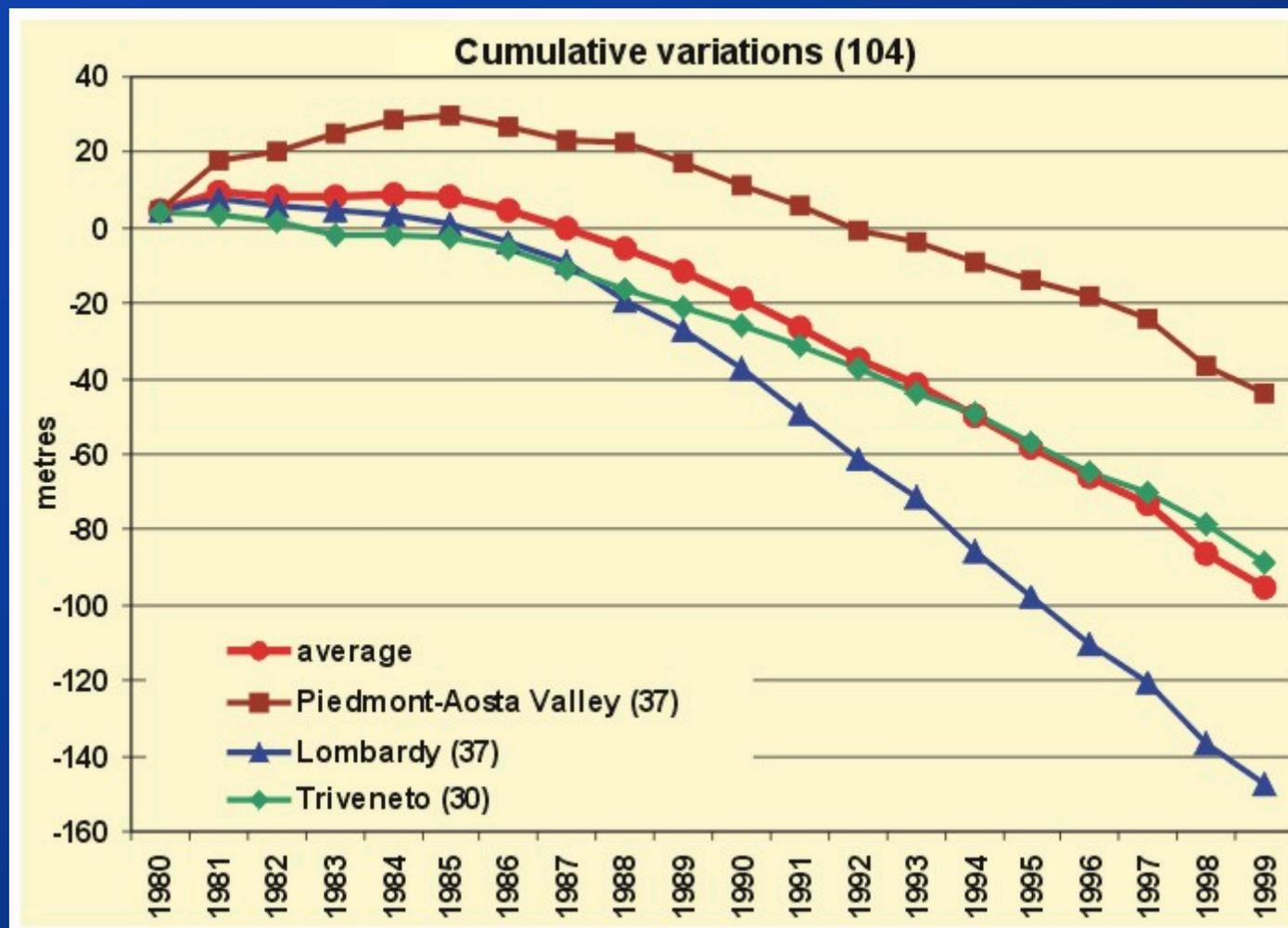
Confronto tra le anomalie della T_{ma} per l'emisfero Nord rispetto alla media 1961-1990 (curva rossa) e il numero dei ghiacciai svizzeri in avanzata dal 1900 al 2001 (colonnine azzurre).

Due fasi di avanzata culminante intorno al 1920 e al 1980 hanno fatto seguito, con un ritardo di un decennio, ai minimi termici del 1910 e del 1970.



(Orombelli, 2007)

Variazioni frontali medie cumulate nei ghiacciai italiani dal 1980 al 1999



n = 104

Fonte CGI

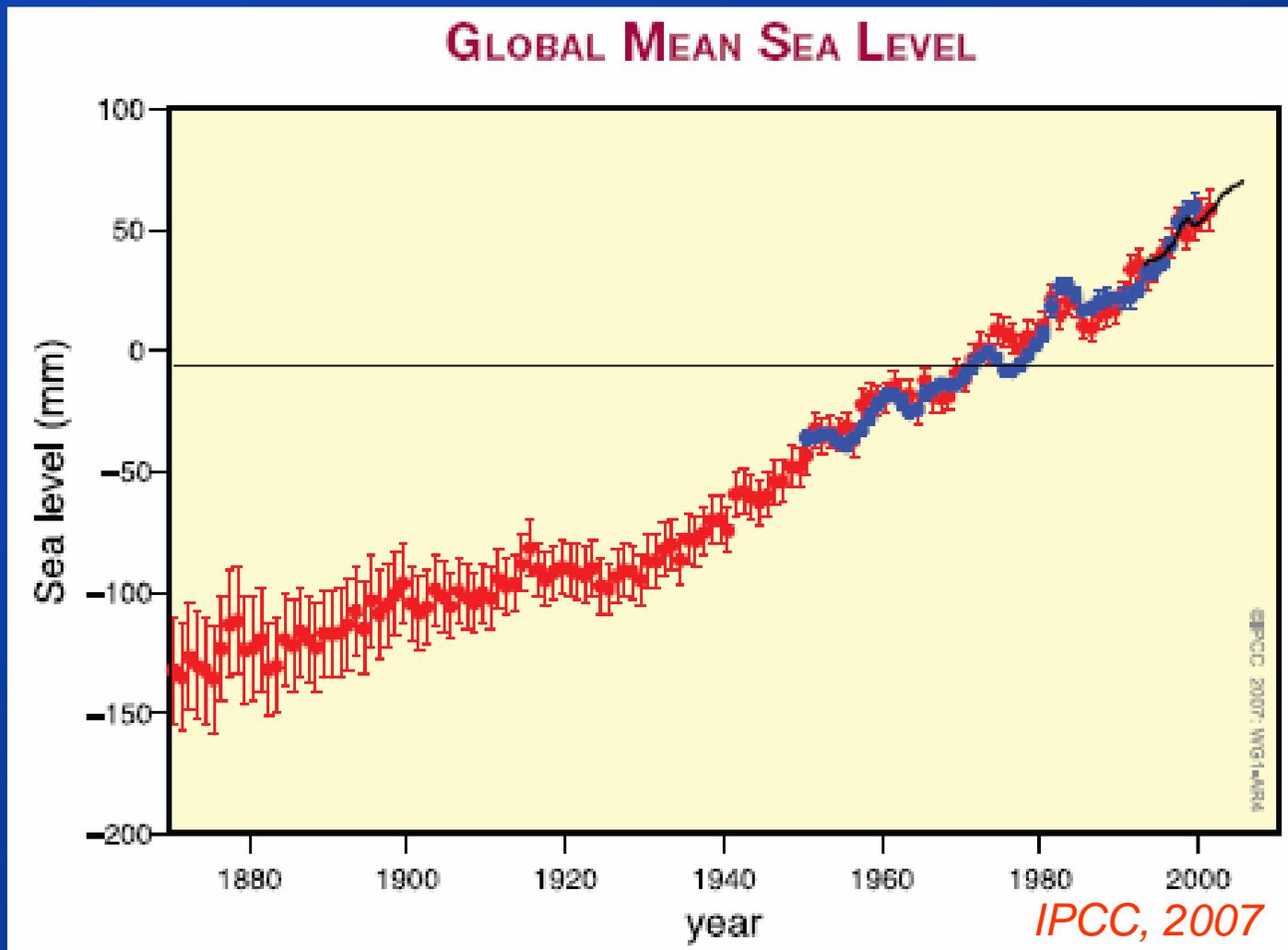


Lago "effimero"



© Scott McGee

Comparsa di nuovi laghi marginali e sopraglacial non solo alle fronti ma pure alla loro Sommità.



Deviazioni medie annue del livello medio globale degli oceani in mm rispetto alla media del trentennio 1961-1990. In rosso ricostruzioni dal 1870, in blu misure mareometriche dal 1950, in nero altimetria da satellite dal 1993.

Aumento stimato dal 1961 al 2003: $1,8 \pm 0,5 \text{ mm a}^{-1}$, dal 1993 al 2003: $3,1 \pm 0,7 \text{ mm a}^{-1}$

Tasso di risalita del livello del mare e stima dei contributi delle diverse cause – IPCC, 2007

Cause	Tasso di risalita (mm a ⁻¹)		
	1961-2003	1993-2003	
Espansione termica	0,42 ± 0,12	1,60 ± 0,50	+ 280%
Ghiacciai montani e <i>ice caps</i>	0,50 ± 0,18	0,77 ± 0,22	+ 54%
Calotta Groenlandia	0,05 ± 0,12	0,21 ± 0,07	+ 320%
Calotte Antartide	0,14 ± 0,41	0,21 ± 0,35	+ 50%
	-----	-----	
	tot.	1,1 ± 0,5	2,8 ± 0,7 + 154%
Tasso di risalita osservato*	1,8 ± 0,5	3,1 ± 0,7	+ 72%
Differenza (osservato – stimato)	0,7 ± 0,7	0,3 ± 1,0	

* 1961-1992 mareometri/1993-2003 satelliti

Contributo eustatico annuo (M) attuale dei ghiacciai alla risalita del livello del mare (RLM) e proiezioni future (*Meier et al. 2007*)

	M 2006 Gt/a*	RLM 2006 mm/a	RLM 2050 mm	RLM 2100 mm
Ghiacciai e Ice Caps (GIC)	- 402 ± 95	1,1 ± 0,24	49 ± 12	104 ± 25
Groenlandia	- 182 ± 34	0,5 ± 0,1	22 ± 4	47 ± 8
Antartide occidentale	- 117 ± 15	0,32 ± 0,04	14 ± 2	30 ± 4
Antartide orientale	+ 56 ± 26	- 0,15 ± 0,07	- 7 ± 3	- 15 ± 7
Totale globale	- 645 ± 170	1,8 ± 0,5	78 ± 21	167 ± 44

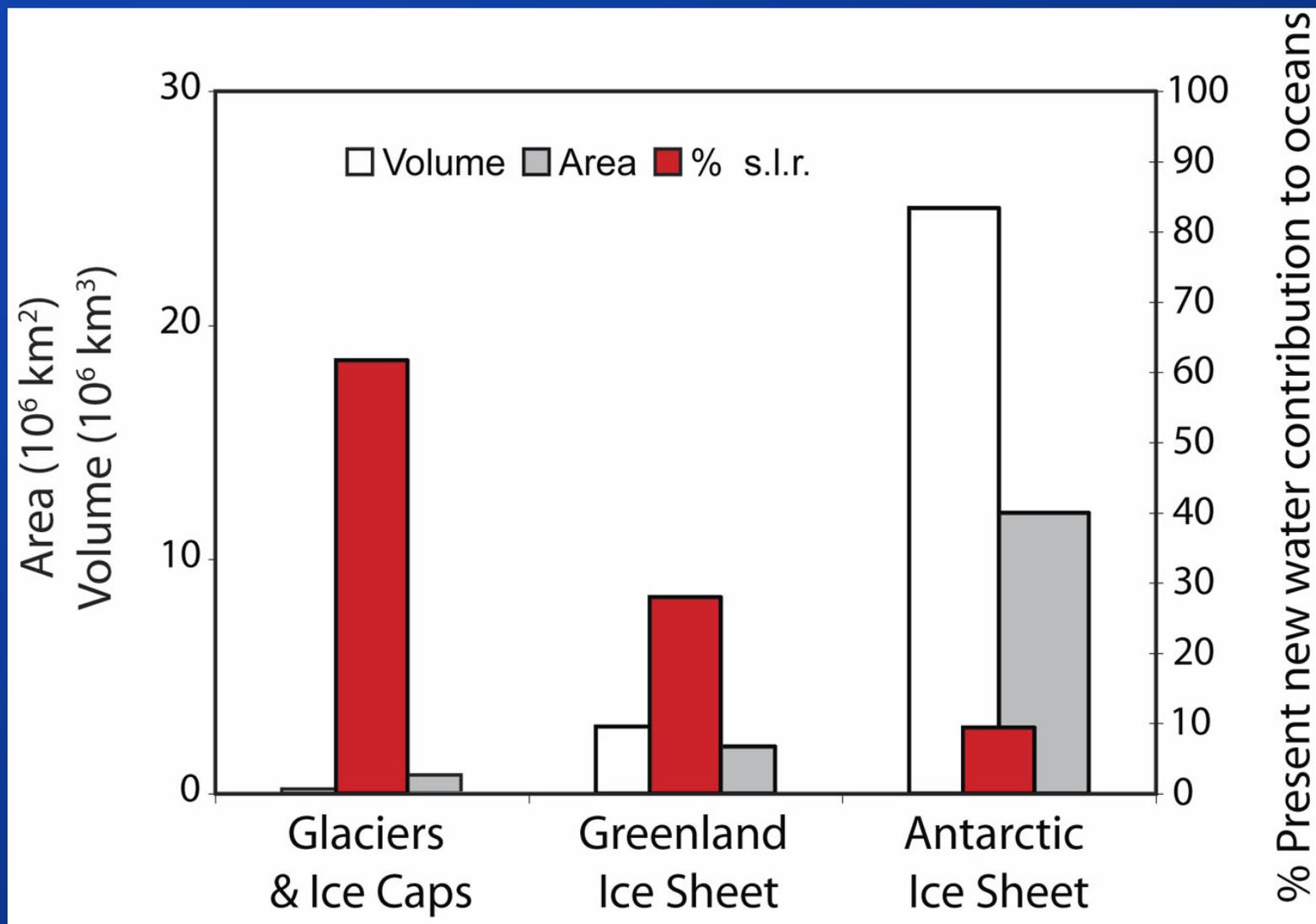
*1 Gt ~ 0,003 mm RLM

Contributo sterico 1993-2003 1,6 ± 0,5

RLM osservata 1993-2003 3,1 ± 0,7

Accelerazione contributo eustatico ultimo decennio dovuto anche a rapido ritiro ghiacciai terminanti in mare, per instabilità dinamica.

