

Analisi meteo-climatica del territorio di Roma nel periodo 1984 – 2014

Meteo-climatic analysis during the period 1984 – 2014 in Rome area (Central Italy)

Giovanni Conte, Andrea Del Bon, Rossella Maria Gafà, Lucio Martarelli, Gennaro Maria Monti

Riassunto: In questo articolo si delineano il quadro evolutivo degli apporti piovosi ed un modello di distribuzione stagionale del trentennio 1984-2014 nell'area urbana di Roma e dintorni in base ai dati di 46 stazioni pluviometriche disponibili.

Nell'area urbana di Roma la media delle precipitazioni cumulate annuali è pari a 793 mm, mentre nelle aree collinari tale parametro sale a 945 mm. L'andamento delle isooete stagionali mostra come, in generale, la variazione delle altezze di precipitazione stagionali sia abbastanza omogenea, aumentando dalle zone più pianeggianti verso i rilievi.

La variabilità delle altezze di pioggia annuale rende difficile individuare la presenza di trend e ciclicità, all'infuori dei cicli stagionali. Tuttavia, il quadro evolutivo delle precipitazioni delinea un trend crescente nei mesi invernali e meno marcato nei mesi estivi, invece, nei periodi autunnali e in minor misura primaverili si è evidenziata una tendenza decrescente.

Nelle sequenze dei valori delle precipitazioni cumulate annuali del 28% delle stazioni sono stati identificate variazioni signifi-

tive, ovvero: inversioni di tendenza da discendente a crescente o incrementi della media in assenza di trend significativo.

I grafici dei dati delle cumulate di pioggia su scala trimestrale (stagionale) mostrano, in quasi tutte le stazioni pluviometriche, una stagione invernale con inversione di tendenza, da negativa a positiva, intorno al 1993.

In base alla classificazione qualitativa dell'Indice Stagionalità (SI), l'area analizzata è descritta in parte come "uniforme ma con una stagione umida definita" ($SI=0.20-0.39$), in parte come "piuttosto stagionale con una ridotta stagione secca" ($SI=0.40-0.59$).

L'analisi delle piogge è stata ulteriormente approfondita elaborando spazialmente i dati di trend di lungo periodo ricavati dall'analisi dello Standard Precipitation Index (SPI), aggregato a scala trimestrale, semestrale ed annuale.

L'analisi delle temperature relative a 21 stazioni ha permesso di evidenziare come le isoterme, in generale, seguano l'andamento della topografia e l'esistenza in corrispondenza dell'area metropolitana di Roma di una zona caratterizzata da temperature maggiori rispetto a quelle circostanti.

Parole chiave: piogge, indice di stagionalità, indice di precipitazione standardizzato, temperature, Roma.

Keywords: rainfall, seasonality index, standard precipitation index, temperature, Rome.

Andrea DEL BON 

Università degli Studi di Roma La Sapienza
Dipartimento di Scienze della Terra - Laboratorio di Idrogeologia Quantitativa
Piazzale Aldo Moro, 5 – 00185 Roma
andrea.delbon@libero.it

Giovanni CONTE

Rossella Maria GAFÀ

Lucio MARTARELLI

Gennaro Maria MONTI

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Dipartimento per la Difesa del Suolo – Servizio Geologico d'Italia
Servizio Geologia Applicata e Idrogeologia
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
rossella.gafa@isprambiente.it

Ricevuto: 31 dicembre 2015 / Accettato: 11 febbraio 2016

Pubblicato online: 29 febbraio 2016

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2016

Introduzione

L'analisi di dati meteo-climatici ha destato negli ultimi anni particolare interesse sia a scala globale (e.g., Giorgi 2005; Gao e Giorgi 2008) che locale (e.g., Corti et al. 2009). Riguardo gli studi idrogeologici, tali analisi sono basilari ai fini della valutazione quantitativa della risorsa idrica e indispensabili per l'elaborazione del bilancio idrogeologico. In occasione della pubblicazione della Carta Idrogeologica di Roma (La Vigna e Mazza, eds., 2015) sono state eseguite diverse elaborazioni numeriche e spaziali dei dati termo-pluviometrici (Conte et al. 2015) degli ultimi 20 anni relativi a 26 stazioni della rete termo-pluviografica della Regione Lazio, di cui 26 pluviometriche e 10 termometriche (Regione Lazio – U.I.M. 2015). I dati pluviometrici e termometrici costituiscono parametri di ingresso fondamentali per la definizione della ricarica delle falde acquifere e per valutazioni idrologiche.

Al fine di una più esaustiva definizione del contesto climatico in cui ricade il territorio di Roma Capitale, in questo lavoro l'area di studio è stata ampliata ben oltre i suoi limiti amministrativi, includendo ulteriori stazioni della rete regionale (per un totale di 46 stazioni pluviometriche e 21 termometriche) inoltre, l'analisi delle serie storiche ventennali (1994-2014) è stata estesa al periodo 1984-2014.

I dati acquisiti hanno permesso di delineare un quadro evolutivo degli apporti piovosi dell'ultimo trentennio, elaborare i valori dell'indicatore della distribuzione stagionale delle piogge (SI) e dell'Indice di Precipitazione Standardizzato (SPI) e, infine, definire un modello di distribuzione stagionale delle piogge nell'area di interesse.

Riguardo alle temperature, è stata eseguita un'analisi spaziale dei dati medi stagionali di lungo periodo (1984-2014).

Per l'inquadramento del contesto idrogeologico romano e delle problematiche relative alle risorse idriche nell'area urbana si rimanda a La Vigna et al. (questo volume) e Mazza et al. (questo volume).

Materiale e metodi

I dati delle stazioni pluviometriche utilizzati in questo lavoro sono stati estratti dagli Annali Idrologici della Regione Lazio (Regione Lazio – U.I.M., 2015). Le stazioni sono state selezionate in base a requisiti di omogeneità e completezza dei dati, di lunghezza delle registrazioni e di localizzazione intorno all'area metropolitana di Roma. I dati mancanti di alcune serie sono stati ricostruiti solo nei casi in cui erano disponibili registrazioni di stazioni ad esse vicine, con valori fortemente correlati, applicando la regressione lineare multivariata.

Le interpolazioni spaziali dei parametri climatici considerati in questo lavoro sono stati sviluppati in ambiente GIS, utilizzando il metodo di interpolazione geostatistica del *kriging* (Matheron 1962).

L'analisi della struttura temporale delle serie pluviometriche di ciascuna stazione è stata condotta su base mensile, trimestrale ed annuale. Per l'individuazione di eventuali pattern evolutivi dei valori delle serie, si è proceduto inizialmente con l'analisi dei grafici delle cumulate mensili dei 12 mesi dell'anno e delle cumulate annuali nei 31 anni di registrazione.

Per una verifica statistica della presenza di trend in tratti di serie monotone sono stati condotti test di significatività con l'ampiamente utilizzato metodo non parametrico di Mann-Kendall (MK; Kendall et al. 1983; Sneyers 1990). Ricordando che nel test MK l'ipotesi nulla, H_0 , è che la serie di valori non contenga un trend significativo, tale test è stato applicato previa verifica di assenza di serialità nella successione di valori da analizzare (Von Storch 1995; Zhang et al. 2001). Infine, per quantificare i trend lineari, in termini di pendenza della retta (tasso di variazione), si è fatto ricorso al metodo *Sen's estimate slope* (Sen 1968).

Nella successiva fase di analisi, sulle serie delle cumulate di precipitazione annuali di tutte le stazioni e su alcune serie trimestrali, sono stati condotti controlli mirati a cogliere eventuali *change point* o *break point* (momenti di cambiamento) nei pattern dei valori di precipitazione del periodo 1984-2014. In letteratura vengono proposte numerose metodologie: alcune basate sulla regressione lineare applicata alle serie con algoritmi iterativi di ottimizzazione della stima dei parametri della regressione, per individuare i punti di svolta più significativi (Ryan et al. 2002; Oosterbaan et al. 1990); altre basate su criteri non parametrici, come il test di Pettitt e il test CUSUM (Pettitt 1979, Smadi e Zghoul 2006). In questo lavoro tali metodologie sono state applicate congiuntamente, le prime due per individuare sperimentalmente i più probabili punti di svolta su di un grande numero di serie di dati, mentre i test di Pettitt e CUSUM per una loro robusta verifica statistica. Occorre precisare che un cambiamento strutturale può essere associato ad un rapido e persistente cambiamento della media dei valori di registrazione, anche in assenza di trend evidenti. Talvolta ciò può essere dovuto a problemi strumentali o ad uno spostamento della stazione di registrazione. Ove l'anomalia strutturale risulti significativa è necessario cercare dei riscontri nei dati di stazioni vicine.

Sempre allo scopo di evidenziare i trend, è stata effettuata un'analisi dell'andamento dei volumi di pioggia annuali che hanno interessato l'intero territorio di studio.

Per individuare la presenza di eventuali ciclicità, su base sia trimestrale che annuale, è stata applicata la *Fast Fourier Transform* (FFT; Press et al. 1992) e la *Continuous Wavelet Transform* (CWT; Torrence et al. 1998) alle serie storiche degli ultimi 60 anni nella stazioni del Collegio Romano, ubicata nel cuore dell'area urbana di Roma, e di Frascati, ubicata a SE, a circa 19 km dalla prima, in corrispondenza dei rilievi collinari.

