

Analisi spaziale delle piogge in Calabria attraverso il confronto di metodi deterministici e geostatistici

Gaetano Pellicone¹, Tommaso Caloiero¹, Giuseppe Modica² e Ilaria Guagliardi¹

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo

² Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Agraria

1. Stato dell'arte

La modellizzazione spaziale di processi complessi, come quelli idrologici, è di assoluto rilievo in molte scienze ambientali e sta assumendo particolare importanza negli ultimi decenni anche alla luce di quei cambiamenti climatici che diversi studi e rapporti di organismi internazionali stanno mettendo sempre più in evidenza (IPCC, 2013). Di particolare rilievo è lo studio della variabilità delle precipitazioni che può fornire utili valutazioni relativamente all'impatto sulla disponibilità e gestione delle risorse idriche, sull'uso del suolo, sulle attività economiche e sulla società. La distribuzione spaziale delle piogge è condizionata da numerosi fattori ed è quindi necessario condurre uno studio dettagliato per migliorare l'accuratezza delle analisi (Chen et al., 2017). Negli ultimi anni sono stati proposti diversi metodi per l'interpolazione dei dati pluviometrici, e molti lavori sono stati dedicati al confronto tra i diversi modelli proposti. Infatti, l'applicazione del metodo di interpolazione appropriato può variare da regione a regione (Buttafuoco et al., 2016). Un approccio comunemente eseguito è il confronto tra tecniche deterministiche e geostatistiche. Dai risultati di questi confronti, molti autori hanno evidenziato come le tecniche geostatistiche forniscano una migliore stima delle precipitazioni rispetto alle tecniche deterministiche (ad esempio, Goovaerts, 2000). Tuttavia, altri autori hanno concluso che i risultati dipendono dalla densità di campionamento (ad esempio, Dirks et al., 1998). Di conseguenza, nella letteratura non esiste consenso unanime su quale sia il metodo migliore per interpolare le precipitazioni mensili. Per quanto riguarda la Regione Calabria, negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi sull'interpolazione spaziale delle precipitazioni mensili (Caloiero et al., 2015) e annuali (Longobardi et al., 2016), ma senza effettuare un confronto tra le diverse metodologie. Inoltre, studi pregressi hanno rilevato una certa dipendenza della pioggia dalla distanza dal mare (Buttafuoco et al., 2011; Caloiero et al., 2015), che può essere considerata in queste analisi.

In questo studio, al fine di determinare il miglior metodo per l'interpolazione delle precipitazioni mensili in Calabria, una regione che per orografia e posizione geografica presenta una marcata variabilità spaziale delle piogge, sono stati confrontati i risultati derivanti dall'applicazione di approcci geostatistici e deterministici.

2. Metodologia

Per l'interpolazione delle piogge mensili in Calabria sono stati applicati un metodo deterministico (*Inverse Distance Weighting* - IDW), e quattro metodi geostatistici (*Ordinary Kriging* - OK, il *Kriging with External Drift* - KED, l'*Ordinary Cokriging* - COK e l'*Empirical Bayesian Kriging* EBK). In particolare l>IDW, l'OK, il KED e il COK sono stati implementati in R utilizzando il pacchetto *gstat* (Pebesma et al., 2016) mentre per l'EBK è stato utilizzato il *Geostatistical Analyst Tool* di ArcGIS 10.5 (Krivoruchko, 2011; 2012).

L>IDW tiene conto della distanza dei punti rispetto al punto di interesse pesando il contributo di ciascun punto con una funzione della sua distanza. Con questo metodo di interpolazione il valore stimato è ottenuto grazie alla combinazione lineare pesata dei valori osservati presso le stazioni vicine al punto di stima tramite coefficienti che dipendono dalla distanza tra il punto di stima e quello di osservazione. I metodi di tipo IDW sono metodi deterministici che forniscono un interpolatore locale ed esatto, ma non forniscono alcuna stima dell'errore di interpolazione o di stima. Sono caratterizzati da un costo computazionale basso e sono particolarmente adatti alle variabili che presentano una distribuzione "liscia" con variazioni molto graduali.

