

Analisi di serie storiche di temperatura e precipitazione in località prossime agli speleotemi

Dario CAMUFFO* & Emanuela PAGAN

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Corso Stati Uniti 4, I-35127 Padova

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: d.camuffo@isac.cnr.it

RIASSUNTO - *Analisi di serie storiche di temperatura e precipitazione in località prossime agli speleotemi* - Sono state analizzate le serie climatiche di temperatura (T) e precipitazione (P) delle stazioni di Trieste (T: 1921-2002; P: 1841-1996), Livorno (T: 1865-1995; P: 1857-1985), Pesaro (T: 1876-1991; P: 1866-1996) e Palermo (T: 1895-1992; P: 1797-1999) allo scopo di fornire delle informazioni utili per lo studio della crescita degli speleotemi. Le stazioni analizzate sono quelle tra le più vicine alle grotte oggetto di studio che forniscono serie strumentali centenarie e affidabili. Per ogni serie si sono prima colmate le eventuali lacune. Le serie sono state poi confrontate tra loro per mettere in evidenza eventuali discontinuità. Per ogni serie sono stati calcolati climogrammi, curve cumulate e interpolazioni lineari o di grado superiore quando ritenuto necessario. Per evidenziare o confermare gli eventuali andamenti trovati con le interpolazioni, su ogni serie è stato eseguito il test di Mann-Kendall. Non emerge un chiaro segnale di recente riscaldamento globale, tranne che per Palermo che presenta un trend doppio di quello globale. I climogrammi dell'escursione termica in funzione della temperatura media hanno mostrato che, mentre i valori medi mensili sono rimasti sostanzialmente invariati, nelle stazioni di Palermo e di Livorno le escursioni termiche sono diminuite nei tempi recenti (dopo il 1960), mentre Pesaro presenta una situazione invariata. Le serie di precipitazioni di Trieste e Palermo presentano andamenti stazionari, quella di Pesaro presenta un trend crescente, mentre nella serie di Livorno il trend è decrescente nel periodo recente (dal 1956). Per ogni stazione è stata infine calcolata l'evapotraspirazione. Il bilancio idrico ha mostrato una chiara dipendenza con la latitudine: positivo per tutto l'anno solo a Trieste, positivo solo nella stagione fredda a Livorno e Pesaro, negativo per tutto l'anno a Palermo. Trieste e Livorno presentano un bilancio idrico stazionario; Pesaro un trend crescente negli anni 1884-1944; Palermo ha un trend decrescente a partire dal 1950, probabilmente attribuibile al cambio del pluviometro.

SUMMARY - *Analysis of long temperature and precipitation series in stations near the speleothems* - Some lengthy meteorological series of air temperature (T) and precipitation (P) have been studied to interpret the growth of speleothems. The stations were: Trieste (T: 1921-2002; P: 1841-1996), Livorno (T: 1865-1995; P: 1857-1985), Pesaro (T: 1876-1991; P: 1866-1996) e Palermo (T: 1895-1992; P: 1797-1999). The series were chosen for their length and reliability and for having the station near the caves. The first step has been to fill gaps in the series; the second to pinpoint discontinuities after the cross comparison and cumulative analysis. An analysis was made concerning trends (with the Mann-Kendall test) and climograms. No evidence for global warming, except for Palermo that has a rate twice the global warming. The diagrams of thermal excursion vs monthly temperature pointed out that the average temperature remained unchanged everywhere, whereas the thermal excursion was reduced in Palermo and Pesaro. The precipitation in Trieste and Palermo is stationary; increasing in Pesaro and decreasing after 1956 in Livorno. The evapotranspiration has been computed for all the stations. The hydrologic balance has shown a clear dependence on latitude: in Trieste positive throughout the whole year; in Livorno and Pesaro positive only in the cold season; Palermo shows a water deficit. The hydrologic balance is stationary in Trieste and Livorno, increasing between 1884-1944 in Pesaro, decreasing since 1950 in Palermo but probably due to the change of rain gauge.

Parole chiave: serie climatiche, temperatura, precipitazione, evapotraspirazione, bilancio idrico

Key words: climatic series, temperature, precipitation, evapotranspiration, hydrologic balance

1. INTRODUZIONE

Sono state analizzate le serie climatiche di alcune località di interesse per lo studio degli speleotemi

per poter fornire, dai dati meteorologici esistenti su scala secolare, informazioni concernenti le condizioni climatiche delle zone studiate. Si è concentrato lo studio sul calcolo dell'evapotraspirazione e del bilancio

Tab. 1 - Stazioni di cui si sono utilizzati i dati di precipitazione e di temperatura per i periodi indicati nelle colonne. I dati di precipitazione sono costituiti da totali mensili mentre quelli di temperatura da medie giornaliere (mg) e valori medi minimi e massimi mensili (mMm).

Tab. 1 - Stations utilized for the precipitation and temperature data. Covered periods are reported. Precipitation is constituted by monthly totals. Temperature by daily averages (mg) and average monthly minima and maxima (mMm).

Stazioni	Precipitazione	Temperature
Trieste	1841-1996	1921-2002 mg
Livorno	1857-1985	1865-1995 mMm
Pesaro	1866-1996	1876-1991 mMm
Palermo	1797-1999	1895-1992 mMm

idrico che sono direttamente connessi alla formazione degli speleotemi.

Le serie climatiche in esame sono quelle relative alle stazioni di Trieste, Livorno, Pesaro e Palermo in quanto le più vicine alle grotte esaminate, tra le lunghe serie esistenti. Le caratteristiche dei dati analizzati sono riportate in tabella 1.

1.1. Lacune

Non tutte le serie sono complete: in alcune stazioni mancano alcuni valori mensili di temperatura e precipitazione.

Si è cercato per quanto possibile di colmare le lacune sulla base di dati da stazioni vicine. Quando questo non è stato possibile per la mancanza, la scarsa affidabilità o la bassa rappresentatività dei dati, si è sostituito mese per mese il dato mancante con il valore medio del mese corrispondente calcolato su tutta la serie per non alterare la sua media. La maggiore delle lacune non colmabili è stata la temperatura di Livorno in sei anni del periodo bellico e post bellico (1944-1950).

Per le precipitazioni di Palermo si hanno a disposizione due serie: Osservatorio Astronomico dell'Università (1797-1999) e Osservatorio Valverde (1880-1992). La serie di Valverde è in linea di principio migliore, almeno per la parte più antica, in quanto voluta e curata da D. Ragona e P. Tacchini al sorgere della rete meteorologica nazionale e l'istituzione dell'Ufficio Presagi, ma è più corta e presenta una forte discontinuità nel 1940. Per questa ragione si è utilizzata la serie dell'Osservatorio Astronomico G.S. Vaiana (Micela *et al.* 2001). Dalla storia della serie è noto che il pluviometro è stato cambiato nel 1851 ed è rimasto lo stesso fino al 1951.

Viene riportato nelle tabelle 2, 3 e 4 l'elenco delle lacune per le stazioni studiate (Trieste è completa).

Tab. 2 - Lacune nei dati di temperatura e precipitazione per la stazione di Livorno.

Tab. 2 - Gaps in temperature and precipitation series, Livorno.

