

La siccità nelle Marche nel periodo 1961-2009

Stefano Leonesi^{1*}, Danilo Tognetti¹

Abstract: Drought is an important phenomenon with effects in agriculture and groundwater. Several results on trend of drought events in Marche Region in the period 1961-2009 are presented. For this purpose, we have considered the Standard Precipitation Index from 1 to 48 monthly temporal scales. The highly significant increase of the frequency of drought events from SPI-6 upwards and their return period, about six years for 3- and 6-months periods, are discussed. The analysis has permitted to individuate the more affected regional areas: northern Marche and coast in summer, most of the region, in particular Macerata's province, during winter.

Keywords: drought, precipitation, Standardized Precipitation Index, SPI, return period.

Riassunto: La siccità è un fenomeno con importanti ricadute in agricoltura e sulle falde acquifere. Sono presentati alcuni risultati dello studio della siccità nelle Marche nel periodo 1961-2009. L'analisi si basa sul calcolo dell'indice SPI (Standardized Precipitation Index) alle diverse scale temporali, da 1 a 48 mesi. I risultati mostrano come ci sia un trend crescente con alto livello di significatività dei fenomeni siccitosi dalla scala semestrale in su. Anche i loro tempi di ritorno sono considerati e si aggirano intorno ai 6 anni per intervalli trimestrali e semestrali. Lo studio ha permesso altresì di individuare le aree marchigiane più soggette e vulnerabili alla siccità: le zone settentrionali e costiere per i periodi estivi, gran parte del territorio, e soprattutto il maceratese, per quello invernale.

Parole chiave: siccità, precipitazioni, Standardized Precipitation Index, SPI, tempi di ritorno.

INTRODUZIONE

La necessità di approfondire la conoscenza sul fenomeno della siccità è decisamente sentita per le sue vaste conseguenze ed implicazioni in ambito agricolo, sociale ed economico. Inoltre i paventati mutamenti climatici non fanno che rendere tale necessità ancor più insistente. Il presente lavoro intende studiare gli eventi siccitosi che hanno interessato la Regione Marche nel periodo 1961-2009, investigare la presenza di un loro trend significativo e individuare le aree regionali più coinvolte dagli stessi.

Per tali fini si è scelto di adoperare l'indice SPI (Standardized Precipitation Index), sviluppato da McKee *et al.* (1993). Uno dei vantaggi legati all'uso dell'SPI deriva dal fatto che per il suo calcolo si abbisogna solo dei dati delle precipitazioni.

La tabella seguente classifica i livelli di siccità in dipendenza ai valori assunti dall'indice:

Valore SPI	Classe
> 2	Estremamente umido
Da 1,5 a 1,99	Severamente umido
Da 1 a 1,49	Moderatamente umido
Da -0,99 a 0,99	Vicino al normale
Da -1,49 a -1	Moderatamente siccitoso
Da -1,99 a -1,5	Severamente siccitoso
< -2	Estremamente siccitoso

* danilo.tognetti@regione.marche.it

¹ Centro Operativo Agrometeo ASSAM – Regione Marche
received 06-Lug-10 accepted 01-Oct-10

L'indice SPI appare estremamente versatile perché in grado di quantificare le ripercussioni della siccità su finestre temporali di varia ampiezza, in genere da 1, 3, 6, 12, 24, 48 mesi. Nel seguito indicheremo con SPI-1, ..., SPI-48 gli indici relativi. Nel considerare SPI-1, si vanno a desumere informazioni sulla siccità meteorologica e sull'umidità dei primi strati del suolo, gli SPI-3 e SPI-6 offrono indicazioni sulla siccità agronomica e sulla resa delle colture, gli SPI-12 o superiori vengono considerati per la siccità idrologica e le sue conseguenze sul livello delle falde acquifere e delle portate dei fiumi.

L'efficacia dell'indice SPI è poi salvaguardata dall'osservazione della lunga e continuativa serie storica del periodo 1961-2009.

Infine per valutare l'intensità e la significatività del trend dell'SPI riscontrato a vari intervalli temporali si sono adoperati rispettivamente i test non parametrici di Sen-Theil e Mann-Kendall.

