



IL COMMISSARIO DELEGATO MALTEMPO MAGGIO 2014

E

Fondazione CIMA

Per

LA MODELLAZIONE E DEFINIZIONE DELLE
GRANDEZZE IDROLOGICHE UTILI ALLA
PROGETTAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA
STRUTTURALE E NON STRUTTURALE DEL
RETICOLO IDROGRAFICO PRINCIPALE DELLA
REGIONE MARCHE.

**Regionalizzazione delle precipitazioni
intense**

(revisione 1)

Savona, 12/05/2016

CIMA Research Foundation

International Center on Environmental Monitoring

University Campus • Armando Magliotto, 2 • 17100 Savona - Italy • info@cimafoundation.org • Tel. +39.019230271 • Fax +39.01923027240

www.cimafoundation.org

OBSERVE TO PREDICT, PREDICT TO PREVENT.



CIMA Research Foundation
contributes to global warming reduction
using green-power and renewable energy.



Fondazione CIMA
certificato
n° 08211
ISO 9001:2000



1	Premessa	3
2	Introduzione	4
3	Analisi e delle serie storiche di massimi annuali di precipitazione disponibili	6
4	Scelta della distribuzione di probabilità genitrice	8
5	Identificazione delle regioni omogenee e distribuzione generatrice	9
6	Spazializzazione della pioggia indice	13
7	Stima delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica	20
8	Ulteriori approfondimenti sulla distribuzione spaziale della variabile indice	26
9	Esempio di applicazione	29
	Bibliografia.....	32
	Lista Allegati	33

1 Premessa

In data 17 febbraio 2015 è stata stipulata la convenzione tra il Commissario Delegato Maltempo Maggio 2014 e Fondazione CIMA per "La modellazione e definizione delle grandezze idrologiche utili alla progettazione per la messa in sicurezza strutturale e non strutturale del reticolo idrografico principale della Regione Marche" (Reg Int: 2015/28 – Nr. 670).

Il presente documento, a norma dell'articolo 6 della convenzione, è la descrizione delle attività svolte da Fondazione CIMA per la regionalizzazione delle precipitazioni intense. Obiettivo del presente lavoro è la definizione della regionalizzazione delle precipitazioni intense di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore con diversi tempo di ritorno per il territorio marchigiano.

2 Introduzione

Nel presente rapporto viene descritto il lavoro svolto relativo all'analisi statistica regionale delle precipitazioni massime annuali per le durate da 1 a 24 ore.

Diverse sono le metodologie tecnico-scientifiche che possono essere utilizzate per giungere alla caratterizzazione statistica delle piogge intense. Alcune sono basate principalmente sull'analisi separata delle singole registrazioni effettuate alle stazioni di misura (analisi a sito singolo), altre sull'uso congiunto dei dati osservati in regioni estese (analisi regionale). L'esperienza nell'ambito del progetto Valutazione delle Piene in Italia (VAPI) del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del CNR, ha mostrato che l'analisi regionale risulta, per l'Italia, il metodo più adatto per la stima affidabile dei quantili dei massimi annuali di precipitazione per elevato periodo di ritorno.

Le scelte adottate per la regionalizzazione delle precipitazioni intense sul territorio della Regione Marche sono state le seguenti:

- analisi di frequenza con approccio regionale: l'approccio di tipo regionale consente di utilizzare contemporaneamente tutta l'informazione pluviometrica disponibile sul territorio. Esso è senz'altro da preferire ad un approccio a sito singolo, in quanto le valutazioni statistiche che ne risultano presentano una disomogeneità spaziale dovuta alla differente lunghezza delle serie storiche osservate ai diversi siti di misura. Inoltre la limitata estensione del campione osservato a sito singolo fa sì che l'incertezza associata alle stime sia inaccettabile, specialmente per gli eventi rari. L'uso di tutta l'informazione disponibile sul territorio consente invece di ridurre tale incertezza al massimo livello possibile.
- utilizzo dei valori massimi annuali di precipitazione per le brevi durate: lo scopo dello studio è quello di arrivare ad una migliore caratterizzazione delle portate al colmo di piena nei bacini di medio-piccole dimensioni, intendendo con tale termine i bacini di scala fino ai 1500 km². I tempi di risposta di tali bacini ad eventi estremi sono contenuti in poche ore e comunque non superano mai le 24 ore. Sono quindi stati analizzati i massimi annuali per le durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore forniti dal Centro Funzionale Regionale.

Determinato quindi quali fossero il metodo ed i dati da utilizzare per l'analisi, si sono identificati i diversi passi necessari per giungere alla caratterizzazione statistica delle piogge. La procedura di analisi statistica regionale prevede i seguenti passi:

1. scelta della distribuzione di probabilità genitrice: per poter eseguire una analisi statistica occorre prima di tutto identificare la distribuzione di probabilità più adatta a descrivere statisticamente le osservazioni. Nell'approccio di tipo regionale tale distribuzione è assunta unica, nella sua forma adimensionale, nella porzione di territorio ritenuta statisticamente omogenea. Essa deve quindi essere in grado di descrivere il comportamento d'insieme dei dati, in termini di variabilità nello spazio dei momenti di ordine superiore osservati. Inoltre essa deve prestarsi ad una stima dei parametri su base regionale attraverso una procedura ben definita in letteratura.
2. identificazione delle regioni omogenee: una volta scelta la forma della distribuzione di probabilità genitrice occorre identificare le porzioni di territorio su cui quest'ultima può essere assunta unica nella sua forma adimensionale.
3. stima dei parametri della curva di crescita che deriva dalla distribuzione di probabilità genitrice prescelta: attraverso le tecniche suggerite in letteratura per la distribuzione prescelta si passa poi alla stima dei parametri all'interno delle regioni omogenee, che definiscono la curva di crescita, ed alla verifica dell'omogeneità;
4. caratterizzazione della pioggia indice: la curva di crescita viene assunta unica all'interno di una regione omogenea nella sua forma adimensionale. Per consentire la particolarizzazione della distribuzione in un sito generico occorre procedere alla caratterizzazione spaziale del parametro di dimensionalizzazione denominato pioggia indice.
5. definizione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP): l'ultimo passo da compiere per la completa caratterizzazione delle precipitazioni in un sito generico del territorio analizzato è la definizione delle LSPP. Esse consentono, per assegnato periodo di ritorno, di disegnare un evento di precipitazione di progetto, il quale può essere utilizzato per la generazione delle portate al colmo di piena, con opportuna tecnica di trasformazione afflussi-deflussi.

3 **Analisi e delle serie storiche di massimi annuali di precipitazione disponibili**

I dati utilizzati per la regionalizzazione delle precipitazioni intense sono le serie storiche delle precipitazioni estreme di durata prefissata (1, 3, 6 12 e 24 ore) per tutti i pluviometri della rete del Centro Funzionale della Regione Marche sino all'anno 2014, compresi i dati pubblicati negli Annali Idrologici parte I dell'Ufficio Idrografico e Mareografico di Bologna sino al 1989, con l'aggiunta degli strumenti della rete ASSAM. Le serie con pluviometri con diverso codice ma stessa posizione spaziale sono state accorpate.

Il numero di pluviometri disponibili è 168 per la rete del Centro Funzionale e 74 per la rete ASSAM, per un totale di 242 serie storiche.

Si è poi proceduto a un controllo dei valori e all'eliminazione di outlier (es: precipitazioni di oltre 400 mm nelle serie a 1 h). In Figura 1 viene rappresentata la disponibilità di dati per tutto il periodo analizzato (1929-2015) per ogni serie del Centro Funzionale. La rete ASSAM, invece, dispone di serie più brevi, che coprono il periodo 1995-2014.

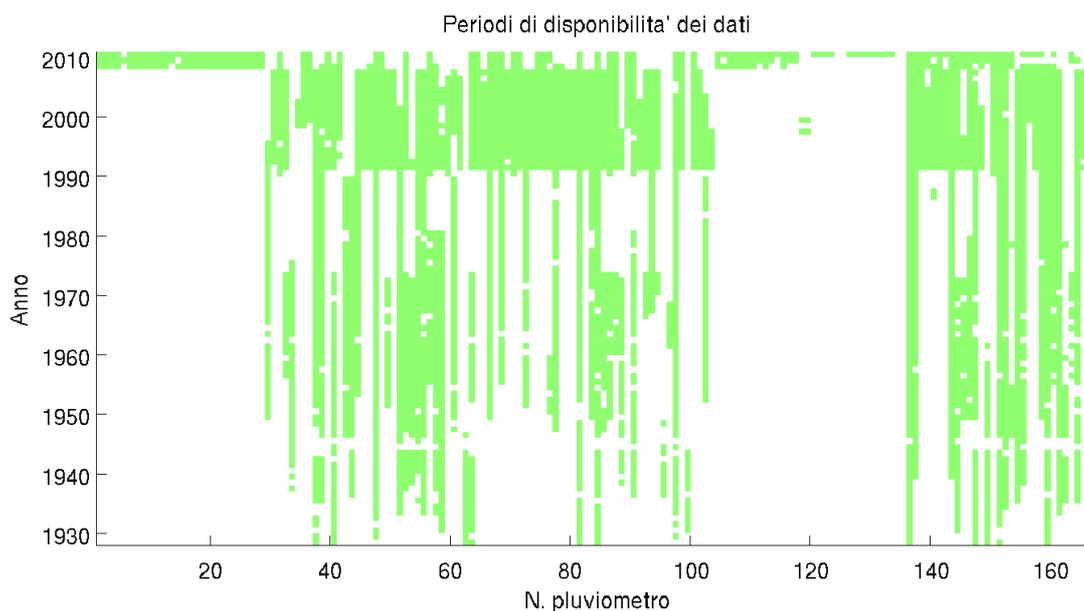


Figura 1 Dati disponibili per dato e per stazione relativamente al dataset del Centro Funzionale.

Al fine di mantenere una buona significatività statistica, ma senza perdere eccessivamente in risoluzione spaziale, sono state prese in considerazione solo le serie aventi almeno 15 anni di dati per ognuna delle durate, riducendo così il numero totale di pluviometri utilizzati per l'analisi a 166. In Figura 2 sono riportate le posizioni dei sensori con l'informazione relativa alla lunghezza della serie.