Dimensioni e contributo annuo relativo dei ghiacciai alla risalita eustatica del livello medio del mare (*Meier et al. 2007*)

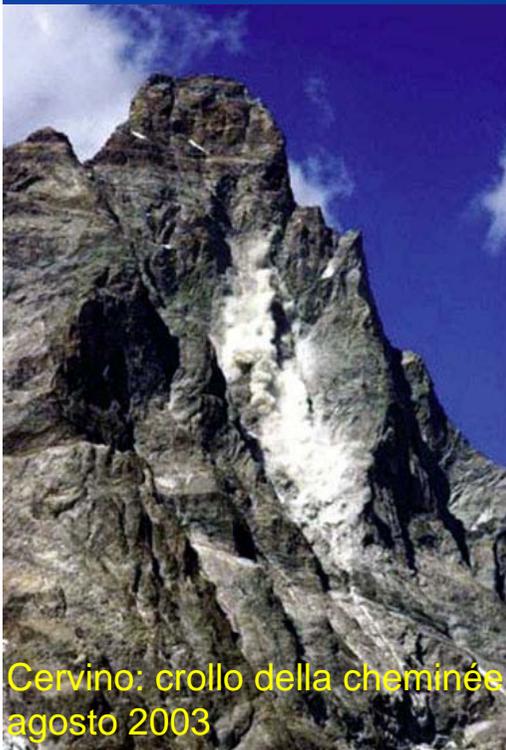


GIC 60% contributo eustatico. I ghiacciai dell'Alaska da soli contribuiscono per 0,27 mm a-1 (*Arendt et al., 2002*)

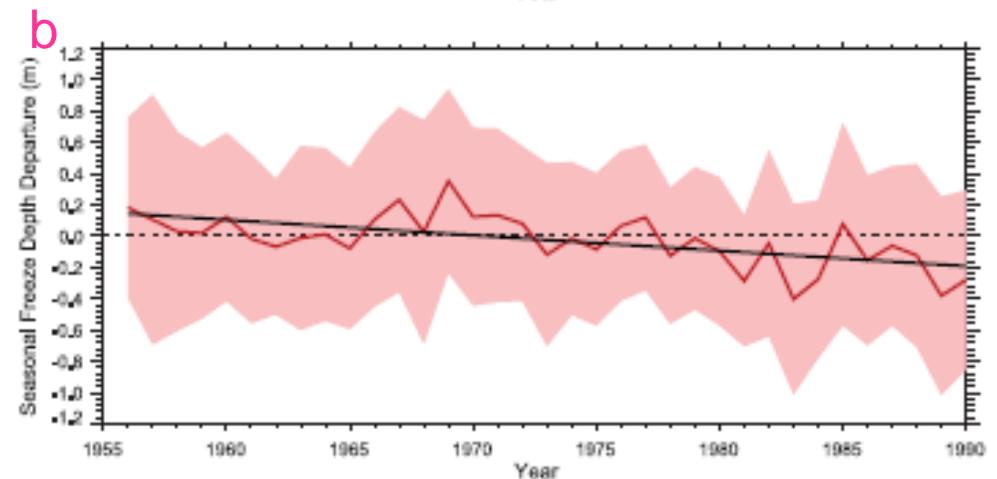
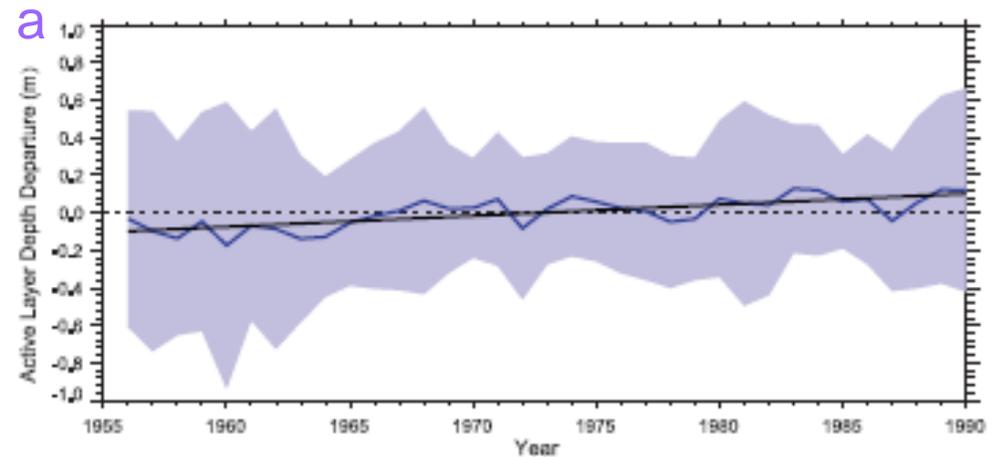
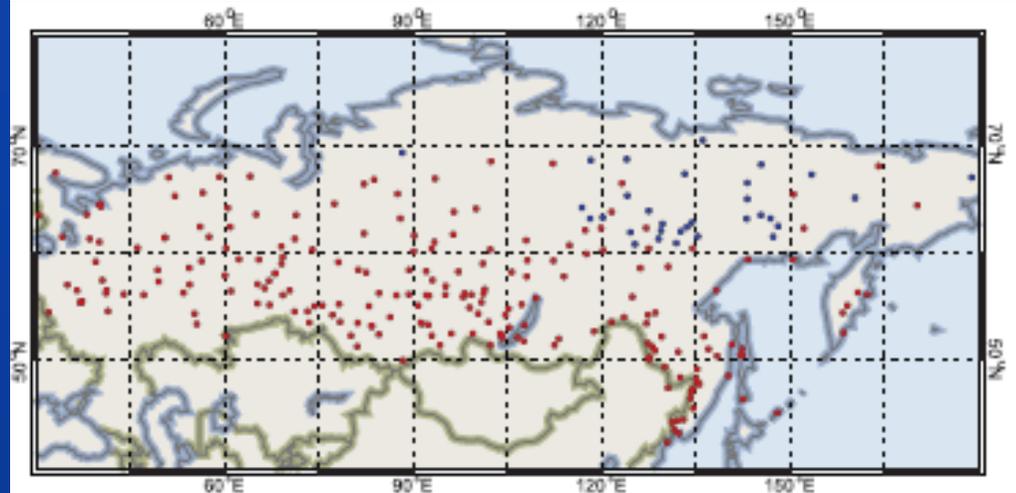
Permafrost e gelo stagionale nel terreno

- a) aumento nello spessore dello strato attivo
- b) riduzione della profondità del terreno gelato stagionale

IPCC, 2007



Cervino: crollo della cheminée agosto 2003



Riduzione media annua della superficie dei ghiacci artici dal 1979 al 2005:

- $2,7 \pm 0,6$ % al decennio.

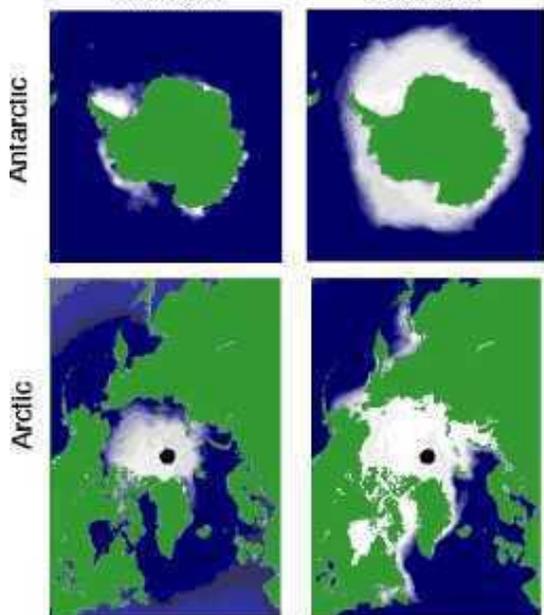
Rid. m. superf. min estiva $-7,4 \pm 2,4$ % /10a

Possibile scomparsa ghiacci artici estivi entro 2100 (**IPCC, 2007**)