Temperatura	Precipitazioni
gennaio 1865-marzo 1865	valori mensili:
gennaio e aprile 1866	anno 1907
luglio settembre ottobre dicembre 1869	anno 1915
gennaio-luglio 1870	anno 1927
agosto 1885	anno 1944
novembre 1886	anno 1950
agosto-dicembre 1943	anno 1963
anni dal 1944 al 1950	settembre 1976
dicembre 1986	
gennaio 1987	
febbraio-dicembre 1993	

Tab. 3 - Lacune nei dati di temperatura e precipitazione per la stazione di Pesaro.

Tab. 3 - Gaps in temperature and precipitation series, Pesaro.

Temperatura	Precipitazioni
maggio 1919 (minima)	dicembre 1869
gennaio-aprile 1929 (minima)	anno 1870
settembre-novembre 1943	anno 1944
anno 1944	anni 1983-1986
maggio 1970	luglio 1987
anni 1981-1986	giugno-luglio 1988
luglio 1987	gennaio, aprile,
luglio 1988	settembre 1989

Tab. 4 - Lacune nei dati di temperatura e precipitazione per la stazione di Palermo.

Tab. 4 - Gaps in temperature and precipitation series, Palermo.

Temperatura	Precipitazioni
febbraio, marzo 1895	anni 1813-1821
febbraio, aprile, agosto 1896	maggio-dicembre 1822
maggio, ottobre 1898	gennaio, febbraio 1823
gennaio 1899	febbraio-dicembre 1839
febbraio, luglio 1907	anno 1840
maggio 1908	anno 1845
agosto 1909	
febbraio 1910	
febbraio, luglio, settembre 1913	
luglio, agosto 1914	
luglio 1916	
agosto 1917	
gennaio 1920	

1.2. Evapotraspirazione

Con il termine evapotraspirazione si intende l'acqua che complessivamente si trasferisce dal bacino idrografico all'atmosfera sia per evaporazione dagli specchi liquidi e dal terreno, sia per traspirazione delle piante. A parità di condizioni, al crescere della disponibilità dell'acqua nel suolo crescerà il valore dell'evapotraspirazione, ma questo non indefinitamente. Ci sarà un valore limite di evapotraspirazione che non sarà superato neanche per maggiori disponibilità d'acqua. Tale valore limite prende il nome di evapotraspirazione potenziale.

L'evapotraspirazione reale è in genere minore di quella potenziale.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale si possono usare vari metodi a seconda dei dati disponibili e dell'accuratezza che si vuole ottenere. Per il calcolo dell'evapotraspirazione si è utilizzata la formula di Thornthwaite (Chow 1964; Ward, 1967; Chow *et al.* 1988).

Questa consente la stima dell'evapotraspirazione potenziale di riferimento (indicata di seguito con U), espressa in cm, su base mensile con l'utilizzo della sola informazione delle temperature medie mensili. La formula di Thornthwaite è data da $U = 1.6 (10 t/TE)^a$, dove t è la temperatura media mensile in °C; TE è l'indice di Thornthwaite dato dalla somma dei dodici valori mensili dell'indice di calore i dato da $i = (t/5)^{1.514}$ (t rappresenta la temperatura media mensile in °C); i è poi corretto a seconda della latitudine a cui si trova la stazione. Infatti, variando il numero di giorni in un mese ed essendo differente il numero di ore tra l'inizio dell'evapotraspirazione nella mattinata e il suo termine alla sera a seconda della stagione e della latitudine, diventa necessario introdurre un fattore che varia con il mese e la latitudine. Il coefficiente a è dato da:

$$a = 0.000000675 \cdot (TE)^3 - 0.0000771 \cdot (TE)^2 + 0.01792 \cdot TE + 0.49239$$

1.3. Bilancio idrico

Il bilancio idrico riportato è dato dalla differenza tra la precipitazione e l'evapotraspirazione.

Indica quindi la somma della quantità d'acqua che scorre sul suolo (*runoff*), della quantità che penetra nel suolo per infiltrazione e di quella che viene trattenuata nel suolo.

Per ogni stazione è stato calcolato il bilancio idrico annuale e stagionale.

2. ANALISI EFFETTUATA SULLE SERIE CLIMATICHE

2.1. Curve cumulate

Per confrontare le diverse stazioni meteorologiche ed evidenziare qualche loro disomogeneità, si sono calcolati i valori cumulati per ogni stazione e si sono confrontati i risultati ottenuti tra due stazioni diverse, variando gli accoppiamenti tra stazioni. Se i dati così ottenuti si dispongono su una retta, le due stazioni in esame mantengono sempre lo stesso carattere, o nel caso contrario, subiscono variazioni nella stessa proporzione. Nel caso in cui si dispongano su rette spezzate, significa che una ha cambiato carattere. Confrontando le due serie sospette con altre, si riconosce immediatamente quale contiene il comportamento anomalo.

Per ogni stazione si è utilizzato il metodo della curva cumulata applicata alle serie storiche delle temperature medie annuali e dei totali annuali di precipitazione. L'operazione di cumulazione riassume e minimizza il disturbo delle fluttuazioni. Se la retta di regressione si sovrappone perfettamente alla cumulata, la serie va considerata omogenea sia in termini di modalità osservative sia in termini climatici.

Le serie analizzate non hanno evidenziato discontinuità (Figg. 1, 2).

2.2. Interpolazioni

Si sono eseguite delle interpolazioni sulle serie climatiche di temperatura e precipitazioni e quelle ricavate di evapotraspirazione e del bilancio idrico per evidenziare l'eventuale presenza di un trend.

L'interpolazione lineare è un riferimento del primo ordine che rappresenta il trend medio della serie.

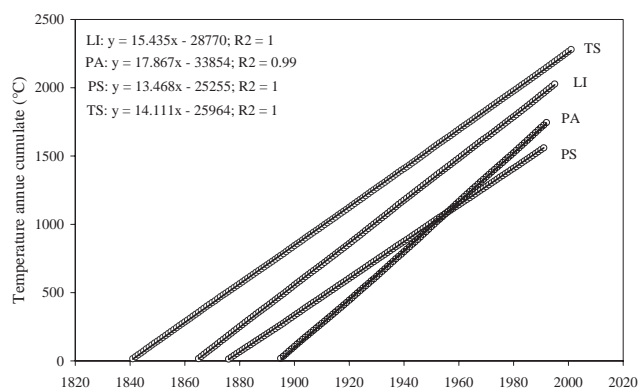


Fig. 1 - Curve cumulate applicate alle serie storiche delle temperature medie annuali per ogni stazione: Trieste (TS), Livorno (LI), Pesaro (PS), Palermo (PA).

Fig. 1 - Cumulative values of yearly temperature for the stations: Trieste (TS), Livorno (LI), Pesaro (PS), Palermo (PA).

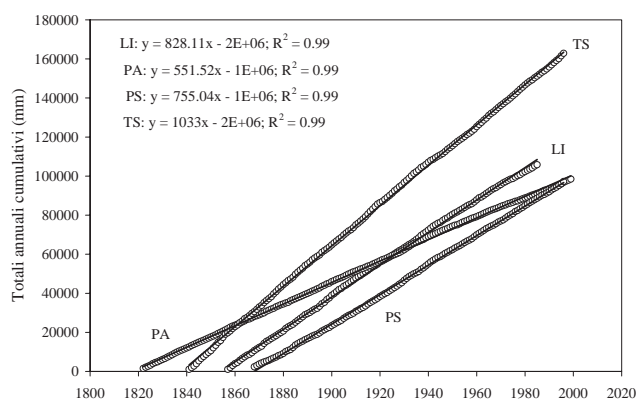


Fig. 2 - Curve cumulate applicate alle serie storiche dei totali annuali di precipitazione per ogni stazione: Trieste (TS), Livorno (LI), Pesaro (PS), Palermo (PA).

