

**Autorità di bacino del fiume Tevere – Distretto dell'Appennino Centrale**

## **OSSERVATORIO UTILIZZI IDRICI DISTRETTO IDROGRAFICO DELL'APPENNINO CENTRALE**

### **CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA DEL REGIME PLUVIOMETRICO NELL'AREA DEL DISTRETTO IDROGRAFICO DELL'APPENNINO CENTRALE NEL PERIODO 1951-2017**

#### *Premessa*

Il presente report, finalizzato a identificare un set di indicatori dello stato di scarsità idrica relativo ad eventi di siccità, adotta la metodologia di analisi per la valutazione dell'intensità di evento siccitoso basato sull'anomalia pluviometrica mutuata anche dalla *World Meteorological Organization*. Indicatori complementari dovranno essere identificati con l'obiettivo di caratterizzare un quadro di scarsità idrica connesso alle specifiche caratteristiche fisiche e d'uso della risorsa del distretto dell'Appennino Centrale sulla base del modello INOPIA sviluppato dal Dipartimento Nazionale di Protezione Civile e dall'Istituto di Ricerca sulle Acque del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRSA).

Il presente report è stato redatto, in collaborazione con l'Autorità di bacino del fiume Tevere su decisione dell'Osservatorio, dai seguenti ricercatori del CNR-IRSA: dott. Emanuele Romano, ing. Nicolas Guyennon, dott.sa Anna Bruna Petrangeli, dott.sa Elisabetta Preziosi.

*Luglio-Novembre 2017*

## 1. INTRODUZIONE

Al fine di inquadrare l'anno idrologico 2016-2017, caratterizzato da condizioni di deficit pluviometrico accentuate, nell'ambito degli andamenti climatici di lungo periodo osservati nel Distretto dell'Appennino Centrale, sono state analizzate le serie storiche di precipitazione mensile relative al periodo gennaio 1951-agosto 2017.

A tal fine sono stati utilizzati i dati di precipitazioni disponibili condivisi dalle Regioni e dall'Autorità d'ambito ottimale del Lazio Centrale (in collaborazione con il gestore AceaATO2 spa) nell'ambito dell'Osservatorio e scaricabili dai siti internet elencati in tabella 1

PRECIPITAZIONI				
REGIONE	NUMERO DI STAZIONI	PERIODO	FONTE	SITO INTERNET
Lazio	30	1916-2017	Ufficio Idrografico e Mareografico della Regione Lazio	<a href="http://www.idrografico.roma.it/default.aspx">http://www.idrografico.roma.it/default.aspx</a>
Umbria	72	1916-2017	Servizio Idrografico Regione Umbria	<a href="http://sirperugia.altervista.org/public/index#">http://sirperugia.altervista.org/public/index#</a>
Marche	70	1960-2017	Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico	<a href="http://app.protezionecivile.marche.it/sol/indexjs.php?lang=it">http://app.protezionecivile.marche.it/sol/indexjs.php?lang=it</a>
Abruzzo	211	1881-2016	Servizio Idrografico e Mareografico della Regione Abruzzo	<a href="http://www.regione.abruzzo.it/xidrografico/">http://www.regione.abruzzo.it/xidrografico/</a>
Toscana	18	1916-2017	Regione Toscana – Settore Idrologico Regionale SIR	<a href="http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=2&amp;IDSS=6">http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=2&amp;IDSS=6</a>

Tabella 1 – Prospetto riassuntivo dei dati di pluviometria analizzati

In figura 1 è mostrata la posizione dei pluviometri analizzati e i sub-distretti considerati per l'aggregazione spaziale dei dati. E' importante sottolineare che la maggior parte delle stazioni è risultata operativa per periodi inferiori al periodo di analisi. Inoltre, la maggior parte delle stazioni ubicate nel Molise pur non afferenti al territorio del Distretto dell'Appennino Centrale sono state considerate nella presente analisi al fine di rendere più robusta l'analisi climatica sul versante adriatico. Il presente quadro territoriale di analisi (al momento con esclusione del solo bacino del fiume Fiora), ispirato dalla suddivisione in sub-distretti

dell'aggiornamento del Piano di Gestione del Distretto (PGDAC.2), potrà essere implementato in relazione ad una più dettagliata caratterizzazione della produzione della risorsa per specifici ambiti fisici (acquiferi delle strutture carbonatiche, vulcaniche e alluvionali del distretto) funzionali all'approvvigionamento della risorsa operato dagli schemi idrici a servizio dei diversi bacini d'utenza (*catchment areas*). Nel prosieguo alcune analisi sono riferibili a questa implementazione del quadro territoriale.

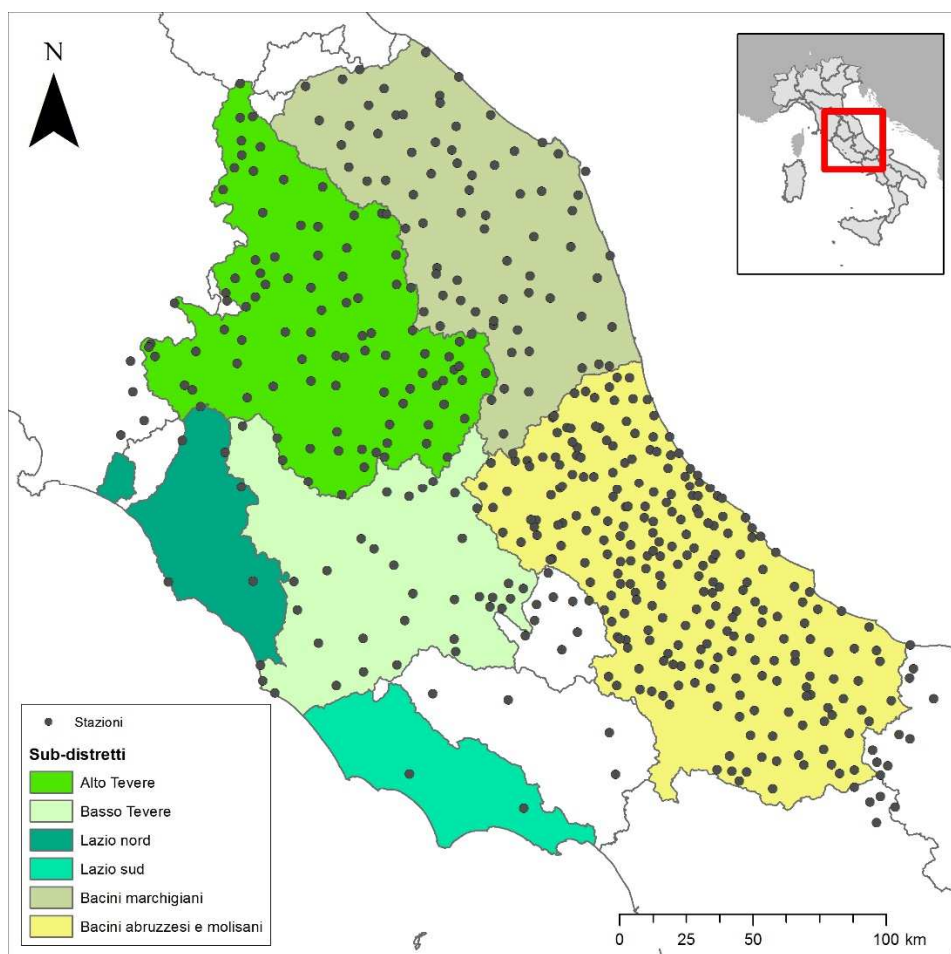


Figura 1 Ubicazione dei pluviometri utilizzati per l'analisi dei trend pluviometrici nell'area del Distretto dell'Appennino Centrale (1951-2017).

## 2. SPAZIALIZZAZIONE DELLE PRECIPITAZIONI

Al fine di ottenere mappe delle precipitazioni mensili nel periodo in esame, i dati puntuali di precipitazione osservati sono stati interpolati mediante la tecnica del kriging (i.e. Cressie, 1988). Le analisi presentate nel seguito (analisi delle tendenze e delle ciclicità, analisi delle anomalie di precipitazione mediante *Standardized*

*Precipitation Index* – SPI. McKee et al. 1993; APAT, 2006; WMO, 2012) sono state effettuate sulle serie storiche di precipitazione media su due macro-aree: versante tirrenico (comprendente i sub-distretti Alto Tevere, Basso Tevere, e dei bacini laziali del Lazio Nord e del Lazio sud) e versante adriatico (comprendente i sub-distretti dei bacini delle Marche Nord e Marche Sud e dei bacini dell’Abruzzo e Molise). L’autocorrelazione spaziale dei dati di precipitazioni osservati è stata modellata mediante un variogramma di tipo sferico, i cui parametri di best-fit sono stati calibrati alla scala mensile per ognuna delle due macro-aree. L’interpolazione mediante kriging è stata effettuata su una griglia regolare di dimensioni pari a 5x5 km<sup>2</sup>.

### 3. ANALISI DELLE TENDENZE PLUVIOMETRICHE

L’analisi delle tendenze pluviometriche è stata effettuata sul periodo 1961-2017 mediante la tecnica del sequential Mann-Kendall (Gerstengarbe and Werner, 1999).

Il test non-parametrico di Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) è basato sul concetto di “*ranking*”, cioè sulle caratteristiche statistiche di ordinamento della serie storica in esame. Nella presente analisi sono state considerate finestre temporali “sequenziali”, quindi di lunghezza crescente: l’analisi per l’anno 1961 (assunto che l’anno di inizio è il 1951) si riferisce all’applicazione del test di Mann-Kendall alle serie storiche di precipitazione mensile relative al periodo 1951-1961; l’analisi per l’anno 1962 si riferisce all’applicazione del test di Mann-Kendall alle serie storiche di precipitazione mensile relative al periodo 1951-1962. In maniera analoga per tutti gli altri anni, fino al 2017. Il periodo storico di analisi prende a riferimento l’inizio degli anni ’50 sia per avere una consistente base campionaria sia al fine di enfatizzare gli effetti sui grandi schemi idrici ideati, progettati e realizzati con riferimento alla risorsa idrica valutata disponibile per la loro massima efficacia di soddisfacimento degli usi. Peraltro gli anni ’60 sono stati caratterizzati nel distretto da un’accentuata precipitazione atmosferica anche con riferimento al precedente periodo storico.

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati ottenuti per il versante tirrenico (figura 2) e adriatico (figura 3). Tali grafici vanno letti come segue: la griglia centrale di ogni grafico mostra i risultati del test di Mann-Kendall sequenziale applicato alla scala mensile dal 1961 al 2017. Sulla sinistra, la barra in legenda rappresenta il coefficiente tau di Kendall normalizzato. I toni caldi (scala colorimetrica nella barra a sinistra) indicano una tendenza positiva con una significatività statistica superiore al 95% (valori > 1.96); analogamente, i toni freddi (scala colorimetrica nella barra a sinistra) indicano una tendenza in diminuzione con una significatività statistica superiore al 95% (valori < -1.96). Il valore della corrispondente retta di regressione lineare, stimata mediante la tecnica del Sen’s slope (Sen, 1968) sull’intero periodo di riferimento ed espressa in mm/anno è riportato per ogni mese sull’asse y secondario. La significatività statistica dei trend stimati è espressa come segue: ° p-value < 0.1, \* p-value < 0.05, \*\* p-value < 0.01, e \*\*\* p-value < 0.001. I valori contraddistinti

dall'apice " ° " indicano che l'ipotesi di stazionarietà statistica delle precipitazioni è da rigettare con una probabilità di errore inferiore al 10%.

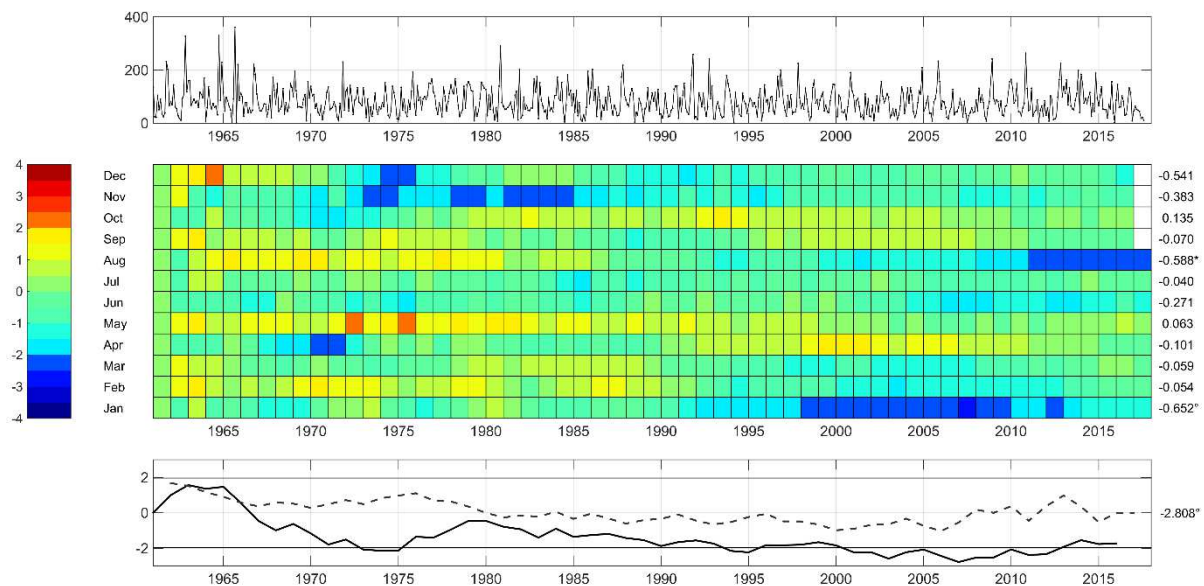


Figura 2 - Risultati dell'analisi delle tendenze pluviometriche (1961-2017) mediante il test di Mann-Kendall sequenziale per il versante tirrenico (Alto Tevere, Basso Tevere, Lazio nord, Lazio sud). Il grafico nel pannello superiore è riferito al valore di precipitazione media mensile sull'area considerata. Il grafico nel pannello inferiore è riferito alla significatività del test di Mann-Kendall sequenziale in avanti (forward, linea continua) e a ritroso (backward, linea tratteggiata)