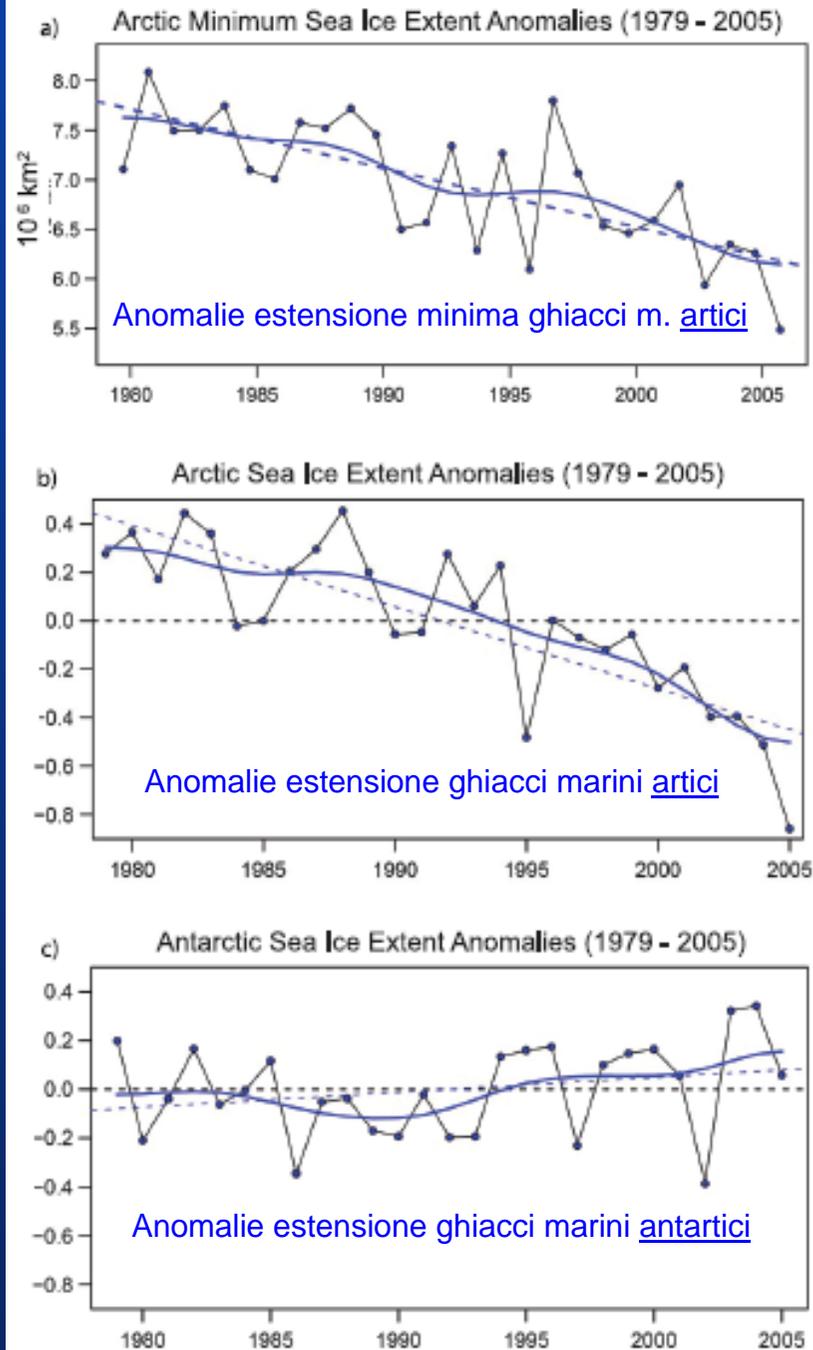
Minimum

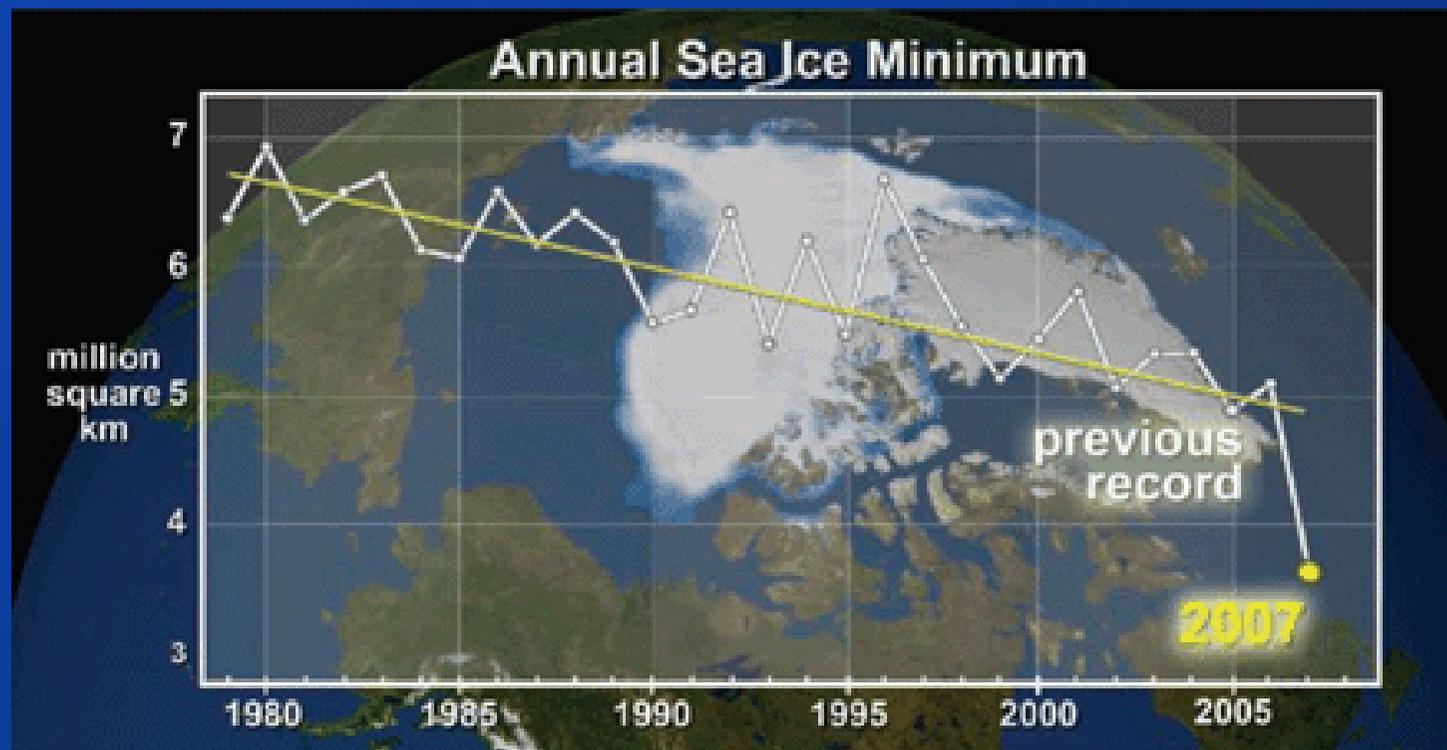
Maximum



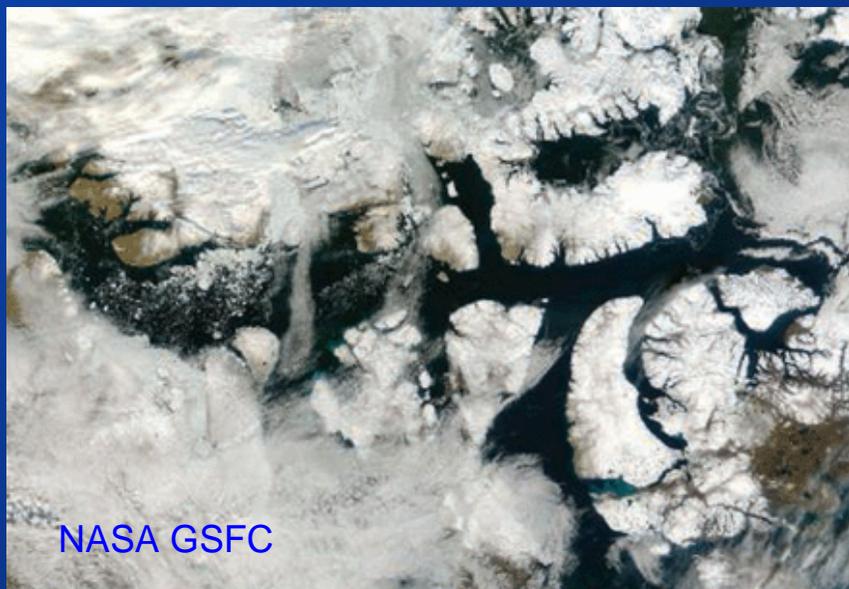
Variazioni stagionali
ghiacci marini

CHANGES IN SEA ICE EXTENT



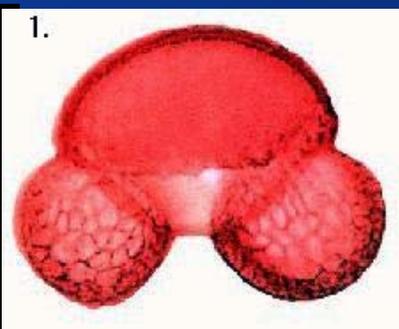
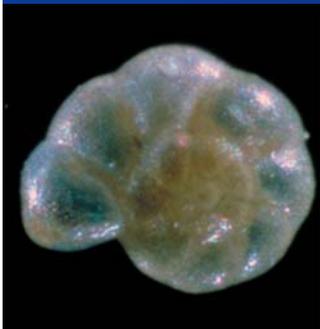
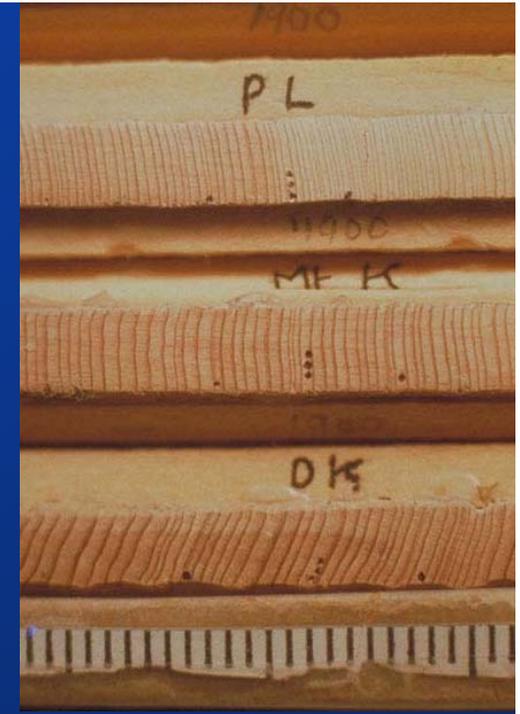


NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

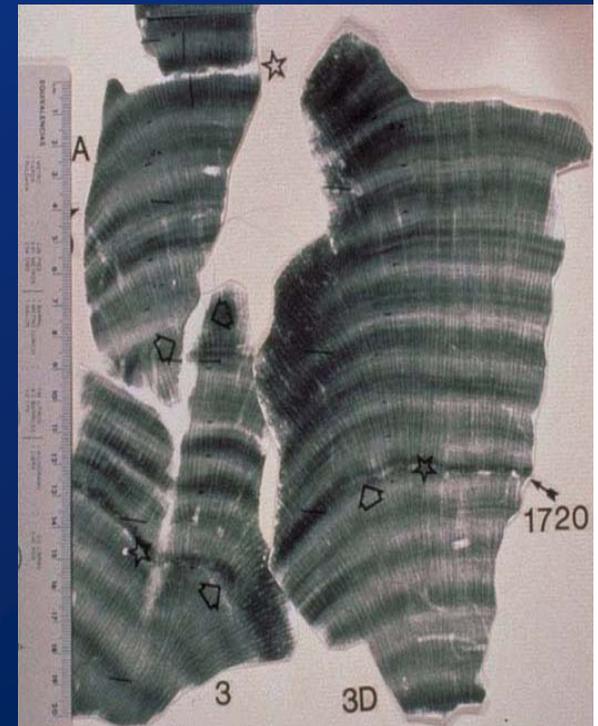


NASA GSFC

I ghiacci marini artici nel settembre 2007 e l'apertura del passaggio a NW. La previsione della totale scomparsa dei ghiacci marini artici estivi è anticipata entro la prima metà del secolo. (Kerr, 2007)

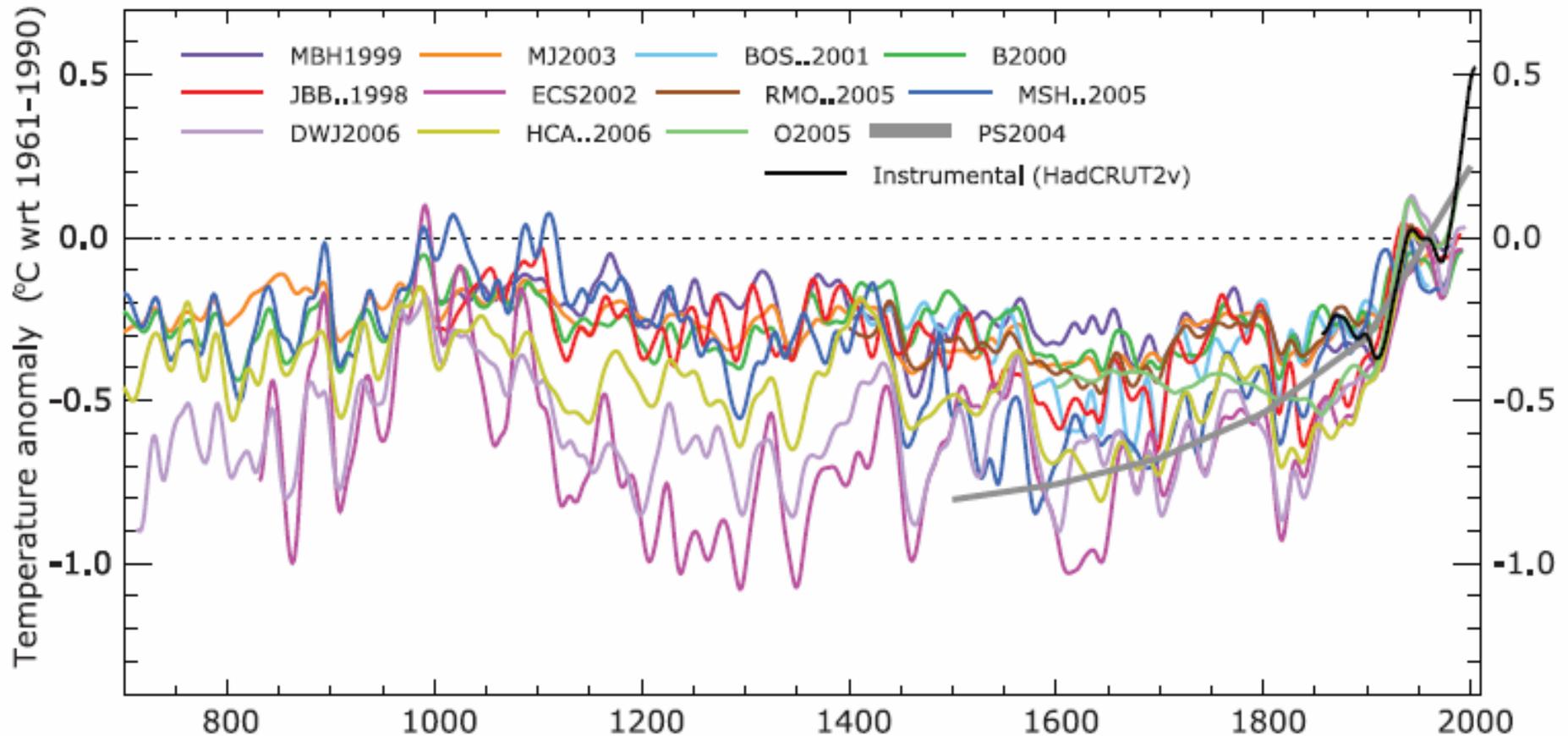


Archivi naturali del clima



Ricostruzione delle variazioni della Tma nell'emisfero N negli ultimi 1300 anni. E' ritenuto: molto probabile (>90%) che le temperature della seconda metà del 20° sec. siano state maggiori di ogni altro periodo di 50 anni dal 1500 e probabile (>66%) negli ultimi 1300 anni, almeno. (IPCC, 2007)