Fig. 2 - Cumulative values of yearly precipitation totals for the stations: Trieste (TS), Livorno (LI), Pesaro (PS), Palermo (PA).

L'interpolazione polinomiale dei gradi successivi si adatta progressivamente alle oscillazioni e il grado della polinomiale più confacente dipende dal numero di oscillazioni che caratterizzano la serie. Ha però il difetto che il grado può cambiare il segno della pendenza agli estremi della serie. Quando le fluttuazioni hanno dei periodi di ritorno di durata variabile, l'ordine della polinomiale diviene non ben definito e aumentando nel grado si ottengono curve interpolanti che seguono sempre più da vicino oscillazioni e fluttuazioni, senza necessariamente dare un'idea migliore del reale andamento della curva che resta non chiaramente definibile.

Nel caso di bassa dispersione di fluttuazioni a breve periodo rispetto all'andamento a medio-lungo termine della serie, il coefficiente di correlazione R^2 può indicare chiaramente quale grado di polinomiale meglio s'addice alla rappresentazione. Nel caso di un'ampia dispersione, R^2 viene sostanzialmente determinato dalle fluttuazioni e diviene poco indicativo della rappresentatività dell'andamento generale che va stabilito con altri test. Nelle figure viene riportato per completezza.

In tal caso la scelta dell'ordine della polinomiale diventa soggettivo ed è preferibile evitare di introdurre equazioni di grado superiore. In assenza di test specifici, l'occhio rimane il solo giudice per stabilire quanto una curva interpolante rappresenti soddisfacentemente la serie in oggetto.

L'equazione interpolante tende ad adattarsi alla parte interna della curva e a rappresentare più o meno precisamente i due estremi. Ne segue che, estrapolando l'andamento nella fase terminale della curva, si ottiene una previsione che dipende non solo dal set dei dati a disposizione, ma anche dal grado imposto alla polinomiale.

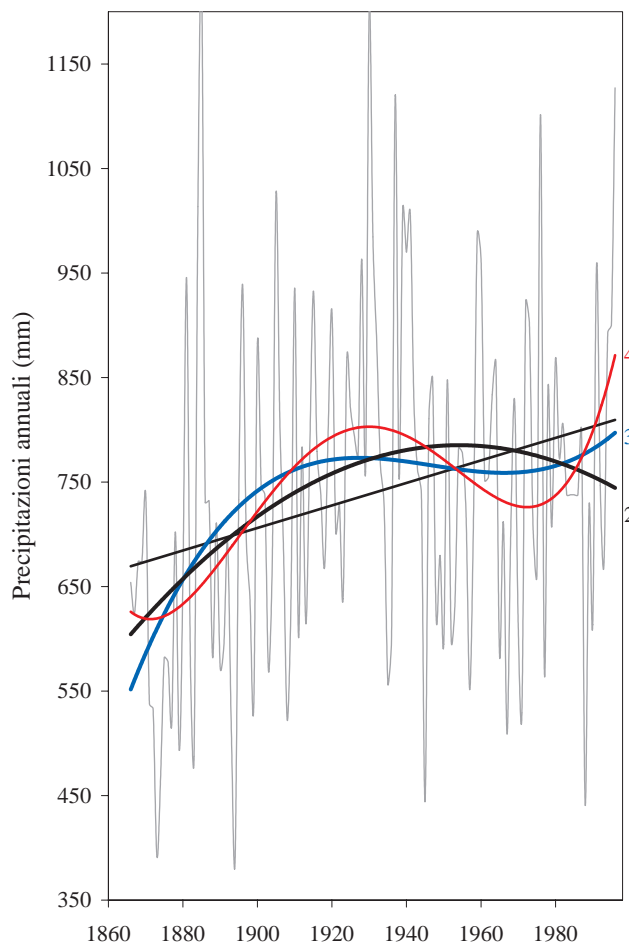


Fig. 3 - Esempio dell'applicazione di diverse interpolazioni polinomiali sulla serie dei totali annuali di precipitazione di Pesaro. Il trend lineare è leggermente crescente. Per quanto riguarda il periodo attuale, il secondo grado (2) indica un trend decrescente, il terzo grado leggermente crescente (3), il quarto grado fortemente crescente (4).

Fig. 3 - An example of polynomial interpolation applied to the yearly precipitation in Pesaro. The linear trend is positive. As far as the recent period is concerned the second order (2) shows a negative trend; the third slightly increasing (3); the fourth rapidly increasing (4).

Nell'esempio di Pesaro - precipitazioni annuali, il trend lineare è leggermente crescente, il secondo grado indica un trend recente decrescente, il terzo grado leggermente crescente, il quarto grado fortemente crescente (Fig. 3).

Nell'impossibilità di stabilire un criterio oggettivo e generale, si è mantenuto il tradizionale riferimento dell'interpolazione lineare che però va confermata da un test di rappresentatività.

2.3. Test di Mann-Kendall

L'interpolazione di primo grado è caratterizzata da un coefficiente angolare che ne definisce la crescita o

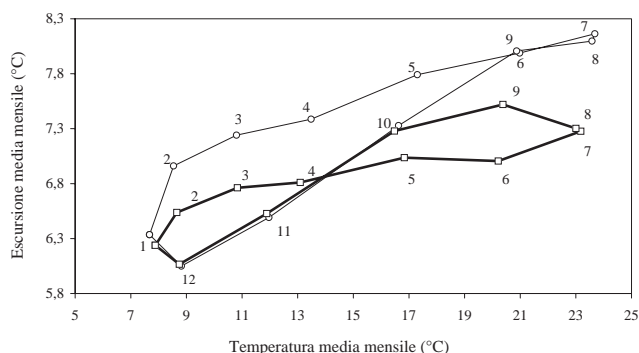


Fig. 4 - Climogrammi per il confronto tra l'escursione termica media mensile e il valor medio mensile della temperatura calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Livorno.

Fig. 4 - Diagrams of the monthly average thermal excursion vs the monthly average temperature computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Livorno.

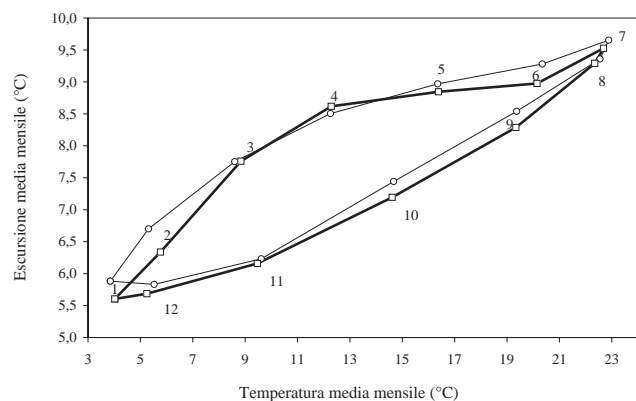


Fig. 5 - Climogrammi per il confronto tra l'escursione termica media mensile e il valor medio mensile della temperatura calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Pesaro.