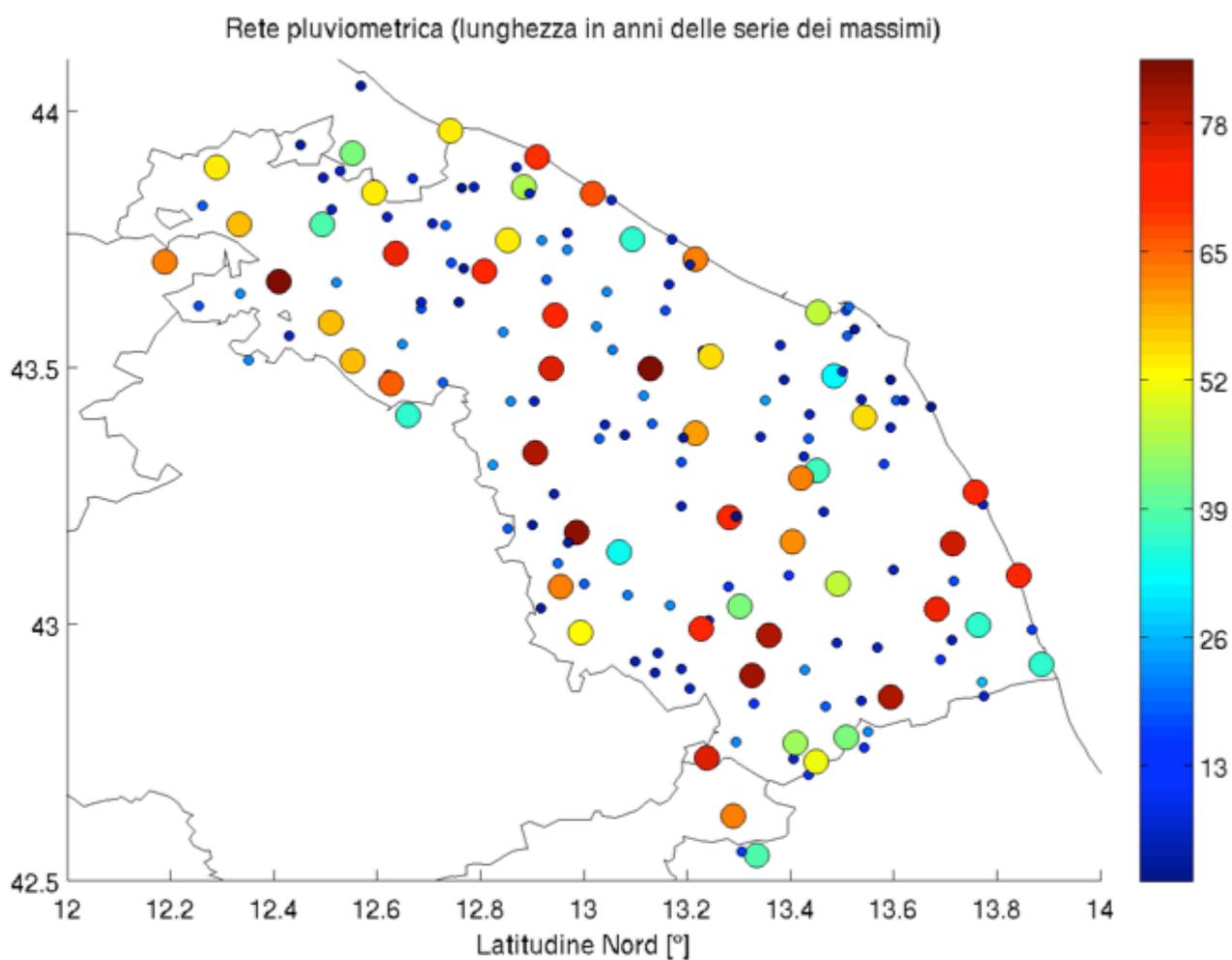


Figura 2 Mappa della lunghezza delle serie disponibili per tutti i pluviometri. Sono stati evidenziati con simboli più grandi i pluviometri aventi più di 40 anni di dati.

Un'ulteriore verifica preliminare è consistita in un test di Mann-Kendall per verificare la stazionarietà delle singole serie e individuare eventuali trend o oscillazioni, con particolare riferimento alle serie più lunghe. Tutte le serie hanno passato il test evidenziando quindi la sostanziale stazionarietà delle precipitazioni estreme in tutta la regione.

4 Scelta della distribuzione di probabilità genitrice

Una volta consolidato e uniformato il dataset, si è proceduto all'analisi statistica delle singole serie. Per ognuna delle serie pluviometriche sono state testate diverse Distribuzioni di Estremo. L'analisi ha mostrato che la GEV (Generalized Extreme Value distribution) si adatta bene alla totalità dei pluviometri, evidenziando la mancanza di una struttura più complessa di precipitazioni eccezionali che avrebbe potuto richiedere una modellazione con una distribuzione TCEV (Two-Component Extreme Values Distribution). In Figura 3 sono mostrate, per alcuni pluviometri regionali, la serie di massimi di precipitazione per la durata di 1 ora e il fitting a sito singolo della GEV, si evidenzia che i dati osservati rientrano sempre all'interno delle bande di confidenza al 95%.

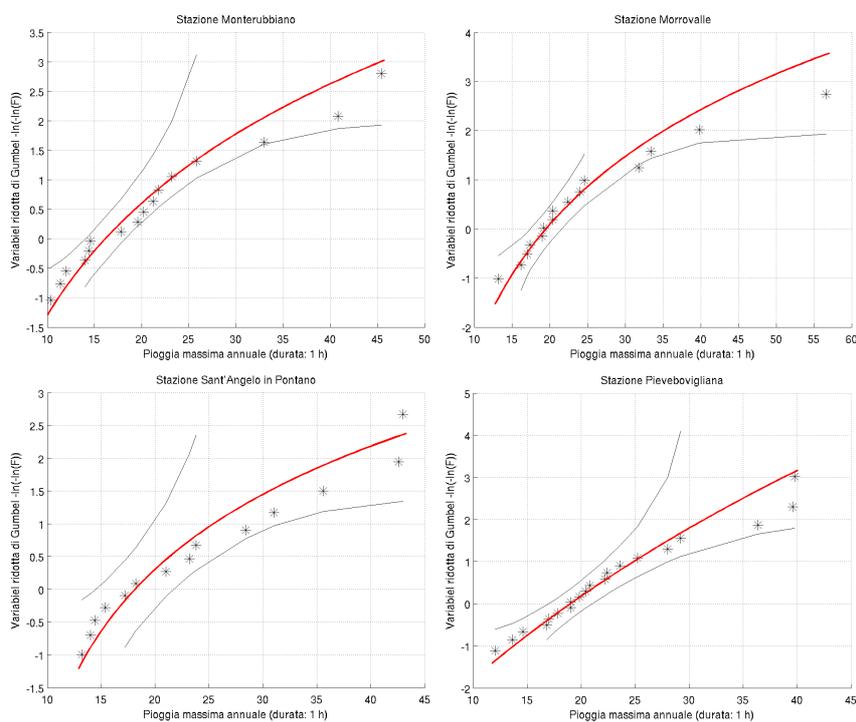


Figura 3 Esempi di fit delle GEV su vari pluviometri con bande di confidenza

5 Identificazione delle regioni omogenee e distribuzione generatrice

Dall'analisi del fitting tra le curve a sito singolo si è potuto osservare, quindi, che le serie storiche analizzate dell'intera rete pluviometrica regionale appartengono a una stessa regione omogenea. Tale risultato è coerente con l'orogenesi delle precipitazioni intense sulla regione di interesse.

Successivamente le serie di massimi annuali di durata un ora sono state adimensionalizzate ciascuna con la propria media e plottate su carta probabilistica (Figura 4).

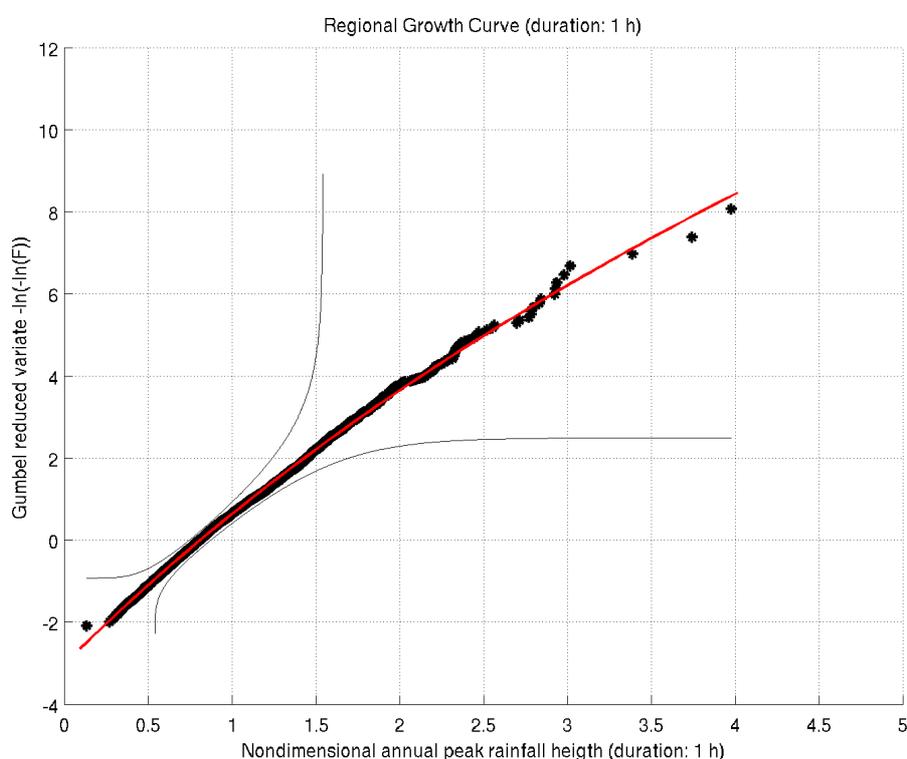


Figura 4 Curva di crescita delle precipitazioni estreme di durata 1 ora adimensionalizzate rispetto alla propria media (pallini neri), curva GEV di fitting (linea rossa) e fasce di confidenza al 99%.

Sul campione delle precipitazioni di durata 1 ora così ottenuto, che comprende quindi tutte le osservazioni di tutte le stazioni adimensionalizzate ognuna con la propria media, è stata fittata la distribuzione di probabilità genitrice, cioè la distribuzione della variabile adimensionale, che è risultata anch'essa una GEV con ottimo accordo con le osservazioni. La procedura è stata

ripetuta per le restanti durate (3, 6, 12, 24 ore) ottenendo risultati analoghi, riportati in Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

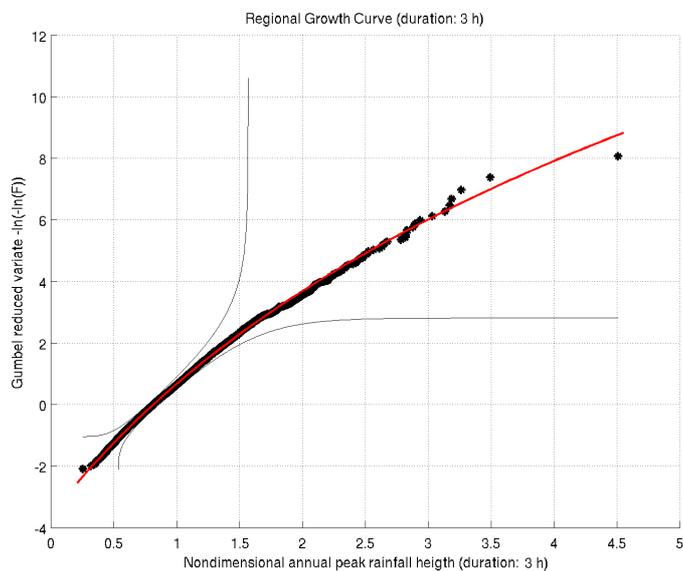


Figura 5 Curva di crescita delle precipitazioni estreme di durata 3 ore adimensionalizzate rispetto alla propria media (pallini neri), curva GEV di fitting (linea rossa) e fasce di confidenza al 99%.

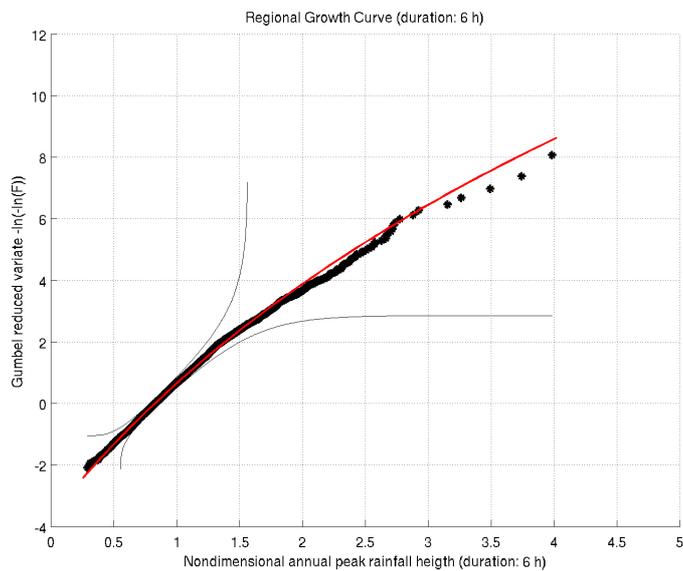


Figura 6 Curva di crescita delle precipitazioni estreme di durata 6 ore adimensionalizzate rispetto alla propria media (pallini neri), curva GEV di fitting (linea rossa) e fasce di confidenza al 99%.

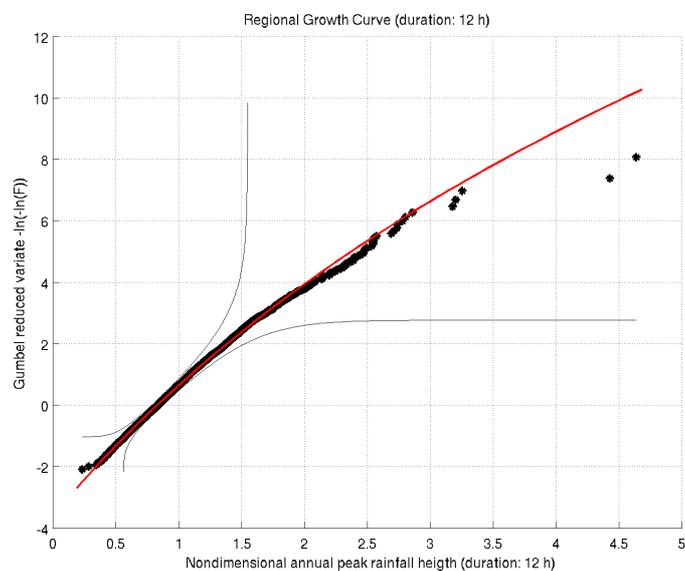


Figura 7 Curva di crescita delle precipitazioni estreme di durata 12 ore adimensionalizzate rispetto alla propria media (pallini neri), curva GEV di fitting (linea rossa) e fasce di confidenza al 99%.

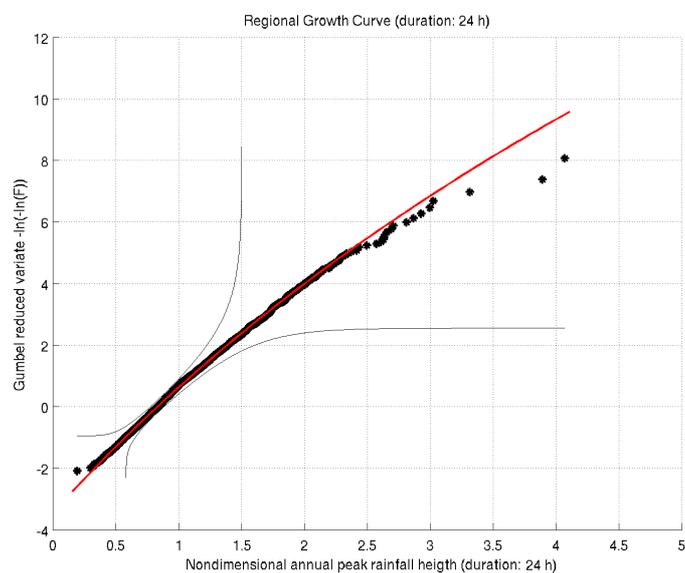


Figura 8 Curva di crescita delle precipitazioni estreme di durata 24 ore adimensionalizzate rispetto alla propria media (pallini neri), curva GEV di fitting (linea rossa) e fasce di confidenza al 99%.

Le distribuzioni GEV così fittate si adattano molto bene alle osservazioni di tutti i sensori, non solo perché le osservazioni stesse si mantengono tutte all'interno delle bande di confidenza, ma anche perché la curva di crescita adimensionale descrive molto bene i dati stessi. Questo risultato, da un lato, permette di rifiutare definitivamente l'ipotesi che le precipitazioni estreme potessero essere descritte da modelli probabilistici più complessi, come la TCEV, dall'altro conferma l'ipotesi iniziale che tutto il territorio delle Marche costituisca un'unica regione omogenea dal punto di vista pluviometrico, cioè le piogge adimensionali hanno la stessa distribuzione di probabilità su tutto il territorio.

In seguito all'osservazione che le GEV fittate per le diverse durate sono in effetti estremamente simili tra di loro, è stata fatta un'analisi ulteriore combinando le piogge adimensionali di tutti i pluviometri e di tutte le durate, e confrontandoli con la GEV stimata per le piogge di durata 1 ora. Il risultato, riportato in Figura 9, mostra come la GEV fittata per i dati a 1 ora descrive molto bene anche tutte le altre durate, i cui dati sono sempre contenuti entro le fasce di confidenza al 99%.

Quest'ultimo risultato permette di definire quindi come unica variabile indice per l'analisi l'altezza di pioggia estrema di durata 1 ora media, valida anche per tutte le altre durate. Nel seguito tale variabile viene identificata come **pioggia indice**.

L'espressione della curva di crescita fittata sui valori adimensionali è la seguente:

$$F(x) = \exp\left(-\left[1 + \left(\frac{x - 0.8336}{0.2635}\right)0.0524\right]^{-1/0.0524}\right) \quad (1)$$

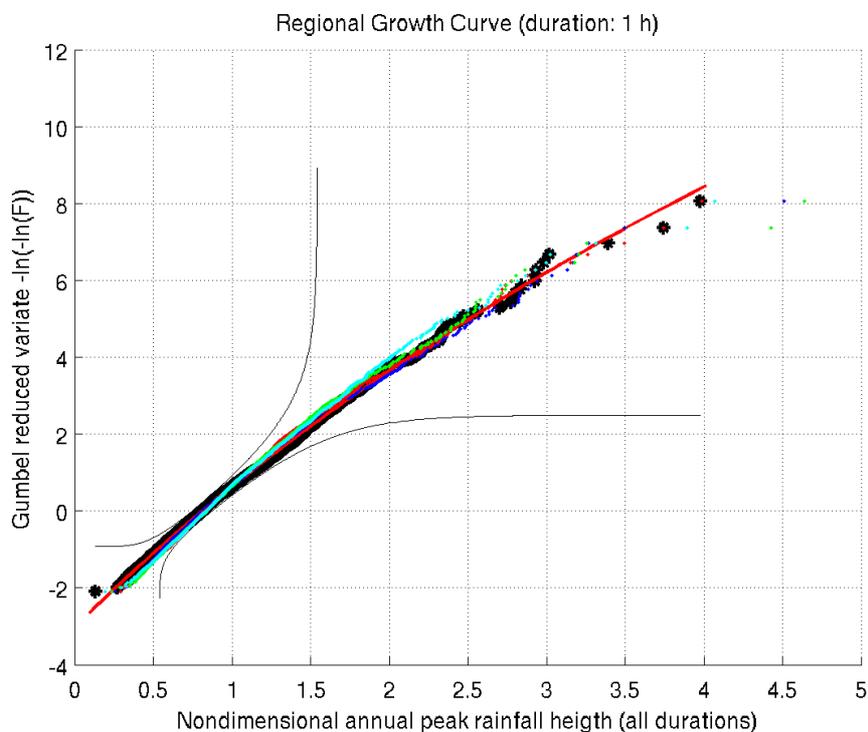


Figura 9 Confronto tra i dati di altezza di pioggia estrema adimensionale di tutti i pluviometri e di tutte le durate con la GEV ricavata per i dati di durata 1 ora (curva rossa). Gli asterischi neri rappresentano i dati a 1 ora, mentre i punti di vari colori rappresentano i dati per tutte le altre durate (3, 6, 12 e 24 ore).

6 Spazializzazione della pioggia indice

Per poter definire l'altezza di precipitazione per assegnata durata e assegnato tempo di ritorno è necessario spazializzare la pioggia indice.

A tale scopo è stata eseguita un'analisi di regressione con un set di variabili topografiche. Una volta ottenuta un'eventuale relazione con una o più variabili spaziali, la procedura per ottenere la distribuzione delle piogge estreme in un dato punto dell'area di interesse consiste nel calcolare, mediante la regressione identificata, la variabile indice nel punto dato e poi usarla per dimensionalizzare la curva di crescita ottenuta nel paragrafo precedente.

Le variabili topografiche che sono state prese in considerazione per l'analisi di regressione sono:

- La quota sul livello del mare
- La pendenza del versante
- L'esposizione del versante
- Un opportuno indice di shading orografico
- La distanza dalla costa

In particolare, per quanto riguarda la quota è stato utilizzato un modello digitale del terreno DEM (Digital Elevation Model) con risoluzione spaziale pari a 250 m. Successivamente è stata considerato sia il DEM originale sia il dem processato con filtri spaziali a finestra mobile (3x3 e 5x5 pixel), sia il DEM risultante da un'analisi con la trasformata di Fourier 2D, a seguito della quale sono state eliminate le armoniche con frequenza più alta (procedura di smoothing del DEM).

La pendenza e l'esposizione sono state ricavate sia dal DEM nativo che da quello ottenuto con il filtro spaziale 3x3.

L'indice di shading orografico è stato calcolato mediante la convoluzione del DEM con un set di kernel asimmetrici appositamente costruiti e derivati dal kernel LoG (Laplacian of Gaussian). Il kernel LoG originale, cambiato di segno, è stato opportunamente modulato in una forma che perde la simmetria centrale ed è stato ruotato in varie direzioni, in modo da evidenziare, in ogni punto del DEM, lo shading orografico nelle corrispondenti direzioni. Un totale di 16 direzioni (da 0° a 337.5° rispetto al Nord) sono state prese in considerazione.

La variabile indice non ha mostrato dipendenze significative con nessuna delle variabili sopraelencate, sono stati inoltre effettuati tentativi di regressione provando a variare la variabile indice utilizzando diversi quantili delle GEV adimensionali, ma senza variazioni significative dei risultati.

Nelle Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16 sono riportati solo alcuni esempi delle analisi effettuate in cui è evidente come la pioggia indice non sia correlata a nessuna variabile topografica. Tali risultati sono inoltre confermati da precedenti lavori di letteratura sulla regione, si vedano ad esempio Brath et al 2001, Merz 2005, Castellarin 2007, Castellarin et al 2005, 2007, 2009.

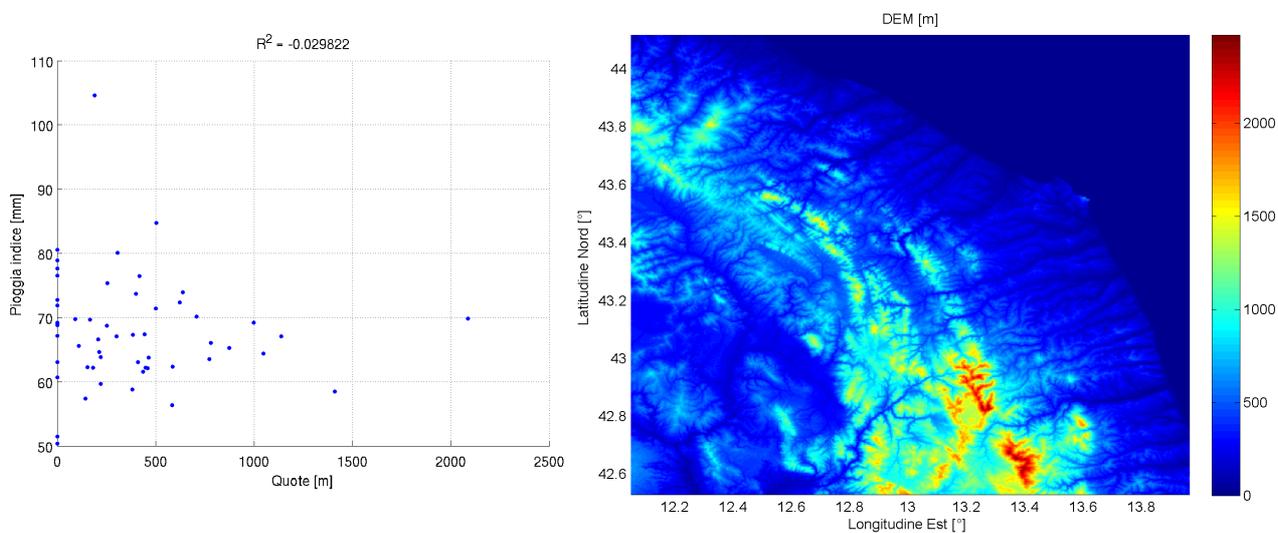


Figura 10 DEM comprendente la Regione Marche e scatterplot tra la quota e la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione.

