

# ANALISI DELLA RELAZIONE FRA ESTREMI DI PRECIPITAZIONE SUB-ORARIA E TEMPERATURA SUPERFICIALE IN SICILIA

Dario Pumo<sup>1\*</sup>, Giuseppina Carlino<sup>1</sup>, Elisa Arnone<sup>2</sup> & Valerio Leonardo Noto<sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128, Palermo, Italy

(2) AMIGO s.r.l., Via Flaminia 48, I-00196, Roma, Italy

\*email: dario.pumo@unipa.it

## ASPETTI CHIAVE

- L'intensificazione delle piogge estreme potrebbe essere legato all'aumento delle temperature.
- Il legame temperatura-precipitazione è riconducibile all'equazione di Clausius-Clapeyron (CC-rate).
- Viene studiata l'influenza della temperatura superficiale sulle piogge estreme in Sicilia.
- Viene investigato il ruolo di alcuni aspetti modellistici relativi all'approccio utilizzato.
- I risultati mostrano uno scaling-rate inferiore al CC-rate relativo all'approccio teorico.

## 1 INTRODUZIONE

La temperatura atmosferica influenza fortemente la precipitazione, in quanto l'aria più calda è in grado di contenere, sotto forma di vapore, più acqua rispetto all'aria più fredda e quindi ha un potenziale maggiore in termini di acqua disponibile per eventuali eventi meteorici. L'equazione termodinamica di Clausius-Clapeyron (CC) descrive la relazione tra pressione di vapore saturo e temperatura assoluta dell'aria. Considerando solo la zona superficiale dell'atmosfera a contatto con il suolo, in cui la pressione di vapore è pressoché costante e nell'ordine dell'1% della pressione assoluta, si può ipotizzare che l'umidità dell'aria cresca esponenzialmente con la temperatura secondo un tasso (CC-rate) pari a quello derivabile dall'equazione CC, cioè pari a circa il 7% per °C per temperature prossime a 0°C e 6% °C<sup>-1</sup> per temperature superiori ai 24°C.

Nell'ultimo decennio, la comunità scientifica ha dedicato grande attenzione alla verifica dell'esistenza di tale tipo di relazione in varie parti del mondo e all'analisi del *rate* e dei fattori che lo influenzano. *Lenderink e van Meijgaard* (2008) sono tra i pionieri di tale ricerca, avendo condotto un'analisi nei Paesi Bassi su un database di precipitazioni massime orarie con intensità sopra un determinato percentile e corrispondente temperatura superficiale. La stessa metodologia, con opportune varianti, è stata utilizzata in altri studi in varie regioni del mondo, dall'Europa (*Lenderink and Van Meijgaard, 2008; Berg and Haerter, 2013; Berg et al., 2013; Loriaux et al., 2013; Blenkinsop et al., 2015*) all'Oceania (*Hardwick-Jones et al., 2010*), dal Nord America (*Shaw et al., 2011; Mishra et al., 2012b*) all'Asia (*Utsumi et al., 2011; Yu and Li, 2012*). Dai vari studi emerge che la relazione tra temperature e precipitazioni estreme osservate non sempre è caratterizzabile dal tasso teorico (CC-rate), mostrando talvolta valori significativamente diversi, sia superiori (super-CC) che inferiori (sub-CC).

Studi di questo tipo in regioni aride e semi-aride sono piuttosto limitati in letteratura; pertanto, l'obiettivo di questo lavoro è di valutare lo *scaling-rate* tra temperatura giornaliera e precipitazioni estreme (sia sub-orarie che orarie) in una regione semi-arida come la Sicilia (Italia).