Fig. 5 - Diagrams of the monthly average thermal excursion vs the monthly average temperature computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Pesaro.

la decrescita, talvolta ambigua in quanto condizionata da una qualche fluttuazione. A volte la serie può anche cambiare carattere di crescita o decrescenza al proprio interno. Allo scopo si è applicato il test di Mann-Kendall (MK) (Sneyers 1990, 1992) che definisce: i) quando un trend è significativo; ii) il suo segno; iii) dove orientativamente questo segno inizia, se all'inizio o dove all'interno della serie.

Quando il test MK è risultato positivo si sono eseguite delle interpolazioni lineari sulla serie esaminata negli intervalli evidenziati.

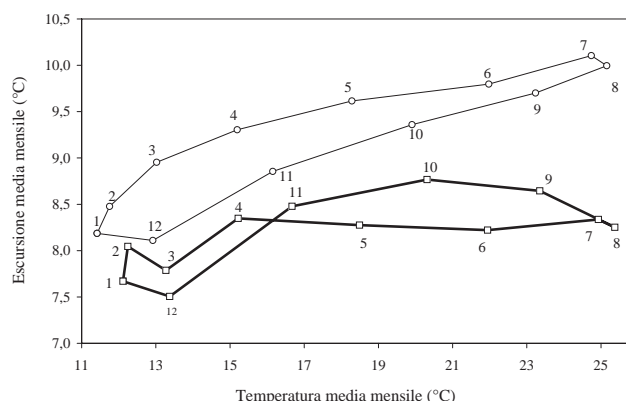


Fig. 6 - Climogrammi per il confronto tra l'escursione termica media mensile e il valor medio mensile della temperatura calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Palermo.

Fig. 6 - Diagrams of the monthly average thermal excursion vs the monthly average temperature computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Palermo.

2.4. Climogrammi

Per evidenziare il possibile impatto dei cambiamenti climatici in atto, sullo stesso diagramma e per ogni stazione sono stati riportati due climogrammi: uno calcolato su tutta la lunghezza delle serie e uno per il periodo recente (dal 1960 in poi). Per l'interpretazione di tale confronto si è calcolata anche la varianza delle variabili sia su tutta la serie sia negli ultimi anni (dal 1960).

Il primo tipo di climogrammi considerato concerne la temperatura, con il confronto tra l'escursione termica media mensile e il valore medio mensile. Per tutte le stazioni esaminate si è riscontrata una diminuzione nell'escursione termica, più marcata a Palermo e Pesaro, mentre i valori medi di temperatura mensile sono rimasti invariati. Per Trieste non è stato possibile eseguire il climogramma in quanto si aveva a disposizione solo la serie delle temperature medie e non quelle dei massimi e minimi da cui calcolare l'escursione (Figg. 4, 5, 6).

Per evidenziare la relazione tra temperatura e precipitazioni si sono costruiti i climogrammi relativi, come sopra. Si è così messo in luce che per le stazioni di Pesaro e Livorno le precipitazioni dei mesi di ottobre, novembre e dicembre sono diminuite; a Trieste le precipitazioni sono chiaramente diminuite nel mese di ottobre; a Palermo la situazione è risultata invariata (Figg. 7, 8, 9, 10).

L'analisi della varianza calcolata su tutta la serie e nel periodo recente (dopo il 1960) non giustifica l'opinione popolare che ora sia aumentata la frequenza degli eventi estremi. Ciò è asserito

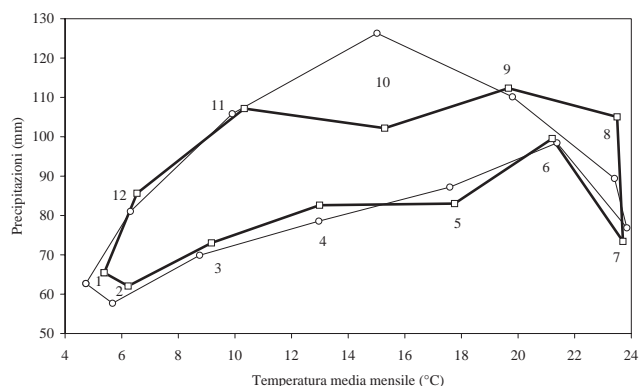


Fig. 7 - Climogrammi per il confronto tra temperatura e precipitazioni calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Trieste.

Fig. 7 - Diagrams of the monthly average temperature vs precipitation computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Trieste.

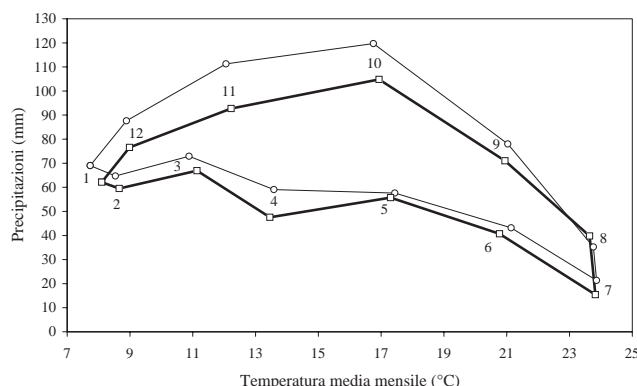


Fig. 8 - Climogrammi per il confronto tra temperatura e precipitazioni calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Livorno.

Fig. 8 - Diagrams of the monthly average temperature vs precipitation computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Livorno.

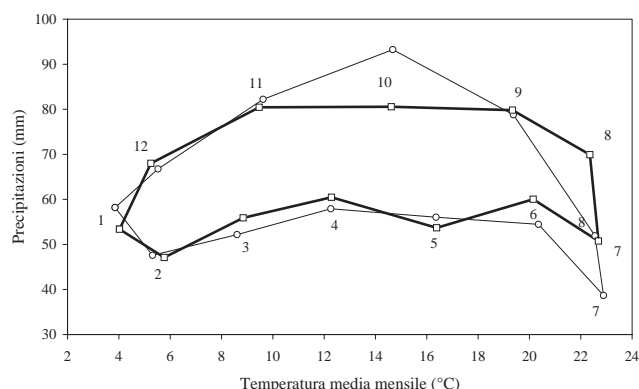


Fig. 9 - Climogrammi per il confronto tra temperatura e precipitazioni calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Pesaro.

Fig. 9 - Diagrams of the monthly average temperature vs precipitation computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Pesaro.

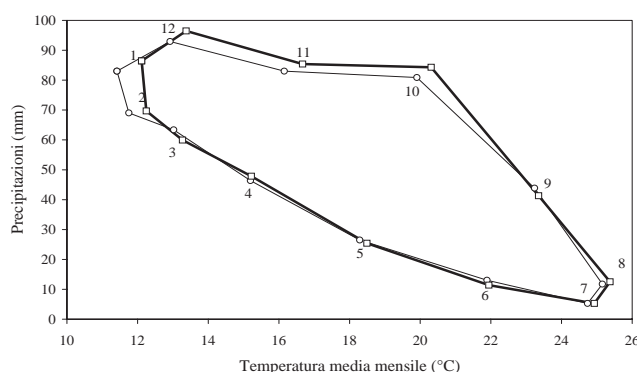


Fig. 10 - Climogrammi per il confronto tra temperatura e precipitazioni calcolati su tutta la lunghezza delle serie (linea sottile) e sul periodo recente (dal 1960 in poi, linea spessa) per la stazione di Palermo.