MATERIALI E METODI

La serie storica delle precipitazioni regionali dal 1961 al 2009, usata per il calcolo dell'SPI e per le successive elaborazioni, è stata ottenuta considerando i dati rilevati da 15 delle 78 stazioni agrometeorologiche dell'ASSAM attive dal 1996, convenientemente scelte in modo da garantire l'omogeneità, la continuità e la rappresentatività del territorio regionale (Fig. 1). Per gli anni anteriori al 1996, i dati sono stati raccordati con le serie storiche dell'ex Servizio Idrografico elaborate nell'ambito del progetto MARSIA ASSAM (Mariani, 2005).

La metodologia usata per calcolo di SPI è quella adottata da Edwards et al. (1997). Per ogni stazione, in corrispondenza di SPI- k ($k = 1, 3, 6, 12, 24, 48$), si ricavano le serie delle cumulate delle precipitazioni $\{s_m\}$ a k mesi, dal mese attuale fino al $k-1$ -esimo precedente. Ogni serie ottenuta viene suddivisa in 12 sequenze mensili le quali sono adattate a distribuzioni Gamma $H_m(x)$ di parametri α_m e β_m , con $m = 1, \dots, 12$, stimati secondo Thom (1966):

$$\alpha_m = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$\beta_m = \frac{E(s_m)}{\alpha_m}$$

dove

$$A = \ln(E(s_m)) - \frac{\sum \ln(s_m)}{N}$$

Le probabilità cumulate sono date da

$$G_m(x) = \frac{1}{\beta_m^{\alpha_m} \Gamma(\alpha_m)} \int_0^x x^{\alpha_m-1} e^{-\frac{x}{\beta_m}} dx$$

per $m = 1, \dots, 12$. Al fine di ampliarne il dominio per $x=0$ (precipitazione nulla), le probabilità cumulate diventano

$$H_m(x) = q + (1-q)G_m(x)$$

dove q è la probabilità di precipitazione nulla. Ciascuna $H_m(x)$ viene finalmente trasformata in una corrispondente distribuzione Normale standard (di media 0 e varianza 1) per ottenere il valore dell'indice SPI. Si tratta di una trasformazione equiprobabile, in modo che la probabilità di essere inferiore ad un certo valore nella Gamma sia uguale alla probabilità di essere inferiore al valore trasformato corrispondente nella Normale (Panofsky and Brier, 1958).

La bontà dell'adattamento della distribuzione di frequenza delle precipitazioni cumulate alla distribuzione di probabilità Gamma è stata controllata tramite il test Chi Quadrato.

La realizzazione pratica dei test di Mann-Kendall e Sen-Theil è stata effettuata tramite le librerie *Kendall* e *Zyp* del software statistico R (reperibile al sito <http://www.r-project.org/>), libero con licenza GNU General Public License (www.gnu.org/). R è stato utilizzato anche per determinare i *break point*, tramite la libreria *Strucchange*. Le carte tematiche sono state realizzate con il software ArcMap di ESRI (<http://www.esri.com/>)

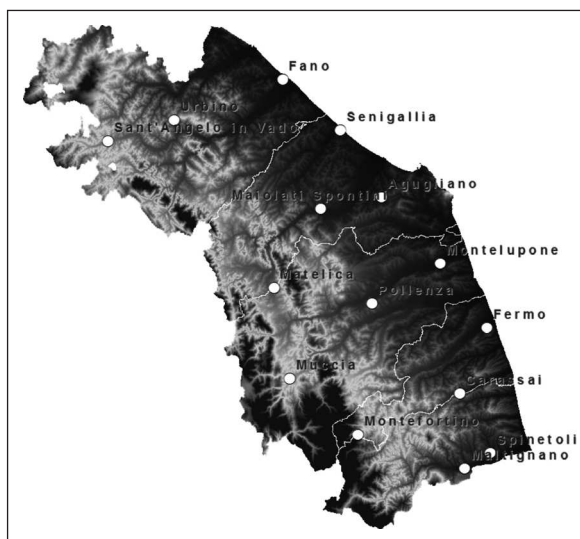


Fig.1 - Posizione geografica delle 15 stazioni usate per la serie storica delle precipitazioni 1961-2009.