NORTHERN HEMISPHERE TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS



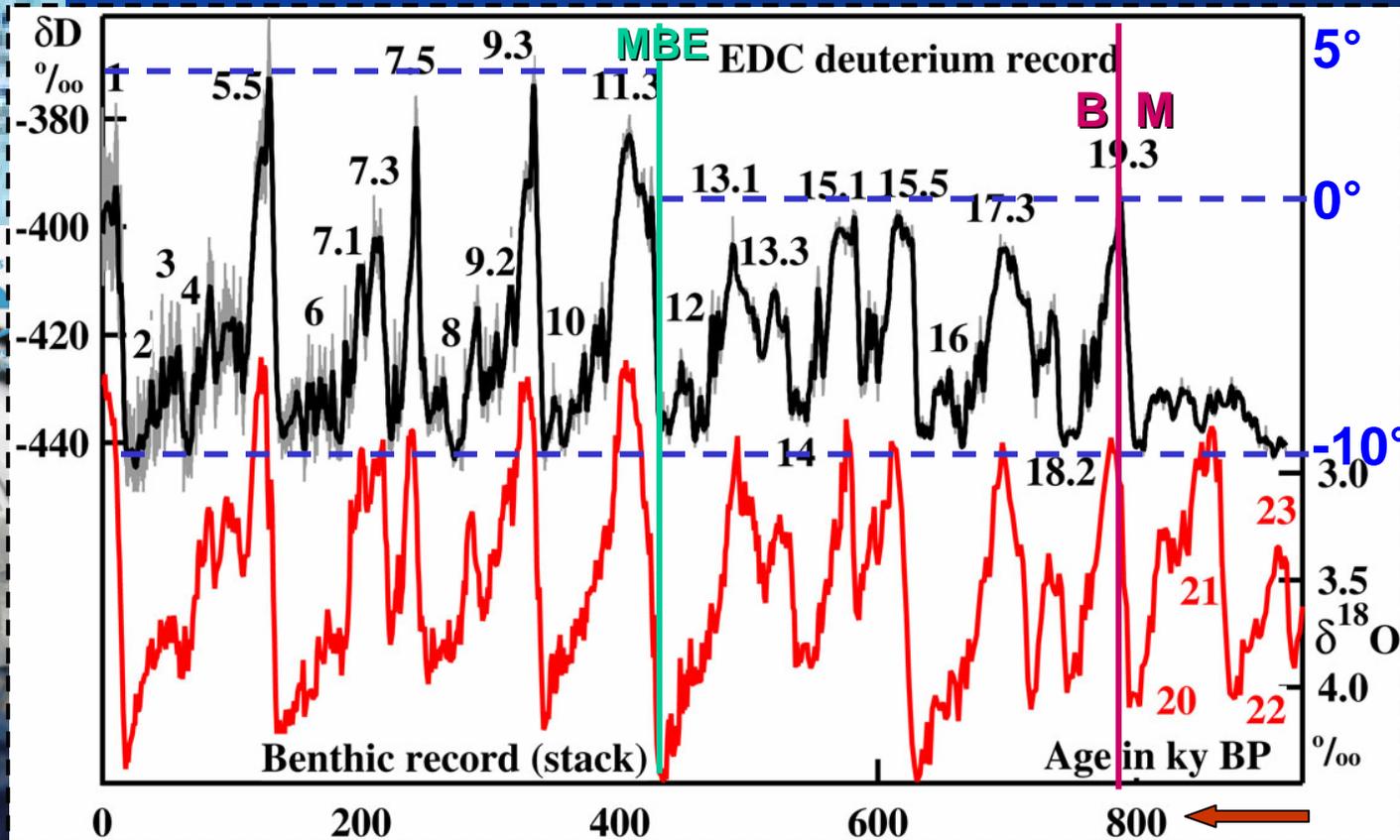
nature

EPICA adventure

Science

EPICA DC: 800 mila anni di storia del clima
Curva isotopica del ghiaccio (in nero), confrontata con la curva isotopica marina (in rosso). In ascissa il tempo in migliaia di anni. Otto cicli climatici asimmetrici della durata di ~100 mila anni: picchi interglaciali separati da più lunghi periodi glaciali. ΔT circa 15°C. Cambio di ampiezza a 430 mila anni.

ΔT °C



MBE: Mid Bruhnes Event
B/M: limite Bruhnes/Matuyama

Jouzel et al. 2007



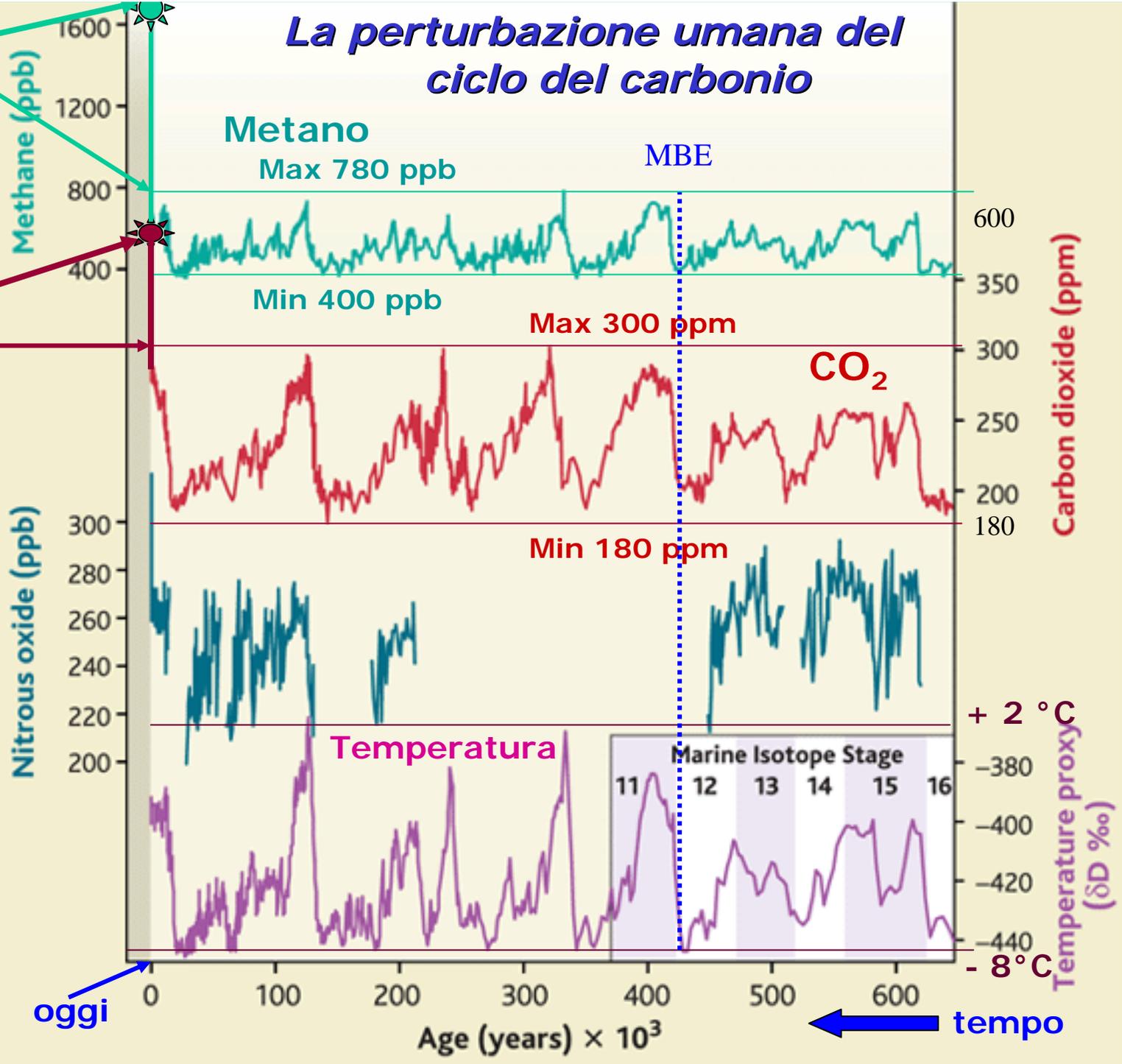
La perturbazione umana del ciclo del carbonio

Metano
2006
1780 ppb
+ 130%
in 200 anni
 Val. preind. 715

CO₂
2006
380 ppm
+ 35 %
in 200 anni
 Val. preind. 280

EPICA DC
Gas serra e
temperatura
negli ultimi
650 mila
Anni

Brook, 2006



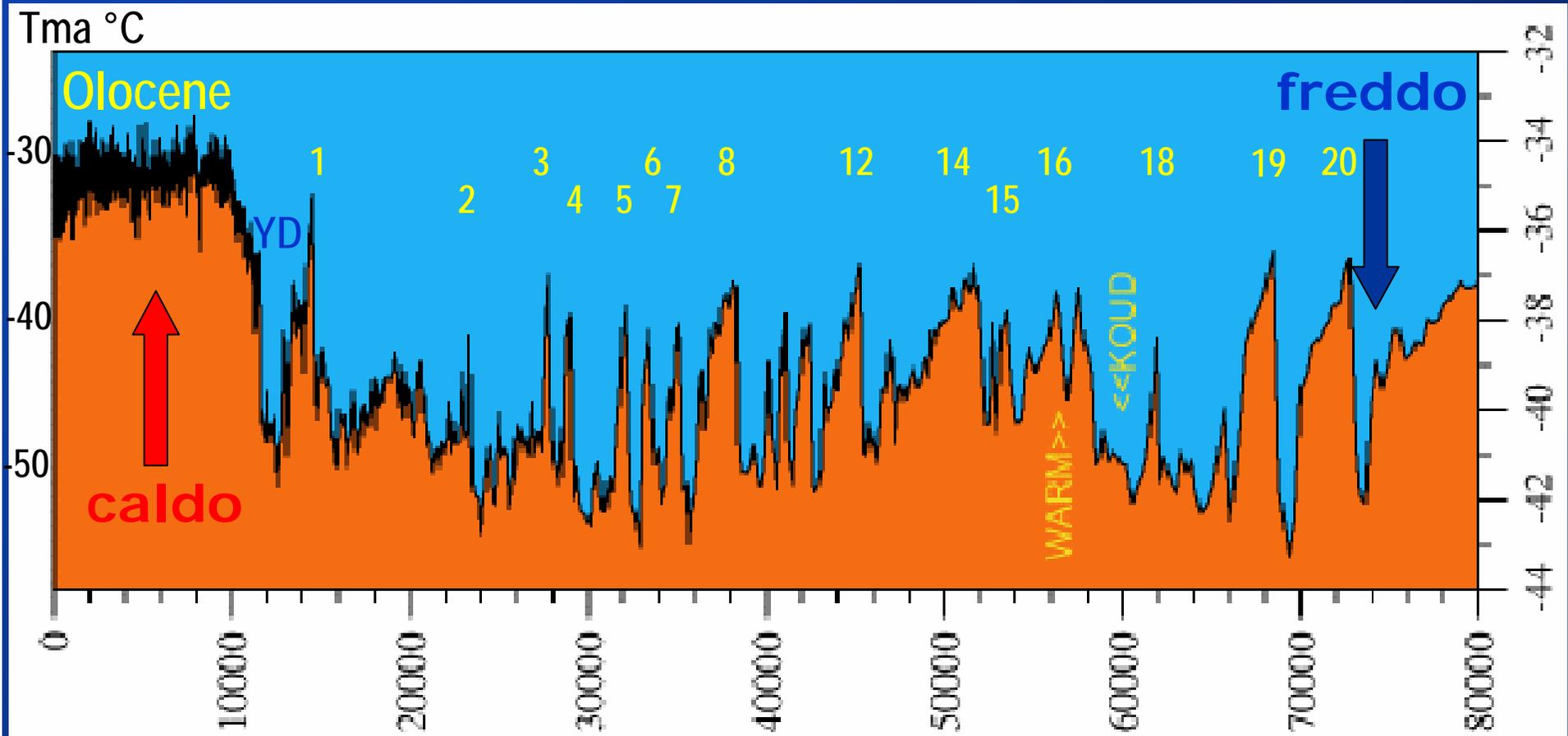
Perforazione GRIP: curva $\delta^{18}\text{O}$