Fig. 10 - Diagrams of the monthly average temperature vs precipitation computed for the total length of the series (thin line) and the recent period (1960-onwards, thick line). Station: Palermo.

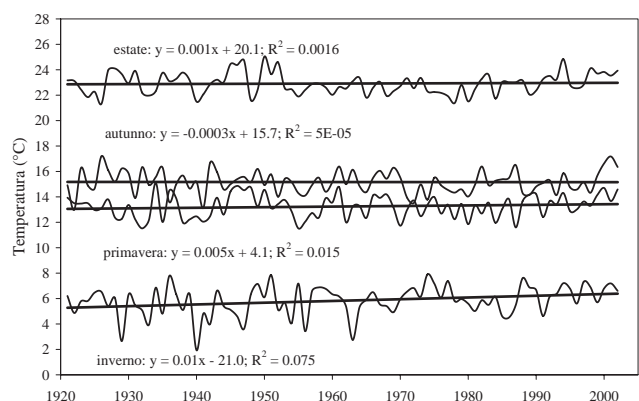


Fig. 11 - Stazione di Trieste. Valori stagionali della temperatura.

Fig. 11 - Station: Trieste. Seasonal temperature.

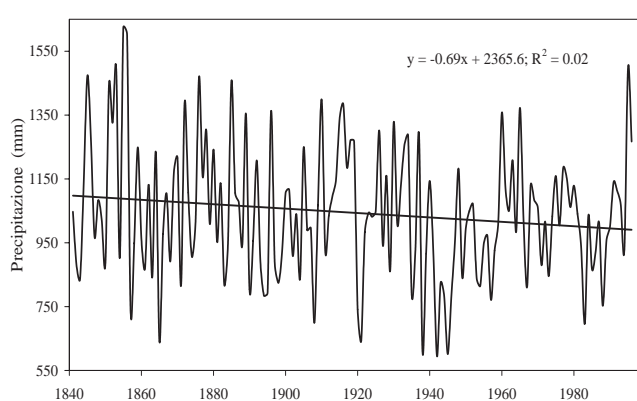


Fig. 12 - Stazione di Trieste. Totali annuali della precipitazione.

Fig. 12 - Station: Trieste. Yearly totals of precipitation.

peraltro anche in letteratura (IPCC 2002); l'opinione corrente è determinata dal fatto che sono

aumentati la vulnerabilità del territorio e l'impatto sull'uomo.

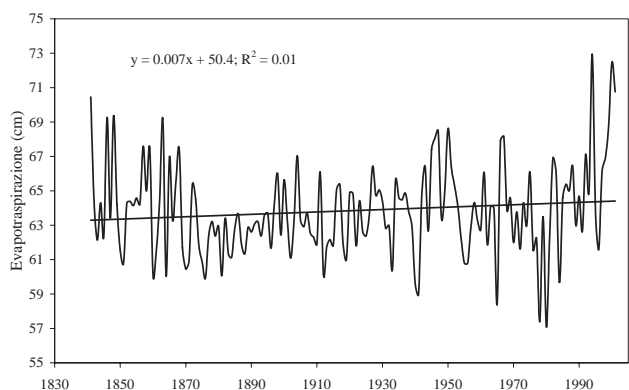


Fig. 13 - Stazione di Trieste. Valori annuali dell'evapotraspirazione.

Fig. 13 - Station: Trieste. Yearly evapotranspiration.

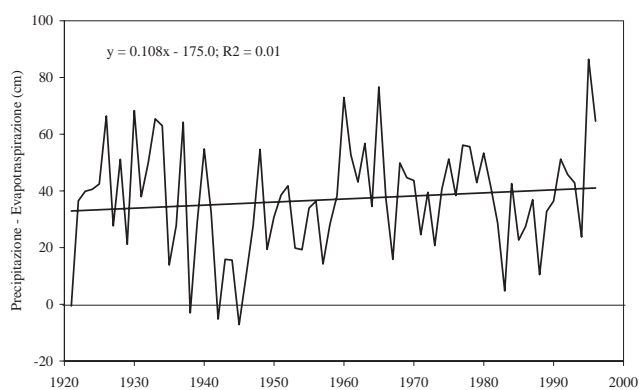


Fig. 14 - Stazione di Trieste. Bilancio idrico annuale.

Fig. 14 - Station: Trieste. Yearly hydrological balance.

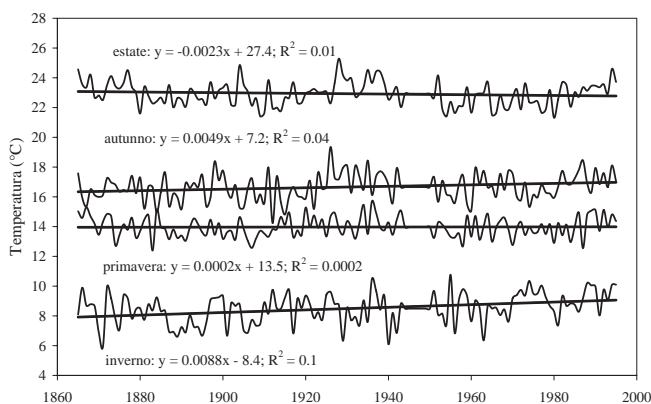


Fig. 15 - Stazione di Livorno. Valori stagionali della temperatura.

Fig. 15 - Station: Livorno. Seasonal temperature.

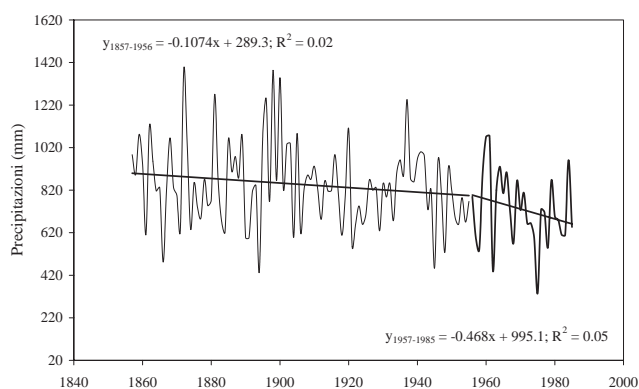


Fig. 16 - Stazione di Livorno. Totali annuali della precipitazione.

Fig. 16 - Station: Livorno. Yearly totals of precipitation.

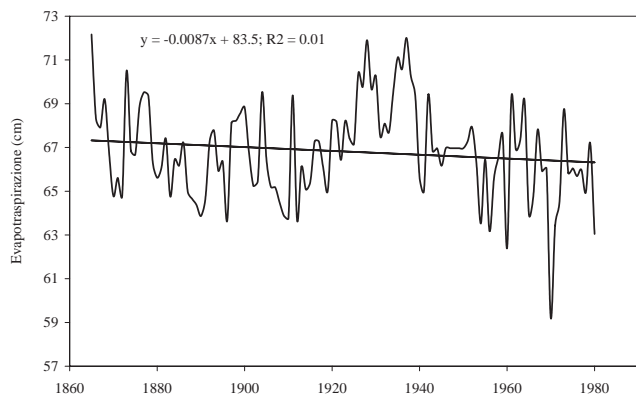


Fig. 17 - Stazione di Livorno. Valori annuali dell'evapotraspirazione.

Fig. 17 - Station: Livorno. Yearly evapotranspiration.