## 2 DATI E METODOLOGIA

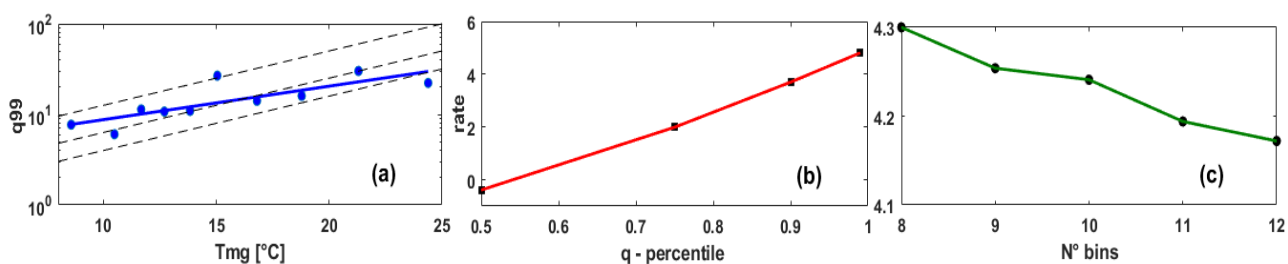
La regione Sicilia si estende per circa 25.000 km<sup>2</sup>, è caratterizzata da un clima e regime pluviometrico stagionali, con alte temperature nel periodo primaverile/estivo, bassa piovosità annuale (circa 700 mm/anno), con pioggia concentrata nella stagione autunnale/invernale ed estati quasi del tutto asciutte.

Il dataset utilizzato si basa sui dati registrati da 93 stazioni meteorologiche del SIAS (*Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano*) presenti sul territorio, per un periodo di tredici anni (dal 2003 al 2015). Le serie temporali di precipitazione sono caratterizzate da una risoluzione di dieci minuti, mentre, per quanto

riguarda la temperatura, si è fatto riferimento a serie orarie. Preliminarmente alle analisi, è stato condotto un pre-processamento dei dati, attuando congiuntamente un processo di controllo sulla qualità e consistenza dei dati a livello di ciascuna stazione. L'analisi della relazione fra precipitazione estreme e temperature è stata condotta con riferimento ai massimi giornalieri di pioggia di prefissata durata. In particolare, seguendo la stessa procedura utilizzata in altri lavori (Hardwick Jones et al., 2010; Utsumi et al., 2001; Blenkinsop et al., 2015), per ciascun giorno con pioggia non nulla è stato ricavato il valore di massimo di pioggia di prefissata durata e, a ciascun dato, è stato associato la temperatura media del giorno corrispondente. Il campione contenente tutte le coppie di valori precipitazione-temperatura per tutto il periodo di osservazione disponibile, è stato poi suddiviso e classificato con il metodo *equal-number* (detto anche a quantili). Al fine di identificare e analizzare solo eventi estremi di pioggia, a ciascuna classe di temperatura è stato associato: (i) il percentile *i*-esimo (prefissato) di precipitazione relativamente a tutte le coppie contenute nella classe, e (ii) il valore mediano della temperatura relativo alla stessa classe. Tale procedura ha permesso di ottenere quindi, per ciascun campione, un set di coppie di valori precipitazione estreme-temperatura (in numero pari al numero di *bins* pre-impostato) sul quale è stata condotta un'analisi regressiva per la caratterizzazione del *rate*. Al fine di individuare la migliore strategia di analisi, nel presente lavoro sono stati esaminati alcuni aspetti modellistici della metodologia; in particolare, sono stati analizzati i massimi giornalieri di pioggia per diverse durate (10, 30 e 60 minuti –  $P_{10}$ ,  $P_{30}$  e  $P_{60}$ ), sono stati considerati diversi numeri di *bin* e diversi percentili per determinare le coppie di punti su cui condurre l'analisi regressiva e, infine, sono stati adottati tre modelli regressivi, ovvero quello esponenziale, la *Two-Segments Piecewise Regression* e la LOESS (*Locally-weighted scatter-plot smoothing*) *Regression*. L'analisi è stata condotta sia sui dati di ciascuna stazione (*single gauge analysis*), che su un unico campione regionale, ottenuto raggruppando tutti i dati provenienti dalle diverse stazioni (*pooled gauges analysis*). L'analisi è stata condotta a livello di intero anno (*Unique Season*) e a livello bi-stagionale ovvero *Wet Season* (da Ott. a Mar.) e *Dry Season* (da Apr. a Sett.).