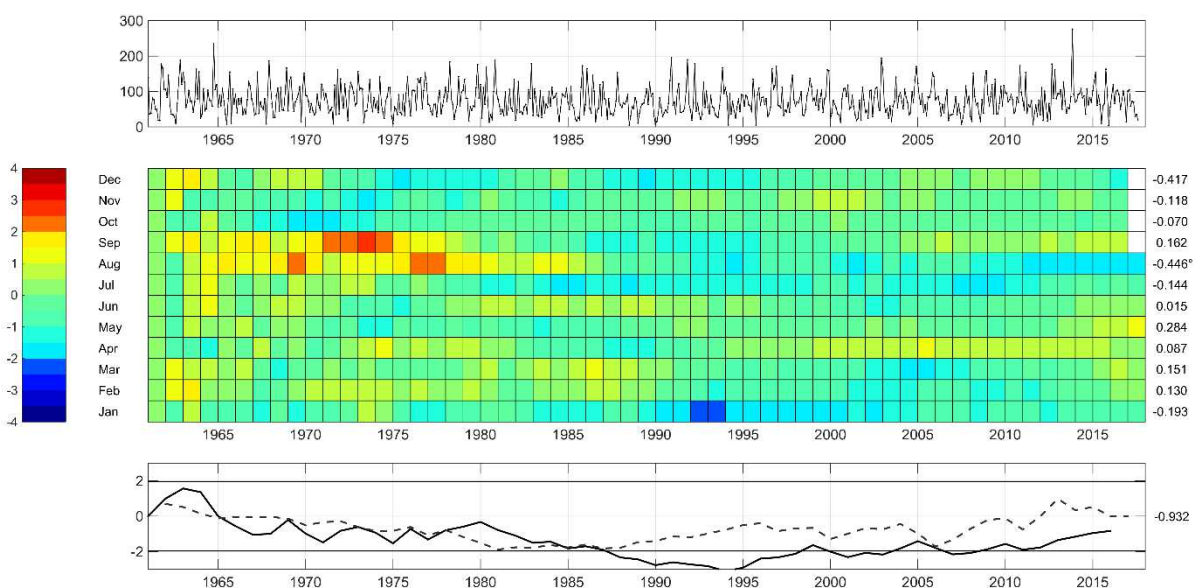


Figura 3 - Risultati dell'analisi delle tendenze pluviometriche (1961-2017) mediante il test di Mann-Kendall sequenziale per il versante adriatico (Marche, Abruzzo e Molise). Il grafico nel pannello superiore è riferito al valore di precipitazione media mensile sull'area considerata. Il grafico nel pannello inferiore è riferito alla significatività del test di Mann-Kendall sequenziale in avanti (forward, linea continua) e a ritroso (backward, linea tratteggiata)

Il test di Mann-Kendall sequenziale suggerisce una significativa diminuzione ( $p\text{-value} < 0.1$ ) delle precipitazioni invernali (gennaio in particolare) e nel mese di agosto sul versante tirrenico. Una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni invernali è registrata anche sul versante adriatico, seppur statisticamente non significativa. Alla scala annuale (pannelli inferiori delle figure 2 e 3) è verificata una significativa ( $p\text{-value} < 0.1$ ) diminuzione delle precipitazioni sul versante tirrenico sul periodo 1961-2016 pari a circa 160 mm. Per quanto riguarda il versante adriatico, alla scala annuale si registra una diminuzione delle precipitazioni e circa 50 mm sul versante adriatico.

E' importante sottolineare che l'analisi delle tendenze presentata è relativa all'intero periodo di analisi. I periodi siccitosi registrati nell'area del Distretto nel recente passato (2002, 2007, 2012, 2017) sono quindi da inquadrarsi in un contesto climatico caratterizzato da una significativa diminuzione delle precipitazioni che interessa l'intero periodo analizzato.

#### 4. ANALISI DELLE ANOMALIE DI PRECIPITAZIONE MEDIANTE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX.

Il segnale climatico medio sulle aree di interesse è stato rappresentato mediante lo Standardized Precipitation Index (SPI, McKee et al. 1993) calcolati sulla precipitazione media su ogni area territoriale di analisi (versante tirrenico e versante adriatico) dal 1951 a oggi.

Mediante l'SPI la funzione di probabilità delle precipitazioni cumulate su una determinata scala di aggregazione (tipicamente da 1 a 24 mesi) viene trasformata nella corrispondente probabilità cumulata di una distribuzione gaussiana a media 0 e deviazione standard 1. Tale procedura (schematizzata nel grafico di figura 3 nel caso di una distribuzione statistica Gamma) può essere così descritta:

1. Per ogni serie storica relativa ad un dato mese e ad un dato pixel sono stimati i parametri di *best fit* di una distribuzione *gamma* mediante il metodo della massima verosimiglianza. Per la calibrazione di tali parametri sono state considerate le serie di precipitazione del periodo 1961-1990, considerata dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) la base-line per la valutazione delle variazioni climatiche in atto (Bates et al. 2008)
2. La distribuzione di probabilità cumulata così ottenuta viene invertita utilizzando la distribuzione normale inversa in modo da ottenere il corrispondente valore di precipitazione standardizzato (*SPI1*)
3. Al fine di valutare la bontà del *fit* si applica il test di normalità di Lilliefors (1967) ad ogni serie temporale standardizzata.

4. La medesima procedura di standardizzazione viene applicata ad ogni serie temporale di precipitazione aggregata a  $n$  mesi (genericamente indicata come  $SPI_n$ ) ottenendo differenti Standardized Precipitation Indices.

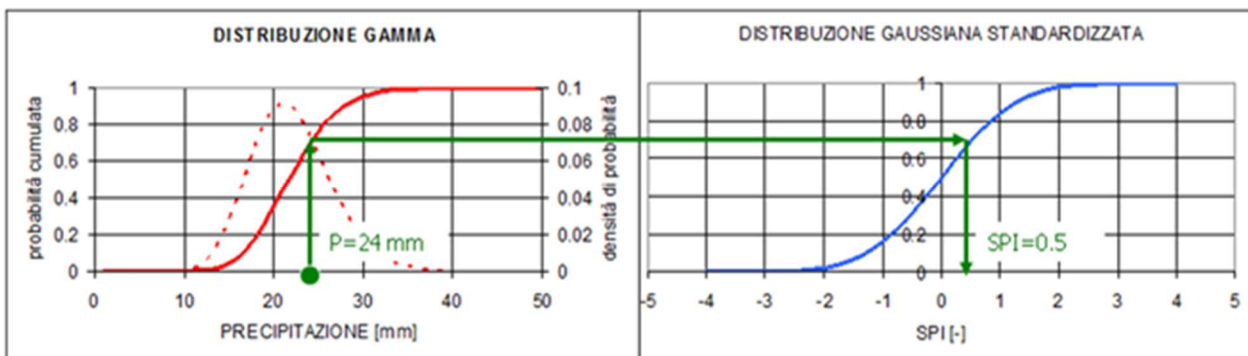


Figura 4 - Rappresentazione grafica della definizione dello Standardized Precipitation Index

La procedura descritta presenta il vantaggio di poter effettuare un confronto diretto tra serie di precipitazione osservate in posti diversi (quindi che possono presentare medie e varianze differenti).

In genere (tabella 2) si utilizza la seguente classificazione (qualitativa) per i valori di  $SPI$  (McKee et al., 1993).

VALORE	CLASSIFICAZIONE
$SPI \geq +2$	Estremamente piovoso
$+1.5 \leq SPI < +2$	Molto piovoso
$+1 \leq SPI < +1.5$	Moderatamente piovoso
$-1 \leq SPI < +1$	Nella norma
$-1.5 \leq SPI < -1$	Moderatamente secco
$-2 \leq SPI < -1.5$	Molto secco
$SPI \leq -2$	Estremamente secco

Tabella 2 – Classificazione dello Standardized Precipitation Index (McKee et al. 1993)

Nelle figure 5, 6, 7 e 8 sono riportati, per ogni unità territoriale (versante tirrenico e versante adriatico), gli andamenti temporali degli SPI relativi alle precipitazioni cumulate su 6, 9, 12 e 24 mesi, rispettivamente. Sono state considerate le seguenti unità territoriali: 1) Alto Tevere; 2) Basso Tevere, Lazio nord e Lazio sud; 3) Marche nord e sud; 4) Abruzzo e Molise.

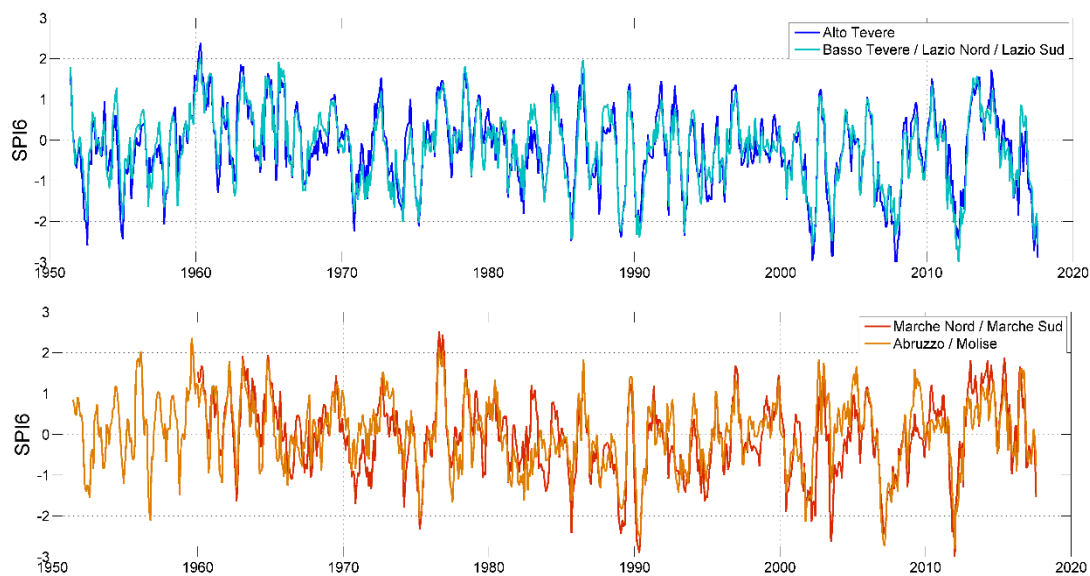


Figura 5 – Standardized Precipitation Indices a 6 mesi (SPI6) per le seguenti unità territoriali: Alto Tevere, Basso Tevere / Lazio nord / Lazio sud, Marche nord / Marche sud, Abruzzo / Molise

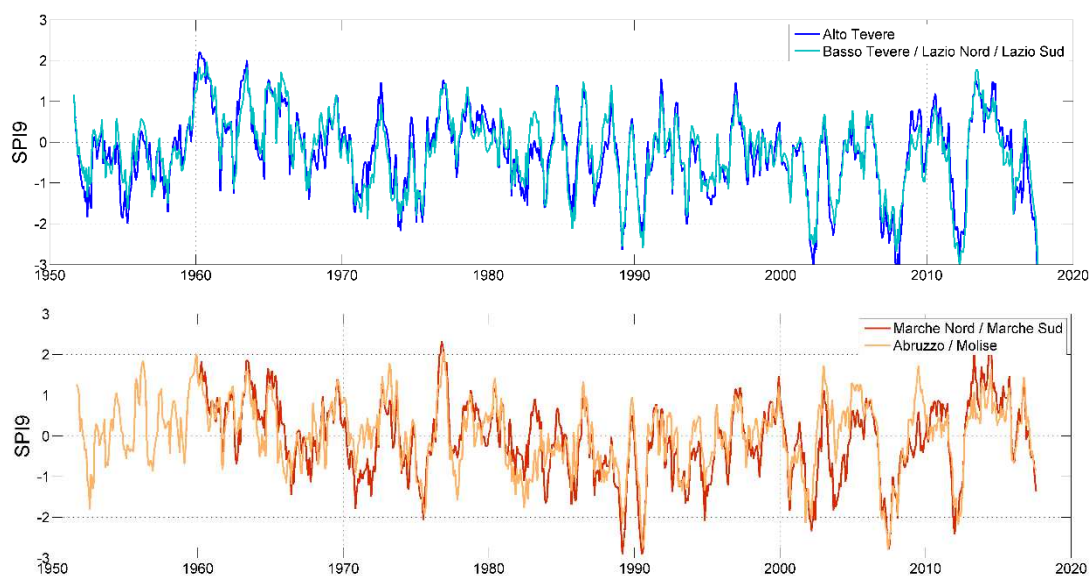


Figura 6 – Standardized Precipitation Indices a 9 mesi (SPI9) per le seguenti unità territoriali: Alto Tevere, Basso Tevere / Lazio nord / Lazio sud, Marche nord / Marche sud, Abruzzo / Molise