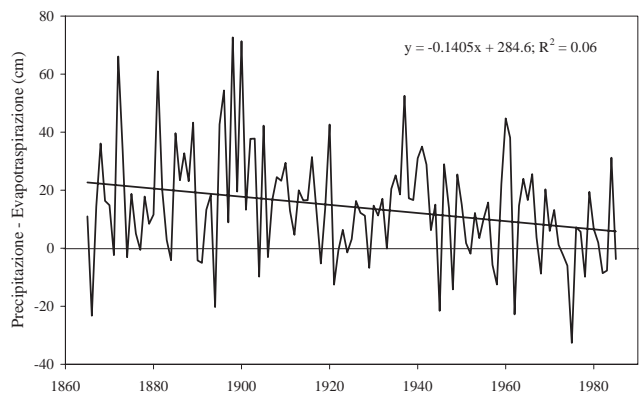


Fig. 18 - Stazione di Livorno. Bilancio idrico annuale.

Fig. 18 - Station: Livorno. Yearly hydrological balance.

3. RISULTATI

3.1. Stazione di Trieste

Le medie di temperatura stagionale risultano essere: in inverno 5,8 °C, in primavera 13,2 °C, in estate 22,9 °C, in autunno 15,2°C (Fig. 11). Nei dati di temperatura si evidenzia un andamento costante confermato sia dalle interpolazioni applicate che dal test MK. Anche per i dati di precipitazione sono state calcolate le medie stagionali. Negli anni presi in esame risulta in inverno una media di precipitazione pari a 67,1 mm/mese, in primavera 78,5 mm/mese, in estate 88,2 mm/mese e in autunno 114,1 mm/mese (Fig. 12). Il test non ha evidenziato andamenti neanche per la serie delle precipitazioni.

È stata calcolata l'evapotraspirazione annuale e stagionale. Per il calcolo si è tenuto conto che Trieste si trova tra il 45° e 46° parallelo. L'evapotraspirazione media stagionale risulta essere di 4,3 cm/mese in primavera ed in estate, 5,2 cm/mese in autunno e 0,9 cm/mese in inverno (Fig. 13).

Si è calcolato quindi il bilancio idrico dato dalla differenza tra precipitazione ed evapotraspirazione.

In inverno il bilancio è positivo: le precipitazioni superano di molto (da 1,3-12,3 cm/mese) la quantità d'acqua persa per evapotraspirazione.

Il bilancio idrico (precipitazione-evapotraspirazione) risulta nettamente positivo in tutte le altre stagioni. I valori medi sono di 5,7 cm/mese in inverno, 3,4 cm/mese in primavera, 4,2 cm/mese in estate e 5,1 cm/mese in autunno (Fig. 14).

I test non hanno evidenziato trend di rilievo neanche per le serie ricavate di evapotraspirazione e bilancio idrico.

I dati evidenziano che per Trieste il contributo dell'evapotraspirazione è circa metà rispetto a quello delle precipitazioni, quindi si può dedurre che per tutto l'anno l'apporto di acqua al suolo sia considerevole, soprattutto in inverno e in autunno.

3.2. Stazione di Livorno

Le medie stagionali calcolate dai dati relativi alla stazione di Livorno risultano essere: inverno 8,5 °C, primavera 14,0 °C, estate 22,9 °C e autunno 16,6 °C. I dati evidenziano un andamento stazionario, risultato confermato anche dal test MK (Fig. 15).

Le medie stagionali delle precipitazioni sono: inverno 73,8 mm/mese, primavera 63,2 mm/mese, estate 33,2 mm/mese e autunno 103,0 mm/mese.

Nella serie dei totali annuali di precipitazione il test MK ha evidenziato un trend decrescente a partire dall'anno 1956 (Fig. 16). Gli andamenti decrescenti sono evidenziati anche dalle regressioni lineari applicate sui dati stagionali.

È stata calcolata l'evapotraspirazione annuale e

stagionale, correggendo i coefficienti della formula di Thornthwaite, considerando che Livorno si trova tra il 43°-44° parallelo. Dai dati si nota un andamento stazionario su tutto il periodo, come confermato dal test MK (Fig. 17). I valori medi stagionali risultano essere 5 cm/mese in inverno, 13 cm/mese in primavera, 31 cm/mese in estate e 17 cm/mese in autunno.

Il bilancio idrico risulta positivo in inverno (2,7cm/mese), mentre nelle altre stagioni risulta essere negativo, soprattutto in estate dove il valor medio è di -27,7 cm/mese. I dati relativi al bilancio idrico evidenziano in tutte le stagioni un andamento leggermente decrescente applicando le interpolazioni, mentre il test MK applicato sulla serie del bilancio idrico nel tempo non evidenzia trend (Fig. 18).

3.3. Stazione di Pesaro

Le medie stagionali risultano essere: in inverno 4,9 °C, in primavera 12,4 °C, in estate 21,9 °C e in autunno 14,5 °C (Fig. 19). I dati evidenziano un andamento stazionario confermato dal test MK.

Le medie stagionali delle precipitazioni sono: inverno 57,5 mm/mese, primavera 55,4 mm, estate 48,3 mm/mese e autunno 84,7 mm/mese. Il test MK applicato sui dati dei totali annui di precipitazione evidenzia un trend crescente (Fig. 20).

Si è calcolata l'evapotraspirazione annuale e stagionale, correggendo i coefficienti della formula di Thornthwaite, considerando che Pesaro si trova tra il 43°- 44° parallelo. I valori medi stagionali risultano essere: in inverno 2,7 cm/mese, in primavera 12,2 cm/mese, in estate 29,8 cm/mese e in autunno 15,9 cm/mese. I dati mostrano l'assenza di trend, confermata dal test MK (Fig. 21).

Il bilancio idrico risulta positivo solo in inverno (3,1 cm/mese), mentre nelle altre stagioni risulta sempre negativo (-6,5 cm/mese in primavera, -25,0 cm/mese in estate e 7,3 cm/mese in autunno).

Il test MK applicato ai dati del bilancio idrico annuale rivela un trend crescente negli anni 1884-1944 (Fig. 22).

3.4. Stazione di Palermo, Osservatorio Astronomico G.S. Vaiana

Le medie stagionali risultano essere: inverno 12,0 °C, primavera 15,5 °C, estate 23,9 °C e autunno 19,8 °C (Fig. 23). I dati evidenziano un trend crescente confermato anche dal MK.

Le medie stagionali delle precipitazioni sono: inverno 63,5 mm/mese, primavera 23,7 mm/mese, estate 4,0 mm/mese e autunno 82,5 mm/mese. Il MK non evidenzia l'esistenza di trend (Fig. 24).

Si è calcolata l'evapotraspirazione annuale e stagionale, correggendo i coefficienti nella formula, considerando che Palermo si trova tra il 38°-39° parallelo.

L'evapotraspirazione risulta essere in inverno di 7,9 cm/mese, in primavera 14,7 cm/mese, in estate 37,4 cm/mese e in autunno di 22,0 cm/mese. L'interpolazione lineare dà un trend leggermente crescente, che però non è confermato dal test di MK (Fig. 25).

In tutte le stagioni il bilancio idrico risulta essere sempre negativo (da -1,5 cm/mese in inverno a -37 cm/mese in estate), con conseguente scarsità di acqua che penetri nel sottosuolo.

