

## Sintesi delle conoscenze sulla variabilità climatica nelle Alpi negli ultimi 1000 anni

Silvia FRISIA

Sezione di Geologia, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, 38100 Trento, Italia  
School of Environmental and Life Sciences, the University of Newcastle, University Drive, Callaghan NSW 2308 Australia  
E-mail: [frisia@mtsn.tn.it](mailto:frisia@mtsn.tn.it)

**RIASSUNTO** - *Sintesi delle conoscenze sulla variabilità climatica nelle Alpi negli ultimi 1000 anni* - Negli ultimi mille anni precedenti il 1850 circa il clima è variato per cause naturali. Le temperature medie annue si sono abbassate di circa -1 °C fino a -1,5 °C nella Piccola Età Glaciale, in particolare nella prima metà del XVIII secolo, e sono state simili, o più calde, delle attuali durante l'Optimum del Medioevo tra il 1150 e il 1400 AD. Il fattore più importante nella variazione del clima alpino è l'aumento delle temperature invernali e primaverili, che pare essenzialmente legato all'attività solare per il periodo pre-industriale e alla combinazione di forzante solare e antropogenico negli ultimi 100 anni. Gli archivi paleoclimatici rappresentati dalle concrezioni di grotta indicano inequivocabilmente che questo fenomeno causa la diminuzione del periodo di permanenza del manto nevoso alle medie e alte quote, con conseguenze imprevedibili per gli ecosistemi forestali.

**SUMMARY** - *A synthesis of our knowledge about alpine climate variability for the last 1000 years* - In the last 1000 years, prior to the year 1850 AD, climate variability had been mostly related to natural causes. Mean annual temperatures were about -1 °C to -1.5 °C lower in the Little Ice Age, and in particular in the cold first half of the 18<sup>th</sup> century and were as high as at Present, or even higher in the Medieval Optimum from c. 1150 to 1400 AD. The most important phenomenon related to the current warming is the increase of winter and spring temperatures in the Alps, which has been related to solar forcing in the pre-industrial era, and to a combination of solar and anthropogenic forcing in the past 100 years. The palaeoclimate record archived in speleothems from Trentino further indicates that this phenomenon results in a shorter duration of snow cover at mid altitudes. This has unpredictable consequences on forest ecosystems.

*Parole chiave:* Alpi, paleoclima, ultimo millennio, Trentino  
*Key words:* Alps, paleoclimate, last millennium, Trentino

### 1. INTRODUZIONE

Conoscere la variabilità del clima alpino per gli ultimi 1000 anni è di estrema importanza per capire l'effetto delle attività umane sulla variabilità naturale e la risposta dell'ambiente al riscaldamento globale. La storia del clima per l'ultimo millennio ci permette di ricostruire periodi in cui il paesaggio delle Alpi appariva simile a quello attuale. Ad esempio, minimi nell'estensione dei ghiacciai sono testimoniati già tra gli anni 1100 e 1300 AD. Ciò che ha profondamente alterato l'ambiente alpino negli ultimi 100 anni, tuttavia, non è la variabilità naturale del clima, ma la maggiore densità di insediamenti umani, il numero più elevato di abitanti, l'impatto sulle risorse naturali e, ovviamente, le emissioni di gas serra. Il fatto che ci sia stato, tra il 1000 e il 1300, un periodo che per

le caratteristiche climatiche è stato definito "Periodo caldo medievale" non ci autorizza comunque a rimandare provvedimenti necessari ad abbattere le emissioni. L'ecosistema naturale, ancora 100 anni fa, riusciva a "difendersi", anche in modo terribile, dai danni che gli arrecavano le attività umane. Basti pensare alle grandi pandemie, che riducevano a meno della metà la popolazione abbattendo così le emissioni di gas serra. Ovviamente non siamo ad augurare l'avvento di una pandemia, che tanti paventano quale possibile effetto del riscaldamento in atto e della globalizzazione. Tuttavia, l'analisi della situazione attuale inserita nel contesto storico ci porta a concludere che siamo a un punto di non ritorno e che, se proprio non riusciamo a tornare indietro, dobbiamo almeno fermare uno sviluppo insostenibile per la Terra e imparare a convivere con il "global warming".