Il kriging è un termine generico per indicare una famiglia di metodi di stima lineare pesata, usati per calcolare i valori del fenomeno spaziale studiato nei punti non campionati, usando i dati ritenuti rilevanti per la stima. Il kriging è una tecnica che permette di ottenere stime ottimali e non distorte della variabile regionalizzata in punti non campionati. I prerequisiti per l'applicazione del kriging sono la decisione di stazionarietà e il modello di variogramma. Una proprietà molto utile del kriging è che per ogni valore stimato è calcolato anche un termine di errore (varianza dell'errore di stima o di kriging), fornendo pertanto una misura dell'affidabilità dell'interpolazione. Il metodo più comunemente usato di kriging è quello ordinario (OK), che tiene conto delle fluttuazioni locali della media limitando la condizione di stazionarietà ad un intorno del punto. Esso assume che la media non è nota e calcola il valore non campionato come combinazione lineare dei valori noti situati nelle vicinanze del punto da stimare (Journel e Huijbregts, 1978). Un'estensione dell'algoritmo del kriging è il Kriging with External Drift (KED). Il suo vantaggio è quello di consentire ad una o più variabili supplementari, spazialmente correlate con la variabile primaria di interesse, di essere considerate covariabili e di essere quindi parte integrante della procedura di stima. Infatti, se i valori della variabile di interesse sono noti solo in pochi punti dell'area di studio, il KED consente la determinazione dei valori nei punti privi di misura attraverso il supporto di un'altra variabile nota in tutti i punti dell'area di studio. In particolare in questo studio la quota e la distanza dal mare sono state utilizzate come variabili secondarie.

L'Ordinary Cokriging (COK) è un altro approccio che consente di utilizzare una variabile ausiliaria (misurata in corrispondenza degli stessi punti della variabile primaria, in punti diversi o entrambi) per la stima del valore della variabile di interesse nei punti privi di misura. Sia per la variabile primaria che per quella ausiliaria è necessaria una struttura spaziale che può essere modellata. Inoltre, per l'interpolazione della variabile primaria, i cui valori sono noti solo in pochi punti dell'area di studio, è necessaria una covarianza spazialmente dipendente.

Nell'approccio bayesiano i parametri utilizzati per la costruzione del semivariogramma vengono trattati come variabili casuali in un processo iterativo dando la possibilità di stimare la loro incertezza. In particolare, facendo riferimento ai metodi classici di kriging, il modello di semivariogramma è calcolato partendo dalla posizione dei dati noti e viene utilizzato per fare previsioni in punti laddove non ci sono informazioni relative alla variabile indagata senza considerare l'incertezza nella stima del semivariogramma, sottovalutando così l'errore standard di predizione. Nell'Empirical Bayesian Kriging invece, i trend locali in corrispondenza di zone caratterizzate da una buona copertura di punti, vengono estesi laddove la copertura dei dati è scarsa, impiegando le informazioni acquisite come informazioni a priori. (Knotters et al., 2010; Krivoruchko, 2011; 2012; Krivoruchko e Butler, 2013).

Per valutare e confrontare le prestazioni dei differenti metodi di interpolazione, è stata adottata la cross validation. In particolare, sono stati calcolati l'errore medio assoluto (MAE, Mean Absolute Error) e la radice dell'errore quadratico medio (RMSE, Root Mean Squared Error).

3. Applicazione del metodo

L'area di studio è la regione Calabria che si estende su un'area di 15080 km² e si presenta con una forma allungata, avente una lunghezza di 248 km, una larghezza massima di 111 km ed una minima di 31 km. Pur non avendo cime molto elevate, la Calabria è una delle regioni più montuose d'Italia: il 42% del territorio è occupato da monti, il 49% da colline e solo il 9% è costituito da pianure. Per le elaborazioni è stato utilizzato il database omogeneo e completo, elaborato da Brunetti et al. (2012), composto da 129 serie di precipitazioni relative al periodo 1916-2006, con una densità di circa 1 stazione per 117 km² (Fig. 1). In Tab. 1 sono riportati, per ogni mese, i risultati in termini di MAE e RMSE, dell'applicazione dei diversi metodi di interpolazione.

Mese	MAE					RMSE				
	IDW	OK	KED	COK	EBK	IDW	OK	KED	COK	EBK
Gennaio	32.8213	24.7138	19.9223	20.4652	23.7001	41.8792	33.5365	27.5998	28.4660	31.9572
Febbraio	26.1728	20.2674	15.7821	16.0902	18.9708	34.3551	27.9847	23.1179	23.5915	26.2304
Marzo	23.0616	17.8518	13.5983	13.9254	17.2148	29.1692	23.6383	18.8757	19.3613	22.4147
Aprile	15.7703	11.8033	9.24470	9.39390	11.8562	20.5997	16.4054	13.1189	13.1427	16.2832
Maggio	10.4217	7.91590	5.86160	6.32180	7.95320	13.9616	10.7741	8.01510	8.51470	10.6626
Giugno	5.90950	4.46690	3.74040	3.83550	4.38300	7.73750	6.05420	5.15290	5.23600	5.88320
Luglio	3.97390	2.70270	2.52310	2.71150	2.54840	5.03300	3.55180	3.36520	3.63790	3.32160
Agosto	4.27910	3.38360	3.13290	3.25460	3.31420	5.61060	4.52300	4.21610	4.38210	4.44310
Settembre	8.40850	6.76320	6.08170	6.41990	6.80820	10.9786	9.10020	8.21880	8.32310	8.97810
Ottobre	18.1010	15.1747	12.5050	13.2577	15.5348	23.2265	20.0271	17.6034	18.5166	20.2983
Novembre	26.8199	22.1079	17.4471	18.5551	22.1549	34.1921	28.7601	23.5434	24.6880	28.2802
Dicembre	31.7629	24.7086	19.7871	20.1848	24.5628	40.7807	33.4337	27.2166	27.7029	32.7888