Per questi dati il test MK ha evidenziato un trend decrescente a partire dal 1950 (Fig. 26), che potrebbe esser più facilmente attribuito al cambio del pluviometro (avvenuto nel 1951 quando il pluviometro costruito nel 1851 da R. Caruso (vedi Chinnici *et al.* 2000) fu sostituito dal pluviografo basculante SIAP in uso al Genio Civile) che a un cambiamento climatico.

4. CONCLUSIONI

Le stazioni analizzate sono quelle tra le più vicine alle grotte oggetto di studio che forniscono serie stru-

mentali centenarie e affidabili: le stazioni di Trieste e Palermo sono molto vicine alle grotte, meno quelle di Livorno e Pesaro. Di questo si dovrà tener presente quando i risultati verranno applicati per l'interpretazione della crescita degli speleotemi.

L'analisi delle serie di temperatura non hanno prodotto un chiaro segnale di recente riscaldamento globale, tranne che per Palermo. Trieste, Livorno e Pesaro hanno presentato un trend dell'ordine di 0,002 °C/anno o inferiore, non confermato però dal test di Mann-Kendall. Nel caso di Palermo, invece, il riscaldamento pari a 0,012 °C/anno è doppio rispetto a quello globale di 0,6°C/secolo (IPCC 2001).

I climogrammi dell'escursione termica in funzione della temperatura media sono stati ottenuti con i dati di tutta la serie e con i dati degli anni successivi al 1960, per evidenziare eventuali variazioni negli anni più recenti. È risultato che, mentre i valori medi mensili sono rimasti sostanzialmente invariati, nelle stazioni di Palermo e di Livorno sono diminuite le escursioni termiche, mentre Pesaro presenta una situazione invariata nel tempo.

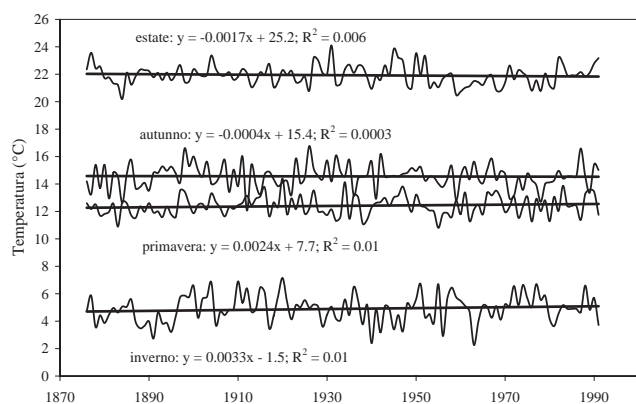


Fig. 19 - Stazione di Pesaro. Valori stagionali della temperatura.

Fig. 19 - Station: Pesaro. Seasonal temperature.

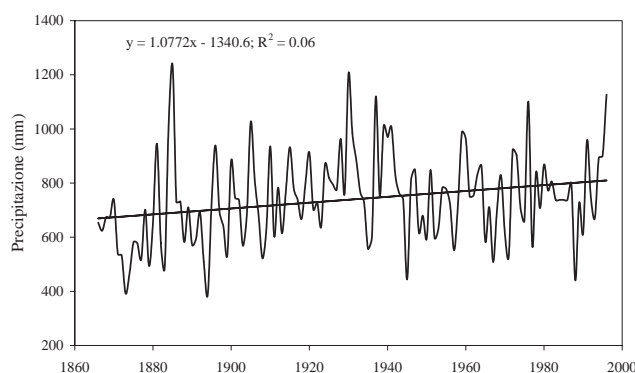


Fig. 20 - Stazione di Pesaro. Totali annuali della precipitazione.

Fig. 20 - Station: Pesaro. Yearly totals of precipitation.

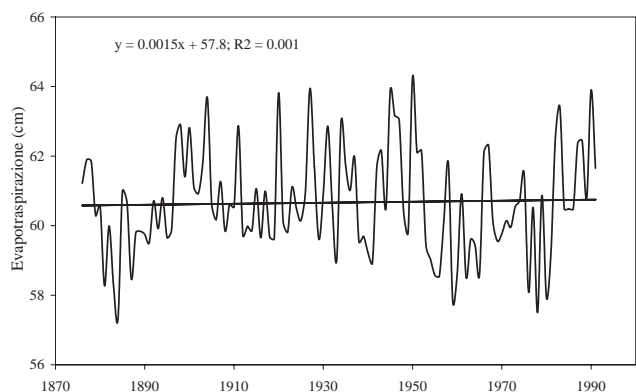


Fig. 21 - Stazione di Pesaro. Valori annuali dell'evapotraspirazione.

Fig. 21 - Station: Pesaro. Yearly evapotranspiration.

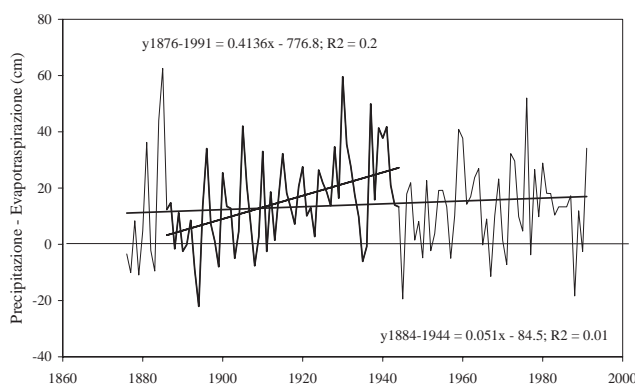


Fig. 22 - Stazione di Pesaro. Bilancio idrico annuale.

Fig. 22 - Station: Pesaro. Yearly hydrological balance.

Le serie di precipitazioni di Trieste e Palermo presentano andamenti stazionari; a Pesaro la precipitazione appare invece crescente (coefficiente angolare dell'interpolazione = 0,4 mm/anno), mentre nella serie di Livorno si è evidenziato un trend decrescente (coefficiente angolare dell'interpolazione = -0,4 mm/anno) nel periodo recente (dopo il 1956).

Il bilancio idrico ha mostrato una chiara dipendenza con la latitudine: positivo per tutto l'anno solo a Trieste, positivo solo nella stagione fredda a Livorno e Pesaro, negativo per tutto l'anno a Palermo

Per evidenziare la relazione stagionale tra temperatura e precipitazioni si sono costruiti i climogrammi con queste grandezze e, come già fatto per le escursioni termiche, sono stati studiati gli eventuali cambiamenti avvenuti negli anni recenti (dal 1960 in poi). Si è così messo in luce che per la stazione di Livorno le precipitazioni dei mesi di ottobre, novembre e dicembre sono diminuite (di 10-20 mm/mese); a Trieste e a Pesaro le precipitazioni sono diminuite solo nel mese di ottobre (rispettivamente di 124 mm/mese e 13 mm/mese); a Palermo la situazione è risultata invariata.

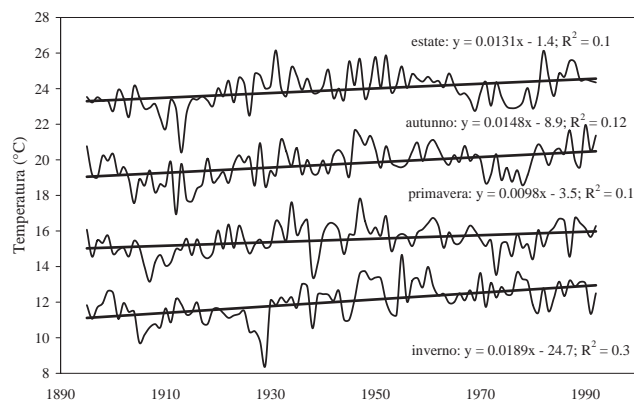


Fig. 23 - Stazione di Palermo. Valori stagionali della temperatura.