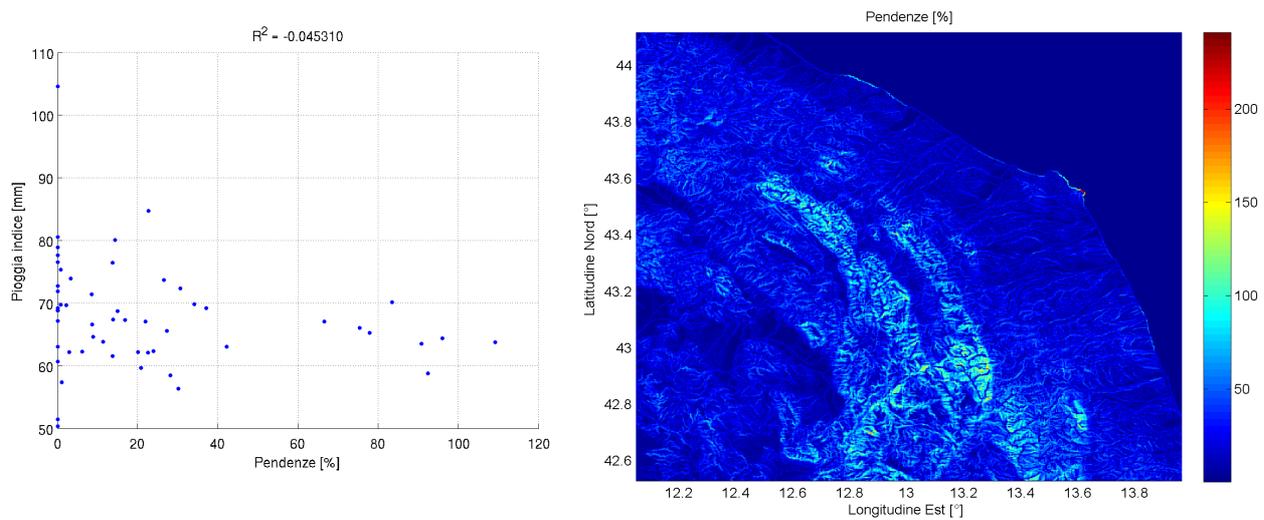


Figura 11 Mappa di pendenza dei versanti e scatterplot tra la pendenza e la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione

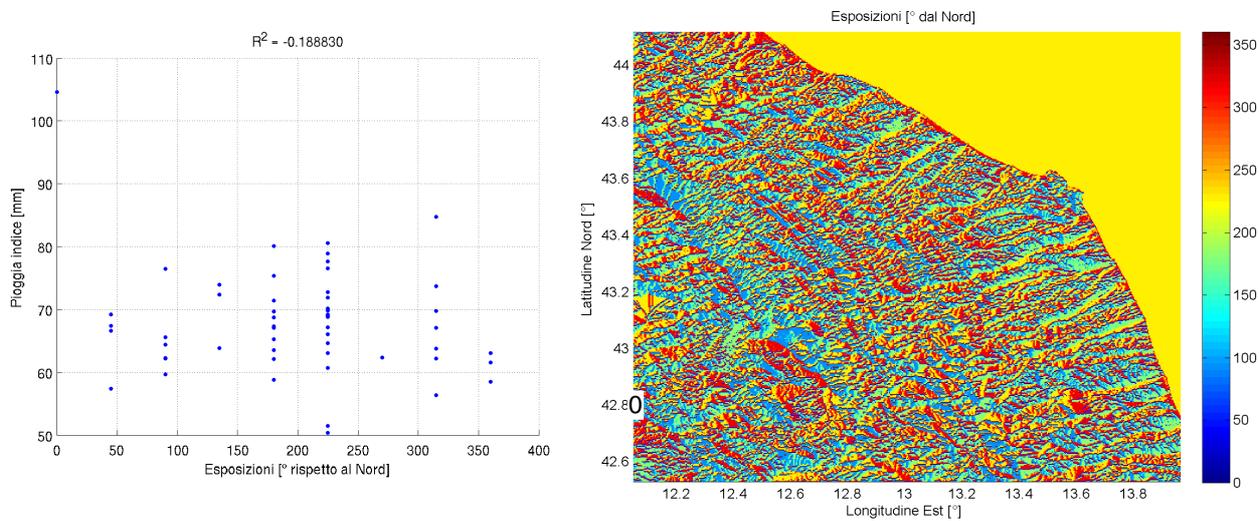


Figura 12 Mappa di esposizione dei versanti e scatterplot tra l'esposizione e la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione

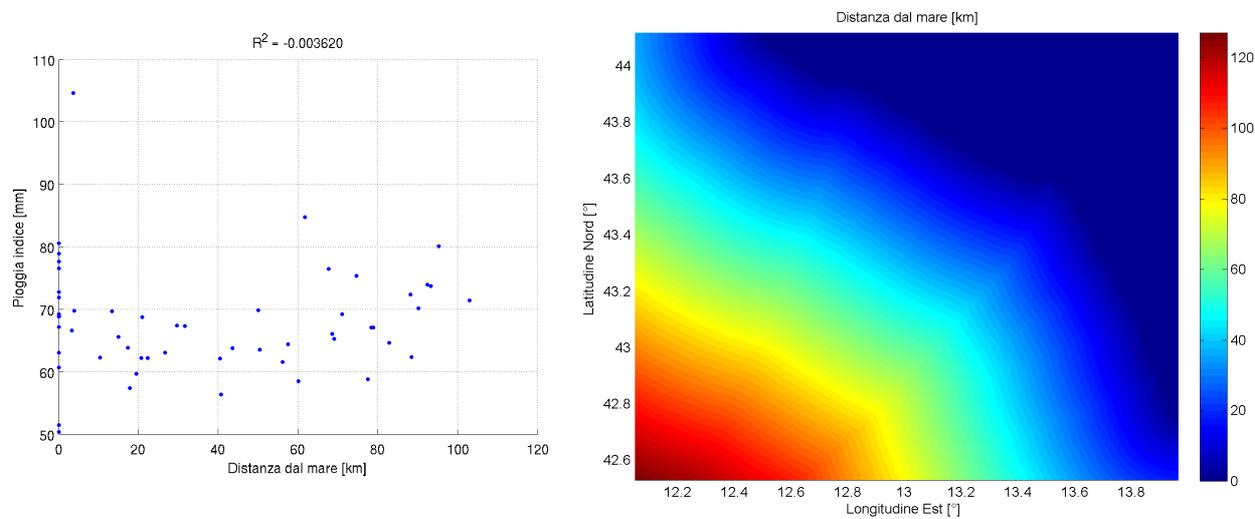


Figura 13 Mappa della distanza di ciascun punto dalla inea di costa e scatterplot tra la distanza dalla linea di costa e la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione

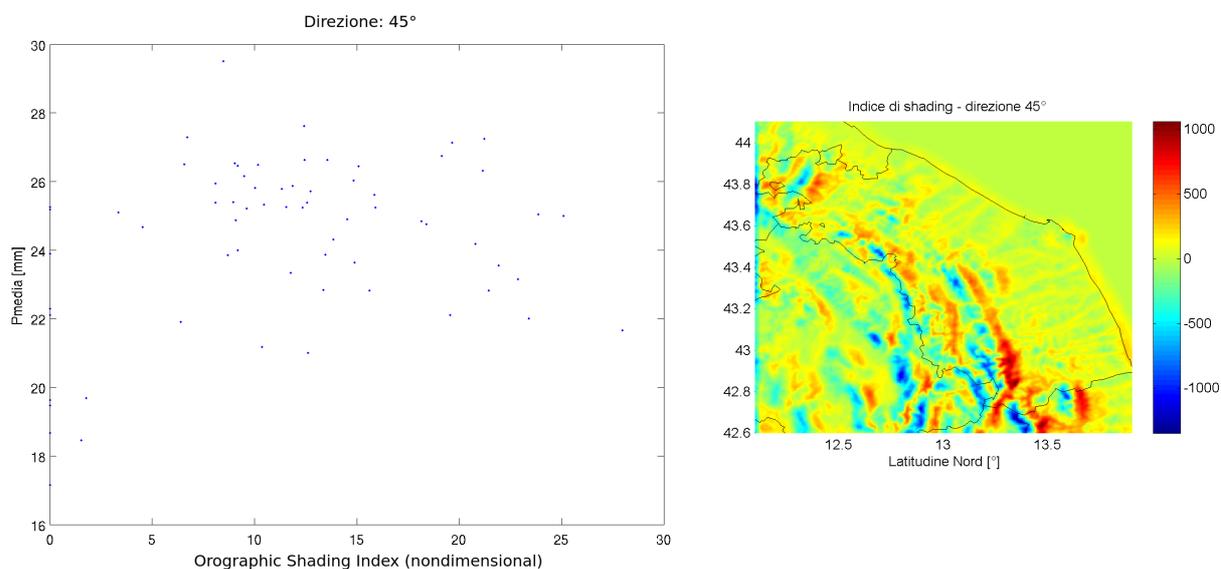


Figura 14 Mappa dell'indice di shading in direzione 45° di ciascun versante e scatterplot con la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione.

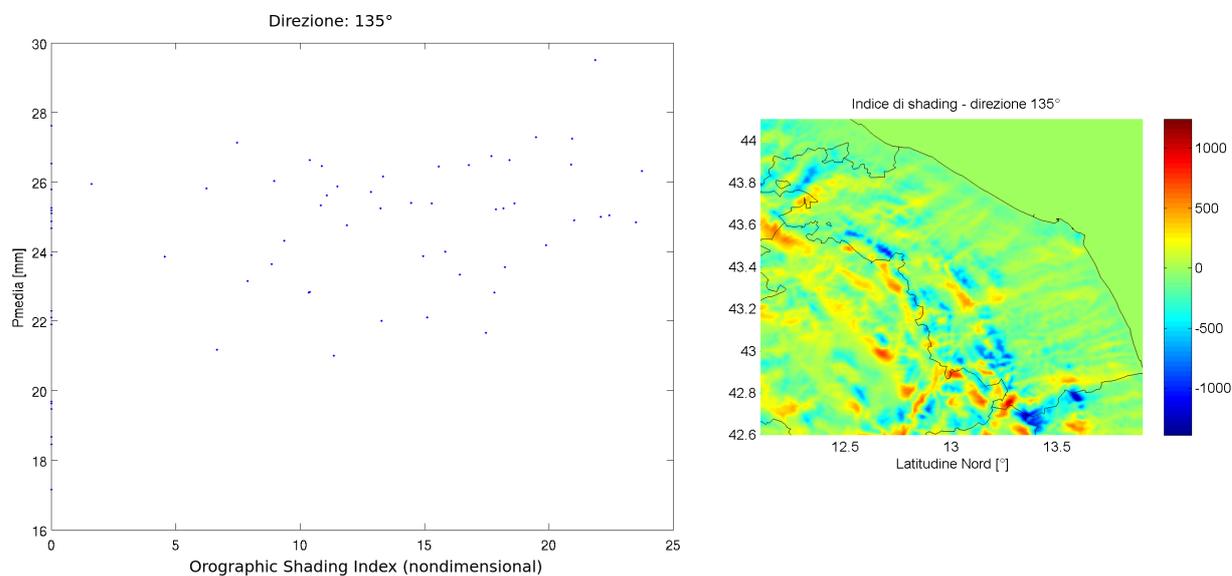


Figura 15 Mappa dell'indice di shading in direzione 135° di ciascun versante e scatterplot con la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione.