Tabella 1. Identificazione del miglior metodo di interpolazione (in grassetto) alla luce della cross-validation

I risultati ottenuti hanno permesso di ottenere chiare indicazioni, in termini di punti di forza e di debolezza, sull'applicabilità dei metodi deterministici e geostatistici alle precipitazioni mensili registrate in Calabria. Dai risultati si evince che il KED e il COK hanno mostrato i valori di MAE e RMSE più bassi in tutti i mesi e che, in particolare, il KED può essere considerato come il miglior metodo per interpolare i valori mensili di precipitazione registrati nella regione Calabria. I risultati della cross validation hanno inoltre evidenziato come gli interpolatori geostatistici risultino essere più performanti rispetto alla tecnica IDW, confermando così i risultati ottenuti da altri ricercatori (Goovaerts, 2000, Lloyd, 2005) che hanno rilevato una precisione inferiore dell'IDW rispetto agli approcci geostatistici nella stima sia delle precipitazioni mensili che di quelle annuali. Tale indicazione è confermata dal confronto visivo (non mostrato nel presente lavoro) tra le mappe ottenute dall'applicazione dei diversi algoritmi. Infatti, come previsto, l'IDW ha prodotto mappe significativamente diverse rispetto agli altri metodi, in quanto tiene conto solo della distanza tra i punti stimati e quelle osservati.

Al contrario, gli interpolatori geostatistici hanno prodotto delle distribuzioni spaziali, che sembrano essere più coerenti con le precipitazioni naturali. In particolare, le mappe di distribuzione delle piogge ottenute tramite l'utilizzo dell'OK, dell'EBK e del COK sono risultate essere piuttosto simili mentre, come evidenziato in alcuni studi precedenti (Goovaerts, 2000; Kyriakidis et al., 2001; Moges et al., 2007), attraverso l'utilizzo del KED si possono ottenere risultati migliori (Fig. 1).