La valutazione del grado di variabilità delle piogge mensili durante l'anno è stata condotta utilizzando l'indice stagionale SI (*Seasonal Index*; Walsh e Lawler 1981). Al fine di definire i contrasti stagionali, l'indice stagionale SI, che è funzione della precipitazione mensile ed annua media, viene definito dalla seguente formula:

$$SI = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{n=12} |x_n - R/12|$$

dove x_n è la precipitazione media del mese ennesimo ed R è la precipitazione media annua. In teoria, SI può variare da zero, se tutti i mesi hanno una identica altezza di pioggia, a 1,83, se tutta la pioggia di un anno si concentra in un unico mese. SI non è un indicatore assoluto ovvero quantitativo delle precipitazioni, ma fornisce valutazioni sulla loro distribuzione durante l'anno. Walsh e Lawler (1981) definiscono una classificazione qualitativa del grado di stagionalità (Tab. 1).

Tab. 1 - Regimi di precipitazione stagionali individuate dal SI (da Walsh e Lawler 1981).

Tab. 1 - Seasonal precipitation regimes indicated by the SI (from Walsh and Lawler 1981).

SI	Regime pluviometrico Precipitation regime
< 0,19	Precipitazioni estese durante tutto l'anno Precipitation spread throughout the year
0,20 – 0,39	Precipitazioni estese durante tutto l'anno, ma con una stagione umida definita Precipitation spread throughout the year, but with a definite wetter season
0,40 – 0,59	Abbastanza stagionale con una corta stagione secca Rather seasonal with a short drier season
0,60 – 0,79	Stagionale Seasonal
0,80 – 0,99	Marcatamente stagionale con una lunga stagione secca Markedly seasonal with a long dry season
1,00 – 1,19	Precipitazioni prevalentemente concentrate in 3 mesi Most precipitation in 3 months
> 1,20	Stagionalità estrema, con quasi tutte le precipitazioni concentrate in 1-2 mesi Extreme seasonality, with almost all precipitation in 1–2 months

Ricordando che Standard Precipitation Index (McKee et al. 1993) costituisce un indicatore di surplus o deficit pluviometrico (Tab. 2), largamente utilizzato a livello internazionale, l'analisi dello SPI sulle serie storiche delle stazioni pluviometriche è stato condotto con la finalità di evidenziare l'esistenza di possibili variazioni nel tempo del regime pluviometrico. Per questo si è optato per la regionalizzazione, mediante kriging (Matheron 1962), dei coefficienti angolari

Tab. 2 - Classificazione degli eventi siccitosi individuati dallo SPI (McKee et al. 1993).

Tab. 2 - Classification of drought events identified by the SPI (McKee et al. 1993).

Valore SPI SPI Value	Classificazione	Classification
≥ 2,00	Estremamente umido	Extremely wet
1,50 – 1,99	Molto umido	Very wet
1,00 – 1,49	Moderatamente umido	Moderately wet
0,00 – 0,99	Mediamente umido	Mildly wet
0,00 – -0,99	Debolmente umido	Mild wet
-1,00 – -1,49	Moderatamente secco	Moderately dry
-1,50 – -1,99	Siccità severa	Severely dry
≤ -2,00	Siccità estrema	Extremely dry

dei trend lineari ricavati dalle rette di regressione ottenuti dai grafici "anno-SPI" relativi alle singole stazioni. Le scale di aggregazione usate sono state: annuale (variazioni complessive sul lungo periodo analizzato), semestrale (periodo secco – da aprile a settembre; periodo umido – da ottobre a marzo) ed infine trimestrale ovvero, stagionale (primavera: aprile – giugno; estate: luglio – agosto; autunno: settembre – dicembre). Per il calcolo dello SPI è stato utilizzato il software gratuito "SPI_SL_6.exe" (National Drought Mitigation Center – University of Nebraska 2015). A titolo esemplificativo, in figura 1 si riporta il grafico relativo alla valutazione del trend a scala annuale per la stazione di Collegio Romano.

Sebbene il parametro temperatura nell'area di studio meriti ulteriori approfondimenti conoscitivi, in questa sede si è preferito limitarsi ad un'analisi spaziale delle temperature medie stagionali riferite al periodo 1984 – 2014. Per l'elaborazione spaziale delle isoterme è stato scelto il metodo Inverse Distance Weighting, IDW, che, dato il ridotto numero di stazioni disponibili, ha permesso di delineare l'andamento generale delle variazioni spaziali stagionali della temperatura.

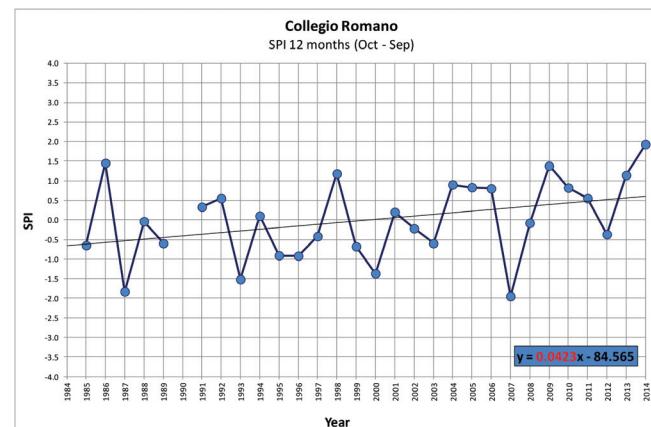


Fig 1 - Grafico del trend SPI a scala annuale per la stazione di Collegio Romano.

Fig. 1 - Plot of annual SPI trend at the Collegio Romano pluviometer.

Discussione dei dati

Contesto geografico e climatico generale dell'area

Il Comune di Roma ricopre una superficie di 1287 km², il 60% della quale urbanizzata. Il restante 40% è costituito dall'Agro Romano, un'area rurale che si estende intorno alla metropoli.

La morfologia del territorio comunale è ondulata ed è caratterizzata da rilievi collinari ed incisioni vallive, modellate dal sistema idrografico del bacino del Tevere. Le quote topografiche variano tra 0 e 377 m s.l.m.

L'area in esame è storicamente caratterizzata dal tipico clima temperato delle medie latitudini, con estati calde, inverno mite e relativamente umido; l'autunno è la stagione più piovosa, mentre l'incidenza delle precipitazioni nevose è trascurabile. L'andamento medio delle cumulate mensili di pioggia degli ultimi 30 anni delle stazioni del Collegio Romano e di Ponte Salario, illustrato nei grafici in figura 2, può essere considerato significativo della distribuzione della piovosità su

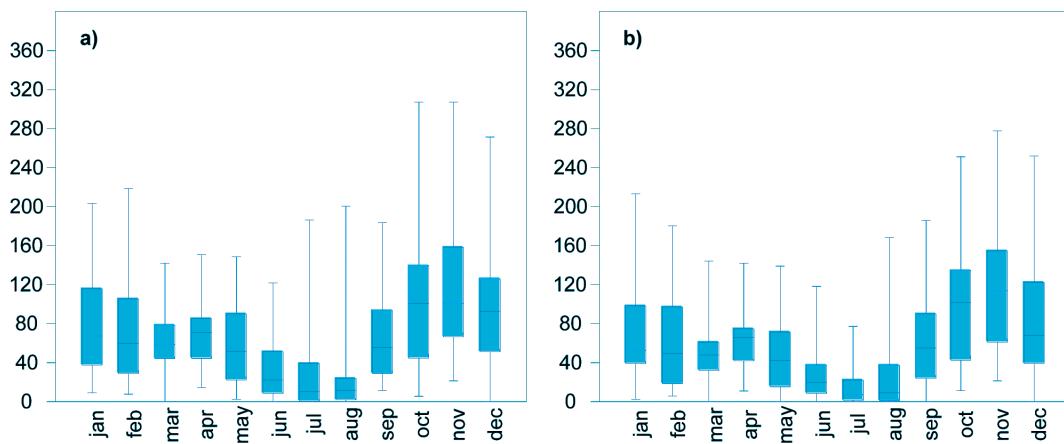


Fig. 2 - Box plot dell'andamento medio delle cumulate mensili di pioggia (mm): a) pluviometro Collegio Romano; b) pluviometro Ponte Salario. Periodo di riferimento 1984-2014 (Fonte dati: Regione Lazio – U.I.M. 2015).

Fig. 2 - Box plot of average pattern of monthly cumulative rainfall (mm): a) Collegio Romano pluviometer; b) Ponte Salario pluviometer. Reference period 1984-2014 (Data source: Regione Lazio – U.I.M. 2015).

scala mensile nel ciclo annuale nell'area di studio. Alla prima stazione corrisponde la serie storica con la media delle cumulate annuali più bassa tra quelle delle stazioni del Comune, alla seconda invece una delle serie dalle medie più elevate. Il grafico è indicativo anche della notevole variabilità delle precipitazioni nel corso del periodo 1984-2014.