### 3 RISULTATI

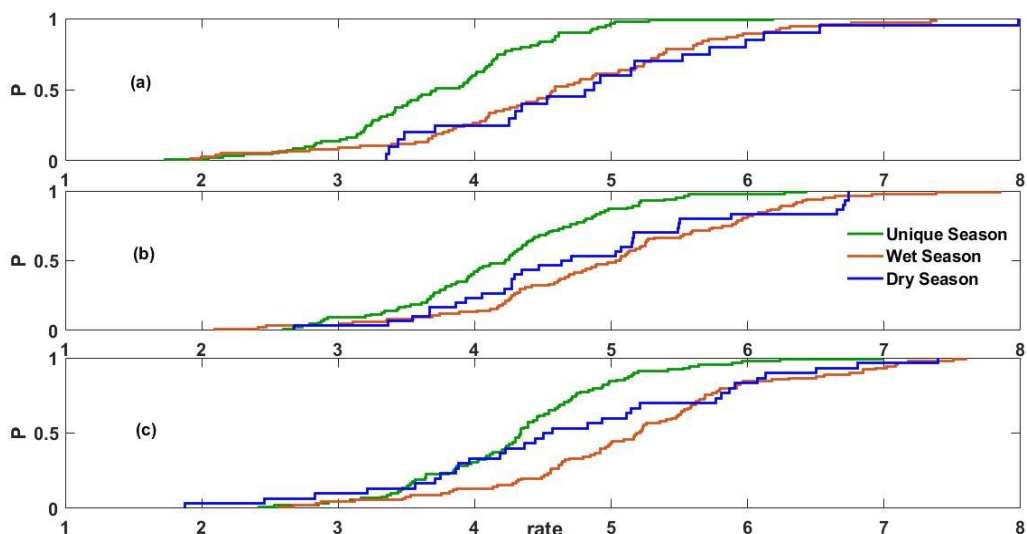
La Figura 1a mostra, a titolo di esempio, alcuni risultati per la stazione ID 750 (rappresentativa del comportamento della maggior parte delle stazioni) relativi alla regressione esponenziale per l'*Unique Season*. La figura riporta, in un piano semilogaritmico, le coppie di punti temperatura mediana e 99° percentile ( $q_{99}$ ) dei  $P_{30}$  per ciascun *bin* (per un numero complessivo di 10 *bins*), la retta di regressione (linea blu continua) e le curve di confronto con pendenza pari al *CC-rate* (linee nere tratteggiate).



**Figura 1 .** (a) Relazione tra temperatura media giornaliera e 99° percentile di  $P_{30}$  per la stazione ID 750. Variazione del *rate* medio di tutte le stazioni per  $P_{10}$  al variare: (b) del percentile, *q* ( $q_{99}$ ,  $q_{90}$ ,  $q_{75}$  e  $q_{50}$ ) per la *Wet Season* e fissato numero di *bins* pari a 10 e (c) del numero di *bins* (da 8 a 12) per fissato quantile ( $q_{99}$ ) e *Unique Season*.

Le Figura 1b e 1c mostrano i risultati della dipendenza del *rate* dal percentile e dal numero di *bins*. In Figura 1b, viene diagrammato l'andamento del valore medio dei *rates* ottenuti in tutte le stazioni, relativamente all'analisi sulla *Wet Season* e considerando piogge massime di durata 10 minuti, in funzione del percentile ( $q_{50}$ ,  $q_{75}$ ,  $q_{90}$  e  $q_{99}$ ). Dal grafico si evince che al crescere del percentile cresce il *rate*. Tale andamento è stato riscontrato anche relativamente alle piogge di durata 30 e 60 minuti e per tutte e tre le stagioni analizzate. Analogamente, in Figura 1c, per  $P_{10}$ ,  $q_{99}$  e relativamente all'*Unique Season*, viene riportato l'andamento del *rate* medio in funzione del numero di *bins* considerati. Dall'analisi completa è emerso che, per la *Wet Season* e l'*Unique Season*, all'aumentare del numero di *bins*, e quindi del numero di coppie piogge estreme – temperatura su cui si effettua la regressione, il *rate* medio diminuisce; mentre per la *Dry Season* si ha un comportamento opposto.

In Figura 2 vengono mostrate le curve di frequenza cumulata (*cdfs*) dei valori di *rate* ottenuti per le varie stazioni, per le diverse stagioni (diversi colori) e durate considerate (60, 30 e 10 min), da cui si evince una generale tendenza a sub-CC *rate*. La tendenza generale riscontrata in tutte le stazioni è stata quella di valori del *rate* più alti durante la *Wet Season* rispetto alla *Dry Season*, per durate sub-orarie, e una tendenza inversa per la durata oraria. Mentre i valori più bassi in assoluto, per tutte le durate, si riscontrano durante la stagione unica; questo andamento potrebbe essere ricondotto alla minore variabilità delle temperature a livello stagionale. Anche la numerosità campionaria dei diversi dataset potrebbe avere un ruolo importante nella stima del *rate*; infatti, in Sicilia, le precipitazioni sono generalmente concentrate soprattutto nei mesi invernali e spesso assenti in estate, e questo implica una maggiore numerosità per i campioni della *Unique* e *Wet Season* sulla base dei quali vengono costruiti modelli regressivi più consistenti per la stima dei *rate*.