Fig. 23 - Station: Palermo. Seasonal temperature.

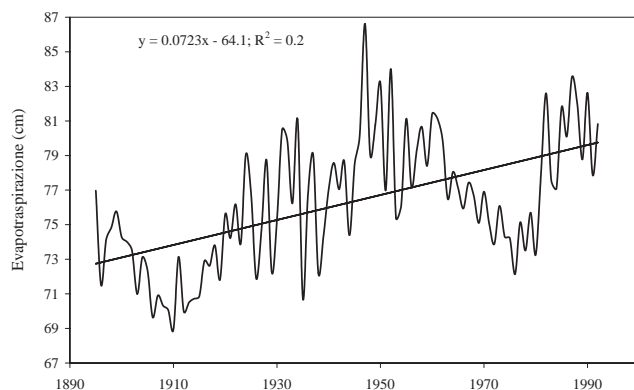


Fig. 25 - Stazione di Palermo. Valori annuali dell'evapotraspirazione.

Fig. 25 - Station: Palermo. Yearly evapotranspiration.

È stata calcolata con la formula di Thornthwaite l'evapotraspirazione media, annuale e stagionale per ogni stazione in esame. Tutte le serie di questa grandezza ricavate hanno mostrato andamenti stazionari. I valori medi trovati per ogni stazione sono di: 63,8 cm/anno per Trieste, 67,2 cm/anno per Livorno, 60,7 cm/anno per Pesaro, 76,2 cm/anno per Palermo.

Il calcolo del bilancio idrico permette di mettere in relazione i dati ricavati dall'analisi degli speleotemi con quelli climatici. Il bilancio idrico è dato dalla differenza tra la precipitazione e l'evapotraspirazione e dà un'informazione sulla quantità di acqua che viene assorbita dal suolo. Il bilancio idrico per la stazione di Trieste risulta nettamente positivo in tutte le altre stagioni con valori medi di 5,7 cm/mese in inverno, 3,4 cm/mese in primavera, 4,2 cm/mese in estate e 5,1 cm/mese in autunno. Per questa stazione il contributo dell'evapotraspirazione è circa metà rispetto a quello delle precipitazioni; per tutto l'anno l'apporto di acqua al suolo è considerevole, soprattutto in inverno e in autunno. Per la stazione di Livorno il bilancio idrico risulta positivo in inver-

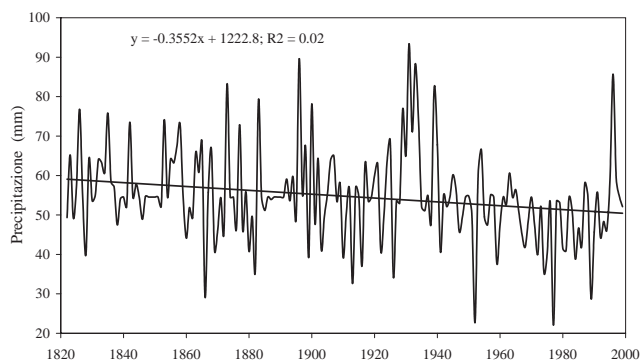


Fig. 24 - Stazione di Palermo. Totali annuali della precipitazione.

Fig. 24 - Station: Palermo. Yearly totals of precipitation.

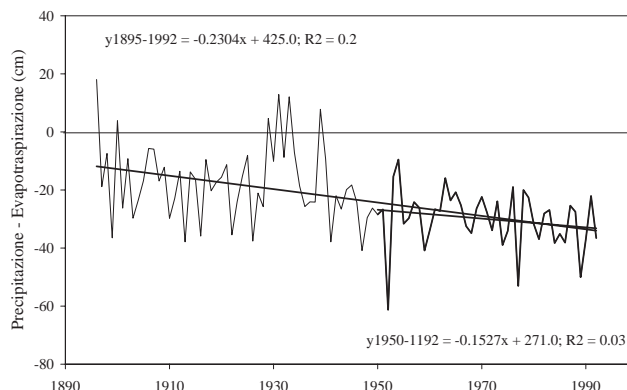


Fig. 26 - Stazione di Palermo. Bilancio idrico annuale.

Fig. 26 - Station: Palermo. Yearly hydrological balance.

no (2,7 cm/mese), mentre nelle altre stagioni risulta negativo, soprattutto in estate quando il valor medio è di -27,7 cm/mese. Anche per la stazione di Pesaro il bilancio idrico risulta positivo solo in inverno (3,1 cm/mese), mentre nelle altre stagioni risulta sempre negativo (-6,5 cm/mese in primavera, -25,0 cm/mese in estate e -7,3 cm/mese in autunno). Per la stazione di Palermo si è trovato un bilancio idrico negativo per tutte le stagioni (da -1,5 cm/mese in inverno a -37 cm/mese in estate), con conseguente scarsità di acqua che penetri nel sottosuolo, il che può rendere più lenta la crescita degli speleotemi.

Il test MK applicato alle serie ricavate di bilancio idrico ha evidenziato andamenti stazionari per le stazioni di Trieste e Livorno; nella stazione di Pesaro si è evidenziato un trend crescente negli anni 1884-1944 (coefficiente angolare dell'interpolazione = 0,4 cm/anno) e in quella di Palermo un trend decrescente (coefficiente angolare dell'interpolazione = -0,2 cm/anno) a partire dal 1950 attribuibile più probabilmente al cambio del pluviometro che a un cambiamento climatico.

RINGRAZIAMENTI

Siamo grati al coordinatore Prof. Ugo Sauro del Dipartimento di Geografia dell'Università di Padova per le utili discussioni e per averci coinvolto in questo studio, alla Dr. Giuseppina Micela dell'Osservatorio Astronomico dell'Università di Palermo per averci gentilmente fornito i dati pluviometrici locali,

e al Dr. Fabio Raicich del CNR, Istituto di Scienze Marine di Trieste, per quelli relativi alla stazione di Trieste.

BIBLIOGRAFIA

- Chinnici I., Foderà Serio G. & Granata L., 2000 - *Duecento anni di meteorologia all'Osservatorio Astronomico di Palermo*. Osservatorio Astronomico di Palermo G.S. Vaiata.
- Chow V.T., 1964 - *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company.
- Chow V.T., Maidment D.R. & Mays L.W., 1988 - *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company.
- IPCC, 2001 - *Climate Change 2001, The scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2002 - *Workshop on Changes in Extreme Weather and Climate Events*, Beijing China. World Meteorological Organization, Geneva.
- Micela G., Granata L. & Iuliano V., 2001 - *Due secoli di pioggia a Palermo*. Osservatorio Astronomico di Palermo G.S. Vaiata, Università di Palermo.
- Sneyers R., 1990 - *On the statistical Analysis of series of observations*, N.415. World Meteorological Organization, Geneva.
- Sneyers R., 1992 - *Use and misuse of statistical methods for the detection of climate change*. American Meteorological Society 12th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Toronto, Canada. American Meteorological Society, Boston.
- Ward R.C., 1967 - *Principles of Hydrology*. McGraw-Hill Book Company.