Il valore medio delle cumulate annuali dei 31 anni analizzati è pari a 793 mm/anno per le stazioni nel Comune di Roma, mentre per quelle ubicate nel territorio adiacente è di 945 mm/anno. Una tale differenza trova riscontro nelle interpolazioni spaziali delle precipitazioni stagionali in ragione dell'orografia del territorio. Queste interpolazioni sono state elaborate partendo dalla media calcolata su 31 anni delle cumulate trimestrali annuali di ciascuna delle 46 stazioni (Fig. 3). L'andamento delle isoiete stagionali mostra come la variazione delle altezze di precipitazione in primavera sia piuttosto omogeneo, aumentando in modo netto sui rilievi dei Monti Lucretili (Licenza). La stagione estiva risulta ancora più omogenea e delineata in modo netto un'area di precipitazione minore di 120 mm che si estende in buona parte dell'area metropolitana di Roma. In autunno, stagione nettamente più piovosa, sui rilievi carbonatici e vulcanici intorno alla Capitale, si individuano aree con altezze di pioggia più elevate (>400 mm), mentre la gran parte dell'area metropolitana ricade all'interno della isoleta 320 mm. Nella stagione invernale la distribuzione della precipitazione è più omogenea: si osserva che l'isoleta 200 mm forma un'ansa che ingloba quasi tutta la città di Roma.

Analisi dei trend

I valori delle altezze di pioggia annuale, come anche i valori delle cumulate di ciascun mese dell'anno, risultano, in tutte le serie esaminate, estremamente dispersi intorno alle loro rispettive medie dei 31 anni analizzati. Tale variabilità rende difficile individuare la presenza di trend e di ciclicità, all'infuori dei comuni cicli stagionali. L'applicazione del test MK (Kendall et al. 1983; Sneyers 1990) sulle 46 stazioni per

ciascuno dei 12 mesi dell'anno e per il ciclo annuale (pari a 598 serie di dati) ha evidenziato la possibile presenza di un trend positivo nel 34% delle stazioni nel trimestre di gennaio, febbraio e marzo. Per il mese di ottobre si è ottenuto un 37% delle stazioni in tendenza negativa. In Tab. 3 sono riportati i risultati del test MK effettuato sulle 46 stazioni pluviografiche. Sono state esclusi dalla lista i casi con valore di significatività $p > 0,1$. Si può notare che la maggiore parte dei casi di rigetto dell'ipotesi nulla corrisponde alla stagione invernale seguita da quella autunnale, come già riscontrato nei risultati del test effettuato sulle serie mensili, mentre l'estate non è mai presente. Anche in questo caso, ciascuno dei 5 periodi considerati (le quattro stagioni e l'intero ciclo annuale) presenta coerenza nel segno del trend. Occorre, a questo proposito, sottolineare che i tre casi significativi relativi al ciclo annuale riportati in tabella manifestano trend negativo. Nell'ultima colonna a destra sono riportati i valori della pendenza del modello tendenziale lineare metodo *Sen's estimate slope*, che corrisponde al tasso di variazione annua.

In tabella 4 viene riportato il quadro riassuntivo dei risultati del MK test applicato alle serie delle 46 stazioni con le percentuali dei casi di rigetto dell'ipotesi nulla sul totale. Per ciascun mese i risultati relativi alle varie stazioni di registrazione sono risultati tra loro coerenti, giacché in nessuno dei singoli mesi analizzati si sono evidenziati trend di segno opposto.

Si delinea pertanto un quadro evolutivo delle precipitazioni nell'area in esame caratterizzato da un evidente trend crescente nei mesi invernali e nel mese di luglio, mentre in ottobre si focalizza la tendenza decrescente della piovosità. A scala annuale non emergono fenomeni tendenziali diffusi. Le analisi condotte nel Nord Italia mostrano una tendenza alla riduzione delle precipitazioni anche in inverno, oltre che in primavera ed in autunno (Cacciamani et al. 2001). Essendo la stagione autunnale quella nella quale si concentrano maggiormente le precipitazioni, la tendenza negativa evidenziata nel mese di ottobre potrebbe comportare una riduzione della precipitazione efficace.

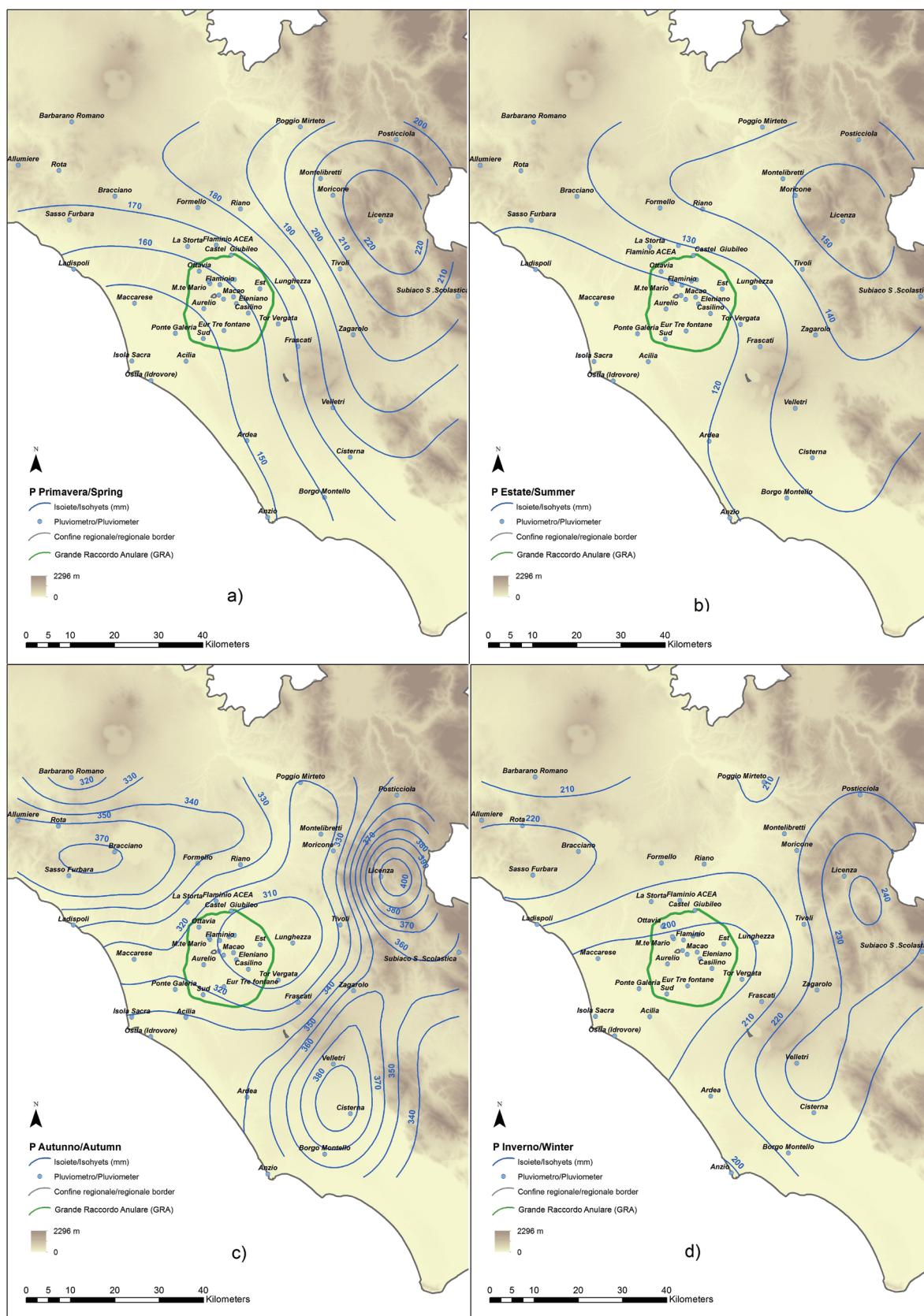


Fig. 3 - Isoete delle precipitazioni medie stagionali nell'area della Città di Roma e nelle zone circostanti (a – Primavera; b – Estate; c – Autunno; d – Inverno). Periodo di riferimento: 1984-2014 (Fonte dati: Regione Lazio – U.I.M. 2015).

Fig. 3 - Isohyets of average seasonal rainfall of the Rome City and surrounding areas. (a – Spring; b – Summer; c – Autumn; d – Winter). Reference period: 1984-2014 (Data source: Regione Lazio – U.I.M. 2015).

Tab. 3 - Risultati del test MK. Le serie sono comprese tra il 1984 ed il 2014.

Tab. 3 - MK test results. Series span from 1984 to 2014.