## 2. VARIABILITÀ DELLE TEMPERATURE IN EUROPA

La ricostruzione più famosa dell'andamento delle temperature medie annue nell'Emisfero Settentrionale per gli ultimi mille anni, quella di Mann *et al.* (1998), mostra una variabilità scarsa tra l'anno 1000 e il 1850 AD, seguita da un forte riscaldamento negli ultimi 150 anni (periodo industriale). Per questa ricostruzione ("a mazza da hockey" o "hockey-stick") gli Autori si sono basati soprattutto sui dati di dendroclimatologia, cioè sulle variazioni di spessore e densità degli anelli di accrescimento degli alberi. Uno dei maggiori problemi nel calcolo delle temperature proposto da Mann *et al.* (1998) è che gran parte dei dati su cui questo è basato si riferisce a zone boreali o al limite della foresta, e che gli anelli di accrescimento degli alberi danno indicazioni molto accurate solo sulla stagione calda. Ci sono così incertezze sull'affidabilità della curva di Mann *et al.* (1998), sebbene questa resti un importante riferimento per i climatologi e per le simulazioni a scopo di previsione (IPCC 2001).

Come accennato, la ricostruzione di Mann *et al.* (1998) si distingue per la sua scarsa variabilità a lungo termine e per il rapido innalzamento delle temperature in età industriale (Fig. 1). Un'altra curva delle temperature medie annue nell'Emisfero Settentrionale, proposta da Esper *et al.* (2002) e sempre basata sulla dendroclimatologia, mostra fluttuazioni molto maggiori (Fig. 1). Ad esempio, Mann *et al.* (1998) danno per il periodo più freddo della Piccola Età Glaciale (XVII secolo) una diminuzione delle temperature medie annue di circa  $-0,4$  °C rispetto al periodo di riferimento (1961-1990), mentre Esper *et al.* (2002) calcolano una diminuzione di  $-0,8$  °C per lo stesso periodo di tempo. La ricostruzione di Esper *et al.* (2002) è caratterizzata da un raffreddamento di quasi un grado centigrado tra l'anno 1000 circa e l'anno 1300, il Periodo Caldo Medievale (PCM), mentre secondo quella di Mann *et al.* (1998) le temperature risultano di poco inferiori alle attuali. Dati provenienti da altri archivi – tra cui sedimenti marini, carote di ghiaccio e stalagmiti – indicano per il cosiddetto PCM temperature medie annue nell'Emisfero Settentrionale tra  $0,03$  e  $0,06$  °C inferiori a quelle registrate per gli ultimi 30 anni (Bradley *et al.* 2003), quindi più basse di quelle calcolate da Mann *et al.* (1998), ma più elevate rispetto a quelle proposte da Esper *et al.* (2002). La ricostruzione che più si avvicina a quella di Bradley *et al.* (2003) per il PCM è quella di Briffa *et al.* (2001), sempre basata sulla dendroclimatologia (Fig. 1).

Il PCM è stato considerato da alcuni paleoclimatologi come un periodo analogo all'attuale. Si caratterizzò per temperature invernali relativamente elevate, ma soprattutto per prolungati periodi siccitosi dall'anno 900 all'anno 1300 in Europa e negli attuali Stati Uniti (McMillan *et al.* 2005), e per piogge catastrofiche in

altre parti del mondo (Bradley *et al.* 2003). Le anomalie nel bilancio idrologico del PCM sono particolarmente importanti. Se, infatti, si ripresentassero nella situazione odierna, con la popolazione mondiale 10 volte più numerosa di più di quella del Medioevo, le conseguenze sarebbero catastrofiche. I segnali relativi ai cambiamenti globali, soprattutto per quanto riguarda la diminuzione della piovosità media annua in alcune aree tra cui quella Mediterranea, sono allarmanti per l'evoluzione dell'ambiente e del paesaggio nell'immediato futuro. È fondamentale, per questo motivo, cercare di comprendere al più presto le cause naturali che provocarono il riscaldamento del PCM, in quanto le emissioni di gas serra da attività umane, alterando il "rumore di fondo" del sistema clima, potrebbero creare un effetto di risonanza e amplificare la variabilità naturale.