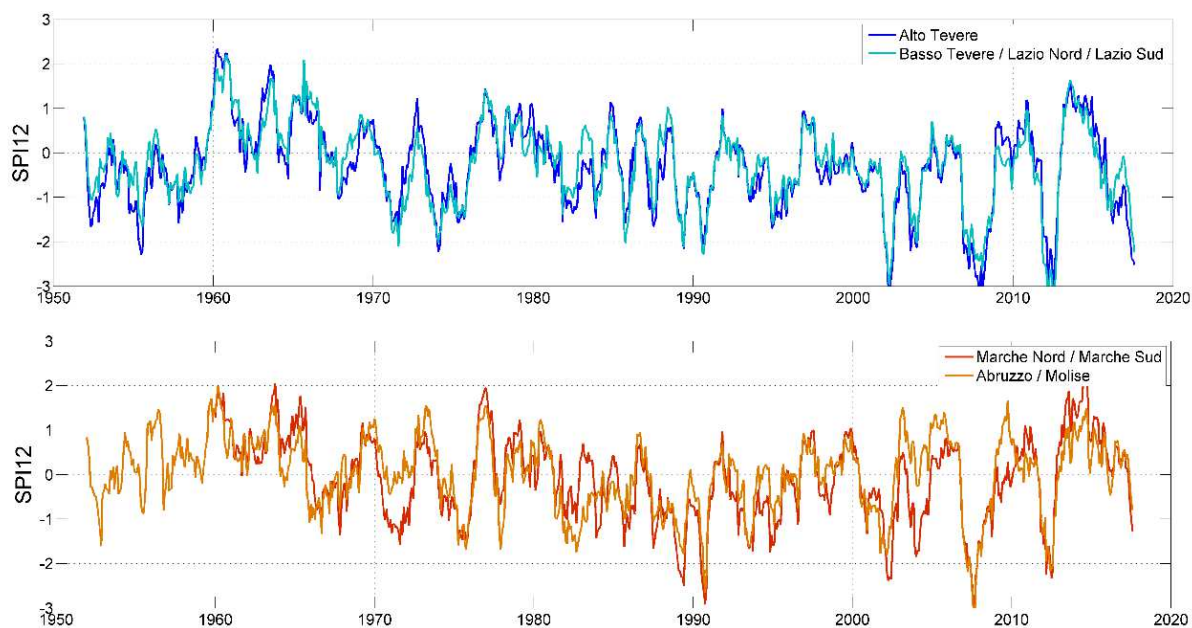


Figura 7 – Standardized Precipitation Indices a 12 mesi (**SPI12**) per le seguenti unità territoriali: Alto Tevere, Basso Tevere / Lazio nord / Lazio sud, Marche nord / Marche sud, Abruzzo / Molise

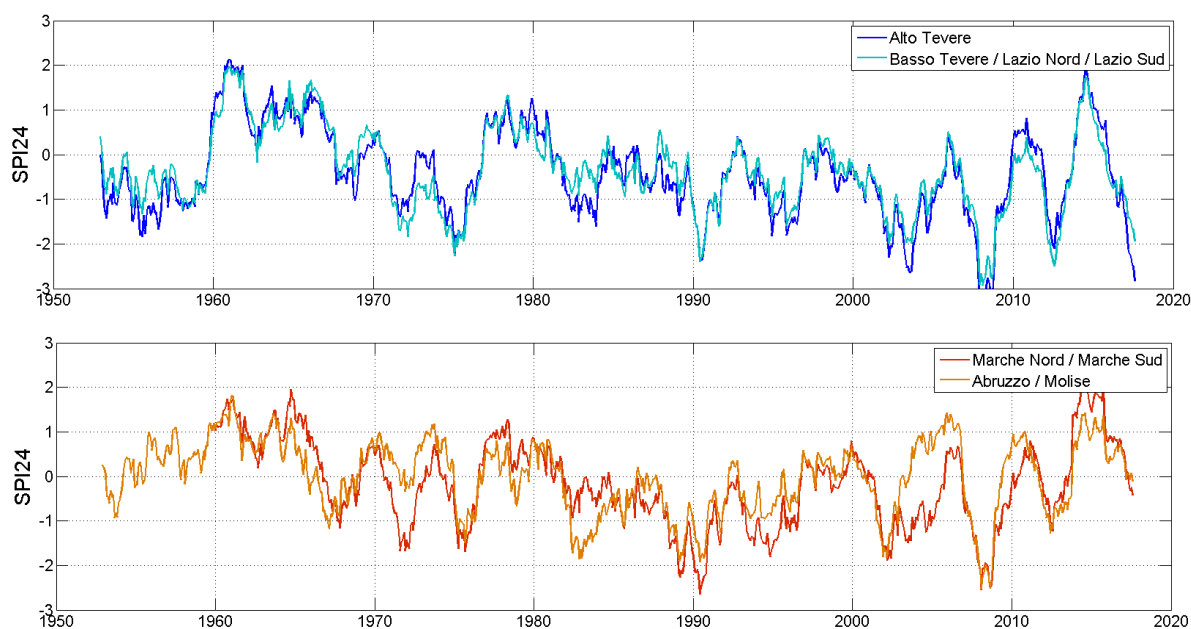


Figura 8 – Standardized Precipitation Indices a 24 mesi (**SPI24**) per le seguenti unità territoriali: Alto Tevere, Basso Tevere / Lazio nord / Lazio sud, Marche nord / Marche sud, Abruzzo / Molise

Le figure dalla 5 alla 8 mostrano una sostanziale uniformità del segnale pluviometrico su entrambi i versanti del Distretto, seppur con differenze significative di intensità del deficit. E' importante in questo contesto sottolineare alcuni aspetti:

1. Gli Standardized Precipitation Indices per scale temporali di aggregazione più lunghe (SPI12 e SPI24) mostrano un chiaro andamento ciclico delle precipitazioni, caratterizzato da un'alternanza di periodi secchi e periodi umidi.
2. Valori estremamente bassi degli SPI sono stati registrati negli ultimi due decenni sia per il versante tirrenico che per il versante adriatico.
3. Il versante tirrenico appare caratterizzato nel 2017 da un deficit di precipitazione estremamente significativo (SPI12 e SPI24 inferiori a -2). Tali valori sono stati registrati anche nel corso di precedenti eventi siccitosi verificatisi nell'ultimo ventennio (2002, 2007, 2012)
4. Il deficit pluviometrico sul versante adriatico relativo al 2017 appare significativo su scala annuale (SPI12 < -1), seppur meno intenso rispetto al versante tirrenico. Considerando una scala di aggregazione biennale (SPI24) il regime pluviometrico appare nella norma, a causa di precipitazioni sopra la media nel 2016

Al fine di analizzare la distribuzione spaziale degli SPI6, SPI9, SPI12 e SPI24 relativi al mese di agosto 2017 (quindi basati sulle precipitazioni cumulate rispettivamente sui periodi marzo→agosto, dicembre→agosto, settembre→agosto di un anno e settembre→agosto di due anni), sono state elaborate le mappe relative (figure 9 e 10). Tali mappe sono state messe graficamente a confronto con le analoghe mappe relative a periodi siccitosi registrati nel recente passato: agosto 2002, agosto 2007 e agosto 2012. Gli SPI dell'Abruzzo relativi ad agosto 2017 non sono stati visualizzati per mancanza di dati sufficienti per una attendibile interpolazione mediante kriging.

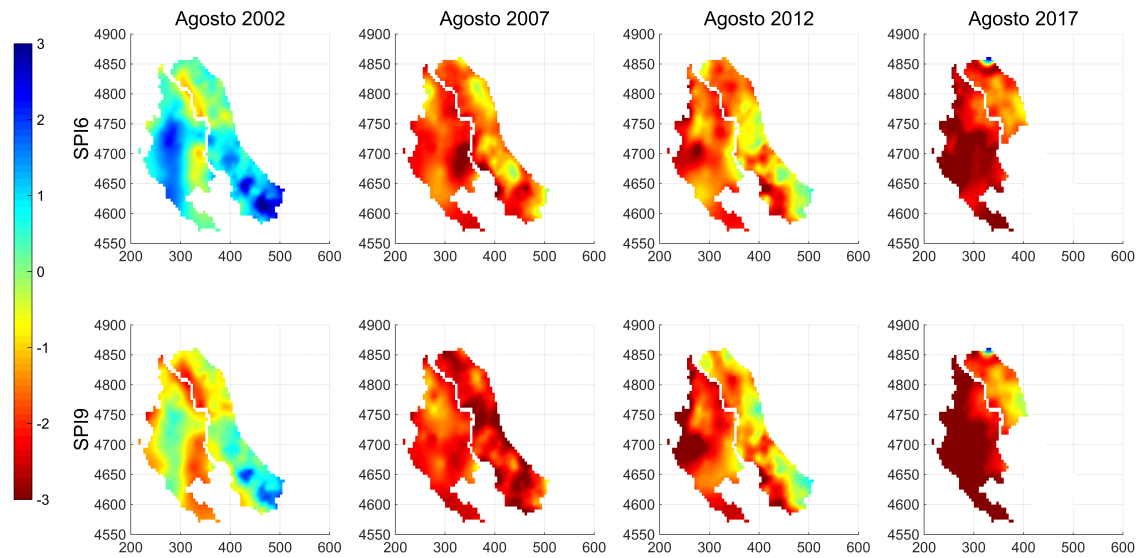


Figura 9 – Mappe di Standardized Precipitation Index a 6 e 9 mesi relative ad agosto 2002, 2007, 2012 e 2017

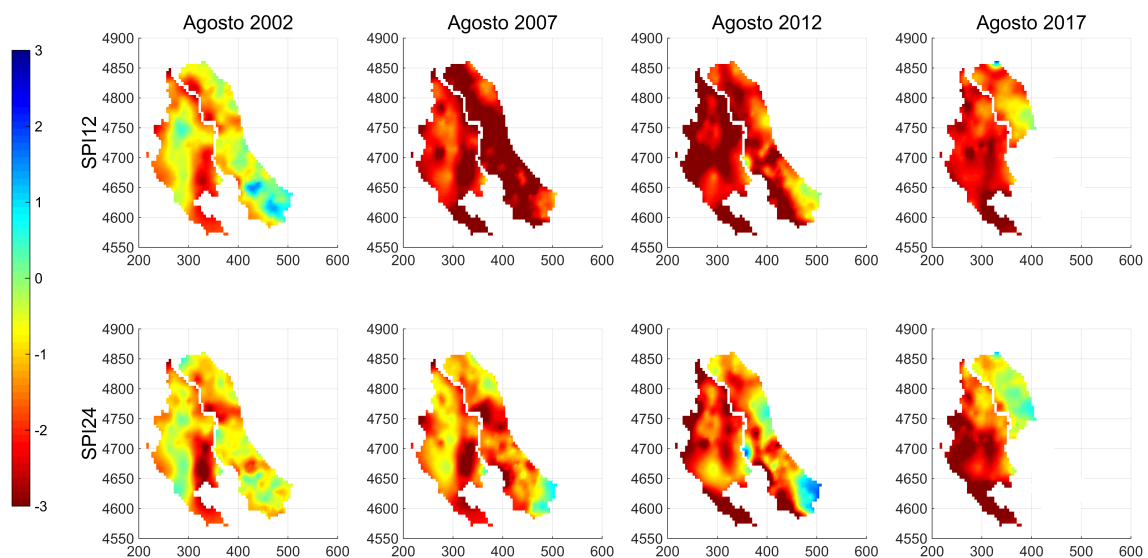


Figura 10 – Mappe di Standardized Precipitation Index a 12 e 24 mesi relative ad agosto 2002, 2007, 2012 e 2017

In relazione alle figure 9 e 10 possono essere proposte le seguenti osservazioni di carattere generale:

1. Per scale di aggregazione temporali brevi (SPI6 e SPI9) il segnale pluviometrico relativo al 2017 appare sostanzialmente uniforme su tutto il distretto, in particolar modo per il versante tirrenico relativamente all'SPI9. Occorre tuttavia sottolineare che l'anomalia standardizzata di precipitazione

appare un po' meno intensa in corrispondenza della dorsale carbonatica, sia sul versante tirrenico che sul versante adriatico, cioè in corrispondenza delle aree di ricarica di molti degli acquiferi che costituiscono risorse idriche fondamentali nel Distretto. E' tuttavia indubbio che gli indici standardizzati dell'anno solare 2017 (fino ad agosto) sono stati estremamente significativi e inferiori anche rispetto ad episodi siccitosi analoghi registrati nel recente passato

2. Considerando scale di aggregazione temporale più lunghe (SPI12 e SPI24), si registrano differenze significative tra i due versanti. L'anomalia standardizzata di precipitazione annuale e bi-annuale sul versante tirrenico appare estremamente significativa (SPI12 e SPI24 inferiori a -1 ovunque e inferiori a -2 nel basso Tevere, Lazio nord e Lazio sud). Meno significativo appare il deficit pluviometrico sul versante adriatico, specie considerando l'SPI24 che, come menzionato in precedenza, risente di precipitazioni sopra la media nel 2016. Non è tuttavia da escludere che nell'immediato futuro il deficit pluviometrico su tale versante possa evolvere verso condizioni ancora più siccitose.

Al fine di analizzare la distribuzione spaziale delle anomalie di precipitazione cumulata a 6, 9, 12 e 24 mesi rispetto alla media delle precipitazioni cumulate sulle medesime scale di aggregazione relativa al periodo 1961-1990, sono state elaborate le mappe relative (figure 11 e 12). Tali mappe sono state messe graficamente a confronto con le analoghe mappe relative a periodi siccitosi registrati nel recente passato: agosto 2002, agosto 2007 e agosto 2012.