Stagione Season	Stazioni Stations	n. di serie n. of series	Test Z	p value	mm/a mm/y
annuale/ annual	Anzio	23	-1,690	0,090976	-8,94
annuale/ annual	Isola Sacra	31	-2,481	0,013084	-13,55
annuale/ annual	Sasso Furbara	22	-2,199	0,027847	-18,60
autunno/ autumn	Isola Sacra	31	-2,040	0,041393	-6,21
primavera/ spring	La Storta *	26	-2,359	0,018323	-4,85
primavera/ spring	Formello	31	-2,447	0,014386	-3,96
primavera/ spring	Ladispoli	31	-1,734	0,082983	-2,41
primavera/ spring	Riano Flaminio	24	-2,158	0,030929	-4,46
primavera/ spring	Sasso Furbara	22	-2,341	0,019214	-4,07
primavera/ spring	Roma Ottavia *	31	-1,904	0,056962	-2,73
primavera/ spring	Roma Tor Vergata *	31	-1,904	0,056962	-2,73
inverno/ winter	La Storta *	26	2,998	0,002721	6,23
inverno/ winter	Lunghezza *	27	2,543	0,010980	4,12
inverno/ winter	Ostia *	26	2,601	0,009298	6,16
inverno/ winter	Cisterna	31	1,819	0,068930	5,28
inverno/ winter	Frascati	31	2,142	0,032230	4,93
inverno/ winter	Roma Cassiodoro *	31	1,972	0,048657	3,30
inverno/ winter	Roma Collegio Romano *	31	2,329	0,019867	4,20
inverno/ winter	Roma Est *	31	1,700	0,089198	2,48
inverno/ winter	Poggio Mirteo	29	2,495	0,012602	5,37
inverno/ winter	Posticciola	28	2,016	0,043846	4,58
inverno/ winter	Subiaco	30	1,855	0,063530	6,57
inverno/ winter	Zagarolo	31	2,108	0,035069	6,21

* località ricadente nel territorio di Roma Capitale / Locality within the territory of the Municipality of Rome.

Tab. 4 - Sintesi dei risultati del test MK applicato alle 46 stazioni pluviometriche: il valore percentuale rappresenta il numero dei casi di rigetto dell'ipotesi nulla.

Tab. 4 - Summary results of MK test applied to the 46 pluviometric stations: the percentage value represent the number of null hypothesis rejection events.

Mese/Month	%	Pendenza/Slope
gennaio/January	6,5	+
febbraio/February	17,4	+
marzo/March	10,9	+
aprile/April	21,7	-
maggio/May	0,0	0
giugno/June	0,0	0
<td>34,8</td> <td>+</td>	34,8	+
agosto/August	6,5	-
settembre/September	0,0	0
ottobre/October	37,0	-
novembre/November	0,0	+
dicembre/December	2,2	+

Tuttavia l'aumento tendenziale delle precipitazioni in inverno, stagione in cui l'evapotraspirazione è minima, potrebbe risultare positivo per la ricarica delle falde. Eventi particolarmente intensi possono, però, determinare episodi di allagamenti ed alluvioni.

A completamento dell'analisi dei trend, allo scopo di individuare cambiamenti strutturali significativi nelle sequenze dei valori delle cumulate annuali di ciascuna stazione, sono state utilizzate le tecniche di analisi e verifica discusse nella sezione ad esse dedicata. Il 28% delle stazioni ha evidenziato, pur in assenza di trend significativo ed in ogni rispettiva serie temporale, la presenza di un solo *change point*, ovvero di un punto di svolta nell'andamento dei valori cumulati annuali, conseguente ad un'inversione di tendenza da discendente ad ascendente oppure ad un incremento della media. Nelle stazioni di Riano, Sasso Furbara e Moricone il punto di svolta è compreso tra il 1993 ed il 1995; a Ponte Salario, Castel Giubileo ed Isola Sacra tra il 2004 ed il 2006; a Barbarano Romano, Tor Vergata, Frascati, Collegio Romano, Poggio Mirteo, Anzio e Licenza tra il 2007 ed il 2008. Alcuni dei periodi suddetti potrebbero essere ricollegati alla successione di periodi sicciosi che sono stati localmente rilevati in modo più evidente in alcune stazioni.

Tra i grafici dei dati delle cumulate di pioggia su scala trimestrale, quelli della stagione invernale mostrano un andamento di valori ricorrente in quasi tutte le stazioni pluviografiche. In particolare, si osserva una inversione di tendenza, da negativa a positiva intorno al 1993. A titolo di esempio, nel grafico di figura 4a vengono riportati i valori del trimestre invernale del Collegio Romano e di quella collinare di Frascati. Nei grafici degli altri tre trimestri (Fig. 4b, 4c e 4d) invece i valori sembrano essere distribuiti in modo casuale.

Limitatamente al caso del trimestre invernale ed in particolare al confronto tra le serie delle stazioni di Collegio Romano

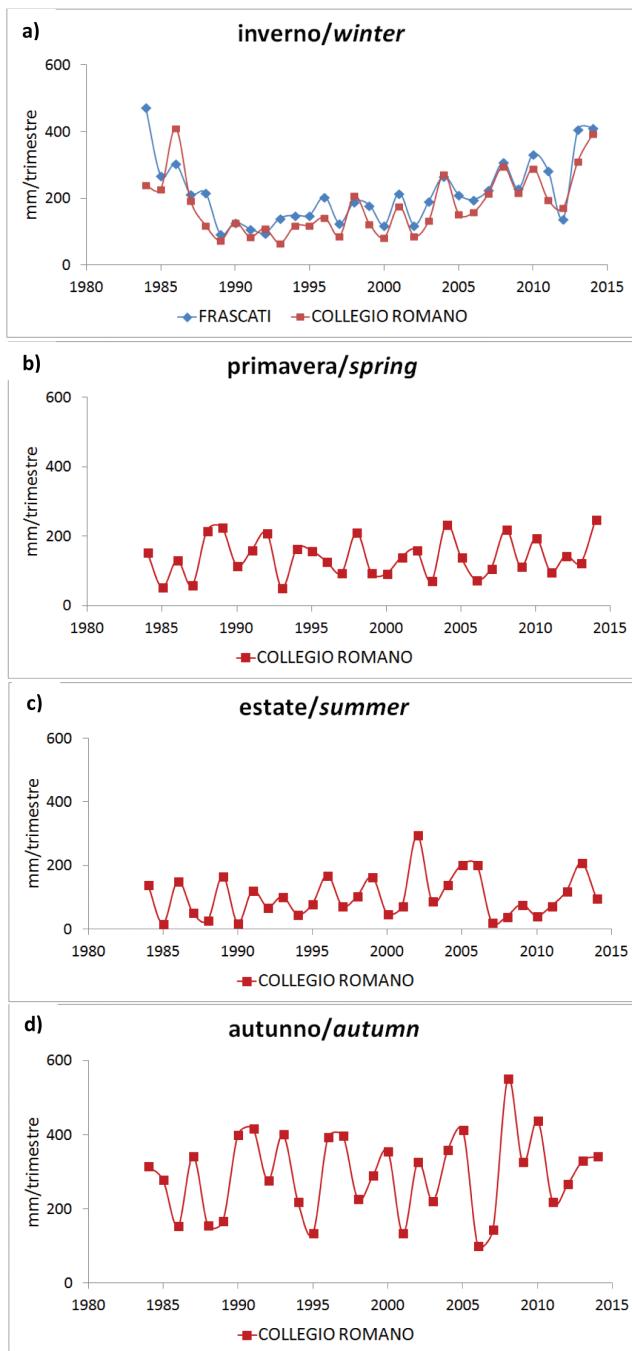


Fig. 4 - Cumulate di pioggia su scala trimestrale: a) Inverno; b) Primavera; c) Estate; d) Autunno. Periodo di riferimento 1984-2014.

Fig. 4 - Total seasonal rainfall: a) Winter; b) Spring; c) Summer; d) Autumn. Reference period 1984-2014.

e Frascati, al fine di avere una visione d'insieme più completa dei pluviogrammi delle serie annuali, è stata ampliata la finestra temporale delle osservazioni iniziando dal 1951 (Fig. 5).

Partendo dalle interpolazioni geostatistiche della distribuzione delle altezze di pioggia annuali nell'area di studio, è stato calcolato il volume degli apporti dei 31 anni al fine di ottenere la serie temporale di dati illustrati nel grafico di figura 6. Da tale grafico non si evidenzia alcun pattern evolutivo, bensì una variabilità notevole da un anno all'altro, con una media

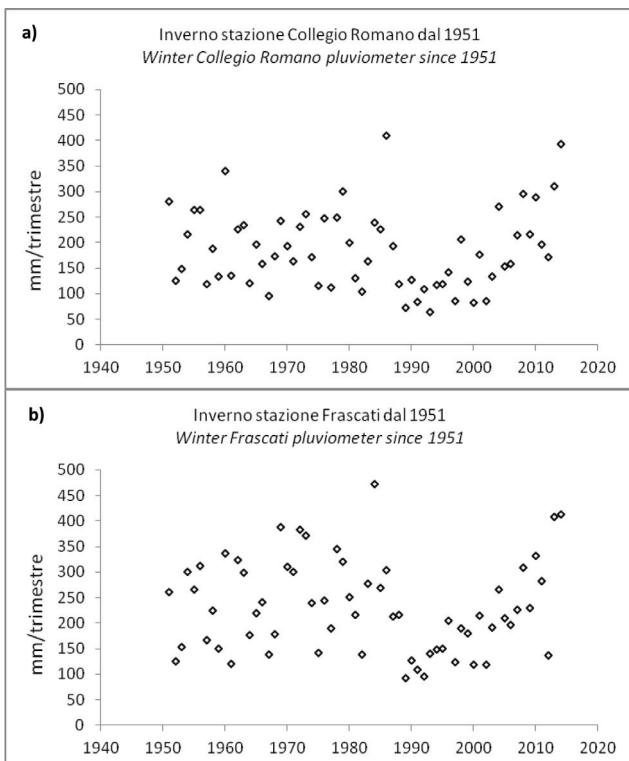


Fig. 5 - Grafici delle altezze di pioggia invernale registrate dal pluviometro di Collegio Romano (a) e Frascati (b). Periodo di Riferimento 1951-2014.

Fig. 5 - Winter rainfall recorded at Collegio Romano pluviometer (a) and at Frascati pluviometer (b). Reference Period 1951-2014.

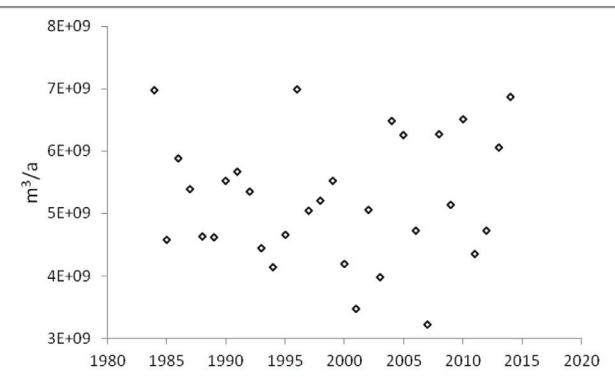
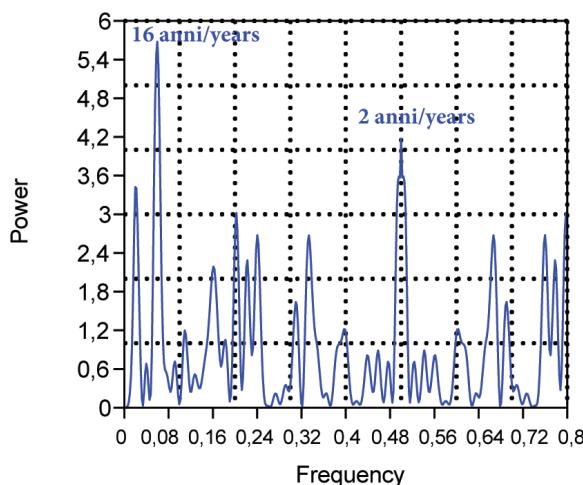


Fig. 6 - Volume degli apporti annuali di pioggia nell'area di interesse (5453 km²).

Fig. 6 - Rainfall annual volume inputs in the study area (5453 km²).

di 5,2E+09 m³/a ed una deviazione standard di 1,0E+09 m³/a, pari al ±20% della media.

Il periodogramma (Press et al. 1992), delle serie di Collegio Romano e Frascati (1951-2014), elaborato per ciascuna stagione e sull'intero ciclo annuale (Fig. 7), non mostra dei picchi particolarmente significativi. I picchi di frequenza principali delle due stazioni sono comunque coincidenti e le corrispondenti densità spettrali sono più alte nelle serie di Frascati e più prossime alla significatività nella stagione invernale (probabile ciclicità con periodo di 15-16 anni) ed autunnale (periodo di 2 anni). Lo spettro della trasformata Wavelet di Morlet (Torrence et al. 1998) su scala annuale nei 63 anni di osservazione evidenzia in entrambe le serie una ciclicità di periodo pari a circa 16 anni.



Regime pluviometrico

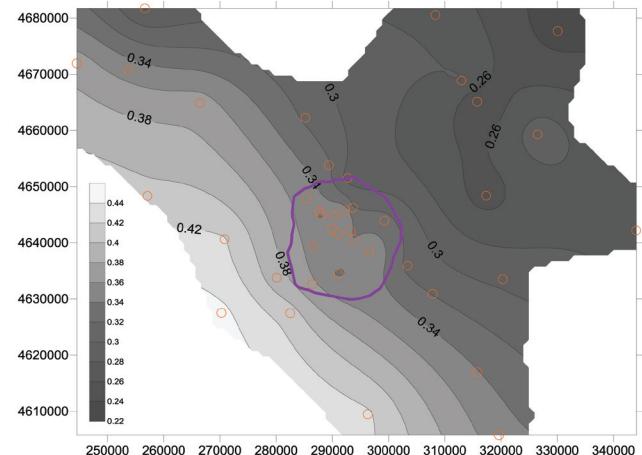
In relazione al regime pluviometrico, si osserva che, in base alla classificazione qualitativa del grado di stagionalità (Walsh e Lawler 1981), l'area analizzata ricade in due categorie: quella compresa fra i valori di SI 0.20 e 0.39, definita come uniforme ma con una stagione umida definita, e quella compresa fra SI 0.40 e 0.59, definita come piuttosto stagionale con una ridotta stagione secca. In figura 8 sono mappate le variazioni dello SI: si osserva che, procedendo dalle zone più interne del Lazio verso la costa, la stagione secca tende a definirsi sempre di più.

L'indice stagionale SI restituisce un valore sottostimato della stagionalità; infatti il calcolo dell'Indice stagionale per l'i-esimo anno mediato sull'intera serie, SI_i , mostra valori più elevati (Tab. 5). Il rapporto SI/SI_i consente di verificare il grado di variabilità del regime pluviometrico (Livada e Asimakopoulos 2005): più il rapporto è alto più le precipitazioni risultano concentrate in determinati mesi, di conseguenza valori alti del rapporto sono indice di maggiore affidabilità dell'indice stagionale. La tabella mostra anche come i valori degli indici SI ed SI_i siano condizionati dalla quota e dalla distanza dal mare (Kanelloupolou 2002).

Tab. 5 - Confronto fra gli indici stagionali dei pluviometri con valori più significativi.

Tab. 5 - Comparison among the most representative seasonal index values.

Pluviometro Pluviometer	Quota (m s.l.m.) Elevation (m a.s.l.)	Distanza dal mare in m Distance from sea in m	SI	SI_i medio average SI_i	SI/SI_i
MORICONE	285	56100	0.24	0.59	0.41
POSTICCIOLA	572	74400	0.23	0.52	0.44
TIVOLI	230	51200	0.25	0.56	0.45
ACILIA ACEA	9	8500	0.41	0.69	0.60
ARDEA	47	5400	0.42	0.67	0.63
ISOLA SACRA	10	1000	0.45	0.74	0.61
LADISPOLI	5	0	0.40	0.66	0.61
MACCARESE	7	4800	0.42	0.67	0.63



Analisi degli SPI

L'analisi dei dati relativi agli SPI a scala annuale per le stazioni pluviometriche ha evidenziato una sostanziale omogeneità negli andamenti per il periodo 1984-2014, identificando come periodi siccitosi ($SPI < -1$) gli anni 1987, 1990, 1993, 1999-2000, 2007, 2012 e come periodi umidi ($SPI > 1$) gli anni 1986, 1998, 2009, 2013-2014.

L'analisi della regionalizzazione dei trend lineari degli SPI, relativi al periodo 1984-2014 ed aggregati a scala annuale, (Fig. 9), semestrale e trimestrale/stagionale è stata condotta non considerando le stazioni: La Storta ACEA, Lunghezza, Anzio, Borgo Montello, Moricone, Riano e Sasso Furbara, in quanto le rispettive serie storiche non sono state reputate sufficientemente complete da risultare significative.

Dalla figura 9a si può evincere come nel trentennio considerato vi sia stato un generale leggero incremento delle precipitazioni nell'area analizzata a scala idrologica annuale, specie in corrispondenza delle zone più rilevate. In particolare, la figura 9b mette in evidenza come tale incremento nella zona urbana

interna al Grande Raccordo Anulare (GRA) abbia interessato le stazioni di Collegio Romano e Roma Aurelio ACEA.

L'analoga elaborazione dei dati di trend ottenuti a partire dai valori SPI semestrali per i periodi secchi (primavera ed estate) e umidi (autunno e inverno), riportati in figura 10, evidenzia come, in generale, le precipitazioni siano cresciute nel periodo autunnale-invernale e diminuite in quello primaverile-estivo, sia a scala dell'ampia area di studio che a quella della zona urbanizzata all'interno del GRA. La stazione pluviometrica del Collegio Romano costituisce per entrambi i semestri un'eccezione positiva, mentre quella di Monte Mario solo per il periodo primaverile-estivo.

L'ultima elaborazione eseguita (Fig. 11) si riferisce alle variazioni stagionali nei trend riscontrati a partire dagli SPI aggregati trimestralmente. A prescindere dalla scala di rappresentazione (area urbanizzata ed estesa) si osserva come nel trimestre invernale (gennaio – marzo) si sia registrato un marcato aumento nel tempo delle precipitazioni, mentre è altrettanto evidente la diminuzione delle piogge in primavera (aprile – giugno). Nel trimestre autunnale (ottobre – dicembre) la situazione appare relativamente stabile, anche se con una maggiore propensione alla diminuzione delle precipitazioni. Una situazione di sostanziale equilibrio si riscontra per il periodo estivo (luglio – settembre), anche se nell'area urbanizzata all'interno del GRA sembra essersi verificato un aumento degli apporti meteorici.

Cenni sulle caratteristiche termometriche dell'area

Riguardo le temperature, in figura 12 si riportano le isolerte delle medie stagionali, calcolate su serie temporali trentennali (1984-2014) a cadenza mensile. Le isolerte seguono in generale l'andamento della topografia: nelle zone interne,

verso i Monti Simbruini ed Ernici ed i Monti Sabini e Reatini, le temperature subiscono una flessione, come anche in corrispondenza dei rilievi vulcanici a nord e a sud della Capitale. Si osserva tuttavia come, in corrispondenza dell'area metropolitana di Roma, si delinei in ogni stagione un'area caratterizzata da temperature maggiori rispetto alle aree circostanti. Tali elevati valori potrebbero essere riconducibili all'elevata antropizzazione.

Tentativo di bilancio idrogeologico dell'area romana

Sebbene le informazioni riguardo alle caratteristiche pluviometriche e termometriche dell'area romana non siano scarse, non è realisticamente possibile al momento un'attendibile valutazione del suo bilancio idrogeologico. Infatti, ad un'aggiornata stima dei valori di precipitazione, temperatura dell'aria e dell'evapotraspirazione potenziale o reale, eventualmente calcolata, non corrisponde una altrettanto aggiornata conoscenza dei deflussi superficiali (stimabili solo in prima approssimazione da dati non recenti) e soprattutto una chiara situazione dei prelievi in falda e nei corsi d'acqua per vario uso. Inoltre, l'incertezza maggiore deriva dalla ben nota complessità del sistema acquifero nell'area della città di Roma (e.g. Capelli et al. 2008), nel cui ambito si conosce sufficientemente, solo a livello qualitativo, il ruolo di alcuni elementi, quali le depressioni e le elevazioni strutturali, il substrato a bassa permeabilità (a quiclude basale) e i principali complessi idrogeologici, nel delimitare gli acquiferi e definire gli scambi idrici delle acque sotterranee. Non è perfettamente nota neanche la reale estensione delle aree di ricarica degli acquiferi locali, poste anche al di fuori del territorio comunale, in corrispondenza di alcuni settori degli apparati vulcanici (Monti Sabatini e Colli Albani) e dei depositi alluvionali fluviali e fluvio-lacustri.

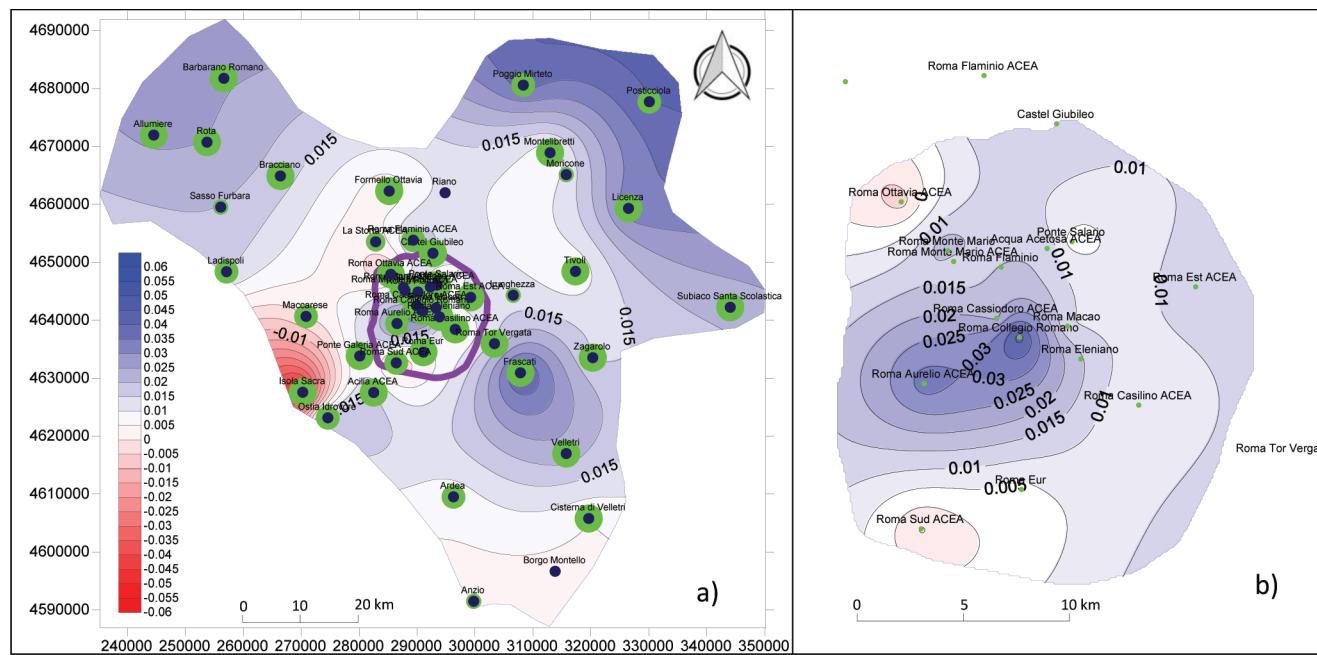


Fig. 9 - Tendenze nelle variazioni pluviometriche annuali nell'area di studio (a) e all'interno del GRA (b). Valori positivi indicano incrementi, valori negativi decrementi (Periodo di riferimento 1984-2014). La linea viola in a) rappresenta il GRA. Coordinate metriche.

Fig. 9 - Trends in annual rainfall variation in the study area (a) and in Rome (b). (Reference period 1984-2014). Purple line in a) highlights the GRA. Metric coordinates.

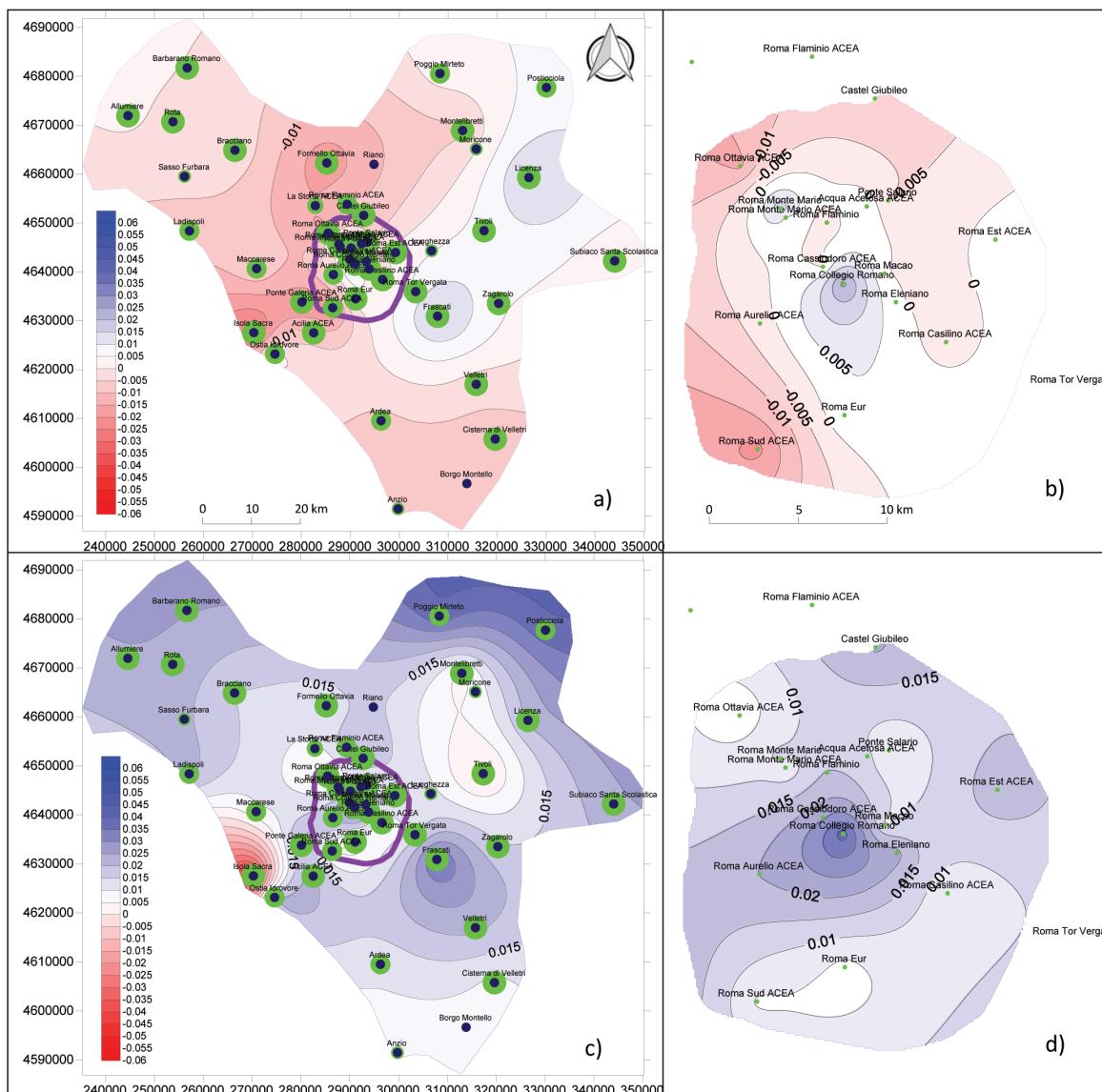


Fig. 10 - Tendenze nelle variazioni pluviometriche semestrali nell'area di studio (a – primavera ed estate; c – autunno e inverno) e all'interno del GRA (b – primavera ed estate; d – autunno e inverno). Valori positivi indicano incrementi, valori negativi decrementi (Periodo di riferimento 1984-2014). La linea viola in a) e c) rappresenta il GRA. Coordinate metriche.

Fig. 10 - Trends in six-months rainfall variation in the study area (a – spring and summer; c – autumn and winter) and in Rome (b – spring and summer; d – autumn and winter). (Reference period 1984-2014). Purple line in a) and c) highlights the GRA. Metric coordinates.

Nonostante la suddetta premessa, alcune considerazioni riguardanti il bilancio idrogeologico, sebbene basate su drastiche semplificazioni e considerando l'area urbana di Roma come possibile unità di bilancio, saranno di seguito presentate. Gli elementi che partecipano al bilancio idrogeologico dell'area che è stato possibile valutare sono: i) le precipitazioni, stimate in circa 790 mm/a; ii) l'evapotraspirazione reale, che, calcolata mediante la formula di TURC (1955) considerando una temperatura media di circa 16°C, è risultata circa 600 mm/a; iii) il ruscellamento superficiale, che si attesta sui 25 m³/s, corrispondenti a circa 610 mm/a, è stato stimato dalla differenza di portata tra la sezione alla foce del Fiume Tevere (circa 240 m³/s; Boni et al. 1996) e le sezioni in entrata dei corsi d'acqua Tevere, Aniene, Treia, Capore ed il contributo di alcune sorgenti

puntuali e lineari nell'ambito del bacino del Tevere (complessivamente circa 215 m³/s; Boni et al. 1996). Si ribadisce, inoltre, che i prelievi idrici da pozzi e gli altri attingimenti all'interno dell'area urbana sono di difficile stima, per la scarsa conoscenza degli utilizzi idrici connessi alle attività economiche presenti nell'area. In definitiva, considerando gli altri elementi coinvolti nell'equazione del bilancio idrico ($I=P-ET-R\pm U$) ed un'area di ricarica zenitale nell'intorno dell'area urbana di circa 1300 km², l'aliquota destinata all'infiltrazione è negativa (nell'ordine dei -400 mm/a, corrispondenti a circa -15 m³/s). Pertanto deve essere preso in considerazione un pari contributo di risorsa idrica sotterranea da aquiferi limitrofi, con aree di ricarica presumibilmente situate in alcuni settori dei Monti Sabatini e dei Colli Albani. Tale contributo è compatibile con il valo-

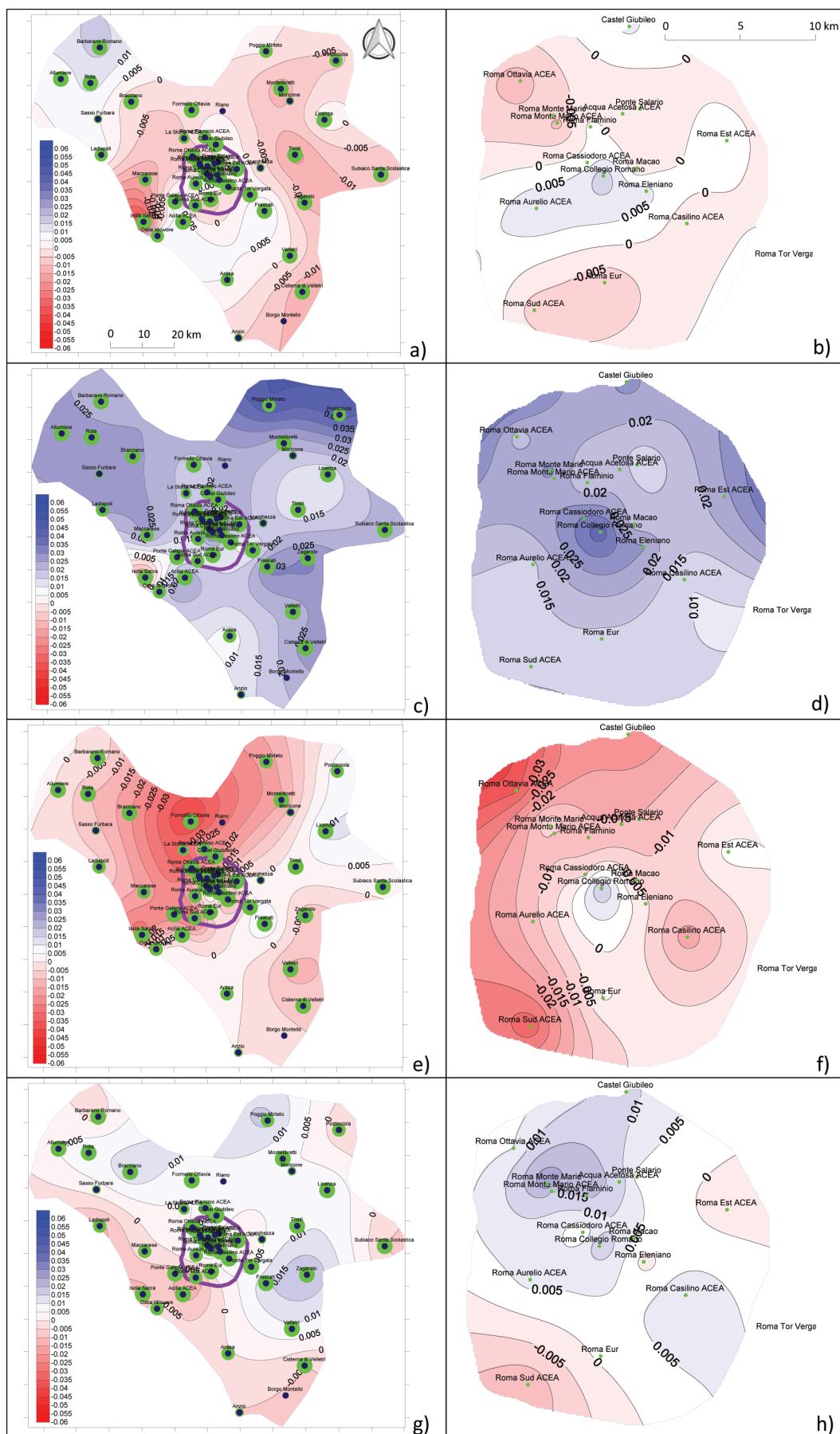


Fig. 11 - Tendenze nelle variazioni pluviometriche trimestrali nell'area di studio (a - autunno; c - inverno; e - primavera; g - estate) e all'interno del GRA (b - autunno; d - inverno; f - primavera; h - estate). Valori positivi indicano incrementi, valori negativi decrementi (Periodo di riferimento 1984-2014). La linea viola in a) c) e) g) rappresenta il GRA. Coordinate metriche.

Fig. 11 - Trends in three-months rainfall variation in the study area (a - autumn; c - winter; e - spring; g - summer) and in Rome (b - autumn; d - winter; f - spring; h - summer). (Reference period 1984-2014). Purple line in a) c) e) g) highlights the GRA. Metric coordinates.