Instabilità climatica alla scala del millennio durante l'ultima Glaciazione

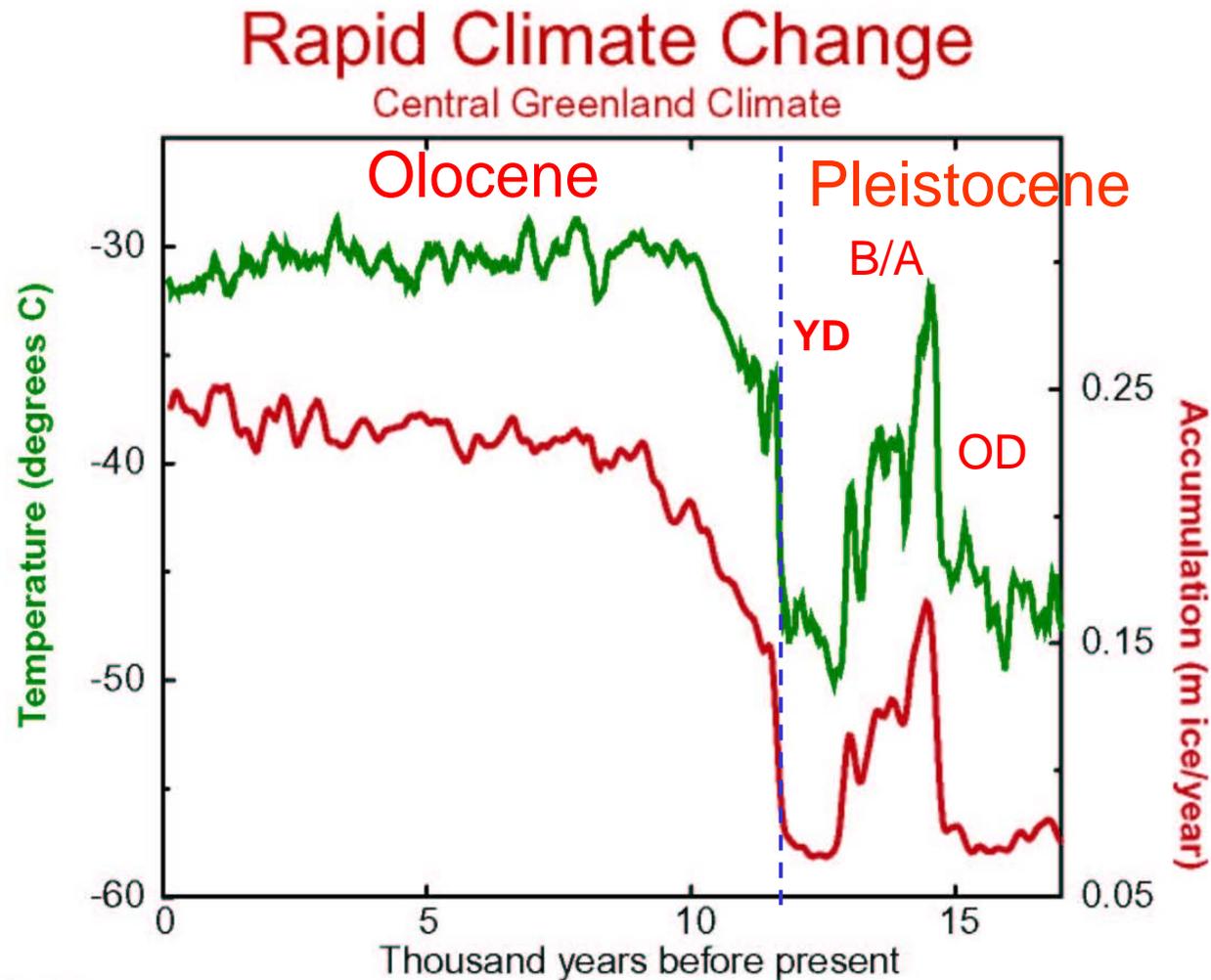
Evidenza di frequenti e ampie variazioni climatiche di breve durata negli ultimo 80 mila anni in Groenlandia (ΔT_{ma} 8-16 °C):

" eventi di Dansgaard-Oeschger "

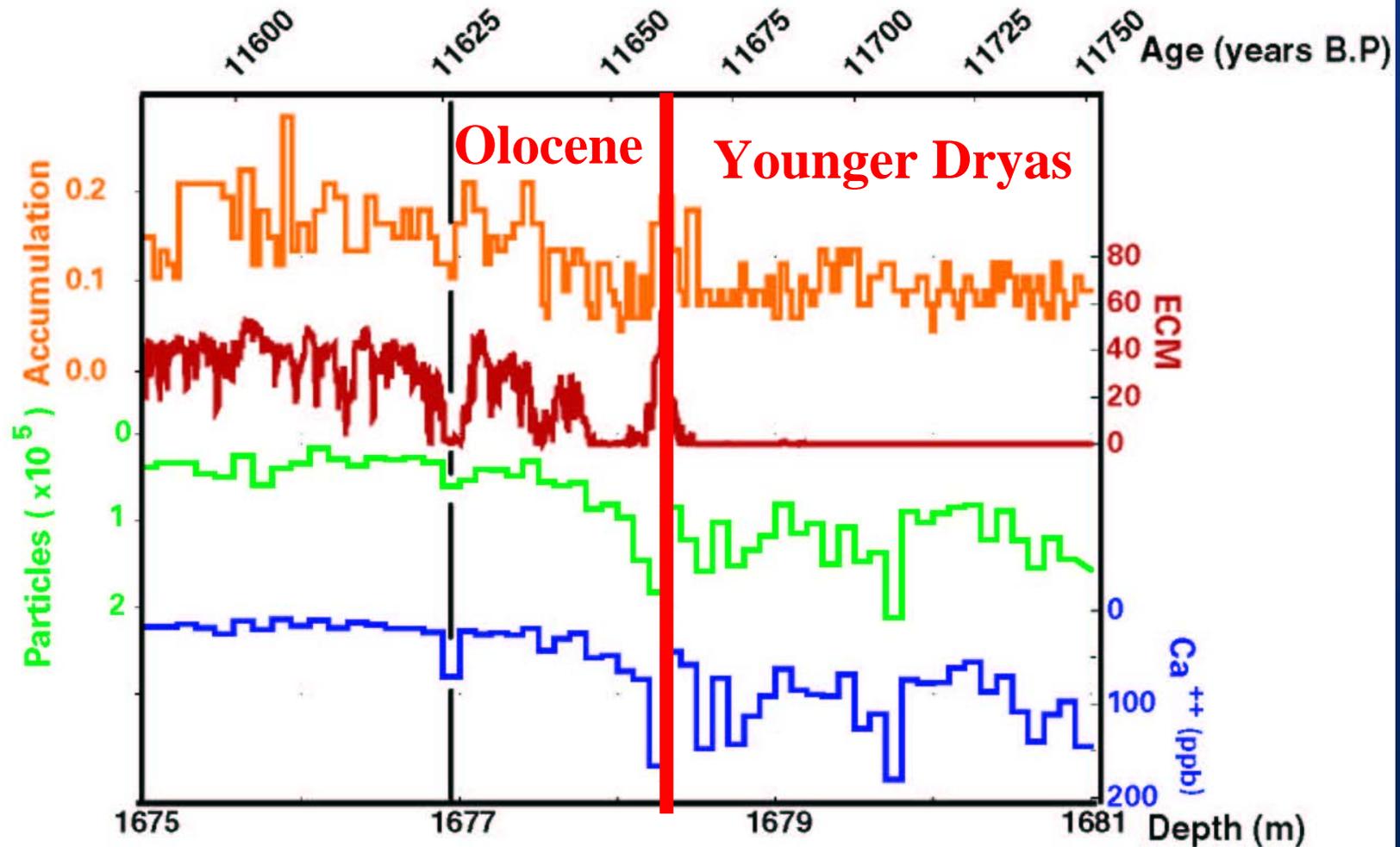
Le transizioni climatiche sono brusche (durata pochi decenni)



**Esempi di radicali cambiamenti climatici repentini (pochi decenni):
fine dell'evento freddo YD in Groenlandia, avvenuta in meno di
25 anni, con un aumento della Tma di una decina di °C e il
raddoppio delle precipitazioni.**



Tra 11.675 e 11.650 anni fa si è conclusa bruscamente l'ultima glaciazione ($\Delta T_{ma} + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta P_{ma} + 100\%$)



Past Global Changes and Their Significance for the Future

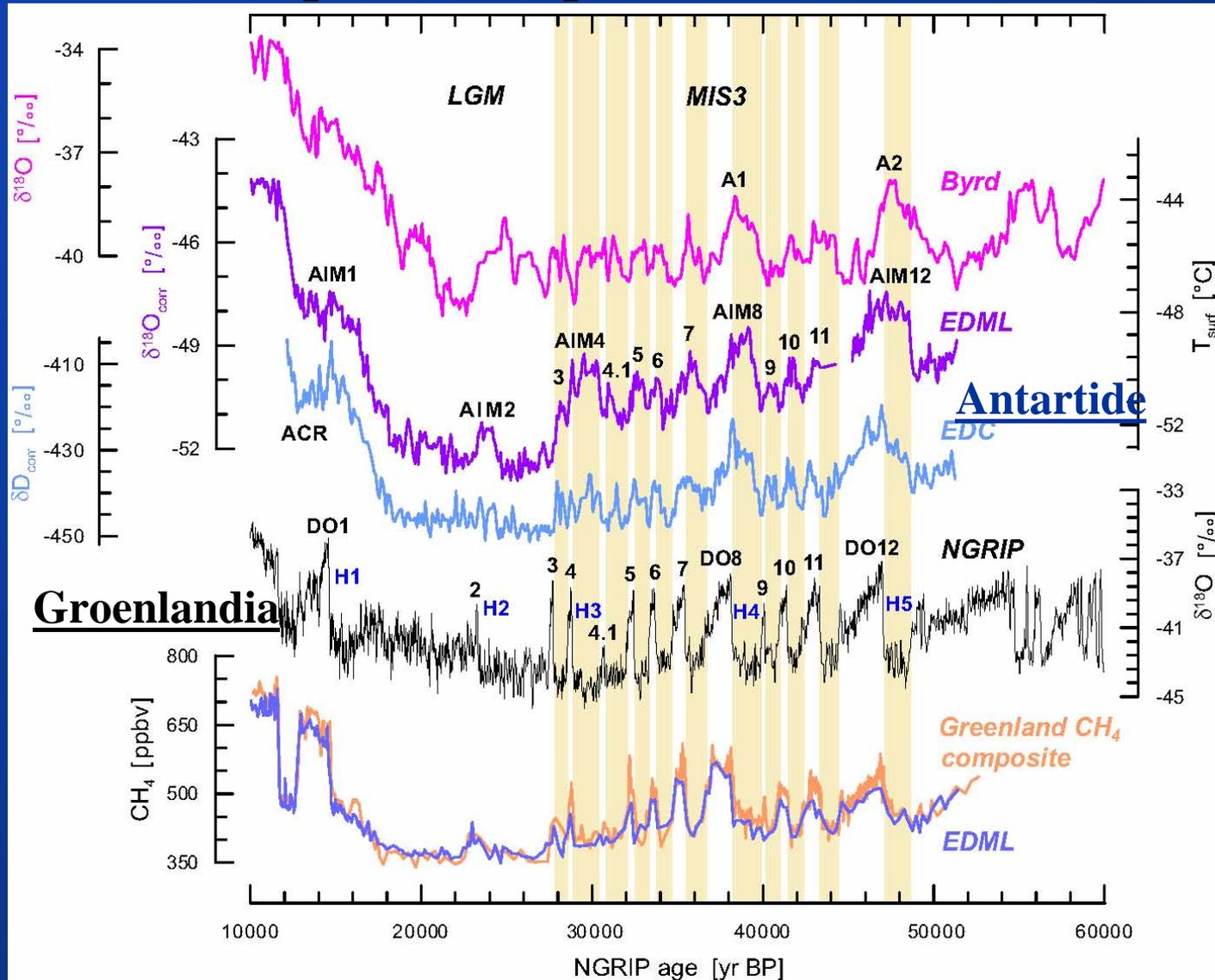
Alverson, Oldfield and Bradley eds.

Alley (2000) QSR, 19, 213-226.

After Taylor et al (1997) Science 278, 825-827.