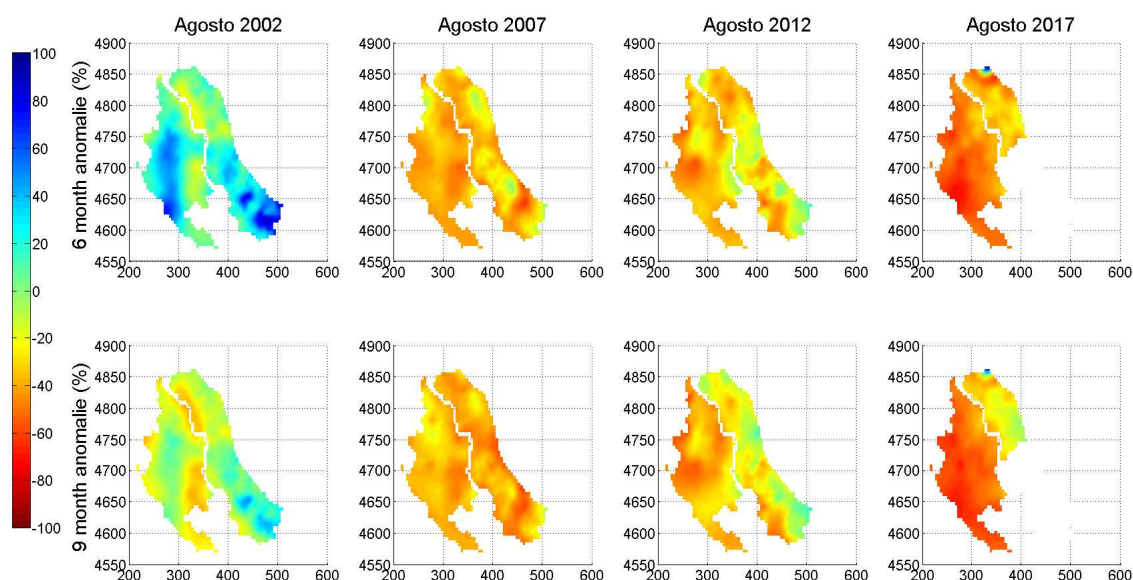


Figura 11 – Mappe di anomalia delle precipitazioni cumulate su 6 e 9 mesi (espressa in percentuale rispetto alla media delle precipitazioni cumulate su 6 e 12 mesi relativa al periodo 1960-1990)

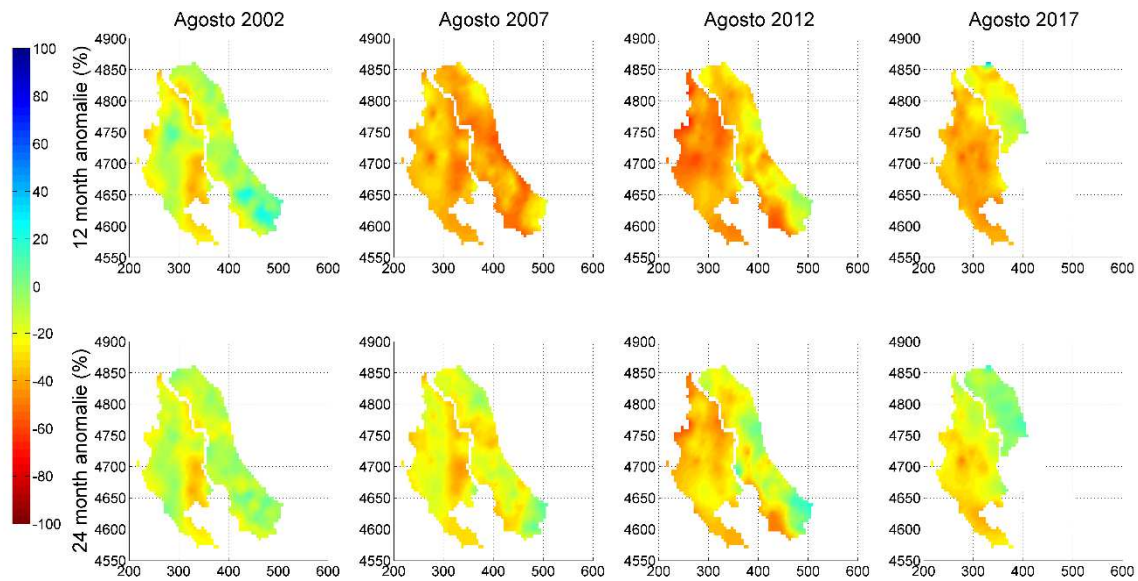


Figura 12 – Mappe di anomalia delle precipitazioni cumulate su 12 e 24 mesi (espressa in percentuale rispetto alla media delle precipitazioni cumulate su 12 e 24 mesi relativa al periodo 1960-1990)

In relazione alle figure 11 e 12 possono essere proposte le seguenti osservazioni di carattere generale:

1. Le anomalie di precipitazione cumulate su 6 e 9 mesi relative ad agosto 2017 (figura 11) sul versante tirrenico sono dell'ordine di - 60% rispetto alla media storica del periodo 1961-1990 e comunque superiori al - 40%. Sul versante adriatico sono stati registrati deficit dell'ordine di -40% sulle precipitazioni cumulate a 6 mesi e dell'ordine di -25% sulle precipitazioni cumulate a 9 mesi.
2. Alla scala annuale (figura 12), il deficit di precipitazione sul versante tirrenico è dell'ordine di -40%. Sul versante adriatico il deficit maggiore (circa -30 %) ha interessato le aree settentrionali delle Marche, mentre le aree meridionali hanno registrato precipitazioni annuali di circa -10% rispetto alla media del periodo 1961-1990. Su scala bi-annuale il deficit pluviometrico più significativo (circa -30%) si registra nelle aree del basso Tevere, Lazio nord e Lazio sud, mentre le zone più elevate (dorsale appenninica) presentano deficit pluviometrici di poco inferiori alla media del periodo 1961-1990 (circa -10%). Su questa scala di aggregazione temporale il versante adriatico non presenta deficit pluviometrici significativi.

E' importante sottolineare che i dati di SPI e deficit di precipitazione presentati vanno letti in relazione alle aree di alimentazione delle risorse idriche utilizzate e ai tempi caratteristici di ricarica delle differenti risorse: i grandi complessi acquiferi che alimentano le sorgenti utilizzate a scopo idropotabile in Umbria e nel Lazio hanno tempi caratteristici lunghi (da diversi mesi ad alcuni anni). Di conseguenza in un contesto di tipo gestionale sono gli SPI relativi a scala di aggregazione lunghe (da 9 a 24 mesi) che debbono considerarsi

significativi in relazione al regime di alimentazione; viceversa, nelle aree del Distretto dove le risorse idriche siano costituite principalmente da bacini superficiali, specie se di dimensioni medio-piccole e quindi con tempi caratteristici di alimentazione brevi (qualche mese), sono gli SPI relativi a scale di aggregazione temporali brevi (da 3 a 6 mesi) che devono essere considerati significativi. In generale, dunque, la significatività degli SPI rispetto a possibili regole di gestione deve essere valutata in relazione alle caratteristiche specifiche delle differenti risorse idriche utilizzate. Tale aspetto verrà brevemente discusso nell'analisi delle portate di magra di alcune sorgenti ubicate nel territorio del distretto discussa nel seguito.

## 5. ANALISI DELLE CICLICITA' DEL REGIME PLUVIOMETRICO

Il regime pluviometrico dell'area mediterranea è in generale caratterizzato da un'alternanza di periodi mediamente siccitosi e periodi mediamente piovosi. Tale alternanza è ben visibile anche dall'andamento degli SPI12 e SPI24 sull'intero distretto mostrato nel paragrafo precedente.

Al fine di analizzare quantitativamente la ciclicità del regime pluviometrico nell'area in esame è stato applicato il metodo della wavelet analysis (Torrence and Compo, 1998). Tale metodo permette di decomporre nel tempo una serie temporale nello spazio delle frequenze (in maniera simile all'analisi di Fourier, ma a differenza di questa permette di individuare la variabilità nel tempo della potenza del segnale decomposto). Sulla base dei coefficienti di tale decomposizione si è quindi in grado di determinare sia i modi dominanti (le frequenze che hanno un segnale più forte), sia come i modi dominanti eventualmente variano nel tempo.

La presente analisi è stata condotta sulle serie temporali di SPI24 relative al versante tirrenico e al versante adriatico. I risultati sono mostrati nelle figure 13 e 14, rispettivamente. Tali grafici mostrano mediante il codice colore presentato in legenda la "potenza" del segnale in funzione del tempo (in ascissa) per periodi della wavelet differenti (fino a 16 anni). I colori "caldi" indicano una potenza del segnale maggiore, mentre la linea nera indica il livello di significatività associato (all' 80% per la linea tratteggiata e al 95% per la linea continua).

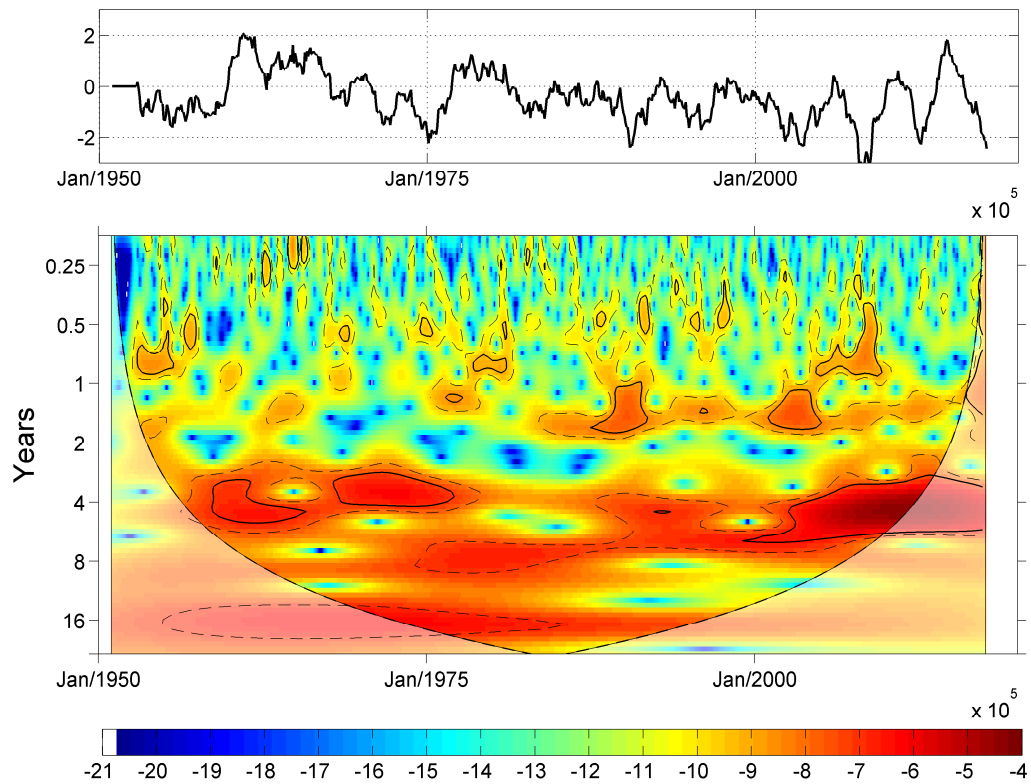


Figura 13 - Wavelet Analysis applicata alle serie temporali di SPI24 (1951-2017) per il versante tirrenico. Il grafico nel pannello superiore mostra l'andamento dell'SPI24 analizzato

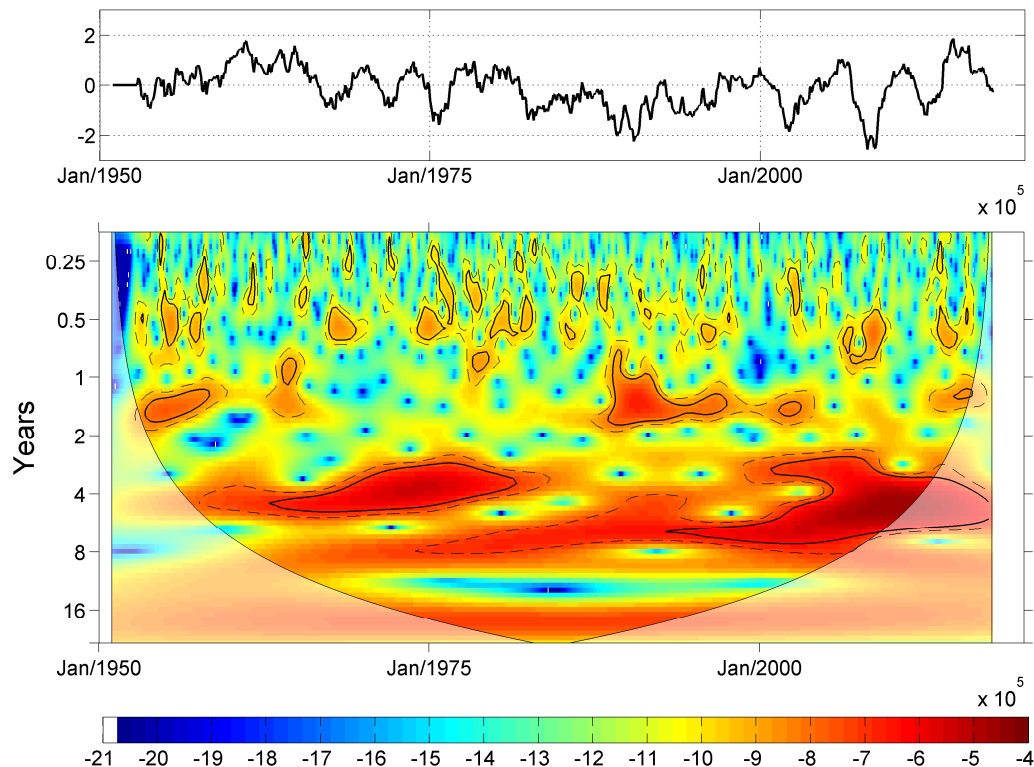


Figura 14 - Wavelet Analysis applicata alle serie temporali di SPI24 (1951-2017) per il versante adriatico. Il grafico nel pannello superiore mostra l'andamento dell'SPI24 analizzato

I grafici di figura 13 e 14 mostrano un segnale ciclico dell'SPI24 significativo con una periodicità variabile tra 4 e 8 anni. Tale segnale risulta molto simile su entrambi i versanti: di conseguenza la ciclicità climatica appare uniforme, sulle scale temporali considerate, sul versante tirrenico e sul versante adriatico. Tale ciclicità risulta particolarmente evidente negli ultimi 20-25 anni (con periodo di circa 4-5 anni), a conferma di quanto evidenziato anche dall'analisi effettuata mediante gli SPI a 12 e 24 mesi.