Mann *et al.* (1998) hanno sensibilizzato il mondo politico sul problema del riscaldamento globale da emissioni antropogeniche, ma a scapito di una certa sottostima della variabilità naturale (von Storch *et al.* 2004). Simulazioni matematiche tramite Modelli di Circolazione Generale (GCM) indicano tuttavia che la frequenza di variazioni climatiche a scala secolare (bassa frequenza) per l'ultimo millennio è alta rispetto a quanto suggerito da Mann *et al.* (1998) (Tett *et al.* 1997; Jones & Mann 2004). Una spiegazione per questa discrepanza è il modo in cui vengono elaborati i dati dendroclimatologici: si utilizzano, infatti, metodi statistici basati sulla regressione, che possono eliminare parte della variabilità a bassa frequenza (Esper *et al.* 2002). Quindi, è necessario ottenere dati da altri archivi, che registrino anche la variabilità stagionale, e calibrarli con misure strumentali e dati storici (Luterbacher *et al.* 2004).

## 3. VARIABILITÀ DELLE TEMPERATURE NELLE ALPI

La ricostruzioni quantitative della variabilità del clima per l'ultimo millennio in area alpina sono ancora scarse, in quanto esistono poche serie temporali che abbiano una risoluzione sufficientemente elevata (preferibilmente annuale), una precisa correlazione con un parametro climatico (temperatura o piovosità), una quantificazione del parametro climatico con la relativa stima della probabilità di errore. Ricostruzioni ad alta risoluzione (annuale e decennale) per il periodo pre-strumentale sono basate sull'analisi di documenti storici e annali (Pfister 1992; Luterbacher *et al.* 2004; Le Roy Ladurie 2004), dati geochimici (isotopi stabili dell'Ossigeno) e fisici (velocità di crescita delle lamine annuali da stalagmiti (Mangini *et al.* 2005; Frisia *et al.* 2003; Smith *et al.* 2006) e profili di temperatura misurati lungo perforazioni profonde (ultimi 300 anni) (Pasquale *et al.* 2000). In genere, si tratta sempre di