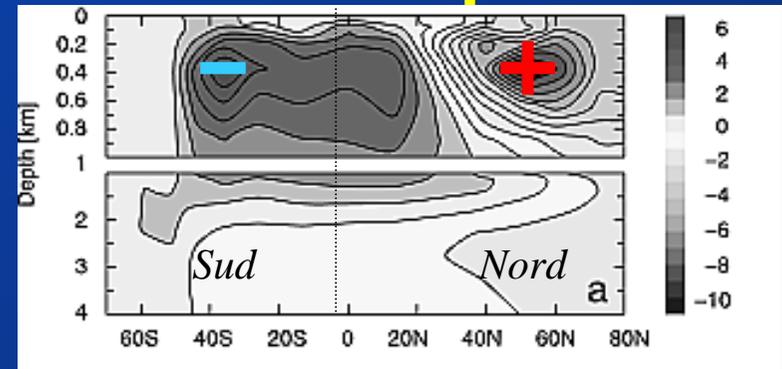
Correlazione N/S mediante segnale CH_4 (MIS3: 50-30 ka BP)

Le bande brune indicano le fasi fredde stadiali in Groenlandia e corrispondono a picchi caldi in Antartide

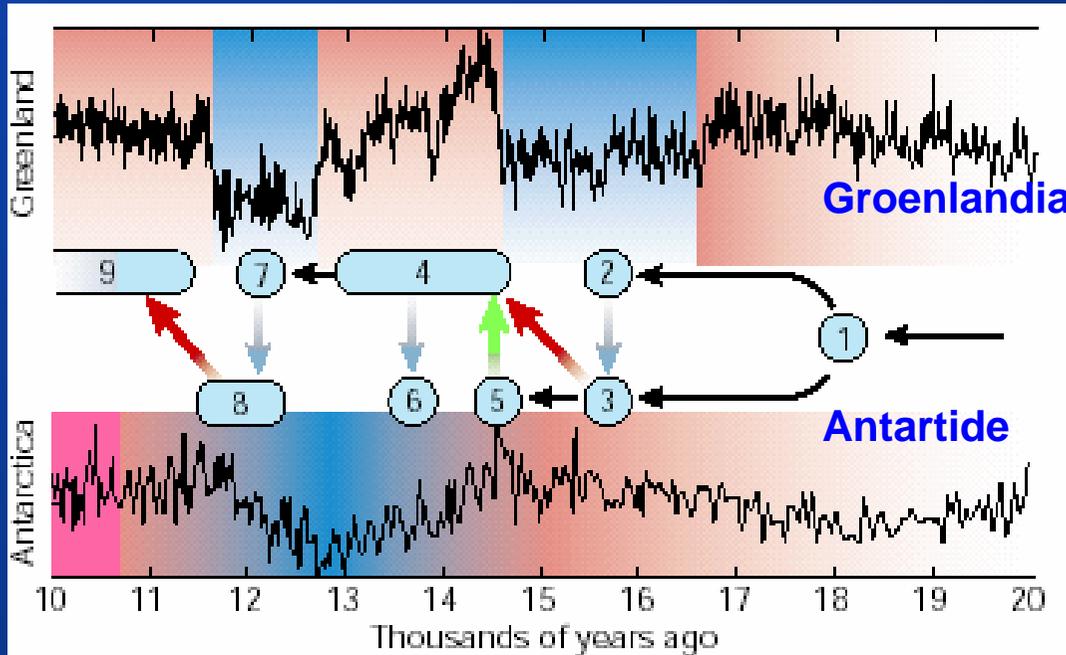
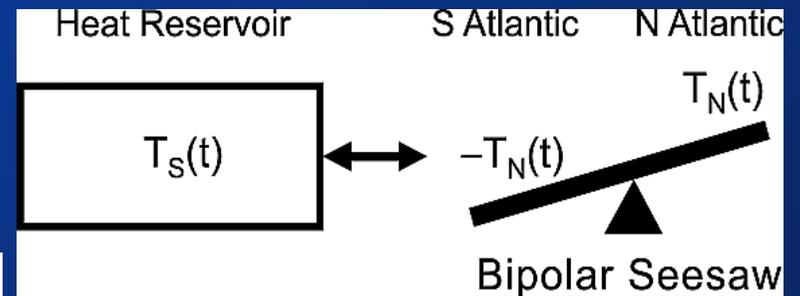




Altalena bipolare



Le variazioni climatiche della durata del millennio non sono in fase nelle due regioni polari: il Sud anticipa il Nord di un migliaio di anni.



Stocker, 2003

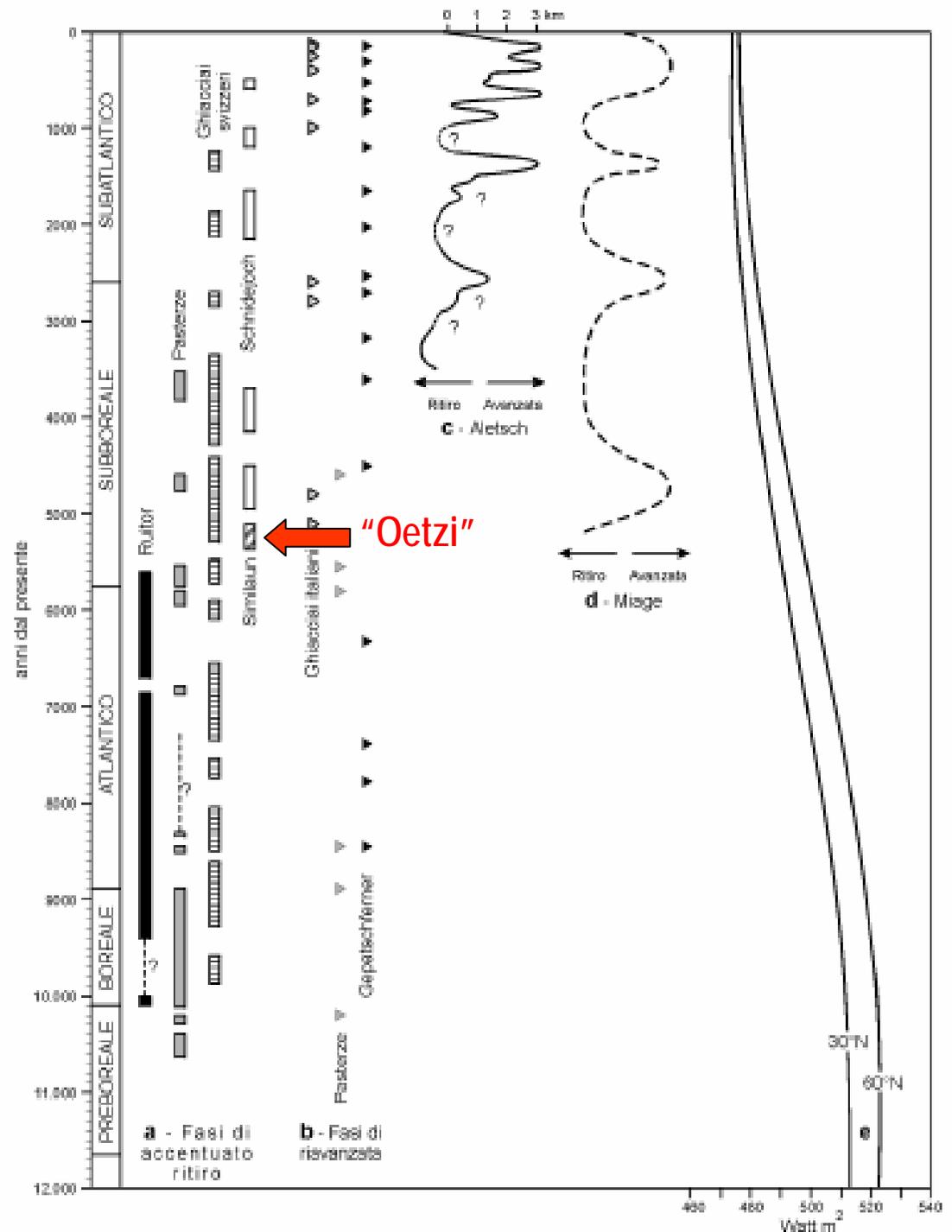


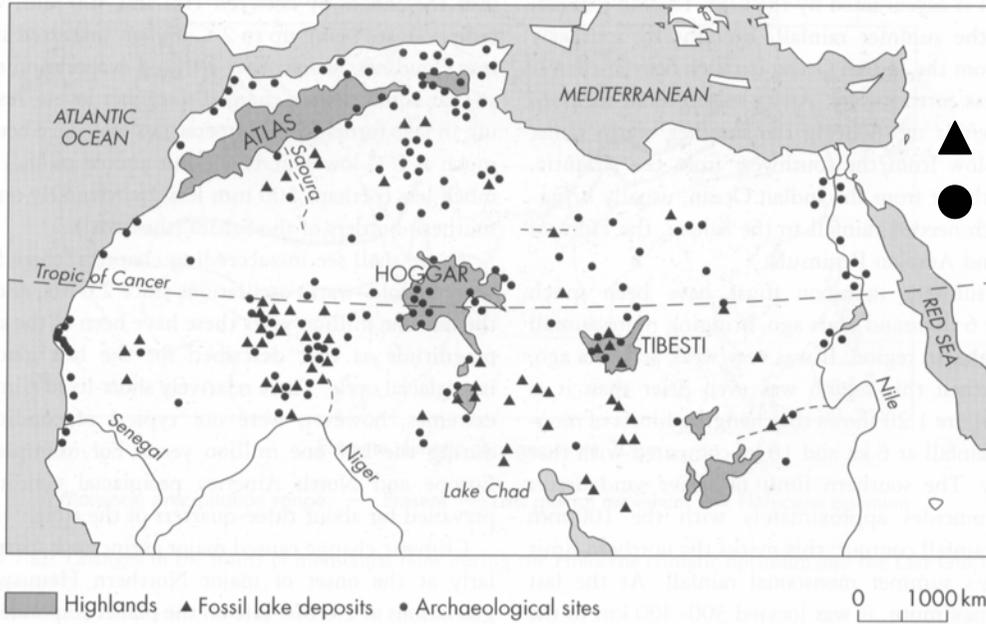
Fasi di ritiro e di avanzata dei ghiacciai delle Alpi: tra 10 e 5 mila anni fa hanno prevalso condizioni di minore estensione delle attuali, mentre negli ultimi 5 mila anni i ghiacciai alpini sono ripetutamente avanzati su posizioni via via più estese, in connessione al declinare della radiazione solare (da circa 520 a 440 W m²)



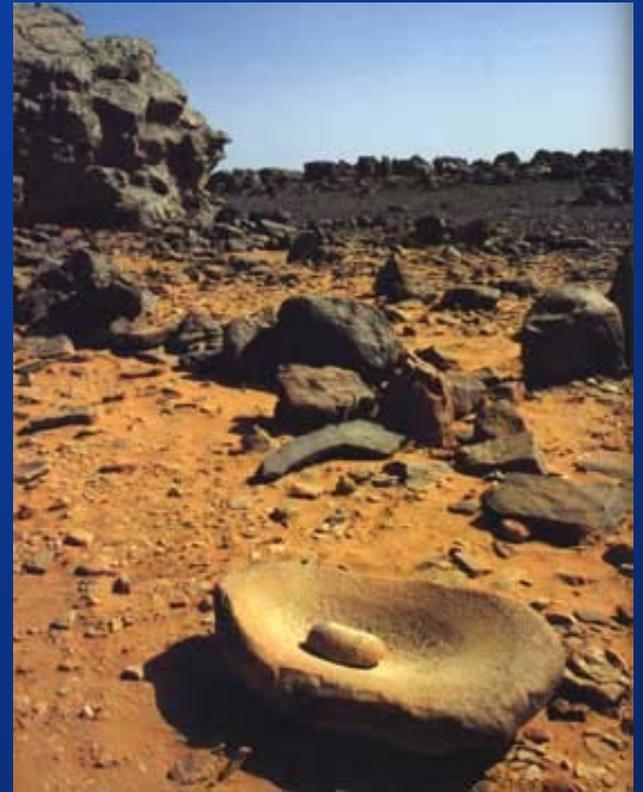
5300 anni B.P.