Se un'ipotesi di cambiamento climatico strutturale al momento appare azzardata a causa della scarsa numerosità del campione, tuttavia la ciclicità di lungo periodo che emerge dalle figure 7 e 8 e dalla wavelet analysis (figure 13-14) consiglia di non sottovalutare l'ipotesi di un aumento della frequenza di episodi siccitosi severi, nonché di un aumento della persistenza di tali eventi, con anomalia di precipitazione negativa caratterizzata da più anni consecutivi con valori di SPI inferiori a - 1.

L'uniformità del segnale ciclico su tutto il Distretto suggerisce che l'alternanza di periodi secchi e umidi sia da mettere in relazione con dinamiche atmosferiche a scala globale, o quantomeno regionale. Tale aspetto verrà analizzato nel seguente paragrafo.



## 6. RELAZIONE PRECIPITAZIONI-NAO

E' un fatto confermato anche da studi climatici precedenti (Hurrell et al. 2003; Muñoz-Díaz and Rodrigo, 2003; Trigo et al. 2004; Massei et al. 2007; Bartolini et al. 2009; Brandimarte et al. 2011; Caloriero et al. 2011; Queralto et al. 2009; Romano and Preziosi, 2013; Bonaccorso et al. 2015; Vergni et al. 2016a; Vergni et al. 2016b) che il regime climatico dell'area mediterranea sia influenzata dalla dinamica oceanico-atmosferica nell'area dell'Atlantico settentrionale. In particolare numerosi studi hanno evidenziato una significativa relazione tra il regime pluviometrico in Italia e il North Atlantic Oscillation Index (NAO), definito come la differenza di pressione standardizzata misurate in una stazione delle Azzorre e una in Islanda. Nella presente analisi è stato messo in relazione il cosiddetto winter-NAO (relativo ai mesi invernali) con l'SPI12 del mese di dicembre relativo ai due versanti tirrenico e adriatico.

Questa relazione può rappresentare un'ipotesi di proxy di condizioni di scarsità idrica estiva dovuta a diminuzioni significative della risorsa in seguito a siccità meteorologica. Di tale relazione si potrebbe tener conto (unitamente ad altre relazioni) nella scelta di organizzare anticipatamente (e in quale misura) alcune azioni di contrasto alla possibile successiva emergenza (intensificazione delle attività di vigilanza e controllo dei consumi, intensificazione dei controlli nei sistemi di *district metering*, intensificazione delle attività di monitoraggio, aumento delle frequenze di scambio delle informazioni tra i soggetti interessati, preparazione degli approvvigionamenti da fonti di riserva, fattibilità di possibili fonti di produzione di risorsa non convenzionale, equalizzazione dell'approvvigionamento globale di risorsa in schemi idrici serviti da fonti diversificate, fattibilità di integrazioni con schemi idrici asserviti ad usi diversi, attivazione di predittori sequenziali sulla base di previsioni meteorologiche alla mesoscala).

Nel presente studio, la relazione tra winter-NAO e SPI12 è stata analizzata mediante cross-wavelet analysis (i.e. Prokoph and El Bilali, 2008; Torrence and Compo, 1998), una estensione della wavelet analysis che permette di evidenziare la potenza comune nella ciclicità tra due serie temporali.

I risultati sono mostrati nelle figure 15 e 16, rispettivamente. Tali grafici mostrano mediante il codice colore presentato in legenda la "potenza" del segnale "comune" tra le due serie analizzate in funzione del tempo (in ascissa) per periodi della cross-wavelet differenti (fino a 16 anni). I colori "caldi" indicano una potenza del segnale comune maggiore. La linea nera localizza in tempo e frequenza i segnali di potenza comune significativi (95%).

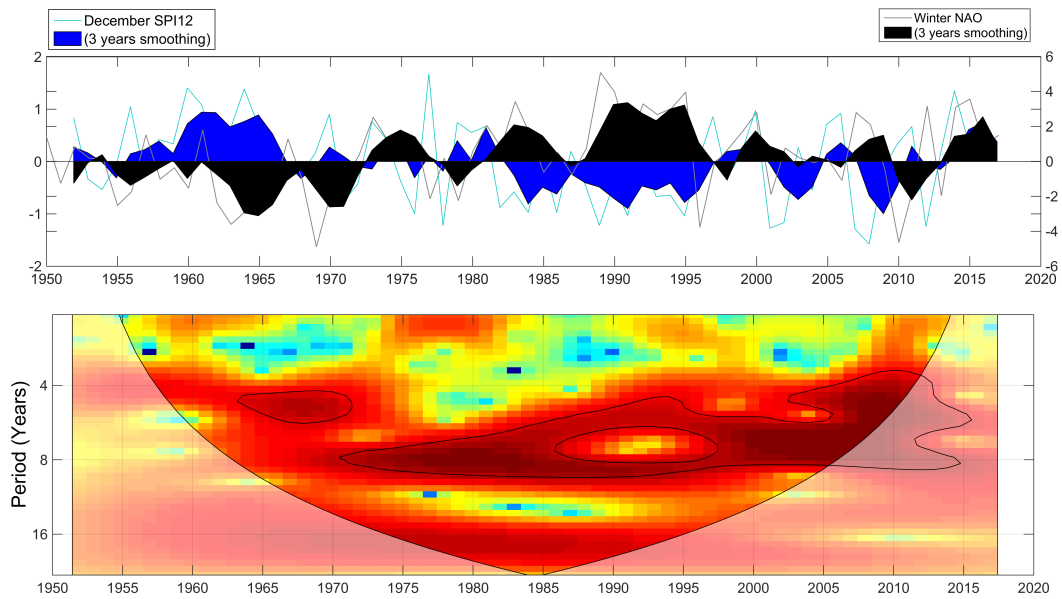


Figura 15 - Cross Wavelet Analysis applicata alle serie temporali di SPI12 dicembre (1951-2017) e Winter NAO per il versante tirrenico

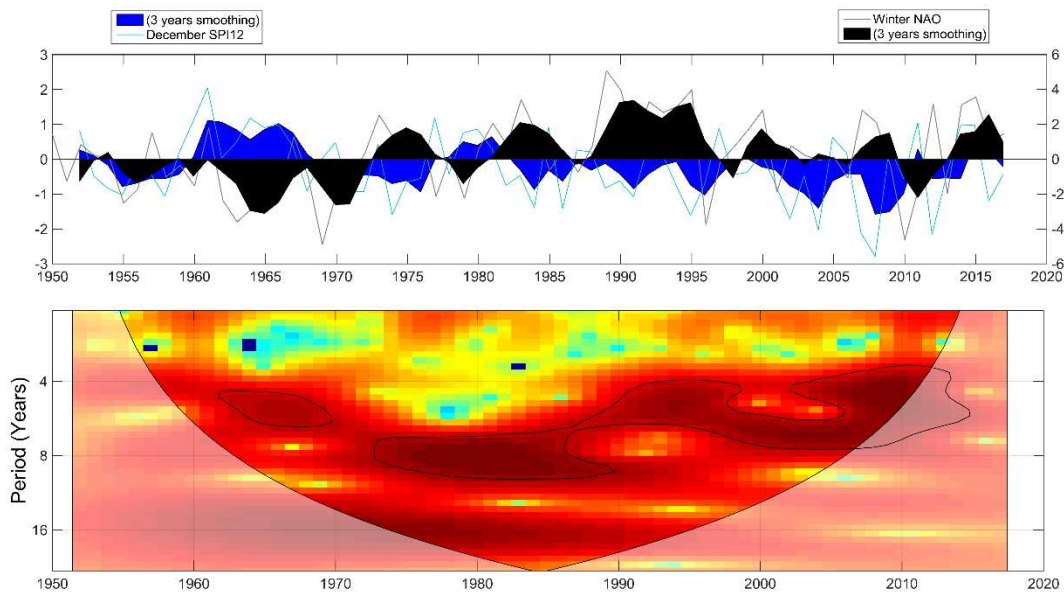


Figura 16 - Cross Wavelet Analysis applicata alle serie temporali di SPI12 dicembre (1951-2017) e Winter NAO per il versante adriatico

Anche in questo caso, come per la wavelet analysis proposta nel paragrafo precedente, il segnale è sostanzialmente uniforme su entrambi i versanti. I grafici mostrano una significativa coerenza tra il segnale periodico del winter-NAO e l'SPI12, opportunamente filtrati mediante una finestra temporale di 3 anni (3 years smoothing). E' dunque confermata una relazione significativa tra la dinamica atmosferica nell'area atlantica settentrionale e il regime pluviometrico nell'area del Distretto, caratterizzata da una tendenza verso

periodi più siccitosi in concomitanza di periodi caratterizzati da valori elevati di winter-NAO, e viceversa con periodi di oscillazione comune variabile tra 4 e 8 anni.

Gli ultimi 4 anni (2014-2017) sono stati caratterizzati da valori del winter-NAO elevati. Se dunque gli effetti del ciclo positivo di tale indice atmosferico non si fossero ancora esauriti, è più probabile la persistenza di un regime siccitoso nell'area del Distretto per periodi temporali superiori all'anno idrologico, con un conseguente significativo impatto anche sulle risorse idriche caratterizzate da tempi caratteristici di ricarica lunghi (2-3 anni) e resilienza più elevata (ad esempio le sorgenti di dimensioni maggiori ubicate sulla dorsale carbonatica).

E' tuttavia importante sottolineare che se da un lato l'indice climatico winter NAO può essere considerato un buon *proxy* del regime pluviometrico per scale temporali di aggregazione ampie (3 anni), esso non può tuttavia essere utilizzato come strumento predittivo per dare attuazione anticipata alle azioni di contrasto in assenza di un'affidabile previsione di riduzione della risorsa idrica (misure come la riduzione delle perdite fino al limite strutturale indicato dal DPCM del 4 marzo 1996, strategie di riduzione dei consumi attraverso l'efficientamento degli impianti di utilizzazione, previsione di utilizzazioni diverse in cascata della stessa risorsa, aumento della capacità di regolazione delle portate e dei volumi attengono al quadro delle misure strutturali dei piani di gestione delle singole utilizzazioni da porre in essere al fine di diminuirne la vulnerabilità indipendentemente dall'occorrenza di eventi di scarsità idrica).

## 7. ANALISI PORTATE DEL FIUME TEVERE A RIPETTA

Al fine di verificare l'impatto del regime pluviometrico sul regime di portata del fiume Tevere in condizioni di magra sono stati analizzati i dati di portata giornaliera del mese di luglio ricavati dalla quota idrometrica misurata dall'idrometro di Ripetta e convertita in portata utilizzando le relazioni indicate dall'Ufficio Idrografico e Mareografico della Regione Lazio (<http://www.idrografico.roma.it/default.aspx>).

Per ogni mese di luglio del periodo 2001-2017 è stata calcolata la media delle portate giornaliere inferiori al decimo percentile. I risultati sono presentati nel diagramma a barre di figura 17.

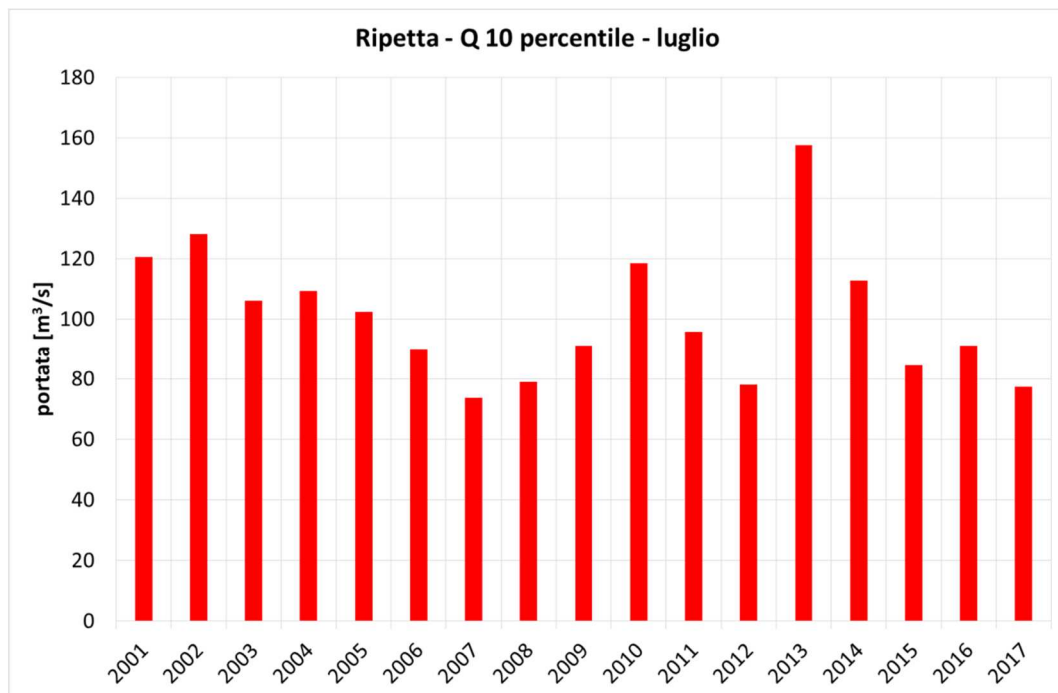


Figura 17 – Analisi delle portate di magra del fiume Tevere a Ripetta: media delle portate giornaliere inferiori al decimo percentile

Il grafico di figura 17 mostra come le portate di magra del Tevere a Ripetta nel mese di luglio risultano analoghe alla stessa grandezza registrata nel corso di altri anni particolarmente siccitosi: 2007 e 2012. Occorre sottolineare come la portata idrometro a Ripetta è ubicato quasi alla chiusura, e di conseguenza integra l'impatto del deficit pluviometrico sull'intero bacino.