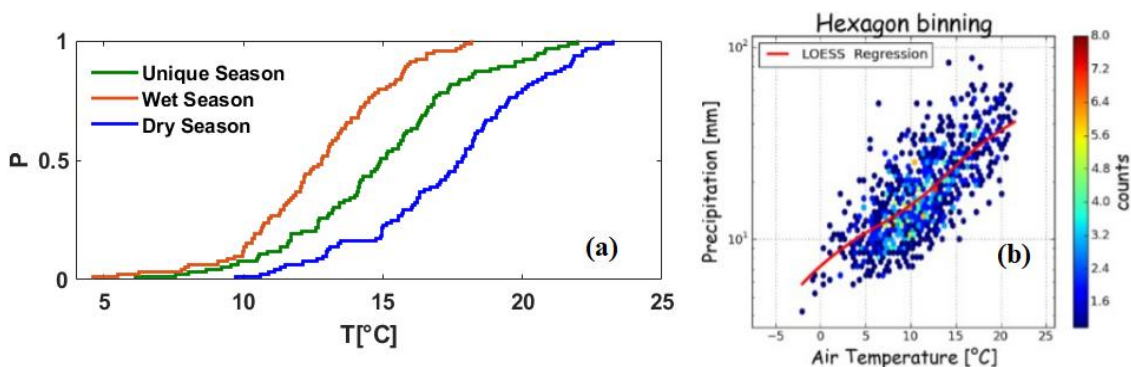


**Figura 2 .** *Cdfs* dei valori del *rate* di tutte le stazioni al variare della stagione (diversi colori) e della durata considerata: (a) eventi estremi di pioggia con durata 60 minuti, (b) estremi di pioggia con durata 30 minuti e (c) estremi di pioggia con durata 10 minuti.

La durata degli eventi estremi di pioggia è stato uno dei parametri che ha influenzato maggiormente l'analisi e il conseguente *rate*; i risultati ottenuti mostrano come, al decrescere della durata della pioggia (ovvero quando si passa da  $P_{60}$  a  $P_{10}$ ) il *rate* tende ad aumentare (*cdfs* spostate verso destra in Figura 2, soprattutto per la *Unique* e *Wet Season*), pur mantenendosi mediamente sempre con valori inferiori al CC-*rate*. Questo comportamento è meno evidente per la *Dry Season*, che rispetto alle altre due stagioni è caratterizzato da minore numerosità campionaria per ciascuna stazione e minor numero di stazioni i cui dati possono essere significativamente interpretati mediante modelli regressivi; per tale analisi è stata infatti fissata una soglia per il coefficiente di determinazione  $R^2 (=0,55)$  sotto la quale il *rate* viene rigettato.

Dall'applicazione della *Two-Segments Piecewise Regression* invece sono stati riscontrati valori anche ben superiori al CC-*rate* relativamente a range limitati di temperatura. In diverse stazioni, dividendo in due parti il dominio di temperatura e calcolando i valori del *rate* per ciascun tratto, è stato riscontrato un *rate* super-CC (es.  $10\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) per uno dei segmenti e un *rate* sub-CC (es.  $2\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) per l'altro, con i valori più alti prevalentemente per i più alti valori di temperatura, anche se in un numero significativo di casi si è manifestato un comportamento opposto (*rate* super-CC per il range più basso di temperatura). Un'ulteriore analisi condotta sui *breakpoints*, che identificano la temperatura soglia cui corrisponde un cambio di pendenza (e quindi di *rate*), viene riportata in Figura 3a, dove le *cdfs* dei *breakpoints* di tutte le stazioni, relativamente a  $P_{60}$ , q99, 10 bins, mostrano una forte dipendenza dalla stagione considerata.