Fig.1 - Geographical map of the meteorological station network USCO for the precipitation in the period 1961-2009.

RISULTATI

L'ipotesi di buon adattamento delle cumulate delle precipitazioni alla distribuzione Gamma, appurato con il test Chi Quadrato, è stata accettata nel 96% dei casi, con una significatività pari a 0,05. I casi negativi ricadono quasi tutti nelle scale temporali inferiori (SPI-1 e SPI-3).

SIGNIFICATIVITÀ DEI TREND LINEARI

Per ognuna delle 15 stazioni considerate si sono calcolati gli SPI-1, ..., SPI-48 con frequenza mensile a partire dalle serie storiche delle precipitazioni puntuali. L'uso delle medie precipitative permette di sin-

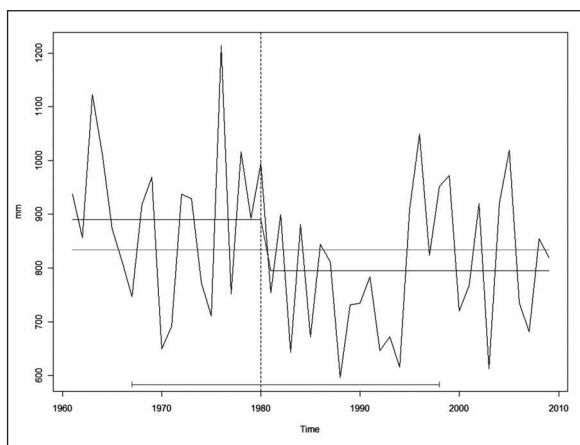


Fig. 2 - Andamento precipitazione totale annua regionale (mm). Anni 1961-2009. Si nota anche il break point del 1980.

Fig. 2 - Regional annual precipitation trend (mm). Period 1961-2009, with estimated break point in 1980.

Stazione	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-12	SPI-24	SPI-48
Regione	n.s.	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003
Prov. Pesaro-Urbino	n.s.	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	n.s.
Fano	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.001
Sant'Angelo in V.	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Urbino	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Prov. Ancona	n.s.	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Agugliano	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Maiolati S.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0.001	n.s.
Senigallia	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Prov. Macerata	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003	-0.003
Matelica	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003
Montelupone	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Muccia	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003
Pollenza	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Prov. Ascoli P.-Fermo	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Carassai	n.s.	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Fermo	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003
Maltignano	n.s.	n.s.	n.s.	-0.001	-0.002	-0.002
Montefortino	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001
Spinetoli	n.s.	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003

Tab. 1 - Stima del coefficiente angolare, con il metodo di Sen-Theil (approssimato alla terza cifra decimale) e sua significatività secondo il test di Mann-Kendall, dei trend lineari dell'indice SPI su media regionale, provinciale e per singola stazione; n.s. non significativo ($p\text{-value} \geq 0,05$); grigio chiaro, moderatamente significativo (95%, $0,01 \leq p < 0,05$); grigio scuro, molto significativo (99%, $p < 0,01$).

Tab. 1 - Estimate of slopes of linear trend of SPI index (approximate to third decimal place) and its significance according to Mann-Kendall test: n.s., not significant ($p\text{-value} \geq 0,05$); light gray, moderately significant (95%, $0,01 \leq p < 0,05$); dark gray, highly significant (99%, $p < 0,01$).

tetzare l'SPI a livello provinciale e regionale (Fig. 2). Successivamente abbiamo rivolto l'attenzione alla tendenza degli indici SPI, sia per ciascuna stazione che a livello medio provinciale e regionale.

La Tab. 1 mostra un trend non significativo dell'SPI-1 per 13 stazioni su 15; Muccia e Matelica hanno invece una significatività forte del 99% (moderata per la provincia di Macerata); con l'SPI-3 si rafforza la significatività per la maggioranza delle stazioni considerate.