Sottolineiamo il fatto che le portate di magra attuali potrebbero essere determinate dal regime pluviometrico registrato non solo nell'anno corrente ma anche nell'anno (o negli anni) precedenti: un confronto qualitativo tra le portate di magra registrate nel 2012 e nel 2017 e gli indici SPI12 e SPI24 relativi mostra che nonostante l'indice  $Q_{10}$  calcolato sia sostanzialmente identico, i valori di portata potrebbero essere stati determinati da regimi pluviometrici differenti: infatti l'SPI12 del 2017 risulta più basso rispetto allo stesso indice del 2012, mentre l'SPI24 del 2012 risulta più basso rispetto all'SPI24 del 2017. In altre parole la magra registrata in luglio 2017 sembra determinata dal deficit pluviometrico intenso registrata nell'anno corrente, mentre la magra registrata nel luglio 2012 sembra determinata dal deficit del biennio precedente. Se dunque le condizioni siccitose attuali si dovessero protrarre anche nel prossimo anno idrologico è probabile una ulteriore diminuzione delle portate di magra estive per il 2018.

## 8. RELAZIONE PRECIPITAZIONI-PORTATA SORGENTI

Il regime pluviometrico incide, ovviamente, anche sul regime idrologico delle sorgenti appenniniche ubicate sulla dorsale carbonatica e utilizzate a scopo idropotabile. Tuttavia la relazione tra anomalie di precipitazione e portata di tali sorgenti può variare in relazione alle caratteristiche idrogeologiche delle idrostrutture che alimentano tali sorgenti, come già accennato nel paragrafo relativo all'analisi del regime pluviometrico effettuata mediante gli Standardized Precipitation Indices (paragrafo 4).

Sono state analizzate le portate delle sorgenti elencate in tabella 3

SORGENTE	PERIODO DI ANALISI	FONTE INFORMATIVA
SCIRCA	2007-2017	Arpa Umbria
BAGNARA	1999-2017	Arpa Umbria
LUPA	1998-2017	Arpa Umbria
SANGIOVENALE	1998-2017	Arpa Umbria
RASIGLIA ALZABOVE	1998-2017	Arpa Umbria
ACQUAMARCIA	1951-2017	AceaATO2
PESCHIERA	1951-1961 / 2007-2017	AceaATO2

Tabella 3 – Elenco sorgenti analizzate. I dati di portata relativi alle sorgenti ubicate in Umbria sono disponibili all'indirizzo <http://www.arpa.umbria.it/articoli/portata-delle-sorgenti-000>

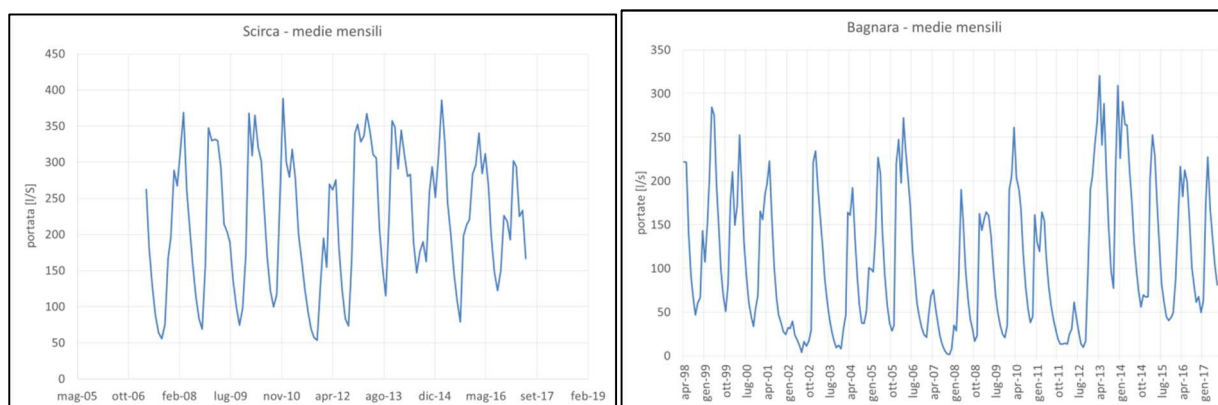




Figura 18 – Portata media mensile delle sorgenti analizzate

Le sorgenti umbre (Scirca, Bagnara, Lupa, San Giovenale, Rasiglia Alzabove) hanno portate medie dell'ordine di qualche centinaia di l/s e un regime idrologico caratterizzato da massimi primaverili e minimi autunnali. Da un punto di vista gestionale le portate minime possono determinare problemi di approvvigionamento idrico. Risulta quindi di estrema importanza individuare precursori di tipo meteorologico in grado di stimare la possibile evoluzione della portata stessa in relazione al regime pluviometrico.

Le sorgenti gestite da AceaATO2 (Peschiera e Acquamarcia) presentano portate medie di qualche m³/s e risultano decisamente più stabili rispetto alle variazioni del regime pluviometrico.

Al fine di analizzare la relazione tra anomalie di precipitazione, rappresentate dallo Standardized Precipitation Index e variabilità nel tempo delle portate minime, è stata utilizzata la metodologia presentata nel dettaglio in Romano et al. (2011) e Romano et al. (2013). Tale metodologia può essere così sintetizzata:

1. Per ogni sorgente sono state calcolate le portate medie mensili
2. Per ogni sorgente viene individuata la portata media mensile minima di ogni anno idrologico  $Q_{min}(m)$
3. Sono stati calcolati gli SPI medi aggregati sui bacini di alimentazione di ogni sorgente per scale di aggregazione da 1 a 24 mesi.
4. E' stato calcolato per ogni sorgente il coefficiente di correlazione tra le portate minime  $Q_{min}(m)$  e i diversi SPI (calcolati per ogni scala temporale di aggregazione  $n$  per tutti i mesi dell'anno e indicati genericamente come  $SPI_n(m)$ ). Si vuole così rispondere alla seguente domanda: quale scala di aggregazione delle precipitazioni e di quale mese "spiega" meglio la variabilità inter-annuale osservata della portata minima della sorgente in esame? Si ottengono così matrici di correlazione come quella rappresentata in tabella 4 e relativa alla sorgente Lupa (Umbria). In essa è possibile osservare, ad esempio, che la correlazione massima con il minimo annuale di portata si ha per l'SPI9 calcolato nel mese di maggio (pari nel caso specifico di Lupa 0.86)

	SPI1	SPI2	SPI3	SPI4	SPI5	SPI6	SPI7	SPI8	SPI9	SPI10	SPI11	SPI12	SPI13	SPI14	SPI15	SPI16	SPI17	SPI18	SPI19	SPI20	SPI21	SPI22	SPI23	SPI24
gennaio	0.34	0.54	0.62	0.78	0.75	0.67	0.58	0.60	0.60	0.61	0.61	0.57	0.55	0.60	0.49	0.48	0.45	0.47	0.49	0.52	0.50	0.46	0.42	0.39
febbraio	0.32	0.34	0.63	0.69	0.81	0.79	0.71	0.63	0.65	0.65	0.66	0.66	0.61	0.59	0.63	0.52	0.51	0.49	0.50	0.52	0.54	0.52	0.49	0.45
marzo	0.50	0.53	0.52	0.67	0.70	0.80	0.79	0.71	0.65	0.67	0.66	0.68	0.68	0.64	0.61	0.66	0.57	0.56	0.54	0.56	0.57	0.59	0.57	0.54
aprile	0.45	0.70	0.69	0.65	0.77	0.79	0.86	0.86	0.80	0.74	0.74	0.73	0.74	0.75	0.71	0.68	0.73	0.64	0.62	0.60	0.61	0.62	0.64	0.61
maggio	-0.01	0.29	0.55	0.53	0.52	0.71	0.77	0.85	0.86	0.80	0.75	0.75	0.75	0.76	0.77	0.73	0.70	0.74	0.65	0.63	0.61	0.62	0.63	0.65
giugno	-0.02	-0.03	0.25	0.46	0.47	0.48	0.66	0.74	0.82	0.83	0.78	0.72	0.73	0.72	0.74	0.75	0.70	0.67	0.72	0.64	0.63	0.61	0.62	0.62
luglio	0.39	0.22	0.15	0.37	0.53	0.51	0.51	0.69	0.75	0.82	0.83	0.78	0.74	0.74	0.73	0.75	0.75	0.71	0.67	0.72	0.64	0.63	0.61	0.62
agosto	-0.12	0.16	0.11	0.09	0.27	0.45	0.44	0.46	0.65	0.72	0.81	0.80	0.76	0.72	0.73	0.72	0.73	0.73	0.69	0.65	0.70	0.61	0.60	0.59
settembre	0.31	0.04	0.25	0.23	0.19	0.33	0.50	0.48	0.50	0.68	0.74	0.81	0.81	0.77	0.74	0.75	0.74	0.75	0.75	0.71	0.68	0.72	0.63	0.62

Tabella 4 - Esempio di matrice di correlazione  $SPI_n(m) - Q_{min}(m)$  per la sorgente Lupa

5. Si calcola la retta di regressione di un grafico portata minima vs SPI e si utilizza tale predittore nell'anno corrente. Un esempio di tale retta è riportato in figura 19, dove l'indicatore rosso è la previsione sulla portata minima per l'anno 2017.

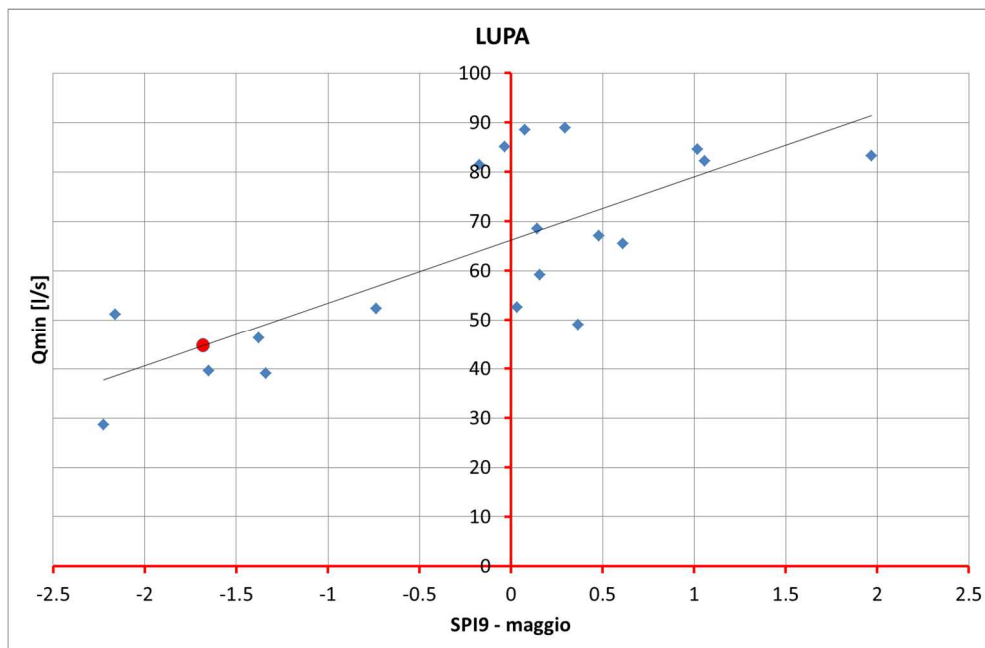


Figura 19 – Retta di regressione  $SPI_n(m)$  vs  $Q_{min}(m)$  per la sorgente Lupa

Nelle tabelle dalla 5 alla 11 sono riportati i valori delle matrici di correlazione  $Q_{min}(m) - SPI_n(m)$  per ogni sorgente analizzata.