Orombelli, 2007

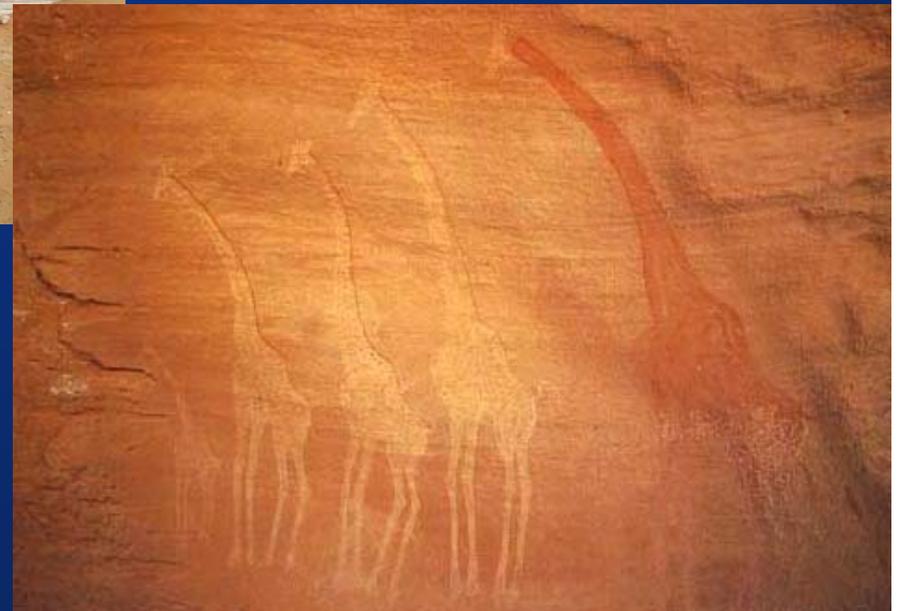
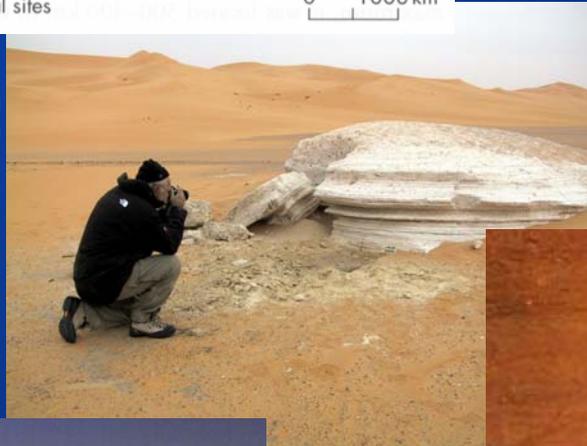




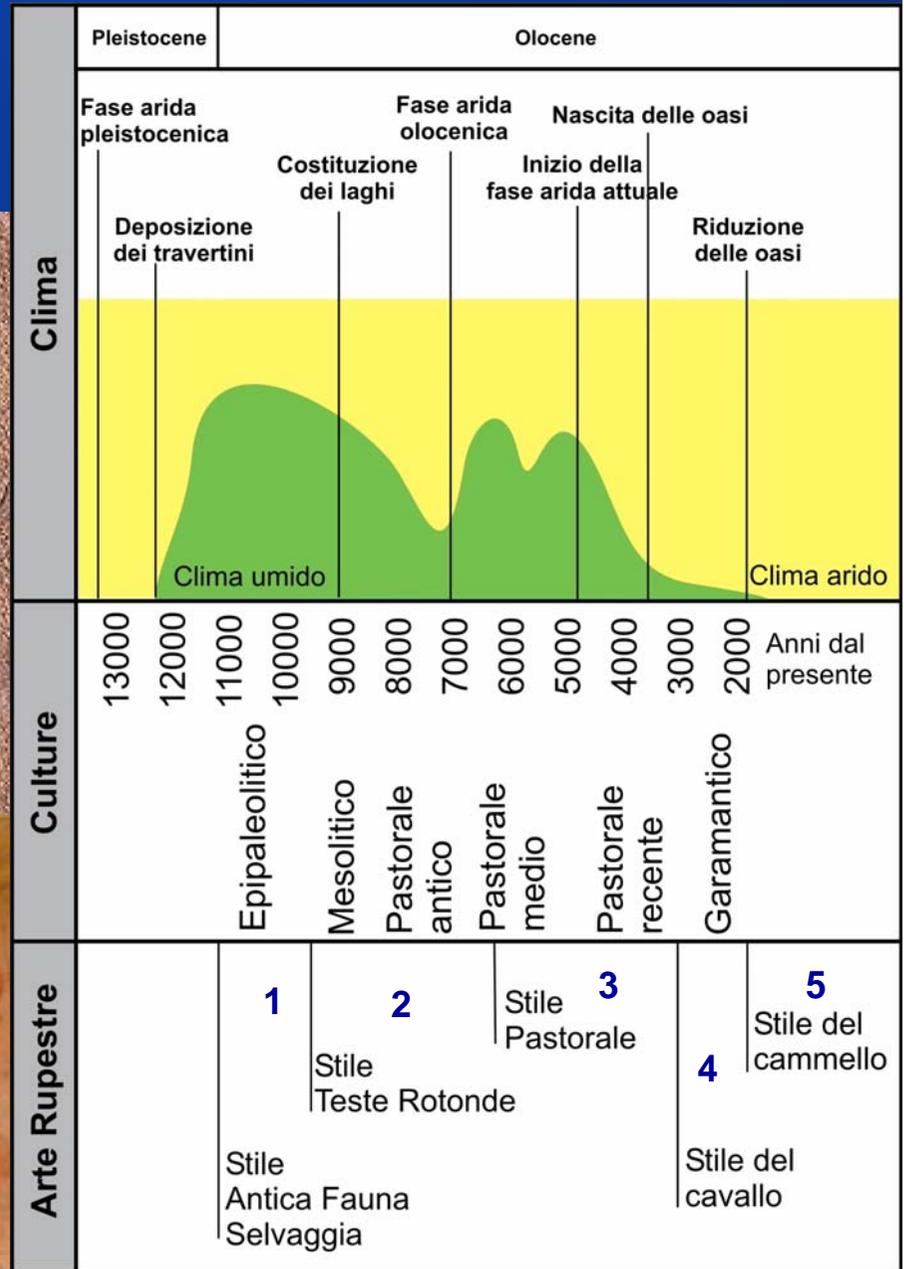
Laghi
Siti
archeologici



Il Sahara verde:
12 000 ÷ 5 000 BP



Le fasi climatiche preistoriche nel Sahara e la desertificazione

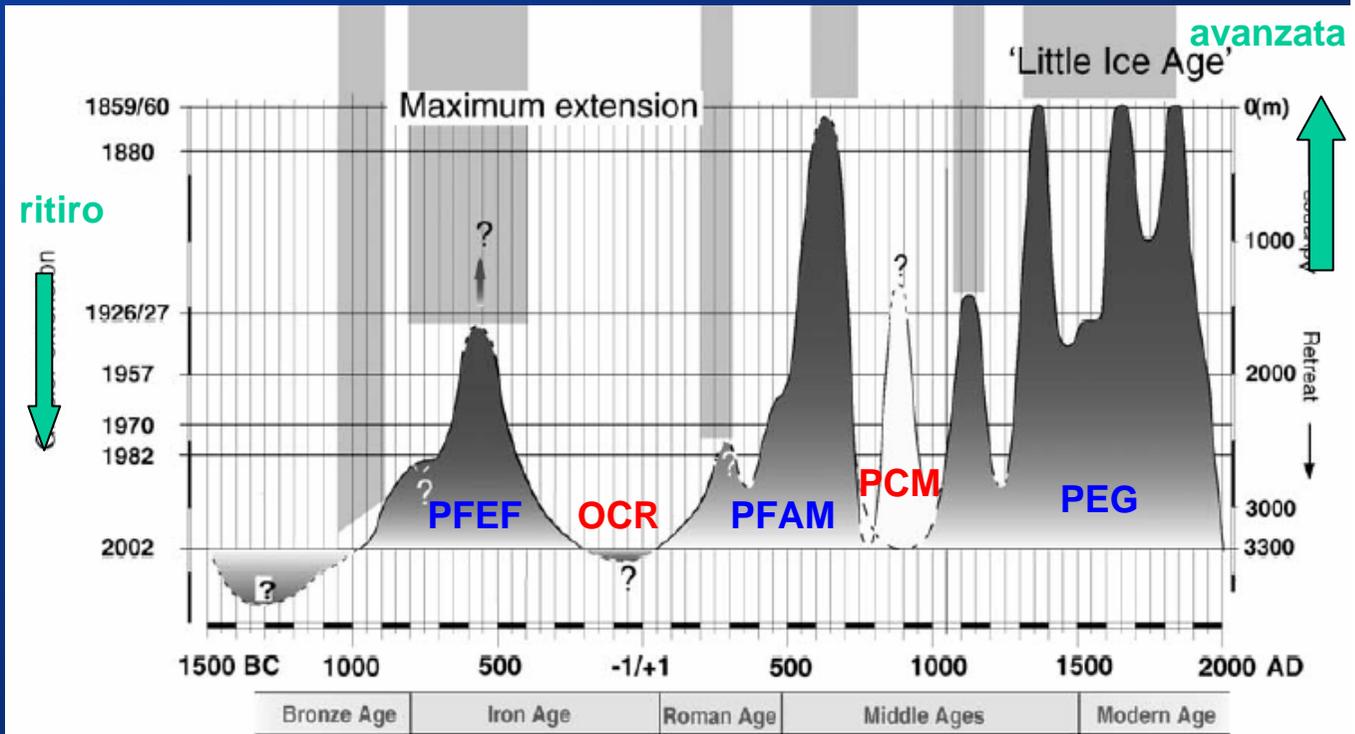


Fluttuazioni del Ghiacciaio Aletsch negli ultimi 3 mila anni



Michel Azema

- Periodo Freddo Età del Ferro
- Optimum Climatico Romano
- Periodo Freddo Alto Medievale
- Periodo Caldo Medievale
- Piccola Età Glaciale:
- 3 max: 1360-90
- 1600-50
- 1820-60



Holzhauser, Magny & Zumbuhl, 2005



Terramara di Poviglio (RE)
Bronzo medio-recente
~ 1600-1250 a.C.



fase di abbandono ~ 1250 a.C.

foto Cremaschi



Peterson, Haug, 2005

Civiltà Maya

2° mill. a.C. ÷ 950 d.C.

Periodo pre-classico

2° millennio a.C. – 250 A.D.

Periodo classico antico

250 – 550 A.D.

Periodo classico recente

550 – 750 A.D.

Periodo classico terminale

750 – 950 A.D.

Apice costruzioni monumentali 721 A.D.

Primi segni del collasso 750-790 A.D.

**Costruzioni monumentali cessano
dopo l' 830 A.D.**

ultimo monumento datato 909 A.D.

De Menocal 2001

Il collasso della civiltà Maya

La civiltà Maya collassa al picco del suo sviluppo culturale, tra 750 e 950 A.D., quando la popolazione sembra aver raggiunto 13 milioni di abitanti.

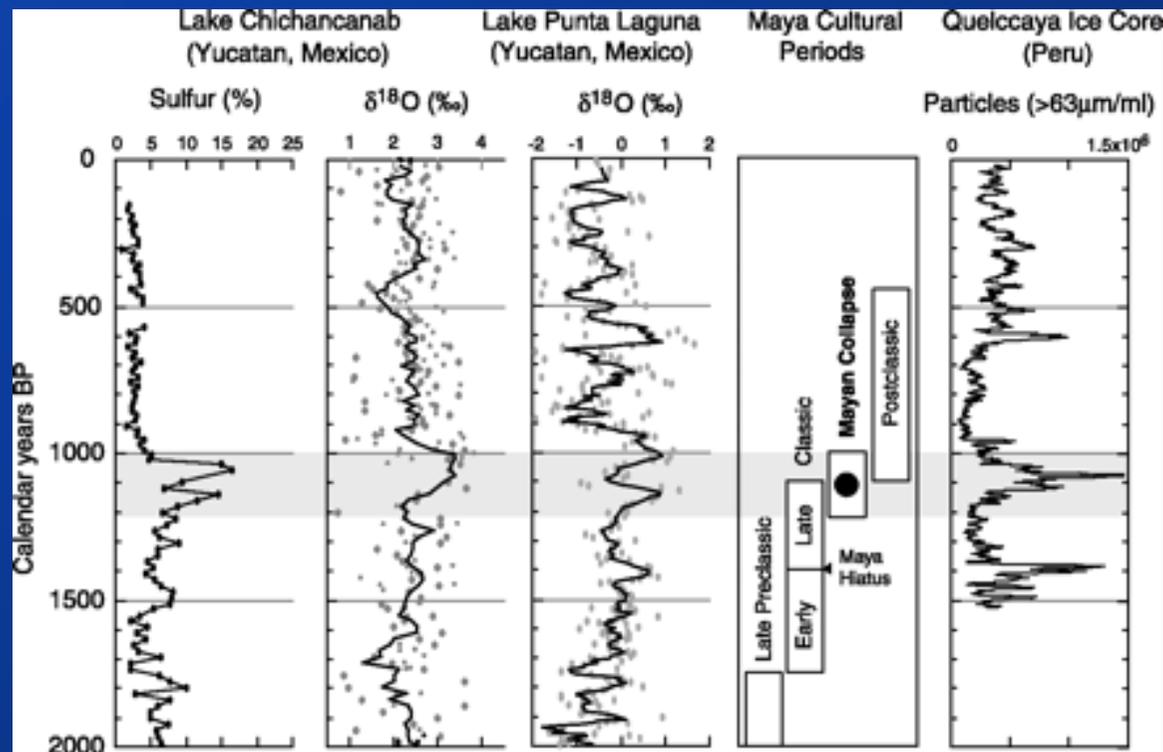
Cause suggerite:
sovrapopolazione, deforestazione/erosione del suolo, sconvolgimenti sociali, guerre, pestilenze, cambiamenti climatici, ecc.