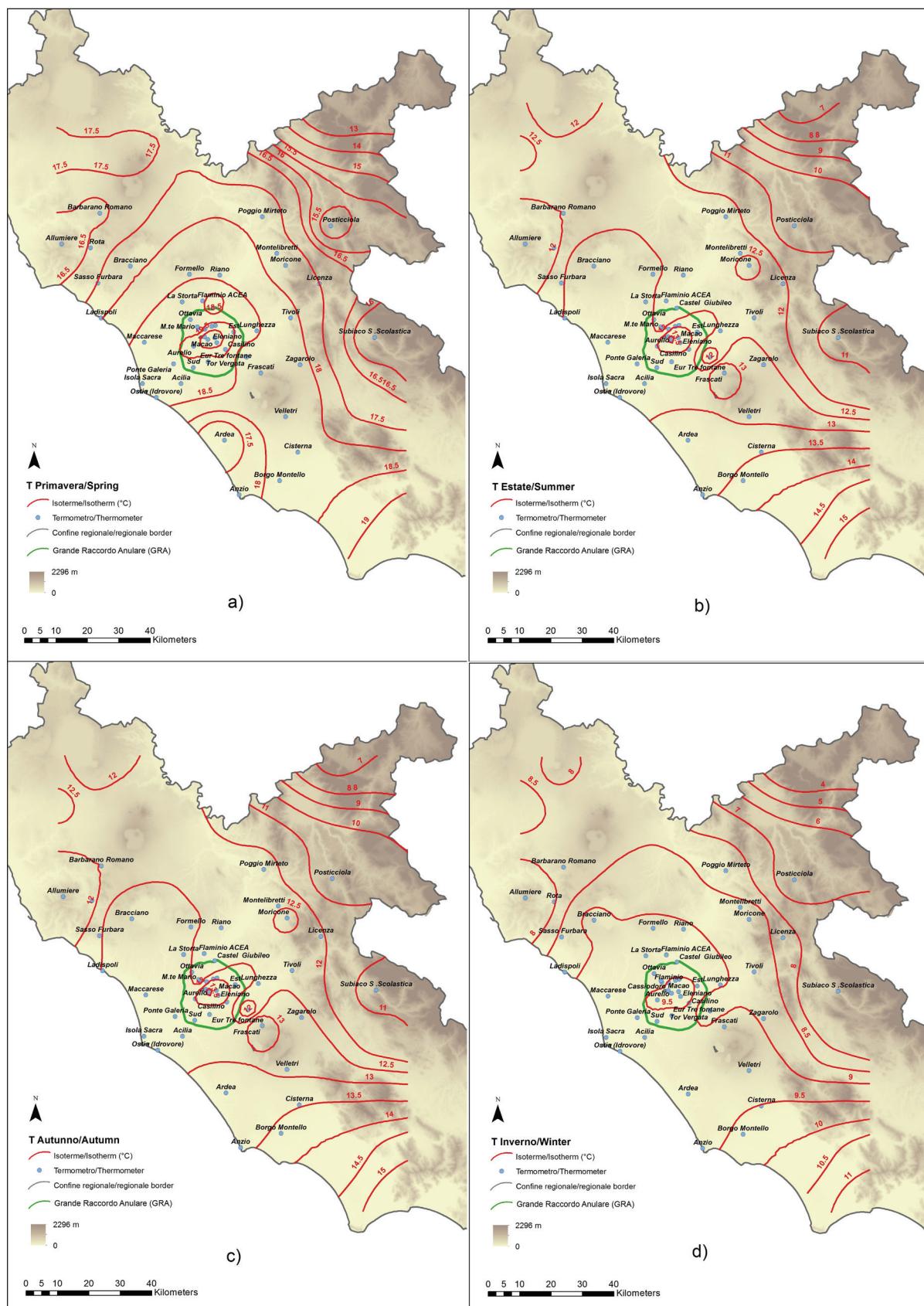


Fig. 12 - Isoterme delle temperature medie stagionali (a – primavera; b – estate; c – autunno; d – inverno) Periodo di riferimento 1984-2014 (Fonte dati: Regione Lazio – U.I.M. 2015).

Fig. 12 - Isotherms of average seasonal temperatures (a – Spring; b – Summer; c – Autumn; d - Winter). Reference period 1984-2014 (Data source: Regione Lazio – U.I.M. 2015).

re della portata naturale media complessiva versata nel bacino del Fiume Tevere dalle idrostrutture degli apparati vulcanici nell'intorno dell'area urbana (circa 15 m³/s; Cesari 2010).

Conclusioni

Le analisi condotte a partire dai dati pluviometrici, relativi al periodo 1984 – 2014 e a oltre 40 stazioni pluviometriche presenti in un'ampia area (6800 km²), all'interno della quale ricade il territorio di Roma Capitale, hanno permesso di evidenziare come durante il trentennio esaminato la situazione sia sia modificata, non tanto sotto il profilo quantitativo degli approvvigionamenti meteorici (793 mm/anno nell'area urbana di Roma; 945 mm/anno nelle aree collinari circostanti), ma piuttosto nella loro modalità di distribuzione durante le stagioni. I differenti procedimenti adottati (test di Mann-Kendall, Pettitt e CUSUM, SPI) concordano nel rilevare una maggiore concentrazione delle piogge nel periodo invernale, una generale leggera diminuzione in autunno (che all'interno del GRA può essere valutato in sostanziale equilibrio), un marcato decremento delle precipitazioni in primavera e, infine, una situazione relativamente stabile in estate, anche se nell'area urbanizzata di Roma si è riscontrato un trend positivo.

La presenza dei rilievi influenza sulle precipitazioni come evidenziato dalle elaborazioni relative indice di stagionalità SI, il quale assume valori ricadenti tra le due categorie di stagionalità "uniforme ma con una stagione umida definita" (nella maggiore parte dei casi) e "piuttosto stagionale con una ridotta stagione secca".

Riguardo alle temperature, le elaborazioni condotte hanno permesso di evidenziare a scala stagionale come in corrispondenza dell'area metropolitana di Roma sia sempre presente una zona di massimo termometri, attribuibile alle attività antropiche, mentre nelle zone circostanti appare evidente l'influenza delle quote topografiche sui valori termici riscontrati.

Sulla base dei parametri termometrici e pluviometrici è stata stimata un'evapotraspirazione reale pari a 600 mm/a. Il confronto dei dati da letteratura degli afflussi e deflussi ha evidenziato un deficit negativo compensato da contributi idrici provenienti da aree di ricarica ed acquiferi limitrofi.

BIBLIOGRAFIA

- Boni C., Petitta M., Preziosi E., Sereni M. (1996). Acque continentali. Idrogeologia. In: Il mare del Lazio, 220-261. Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Regione Lazio.
- Cacciamani C., Lazzeri M., Selvini A., Tomozeiu R., Zuccherelli A. (2001). Evidenza di cambiamenti climatici sul Nord Italia. Parte I: analisi delle temperature e delle precipitazioni. Quaderno Tecnico ARPA SMR 04/2001.
- Capelli G., Mazza R., Taviani S. (2008). Acque sotterranee nella città di Roma. In: Funicello R., Praturlon A., Giordano G. (eds.) La Geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXXX:221-245.
- Cesari G. (2010). Il bacino del Tevere, il suo ambiente idrico e l'impatto antropico. Consorzio Tiberina. Primo Rapporto Annuale, 27-44.
- Conte G., Del Bon A., Gafa R.M., La Vigna F., Martarelli L. (2015). Dati termo-pluviometrici ed idrometrici "Thermo-pluviometric and hydrometric data". In: La Vigna F. e Mazza R. (eds.) Carta Idrogeologica di Roma – Scala 1:50.000 "Hydrogeological Map of Rome- Scale 1:50.000". 25-28.
- Corti S., Decesari S., Fierli F., Fuzzi S., Provenzale A., Sabbioni C., Santoleri R., Vitale V. (2009). Clima, cambiamenti climatici globali e loro impatto sul territorio nazionale. "Climate, global climate change and its impact on the national territory". Quaderni dell'ISAC-CNR, volume 1.
- Gao X., Giorgi F. (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution regional climate projections. Global and Planetary Change, 62, 195-209.
- Giorgi F. (2005). Climate change prediction. Climatic Change, 73, 239-265.
- Kanellopoulou E. A. (2002). Spatial distribution of rainfall seasonality in Greece. Weather Vol. 57.
- Kendall M., Stuart A., Ord J.K. (1983). The advanced theory of statistics. Volume 3, Charles Griffin e Company Limited, London e High Wycombe.
- La Vigna F., Bonfà I., Coppola A.G., Corazza A., Di Filippo C., Ferri G., Martelli S., Rosa C., Succhiarelli C. (2016). La città di Roma e le sue falde acquifere: dalle criticità, alle opportunità di resilienza urbana. Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater 4/142: 59-70. DOI: 10.7343/AS-132-15-0159
- La Vigna F., Mazza R. (eds.) (2015). Carta Idrogeologica di Roma- Scala 1:50.000 "Hydrogeological Map of Rome- Scale 1:50.000". Roma Capitale. Edizioni POLLGRAF. Pomezia.
- Livada I.e Asimakopoulos D.N. (2005). Individual seasonality index of rainfall regimes in Greece. Climate Research, Vol 28: 155-161.
- Matheron G. (1962) Traité de géostatistique appliquée, Mémoires, France Bureau de recherches géologiques et minières Mémoires (France). 321 pp.
- Mazza R., La Vigna F., Capelli G., Dimasi M., Mancini M., Mastrorillo L. (2016). Idrogeologia del territorio di Roma. Acque Sotterranee Italian Journal of Groundwater: 4/142,19-30. DOI: 10.7343/AS-129-15-0156
- McKee T.B., Doesken N. J., Kliest J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA. 179-18.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan 15th-20th, 1995, Dallas TX, pp. 233-236.
- National Drought Mitigation Center – University of Nebraska (2015). <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx> (ultimo accesso 31/12/2015).
- Oosterbaan R.J., Sharma D.P., Singh K.N., Rao K.V.G.K (1990). Symposium on Land Drainage for Salinity Control in Arid and Semi-Arid Regions, February 25th to March 2nd, 1990, Cairo, Egypt, Vol. 3, Session V, 373-383.
- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. Applied Statistics, 28(2).
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (1992). Numerical Recipes in C. Cambridge University Press.
- Regione Lazio – Ufficio Idrografico e Mareografico (U.I.M.) (2015) <http://www.idrografico.roma.it/> (ultimo accesso 31/12/2015).
- Ryan S.E., Porth L.S., Troendle (2002). Defining phases of bedload transport using piecewise regression. Earth Surface Processes and Landforms 27: 971-990.
- Sen P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63:1379–1389.
- Smadi M.M., Zghoul A. (2006). A sudden change in rainfall characteristics in Amman, Jordan during the mid 1950s. American Journal of Environmental Sciences, 2(3), 84-91.
- Sneyers R. (1990). On the statistical analysis of series of observations. Technical note n. 143, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Torrance, C. e Compo G.P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society 79:61-78.
- Von Storch H. (1995). Chapter 2: Misuses of statistical analysis in climate research. pp. 11-26 In: Von Storch H. e Navarra A. Eds., Analysis of Climate Variability – Application of Statistical Techniques, Springer, Berlin.
- Walsh R.P.D. e Lawler D.M. (1981). Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time. Water, 36: 201-208.
- Zhang X., Harvey K.D., Hogg W.D., Yuzyk T.R. (2001). Trends in Canadian streamflow. Water Resources Research, 37(4):987-998.