	SPI1	SPI2	SPI3	SPI4	SPI5	SPI6	SPI7	SPI8	SPI9	SPI10	SPI11	SPI12	SPI13	SPI14	SPI15	SPI16	SPI17	SPI18	SPI19	SPI20	SPI21	SPI22	SPI23	SPI24
gennaio	0.34	0.50	0.44	0.45	0.36	0.24	0.24	0.29	0.34	0.29	0.25	0.21	0.18	0.12	-0.05	-0.07	-0.08	-0.14	-0.13	-0.12	-0.10	-0.15	-0.11	-0.12
febbraio	-0.07	0.16	0.32	0.34	0.35	0.28	0.18	0.18	0.23	0.27	0.24	0.21	0.17	0.15	0.09	-0.06	-0.08	-0.09	-0.14	-0.13	-0.12	-0.10	-0.15	-0.11
marzo	0.20	0.14	0.24	0.40	0.37	0.38	0.32	0.23	0.23	0.28	0.31	0.28	0.25	0.22	0.19	0.15	0.00	-0.02	-0.03	-0.08	-0.07	-0.07	-0.05	-0.10
aprile	0.68	0.85	0.54	0.48	0.60	0.52	0.51	0.45	0.35	0.36	0.40	0.42	0.37	0.35	0.31	0.27	0.22	0.07	0.04	0.03	-0.02	-0.01	0.00	0.01
maggio	0.26	0.52	0.77	0.50	0.47	0.59	0.55	0.53	0.46	0.38	0.39	0.43	0.44	0.40	0.38	0.34	0.30	0.25	0.10	0.07	0.07	0.01	0.03	0.03
giugno	0.11	0.32	0.58	0.68	0.47	0.45	0.57	0.53	0.51	0.45	0.37	0.38	0.42	0.44	0.40	0.37	0.33	0.30	0.26	0.11	0.08	0.08	0.02	0.04
luglio	0.45	0.28	0.36	0.58	0.65	0.48	0.45	0.55	0.52	0.50	0.45	0.37	0.38	0.42	0.43	0.40	0.37	0.34	0.30	0.26	0.13	0.10	0.10	0.05
agosto	-0.02	0.22	0.23	0.34	0.56	0.64	0.45	0.44	0.54	0.51	0.49	0.44	0.36	0.37	0.41	0.42	0.38	0.36	0.33	0.30	0.25	0.12	0.09	0.09
settembre	0.53	0.29	0.43	0.41	0.43	0.58	0.68	0.50	0.48	0.57	0.54	0.52	0.47	0.40	0.41	0.44	0.45	0.41	0.39	0.36	0.32	0.28	0.15	0.12

Tabella 5 – Sorgente Scirca. Matrice di correlazione  $SPI_n(m) - Q_{min}(m)$

	SPI1	SPI2	SPI3	SPI4	SPI5	SPI6	SPI7	SPI8	SPI9	SPI10	SPI11	SPI12	SPI13	SPI14	SPI15	SPI16	SPI17	SPI18	SPI19	SPI20	SPI21	SPI22	SPI23	SPI24
gennaio	0.26	0.26	0.40	0.51	0.54	0.49	0.44	0.45	0.49	0.53	0.50	0.47	0.44	0.42	0.39	0.38	0.37	0.30	0.32	0.36	0.33	0.34	0.35	0.31
febbraio	0.24	0.28	0.31	0.42	0.51	0.55	0.50	0.46	0.47	0.50	0.54	0.51	0.49	0.45	0.43	0.39	0.39	0.39	0.32	0.34	0.36	0.34	0.35	0.36
marzo	0.18	0.25	0.29	0.29	0.39	0.47	0.51	0.47	0.44	0.45	0.48	0.52	0.49	0.47	0.44	0.43	0.40	0.40	0.40	0.33	0.35	0.37	0.35	0.36
aprile	0.59	0.44	0.44	0.43	0.41	0.47	0.53	0.57	0.54	0.52	0.52	0.54	0.57	0.55	0.53	0.50	0.48	0.45	0.44	0.44	0.37	0.39	0.42	0.39
maggio	0.14	0.43	0.42	0.39	0.40	0.41	0.47	0.54	0.58	0.56	0.54	0.54	0.56	0.60	0.57	0.55	0.51	0.49	0.47	0.46	0.46	0.39	0.41	0.43
giugno	0.15	0.14	0.39	0.39	0.37	0.38	0.40	0.47	0.53	0.58	0.55	0.53	0.53	0.55	0.59	0.56	0.54	0.50	0.49	0.47	0.46	0.46	0.39	0.41
luglio	0.59	0.45	0.33	0.53	0.52	0.46	0.45	0.49	0.53	0.59	0.62	0.60	0.59	0.59	0.60	0.63	0.60	0.58	0.54	0.52	0.50	0.49	0.49	0.43
agosto	0.39	0.53	0.52	0.46	0.63	0.65	0.55	0.54	0.59	0.61	0.66	0.69	0.67	0.66	0.67	0.67	0.69	0.66	0.64	0.59	0.57	0.54	0.53	0.53
settembre	0.59	0.57	0.70	0.73	0.61	0.71	0.74	0.63	0.62	0.66	0.66	0.70	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.74	0.71	0.69	0.63	0.61	0.58	0.56

Tabella 6 – Sorgente Bagnara. Matrice di correlazione  $SPI_n(m) - Q_{min}(m)$





	SPI1	SPI2	SPI3	SPI4	SPI5	SPI6	SPI7	SPI8	SPI9	SPI10	SPI11	SPI12	SPI13	SPI14	SPI15	SPI16	SPI17	SPI18	SPI19	SPI20	SPI21	SPI22	SPI23	SPI24
gennaio	0.53	0.65	0.57	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.57	0.65	0.60	0.59	0.65	0.70	0.65	0.66	0.64	0.64	0.62	0.61	0.63	0.65	0.63
febbraio	0.10	0.36	0.61	0.56	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.62	0.55	0.63	0.59	0.57	0.63	0.68	0.63	0.64	0.63	0.63	0.60	0.59	0.61	0.63
marzo	0.09	0.09	0.30	0.50	0.49	0.55	0.58	0.57	0.58	0.58	0.58	0.52	0.60	0.56	0.55	0.61	0.68	0.63	0.64	0.63	0.62	0.60	0.60	0.61
aprile	0.39	0.26	0.22	0.37	0.53	0.53	0.57	0.61	0.60	0.61	0.60	0.60	0.54	0.62	0.58	0.58	0.63	0.69	0.64	0.66	0.64	0.64	0.62	0.61
maggio	0.09	0.26	0.22	0.18	0.33	0.50	0.52	0.57	0.61	0.59	0.61	0.60	0.60	0.55	0.63	0.59	0.59	0.63	0.69	0.65	0.66	0.64	0.64	0.62
giugno	0.36	0.30	0.37	0.33	0.28	0.40	0.53	0.55	0.58	0.62	0.61	0.62	0.61	0.62	0.56	0.64	0.61	0.61	0.65	0.71	0.67	0.68	0.66	0.66
luglio	0.43	0.46	0.41	0.47	0.40	0.34	0.44	0.57	0.57	0.60	0.63	0.62	0.63	0.63	0.62	0.57	0.65	0.62	0.61	0.65	0.71	0.68	0.68	0.67
agosto	-0.32	0.06	0.23	0.20	0.32	0.30	0.26	0.37	0.51	0.52	0.55	0.59	0.58	0.59	0.58	0.59	0.54	0.61	0.58	0.58	0.62	0.68	0.64	0.65
settembre	0.44	0.22	0.36	0.47	0.41	0.47	0.41	0.34	0.44	0.56	0.56	0.59	0.63	0.62	0.63	0.62	0.62	0.57	0.64	0.61	0.61	0.66	0.71	0.67
ottobre	0.38	0.49	0.35	0.47	0.53	0.51	0.54	0.52	0.48	0.55	0.62	0.63	0.65	0.67	0.66	0.67	0.66	0.66	0.62	0.67	0.65	0.64	0.68	0.73
novembre	0.36	0.50	0.54	0.46	0.55	0.60	0.56	0.55	0.55	0.52	0.56	0.63	0.66	0.67	0.70	0.69	0.69	0.68	0.69	0.65	0.70	0.68	0.68	0.71
dicembre	0.19	0.32	0.44	0.47	0.42	0.48	0.52	0.49	0.49	0.49	0.48	0.53	0.58	0.62	0.64	0.67	0.67	0.68	0.68	0.68	0.64	0.68	0.66	0.67

 Tabella 11 – Sorgente Peschiera. Matrice di correlazione  $SPI_n(m) - Q_{min}(m)$ 

I valori dei coefficienti di correlazione calcolati indicano che è possibile individuare una relazione tra precipitazioni cumulate, rappresentate dall' $SPI_n(m)$  e la variabilità inter-annuale della portata minima  $Q_{min}$  per tutte le sorgenti analizzate. Inoltre, una correlazione lineare spiega una parte consistente della variabilità di  $Q_{min}$ . In tabella 12 sono riportati gli  $SPI_n(m)$  corrispondenti ai valori di correlazione massima. In figura 20 sono riportate le rette di regressione  $SPI_n(m)$  vs  $Q_{min}(m)$  per ogni sorgente analizzata.

SORGENTE	$SPI_n(m)$ con correlazione massima	Coefficiente di correlazione massimo
SCIRCA	SPI2(apr)	0.85
BAGNARA	SPI7(sett)	0.74
LUPA	SPI9(mag)	0.86
SANGIOVENALE	SPI17(lug)	0.84
RASIGLIA ALZABOVE	SPI6(mag)	0.79
ACQUAMARCIA	SPI9(apr)	0.81
PESCHIERA	SPI24(ott)	0.73

 Tabella 12 -  $SPI_n(m)$  corrispondenti ai valori di correlazione massima e relativo coefficiente di correlazione

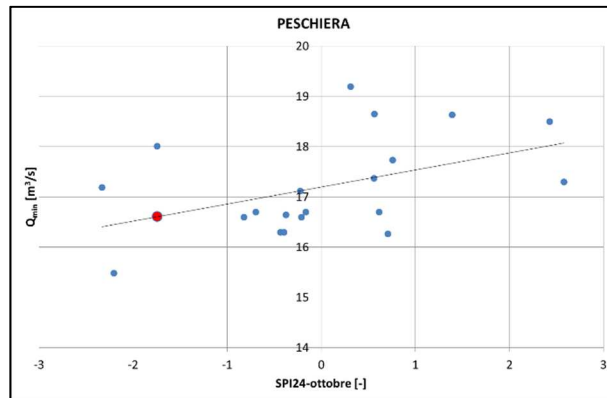
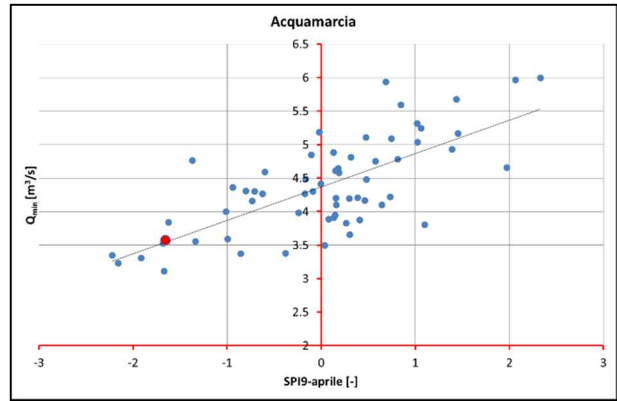
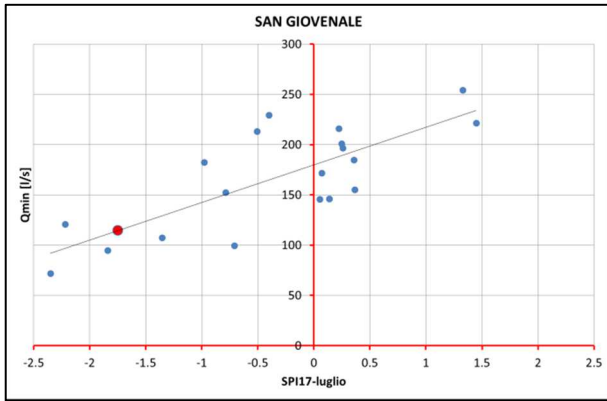
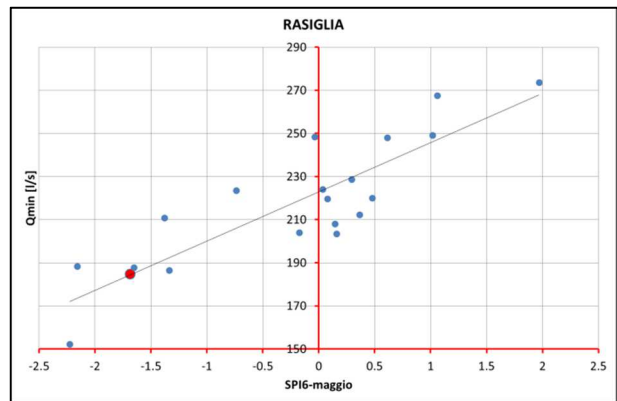
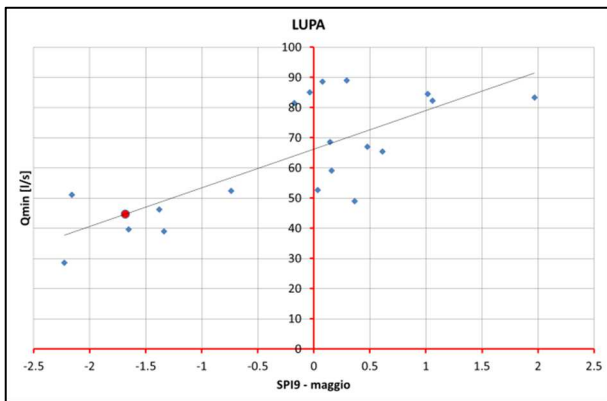
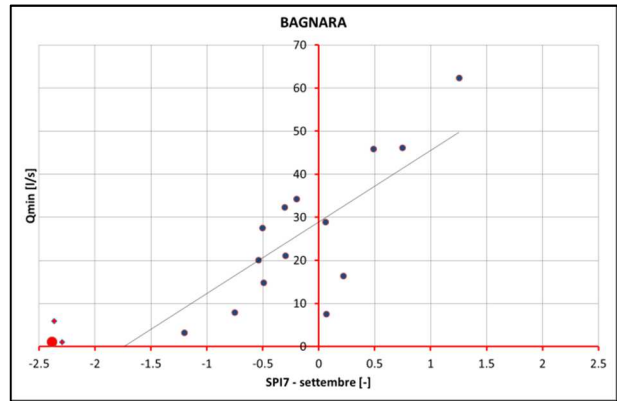
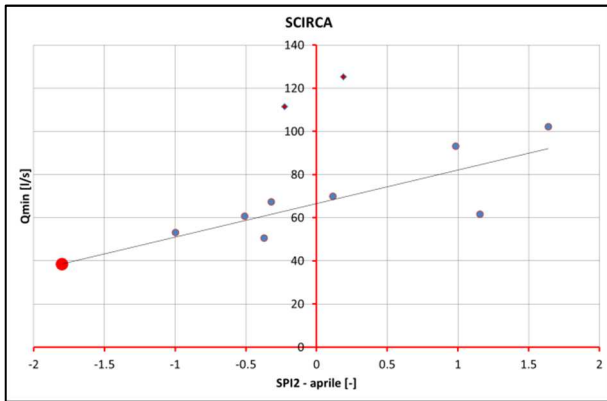


Figura 20 –Rette di regressione  $SPI_n(m)$  vs  $Q_{min}$  per le sorgenti analizzate. I pallini blu rappresentano le portate medie mensili minime di ciascun anno e il corrispondente  $SPI_n$ . Il pallino rosso indica la previsione di portata media mensile minima per il 2017 effettuata sulla base dei

Nei grafici precedenti il valore estrapolato per il 2017 è evidenziato in rosso. Occorre sottolineare che questa analisi è stata effettuata nel mese di luglio 2017. Per le sorgenti per le quali la correlazione massima è stata trovata per un  $SPI_n$  calcolato in un mese successivo a luglio (Bagnara e Peschiera) il valore di  $SPI$  utilizzato è quello che si avrebbe nel caso in cui la precipitazione da agosto in poi (fino a settembre per Bagnara e fino a Ottobre per Peschiera) sia nulla. In tabella 13 sono riportate le stime per l'anno 2017 ottenute sulla base della metodologia adottata. L'incertezza indicata in tabella è stata calcolata come deviazione standard dell'errore di stima.