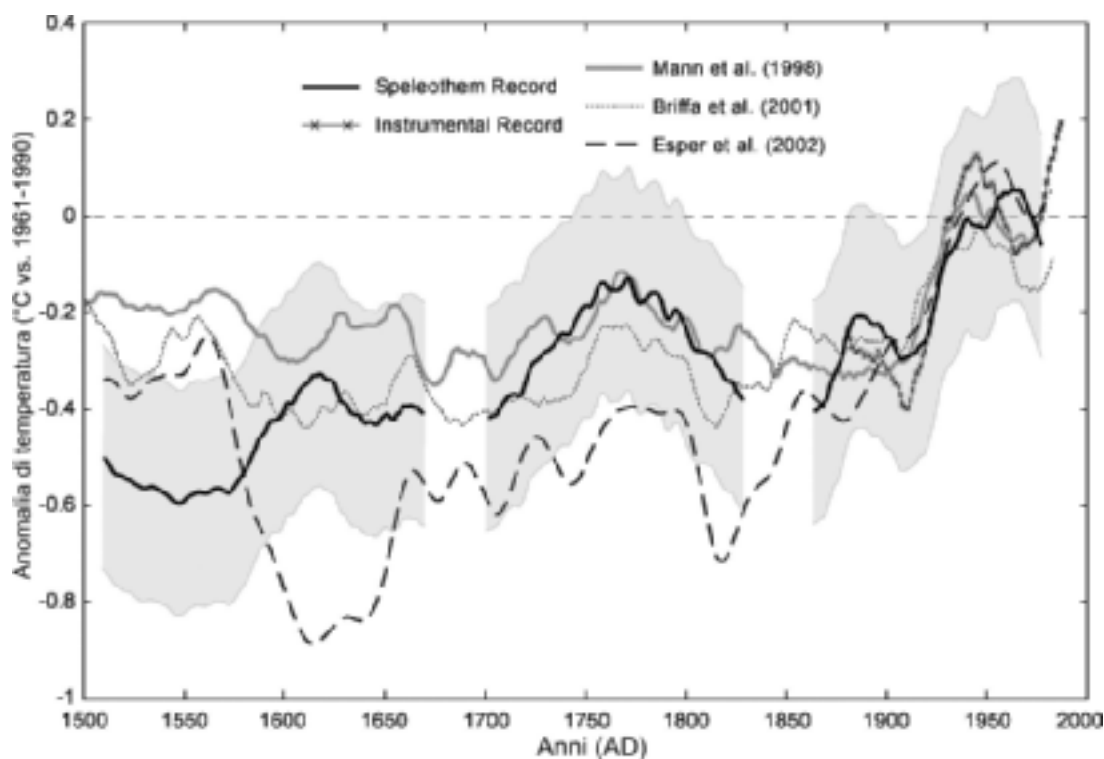


Fig. 1 - Ricostruzione delle temperature medie annue da speleotemi dell'Emisfero Nord per gli ultimi 500 anni confrontate con differenti ricostruzioni di temperatura mediate attraverso un filtro passa-basso con finestra di 20 anni. L'area in grigio rappresenta l'intervallo di errore  $2\sigma$  (da Smith *et al.* 2006).

Fig. 1 - Reconstructed mean annual temperature from Northern Hemisphere speleothems for the last 500 years compared with several Northern Hemisphere mean annual temperature reconstructions smoothed with a 20-year low-pass filter. The shaded area shows the  $2\sigma$  error intervals (from Smith *et al.* 2006).

ricostruzioni di anomalie di temperatura. Le evidenze geomorfologiche o documentarie di avanzate e ritirate dei ghiacciai danno indicazioni qualitative (Holzhauser 1997). Esistono, inoltre, cronologie di alberi di *treeline* che coprono gli ultimi 8 secoli (Urbinati *et al.* 2004), che, tuttavia, non sono state quantificate in termini di parametri climatici.

La calibrazione delle serie paleoclimatiche con le serie strumentali, ovviamente, si basa sul presupposto che il clima dell'ultimo millennio fosse caratterizzato da modi di variabilità analoghi a quelli del periodo strumentale. Questo assunto potrebbe non essere corretto (cfr. Bradley *et al.* 2003), tuttavia conforta il fatto che in tutte le serie emergano variazioni a bassa e alta frequenza confrontabili tra loro. Quello che cambia maggiormente è proprio la ricostruzione del dato quantitativo. Ad esempio, la ricostruzione delle anomalie di temperatura proposta da Mangini *et al.* (2005) e basata sulla variabilità del  $\delta^{18}\text{O}$  in una stalagmite della Grotta di Spannagel (Innsbruck) prelevata a una quota di 2347m s.l.m. ha massimi di temperatura, soprattutto in inverno, stimati fino a  $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  in più durante il PCM rispetto alla media tra il 1900 e il 1950 (Fig. 2). Frisia *et al.* (2005) per l'intervallo di tempo tra il 1150 e il

1400 AD hanno calcolato dal  $\delta^{18}\text{O}$  di una stalagmite proveniente dalla Grotta Savi (Trieste; ca. 450 m a.s.l.) temperature medie annue simili a quelle del periodo 1961-1991.

Nella successiva Piccola Età Glaciale (PEG) l'anomalia di temperatura, soprattutto invernale, stimata dal  $\delta^{18}\text{O}$  della stalagmite della Grotta Savi è di circa  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  tra il 1650 e il 1750 rispetto agli ultimi 30 anni. Per la stalagmite di Spannagel, l'anomalia calcolata per lo stesso periodo di tempo è di circa  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  rispetto alla media tra il 1900 e il 1950 (per Spannagel manca il record dal 1950 a oggi). Entrambi i dati sono confrontabili con le stime di diminuzione della temperatura media invernale in Europa tra 1650 e 1750 AD (circa  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Luterbacher *et al.* 2004). Il  $\delta^{18}\text{O}$  delle stalagmiti alpine, quindi, sembrano registrare molto bene la variazione della temperatura nei mesi freddi.

Nella ricostruzione delle temperature medie per gli ultimi 500 anni calcolata utilizzando la variazione dello spessore delle lamine di accrescimento annuale di tre stalagmiti, di cui una proveniente dalla Grotta di Ernesto (1160 m s.l.m., Comune di Grigno, Trentino), l'abbassamento delle temperature medie annue durante il periodo più freddo della PEG (rispetto alla media

1961-1991) è stimato di  $-0,4$  °C, con un errore di  $\pm 0,2$  °C (Fig. 3). Questo valore è simile a quello calcolato da Luterbacher *et al.* (2004) per lo stesso intervallo di tempo.