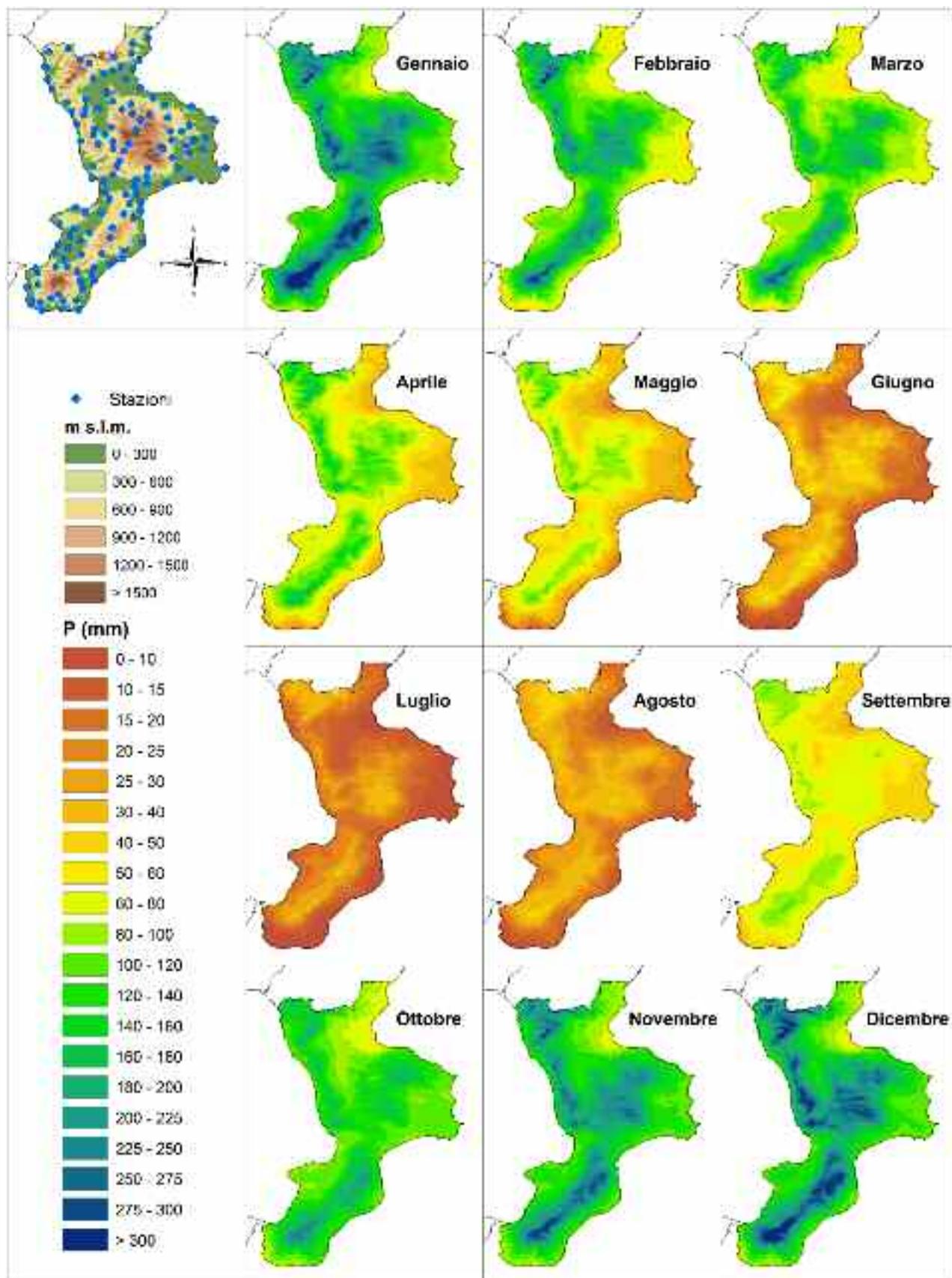


Figura 1. Localizzazione delle stazioni pluviometriche utilizzate per le elaborazioni e distribuzione spaziale delle precipitazioni medie mensili in seguito all'applicazione del Kriging with External Drift (KED)

Bibliografia

- Brunetti M., Caloiero T., Coscarelli R., Gullà G., Nanni T., Simolo C., 2012, Precipitation variability and change in the Calabria region (Italy) from a high resolution daily dataset, in *International Journal of Climatology* 32, pp. 57-73.
- Buttafuoco G., Caloiero T., Coscarelli R., 2011, Spatial and temporal patterns of the mean annual precipitation at decadal time scale in southern Italy (Calabria region), *Theoretical and Applied Climatology* 105, pp. 431-444.
- Buttafuoco G., Tarvainen T., Jarva J., Guagliardi I., 2016, Spatial variability and trigger values of arsenic in the surface urban soils of the cities of Tampere and Lahti, Finland. *Environmental Earth Sciences*, 75, pp. 896.
- Caloiero T., Buttafuoco G., Coscarelli R., Ferrari E. 2015, Spatial and temporal characterization of climate at regional scale using homogeneous monthly precipitation and air temperature data: an application in Calabria (southern Italy), *Hydrology Research* 46, pp. 629-646.
- Chen T., Ren L., Yuan F., Yang X., Jiang S., Tang T., Liu Y., Zhao C., Zhang L., 2017, Comparison of spatial interpolation schemes for rainfall data and application in hydrological modelling, *Water* 9, pp. 342
- Dirks KN., Hay JE., Stow CD., Harris D., 1998, High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island, Part II, pp. interpolation of rainfall data, *Journal of Hydrology* 208, pp. 187-193.
- Goovaerts P., 2000, Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology* 228, pp. 113-129.
- IPCC., 2013, *Summary for policymakers. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press: Cambridge and New York.
- Journal AG., Huijbregts CJ., 1978, *Mining geostatistics*, Academic Press: San Diego.
- Knotters M, Heuvelink GBM, Hoogland T., Walvoort DJJ., 2010, *A Disposition of Interpolation Techniques*. Wageningen University and Research Centre, Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment: Wageningen.
- Krivoruchko K., 2011, *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users*, Esri, pp. Redlands
- Krivoruchko K., 2012, *Empirical Bayesian Kriging*. Esri Redlands,
- Krivoruchko K., Butler K., 2013, *Unequal Probability-Based Spatial Mapping*, Esri, pp. Redlands.
- Kyriakidis PC., Kim J., Miller NL., 2001, Geostatistical mapping of precipitation from rain gauge data using atmospheric and terrain characteristics, *Journal of Applied Meteorology* 40, pp. 1855-1877.
- Lloyd CD., 2005, Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain, *Journal of Hydrology* 308, pp. 128-150.
- Longobardi A., Buttafuoco G., Caloiero T., Coscarelli R., 2016, Spatial and temporal distribution of precipitation in a Mediterranean area (southern Italy), *Environmental Earth Sciences* 75, pp. 189.
- Moges SA., Alemaw BF., Chaoka TR., Kachroo RK., 2007, Rainfall interpolation using a remote sensing CCD data in a tropical basin – a GIS and geostatistical application, *Physics and Chemistry of the Earth* 32, pp. 976-983.
- Pebesma E., Graeler B., 2016., *Package "gstat."* CRAN Reference Manual, Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/gstat/index.html>