Allargando poi la finestra temporale dell'indice, si nota un contemporaneo e diffuso incremento del numero delle stazioni che presentano un trend significativo soprattutto per le provincie meridionali, Macerata, Fermo e Ascoli Piceno.

Discorso a parte meritano le stazioni di Fano e Maiolati S. dove la significatività risulta esigua, rispet-

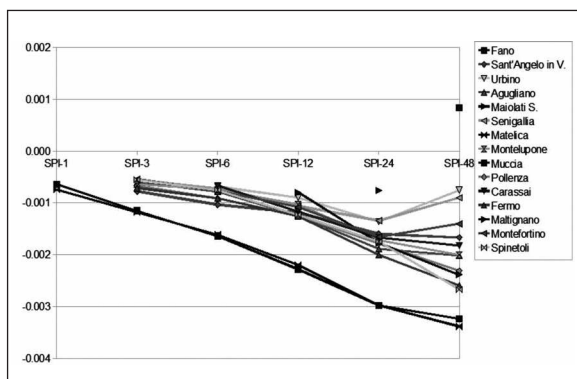


Fig. 3 - Andamento dei coeff. angolari (stimati con metodo di Sen-Theil) dell'indice SPI in funzione della finestra temporale. Sono riportati solo i coefficienti ritenuti significativi (test di Mann-Kendall). Periodo di calcolo 1961-2009.

Fig. 3 - Trend of slopes (estimated with Sen-Theil approach) of SPI indexes. Only significant slopes (by Mann-Kendall test) are considered. Period 1961-2009.

tivamente solo nei casi di SPI-48 e SPI-24. La quasi totalità dei trend lineari significativi degli SPI calcolati sulle singole stazioni considerate è negativo (Fig. 3); solo quella di Fano presenta un trend positivo in corrispondenza dei 48 mesi. Da evidenziare che in genere l'entità della decrescita si accentua all'aumentare dell'ampiezza della finestra temporale, come si può dedurre dalla diminuzione dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative (Fig. 3).

Anche a livello medio regionale tutti gli indici SPI, ad eccezione di SPI-1, fanno emergere un andamento lineare decrescente con alta significatività ($p < 0,01$) a partire dai 3 mesi (Tab. 1) e con pendenza crescente all'aumentare dell'ampiezza della finestra temporale (esempi da Fig. 4 a Fig. 8). L'SPI-1 non presenta invece alcuna significatività. La non significatività e la discordanza dei risultati

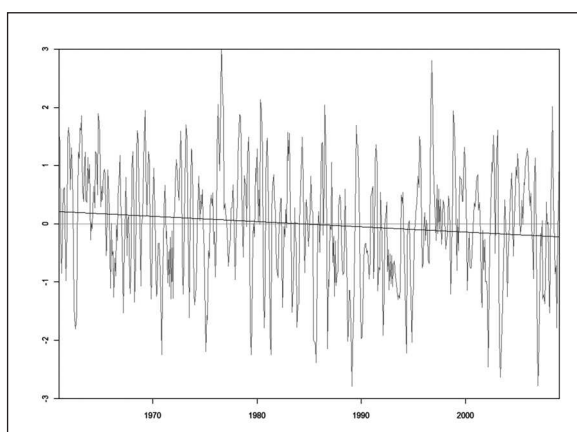


Fig. 4 - Andamento mensile SPI-3. Anni 1961-2009.
Fig. 4 - Monthly SPI-3 trend. Period 1961-2009.

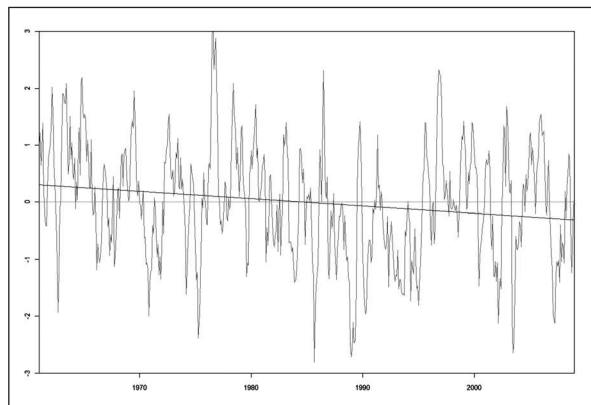


Fig. 5 - Andamento mensile SPI-6. Anni 1961-2009.
Fig. 5 - Monthly SPI-6 trend. Period 1961-2009.