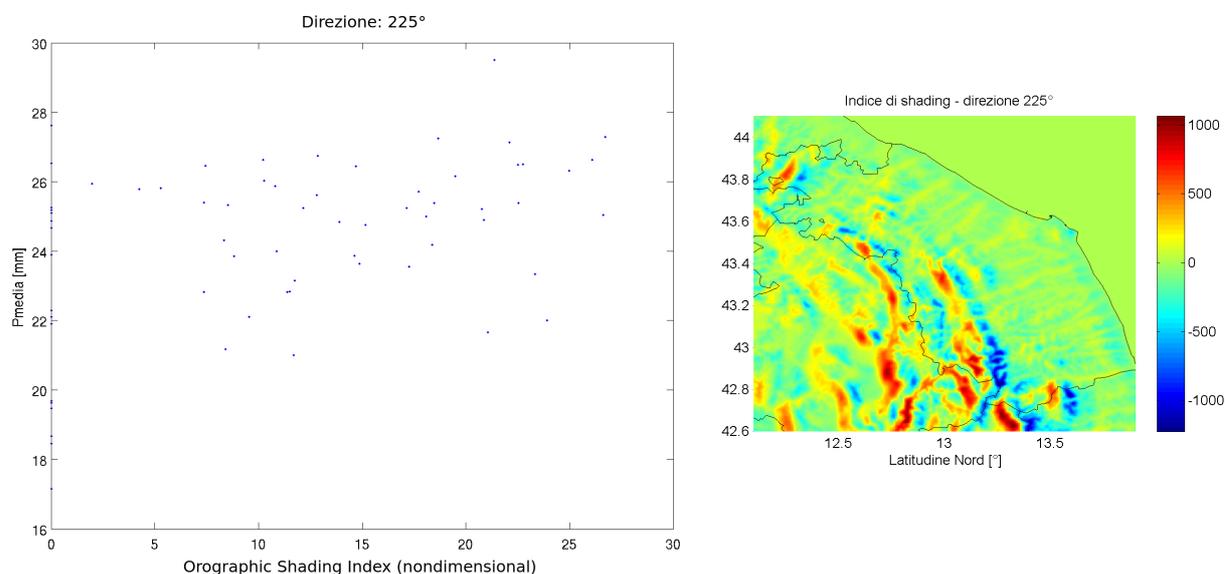


Figura 16 Mappa dell'indice di shading in direzione 225° di ciascun versante e scatterplot con la pioggia indice, non si evidenzia nessuna correlazione.

La pioggia indice è stata quindi spazializzata con un metodo di interpolazione spaziale dei valori noti in corrispondenza dei sensori. Per determinare la tecnica di interpolazione migliore, che minimizzasse l'errore di spazializzazione è stata applicata un'analisi Jackknife. Le tecniche di interpolazione indagate sono state: il nearest neighbour, l'inverso del quadrato della distanza, e il kriging con diversi semivariogrammi teorici quali: lineare, circolare, sferico, penta sferico, esponenziale, gaussiano.

La procedura Jackknife è consistita nel fare 100 estrazioni casuali di metà dei pluviometri analizzati. La metà estratta è stata esclusa dall'interpolazione e utilizzata come punti di validazione dell'interpolazione eseguita con la restante metà dei valori. Gli errori, calcolati come valore interpolato, nel punto in cui è presente un sensore, meno valore registrato dal sensore stesso, sono poi stati analizzati e, a loro volta, interpolati spazialmente allo scopo di avere una mappa di errore di interpolazione medio. Questa procedura, applicata alla variabile indice (quindi alla precipitazione estrema di durata 1 ora media sul periodo di disponibilità dei dati) è stata applicata per tutte le tecniche di interpolazione citate.

Il nearest neighbour e l'inverso del quadrato della distanza sono risultati i metodi con errori più alti mentre le differenze tra gli errori di interpolazione ottenuti con diversi semivariogrammi

per il kriging è molto bassa, probabilmente anche a causa della scarsissima correlazione spaziale registrata nei dati stessi.

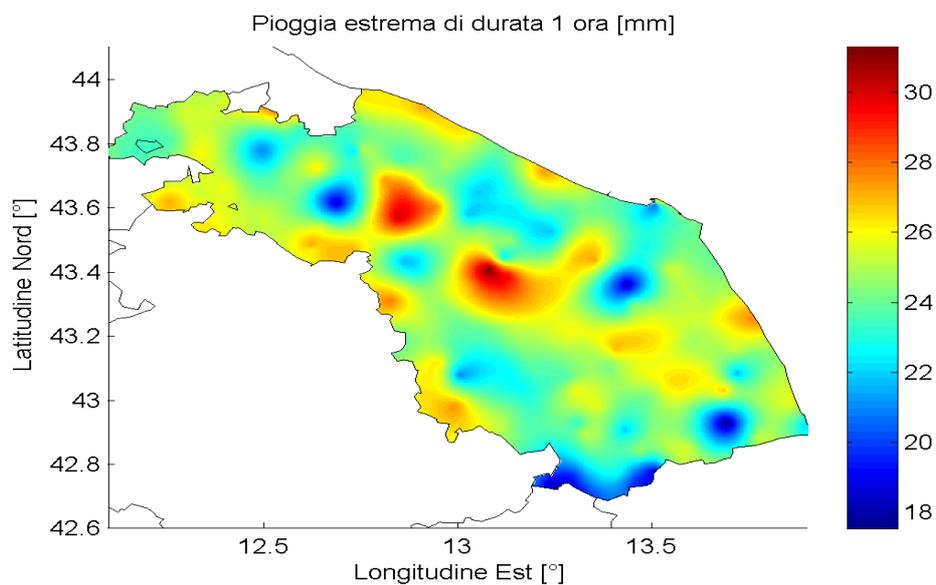


Figura 17 Mappa della precipitazione indice [mm]

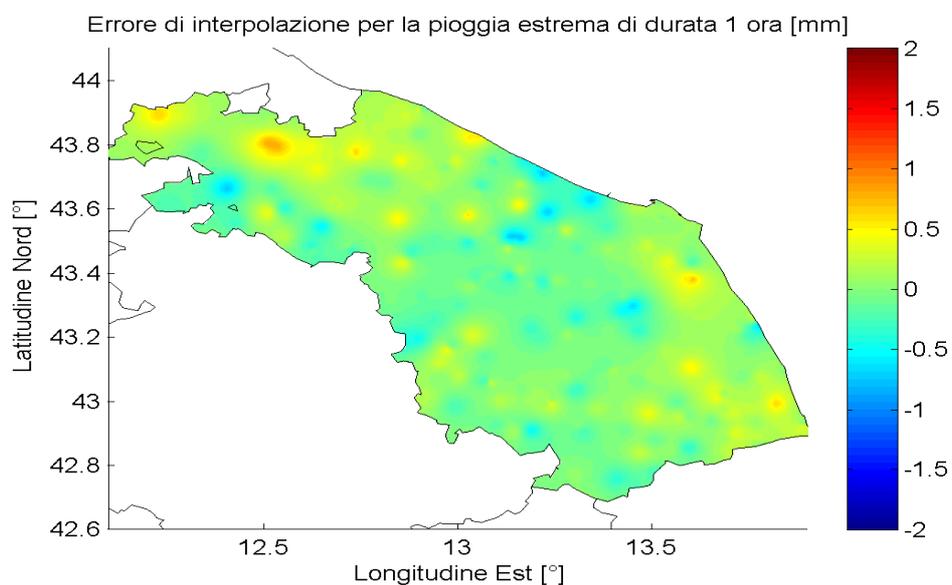


Figura 18 Mappa dell'errore di interpolazione utilizzando la tecnica di interpolazione kriging con semivariogramma sferico.

Tra i diversi semivariogrammi è stato selezionato il semivariogramma sferico. In Figura 17 è riportata la mappa interpolata della variabile indice, mentre in Figura 18 è riportata la mappa interpolata (sempre con variogramma sferico) degli errori di interpolazione medi.

7 Stima delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica

Ottenuta la spazializzazione della variabile indice per tutte le durate, col metodo kriging esposto nel paragrafo precedente, la stima della **Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica** ha seguito la metodologia standard.

Per ogni pixel, sono stati riportati in piano bi-logaritmico i valori di durata (1, 3, 6, 12, 24 ore) e i corrispondenti valori di altezza di pioggia per diversi valori dei tempi di ritorno (10, 25, 100, 200 anni) ottenuti mediante la GEV regionale. Per ogni tempo di ritorno, è stata quindi stimata, con regressione lineare e ottimo accordo con i dati, l'equazione nella forma:

$$H = ad^n \quad (2)$$

dove **H** è l'altezza di pioggia [mm], **d** la durata [ore], e **a** ed **n** sono parametri da stimare. Per la dimensionalizzazione e il calcolo dell'altezza di pioggia estrema per ogni tempo di ritorno, si fa ricorso alla distribuzione genitrice stimata nei paragrafi precedenti, pervenendo così alla formula della LSPP regionalizzata:

$$H = \frac{k(T)}{k(10)} ad^n \quad (3)$$

dove **k(T)** è il fattore di crescita, ed è ottenuto invertendo la formula della funzione di ripartizione della GEV trovata nei paragrafi precedenti, trovando così una relazione dipendente dal tempo di ritorno **T**. **k(10)** è il fattore di crescita calcolato per il tempo di ritorno pari a 10 anni, il più basso tra quelli considerati, rispetto al quale sono state calcolate le mappe dei parametri **a** ed **n** di riferimento, riportate di seguito.

L'espressione finale della LSPP, in funzione del tempo di ritorno **T** [anni] e della durata **d** [ore], è quindi,:

$$H(d, T) = 0.5711 \cdot \left[5.0286 \left(-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right)^{-0.0524} - 4.1950 \right] \cdot ad^n \quad (4)$$

Tale formula, abbinata alle mappe dei parametri **a** ed **n** (per un tempo di ritorno di 10 anni), riportate rispettivamente in Figura 19 e Figura 20, costituisce quindi il risultato finale della regionalizzazione delle altezze di pioggia estrema e durata prefissata.

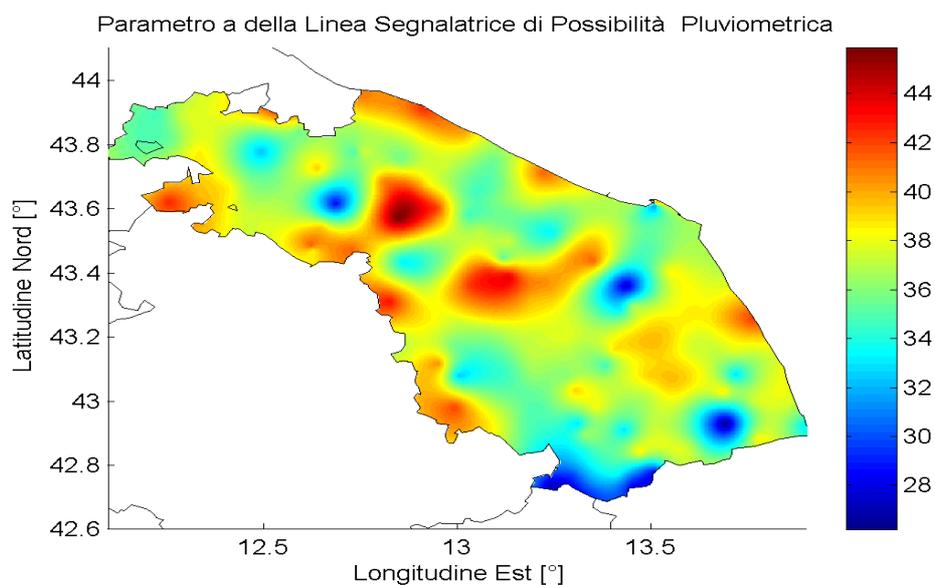


Figura 19 Mappa del parametro **a** della LSPP regionalizzata, calcolato per un tempo di ritorno di 10 anni.

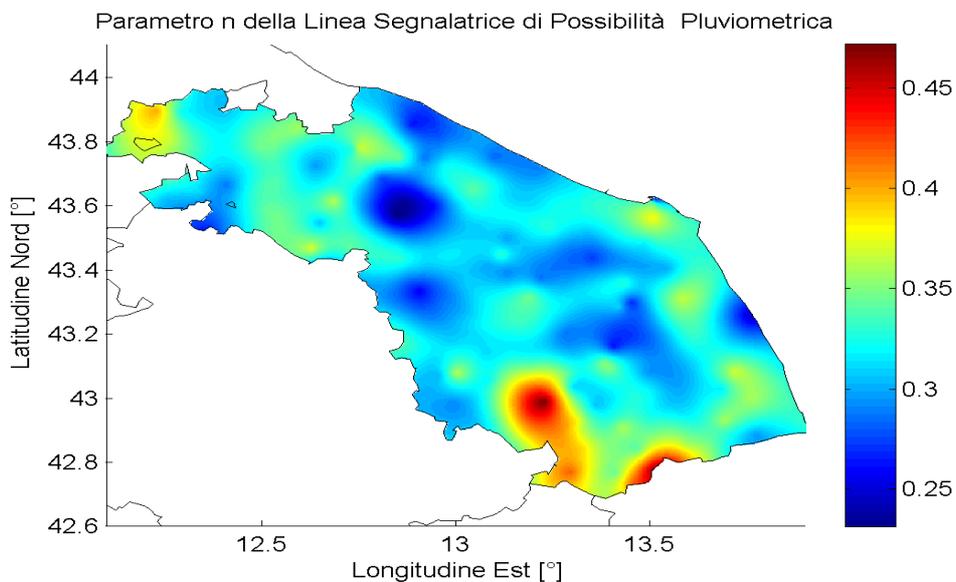


Figura 20 Mappa del parametro **n** della LSPP regionalizzata, calcolato per un tempo di ritorno di 10 anni.

Stazione	Pioggia indice [mm]	a	n	Stazione	Pioggia indice [mm]	a	n
Ca' Mazzasette	24.1	36.80	0.33	Sarnano	25.8	39.12	0.31
Montellabate	24.6	37.47	0.33	Servigliano	25.9	39.18	0.30
Lucrezia	24.8	37.57	0.30	Ripatransone	24.6	37.40	0.36
Pesaro Ferrovia	26.8	41.85	0.28	Poggio Cancelli	19.5	29.59	0.31
Montegrimano	25.3	38.22	0.33	Poggio Cancelli	21.1	31.70	0.31
Sassofeltrio	26.6	40.12	0.33	Amatrice	17.2	25.28	0.34
Bronzo	22.2	34.10	0.35	Offida	17.6	26.26	0.36
Apecchio	25.4	37.78	0.31	Spinetoli	25.1	38.10	0.30
Jesi	22.0	33.60	0.33	Diga di Talvacchia	18.8	28.45	0.47
Agugliano	24.7	37.65	0.32	San Vito	23.8	35.50	0.46
Villa Fastiggi	26.0	40.35	0.28	Pietralta	20.6	29.51	0.39
Recanati	24.9	38.10	0.33	Settecerri	21.6	32.17	0.46
Umito	21.4	31.23	0.36	Ascoli Piceno	25.2	37.35	0.36
Esanatoglia convento	24.7	38.21	0.29	Arquata del Tronto	19.7	29.71	0.42
San Giovanni	28.8	42.05	0.31	Centrale di Castro	23.8	33.92	0.39
Mozzano	24.9	37.50	0.38	Croce di Casale	22.0	33.04	0.36
Rotella	24.6	36.57	0.32	Capo di Colle	24.6	38.36	0.34
San Benedetto	22.8	34.01	0.33	San Martino	19.7	28.24	0.42
Force	24.1	36.74	0.32	Saludecio	24.2	37.45	0.33
Porto S.Elpidio	27.0	40.93	0.26	San Severino Marche	25.4	37.74	0.33

Grottazzolina	25.9	38.62	0.31	S. Maria in Arzilla	25.0	38.74	0.27
Ussita	24.2	36.27	0.39	Bettolelle	24.1	37.79	0.30
Pintura di Bolognola	24.1	35.58	0.45	Gallo	23.0	35.77	0.32
Sassotetto	24.1	35.90	0.43	Acqualagna	19.2	29.63	0.35
Monte Prata	23.3	34.02	0.39	Marotta Cesano	25.3	38.45	0.29
Monte Bove Sud	23.7	34.82	0.41	Spinetoli	24.9	37.80	0.30
Montefano	21.6	32.55	0.30	Villa Potenza	20.8	31.03	0.31
Appignano	24.0	35.98	0.31	Colleponi	22.5	34.10	0.32
Candelara	25.1	38.94	0.26	Metaurilia	25.2	38.25	0.30
Monterubbiano	21.7	32.90	0.37	Meteomarina CADSEALAND	24.1	36.86	0.33
Piagge	24.9	37.34	0.32	Osimo Monteragolo	23.0	35.13	0.33
Mondolfo	23.4	35.42	0.29	Endesa	25.2	38.09	0.33
Macerata	24.2	36.52	0.27	Ponte Tavola	24.4	36.46	0.36
Petriolo	26.2	38.83	0.28	San Marino	26.4	39.78	0.31
Morrovalle	25.0	38.25	0.37	Rimini	25.6	38.74	0.32
Sant'Angelo in Pontano	24.4	36.26	0.35	Montepolesco	25.4	38.39	0.30
Bolognola	23.9	35.22	0.47	S. Maria Goretti	21.6	32.24	0.35
Tolentino	25.9	37.87	0.29	Senigallia	26.6	40.46	0.29
Pieve Bovigliana	22.8	34.64	0.32	Rostighello	24.2	36.68	0.31
Serravalle del Chienti	25.6	38.32	0.30	Svarchi	24.2	36.79	0.33
Gelagna Alta	21.1	32.48	0.36	Montecchio	24.3	37.10	0.34
Monte Colombo	29.4	44.17	0.32	Monte Paganuccio	23.7	36.28	0.30
Cattolica	26.5	41.09	0.31	Sefro	24.2	36.81	0.31

Jesi	22.1	33.51	0.33	Spindoli	24.6	37.79	0.32
Poggio S. Romualdo	27.3	42.15	0.31	Cingoli	27.1	40.74	0.31
Apiro	29.3	43.64	0.29	Serravalle di Chienti	26.3	39.76	0.30
Moie	24.8	37.41	0.30	Poggio San Vicino	29.6	43.12	0.31
Sassoferrato	21.7	33.30	0.33	Loreto	24.2	37.01	0.33
Sassocorvaro	21.0	32.39	0.34	Baraccola	22.7	34.86	0.36
Petriano	22.4	34.94	0.33	Tolentino	25.8	37.62	0.29
Pesaro	27.2	42.42	0.28	Cesane Foresta	24.4	36.91	0.32
Carpegna	26.0	38.52	0.33	S. Angelo in Vado	25.7	38.54	0.29
Ragnola	22.4	33.54	0.33	Urbino	26.2	39.23	0.30
Fano	26.3	40.08	0.29	Pergola	30.0	45.76	0.23
Porto Sant' Elpidio	27.6	42.01	0.25	Fonte Avellana	27.0	41.33	0.34
Ancona Torrette	23.1	36.32	0.34	Filottrano	27.1	41.14	0.27
Senigallia	27.2	41.19	0.29	Cupramontana	22.6	35.47	0.33
Badia Tedalda	24.0	36.93	0.36	Colle	24.3	36.88	0.31
Pennabilli	23.7	35.49	0.37	Arcevia	24.7	36.77	0.30
Novafeltria	25.4	37.38	0.32	Loro Piceno	26.8	38.78	0.26
Foresta della Cesana	23.2	35.38	0.33	Camerino	22.8	34.57	0.31
Pontedazzo	27.1	41.23	0.35	Montecavallo	27.4	41.81	0.29
Piobbico	25.2	37.22	0.34	Capodacqua	18.4	27.32	0.39
Bocca Serriola	26.4	39.44	0.26	Serralta	27.1	39.59	0.35
Acqualagna	18.5	28.60	0.36	Scheggia	26.3	39.57	0.27
Cantiano	26.2	38.57	0.37	Campodiegoli	27.8	43.06	0.29

Cagli	25.2	39.04	0.31	Montemonaco	25.1	36.37	0.36
Pianello	25.4	38.39	0.35	Fermo	25.3	37.83	0.32
Lamoli	27.1	42.58	0.30	Ancona Regione	21.0	32.15	0.33
Mercatello	25.3	39.54	0.31	Carassai	26.8	38.75	0.32
Urbania	23.9	35.87	0.34	San Lorenzo in Campo	27.4	42.18	0.26
Bargni	23.6	35.79	0.34	Santa Maria di Pieca	23.7	36.15	0.35
Barchi	24.7	38.62	0.30	Fiume di Fiastra	22.6	35.28	0.40
Calcinelli	24.2	37.45	0.29	Lornano	22.8	33.32	0.31
Corinaldo	22.0	34.73	0.34	Fabriano	24.8	37.89	0.26
Osimo	22.8	34.86	0.32	Tavoleto	23.2	35.71	0.36
Cingoli	26.7	40.67	0.29	Pedaso	25.0	38.10	0.32
Loreto	24.2	37.00	0.33	Ancona	25.3	39.03	0.28
Baraccola	22.7	35.04	0.38	Grottammare	25.5	37.16	0.33
Ville Santa Lucia	23.7	36.75	0.34	Fossombrone	27.3	40.68	0.28
Pioraco	23.7	35.79	0.31	Ostra	22.8	36.52	0.31
Montecassiano	18.4	27.49	0.33	Barbara	21.9	34.74	0.32
Recanati	25.3	38.16	0.30	Sorti	26.3	40.32	0.31
Amandola	25.7	38.10	0.31	Acquasanta	22.5	33.26	0.35

Tabella 1 Valori dei parametri della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica a e n e valori della pioggia indice in corrispondenza delle stazioni di misura.

In Tabella 1 sono riportati i valori dei parametri a ed n e della pioggia indice in corrispondenza delle centraline di misura.

La Figura 21 mostra, come esempio, la mappa di altezza di precipitazione per la durata di 3 ore e tempo di ritorno 200 anni.

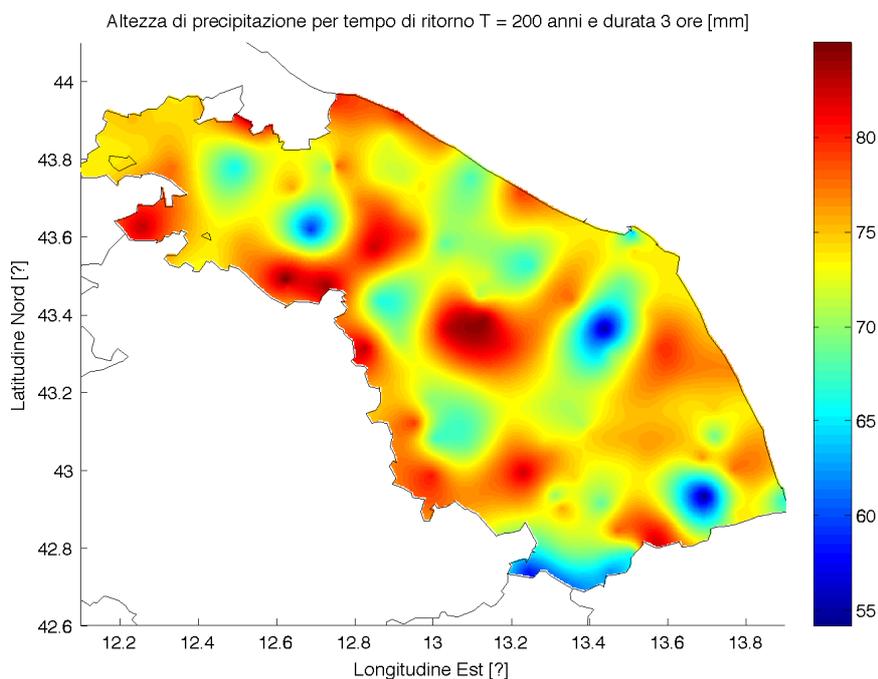


Figura 21 Mappa di altezza di precipitazione per la durata di 3 ore e tempo di ritorno 200 anni.

8 Ulteriori approfondimenti sulla distribuzione spaziale della variabile indice

Vista la mancanza di dipendenza della pioggia indice da grandezze topografiche, è stata condotta un'analisi ulteriore avvalendosi di un dataset meteorologico prodotto da un modello ad area limitata. Questo allo scopo di valutare, al netto delle inevitabili incertezze ed errori presenti nei prodotti di una modellazione numerica, l'eventuale presenza di pattern spaziali complessi in mappe spazialmente continue. L'analisi è stata basata sul dataset di previsioni operative del modello LAMI (<http://www.cosmo-model.org>), attivo su un dominio comprendente tutto il territorio italiano a una risoluzione operativa di 7 km. Il dataset è stato utilizzato per l'analisi del periodo 2008-2014, che presentava uniformità nella griglia di calcolo e completezza sufficiente dei dati. L'analisi è consistita nell'estrazione, per ognuno degli anni disponibili, della mappa delle precipitazioni di intensità massima, pixel per pixel, e di durata pari a 3 ore (massima risoluzione temporale disponibile dal modello). Queste mappe sono poi state mediate in modo da ottenere la mappa delle precipitazioni di 3 ore estreme medie su tutto il periodo (Figura 22).

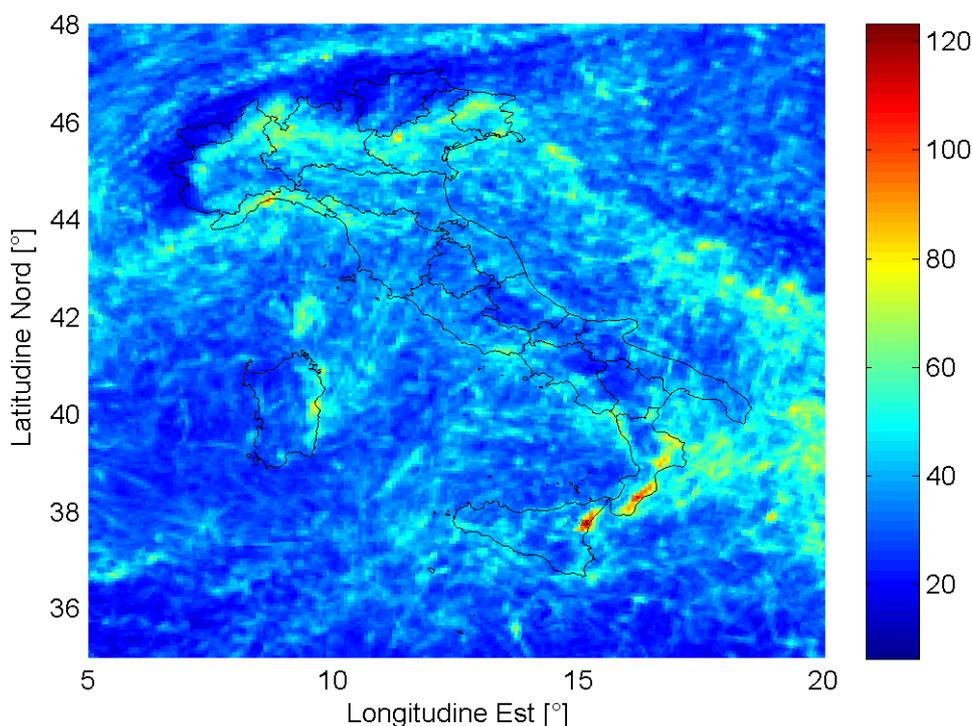


Figura 22 Mappa delle altezze di precipitazioni estreme di durata 3 ore (in mm) ricavate dalle simulazioni del modello meteorologico LAMI.

Nonostante la scarsa numerosità del campione dal punto di vista statistico (solo 7 anni), la mappa fornisce comunque informazioni di interesse per la presente analisi. Si può infatti notare come, limitandosi al territorio italiano, le precipitazioni analizzate si possano suddividere in tre tipi:

- aree con precipitazioni estreme molto localizzate (Liguria centrale, Calabria meridionale, costa ionica settentrionale della Sicilia)
- aree dominate da forti gradienti orografici (arco alpino e, in misura molto meno evidente, arco appenninico meridionale)
- resto del territorio, in cui non appare nessun pattern particolare

Con particolare riferimento a quest'ultima classe, nella quale ricade il territorio delle Marche, e sempre tenendo presente i limiti di un'analisi di questo tipo, tra cui la risoluzione molto grossolana (7 km) e molto al di sopra della dimensione delle celle convettive (tipica causa degli eventi estremi estivi), si può osservare che il pattern generale appare come la sovrapposizione di eventi estremi occorsi in diversi periodi e diverse posizioni spaziali (ma, in generale, di estensione complessiva abbastanza consistente), senza pattern particolari. Più formalmente, il

pattern osservato risulta avere una correlazione spaziale estremamente bassa e appare come un rumore bianco spaziale, in cui i valori di ogni pixel sembrano essere il risultato dell'estrazione da una particolare distribuzione di probabilità costante, che però è indipendente da quella di tutti gli altri pixel. Questa può essere considerata come una spiegazione della mancanza di pattern specifici nelle precipitazioni estreme analizzate nei paragrafi precedenti, mentre l'ottimo accordo della variabile indice con una distribuzione teorica di tipo GEV sembra confermare l'ipotesi di un processo stocastico spaziale in cui la distribuzione è invariante con la posizione, ma non esiste correlazione tra le posizioni stesse. Un'ulteriore considerazione che può essere fatta sulla base di questa mappa è che il campo di precipitazioni estreme medie così ottenuto, appare presentare proprietà di auto-similarità. E' stata infatti eseguita un'analisi di scala, in cui la mappa è stata via via aggregata per potenze di due, prendendo di volta in volta la media dei pixel interessati. Al primo passo la nuova mappa aveva un numero di righe e colonne pari alla metà di quella originale, e i nuovi pixel assumevano come valore la media dei 4 pixel precedenti. E così via proseguendo nell'aggregazione. Questo procedimento è stato ripetuto 6 volte, e per ogni mappa sono stati calcolati i momenti statistici centrati dal 2° (Varianza) al 5° ordine. Il grafico di come questi momenti variano con la scala di aggregazione è rappresentato, in scala bi-logaritmica, in Figura 23.

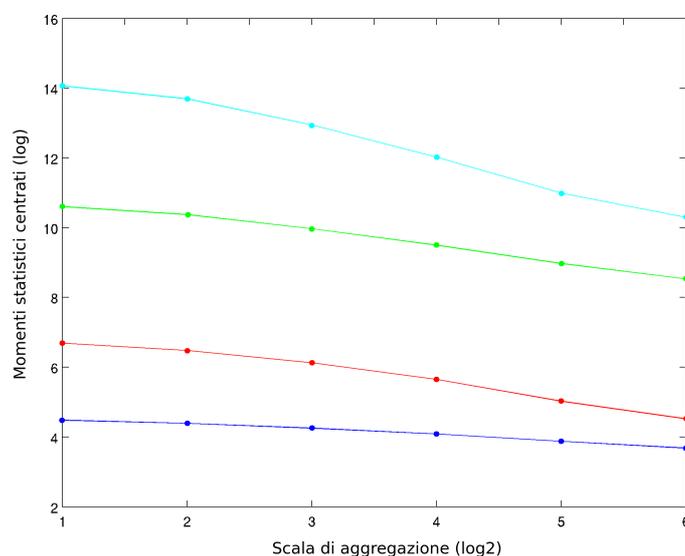


Figura 23 Andamento dei momenti statistici delle altezze di precipitazioni estreme di durata 3 ore ricavate dal modello meteorologico LAMI (in scala bilogarithmica).

Come si può osservare i momenti assumono un andamento lineare (la cosa è tanto più evidente quanto è basso l'ordine del momento), che indica appunto proprietà multi frattali del campo.

La cosa è una possibile prova del fatto che, sebbene ci si stia riferendo ai risultati di una modellazione numerica per di più a risoluzione relativamente grossolana e con bassa numerosità statistica, il dato analizzato mantiene comunque caratteristiche importanti osservate nei campi di precipitazione reali.

9 Esempio di applicazione

Nel presente paragrafo viene eseguito un esempio di applicazione della procedura per la definizione delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP) in un sito non strumentato qualsiasi della regione Marche. Nel caso particolare si vuole valutare la LSPP per un punto di coordinate assegnate a Jesi (latitudine 43.52, longitudine 13.22 – EPGS 4326).

È possibile caricare le mappe di Pioggia indice, **n**, **a** in un qualunque software GIS, come ad esempio QGIS (www.qgis.org); la Figura 24 mostra l'ambiente GIS con visualizzata la mappa "Bing Road" (caricabile dal menu di QGIS: Web-> OpenLayers Plugin-> Bing Road) con il punto oggetto dell'indagine.

Dopo aver caricato in ambiente GIS le mappe è sufficiente interrogarle utilizzando lo strumento "Identify Features" contraddistinto dal simbolo "i" bianca su campo blu in QGIS; la Figura 25, la Figura 26 e la Figura 27 mostrano i parametri della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per la Regione Marche. La Figura 28 mostra l'interrogazione in ambiente GIS delle mappe da cui risulta $a = 33.6$, $n=0.32$; utilizzando tali valori e la formula (4) è possibile ricavare l'altezza di precipitazione per assegnato tempo di ritorno e assegnata durata; nel caso di $T = 20$ anni e $d = 3$ ore risulta $H = 46$ mm.

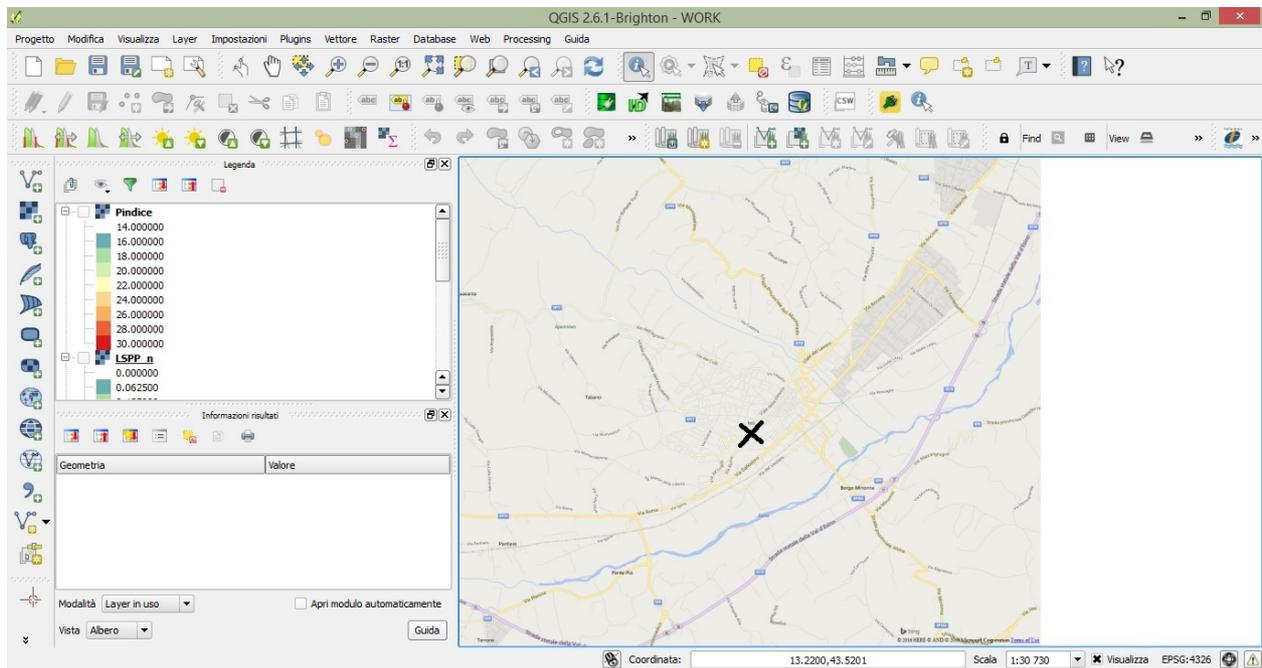


Figura 24 Esempio di applicazione in un punto in località Jesi – QGIS

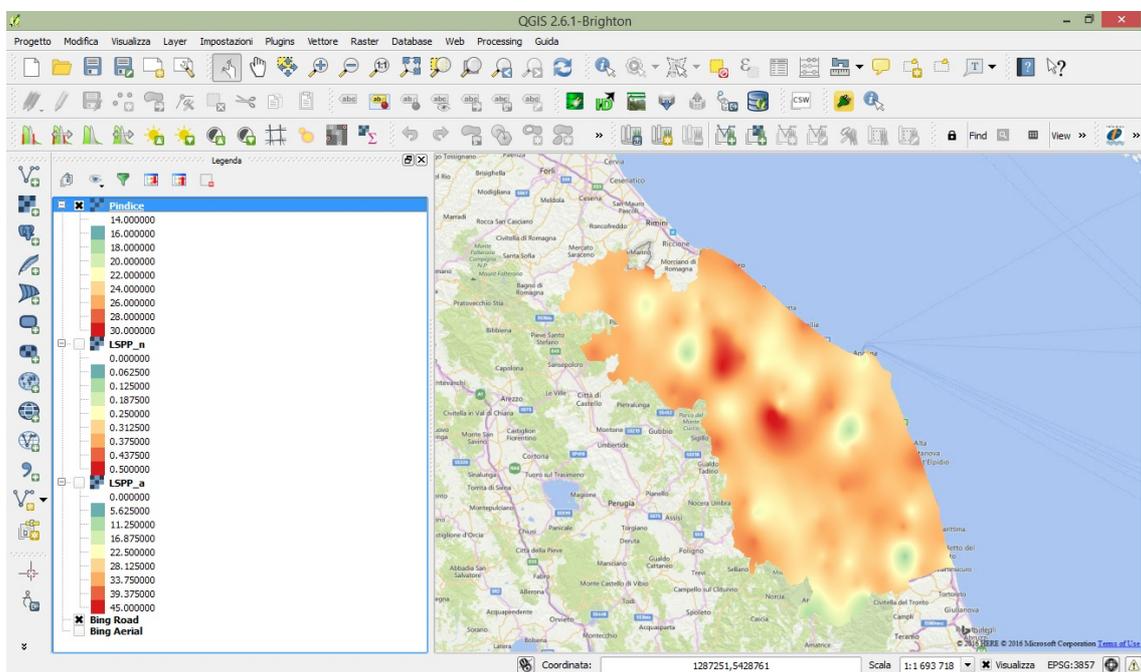


Figura 25 Mappa del parametro "pioggia indice" linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per la Regione Marche.

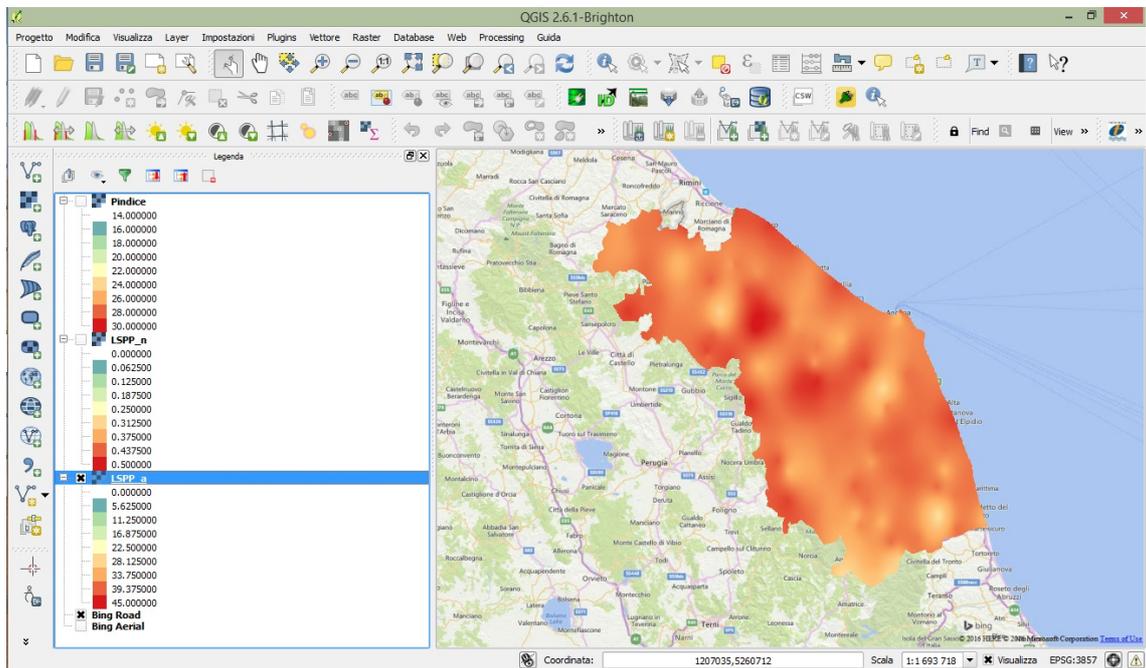


Figura 26 Mappa del parametro "a" della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per la Regione Marche.

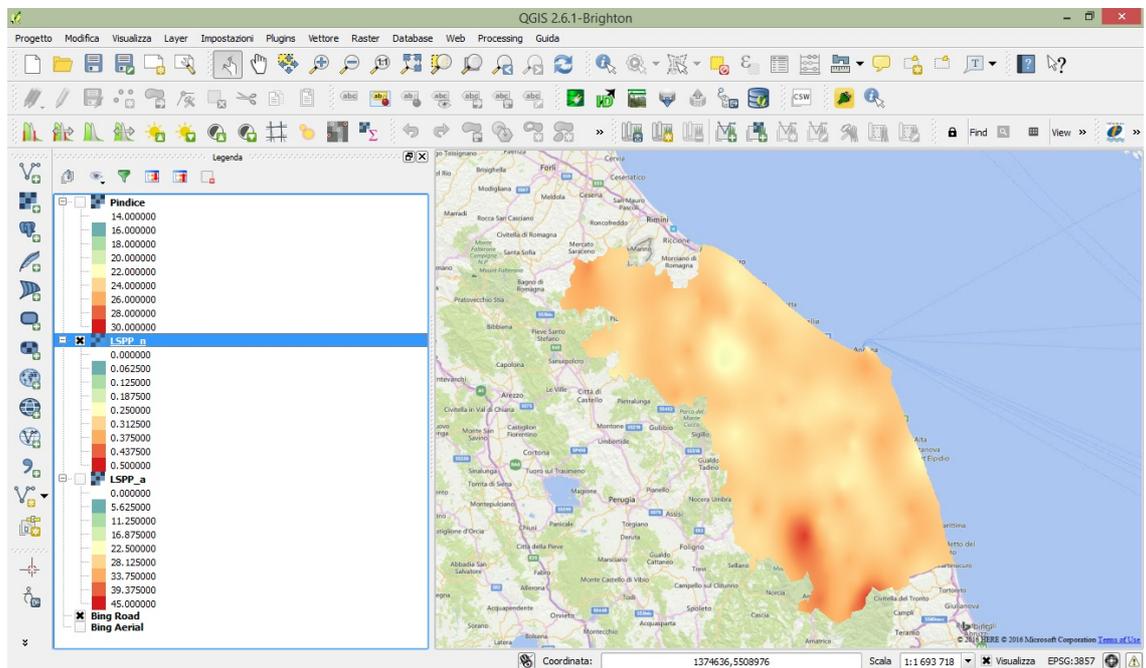


Figura 27 Mappa del parametro "n" della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per la Regione Marche.

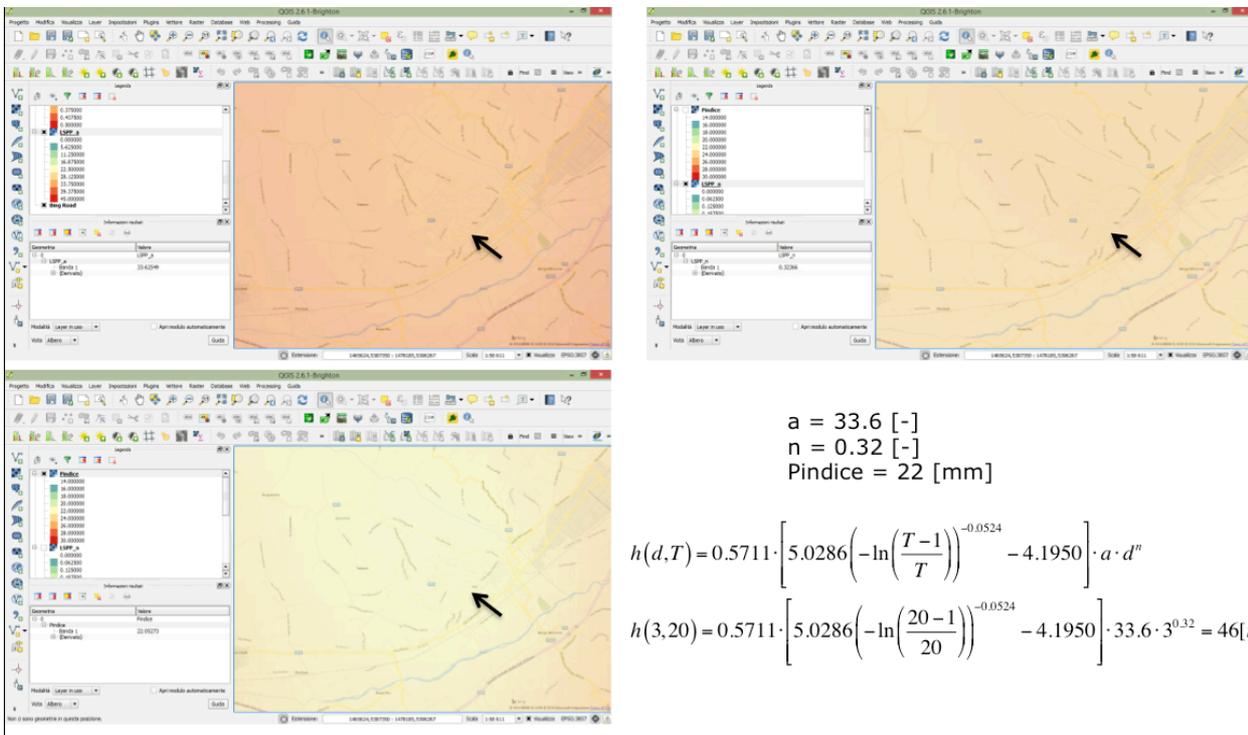


Figura 28 Esempio di applicazione della procedura per determinare l'altezza di precipitazione assegnato tempo di ritorno e assegnata durata.

Bibliografia

- Brath, Castellarin, Franchini, Galeati, Estimating the index flood using indirect methods, Hydrological Sciences, Hydrological Sciences Journal, 46(3), 399-418, 2001.
- Castellarin, Vogel, Matalas, Probabilistic behavior of a regional envelope curve, Water Resources Research, W06018, doi:10.1029/2004WR003042, 2005
- Castellarin, Probabilistic envelope curves for design flood estimation at ungauged sites, Water Resources Research (43), W04406, doi:10.1029/2005WR004384, 2007.
- Castellarin, Vogel, Matalas, Multivariate probabilistic regional envelopes of extreme floods, Journal of Hydrology, 336(3-4), 376-390, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.007, 2007.
- Castellarin, Merz, Blöschl, Probabilistic envelope curves for extreme rainfall events, Journal of Hydrology, 378, 263–271, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.030, 2009.
- Merz, Blöschl, Flood frequency regionalisation—spatial proximity vs. catchment attributes, Journal of Hydrology, 302, 283–306, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.018, 2005.

Lista Allegati

1. Mappe_Pindice_LSPP.zip: mappe in formato ESRI grid, lat-lon WGS84 (EPSG 4326), per i parametri **a**, **n** e **pioggia indice** della regionalizzazione delle precipitazioni e, come esempio, la mappa di altezza di precipitazione per la durata di 3 ore e tempo di ritorno di 200 anni.