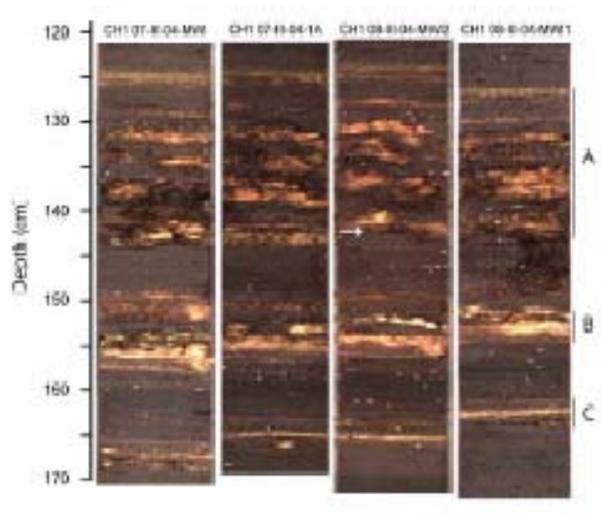
Evidenze paleoclimatiche: due secoli di persistente siccità tra 800 e 1000 A.D.



Tikal, Guatemala

De Menocal, 2001





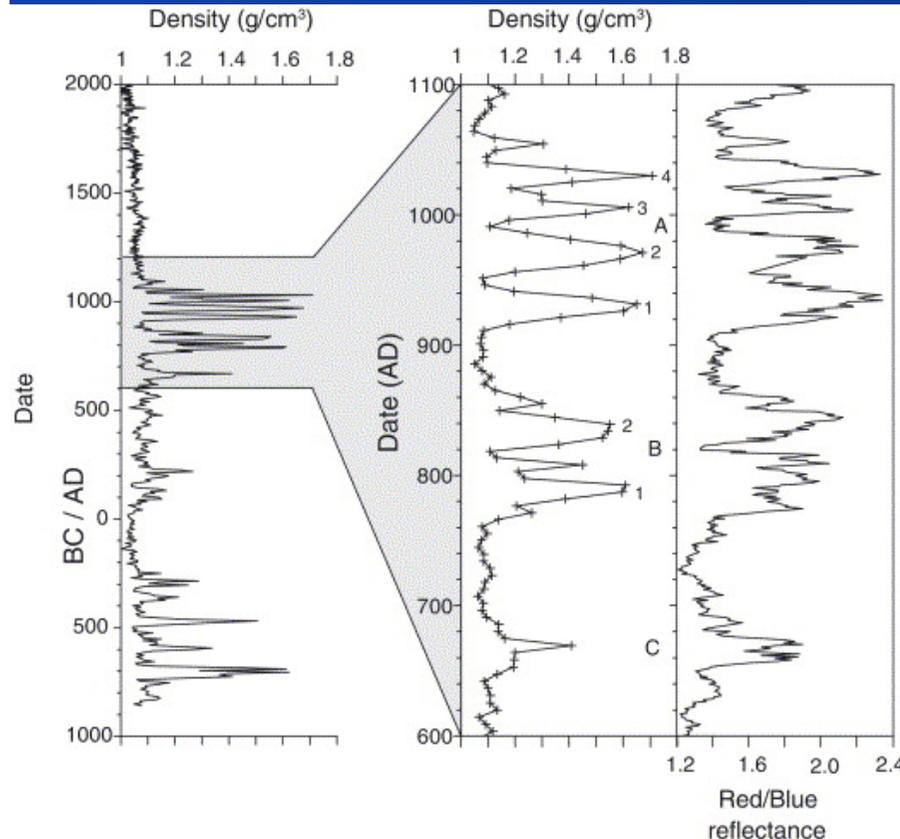
Sedimenti Lago Chichancanab (Yucatan)

3 periodi di deposizione di gesso negli ultimi 2800 anni, implicanti fasi di siccità più frequenti e protratte:

~ 800 – 250 a.C

90 – 230 AD

650 – 1100 AD



L'ultimo periodo include il Periodo Classico Terminale, con fasi di siccità intorno a:

670 AD (C),

770-870 AD (B),

920 – 1100 AD (A)

Due principali fasi di siccità di durata secolare (B ed A), separate da una breve fase umida, tra 870 e 920 AD.

Esempi di cambiamenti/collassi nelle civiltà preistoriche attribuiti a cambiamenti climatici

(Weiss & Bradley 2001)

Civiltà Natufiana (Medio Oriente), transizione dalla caccia/raccolta all'agricoltura/domesticazione (ca. 12.000 BP) in connessione con Y.D.

~ 8200 BP - crisi di siccità bisecolare nel Medio Oriente e in Mesopotamia, abbandono insediamenti agricoli. Con il successivo ritorno a condizioni più umide, insediamenti nelle pianure alluvionali Tigri e Eufrate e agricoltura da irrigazione nella Mesopotamia meridionale.

3200-3000 a.C. (5150-4950 BP) - collasso civiltà di Uruk (Mesopotamia), attribuita a siccità prolungata

2200 a.C. - siccità catastrofica – collasso civiltà accadica (Mesopotamia)

6° sec. AD - civiltà Moche (Perù): 30 anni di siccità, capitale distrutta, carestia

9° sec. AD - collasso civiltà classica dei Maya (Yucatan), siccità prolungata

10° sec. AD - collasso civiltà Tiwanaku (Ande centrali), siccità prolungata

13° sec. AD - improvviso abbandono insediamenti indiani Anasazi



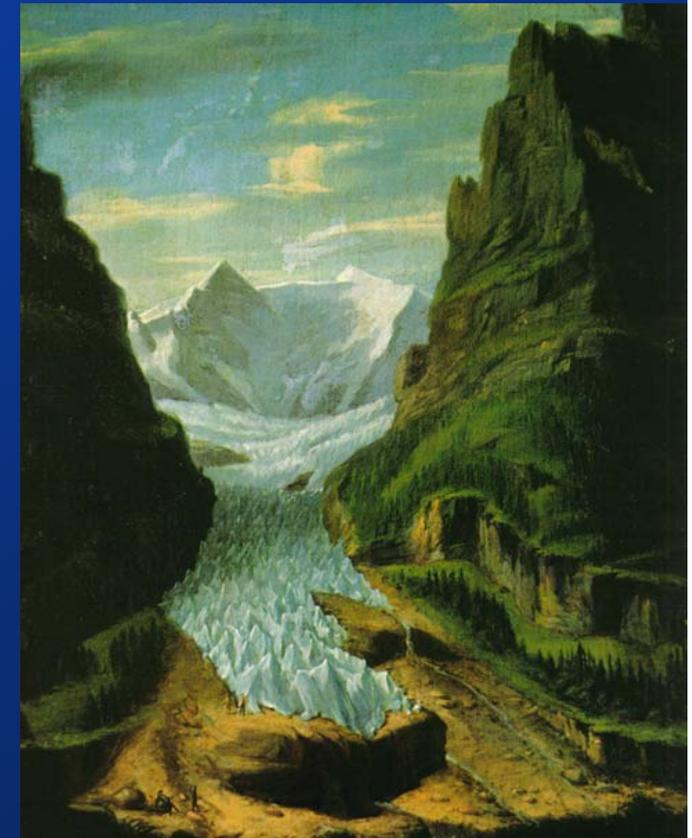
La Piccola Età Glaciale 1300 -1860

tre massimi:

1360-90

1600-50

1820-60



*Unterer Grindelwald glacier,
XVIII century*

“Cacciatori nella neve”

Pieter Bruegel il vecchio 1565

Il periodo caldo medievale termina con il *beau XIII^e siècle* (Le Roy L., 2004). Con il primo decennio del '300 inizia la PEG: grande carestia 1315-1316, clima sfavorevole, raccolti insufficienti, prezzi elevati, mortalità, migrazioni e mendicizia. La peste nera 1348.

Il cambiamento climatico in corso

L'attuale fase di riscaldamento climatico è certa, dimostrata dall'aumento della temperatura media globale dell'aria e degli oceani, dalla riduzione della copertura nevosa, dalla riduzione dei ghiacci marini (emisf. N), dalla generale e accentuata riduzione dei ghiacciai montani, dalla risalita del livello medio degli oceani.

Dal 1906 al 2005 la T_{ma} globale è aumentata di $0,74 \pm 0,18$ °C; il tasso di aumento è raddoppiato negli ultimi 50 anni ($0,13$ °C/10 anni).

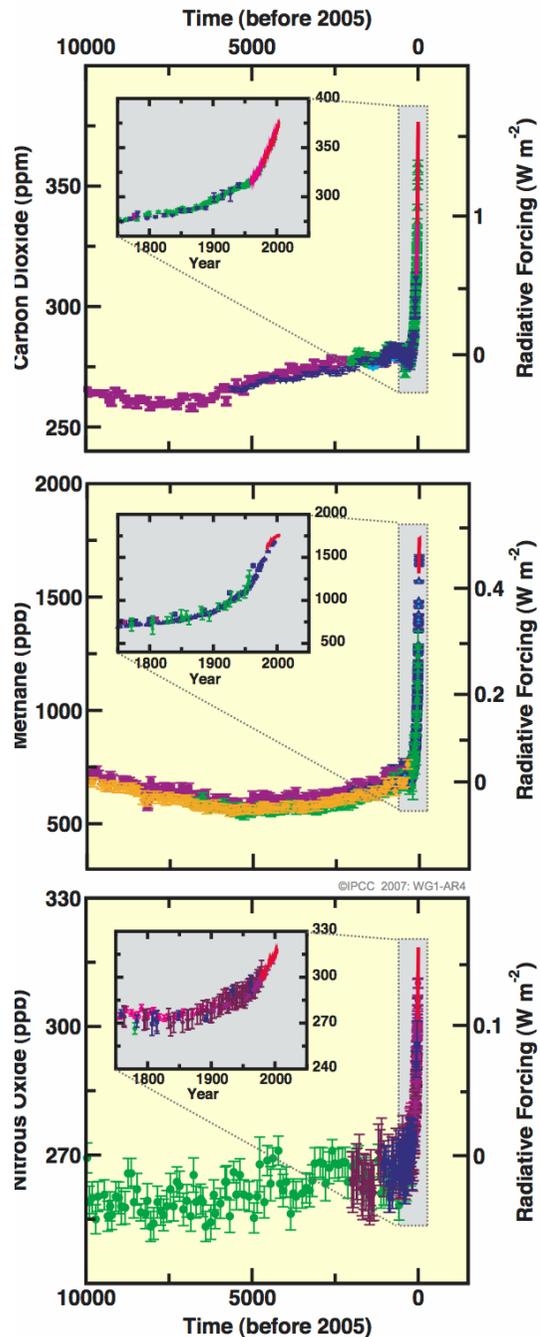
L'effetto delle isole di calore urbane è reale ma quasi trascurabile a livello globale. Misure di temperatura da satellite e da pallone nella media-bassa troposfera confermano le misure della temperatura dell'aria al suolo.

La T_m globale degli oceani fino alla profondità di 3000 m è aumentata. Gli oceani assorbono più dell'80% del calore aggiunto al sistema climatico.

La temperatura media globale dell'emisfero Nord negli ultimi 50 anni è stata quasi sicuramente la più calda negli ultimi 500 anni e probabilmente negli ultimi 1300 anni.

(IPCC, 2007)

Changes in Greenhouse Gases from ice-Core and Modern Data



L'aumento dei gas serra e dell'albedo

La concentrazione atmosferica globale dei gas serra CO₂, CH₄, N₂O è aumentata molto rapidamente negli ultimi 2 secoli, superando nettamente i valori preindustriali:

CO₂ da 280 a 383 ppm (+ 37 %)

CH₄ da 715 a 1775 ppb (+ 148 %)

N₂O da 270 a 320 ppb (+ 18 %)

Tenuto conto degli effetti di raffreddamento prodotti da polveri e fumi immessi dall'uomo, l'effetto netto dell'inquinamento atmosferico è un aumento del *forcing* radiativo stimato in $1,6 \pm 1 \text{ W m}^{-2}$

La riduzione della copertura nevosa, dell'estensione dei ghiacci marini e dei ghiacciai produce una diminuzione dell'albedo, e quindi aumenta la radiazione solare assorbita dalla Terra

IPCC, 2007

L'insegnamento del passato

Le carote di ghiaccio hanno rivelato l'esistenza di variazioni climatiche alla scala del millennio (*DO events*), che iniziano e terminano bruscamente in pochi anni/decine di anni.

Il clima è capace di sorprese: è un sistema non lineare, che può reagire rapidamente e con effetti non proporzionati a cause forzanti assai deboli.

Nell'ultimo interglaciale (Olocene, iniziato 11 500 anni fa) la temperatura è stata quasi stabile, ma si sono prodotti cambiamenti nella circolazione atmosferica e nel ciclo idrologico, con conseguenze rilevanti nella distribuzione e nel regime delle precipitazioni. Prolungate fasi di siccità hanno probabilmente causato il collasso di società sviluppate in ambienti al limite delle disponibilità idriche e migrazione di popolazioni.

L'umanità attuale ha conoscenze e mezzi per affrontare crisi climatico-ambientali. Ma si deve tenere conto della situazione demografica ed economico-sociale radicalmente nuova nella storia.