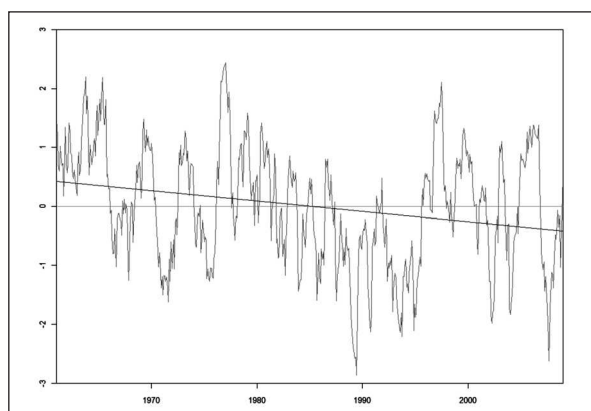


Fig. 6 - Andamento mensile SPI-12. Anni 1961-2009.
Fig. 6 - Monthly SPI-12 trend. Period 1961-2009.

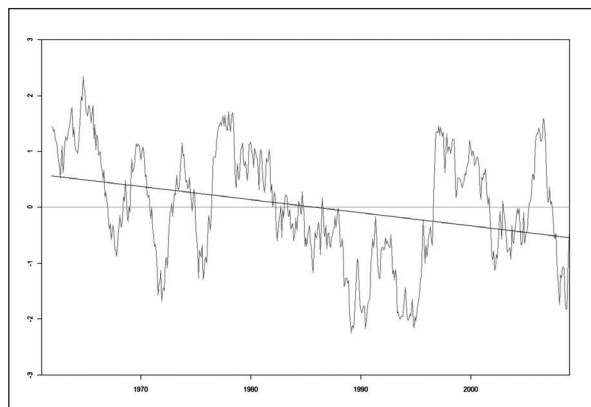


Fig. 7 - Andamento mensile SPI-24. Anni 1961-2009.
Fig. 7 - Monthly SPI-24 trend. Period 1961-2009.

delle stazioni di Maiolati S. e Fano rispetto alle altre stazioni, anche limitrofe, potrebbe essere imputabile ad un impreciso raccordo tra le due serie storiche delle precipitazioni usate per calcolare gli indici.

	SPI-1 Luglio	SPI-3 estate	SPI-6 inverno	SPI-6 estate
Estr. siccitosi SPI < -2	2.0	2.7	2.0	3.1
Sev. siccitosi -2 ≤ SPI < 1.5	6.1	4.8	2.7	4.1
Mod. siccitosi -1.5 ≤ SPI < -1	2.0	8.2	13.9	9.2
Siccitosi SPI < -1	10.2	15.6	18.7	16.3
Vicino al normale -1 ≤ SPI < 1	75.5	67.3	66.0	70.1
Umidità SPI ≥ 1	14.3	17.0	15.3	13.6
Mod. umidi 1 ≤ SPI < 1.5	4.1	10.2	8.8	8.8
Sev. umidi 1.5 ≤ SPI < 2	8.2	4.1	3.1	2.7
Estr. umidi SPI > 2	2.0	2.7	3.4	2.0

Tab. 2 - Frequenza percentuale eventi siccitosi, media regionale. Periodo di calcolo 1961-2009.
Tab. 2 - Drought events frequency (%), regional average. Period 1961-2009.

FREQUENZA DEGLI EVENTI SICCIOSI

A livello regionale, la maggior frequenza di eventi siccitosi (valori di SPI < -1) ha cadenza semestrale, specie nel periodo invernale, dal mese di ottobre a quello di marzo (Tab. 2).

Gli eventi *estremamente siccitosi* mostrano una frequenza del 2-3% con un picco di 3,1% nel semestre estivo (SPI-6 da aprile a settembre).

Oscillazioni più ampie per gli eventi *severamente siccitosi*, tra 2,7%-6,1%. I più frequenti risultano

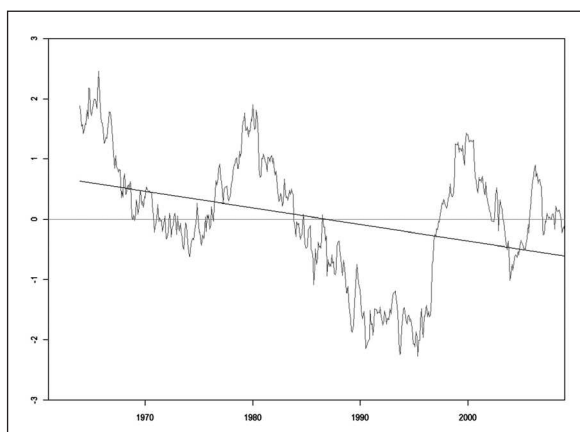


Fig. 8 - Andamento mensile SPI-48. Anni 1961-2009.
Fig. 8 - Monthly SPI-48 trend. Period 1961-2009.

	SPI-1 Luglio	SPI-3 estate	SPI-6 inverno	SPI-6 estate
Estr. siccitosi SPI<-2	49.0	36.8	49.0	32.7
Sev. siccitosi -2<=SPI<1.5	16.3	21.0	36.8	24.5
Mod. siccit osi -1.5<=SPI<-1	49.0	12.3	7.2	10.9
Siccitosi SPI<-1	9.8	6.4	5.3	6.1
Vicino al normale -1<=SPI<1	1.3	1.5	1.5	1.4
Umidi SPI>=1	7.0	5.9	6.5	7.4
Mod. umidi 1<=SPI<1.5	24.5	9.8	11.3	11.3
Sev. umidi 1.5<=SPI<2	12.3	24.5	32.7	36.8
Estr. umidi SPI>2	49.0	36.8	29.4	49.0

Tab. 3 - Tempi di ritorno in anni, media regionale. Periodo di calcolo 1961-2009.

Tab. 3 - Return period (year) regional, average. Period 1961-2009.

quelli alle scale temporali più brevi (SPI-1 di luglio e SPI-3 luglio-agosto-settembre).

Sempre per l'SPI-6 invernale (da ottobre a marzo) si verificano più spesso gli eventi siccitosi di moderata intensità (13,9%).

La frequenza degli eventi umidi varia, grosso modo, nell'intervallo 14-17%, con più elevate ricorrenze nel trimestre estivo (SPI-3 luglio-agosto-settembre).

Anche gli eventi estremamente umidi si aggirano intorno al 2-3% con un massimo di 3,4% per l'SPI-6 invernale.

L'indagine territoriale mostra interessanti correlazioni fra l'indice e alcune variabili geografiche. Significativo ad esempio è risultato il coefficiente di correlazione (r) fra la frequenza degli eventi siccitosi nel breve periodo e la distanza dal mare, pari a -0,52 per l'SPI-1 luglio e 0,64 per l'SPI-3 estate, il che evidenzia all'allontanarsi della costa un comportamento diametralmente opposto, con un decremento degli eventi siccitosi a luglio ed un incremento degli eventi stessi per il trimestre estivo, fenomeno quest'ultimo che coinvolge sia la zona costiera che il maceratese in genere (Fig. 9 e Fig. 10). Il conteggio degli eventi siccitosi semestrali dimostra una maggiore affinità con la latitudine (Fig. 11 e Fig. 12) ma anche in questo caso, con direzioni opposte. Infatti, mentre l'SPI-6 estivo cresce con la latitudine

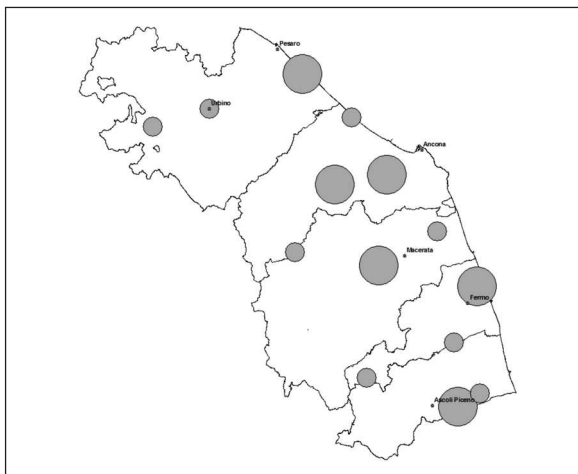


Fig. 9 - SPI-1 luglio. Frequenza eventi siccitosi. Anni 1961-2009. A cerchio più grande corrisponde frequenza maggiore.

Fig. 9 - SPI-1 July. Drought events frequency. Period 1961-2009. Circle area is proportional to frequency.

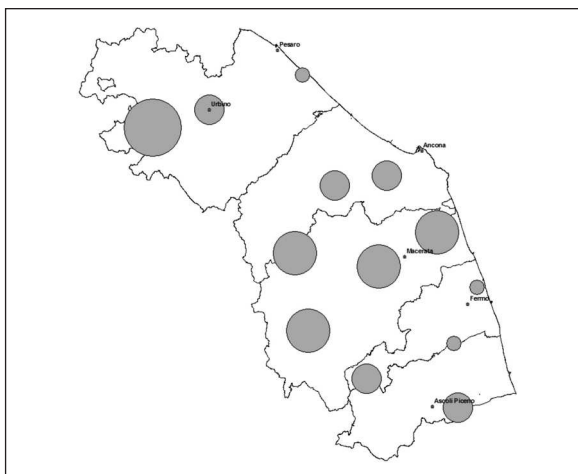


Fig. 10 - SPI-3 estate. Frequenza eventi siccitosi. Anni 1961-2009. A cerchio più grande corrisponde frequenza maggiore.

Fig. 10 - SPI-3 summer. Drought events frequency. Period 1961-2009. Circle area is proportional to frequency.

($r=0,53$) quello invernale diminuisce anche se in maniera più disordinata e con una bassa correlazione ($r=-0,38$).

Possiamo offrire una diversa lettura della Tab. 2 esprimendone i dati sotto forma di *tempo medio di ritorno* $T = 1/frequenza\ rel.$ Segue che, sempre a livello regionale, con cadenza trimestrale e semestrale, il tempo medio di ritorno sia degli eventi siccitosi (SPI<-1) che di quelli umidi (SPI>1) si aggira intorno ai 6 anni. Naturalmente minore è invece la media degli eventi "normali", pari a 1,4 anni (Tab. 3).

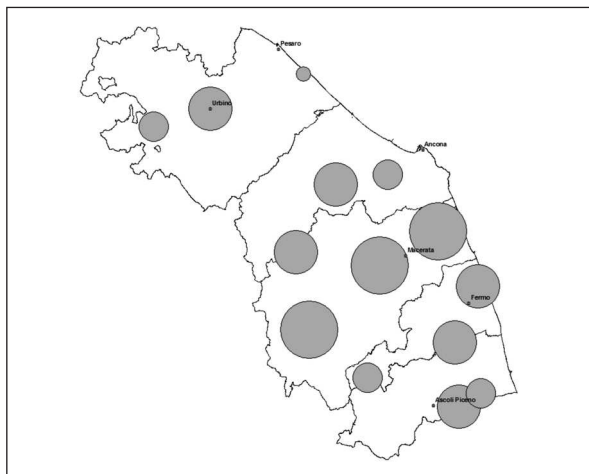


Fig. 11 - SPI-6 inverno. Frequenza eventi siccitosi. Anni 1961-2009. A cerchio più grande corrisponde frequenza maggiore.

Fig. 11 - SPI-6 winter. Drought events frequency. Period 1961-2009. Circle area is proportional to frequency.

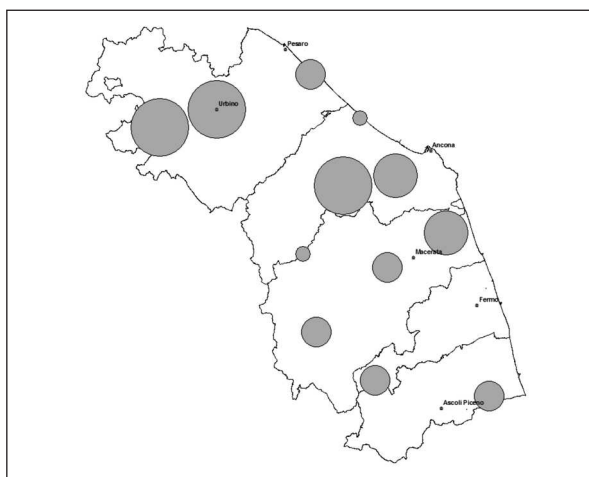


Fig. 12 - SPI-6 estate. Frequenza eventi siccitosi. Anni 1961-2009. A cerchio più grande corrisponde frequenza maggiore.

Fig. 12 - SPI-6 summer. Drought events frequency. Period 1961-2009. Circle area is proportional to frequency.

CONCLUSIONI

Dalle elaborazioni è emerso un generale incremento dei fenomeni siccitosi nelle Marche con un accento maggiore per quelli a media e lunga durata. Si nota inoltre una più alta incidenza della siccità estiva tendenzialmente per le zone settentrionali e costiere, ed un carattere più diffuso e generalizzato per quella invernale, più marcato comunque per le province meridionali e in particolare per il maceratese.

Le incongruenze sugli andamenti degli indici riscontrate per le stazioni di Fano e Maiolati S. sug-

geriscono di approfondire la questione del raccordo fra i dati più recenti di fonte ASSAM e quelli dell'ex Servizio Idrografico riferiti al periodo anteriore al 1996.

Bibliografia

- Bai J., 1994. Least Squares Estimation of a Shift in Linear Processes. *Journal of Time Series Analysis*, 15: 453-472.
- Bai J., 1997a. Estimating Multiple Breaks One at a Time. *Econometric Theory*, 13: 315-352.
- Bai J., 1997b. Estimation of a Change Point in Multiple Regression Models. *Review of Economics and Statistics*, 79: 551-563.
- Bai J., Perron P., 1998. Estimating and Testing Linear Models With Multiple Structural Changes. *Econometrica*, 66: 47-78.
- Cacciatori G., Chiaudani A., Tridello G., Borin M., Salvan F., 2005. Studio della siccità in Veneto negli anni 1961-2004: SPI (Standard Precipitation Index). "Rivista Italiana di Agrometeorologia", 1: 26-27.
- Edwards Daniel C., McKee Thomas B., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climo Report 97-2*, Dept. of Atmos. Sci., CSU, Fort Collins, CO, May, Cap. 3.
- Maniero G., Borin M., Chiaudani A., Cacciatori G., 2009. SPI: Standard Precipitation Index - Analisi storica del deficit e surplus pluviometrico in Veneto nel periodo 1956-2004. "Rivista Italiana di agrometeorologia", 14 (2).
- Mariani L., 2006. Alcuni metodi per l'analisi delle serie storiche in agrometeorologia.
- Mariani L., 2005. Caratterizzazione agroclimatica del territorio delle Marche, progetto MARSIA ASSAM.
- McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Pre prints, 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, Texas, American Meteorological Society: 233-236.
- McKee T., Doesken N., Kleist J. 1993. "The relationship of drought frequency and duration to time scales". 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22, 1993, Anaheim, California, Amer. Meteor. Soc.: 179-184.
- Panofsky H. A., Brier G. W., 1958. Some Application of Statistics to Meteorology. *Earth and Mineral Sciences Continuing Education*, College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 224 pp.
- Thorn, H. C. S., 1966. *Some Methods of Climatological Analysis*. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.