La variazione dello spessore delle lamine delle stalagmiti della Grotta di Ernesto ha una correlazione molto buona con le temperature medie annue e invernali (Frisia *et al.* 2003), in quanto dipende dall'attività del suolo e dalla produzione di CO<sub>2</sub>. Una maggiore concentrazione di CO<sub>2</sub> nelle acque del suolo determina infatti una maggiore dissoluzione della roccia carsica e, quindi, un aumento della precipitazione di calcite in grotta (Frisia 2005). In sintesi, durante gli inverni della PEG i suoli del Trentino dovevano rimanere coperti di neve o gelati più a lungo che negli ultimi 30 anni. L'aumento dello spessore delle lamine annuali di crescita è particolarmente accentuato negli ultimi 100 anni con un massimo tra il 1990 e il 2000 (Frisia *et al.* 2003, 2005)<sup>1</sup>. Questo è un segno inequivocabile del riscaldamento globale e degli effetti che tale fenomeno ha in area alpina sulla diminuzione costante della durata della stagione fredda e della copertura nevosa. La temperatura della stagione invernale e primaverile sembra essere, quindi, uno dei fattori più importante di cambiamento in ambiente alpino, almeno per gli ultimi 1000 anni: il riscaldamento primaverile, in particolare, ha come conseguenza la permanenza più breve del manto nevoso e l'allungamento della stagione vegetativa (Menzel & Fabian 1999). L'attività batterica più prolungata nel tempo comporta una decomposizione più efficace della materia organica, una diminuzione di pH negli orizzonti più superficiali del suolo forestale e, quindi, una maggiore mobilitazione di elementi in traccia da suolo a sottosuolo (Frisia *et al.* 2005; Borsato *et al.* 2007). Se questo andamento continuasse e il periodo vegetativo diventasse continuo, le conseguenze sulla qualità del suolo sarebbero imprevedibili.

L'importanza della variabilità stagionale dovuta al cambiamento climatico è stata sottolineata anche in una recente ricostruzione delle temperature primaverili e autunnali per gli ultimi 500 anni in Europa, che combina dati storici e strumentali (Xoplaki *et al.* 2005). Tale ricostruzione evidenzia che le primavere più fredde si registrano tra il 1687 e 1716, nella seconda parte del cosiddetto Minimo di Maunder di attività solare, e che nelle Alpi l'andamento delle temperature invernali e primaverili era molto simile alla media europea nello stesso intervallo di tempo (Pfister 1992; Luterbacher *et al.* 2004). Xoplaki *et al.* (2005), inoltre, indicano che le temperature primaverili degli ultimi 500 anni sarebbero influenzate da variazioni dell'attività solare,

come già evidenziato da Frisia *et al.* (2003) attraverso l'analisi spettrale degli spessori delle lamine di crescita annuale di stalagmiti della Grotta di Ernesto. La variabilità a bassa frequenza delle temperature invernali e primaverili, quindi, sarebbe legata alla variabilità solare in condizioni "naturali".

Nella ricostruzione di Xoplaki *et al.* (2005), l'ultimo secolo è stato caratterizzato da un innalzamento delle temperature di  $+0,1$  °K per decade, soprattutto in marzo, mese che sembra contribuire più degli altri all'anomalia positiva di temperatura. La tendenza al riscaldamento in marzo sarebbe dovuto a una più alta attività solare nell'ultimo secolo rispetto ai precedenti (Xoplaki *et al.* 2005).

#### 4. CONCLUSIONI

In conclusione, l'analisi della variabilità a bassa frequenza per serie di dati proxy climatici provenienti dalle Alpi porta alle seguenti considerazioni:

- 1) la variabilità climatica a bassa frequenza è naturale e modulata dall'attività solare;
- 2) è possibile che il Periodo Caldo Medievale sia stato caratterizzato da temperature invernali simili a quelle attuali in alcune zone delle Alpi centro-settentrionali (Spannagel), mentre sul versante meridionale dello spartiacque alpino le temperature medie sarebbero state paragonabili a quelle del trentennio 1961-1991;
- 3) è inequivocabile un aumento delle temperature medie annue e dalle temperature medie della stagione invernale. Questo fenomeno è dovuto in parte all'attività solare, ma, soprattutto, alle attività dell'uomo e alle conseguenti emissioni di gas serra.

#### RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è parte del progetto AQUAPAST, finanziato dal Fondo Unico per la Ricerca della PAT, di cui l'autrice è stata coordinatore scientifico per conto del Museo Tridentino di Scienze Naturali.

#### BIBLIOGRAFIA

- Borsato A., Frisia S., Fairchild I.J., Somogyi A. & Susini J., 2007 - Trace element distribution in annual stalagmite laminae mapped by micrometer-resolution X-ray fluorescence: implications for incorporation of environmentally significant species. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 1494-1512.
- Bradley R., Briffa K.R., Cole J.E., Hughes M.K., & Osborn T.J., 2003 - The climate of the last millennium. In: Pederson T.F. (ed.), *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Springer Verlag, Berlin: 163-167.

<sup>1</sup> I dati relativi alle lamine di crescita delle stalagmiti della Grotta di Ernesto sono accessibili dal sito del World Data Center for Paleoclimatology (<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/speleothem.html>).

- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G. & Vaganov E.A., 2001 - Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *J. Geophys. Research*, A106: 2929-2941.
- Esper J., Cook E.R. & Schweingruber F.H., 2002 - Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295: 2250-2253.
- Frisia S., Borsato A., Preto N. & McDermott F., 2003 - Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 216: 411-424.
- Frisia S., Borsato A., Spötl C., Miorandi R., Villa I. & Cucchi F., 2005 - Climate variability in the South-Eastern Alps of Italy over the last 17.000 years reconstructed from stalagmite records. *Boreas*, 34: 445-455.
- IPCC, 2001 - *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press.
- Jones P.D. & Mann M.E., 2004 - Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42: doi: 10.1029/2003RG000143.
- Holzhauser H., 1997 - Fluctuations of the Grosser Aletsch Glacier and the Gorner Glacier during the last 3200 years: new results. In: Frenzel B. (ed.), *Glacier fluctuations during the Holocene*. Fischer, Stuttgart: 35-58.
- Le Roy Ladurie E., 2004 - *Historie humaine et comparée du climat (XIIIème-XVIIIème siècles)*. Editions Fayard, France: 740 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.
- Mangini A., Spötl C. & Verdes P., 2005 - Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 years from a  $\delta^{18}\text{O}$  stalagmite record. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 235: 741-751.
- Mann M.E., Bradley R.S. & Hughes M.K., 1998 - Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392: 779-787.
- McMillan E.A., Fairchild I.J., Frisia S., Borsato A. & McDermott F., 2005 - Annual trace element cycles in calcite-aragonite speleothems: Evidence of drought in the western Mediterranean 1200-1100 years BP. *J. Quaternary Sci.*, 20: 423-433.
- Menzel A. & Fabian P., 1999 - Growing season extended in Europe. *Nature*, 397: 659-661.
- Pasquale V., Verdojya M., Chiozzi P. & Safanda J., 2000 - Evidence of climate warming from underground temperatures in NW Italy. *Global Planetary Change*, 25: 215-225.
- Pfister C., 1992 - Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. In: Bradley R.S. & Jones P.D. (eds), *A methodology for quantifying man-made evidence on weather and climate*. Rutledge, London and New York, 118-142.
- Smith C.L., Baker A., Fairchild I.J. & Frisia S., 2006 - Reconstructing Regional Climates from Multiple Stalagmite Records. *Int. Journal of Climatology*, 26: 1417-1424.
- Tett S.F.B., Johns T.C. & Mitchell J.F.B., 1997 - Global and regional variability in a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 13: 303-323.
- Urbinati C., Carrer M., Pastorello C. & Vidi A., 2004 - Accrescimento radiale e sensibilità climatica di pino silvestre e larice in ambienti di limite in Val di Tovel (TN). In: Borghi B., Borsato A., Cantonati M., Corradini F. & Flaim G. (a cura di), *Studio sul mancato arrossamento del Lago di Tovel*. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Biol.*, 81, Suppl. 2: 53-71.
- Von Storch H., Zorita E., Jones J., Dimitriev Y., Gonzalez-Rouco F. & Tett S.F.B., 2004 - Reconstructing past climate from noisy data. *Science*, 306: 679-682.
- Xoplaki E., Luterbacher J., Paeth H., Dietrich D., Steiner N., Grosjean M. & Wanner H., 2005 - European spring and autumn temperature variability and changes of extremes in the last half millennium. *Geophys. Res. Lett.* 32, doi: 10.1029/2005GLO23424.