La *pooled gauges analysis* è stata condotta facendo riferimento alla *LOESS Regression*. Dai risultati ottenuti, in conformità con quanto ottenuto prima, è emerso che i valori del *rate* annuali sono più bassi rispetto a quelli mediamente ottenuti a livello di singola stagione e crescenti al diminuire della durata delle precipitazioni considerata. In Figura 3b, viene mostrato il *density plot* (*hexagon binning*), e la curva ottenuta con la *LOESS Regression* (curva rossa), nel caso che ha fornito in assoluto i maggiori *rate*, ovvero: piogge estreme orarie ( $P_{60}$ ) e *Wet Season*.



**Figura 3 .** (a) *Single Gauge Analysis* con *Two-Segments Piecewise Regression*: *cdf* dei breakpoints di tutte le stazioni al variare della stagione ( $P_{60}$ ,  $q_{99}$ , 10 bins). (b) *Pooled Gauges Analysis* con *LOESS Regression*: densità plot per la *Wet Season* e piogge estreme orarie ( $P_{60}$  e  $q_{99}$ ); la curva rossa rappresenta la retta di regressione stimata con la *LOESS Regression*.

## 4 CONCLUSIONI

Lo studio ha dimostrato come in Sicilia lo *scaling-rate* sia quasi sempre inferiore a quello teorico (*CC-rate*) e fortemente legato alla durata della precipitazione e alla stagionalità, nonché a fattori modellistici quali il percentile e il numero di *bins* considerati. In conformità con altri studi è emerso anche che il modello regressivo esponenziale, usualmente utilizzato in regioni umide, non sempre è adatto a rappresentare il legame precipitazioni estreme-temperature, specialmente in regioni semi-aride caratterizzate da pochi eventi estremi. L'analisi sulla *Dry Season* ha infatti mostrato come solo per circa il 21% (per  $P_{60}$ ) e 31% (per  $P_{30}$  e  $P_{10}$ ) delle stazioni esaminate è stato possibile adattare al campione un modello regressivo statisticamente significativo ( $R^2 > 0,55$ ). L'analisi dello *scaling-rate* in tali ambienti risulta fondamentale anche in considerazione dei cambiamenti climatici più intensi previsti (innalzamento delle temperature) e per le notevoli implicazioni che i conseguenti cambiamenti nell'intensità e frequenza degli eventi estremi potrebbero avere su diversi aspetti socio-economici legati ad esempio all'alterazione quali-quantitativa della risorsa idrica (già limitata) o all'intensificazione di eventi di *urban flash-flood*. Nell'ipotesi di invarianza dei *rate*, i risultati dello studio presentato implicherebbero, per la Sicilia, una maggiore intensificazione delle precipitazioni estreme di breve durata (sub-oraria) rispetto a quelle orarie, all'aumentare delle temperature. Tra i possibili sviluppi di questo studio sarebbe interessante valutare la relazione tra le precipitazioni estreme e la temperatura di rugiada, in quanto più rappresentativa del contenuto di umidità presente in atmosfera.

## Riferimenti bibliografici

- Berg P. and Haerter J.O. Unexpected increase in precipitation intensity with temperature - A result of mixing of precipitation types? *Atmos. Res.*, 2013, 119, 56–61.
- Berg P., Moseley C. and Haerter J.O. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures *Nat. Geosci.*, 2013, 6, 181–5.
- Blenkinsop S., Chan S.C., Kendon E. K., Roberts N.M. and Fowler H.J. Temperature influences on intense UK hourly precipitation and dependency on large-scale circulation. *Environmental Research Letters*, 2015, 10 (5).
- Hardwick Jones R., Westra S. and Sharma A. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37 L22805.
- Lenderink G. and van Meijgaard E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes *Nat. Geosci.*, 2008, 1, 511–4.
- Loriaux J.M., Lenderink G., De Roode S.R. and Siebesma A.P. Understanding convective extreme precipitation scaling using observations and an entraining plume model *J. Atmos. Sci.*, 2013, 70 3641–55.
- Mishra V., Wallace J. M. and Lettenmaier D. P. Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 2012b, 39, L16403.
- Shaw S.B., Royem A. and Riha S. J. The relationship between extreme hourly precipitation and surface temperatures in different hydroclimatic regions of the United States, *J. Hydrometeorol.*, 2011, 12, 319–325.
- Utsumi N., Seto S., Kanae S., Maeda E. and Oki T. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38, L16708.
- Yu R. and Li J. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China *J. Clim.*, 2012, 25, 6851–61.