SORGENTE	$SPI_n(m)$ con correlazione massima	R max	STIMA $Q_{min}$ 2017	NOTE
SCIRCA	$SPI_2(\text{apr})$	0.77	$39 \pm 14$ l/s	
BAGNARA	$SPI_7(\text{sett})$	0.74	In esaurimento	
LUPA	$SPI_9(\text{mag})$	0.86	$45 \pm 13$ l/s	
SANGIOVENALE	$SPI_{17}(\text{lug})$	0.84	$114 \pm 35$ l/s	
RASIGLIA	$SPI_6(\text{mag})$	0.79	$185 \pm 16$ l/s	
ACQUAMARCIA	$SPI_9(\text{apr})$	0.81	$3.53 \pm 0.58$ m <sup>3</sup> /s	Esiste un segnale significativo anche per l' $SPI_{21}$ -aprile (memoria del regime idrologico dell'anno precedente)
PESCHIERA	$SPI_{24}(\text{ott})$	0.73	$16.61 \pm 0.95$ m <sup>3</sup> /s	I dati disponibili sono pochi. La stima è poco significativa

Tabella 13 – Stime previsionali di portata minima relative alle sorgenti analizzate

Occorre sottolineare che la metodologia presentata risulta più robusta per le sorgenti di dimensioni medio-piccole (sostanzialmente le sorgenti ombre), per le quali l'assunzione di correlazione lineare tra anomalia pluviometrica e portata minima appare più robusta. Per le sorgenti più grandi (Acquamarcia e Peschiera) è ipotizzabile che la portata di base sia determinata dalla sovrapposizione di deficit pluviometrici su più scale temporali, meglio rappresentabile da regressioni multi-lineari (nei parametri) e più in generale multivariate non lineari nelle variabili.

## 9. CONCLUSIONI

Sulla base delle analisi precedentemente presentate, è possibile trarre alcune conclusioni di carattere generale, seppur parziali:

- Sul lungo periodo (1951-2017) il regime pluviometrico sul versante tirrenico del Distretto dell'Appennino centrale è caratterizzato a partire dagli anni '1990 da una tendenza statisticamente significativa ( $p\text{-value} < 0.1$ ) ad una diminuzione delle precipitazioni invernali (gennaio in particolare). Una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni invernali, seppur non statisticamente significativa, è osservata anche sul versante adriatico. I periodi siccitosi registrati nell'area del Distretto nel recente passato (2002, 2007, 2012, 2017) sono quindi da inquadrarsi in un contesto climatico caratterizzato da una significativa diminuzione delle precipitazioni, in particolar modo quelle invernali.
- Il versante tirrenico appare caratterizzato nel 2017 da un deficit di precipitazione estremamente significativo (SPI12 e SPI24 inferiori a -2). Tali valori sono stati registrati anche nel corso di precedenti eventi siccitosi verificatisi nell'ultimo ventennio (2002, 2007, 2012). Il deficit pluviometrico sul versante adriatico relativo al 2017 appare significativo su scala annuale (SPI12 < -1), seppur meno intenso rispetto al versante tirrenico. Considerando una scala di aggregazione biennale (SPI24) il regime pluviometrico appare nella norma, a causa di precipitazioni sopra la media nel 2016.
- Le anomalie di precipitazione cumulate su 6 e 9 mesi relative ad agosto 2017 (figura 11) sul versante tirrenico sono dell'ordine di - 60% rispetto alla media storica del periodo 1961-1990 e comunque superiori al - 40%. Sul versante adriatico sono stati registrati deficit dell'ordine di -40% sulle precipitazioni cumulate a 6 mesi e dell'ordine di -25% sulle precipitazioni cumulate a 9 mesi. Alla scala annuale, il deficit di precipitazione sul versante tirrenico è dell'ordine di -40%. Sul versante adriatico il deficit maggiore (circa -30 %) ha interessato le aree settentrionali delle Marche, mentre le aree meridionali hanno registrato precipitazioni annuali di circa -10% rispetto alla media del periodo 1961-1990. Su scala bi-annuale il deficit pluviometrico più significativo (circa - 30%) si registra nelle aree del basso Tevere, Lazio nord e Lazio sud, mentre le zone più elevate (dorsale appenninica) presentano deficit pluviometrici di poco inferiori alla media del periodo 1961-1990 (circa -10%).
- Il regime pluviometrico registrato nel Distretto dell'Appennino centrale nel periodo di analisi (1951-2017) è caratterizzato da oscillazioni con periodo variabile tra 4 e 8 anni. Tale periodicità risulta piuttosto variabile nel tempo. Il segnale periodico osservato è particolarmente significativo a partire dagli anni '2000; la periodicità negli ultimi 25 anni appare estremamente definita, con periodo di 4-5 anni.

- L'uniformità del segnale ciclico su tutto il Distretto suggerisce che l'alternanza di periodi secchi e umidi sia da mettere in relazione con dinamiche oceano-atmosferiche a scala globale, o quantomeno regionale. Tale ipotesi è stata confermata dai risultati della cross-wavelet analysis condotta sulla serie storica dell'SPI12 in relazione alla media mobile a 3 anni della serie storica dell'indice climatico winter-NAO. Tale analisi indica una relazione significativa tra la dinamica atmosferica nell'area atlantica settentrionale e il regime pluviometrico nell'area del Distretto, caratterizzata da una tendenza verso periodi più siccitosi in concomitanza di periodi caratterizzati da valori elevati di winter-NAO, e viceversa.
- E' importante sottolineare come gli ultimi 4 anni siano stati caratterizzati da valori del winter-NAO mediamente elevati. Se gli effetti del ciclo positivo di tale indice atmosferico non si fossero ancora esauriti, sembra probabile la persistenza di un regime siccitoso nell'area del Distretto per periodi temporali superiori all'anno idrologico, con un conseguente significativo impatto anche sulle risorse idriche caratterizzate da tempi caratteristici di ricarica lunghi (2-3 anni) e resilienza più elevata (quindi sulle sorgenti di dimensioni maggiori ubicate sulla dorsale carbonatica). Occorre tuttavia tenere in considerazione il fatto che se da un lato l'indice climatico winter-NAO può essere considerato un buon proxy del regime pluviometrico per scale temporali di aggregazione lunghe (3 anni), esso non può tuttavia essere utilizzato come strumento predittivo.
- Il regime pluviometrico si riflette specularmente sul regime idrologico del fiume Tevere (portate di base a Ripetta analoghe per gli anni 2007, 2012 e 2017 di poco inferiori a 80 m<sup>3</sup>/s alla fine del mese di luglio).
- L'analisi delle portate minime annuali (valutate alla scala mensile) di alcune sorgenti ubicate sulla dorsale carbonatica in relazione con le anomalie di precipitazione quantificate mediante Standardized Precipitation Indices mostra che per le sorgenti medio-piccole (sostanzialmente le sorgenti ombre) la variabilità interannuale della portata di magra può essere in buona misura spiegata dalla variabilità interannuale dell'SPI calcolato per una determinata scala di aggregazione temporale e in un determinato mese dell'anno idrologico. Tale relazione (di tipo lineare) appare meno robusta per le sorgenti di dimensione maggiore, quali Acquamarzia e Peschiera, per le quali sembra più affidabile una relazione multivariata.
- Le estrapolazione effettuate sulla portata minima delle sorgenti analizzate per l'anno corrente (2017) ipotizzabili sulla base dei dati disponibili indicano in generale una condizione di possibile criticità ma non di eccezionalità. Si sottolinea tuttavia l'incertezza dell'analisi proposta, basata su correlazioni di tipo statistico. Nella presente analisi alla scala di Distretto non sono stati considerati modelli sito

specifici che, quando di tipo deterministico, debbono essere processati in forma tale da rendere esplicito il grado di incertezza.

## 10. BIBLIOGRAFIA

APAT (2006). Linee guida per l'individuazione delle aree soggette a fenomeni di siccità. Manuali e linee guida 42 (<http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00003400/3464-manuale-2006-42.pdf/> )

Bartolini E., P. Claps, P. D' Odorico (2009). Interannual variability of winter precipitation in the European Alps: relations with the North Atlantic Oscillation *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 17-25

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. (2008). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp

Bonaccorso B., A. Cancelliere, G. Rossi (2015). Probabilistic forecasting of drought class transitions in Sicily (Italy) using Standardized Precipitation Index and North Atlantic Oscillation Index. *J. Hydrol.*, 526, 136-150

Brandimarte, G. Di Baldassarre, G. Bruni, P. D'Odorico, A. Montanari (2011). Relation between the North-Atlantic Oscillation and hydroclimatic conditions in Mediterranean areas. *Water Resour. Manag.*, 25, 1269-1279

Caloiero T., R. Coscarelli, E. Ferrari, M. Mancini (2011). Precipitation change in Southern Italy linked to global scale oscillation indexes *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1683-1694

Cressie, N. (1988). Spatial prediction and ordinary kriging, *Math. Geol.*, 20, 405–421.

Gerstengarbe, F. W. and Werner, P. C. (1999) Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime, *Clim. Res.*, 11, 97–107.

Hurrell J.W., Y. Kushnir, G. Ottersen, M. Visbeck (Eds.) (2003), *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Geophysical Monograph Series, 134, American Geophysical Union, Washington, DC

Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*, Griffin, London.

Lilliefors, H. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *J. Am. Stat. Assoc.*, 62(318), 399–402.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245–259.

Massei N., A. Durand, J. Deloffre, J.P. Dupont, D. Valdes, B. Laignel (2007). Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and precipitation variability in northwestern France over the past 35 years *J. Geophys. Res.*, 112, D09121

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, K. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In 8th Conference on Applied Climatology. Am. Meteor. Soc: Boston.

Muñoz-Díaz D., F.S. Rodrigo (2003). Effects of the North Atlantic Oscillation on the probability for climatic categories of local monthly precipitation in southern Spain. *Int. J. Climatol.*, 23, 381-397

Prokoph A., and H. El Bilali (2008). Cross-Wavelet Analysis: a Tool for Detection of Relationships between Paleoclimate Proxy Records. *Mathematical Geosciences*, 40(5), 575–586

Queralt S., E. Hernández, D. Barriopedro, D. Gallego, P. Ribera, C. Casanova (2009). North Atlantic oscillation influence and weather types associated with winter total and extreme precipitation events in Spain *Atmos. Res.*, 94 (4) (2009), pp. 675-683

Romano, E., Preziosi, E., Petrangeli, A.B. (2011). Spatial and Time Analysis of Rainfall in the Tiber River Basin (Central Italy) in relation to Discharge Measurements (1920-2010). *Procedia Environmental Sciences* 258–263. doi: 10.1016/j.proenv.2011.07.045

Romano E., E. Preziosi (2013). Precipitation pattern analysis in the Tiber River basin (central Italy) using standardized indices. *Int. J. Climatol.*, 33, 1781-1792

Romano, E., Del Bon, A., Petrangeli, A.B., Preziosi, E. (2013). Generating synthetic time series of springs discharge in relation to standardized precipitation indices. Case study in Central Italy. *J. Hydrol.* 507, 86–99. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.020

Torrence C, Compo GP. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 61–78.

Trigo R.M., D. Pozo-Vázquez, T.J. Osborn, Y. Castro-Díez, S. Gámiz-Fortis, M.J. Esteban-Parra (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 24, 925-944.

Vergni L., F. Todisco, B. Di Lena, F. Mannocchi (2016a). Effect of the North Atlantic Oscillation on winter daily rainfall and runoff in the Abruzzo region (Central Italy) *Stoch. Environ. Risk Assess.* 30(7), 1901–1915



Vergni L., Di Lena B., Chiaudanic A. (2016b). Statistical characterisation of winter precipitation in the Abruzzo region (Italy) in relation to the North Atlantic Oscillation (NAO). *Atmospheric Research*. 178-179, 279-290.

World Meteorological Organization (2012). Standardized Precipitation Index. User Guide. WMO-No. 1090. 24 pp ([http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO\\_1090\\_EN.pdf](http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf))