



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

A.A. 2021/2022

Sessione di Laurea Marzo 2022

Utilizzo di Metodi di Analisi Retrospettiva per l'Identificazione di Eventi Alluvionali

Applicazione al Caso Italia

Relatore:

Pierluigi Claps

Correlatore:

Paola Mazzoglio

Candidato:

Paolo Falchetti

Sommario

1. Misure della precipitazione	7
1.1. Introduzione	7
1.1.1. Descrizione preliminare dei dataset di analisi retrospettiva	8
1.2. Osservazione e registrazione dati di pioggia.....	10
1.2.1. Pluviometro	11
1.2.2. Disdrometro	13
1.2.3. Radar meteorologico.....	14
1.2.4. Satellite.....	17
1.2.5. Analisi retrospettive	20
1.3. Obiettivo della tesi: misura ed identificazione di eventi estremi di precipitazione	21
2. Metodi per la costruzione di basi di dati retrospettive	23
2.1. Origini	23
2.2. Definizione	24
2.3. Caratteristiche.....	25
2.4. Funzionamento	25
2.5. Dati di input per la produzione di dataset retrospettivi	27
2.5.1. Osservazioni da reti in situ	28
2.6. Caratteristiche generali dei dati utilizzati per le rianalisi.....	28
2.7. Modello di simulazione atmosferico e il sistema di acquisizione dati	30
2.7.1. Sistema 4D-VAR.....	31
2.8. Post-processing	32
3. Basi di dati retrospettivi esistenti	34
3.1. Dataset globali.....	34
3.2. Dataset regionali	35
3.2.1. Principali vantaggi dell'utilizzo di dataset di rianalisi.....	36
3.3. Descrizione dataset di ERA5	37
3.3.1. Problemi ERA5.....	40
3.3.2. Prodotti correlati ERA5.....	41
3.4. Descrizione dataset ERA5-Land.....	41
4. ERA5 e ERA5-Land: validazione e comparazioni.....	43
4.1. Studio comparativo tra diversi dataset di precipitazione in Cina (Xu et al.,2021)	43
4.1.1. Metodo di analisi.....	44
4.1.2. Risultati.....	45

4.1.3. Conclusioni	46
4.2. Studio comparazione dati di rianalisi in India (Singh et al, 2021)	47
4.2.1. Metodo di studio.....	47
4.2.2. Risultati.....	48
5. Metodo di analisi e caso studio	51
5.1. Metodo di studio.....	51
5.2. Acquisizione dei dati ERA5-Land	52
5.3. Definizione delle matrici di soglia pluviometrica	53
5.3.1. Calcolo della PMA.....	54
5.3.2. Dato preliminare ERA5-Land	57
5.3.3. Soglie pluviometriche PMA	61
5.4. Raccolta dati di eventi reali per il confronto (EM-DAT e ESWD).....	64
5.4.1. Database di EM-DAT	64
5.4.2. Database ESWD	67
5.5. Analisi regionale e provinciale dei dati ERA5-LAND.....	71
5.6. Suddivisione degli eventi in base alle regioni e province.....	81
5.6.1. Shapefile utilizzati per il riconoscimento	86
6. Risultati analisi regionali e provinciali	90
6.1. Risultati analisi regionale	95
6.2. Risultati analisi provinciale.....	106
7. Controllo eventi ERA5-LAND con eventi noti	117
7.1. Evento del 14/15 luglio 2020, Palermo.....	117
7.2. Evento del 19/24 ottobre 2019, Piemonte	119
7.3. Evento del 27/29 novembre 2020, Sardegna.....	122
7.4. Evento del 2/3 ottobre 2020, Limone Piemonte	125
7.5. Evento del 4/5 giugno 2020, Toscana ed Emilia-Romagna	127
8. Risultati e scelta della soglia pluviometrica migliore per l'identificazione di eventi estremi.....	130
8.1. Analisi risultati regioni.....	130
8.2. Analisi risultati province.....	135
9. Conclusioni	140
Bibliografia.....	144
Sitografia.....	146
Ringraziamenti	147

Abstract

I metodi di analisi retrospettiva, o rianalisi, costituiscono una delle principali fonti di dati riguardanti il clima e i parametri meteo climatici del passato. I *dataset* di rianalisi al giorno d'oggi sono molteplici e diversi, possono coprire l'intero globo o solamente alcune porzioni della superficie terrestre ed estendersi su finestre temporali di alcuni decenni fino a quasi tutto il secolo scorso.

Attualmente questi *dataset* vengono utilizzati per diversi scopi, come le analisi climatiche, lo studio di eventi meteorologici particolari o estremi e il cambiamento climatico. Utilizzi più recenti riguardano, invece, temi non convenzionali come l'ambiente finanziario, assicurativo e politico.

L'analisi svolta all'interno di questo lavoro ha avuto come obiettivo quello di valutare se i dati di precipitazione di ERA5-Land fossero utilizzabili per definire una soglia di piovosità applicabile in futuro per individuare, di conseguenza, eventi di pioggia estrema da cui possono scaturire eventi alluvionali, molto frequenti e problematici nel nostro Paese. L'analisi descritta in Mazzoglio et al. (2022) ha rappresentato la base di partenza per questo lavoro, fornendo la metodologia e la struttura di approccio allo studio. Le informazioni sul dataset di ERA5 e ERA5-Land riguardo l'utilizzo generale di dati di pioggia rispetto ad altri *dataset* sono state tratte invece dagli articoli di Singh et al. (2021) e Xu et al. (2021).

In questo lavoro sono state analizzate le piogge cumulate su 24 ore del *dataset* di ERA5-Land su una finestra temporale che va dal 2010 al 2020. Alle cumulate sono state applicate delle soglie pluviometriche ricavate dalla percentuale di pioggia media annua (PMA) ottenuta dagli stessi dati ERA5-Land. Le soglie utilizzate vanno dal 3 al 7% di pioggia media annua. Gli eventi piovosi dei dati di ERA5-Land che superavano l'altezza di pioggia imposta dalle soglie in un qualsiasi punto del territorio italiano sono stati confrontati con gli eventi reali noti ottenuti dai *database* di EM-DAT e ESWD.

L'analisi è stata svolta associando ad ogni evento piovoso che superava la soglia, la regione/i e la provincia/e in cui si è verificato l'evento e confrontando quest'ultimo con data e luogo di quelli reali di EM-DAT o ESWD. Dall'analisi e dal confronto tra le

due serie di eventi è stata successivamente scelta la soglia pluviometrica migliore da applicare nel caso di suddivisione di eventi a scala regionale e provinciale.

1. Misure della precipitazione

1.1. Introduzione

Negli ultimi anni il tema del cambiamento climatico è stato uno dei principali argomenti che viene quotidianamente trattato e discusso sia nelle tematiche politiche che sociali. Il clima e la componente meteorologica stanno acquistando via via maggiore importanza nella vita di tutti i giorni ed è ormai noto come alcuni degli eventi climatici quali per esempio la siccità, le temperature più elevate della media e gli eventi meteorologici estremi siano sempre più frequenti e comuni e si prevede che lo saranno sempre più in futuro.

La conoscenza e la comprensione di questi fenomeni, in termini di meccanismi che li generano, di fattori predisponenti e scatenanti sono uno dei principali obiettivi della meteorologia e climatologia moderna. Tuttavia, solamente negli ultimi anni si è riusciti, grazie allo sviluppo tecnologico e all'introduzione di nuovi strumenti digitali, ad acquisire dati in maniera massiccia e completa. Dati che riguardano diversi aspetti e diverse tipologie di fenomeni, che forniscono un quadro su molteplici parametri e variabili meteorologiche in quasi tutte le zone del pianeta.

Il notevole passo in avanti riguarda però solamente gli ultimi anni, non abbiamo infatti a disposizione per il secolo scorso uno storico completo di dati acquisiti in maniera “diretta”, né con strumenti a terra né con metodi più innovativi come i satelliti. Una delle soluzioni a questo problema è stata l'applicazione delle tecniche di rianalisi, o analisi retrospettiva, che forniscono dei veri e propri *dataset* storici sul clima e sul meteo degli anni passati.

I *dataset* forniti dalla rianalisi sono molto interessanti sotto diversi punti di vista poiché possono essere utilizzati per l'analisi e lo studio in diversi ambiti sociali e in materie di stampo scientifico anche molto diverse tra loro. Il loro punto di forza sta nel fatto che forniscono informazioni che coprono ampie porzioni della superficie terrestre e allo stesso tempo anche grandi intervalli temporali. Questa caratteristica consente di vedere nel dettaglio come sono cambiati i parametri e le variabili climatiche nel corso del tempo. Conoscere com'è cambiato il clima in una determinata

zona e avere delle indicazioni su come sta cambiando è fondamentale. Infatti, questi dati non vengono utilizzati solo per avere informazioni riguardanti il clima o per fare delle previsioni per i giorni futuri, ma possono essere utilizzati per scopi ben più “distanti” da quello che comunemente si può pensare, come all'interno di ambiti riguardi i mercati finanziari, le assicurazioni, i trasporti e l'approvvigionamento idrico.

Questi sono alcuni tra gli impieghi professionali in cui la rianalisi climatica è applicata al momento, si prevede però che nei prossimi anni verrà utilizzata con sempre maggiore frequenza e sarà destinata ad un utilizzo ancora più ampio e trasversale di quanto non lo sia adesso.

L'ampliamento della conoscenza in questo campo rappresenta uno dei punti chiave per acquisire una conoscenza meteorologica e climatica tale da permetterci di raggiungere molti obiettivi tra cui, quello più importante, mitigare e contenere l'effetto del cambiamento climatico.

1.1.1. Descrizione preliminare dei dataset di analisi retrospettiva

Come già introdotto in precedenza, la rianalisi climatica è uno strumento capace di quantificare gli andamenti climatici e le dinamiche meteorologiche di tutto il globo, fornendo informazioni sia sugli eventi nel loro insieme, a scala globale, sia sugli eventi molto più specifici e locali. Il risultato della rianalisi consiste in una griglia regolare all'interno della quale è riportato l'andamento di tutte le variabili climatiche analizzate nell'arco di tempo considerato. Questo consiste in una omogeneizzazione ed uniformizzazione dei parametri meteorologici, che restituisce una visione globale e sostanziale del paleoclima adatta ad un uso in termini statistici o per elaborazioni più complesse.

Una delle caratteristiche che contraddistingue questo metodo è, come già accennato, l'analisi storica che viene effettuata. Questa rappresenta un vantaggio in quanto l'atmosfera, così come la terra, evolvono in tempi relativamente lunghi e l'analisi di questi *dataset* permette e concede all'osservatore una visione d'insieme e del *trend* di mutamento del clima.

Al giorno d'oggi il clima non costituisce più una componente svincolata e slegata dall'ecosistema Terra e dall'essere umano, ma al contrario abbiamo capito come ciò che facciamo, le nostre attività ed i nostri comportamenti siano legati con quello che succede intorno a noi. Nei prossimi anni infatti potremmo assistere al superamento di soglie, alla riduzione di tempi di ritorno e alla modifica di equilibri ambientali e territoriali e di conseguenza economici e politici.

Il risultato della rianalisi può essere considerato come una matrice su cui possono essere analizzate e comprese diverse tematiche e politiche, poiché la meteorologia e il clima sono legati al contesto storico, culturale e sociale.

In quest'ottica in Italia è stato avviato un progetto per lo sviluppo di *dataset* realizzati appositamente per il nostro territorio. Il progetto in questione è chiamato MERIDA ed è stato sviluppato al fine di conoscere ed individuare le tendenze climatiche italiane, al fine di metterle in relazione con lo sviluppo e la distribuzione della rete elettrica sul territorio.

Anche in ambito Europeo e non solo ci si è concentrati su questa tematica, infatti numerosi sono i progetti sviluppati al fine di produrre *dataset* di rianalisi da poter utilizzare per diversi obiettivi. Progetti quali, per esempio, ERA5, sviluppato in collaborazione con *Copernicus* e la costellazione dei satelliti *Sentinel*.

Il motivo per cui effettivamente ci si concentra, con progetti e studi in diverse parti del mondo, sulla tematica delle rianalisi è che questo prodotto, basato su osservazioni derivate da diverse tipologie di strumenti, fornisce dei *dataset* di campi di variabili climatiche continui ed aggregati sia temporalmente che spazialmente. La rianalisi permette di incrementare le conoscenze meteorologiche su parametri che vengono poco monitorati, poiché ritenuti secondari, o di fornire informazioni primarie (temperatura, pressione, umidità, ecc.) in zone del mondo nelle quali lo sviluppo tecnologico è limitato o che sono difficili da raggiungere e studiare per diversi motivi. Basti pensare per esempio alle zone tropicali dell'America del Sud, alle zone interne e remote della foresta amazzonica difficili da raggiungere con la strumentazione a terra, così come per il Sud Africa o l'India in cui le caratteristiche sociali, economiche e

politiche del Paese non hanno come scopo primo quello dello sviluppo e della digitalizzazione delle variabili climatiche.

1.2. Osservazione e registrazione dati di pioggia

La misura delle precipitazioni occupa un ruolo fondamentale per lo studio e l'analisi meteorologica e climatica. Conoscere la quantità d'acqua che cade al suolo durante il verificarsi di un evento precipitativo e sapere come questa è distribuita sul territorio sono alcune delle variabili più importanti da definire per garantire la sicurezza e la migliore gestione possibile dell'evento.

Possedere informazioni in termini quantitativi sull'acqua che cade sul territorio durante un evento o durante finestre temporali più ampie è importante non solo per la gestione delle emergenze e degli eventi alluvionali ma anche per il più semplice controllo delle risorse idriche. Quotidianamente, ormai, si sente parlare delle maggiori difficoltà nella gestione delle risorse dovute anche al fatto che le precipitazioni tendono ad essere più intense e rare, il che ne rende più difficile la gestione anche all'interno degli stessi bacini di accumulo o dighe.

Al giorno d'oggi l'acquisizione dei dati di pioggia può essere effettuata con diverse tecniche e strumenti. Ognuna di esse presenta dei vantaggi e degli svantaggi legati alle caratteristiche intrinseche di funzionamento e di modalità di acquisizione del dato. I principali metodi di acquisizione sono:

- strumentazione a terra (*in situ*);
- acquisizione satellitare o *remote sensing*;
- *dataset* di rianalisi;

Le precipitazioni possiedono un'elevata variabilità spaziale e temporale. Per effettuare delle osservazioni riguardanti le piogge attraverso l'acquisizione diretta in sito sono necessari strumenti appositi. La progressione tecnologica ha fornito una notevole varietà di strumenti, passando dai più semplici pluviometri da pioggia ai più sofisticati e recenti radar meteo.

1.2.1. Pluviometro

Uno dei principali strumenti utilizzati da molto tempo è il pluviometro (Figura 1). Esso costituisce una delle componenti principali delle comuni stazioni meteorologiche. Il corretto funzionamento di un pluviometro dipende dalla sua corretta collocazione ed installazione che deve essere eseguita in un luogo aperto e libero da ogni ostacolo come alberi o edifici. Il giusto posizionamento permette allo strumento di registrare dati di pioggia che poi verranno raccolti e ordinati negli archivi idrologici. Vi sono diverse tipologie di pluviometri, che sono più o meno automatizzati e con diversi livelli di tecnologia applicata. Il più basilare tra tutti è il *pluviometro manuale* costituito da un vaso cilindrico che misura l'acqua caduta all'interno attraverso una scala graduata in millimetri presente sul lato del vaso.

Una delle versioni più frequenti utilizzate è quella del *pluviometro a doppia vaschetta basculante*. Questa tipologia di strumento è costituita da un imbuto che convoglia l'acqua verso una doppia vaschetta, in plastica o metallo, che è incernierata in un punto. Il sistema funziona grazie all'oscillazione delle due vaschette che avviene a seconda della quantità d'acqua caduta all'interno. Generalmente il sistema è calibrato per basculare ogni 0,2 mm d'acqua accumulata all'interno della vaschetta che staziona sotto l'imbuto. A ogni rotazione viene riportata la vaschetta vuota sotto l'ugello dell'imbuto per continuare con le misure. Ogni rotazione viene registrata e, nel caso il sistema lo permetta, inviata in diretta alla stazione meteorologica di riferimento. La misura della quantità d'acqua caduta durante un evento di pioggia è data dall'altezza d'acqua necessaria per il ribaltamento della vaschetta moltiplicata per il numero di ribaltamenti avvenuti durante l'evento.

È importante sottolineare che recentemente sono stati introdotti anche i *pluviometri termoriscaldati*. Questi strumenti sono utili per misurare la quantità d'acqua precipitata nei mesi invernali in quanto il calore fornito dalla resistenza collocata intorno all'imbuto permette di fondere la neve che vi cade all'interno e di misurare l'equivalente liquido dell'evento precipitativo.



Figura 1- Pluviometro della stazione meteo di Lillianes, Aosta

1.2.2. Disdrometro

Un altro strumento disponibile per l'acquisizione *in situ*, il cui impiego si è sviluppato recentemente, è il *disdrometro* (o drop size distribution meter, Figura 2). Questo strumento è in grado di rilevare nello stesso momento la velocità di caduta e le dimensioni delle idrometeore come pioggia, neve o ghiaccio. Il disdrometro è costituito da una matrice laser con caratteristiche e sensibilità diverse in base alla versione utilizzata. È utilizzabile ed installabile facilmente e può essere anche utilizzato come strumento di misura mobile da impiegare in diversi siti in caso di necessità.

Le misurazioni di un disdrometro laser sono eseguite attraverso la variazione di luminosità del fascio laser. In base alla riduzione di luminosità, infatti, si è in grado di determinare il diametro della particella che ha appena attraversato il fascio di luce mentre la durata dell'attenuazione, o in altre parole, il tempo per cui perdura la riduzione di luminosità dovuta allo stazionamento dell'idrometeora tra i due ricevitori dello strumento, è inversamente proporzionale alla velocità di caduta. La velocità di caduta, inoltre, e la dimensione delle particelle sono strettamente collegate. Come riporta Fehlmann et al. (2020) a parità di tipologia di particella (pioggia, neve o grandine) più aumenta la dimensione di queste più aumenta la velocità di caduta.

In presenza di nebbia, ad esempio, la velocità di caduta è dell'ordine di alcuni centimetri al secondo, per la pioggia si aggira intorno ai 6 m/sec che può arrivare, nel caso di piogge grossolane, anche a picchi di 9 m/sec. Infine, in presenza di grandine le velocità dei chicchi più grandi possono raggiungere gli 11 m/sec.



Figura 2- Disdrometro, Fonte: Corte (2020)

1.2.3. Radar meteorologico

Continuando a parlare di strumenti, apparsi recentemente nel ventaglio delle tecnologie disponibili per il monitoraggio degli eventi piovosi e delle idrometeore, va menzionato il *radar meteorologico*. Questo strumento (Figura 3) utilizza impulsi di onde elettromagnetiche per identificare ed individuare la presenza di idrometeore nell'atmosfera.

L'obiettivo, quindi, è molto simile a quello già visto per il disdrometro, ovvero rilevare le idrometeore come gocce d'acqua, cristalli di neve o di ghiaccio presenti in atmosfera. Il meccanismo di funzionamento però è radicalmente diverso. Nel dettaglio il radar meteo scansiona una porzione di atmosfera molto ampia utilizzando dei fasci di onde elettromagnetiche anziché limitarsi alla misurazione puntuale come per il disdrometro. Il fondamento del funzionamento di questa tecnologia consiste nell'interpretare quella parte di segnale elettromagnetico che viene riflesso nel momento in cui incontra un ostacolo, che comunemente viene chiamato riflettività (Z).

Il principio di funzionamento del radar meteorologico consiste nel trasmettere un segnale elettromagnetico in uscita, attraverso l'antenna, caratterizzato da una certa

potenza e da una certa direzione, definita dall'angolo di azimut (φ) sul piano orizzontale e dall'angolo di elevazione (θ) sul verticale. Il dato registrato dal radar meteo consiste in quella parte di onde elettromagnetiche che interagiscono con il corpo atmosferico e venendo riflesse indietro subiscono un'alterazione legata direttamente alle caratteristiche del corpo incontrato. Successivamente la parte di segnale riflesso viene acquisito dal ricevitore presente nella stessa struttura (Galvano, 2020).

L'analisi del segnale riflesso consente di ottenere informazioni riguardanti sia la posizione dell'oggetto rilevato sia la direzione di movimento. L'emissione di fasci di onde elettromagnetiche in continuo o discretizzati secondo intervalli regolari permette di tracciare la traiettoria e la posizione del corpo, consentendone di valutare anche la velocità di spostamento. Conoscere la velocità e direzione di movimento consente di effettuare delle previsioni anche molto accurate di celle convettive o fenomeni di piccola entità.

Il dato acquisito dagli strumenti *radar* è, come anticipato, legato alle caratteristiche delle onde elettromagnetiche riflesse registrate. L'alterazione che subiscono le onde elettromagnetiche e la potenza con cui ritornano al ricevitore dipendono da diversi fattori quali, per esempio, la potenza del segnale in trasmissione, le caratteristiche e le proprietà del bersaglio e dalla distanza tra il radar ed il bersaglio stesso.

La conversione dell'onda riflessa in un dato di pioggia è possibile grazie alla proporzionalità diretta tra la riflettività (Z), il numero e il diametro delle gocce d'acqua presenti in atmosfera secondo la legge:

$$Z = aR^b$$

In cui:

- R è l'intensità della precipitazione;
- a e b sono i coefficienti legati alle dimensioni delle caratteristiche e dimensioni delle idrometeore;
- Z è la riflettività.

La conversione del dato di riflettività nel dato di pioggia è soggetta, come evidenziano Marshall e Palmer (1948), alla dimensione e alla distribuzione delle particelle d'acqua presenti all'interno delle nuvole.

Queste informazioni però sono molto difficili da recuperare poiché necessitano di strumenti sul territorio idonei e distribuiti in modo omogeneo cosa che, spesso, viene meno anche nei Paesi più avanzati.

Le difficoltà nella definizione di questi parametri, e di conseguenza nella definizione dei valori di a e b , costituisce un limite nella precisione della stima che queste tecnologie possono avere. Per far fronte a questo problema vengono definite delle metodologie di stima del dato di pioggia in base alla relazione riflettività ed intensità della precipitazione ($Z-R$) che sono:

- *non adattativa*: in cui i parametri a e b rimangono costanti nel tempo e nello spazio;
- *adattativa*: in cui i parametri a e b invece non sono costanti ma cambiano sia rispetto allo spazio che al tempo.



Figura 3 - Radar meteorologico, Fonte: <https://www.meteoweb.eu/radar-meteo-italia/>.

1.2.4. Satellite

Un altro degli strumenti recenti che completa il quadro delle tecniche di acquisizione per il monitoraggio degli eventi di pioggia è il satellite. Questi strumenti artificiali vengono realizzati appositamente per essere messi in orbita attorno al globo, il che permette di godere di un punto di vista differente da quello dei sistemi di acquisizione del dato a terra appena visti e di osservare gli eventi “dall’alto” su più ampia scala. Lo sviluppo della tecnologia permette di operare con queste macchine praticamente in tempo reale e di svolgere attività particolari da remoto. Inoltre, generalmente, all'interno dei satelliti sono montati diverse tipologie di strumenti e sensori, il che consente di avere delle misure più attendibili poiché vengono registrare osservazioni di natura diversa, sfruttando diversi spettri di onde elettromagnetiche.

Acquisire dati in campi multispettrali di radiazioni elettromagnetiche dà la possibilità di sfruttare raggi gamma, raggi X, ultravioletti, spettro del visibile, infrarossi, onde radio e microonde. Il ventaglio di onde elettromagnetiche utilizzabili da questi strumenti non viene però emesso direttamente dal satellite ma bensì ne viene acquisito il riflesso dei raggi cosmici prodotti dal Sole che impattano contro la Terra e vengono riflessi in atmosfera o, nel caso dell'infrarosso, direttamente emesso dalla Terra.

Generalmente è difficile trovare satelliti che operano in singolo poiché un solo satellite non è in grado di coprire l'intera superficie terrestre in modo adeguato senza lasciare, a parità di punto d'interesse a terra, troppe lacune temporali tra un'acquisizione e l'altra o una risoluzione spaziale troppo bassa. È invece molto più comune trovare più satelliti dello stesso tipo che operano in orbita nello stesso momento, i gruppi di satelliti sono anche detti “costellazioni”.

I concetti di risoluzione spaziale, temporale e spettrale sono le caratteristiche più importanti nei sistemi di telerilevamento satellitare. La risoluzione spaziale è strettamente correlata alla tipologia di strumenti di acquisizione utilizzati, alla capacità di cogliere e distinguere i dettagli e i singoli oggetti e alla sensibilità nel registrare il livello di radiazione emessa da questi ultimi. In altre parole, un'alta risoluzione spaziale fornisce un'immagine molto nitida, i cui bordi degli oggetti sono

definiti e privi di brusche interruzioni. Al contrario, una bassa risoluzione spaziale, fornisce immagini sgranate, con quadretti grossolani, nelle quali risulta difficile identificare anche solo le forme e i contorni degli oggetti.

La risoluzione temporale è legata al numero di volte in cui lo stesso punto a terra viene inquadrato dal sensore. Si tratta quindi di quell'intervallo di tempo che passa dal momento in cui il punto terra viene inquadrato ed osservato da un satellite a quando lo stesso punto a terra viene osservato dallo stesso satellite o da uno appartenente alla stessa costellazione. Un elevato valore di risoluzione temporale permette di osservare i cambiamenti che possono avvenire, ad esempio, in un evento piovoso in modo molto dettagliato, il che permette di conoscere l'evoluzione del fenomeno, il suo spostamento, le dimensioni, ecc. Ovviamente l'incremento della risoluzione temporale avviene previa l'aumento del numero di satelliti messi in orbita a cui consegue un aumento dei costi che non può essere trascurato. I satelliti destinati a fini meteorologici generalmente prediligono una risoluzione temporale migliore, con intervalli anche sub-orari, a discapito di una risoluzione spaziale più bassa.

L'ultimo aspetto rilevante da considerare è la risoluzione spettrale che caratterizza le acquisizioni satellitari. Lo spettro delle onde elettromagnetiche è formato, come accennato in precedenza, da intervalli di lunghezze d'onda (λ) diversi.

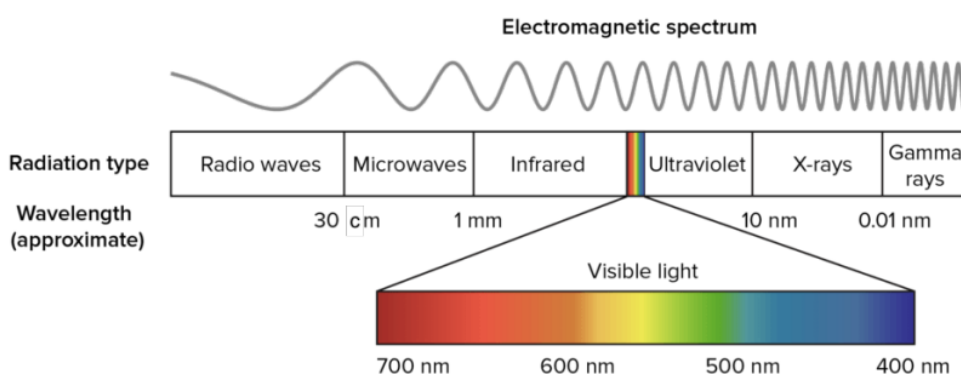


Figura 4 – Rappresentazione dello spettro elettromagnetico Fonte: Galvano (2020)

Come riporta la Figura 4 le lunghezze d'onda vengono divise in intervalli, dei quali quello più noto a noi esseri umani è quello del visibile. Ogni intervallo viene acquisito

da un sensore dedicato. L'acquisizione simultanea delle radiazioni elettromagnetiche riflesse dalla terra su diversi intervalli spettrali permette di effettuare delle analisi molto più approfondite su quello che realmente sta accadendo a terra. Infatti, molti punti di interesse come l'acqua o la vegetazione, a cui noi siamo tendenzialmente abituati ad associare rispettivamente il colore blu e verde, nel campo delle acquisizioni nell'infrarosso o nelle microonde possiedono delle caratteristiche spettrali tipiche e uniche che li rendono identificabili in maniera molto più efficiente e precisa. La maggior parte delle acquisizioni satellitari avviene nello spettro dell'infrarosso (IR), delle microonde (MW) e nel visibile (VIS) mentre le lunghezze d'onda più corte, come l'ultravioletto, vengono spesso bloccate dagli strati più alti dell'atmosfera.

Per quanto riguarda l'acquisizione di osservazioni satellitari riguardanti gli eventi piovosi il principio di funzionamento dei metodi basati su acquisizioni VIS/IR è fondato sul legame che sorge tra le nuvole fredde e luminose con le strutture convettive. In particolare, la bassa temperatura presente sulla parte sommitale del corpo nuvoloso suggerisce un maggior sviluppo verticale della stessa e una maggiore piovosità (Adler e Negri, 1988). Va sottolineata che la relazione tra temperatura nella parte superiore delle nuvole e la precipitazione è di tipo indiretta e non tutte le nuvole che presentano questa caratteristica, generano delle precipitazioni effettive. Il collegamento tra la temperatura superiore della nuvola, valutata attraverso l'utilizzo degli infrarossi, e la probabile intensità di una precipitazione può essere utilizzato per stimare le precipitazioni delle letture IR (Sun et al., 2017).

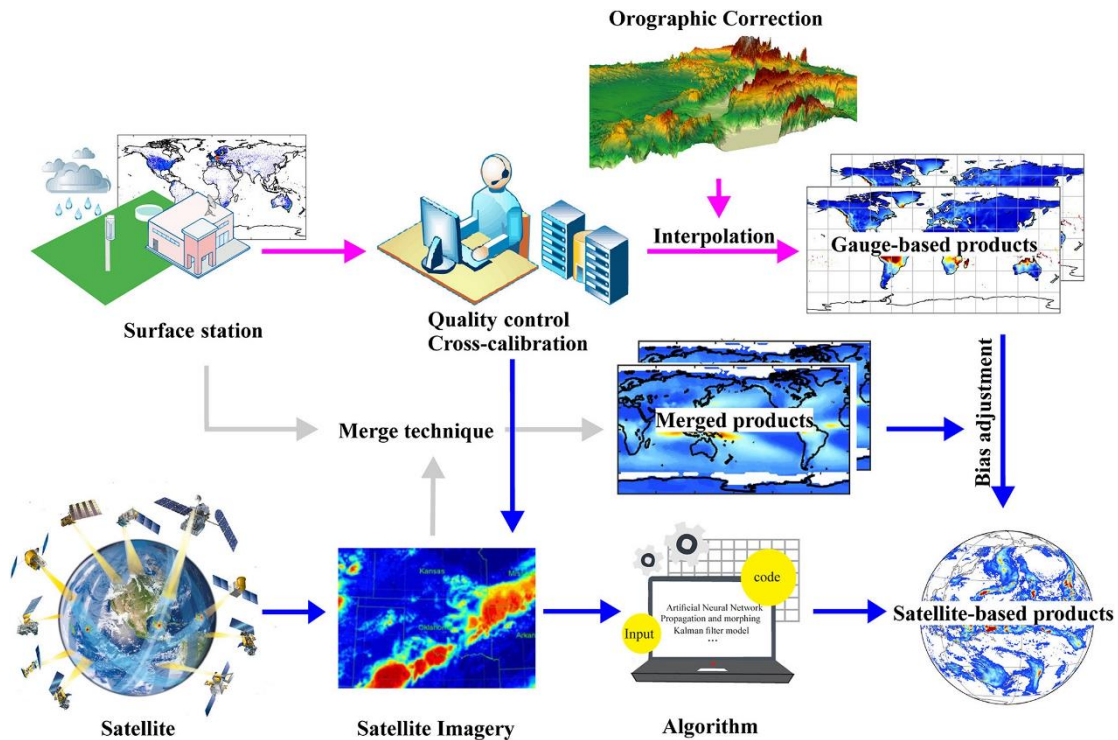


Figura 5- Diagramma di flusso per i prodotti delle precipitazioni (Sun et al., 2017).

1.2.5. Analisi retrospettive

L'ultimo metodo che permette di fornire *dataset* su diverse variabili meteorologiche ma che in particolare, per questo caso, prende in considerazione gli eventi piovosi è la rianalisi. Come già accennato in precedenza il principio alla base dei sistemi di rianalisi è quello di unire delle osservazioni che possono essere più o meno regolari provenienti da più fonti con modelli che simulano i processi fisici e dinamici dell'atmosfera. Il risultato è una stima della variabile climatica considerata che viene fornita su una griglia uniforme, omogenea spazialmente, continua temporalmente e coerente con le stime delle altre variabili climatiche.

Questa tecnica è quella che verrà utilizzata e analizzata approfonditamente all'interno della tesi e che è stata utilizzata come *dataset* di base per l'individuazione degli eventi piovosi e delle soglie. Nel prossimo capitolo verrà trattato ampiamente il tema della rianalisi descrivendola in modo dettagliato e preciso.

1.3. Obiettivo della tesi: misura ed identificazione di eventi estremi di precipitazione

Uno degli obiettivi fondamentali riguardanti il clima di questi ultimi anni è quello di conoscere e prevedere il più profondamente e dettagliatamente possibile gli eventi climatici estremi. Come ben sappiamo negli ultimi anni gli eventi atmosferici estremi si stanno verificando con sempre maggiore intensità in tutto il mondo il che rende la capacità di prevederli un aspetto fondamentale. Come evidenzia un'analisi Coldiretti, diversi enti come il World Meteorological Organization (WMO) hanno effettuato degli studi a riguardo, sottolineando come negli ultimi anni i disastri provocati da eventi meteo estremi siano aumentati di circa 5 volte rispetto a cinquant'anni fa e abbiano provocato milioni di vittime e miliardi di dollari di danni (Coldiretti, 2019).

Questa tesi si pone come obiettivo quello di utilizzare i prodotti delle rianalisi e i dati in essa contenuti al fine di definire delle soglie di pioggia da poter essere utilizzate in futuro come valore quantitativo per individuare gli eventi di pioggia estremi. Questo lavoro prende spunto da quello svolto in precedenza in Mazzoglio et al. (2022), nel quale si è cercato di individuare le stesse soglie di piovosità utilizzando dati satellitari come *input* e fornendo come *output* un valore soglia per ogni nazione nel mondo.

In questo lavoro invece è stata considerata esclusivamente l'Italia. Si è cercato inoltre di incrementare il livello di dettaglio geografico andando ad analizzare e suddividere gli eventi piovosi sulla base della regione in cui sono avvenuti e di verificarne l'effettiva congruenza con gli eventi realmente accaduti disponibili in *database* di censimento online come EM-DAT o ESWD.

L'individuazione e la previsione degli eventi estremi è fondamentale: un'analisi della Coldiretti eseguita sui dati rilasciati da ESWD (European Severe Weather Database) evidenzia come il 2021 sia stato un anno caratterizzato da una straordinaria quantità di eventi meteorologici estremi. In particolare, in questo rapporto si parla di un +65% rispetto agli anni passati o, in altre parole, ben più di 1400 eventi tra grandinate, bombe d'acqua, tempeste, ondate di calore e bufere di vento che hanno colpito tutta la penisola da nord a sud.

L'effetto dei cambiamenti climatici ha portato all'alternanza tra periodi di siccità e alluvioni repentine ed ha provocato danni per oltre 14 miliardi di euro in un solo decennio. I danni provocati ovviamente fanno riferimento al danneggiamento di infrastrutture, all'allagamento di campagne e colture e alla distruzione causata da frane e smottamenti che hanno avuto pesanti ripercussioni su tutto il territorio e sul settore produttivo italiano (Coldiretti, 2021).

L'antropizzazione del territorio e l'aumento della superficie cementata o asfaltata rende decisamente più difficile la gestione e la mitigazione degli effetti provocati da queste sempre più intense e frequenti piogge estreme o giornalmente parlando "bombe d'acqua". L'Italia poi, a differenza di altri paesi, possiede una geologia molto diversificata e variegata, una morfologia principalmente caratterizzata da zone collinari (per il 41,6%) e da zone montuose (per il 35,2%) tanto che si stima che circa il 91% del totale dei comuni italiani sia soggetto a rischio idrogeologico (stime Coldiretti su dati ISPRA e ISTAT).

2. Metodi per la costruzione di basi di dati retrospettive

2.1. Origini

La tecnica delle rianalisi venne introdotta per la prima volta intorno alla metà degli anni '90 con lo scopo di essere utilizzata per la produzione dei primi *dataset* climatici. L'avanzamento della tecnologia e della potenza informatica e computazionale ha fatto sì che si potessero applicare queste analisi modellistiche particolarmente complesse a grandi quantità di dati.

L'esigenza nacque dalle necessità della comunità scientifica di lavorare su dati continui ed omogenei nel tempo e nello spazio cosa che, fino ad allora, era impossibile a causa delle disomogeneità di acquisizione spaziale e temporale. Questo costringeva la comunità scientifica ad operare su *dataset* discontinui legati alla modalità di misurazione tradizionale di allora.

Con il passare degli anni i *dataset* di rianalisi acquisirono un'importanza sempre più significativa legata alla crescente domanda di disporre di una meteorologia più definita e precisa. Al giorno d'oggi diversi settori necessitano di un'applicazione avanzata e digitalizzata di questi prodotti. Nello specifico questi *dataset* assumono un ruolo fondamentale e strategico per la realizzazione di nuove formule o tipologie assicurative, per lo sviluppo di prodotti finanziari come i derivati climatici, nella *smart-agricolture* ed infine nei settori dell'energia e del ciclo idrico che necessitano di un supporto per la progettazione e per la gestione delle risorse e delle reti di distribuzione, di vendita e approvvigionamento.

Non meno importante negli ultimi anni si è affermato un sempre maggior interesse verso l'ambiente legato principalmente all'ormai noto cambiamento climatico e al riscaldamento globale. La maggiore sensibilità e consapevolezza sociale rispetto a queste tematiche ha fatto sì che un numero sempre maggiore di laboratori e centri di ricerca accogliesse l'esigenza di una miglior comprensione di questi fenomeni, concentrando le ricerche e gli sforzi in questa direzione.

2.2. Definizione

La rianalisi, in meteorologia, definisce un metodo scientifico che serve per sviluppare un archivio completo di parametri meteorologici e climatici e di come questi cambino nel tempo. All'interno della rianalisi, o analisi retrospettiva, vengono combinate le osservazioni reali effettuate e i modelli numerici di simulazione. Questa combinazione crea una rappresentazione oggettiva e sintetica di uno o più aspetti dell'atmosfera e della superficie terrestre. Il prodotto ottenuto dalle rianalisi viene riorganizzato in un sistema regolare di griglie, con dimensioni e con caratteristiche specifiche in base al progetto o all'applicazione richiesta.

La rianalisi si estende in genere su diversi decenni o più, coprendo l'intera superficie terrestre fino ad oltre la stratosfera. Sono ampiamente utilizzate nella ricerca e negli istituti climatici, per monitorare e confrontare le condizioni climatiche attuali con quelle del passato, identificare le cause delle variazioni e dei cambiamenti del clima e per realizzare e verificare previsioni climatiche. Le informazioni derivate dalle rianalisi vengono inoltre utilizzate sempre più in applicazioni commerciali ed aziendali in settori quali energia, agricoltura, ecc.

In altre parole, la rianalisi è in grado di ricreare un passato più simile alla realtà di quanto ci era noto e ci permettere di utilizzare questa conoscenza per definire un futuro altrettanto attendibile.

Le principali stime dei parametri atmosferici fornite dalle rianalisi sono la temperatura dell'aria, la pressione e la velocità del vento a diverse altitudini ed inoltre parametri di superficie come le precipitazioni, il contenuto di umidità del suolo, l'altezza delle onde oceaniche e la temperatura della superficie del mare. Le stime sono prodotte per tutte le località della terra e abbracciano un lungo periodo di tempo che può estendersi indietro di diversi decenni o più.

I *dataset* meteo-climatici rappresentano uno strumento fondamentale per lo studio della variabilità climatica e per la comprensione dei meccanismi di funzionamento del clima, trasformandoli in uno degli strumenti principali dei giorni nostri.

2.3. Caratteristiche

Le caratteristiche principali dei *dataset* meteorologici di rianalisi sono:

- copertura completa della superficie terrestre;
- elevato grado di veridicità delle condizioni meteo-climatiche ricostruite su tutto il territorio e anche nelle zone non coperte da monitoraggio e strumentazione in situ;
- riduzione o completa eliminazione delle discontinuità spazio-temporali.

La fruibilità spaziale e temporale di questi dati è funzione del progetto da cui questi *dataset* hanno origine e variano in base alla specifica applicazione e alle dinamiche meteo climatiche ricercate. In generale, gli intervalli di discretizzazione dei dati di rianalisi possono variare da un valore al mese, uno al giorno fino ad arrivare ad intervalli della dimensione di un paio d'ore o meno. (Crespi, 2020).

2.4. Funzionamento

La rianalisi acquisisce tutte le misurazioni e i dati derivanti dalle acquisizioni *in situ* e dai sistemi di monitoraggio meteorologico in remoto come i satelliti. I dati vengono quindi elaborati da modelli numerici di previsione atmosferica ed, eventualmente, post-processati. Il risultato del processo, o *output*, è, come già accennato in precedenza, una distribuzione di dati elaborati su una griglia uniforme di grandezza variabile in base al tipo di progetto per cui vengono sviluppati (Figura 6). L'*output* restituisce un risultato per ogni punto del dominio spaziale a prescindere dalla provenienza del dato di partenza, sia che derivi da osservazioni *in situ* sia che derivi da acquisizioni in remoto.



Figura 6- Griglia di Dati da Processo Rianalisi. Fonte: Massimo Crespi & Gianluca Ferrari, QUADERNO DI METEOROLOGIA APERTA n° 2 DELLA RIANALISI, O ANALISI RETROSPETTIVA, IN METEOROLOGIA.

Gli elementi essenziali di cui si deve disporre per una corretta applicazione sono:

- un *set* di dati di *input* il più grande e ricco possibile, sia in situ che da remoto;
- un modello di previsione atmosferica definito in partenza e che non subisca modifiche durante tutto il processo di rianalisi.

Queste due caratteristiche sono essenziali per ottenere un *dataset* di buona qualità. Più ampio e consistente è il *set* di dati derivante dalle osservazioni migliore e attendibile sarà il risultato finale. Non sempre però questa condizione può essere rispettata in modo impeccabile poiché l'acquisizione dei dati *in situ* è soggetta ed è stata soggetta a condizioni diverse che, nel corso degli anni, potrebbero aver influenzato la qualità di alcuni dati.

A soluzione di questo problema o per rispondere ad esigenze specifiche di utilizzo dei *dataset* prodotti ci si può avvalere delle operazioni di *post-processing*.

Il *post-processing* consiste sostanzialmente nella rielaborazione del dataset di rianalisi prodotto per ottimizzarlo per un determinato utilizzo. Principalmente ne vengono utilizzati tre tipologie:

- *downscaling* che sfrutta l'utilizzo di DEM (Digital Elevation Model) con una risoluzione maggiore che permette di "aggiustare" il dato del *dataset* originario sulla base di un modello digitale del terreno più preciso;
- riduzione del bias con l'applicazione di metodi statistici quali i MOS (Model Output Statistics) che utilizzano le statistiche delle misure meteo locali attuali o storiche per aumentare sensibilmente l'accuratezza dei dati;
- la correzione di variabili climatiche derivate, ossia di quelle variabili che non vengono direttamente misurate al suolo o nell'atmosfera con osservazioni dirette ma prodotte dalla sola componente modellistica della rianalisi come, ad esempio, l'altezza di pioggia.

2.5. Dati di input per la produzione di dataset retrospettivi

Uno degli ingredienti fondamentali per produrre delle analisi di buona qualità sono i dati di *input*, ovvero le osservazioni. L'obiettivo sostanziale delle rianalisi è quello di trattare e rielaborare le osservazioni nel modo migliore e più veritiero possibile, così che il risultato sia coerente con quest'ultime.

Le osservazioni possiedono un ruolo fondamentale per la buona riuscita del processo, ma vi è la necessità di eseguire una selezione approfondita su queste ultime, scegliendo di utilizzare solamente quelle che presentano determinate caratteristiche di qualità, che rispettano determinati standard e che sono sufficientemente ricche in dati e robuste in stima.

Vi sono due principali gruppi in cui le osservazioni, o dati di *input*, possono essere suddivisi:

- osservazioni provenienti da reti *in situ*;
- osservazioni provenienti da reti che operano in *remote sensing*.

2.5.1. Osservazioni da reti in situ

Nelle osservazioni provenienti da reti *in situ* rientrano tutti quei dati di *input* che derivano da strumenti a terra caratterizzati da funzioni e tecnologie anche molto diverse tra loro. Una descrizione indicativa di questi è stata fornita nel capitolo precedente e, per citarli ancora, rientrano in questa categoria i pluviometri, i disdrometri, ecc.

I dati provenienti da questi strumenti però non sono tutti ugualmente utilizzabili allo stesso modo, poiché bisogna essere sicuri che il dato riportato sia realistico, che sia stato acquisito da reti di monitoraggio adeguate e a norma, che sia robusto ed infine che sia liberamente fruibile. La caratteristica che viene richiesta per i dati acquisiti *in situ* è quella di rientrare all'interno di una delle seguenti categorie:

- provenienza da “*reti certificate*” ovvero reti di acquisizione che siano state sottoposte alle formali procedure di certificazione della tipologia di strumenti utilizzati ed installati, del loro posizionamento geografico e nel contesto morfologico ed infine delle procedure di manutenzione e di validazione del dato acquisito;
- “*a norma WMO*”: ovvero da reti che fanno riferimento ad associazioni, organizzazioni o aziende di gestione del territorio che applicano per la gestione di tutto il ciclo di vita delle reti di acquisizione le linee guida della WMO;
- “*reti ufficiali*”: ovvero quelle reti che fanno riferimento ad organizzazioni governative preposte al monitoraggio e alla previsione meteorologico-ambientale. Quest'ultime però non sono sempre utilizzabili poiché la loro ufficialità non è garanzia o sinonimo di qualità rispetto ai parametri WMO.

2.6. Caratteristiche generali dei dati utilizzati per le rianalisi

Tutti i tipi di dati che vengono utilizzati per realizzare i *dataset* di rianalisi devono possedere determinate caratteristiche più o meno generali che ne determinano la loro applicabilità o meno oltre a quelle appena citate. Le principali caratteristiche sono:

- *accessibilità*: ovvero i dati devono essere liberamente accessibili da chiunque e forniti nei formati standard così da non impedirne l'utilizzo a enti che non sono predisposti a trattare particolari formati di dati;
- *continuità*: come già accennato in precedenza è importante che i dati di partenza siano inseriti all'interno di una serie storica consistente poiché anche se il risultato della rianalisi ha come obiettivo quello di produrre un *dataset* consistente nel tempo, l'utilizzo di dati che già presentano in parte questa caratteristica migliora il risultato del prodotto finale;
- *disponibilità*: devono essere disponibili, almeno per la maggior parte dei casi, su criteri *open data* e quindi liberamente consultabili e scaricabili da chiunque;
- *fruibilità*: si intende la possibilità di reperire i dati in tempi utili ai diversi utilizzi;
- *terziarietà*: non attribuibili a terze parti;
- *trasparenza*: corredati dai metadati di acquisizione;
- *univocità*: che siano riferibili e si prestino ad un'unica interpretazione;

Anche i dataset stessi da cui provengono i dati di input delle rianalisi devono rispettare certe caratteristiche per essere utilizzati:

- *continuità* nello spazio e nel tempo;
- *copertura* consistente e adeguata allo specifico utilizzo che se ne intende fare, globale nel caso di analisi su vasta scala o con copertura minore nel caso di analisi più specifiche;
- *invarianza* o immutabilità nel tempo dello stesso *dataset*;
- *omogeneità* di dati a intervalli regolari nel tempo e uniformità spaziale;
- *rappresentatività* di quello che effettivamente è avvenuto nella realtà;

Il rispetto di queste caratteristiche non esula il sistema di acquisizione dei dati di *input* della rianalisi dall'effettuare un controllo di qualità dei dati per, eventualmente, identificare preventivamente la presenza di *bias* all'interno di alcuni *dataset*. Così facendo si potranno utilizzare per la rianalisi solamente osservazioni congruenti con lo stato reale dell'atmosfera.

2.7. Modello di simulazione atmosferico e il sistema di acquisizione dati

La seconda componente fondamentale delle rianalisi, dopo il dato di *input*, è il modello di previsione atmosferica o di simulazione. A questo modello però viene associato il sistema di assimilazione o acquisizione dei dati che ha il compito di introdurre nel modello i dati di *input* forniti dalle osservazioni. A questo si aggiunge il modello di simulazione che, basandosi sull'utilizzo delle leggi fisiche che governano i moti atmosferici, cerca di ottenere una coerenza fisica tra i diversi parametri climatici che vengono analizzati. I modelli più complicati e complessi sono in grado di utilizzare le informazioni puntuali provenienti dai dati di *input* e di propagare questa informazione, in accordo con le leggi fisiche del modello stesso, in tutti i punti prossimi a quest'ultimo e di metterli in relazione anche con lo sviluppo temporale.

Nel caso di dati di precipitazione va evidenziato che il modello non acquisisce direttamente il dato del parametro dai dati di *input*, ma lo elabora e lo sviluppa in modo derivato, attraverso quindi l'utilizzo di equazioni differenziali e di dinamiche atmosferiche proprie del modello di previsione utilizzato. La derivazione del dato di pioggia avviene attraverso l'utilizzo di altre variabili atmosferiche quali, per esempio, la temperatura, il vento, la pressione e l'umidità che messe all'interno delle equazioni determinano il valore di precipitazione. Questo tipo di approccio ha di contro il fatto che rende l'incertezza, nel caso di precipitazioni di tipo convettivo, abbastanza elevata, mentre l'errore è più contenuto nel caso di eventi stratiformi.

La forza di questo strumento sta nel fatto che, a partire sempre dai parametri meteorologici di base e dal modello, si è in grado di produrre stime anche molto accurate di variabili che non sono direttamente misurate dai sistemi di osservazione. Alcune di queste sono per esempio la copertura nuvolosa, la precipitazione, la radianza solare o la temperatura a diverse quote dell'atmosfera o al livello del mare.

Ovviamente in base al modello di simulazione utilizzato cambia il *dataset* di rianalisi che ne deriva. Ognuno di essi, infatti, è caratterizzato da una propria griglia, una propria risoluzione spaziale specifica, da equazioni e parametrizzazioni fisiche

specifiche e dalla scelta delle condizioni al contorno che vincolano le soluzioni delle equazioni differenziali del modello.

2.7.1. Sistema 4D-VAR

Uno dei più recenti sistemi che accoppia il processo di acquisizione dei dati e il modello di previsione e simulazione atmosferica è il sistema 4D-VAR. Il nome di questo sistema deriva dal fatto che sfrutta quattro dimensioni, tre dimensioni spaziali e una temporale, per completare e produrre il *set* di dati di rianalisi. La particolarità di questo sistema sta nel fatto che il dato non viene acquisito singolarmente ma secondo una finestra temporale continua che fa in modo che il risultato della rianalisi prodotto durante l'elaborazione effettuata dal modello previsionale venga corretto durante tutto il ciclo di rianalisi, così da minimizzare le differenze tra il risultato della stima del *dataset* di rianalisi e i valori del dato di *input*.

Uno schema rappresentativo del funzionamento di questo sistema è disponibile nella Figura 7.

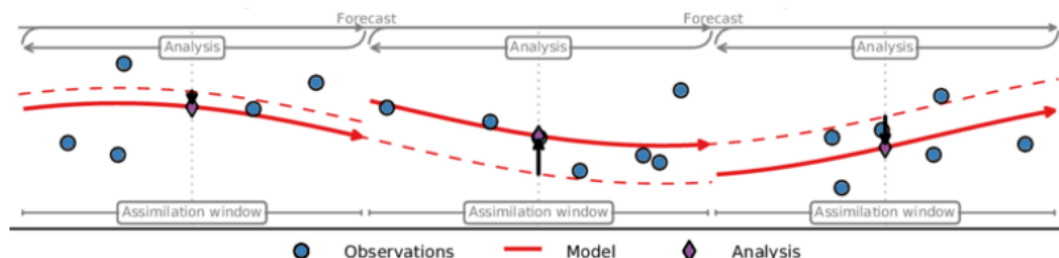


Figura 7- Schema di Acquisizione Incrementale 4D-VAR. Fonte: Massimo Crespi & Gianluca Ferrari, QUADERNO DI METEOROLOGIA APERTA n° 2 DELLA RIANALISI, O ANALISI RETROSPETTIVA, IN METEOROLOGIA

In Figura 7 si cerca di spiegare in modo figurativo il funzionamento del sistema 4D-VAR, dove le simulazioni del modello vengono continuamente aggiornate sulla base dei dati acquisiti dal sistema di acquisizione. La linea rossa tratteggiata rappresenta l'andamento che la simulazione avrebbe seguito nel caso non fosse stato acquisito il dato di *input* per una finestra temporale continua, ma solamente come singolo e unico *input* iniziale, mentre la linea rossa continua rappresenta l'evoluzione del parametro climatico a seguito della continua correzione da parte del dato di *input* acquisito dal sistema di acquisizione.

È importante per la buona riuscita della rianalisi che il rapporto tra il modello previsionale e il sistema di acquisizione del dato rimanga il più possibile costante durante tutta l'elaborazione del *dataset*. La mancata costanza d'interfaccia tra questi due aspetti può dar vita alla generazione di disomogeneità spazio-temporali che, nel caso di progetti specifici che richiedono *dataset* dedicati come per esempio lo studio del clima, possono dare problemi.

2.8. Post-processing

La procedura di *post-processing* è necessaria nel momento in cui il prodotto della rianalisi deve essere utilizzato per delle specifiche applicazioni. Utenti diversi, infatti, possono avere esigenze diverse che richiedono elaborazioni dedicate. Come già accennato precedentemente, i prodotti delle rianalisi al giorno d'oggi vengono utilizzati da una moltitudine di enti diversi come le assicurazioni nell'ambito dell'energia, agricoltura, ecc. A questo scopo ci sono diverse tecniche di *post-processing* che permettono di soddisfare requisiti e caratteristiche specifiche richieste dall'utilizzatore del prodotto di rianalisi. Le principali procedure di *post-processing* sono:

- il *downscaling*: consiste in una procedura che consente di aumentare la risoluzione spaziale o temporale di tutte o alcune delle variabili climatiche di interesse rispetto al *dataset* originario. Questa procedura può essere eseguita sia in modo modellistico, utilizzando modelli ad alta risoluzione, e sia nel caso di rianalisi specifiche su parti o porzioni più piccole di territorio rispetto al *dataset* originale. Spesso in questi casi vengono utilizzati i valori del *dataset* originario nei bordi del nuovo dominio del *dataset*, come condizioni al contorno;
- Una correzione dell'*output* eseguita su base statistica per una riduzione del *bias*. Queste tecniche operano in modi diversi tra cui, una delle più utilizzate, è quella del MOS;
- Correzioni statistiche eseguite in modo puntuale sulle variabili meteorologiche che vengono ottenute in modo derivato come per esempio le precipitazioni. Le precipitazioni, come descritto in precedenza, sono generate

dinamicamente a partire dalle variabili come temperatura, umidità e vento. La correzione di questo campo, con gli eventuali dati provenienti da pluviometri o altri strumenti, consente di rimuovere eventuali errori legati a questa errata rappresentazione;

L'utilizzo di queste tecniche può portare però ad una minore coerenza che i dati hanno tra di loro in senso fisico, poiché, correggendo il singolo valore o il parametro meteo-climatico, si ottiene una sorta di discostamento con le altre variabili elaborate durante la rianalisi e si perde la continuità ottenuta dopo l'applicazione delle equazioni differenziali del modello di previsione atmosferica. Le correzioni in *post-processing* permettono di fornire un *dataset* di rianalisi più coerente con la realtà e di conseguenza più utilizzabile ai fini operativi e/o professionali ma, di contro, questo aspetto ne può influenzare l'applicabilità nella ricerca scientifica (Crespi et al., 2017).

3. Basi di dati retrospettivi esistenti

Genericamente i *dataset* di rianalisi vengono suddivisi sulla base della dimensione del loro dominio spaziale. I *dataset* sono essenzialmente di due tipi:

- *dataset* di rianalisi globale interessano tutta la superficie terrestre;
- *dataset* regionali, che hanno un dominio geografico limitato a porzioni della superficie terrestre.

In base al tipo di applicazione si può decidere quale delle due tipologie di *dataset* utilizzare. Per studi a livello climatico, per esempio, si preferisce utilizzare *dataset* a livello globale e poi scendere nel dettaglio di un continente o di una porzione di esso. I *dataset* regionali invece sono maggiormente impiegati negli studi di settore nazionali o subnazionali che richiedono un dettaglio maggiore.

3.1. Dataset globali

I *dataset* globali sono elaborati e forniti dai principali enti meteorologici del pianeta, i quali hanno competenze e risorse tali da essere in grado di gestire e realizzare elaborazioni modellistiche molto complesse. I principali enti di produzione di rianalisi che vengono presi in considerazione sono:

- ECMWF – European Center Medium Weather Forecast dell'Unione Europea;
- NCEP/NCAR – NOAA National Centre for Environmental Prediction/ National Centre for Atmospheric Research, degli Stati Uniti;
- NOAA – National Oceanic Atmospheric Administration, Stati Uniti;

I prodotti di elaborazione globali forniscono dati distribuiti su una griglia spaziale molto ampia che li rende ottimali per l'analisi di fenomeni climatici a scala sinottica, che impattano e interessano grandi porzioni del globo. Inoltre, i *dataset* globali sono anche utilizzabili come base, o condizione al contorno, per i *dataset* a scala regionale.

L'impiego di questi *dataset* è molto utile per studiare ed analizzare fenomeni di grandi dimensioni quali per esempio gli uragani o i cicloni extra-tropicali. Eventi che sono in grado di provocare ingenti danni e molte vittime. Infatti, per questo motivo, una delle

applicazioni più recenti di questi *dataset* è quella nel campo assicurativo da eventi climatici.

A partire dagli ultimi anni dello scorso secolo ai giorni nostri sono diversi i *dataset* che sono stati realizzati e messi a disposizione degli utenti, tra i quali ricordiamo quelli riportati in Tabella 1.

DATASET	RISOLUZIONE	FREQUENZA	PERIODO	FONTE	SISTEMI DI ASSIMILAZIONE
CERA-20C	1,125°x 1,125°	3 ore	1901–2010	ECMWF	
NCEP1	2,5° × 2,5°	Mensile/Giornaliero/6 ore	1948-oggi	NCEP/NCAR	3D-Var
NCEP2	1.875° × 1.875°	Mensile/6 ore	1979-oggi	NCEP/DOE	3D-Var
ERA-20C	125 KM	3 ore	1900 al 2010	ECMWF/NCAR	4D-Var
ERA 40	2,5° × 2,5°/1,125° × 1,125°	Mensile/6 ore	1957–2002	ECMWF	3D-Var
ERA INTERIM	1,5° × 1,5°/ 0,75° × 0,75°	Mensile/6 ore	1979-oggi	ECMWF	4D-Var
20CRV2	2,0° × 2,0°	Mensile/giornaliero/6 ore	1871–2012	NOAA	Filtro dell'ensemble Kalman
JRA-55	60 km	Mensile/3 ore/6 ore	1958-oggi	Agenzia meteorologica giapponese	4D-Var
MERRA	0,5° × 0,67°	Quotidiano	1979-2016	Nasa	3D-Var
MERRA-2	0,5° × 0,67°	Mensile/Giornaliero/1ora	1980-presente	Nasa	3D-Var
PESC	38 km	6 ogni ora	1979–2010	NOAA	3D-Var
ERA5	0,25°x0,25°	3 ore	1950 ad oggi	ECMWF	4D-Var
20CRV3	1,0°x1,0°	3 ore	1837 al 2015	NOAA/NCAR/NERSC	4D-Var
ERA5-LAND	0,1°x0,1°	Orario	1950 ad oggi	ECMWF	4D-Var

Tabella 1-Tabella dei principali dataset di rianalisi globale (Sun et al.,2017)

3.2. Dataset regionali

Negli ultimi anni si sono sempre più affermati i *dataset* provenienti da rianalisi a scala regionale. Questa esigenza nasce dalla domanda crescente di avere dati meteo climatici utilizzabili per specifiche aree o per specifici progetti. Diversi progetti sono stati sviluppati per far fronte a queste esigenze nei campi più diversificati. Campi d'impiego come il settore energetico, la giustizia e quello assicurativo.

Il motivo principale per cui vengono utilizzati al posto dei *dataset* globali è che possiedono una risoluzione spaziale e temporale maggiore rispetto a questi ultimi. Inoltre, richiedono tendenzialmente una griglia decisamente più piccola che riduce di molto le risorse computazionali necessarie per svilupparli ed aumenta il numero di enti o aziende che possono realizzarli. L'essere più dettagliati permette di ricreare una serie storica anche per eventi di piccola entità come per esempio i temporali che, difficilmente, vengono individuati dai *dataset* a scala più grande.

Una delle condizioni necessarie per realizzare dei *set* di rianalisi regionali è quella di fornire al modello delle condizioni al contorno. Le condizioni al contorno richieste sono disponibili solo se il modello di previsione ha accesso ad informazioni riguardanti le condizioni atmosferiche alle zone limitrofe. Per questo motivo spesso i *dataset* di rianalisi regionale partono e utilizzano come condizioni al contorno di *input* i risultati dei modelli di rianalisi a più ampia scala o globali.

I principali dataset di rianalisi regionale sono riportati in Tabella 2.

DATASET	RISOLUZIONE	DATI CONDIZIONI AL CONTORNO	FREQUENZA	PERIODO	FORTE	SISTEMI DI ASSIMILAZIONE	DOMINIO SPAZIALE
UERRA	11 km	ERA40/ERA-Interim	Orario	1961 al 2019	ECMW F	3D-VAR	Europa, Nord Africa e Groenlandia
COSMO REA 6	6 km	ERA-Interim	Orario	1995 al 2019	DWD	COSMO	Europa
MERDIA	21 km/7 km	ERA5	3 ore	1990-2020	ECMW F	WRF-ARW	Italia

Tabella 2- Tabella dataset di rianalisi regionali (Crespi et al., 2017)

3.2.1. Principali vantaggi dell'utilizzo di dataset di rianalisi

L'utilizzo e l'impiego delle rianalisi ha portato a vantaggi in diversi settori, primo fra tutti ovviamente è quello meteorologico e previsionale dove il suo impiego è stato ed è fondamentale per la comprensione del clima a livello mondiale e soprattutto del *trend* che quest'ultimo sta seguendo negli ultimi anni. Conoscere i parametri quali la temperatura media, la piovosità e la distribuzione degli eventi estremi di oggi e del passato è un passo in avanti notevole.

Le principali caratteristiche per cui vengono così tanto utilizzati al giorno d'oggi sono:

- utilizza molte se non tutte le fonti di osservazioni disponibili per produrre i propri *dataset*;
- l'*output* generato possiede un elevato grado di coerenza con la realtà e con le misurazioni storiche;
- i dati sono congrui tra di loro poiché sottoposti a diverse correzioni statistiche e ad azioni di *cross validation*;
- i dati vengono forniti in griglie che sono uniformi sia in termini spaziali che temporali indipendentemente dalla distribuzione e uniformità spaziale e temporale del dato di *input*;
- la produzione del dato è eseguita attraverso l'utilizzo di modelli che simulano le dinamiche dell'atmosfera e non solo per mera interpolazione;
- si possono ottenere anche informazioni riguardanti le variabili derivate che non vengono direttamente misurate ma che sono ottenibili sempre attraverso la componente modellistica;
- infine, questi *dataset* sono facilmente fruibili dai diversi utenti e utilizzabili liberamente.

3.3. Descrizione dataset di ERA5

Il *dataset* di rianalisi di ERA5 è stato prodotto da ECMWF ed è solo l'ultimo di una lunga serie. Infatti, il primo *dataset* prodotto è stato il progetto FGGE del 1979 a cui sono seguiti i progetti ERA tra cui va ricordato ERA-15 nella metà degli anni 90, ERA-40 negli anni tra 2001 e 2003 ed il penultimo ERA-Interim dal 2006 al 2019. Ognuno di questi *dataset* di rianalisi prodotto ha migliorato ed incrementato una o più caratteristiche, migliorando il modello utilizzato, la risoluzione spaziale o temporale

utilizzata fino a ridurre il tempo di latenza necessario perché le rianalisi vengano prodotte e messe a disposizione dell'utenza.

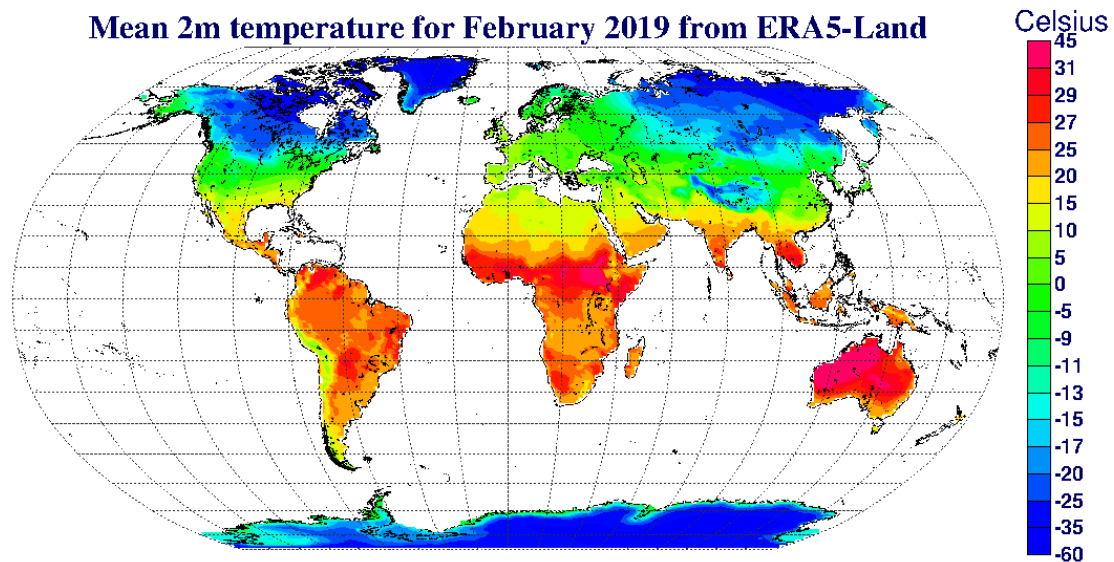


Figura 8- Rappresentazione dato di temperatura media a 2m del dataset di ERA5-LAND. Fonte: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>.

Una delle migliorie principali che è stata portata a ERA5 rispetto al precedente ERA-Interim è l'estensione della finestra temporale rianalizzata che va dai giorni nostri fino al gennaio del 1950. Insieme all'aumento della finestra temporale di rianalisi i dati ERA5 forniscono inoltre un numero maggiore di parametri climatici in uscita rispetto ai *dataset* precedenti, oltre che una maggiore risoluzione spaziale del prodotto sia in termini orizzontali che verticali.

Inoltre, va sottolineato il fatto che il prodotto di rianalisi di ERA5 è reso disponibile al pubblico solamente 5 giorni dopo, riducendo così di molto i tempi di latenza richiesti dal precedente *dataset*. Ovviamente il dato disponibile dopo cinque giorni è un dato di tipo preliminare che verrà successivamente validato con un controllo approfondito entro i due mesi successivi. Il vantaggio di disporre di un dato preliminare è che difficilmente e raramente questo differisce da quello validato, il che rende questo *dataset* realmente fruibile in tempi brevi.

Entrando nella parte più tecnica alcune delle migliorie che sono state apportate riguardano lo schema delle nubi e delle precipitazioni su larga scala che è stato

aggiornato per migliorare la rappresentazione delle nubi in fase mista e delle precipitazioni piovose e nevoso (Forbes e Ahlgrimm, 2014).

Inoltre sono state introdotte modifiche sulla parametrizzazione della convezione che vengono utilizzati per la previsione e simulazione su grande scala e la conseguente ridistribuzione delle precipitazioni rispetto al precedente (Bechtold et al., 2014). Miglioramenti sono stati apportati anche ad altri parametri come la miscelazione turbolenta, l'interazione con la superficie e sulla resistenza orografica (Sandu et al., 2014), sul calcolo del gradiente di pressione e la sua variazione nello spazio e tempo (ECMWF R & D, 2016).

Anche per quanto riguarda la componente a terra sono stati introdotti notevoli miglioramenti: tra i più significativi viene riportata l'introduzione della mappa della tessitura del suolo (Balsamo et al., 2009) e la migliore rappresentazione dell'evaporazione nell'acqua nei suoli nudi (Albergel et al., 2012). Sono stati introdotti anche parametrizzazioni che consentono di considerare le condizioni del manto nevoso e le variazioni di deflusso e di stoccaggio legate sia a quest'ultimo che ai corpi idrici superficiali come i laghi (Dutra et al., 2009).

Inoltre, in questi *dataset* sono riportati informazioni riguardanti la componente oceanica dell'atmosfera; infatti, è stato introdotto un nuovo schema di adduzione delle onde che consente di spiegare meglio come le onde si propagano lungo le coste e di modellare inoltre l'impatto di queste sulla terraferma. Per quanto riguarda le onde anomale che si possono verificare negli oceani a seguito di calamità sono stati aggiunti dei parametri che permettono di caratterizzare l'*output* previsto per questo evento anomalo. (Janssen e Bidlot, 2009).

Anche nel confronto delle diagnosi e nella modellizzazione dei diversi tipi di errore è stata notevolmente migliorata se messa a confronto con i precedenti *dataset*.

In sostanza, come affermato in precedenza, vi sono molte migliorie che sono state apportate nello sviluppo di ERA5 tra cui, una delle principali, è la risoluzione temporale e spaziale molto elevata. Infatti, al giorno d'oggi la risoluzione più bassa è appunto quella del *dataset* di ERA5 con dati che vengono forniti a intervalli orari,

mentre la risoluzione orizzontale ha raggiunto un ottimo livello arrivando a descrivere celle di 31 per 31 km disposte su 137 livelli atmosferici verticali fino al raggiungimento di 0,01 hPa. Dopo il rilascio del *dataset* di ERA5 diversi studi hanno valutato le prestazioni di questi dati. In particolare vanno citati gli studi condotti da Graham et al., (2019) e Tetzner et al., (2019) che hanno riscontrato un'ottima qualità del dato in termini di utilizzo per valutare il bilancio energetico atmosferico. Anche la rappresentazione delle piogge negli USA è stata confrontata con altri dati di rianalisi (Xu et al., 2019) riportando gli stessi risultati degli studi precedenti, così come le caratteristiche del vento a bassa quota (Belmonte Rivas e Stoffelen, 2019).

3.3.1. Problemi ERA5

Nonostante, comunque, ERA5 sia stato un miglioramento in quasi tutti i campi rispetto ERA-Interim vi sono però ancora dei problemi legati ad alcuni aspetti che non sono stati migliorati; uno di questi, infatti, è la polarizzazione del freddo nella stratosfera inferiore e quella del caldo in prossimità della stratopausa.

Un altro tema molto importante, che in questa tesi ricopre un ruolo fondamentale, è quello delle precipitazioni. Infatti, ERA5 produce occasionalmente quantità di precipitazioni che risultano irrealisticamente elevate. Questi eventi particolarmente intensi sono diventati evidenti a partire da novembre 2013, momento nel quale sono state introdotte delle modifiche allo schema di convezione al fine di migliorare l'acquisizione dei dati durante il ciclo di convezione diurna e convezione profonda. In particolari condizioni come, ad esempio, con la presenza di aria umida o con la presenza di eventi convergenti di bassa intensità si può osservare la comparsa di questi fenomeni straordinari non veritieri (Malardel e Ricard, 2015). Va comunque ricordato che questo problema non inficiava più di tanto sulla qualità delle rappresentazioni poiché interessava pochi eventi all'anno, circa dieci per anno solare, che successivamente è stato corretto grazie all'introduzione della griglia Gaussiana Ottaedrica ridotta.

Anche per le precipitazioni nevose esiste lo stesso problema, infatti nelle regioni montuose al di sopra di 1500 metri può capitare che l'altezza di neve sia alle volte irrealisticamente grande, poiché non vi è una compensazione adeguata dettata dalle

equazioni che descrivono la fusione di quest'ultima. Così come la presenza eventuale di ghiaccio marino presente anche nei mesi estivi quando in realtà ciò non accade.

3.3.2. Prodotti correlati ERA5

Contemporaneamente alla messa a disposizione del *dataset* di rianalisi di ERA5 è stato reso disponibile anche un prodotto ridotto, ovvero ERA5-Land i cui dati sono stati utilizzati per le analisi svolte in questa tesi.

La caratteristica principale di ERA5-Land è una risoluzione orizzontale ridotta fino a 9 per 9 km che è stata possibile grazie ad una simulazione guidata dai campi atmosferici prossimi alla superficie di ERA5, avvenuta grazie alla regolazione orografica sia della temperatura che della termodinamica.

3.4. Descrizione dataset ERA5-Land

ERA5-Land è un set di dati di rianalisi che fornisce una visione coerente dell'evoluzione delle variabili del terreno nel corso di diversi decenni con una risoluzione migliorata rispetto a ERA5. ERA5-Land è stato realizzato riproducendo la componente terrestre della rianalisi climatica ECMWF di ERA5.

ERA5-Land utilizza come *input* per simulare le variabili atmosferiche dei campi terrestri i dati stimati di ERA5, come la temperatura e l'umidità dell'aria. Questa è chiamata forzatura atmosferica. Senza il vincolo della forzatura atmosferica, le stime basate sul modello possono deviare rapidamente dalla realtà. Pertanto, sebbene le osservazioni non siano utilizzate direttamente nella produzione di ERA5-Land, hanno un'influenza indiretta attraverso la forzatura atmosferica utilizzata per eseguire la simulazione. Inoltre, la temperatura dell'aria in ingresso, l'umidità dell'aria e la pressione atmosferica utilizzate per eseguire ERA5-Land vengono corrette per tenere conto della differenza di altitudine tra la griglia della forzatura e la griglia a risoluzione più elevata di ERA5-Land. Questa correzione è chiamata "correzione della velocità di decadimento".

Il set di dati ERA5-Land, come qualsiasi altra simulazione, fornisce stime con un certo grado di incertezza. I modelli numerici possono solo fornire una rappresentazione più o meno accurata dei reali processi fisici che governano le diverse componenti del

sistema Terra. In generale, l'incertezza delle stime dei modelli cresce andando indietro nel tempo, perché il numero di osservazioni disponibili per creare una forzatura atmosferica di buona qualità è inferiore.

Le risoluzioni temporali e spaziali di ERA5-Land rendono questo set di dati molto utile per tutti i tipi di applicazioni sulla superficie terrestre tra cui, principalmente, lo studio del clima delle terre emerse. La risoluzione temporale e spaziale di questo set di dati e il periodo coperto nel tempo consentono a scienziati, aziende e centri di ricerca di accedere e utilizzare informazioni più accurate sullo stato del territorio e sulla sua evoluzione.

DESCRIZIONE DEI DATI

Tipo di dati	grigliato
Proiezione	Griglia latitudine-longitudine regolare
Copertura orizzontale	Globale
Risoluzione orizzontale	0,1° x 0,1°; La risoluzione nativa è di 9 km.
Copertura verticale	Da 2 m sopra il livello della superficie, a una profondità del suolo di 289 cm.
Risoluzione verticale	4 livelli del modello di superficie ECMWF: Layer 1: 0 -7cm, Layer 2: 7 -28cm, Layer 3: 28-100cm, Layer 4: 100-289cm Alcuni parametri sono definiti a 2 m sopra la superficie.
Copertura temporale	gennaio 1950 ad oggi
Risoluzione temporale	Ogni ora
Formato del file	GRIB
Frequenza di aggiornamento	Mensile con un ritardo di circa tre mesi rispetto alla data effettiva.

Tabella 3-Tabella caratteristiche dato di total precipitation di ERA5-Land. Fonte:
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>

4. ERA5 e ERA5-Land: validazione e comparazioni

4.1. Studio comparativo tra diversi dataset di precipitazione in Cina (Xu et al., 2021)

Diversi studi hanno già utilizzato i dati di rianalisi per scopi diversi. La maggior parte degli studi si concentra genericamente sull'analisi delle precipitazioni, per il confronto di serie storiche o per verificare l'effettiva applicabilità dei dati di rianalisi. Questi *dataset*, infatti, si prestano molto a questi tipi di analisi data la grande quantità di parametri climatici che sono presenti all'interno, oltre all'altezza di pioggia.

In Xu et al. (2021), viene preso in esame il territorio nazionale della Cina continentale, che è costituita da circa 9 milioni di km² e da un'estensione topografica che va 73° al 135° di longitudine Est e dal 18° al 53° di latitudine Nord. Oltre all'ampia estensione areale il territorio cinese è caratterizzato anche da una elevata variabilità topografica che, come evidenziano gli autori, porta significative diversità di condizioni climatiche. Per semplicità la Cina è stata suddivisa in quattro regioni caratterizzate da un clima differente:

- clima temperato continentale (TC);
- clima montano (PM);
- clima monsonico tropicale (ST);
- clima monsonico temperato (TM).

Per lo studio sono stati utilizzati quattro *dataset* di dati di pioggia diversi:

- *IMERG-Final*: Uno dei prodotti di precipitazione migliori rilasciato dalla NASA. *dataset* che sfrutta l'algoritmo IMERG in combinazione con le osservazioni acquisite nello spettro dell'infrarosso (IR) e delle microonde (PMW) dei satelliti della costellazione GPM. Questo set di dati riporta le variabili climatiche secondo celle di dimensioni 0.1° x 0.1° a intervalli sub-orari;
- *GSMaP-Gauge*: è un *dataset* climatico sviluppato in Giappone dalla JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) che combina le osservazioni prodotte dai radar di precipitazione a doppia frequenza (DPR) presenti a bordo

dell'osservatorio GPM con le osservazioni dai radiometri passivi che sfruttano sia le microonde che gli infrarossi dei satelliti della stessa costellazione;

- *ERA5*: il *dataset* di rianalisi di ECMWF che fornisce dati rispetto a un gran numero di parametri atmosferici sia superficiali che marini. In questo caso però il parametro di precipitazione utilizzato da ERA5 comprende, oltre alle precipitazioni piovose, anche quelle di pioggia e neve. Da notare che per questo studio i dati di ERA5 sono stati campionati riducendo la dimensione della cella da $0,25^\circ$ a $0,1^\circ$;
- *ERA5-Land*: come già detto in precedenza è il *dataset* che deriva dal *dataset* di ERA5 caratterizzato però da una riduzione delle dimensioni della cella ($0,1^\circ$). Inoltre, sempre secondo l'autore, potrebbe essere il primo set di dati a descrivere in modo ottimale i bilanci energetici e i flussi d'acqua con questa risoluzione spaziale;
- Osservazioni orarie derivanti da *pluviometri*: sono state inoltre raccolte le informazioni provenienti da pluviometri sparsi per tutto il territorio cinese che sono state utilizzate per la valutazione dei diversi *dataset*. Va sottolineato che la distribuzione spaziale della rete di pluviometri non è omogenea su tutto il territorio cinese. I dati degli strumenti sono stati utilizzati per tre diversi tipi di controlli quali il controllo qualità, il controllo valori estremi e quello di verifica della coerenza spaziale.

4.1.1. Metodo di analisi

Il metodo di analisi utilizzato in Xu et al. (2021) sfrutta diversi strumenti statistici per poter valutare in modo quantitativo quale sia effettivamente il miglior *dataset* che più si avvicina ai dati reali registrati dai pluviometri.

I parametri utilizzati in questo studio per la verifica sono per esempio il coefficiente di correlazione (CC), il bias, lo scarto quadratico medio (RMSE), il False Alarm Ratio (FAR), Probability of Detection (POD), il Critical Success Index (CSI), l'Event Duration (ED), l'Heidke Skill Score (HSS), il Mean Event Precipitation Rate (MEPR) e il Multi-Source Fusion Index (MFI).

Il CC viene utilizzato per descrivere la correlazione tra il dato di rianalisi e quello proveniente dalle stazioni pluviometriche in sito. Gli indici bias e RMSE sono comunemente utilizzati per descrivere la deviazione standard che vi è tra i dati stimati e quelli provenienti dall'osservazione *in situ*. Mentre i parametri statistici come POD, FAR, CSI e HSS vengono utilizzati per quantificare la capacità del *dataset* di “catturare” correttamente l'evento meteorologico precipitativo. Il parametro ED è utilizzato per riportare la durata media dell'evento, mentre MEPR rappresenta l'indice di piovosità medio di uno specifico evento valutato su scala oraria. Il MFI, infine, è un indice sommario che integra al suo interno diversi altri parametri statistici citati precedentemente.

Tutti i parametri statistici indicati in precedenza vengono utilizzati al fine di verificare la corrispondenza tra un evento stimato dai *dataset* di rianalisi o satellitari e quello realmente accaduto registrato dai pluviometri. Le soglie utilizzate, per discernere tra un evento piovoso e non, sono state rispettivamente di 0,1 mm per la scala oraria mentre di 1 mm per la scala giornaliera.

4.1.2. Risultati

In questo studio sono state prese in considerazione le precipitazioni avvenute tra il 2016 e il 2019, confrontando *set* di dati continui delle rianalisi e dei *dataset* satellitari con interpolazioni spaziali dei dati pluviometrici, realizzate mediante l'utilizzo del metodo di interpolazione IDW (Inverse Distance Interpolation), per creare una continuità spaziale nei dati derivanti da osservazioni *in situ*.

L'autore evidenzia anche che vi sono delle differenze sostanziali tra i risultati derivati da satellite e quelli modellati sulla base del luogo dove è avvenuto l'evento, in riferimento alle quattro regioni citate precedentemente. L'analisi, infatti, è stata eseguita considerando le differenze di stima di ogni *dataset* satellitare e modellistico rispetto alle osservazioni *in situ* per ognuna delle quattro regioni climatiche identificate. Inoltre, è stato considerato il clima caratteristico della zona suddividendo gli eventi piovosi anche in base alla stagione in cui sono avvenuti.

Nell'articolo viene evidenziato che i *dataset* basati su modelli generalmente hanno delle prestazioni peggiori rispetto a quelli basati sui prodotti satellitari. Inoltre, in accordo con il parametro CC, le rianalisi di ERA5 e ERA5-Land mostrano risultati peggiori nelle stagioni umide (come appunto la stagione estiva caratterizzata dalla presenza dei monsoni) mentre migliorano in quelle secche, ovvero in inverno. Al contrario invece IMERG-Final e GDMaP-Gauge mostrano una tendenza peggiore nell'identificare precipitazioni durante la stagione secca che invece migliora durante la stagione umida. Per quanto riguarda la suddivisione nelle quattro regioni climatiche indicate precedentemente, sono state riscontrati scostamenti dai dati pluviometrici molto piccoli nelle regioni TC e TM, mentre sensibilmente più alti per le regioni PM e ST.

4.1.3. Conclusioni

In conclusione, gli autori riportano che tutti i *dataset*, sia quelli basati su modellazione, ovvero ERA5 e ERA5-Land, che quelli satellitari, mostrano una simile distribuzione spaziale annuale delle piogge con un generale miglioramento e una maggiore precisione nelle zone Nord-Ovest della Cina. Inoltre, considerando l'intero studio, i prodotti satellitari hanno generalmente delle prestazioni migliori rispetto ai *dataset* modellistici, ad eccezione fatta per alcune tipologie climatiche (infatti nei mesi invernali sono migliori i *dataset* modellistici) o per determinate regioni.

Tra tutti i modelli analizzati però IMERG-Final è quello che riporta le performance migliori per le analisi mensili, mentre il *dataset* GSMaP-Gauge per le analisi giornaliere. I dataset ERA5 e ERA5-Land riportano risultati simili, ma ERA5-Land risulta essere migliore se si fa riferimento ai parametri statistici utilizzati per effettuare l'analisi, il che può essere attribuito principalmente al processo di *downscaling* effettuato per realizzare il *dataset* dello stesso. Viene evidenziata, inoltre, anche una differenza di precisione nell'individuazione degli eventi piovosi sulla base della zona meteo-climatica considerata. Infatti, si hanno prestazioni più elevate per i prodotti satellitari nella regione ST, mentre i *dataset* modellistici sono migliori nelle regioni TM e TC anche se, evidenziano gli autori, le incertezze dei dati dei *dataset* modellistici aumentano nelle ore pomeridiane.

In termini di stima della durata dell'evento ED, il *dataset* IMERG-Final mostra risultati migliori, GSMaP-Gauge sovrastima significativamente la durata dell'evento e per *contro ERA5 e ERA5-Land* lo sottostimano sensibilmente.

4.2. Studio comparazione dati di rianalisi in India (Singh et al, 2021)

Singh et al. (2021) si è concentrato sull'analisi delle precipitazioni che caratterizzano il clima monsonico indiano. In tale lavoro, sono stati utilizzati, coerentemente con Xu et al. (2021), tre *dataset* differenti di rianalisi ad alta risoluzione come il *dataset* di rianalisi regionale IMDAA (Indian Monsoon Data Assimilation and Analysis), le rianalisi globali ad alta risoluzione NGFS e ERA5.

Lo studio in questione è stato svolto al fine di analizzare in modo più approfondito il clima monsonico che caratterizza l'area, di studiare la distribuzione delle piogge e di fornire un quadro sul *trend* futuro e sulla possibile migliore gestione di questi eventi climatici. Risulta importante, a tale scopo, quantificare l'intensità delle precipitazioni nel modo più completo possibile mettendo a confronto i *dataset* di rianalisi a risoluzione elevata con interpolazioni IDW dei dati pluviometrici.

In queste zone il monsone estivo contribuisce alla maggior parte delle precipitazioni annuali; infatti, esso rappresenta circa 80% della precipitazione annuale media che si verifica nella regione indiana. Il periodo preso in considerazione durante lo studio va dal 1999 al 2018.

4.2.1. Metodo di studio

Il *set* di dati utilizzato per il confronto tra i dati di rianalisi e quelli realmente accaduti è costituito, anche in questo caso, dall'interpolazione delle osservazioni pluviometriche *in situ*. Questo *dataset* è disponibile con una risoluzione di $0.25^\circ \times 0,25^\circ$ e copre la maggior parte della superficie nazionale indiana. Anche per questo studio, per poter confrontare i dati reali con quelli di rianalisi, è stata eseguita una interpolazione ponderata a distanza inversa (IDW) dei dati pluviometrici che genera una superficie di interpolazione continua. Essa tiene conto e considera, dandogli un peso maggiore, la distanza del punto da interpolare con il dato osservazionale. In questo

modo si ottengono delle superfici continue sulle quali è possibile effettuare il confronto. I *dataset* di rianalisi utilizzati sono i seguenti:

- Il *dataset* di rianalisi è IMDAA, *set* di rianalisi atmosferico regionale, che è il primo nel suo genere poiché effettua una rianalisi sul territorio asiatico ad alta risoluzione ($0,12^\circ \times 0,12^\circ$). Questo *dataset* è stato creato utilizzando una finestra di assimilazione di sei ore con un sistema 4D-Var del modello previsionale che usa come condizioni al contorno i dati del *dataset* di rianalisi globali ERA-Interim;
- NGFS: è un sistema di rianalisi atmosferiche ad alta risoluzione prodotta da NCMRWF, che riporta una risoluzione orizzontale di circa 22 km distribuita su 64 livelli verticali;
- L'ultimo *dataset* considerato è quello di ERA5, *dataset* che è stato ampiamente trattato precedentemente, prodotto da ECMWF, con una risoluzione orizzontale di $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ su tutti i diversi livelli verticali ed è disponibile dal 1950 ad oggi;

Anche in questo caso il metodo di studio seguito ha voluto differenziare le diverse stagioni che caratterizzano il clima indiano. Suddividendolo in quattro stagioni:

- pre-monsonico (marzo-giugno);
- monsonico (giugno-settembre);
- post-monsonico (ottobre-novembre)
- inverno (dicembre-febbraio)

Per effettuare la comparazione sono stati utilizzati dei parametri statistici come la spatial standard deviation (s), scaled percentage bias, root mean square error (RMSE) e pearson correlation coefficient (R).

4.2.2. Risultati

Come evidenziano gli autori, i tre *set* di rianalisi in comparazione con i dati osservazionali tendono a sovrastimare la quantità di pioggia precipitata in alcune zone, come nella zona meridionale e in quella orientale. Mentre vengono stimate abbastanza realisticamente le precipitazioni nelle altre regioni. Andando nel dettaglio

e analizzando i set di rianalisi su base stagionale, gli autori riportano come il *dataset* di IMDAA e ERA5 tendano a generare una leggera sovrastima del dato di pioggia, ma in modo più marcato di NGFS.

Durante la stagione pre-monsoonica, invece, tutti i *dataset* di rianalisi tendono a sovrastimare modelli di precipitazione. In sintesi, la distribuzione spaziale delle precipitazioni indica che le rianalisi di IMDAA, le NGFS e ERA5 riescono a modellare sufficientemente bene il clima indiano e in modo congruente con quanto riportano i dati osservati dai pluviometri. In particolare, però la rianalisi di ERA5 tende a sovrastimare leggermente la quantità di pioggia precipitata rispetto a NGFS nelle regioni prossime all'Himalaya e nelle regioni collinari.

Inoltre, gli autori riportano che la distribuzione spaziale del bias indica che le rianalisi IMDAA hanno la tendenza a sovrastimare leggermente la piovosità in tutta la regione indiana in inverno e nella stagione pre-monsoonica. ERA5, inoltre, tende a comportarsi in modo simile a IMDAA in tutte le stagioni tranne in quella pre-monsoonica. NGFS, invece, mostra un andamento più altalenante dei dati statistici utilizzati per quantificare la congruenza con i dati osservazionali. Un particolare importante è quello che riporta la correlazione spaziale delle rianalisi ERA5 rispetto ai dati osservazionali che risulta molto elevata e più alta rispetto agli altri due *dataset* su scala annuale in tutte le stagioni. Questa correlazione si manifesta anche nella suddivisione a scala stagionale dove ERA5 prevale sugli altri due *dataset* in tutte le stagioni tranne che per l'inverno, dove invece prevale NGFS.

Gli autori inoltre evidenziano che i dati di ERA5 tendono ad avere dei problemi nella probabilità di distribuzione dell'intensità della pioggia e problemi a riportare eventi piovosi oltre i 550 mm al giorno.

Infine, lo studio riporta un'analisi degli eventi estremi di precipitazione registrati, basati sul superamento del 95° percentile delle intensità di pioggia di tutti e tre i set di dati. Il *dataset* di IMDAA riporta una sovrastima dell'estremo del 95° percentile così come NGFS, mentre ERA5 lo sottostima. In ultimo però va evidenziato che tutti e tre i *dataset* hanno riscontrato problemi nel registrare precipitazioni molto intense

verificarsi nella regione settentrionale. In conclusione ERA5 tende a sottostimare le precipitazioni estreme rispetto agli altri due *dataset* anche se è quello che meglio le rappresenta spazialmente.

5. Metodo di analisi e caso studio

L'obiettivo di questa tesi è la ricerca di una soglia pluviometrica per l'identificazione di eventi di pioggia estremi attraverso l'utilizzo dei dati di analisi retrospettiva di ERA5-Land. Gli strumenti di analisi retrospettiva, o rianalisi, come già ampiamente discusso, sono strumenti che permettono di analizzare il clima mondiale e i suoi parametri per finestre temporali anche di diversi decenni. Gli studi già effettuati al riguardo hanno evidenziato la possibilità reale di poter utilizzare i *dataset* di rianalisi per diversi scopi ed obiettivi. Gli stessi studi hanno anche evidenziato, però, la difficoltà nel simulare nel modo corretto alcuni eventi piovosi particolari che si verificano in certe zone climatiche o che sono caratterizzati da intensità molto elevate e durate molto brevi come, ad esempio, le celle convettive.

Considerando questi aspetti, è sorto spontaneo cercare di capire quanto questi *dataset* siano realmente utilizzabili per lo studio e l'analisi degli eventi piovosi estremi e se, su questa base, sia possibile definire delle soglie di piovosità da poter essere utilizzate per cercare di identificare preventivamente i futuri eventi estremi di pioggia.

L'ulteriore verifica che si è cercato di apportare in questo lavoro rispetto a quello precedentemente svolto da Mazzoglio et al. (2022) è quello di incrementare il livello di dettaglio dell'analisi, passando da uno studio che considera gli eventi piovosi a scala nazionale ad uno che prende in considerazione il livello regionale e provinciale del solo territorio italiano. Il confronto tra i due livelli sarà inoltre considerato per verificare quale delle due suddivisioni sia effettivamente la migliore per il territorio italiano.

5.1. Metodo di studio

Il lavoro svolto e i risultati ottenuti verranno descritti nei paragrafi successivi in dettaglio, partendo dall'acquisizione del dato di ERA5-Land, passando per la creazione del *database* di eventi accaduti nella realtà fino al confronto tra gli eventi ERA5 e quelli reali, per poi analizzare i risultati ottenuti.

5.2. Acquisizione dei dati ERA5-Land

I dati utilizzati del *dataset* di rianalisi di ERA5-Land, le cui caratteristiche sono state già ampiamente discusse nel capitolo 2, sono disponibili e liberamente utilizzabili al sito <https://cds.climate.copernicus.eu>.

Il dato di rianalisi viene fornito su diversi intervalli temporali; infatti, si possono scaricare dati a cadenza mensile, giornaliera o, come quelli utilizzati in questo lavoro, oraria.

All'interno del sito è possibile decidere e personalizzare i dati che si vogliono scaricare, scegliendo in modo preliminare il periodo o la finestra temporale che si intende utilizzare ed il dominio spaziale di cui si vuole acquisire il dato. Si può scegliere di scaricare i dati per l'intera superficie terrestre o solo una porzione di quest'ultima, inoltre si può decidere anche quale parametro o quali parametri meteo-climatici si intende scaricare. ERA5-Land offre uno ampio ventaglio di parametri meteo climatici utilizzabili suddivisi in macrocategorie in base alla tipologia. Le principali categorie sono:

- *temperature*: contiene dati rispetto alla temperatura misurata a diversi livelli;
- *lake*: sono riportati tutti i parametri riguardanti i laghi come la temperatura dell'acqua e la quantità di ghiaccio presente;
- *snow*: tutti i parametri che hanno a che vedere con la presenza di neve, come la superficie coperta, la densità, l'altezza di neve, albedo, la precipitazione e la sua fusione;
- *soil water*: tutte le variabili che considerano la presenza di acqua nei suoli;
- *radiation and heat*: la radiazione solare e l'albedo delle superfici;
- *evaporation and runoff*: considera l'evaporazione che si verifica ai diversi livelli come quella del suolo, sulla superficie delle acque e della vegetazione;
- *wind, pressure and total precipitation*: parametri come la velocità del vento, la pressione atmosferica a contatto con la superficie e la precipitazione totale;
- *vegetation*: indici di copertura fogliare della vegetazione alta e bassa;

Per questo studio si è scelto di utilizzare i dati di pioggia per il periodo di tempo che va dal 2010 al 2020 che nel *dataset* di ERA5-Land sono indicati sotto il nome “*total precipitation*”. Le precipitazioni riportate all'interno di questo parametro considerano il liquido accumulato sulla superficie che comprende pioggia, neve e ghiaccio. La *total precipitation* è quindi la somma delle precipitazioni su larga scala (quelle precipitazioni generate da eventi meteorologici come depressioni e fronti freddi) e delle precipitazioni convettive (generate dalla convezione che si verifica quando l'aria a livelli inferiori nell'atmosfera è più calda e meno densa dell'aria dei livelli più alti). La *total precipitation* non include la nebbia, la rugiada o la parte delle precipitazioni che evapora nell'atmosfera prima che atterri sulla superficie terrestre. L'unità di misura con cui viene espressa la precipitazione totale nel *dataset* di ERA5-Land è il metro.

Tutti i parametri climatici di ERA5-Land sono forniti su un intervallo temporale di un'ora, infatti, è possibile scaricare anche solo il dato riferito a un'ora precisa. In generale è possibile selezionare e personalizzare il periodo di tempo per il quale si intende scaricare il dato, scegliendo, per esempio, di scaricare interi anni, mesi, giorni o ore consecutive oppure selezionare solo alcuni giorni o ancora più in particolare e specifico solo alcune ore all'interno della giornata. Inoltre, i dati possono essere scaricati in due formati differenti:

- *GRIB (Gridded Binary Format)*: è un'estensione del file creata dal *World Meteorological Organization (WMO)* utilizzato in meteorologia per immagazzinare e gestire una serie storica di dati meteo-climatici in formato binario a griglia;
- *NetCDF(experimental)*.

Il formato utilizzato per questo lavoro è il *NetCDF*.

5.3. Definizione delle matrici di soglia pluviometrica

Dopo avere scaricato i dati riguardanti le piogge verificatesi tra gli anni 2000 e 2020 dal sito di ERA5-Land lo studio si è concentrato sull'individuazione delle matrici di soglia pluviometrica da applicare ai dati del *dataset* per identificare gli eventi estremi. Le analisi sono state svolte considerando gli eventi a scala giornaliera e quindi le

cumulate di pioggia cadute all'interno dell'arco di tempo che va dalle 00:00 fino alle 23:59 dello stesso giorno.

Una particolarità che deve essere evidenziata è che il dato di pioggia che viene fornito nel *dataset* è descritto sì a intervalli orari ma, il valore riportato ad ogni ora nel *dataset*; non è la pioggia caduta nell'intervallo orario dei 60 minuti precedenti considerati, ma bensì la cumulata di pioggia calcolata a partire dalle 00:00 dello stesso giorno. Questo significa che se si decide per esempio di scaricare e visualizzare il dato di pioggia delle 15:00 di un qualsiasi giorno, il valore di pioggia indicato farà riferimento alla pioggia stimata caduta al suolo dalle ore 00:00 fino alle ore 15:00 dello stesso giorno. Per conoscere il valore della stima di pioggia che effettivamente è caduta nell'arco di un'ora, sempre per esempio dalle 14:00 alle 15:00, sarà quindi necessario effettuare una differenza tra le due cumulate corrispondenti alle ore 14:00 e alle 15:00.

In sintesi, questo significa che il dato orario che fa riferimento alle ore 00:00 di quel giorno contiene al suo interno la cumulata di precipitazione totale che è avvenuta il giorno prima.

La ricerca e l'individuazione degli eventi estremi di pioggia giornalieri nel *dataset* di ERA5-Land deve essere soggetta ad una discriminante che discerne tra un evento piovoso normale ed uno che potrebbe causare un'alluvione. Come ipotesi fondamentale utilizzata alla base di questo lavoro vi è la scelta di utilizzare come soglia di piovosità una certa percentuale di pioggia media annua caduta sul territorio italiano. Prima di calcolare queste soglie, al fine di avere dei valori che fossero il più possibile coerenti con il *dataset* di ERA5-Land, è stata calcolata la piovosità media annua (PMA).

5.3.1. Calcolo della PMA

Per ottenere un valore di pioggia media annua (PMA) che fosse il più coerente possibile con i dati di rianalisi, si è deciso di calcolare detto valore direttamente dai dati di pioggia riportati nel *dataset* ERA5-Land. La pioggia media annua è stata

calcolata sull'arco di tempo dei vent'anni scaricati, considerando quindi gli anni tra il 2000 e il 2020.

È importante sottolineare che la soglia pluviometrica che si è pensato di realizzare per questo lavoro, non è una soglia che tenesse in considerazione un unico valore numerico uguale per tutta l'Italia, ma bensì che considerasse una certa percentuale del valore di pioggia media annua, calcolata sempre sui dati di ERA5-Land, nel punto preso in esame. In altre parole, questo significa che ogni cella, di dimensione 9 per 9 km del *dataset* di ERA5-Land, riporterà un'altezza di pioggia diversa ma, il cui valore quantitativo, deriva dalla stessa percentuale di PMA che si è deciso di utilizzare come soglia di pioggia.

Il vantaggio di avere una soglia pluviometrica che non è uguale quantitativamente su tutto il territorio sta nel fatto che ci si adatta alle caratteristiche climatiche della regione o subregione considerata. Dai dati emerge che le soglie più elevate in termini numerici si osservano nelle zone alpine del Nord d'Italia, dove il clima è tale da interessare queste zone con maggiori piogge, mentre più basse al sud o nelle isole, dove la quantità di pioggia che cade nell'arco di tempo di un anno, è decisamente minore.

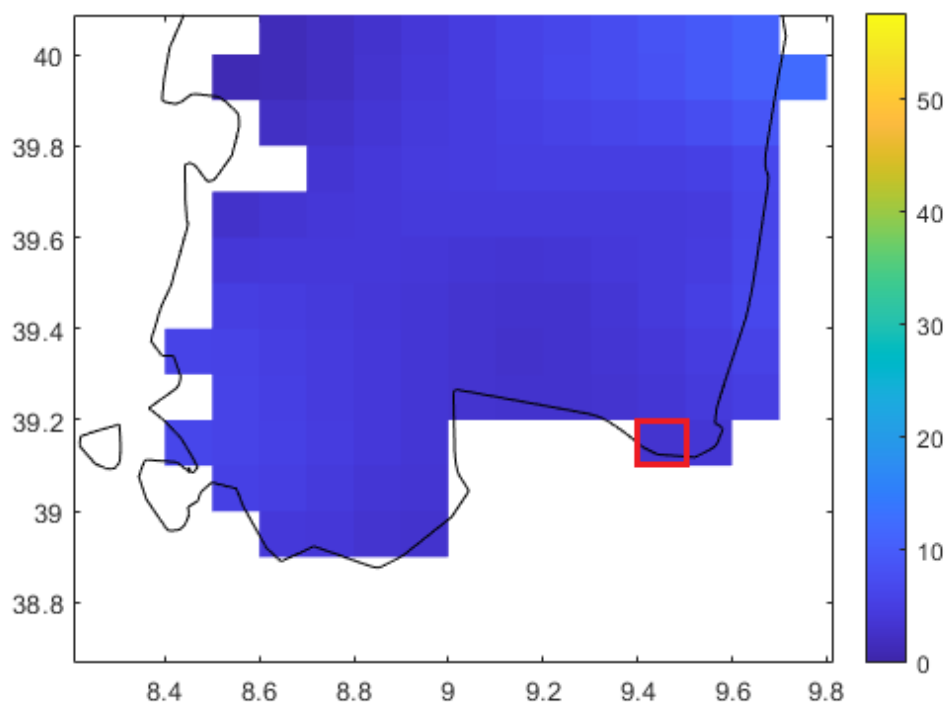


Figura 9- Dettaglio esempio matrice di soglia per il Sud Sardegna (sono riportate in blu le zone in cui sono disponibili i dati di ERA5-Land, in rosso è indicato la cella di ERA5-Land di $0,1^\circ \times 0,1^\circ$)

In Figura 9 si può osservare come vengono forniti i dati di rianalisi di ERA5-Land e la dimensione e distribuzione spaziale del dato. In questo caso, in particolare è stato riportato il dettaglio del sud Sardegna dove viene indicata, con il colore rosso, l'estensione spaziale di un pixel di ERA5-Land (di $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ovvero circa 9 per 9 km). Sulla base di quanto detto precedentemente la percentuale di pioggia media annua (PMA) che viene utilizzata come soglia pluviometrica per identificare gli eventi estremi di pioggia varia da cella a cella. All'interno della stessa però il valore ovviamente sarà il medesimo, di conseguenza, questa soglia risulta omogenea all'interno di ogni singola cella, ma ogni cella avrà un valore numerico quantitativamente diverso da quella adiacenti sulla base del valore di PMA stimato.

La rappresentazione del dato di rianalisi nella Figura 9 è stata effettuata con il programma di calcolo Matlab ed è possibile osservare l'altezza di pioggia cumulata su

24 ore rispetto alla scala cromatica riportata sulla destra, mentre i confini nazionali con la linea nera continua. Per rappresentare i confini nazionali è stata utilizzata una funzione già disponibile nelle librerie di Matlab chiamata “borderdata.mat” che contiene al suo interno i confini di tutte le nazioni del mondo. Utilizzando questa funzione si può osservare, sempre in Figura 9, una leggera discrepanza tra il dato ERA5-Land e i confini della funzione suddetta, ma, ciononostante, questa funzione è stata utilizzata puramente a scopo rappresentativo e non ha in nessun modo influenzato le operazioni successive.

5.3.2. Dato preliminare ERA5-Land

Il primo passo è stato quello di visualizzare il dato di pioggia di rianalisi scaricato dal *dataset* di ERA5-Land. Il dato viene fornito secondo una disposizione matriciale, formata da una matrice a tre dimensioni. Le prime due dimensioni della matrice ovvero la latitudine e la longitudine, scelte per il progetto in questione, servono per rappresentare il parametro meteo-climatico su una superficie 2D, mentre la terza dimensione è utilizzata per riportare la progressione temporale della medesima variabile. La successione di matrici descrive l'evoluzione del parametro nel tempo. Il tempo scelto può essere qualsiasi, infatti, come descritto in precedenza, si può scegliere di riportare una successione oraria, giornaliera o più grande, oppure, in alternativa, una serie di dati distribuiti a piacere o con date specifiche. Il riconoscimento del giorno e dell'ora di riferimento del dato è possibile grazie al fatto che insieme alla matrice tridimensionale viene scaricato anche un vettore che riporta le ore cumulate passate dalla data di riferimento di base del *dataset* fino al dato rappresentato o utilizzato. Il vettore di ore cumulate è concorde e ordinato esattamente come quello delle matrici scaricate, disposto quindi in ordine cronologico. In altre parole, allo stesso indice della terza dimensione della matrice corrisponde lo stesso indice nel vettore delle ore cumulate, così da poter individuare in modo ordinato il giorno e l'ora corrispondenti al dato rappresentato dalle altre due variabili.

Le ore cumulate fanno riferimento alle ore 00:00:00 del 1/01/1900. Attraverso l'uso specifico di funzioni di Matlab è possibile trasformare il totale di ore trascorse dalla

data di riferimento al giorno ed ora esatti del verificarsi del dato meteo-climatico utilizzato.

Il dato di partenza che viene fornito da ERA5-Land per l'Italia, a scopo esemplificativo, è visibile in Figura 10.

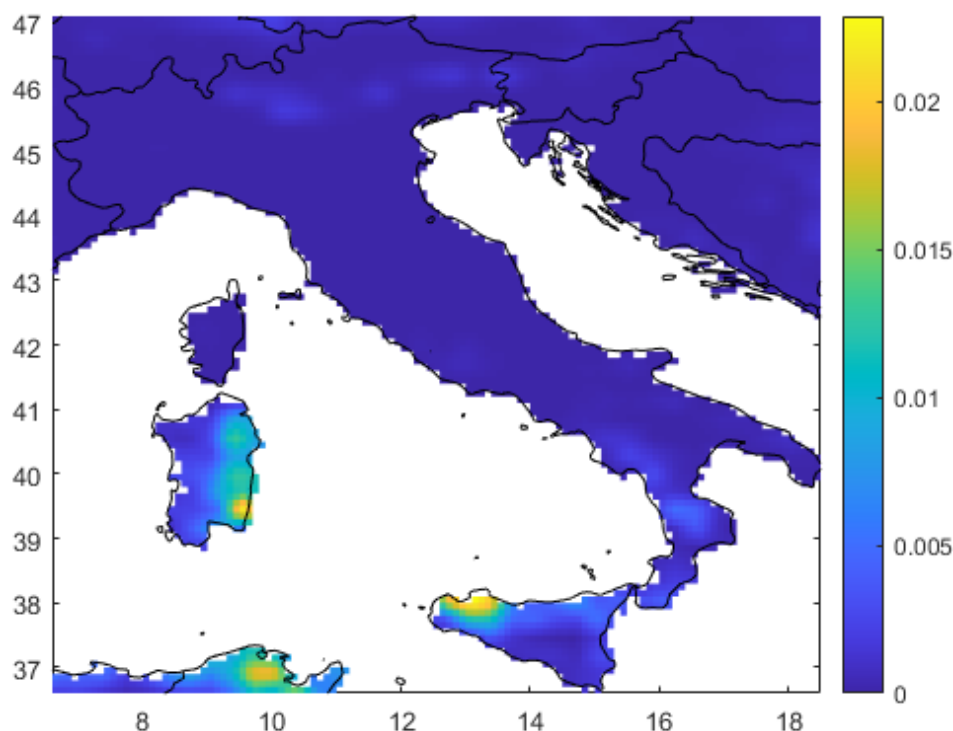


Figura 10- Dato ERA5-Land riportato così come viene fornito dal dataset, nella parte sinistra è riportata la scala di altezza di pioggia in m

Il dato di pioggia di ERA5-Land è sempre quello che fa riferimento alla scala graduata riportata in Figura 10, mentre le linee nere continue che definiscono i confini nazionali, fanno parte di una funzione specifica di Matlab e non del dato di rianalisi.

Applicando un ritaglio del dato, si va a considerare solo quelle celle che rientrano all'interno dei confini nazionali, dal momento che l'obiettivo è quello di valutare solamente gli eventi piovosi avvenuti all'interno dei confini italiani stessi. La medesima cumulata di pioggia rappresentata in Figura 10 è visibile in Figura 11 dopo che sono stati eliminati i dati di pioggia esterni ai confini nazionali oltre alla modifica dell'unità di misura da metri a millimetri.

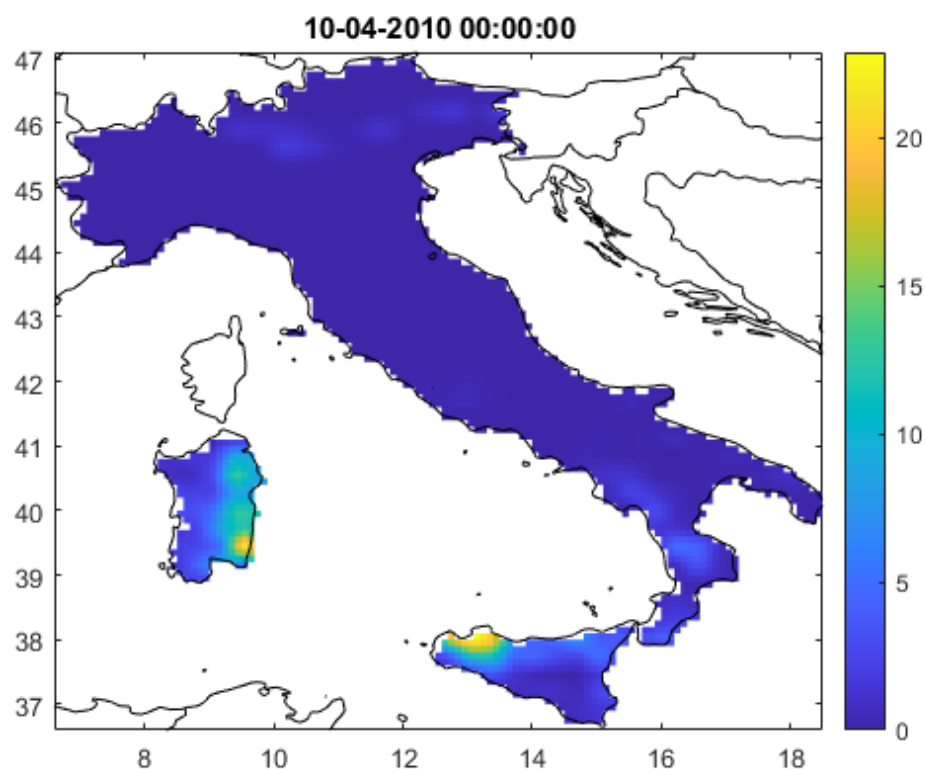


Figura 11- Dato ERA5-Land solo Italia, con scala altezza di pioggia in mm

Il metodo di studio adottato in questa analisi prevede, dopo aver correttamente riportato i dati nel programma, di valutare la piovosità media annua (PMA) all'interno della finestra temporale scelta (da 2000 al 2020). Per realizzare la matrice di piogge cumulate annue sono state sommate le singole cumulate giornaliere, misurate su 24 ore, per ogni anno utilizzato nello studio. Dai calcoli sono state ottenute 20 matrici diverse di cumulate annuali di pioggia dalle quali poi si è ottenuta la matrice di piovosità media annua PMA. La PMA è stata realizzata facendo la media esatta di tutte le matrici nel singolo punto. In altre parole, la matrice, che è possibile vedere in Figura 12, rappresenta il risultato della media delle cumulate annuali effettuata, cella per cella, sui vent'anni del dato di ERA5-Land. Ogni cella della Figura 12 infatti riporta come risultato la piovosità media annua stimata da ERA5-Land e mediata sui 20 anni considerati.

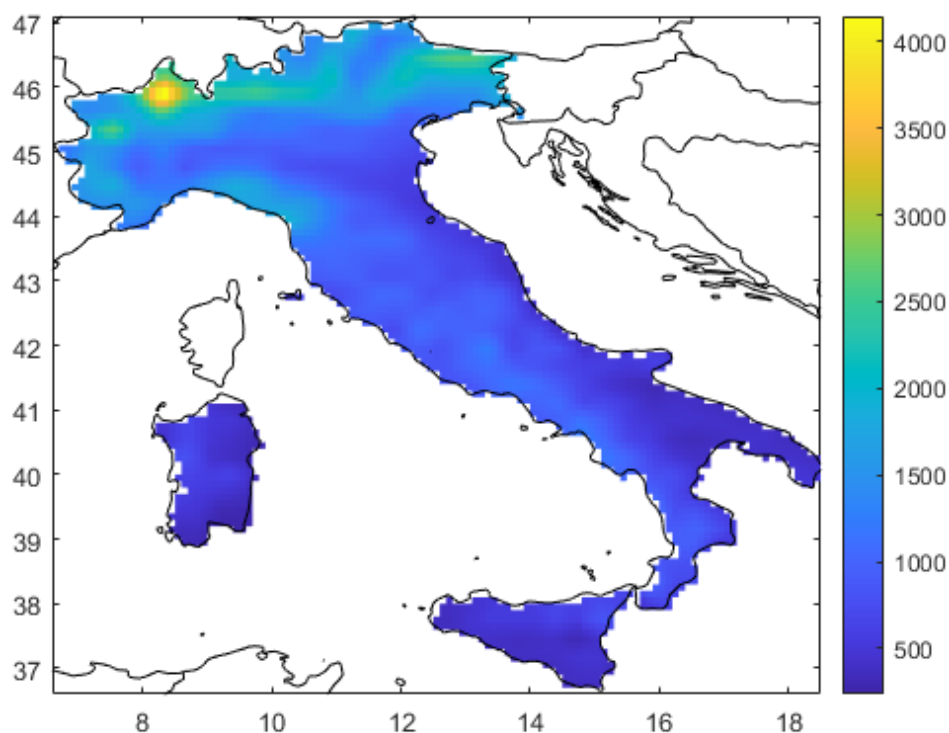


Figura 12 - Mappa di pioggia media annua (espressa in mm) calcolata tra il 2000 e 2020 dai dati di ERA5-Land

Da come è possibile vedere nella Figura 12 il risultato della PMA calcolata sul territorio italiano è distribuita in modo corretto rispetto ai dati presenti in letteratura. Infatti, si osservano piogge medie di circa 500 mm nelle zone del sud Italia e nelle isole, mentre la media aumenta man mano che ci si sposta verso nord fino a raggiungere una media intorno al metro e oltre. Va evidenziata però la forte sovra stima che si verifica nel territorio del Verbano nel Piemonte, dove si raggiunge il picco di piovosità media annua. Nella realtà il territorio di Verbano-Cusio-Ossola è effettivamente un territorio molto piovoso, ma essendo l'altezza di pioggia nel *dataset* di ERA5-Land e in molti *dataset* di rianalisi un dato derivato e che non viene corretto con altezze di pioggia a terra, può generare questa tipologia di problemi. A dimostrazione del fatto che la pioggia media annua ottenuta sia effettivamente congrua con quanto accade nella realtà e con i dati medi pluviometrici, è stato calcolato il valore medio di piovosità annua su tutto il territorio secondo il *dataset* di ERA5-Land e confrontato con i dati di altri enti validati (Tabella 4).

ERA5-Land	1050.52 mm
Dato Climate-data.org	1002 mm

Tabella 4-Confronto valori di pioggia media annua calcolata con i dati di ERA5-Land e quella presente in bibliografia, Fonte: Climate-data.org

5.3.3. Soglie pluviometriche PMA

Le percentuali di PMA che sono state utilizzate in questo lavoro sono del 3, 4, 5, 6 e 7%. Sono state scelte queste soglie come punto di partenza poiché sono già state utilizzate nel precedente lavoro di Mazzoglio et al. (2022) e, quindi, forniscono una sorta di indicazione qualitativa sul tipo di soglia pluviometrica da utilizzare, dal momento che anche in quello studio sono state utilizzate soglie derivanti dalla PMA.

Come verrà approfondito successivamente, applicando le soglie con percentuali più basse vengono identificati come possibili eventi estremi un numero maggiore di eventi rispetto a quelle più alte. Aumentando il numero di eventi identificati, infatti, aumenta anche la probabilità di individuare gli eventi che si sono effettivamente verificati nella realtà, ma allo stesso tempo aumentano anche i falsi segnali. Di contro, applicando soglie più alte si riduce il numero complessivo di eventi individuati e di conseguenza anche i falsi segnali, ma aumenta invece il numero di mancati segnali.

Il problema sostanziale, che potrebbe essere oggetto di studi successivi più approfonditi, è che tendenzialmente nelle regioni caratterizzate da valori di PMA più bassi il valore numerico della soglia pluviometro nella cella risulta quantitativamente basso poiché è strettamente collegato con la pioggia media annua. Ciò potrebbe causare un problema in quanto non necessariamente la quantità di pioggia che cade al suolo durante un evento precipitativo al sud sia effettivamente minore di uno stesso evento che si verifica nelle regioni più a nord. Le piogge sono molto variabili ma possono comportarsi in modo simile sia al nord che al sud, cambia invece la loro distribuzione temporale che le rende più “rare” nelle regioni del Sud Italia. Nelle regioni del Sud Italia e nelle isole, infatti, questo tende ad essere uno dei principali problemi poiché, come vedremo, alcuni eventi che potrebbero essere considerati non

eccezionali in riferimento alle altezze di pioggia vengono segnalati comunque e contribuiscono a generare dei falsi segnali.

Le soglie utilizzate in questo lavoro sono riportate nella Figura 13 in modo da potere avere un riscontro sia in termini di distribuzione dell'altezza di pioggia utilizzata come valore soglia pluviometrica e sia di come queste cambino aumentando la percentuale di PMA utilizzata.

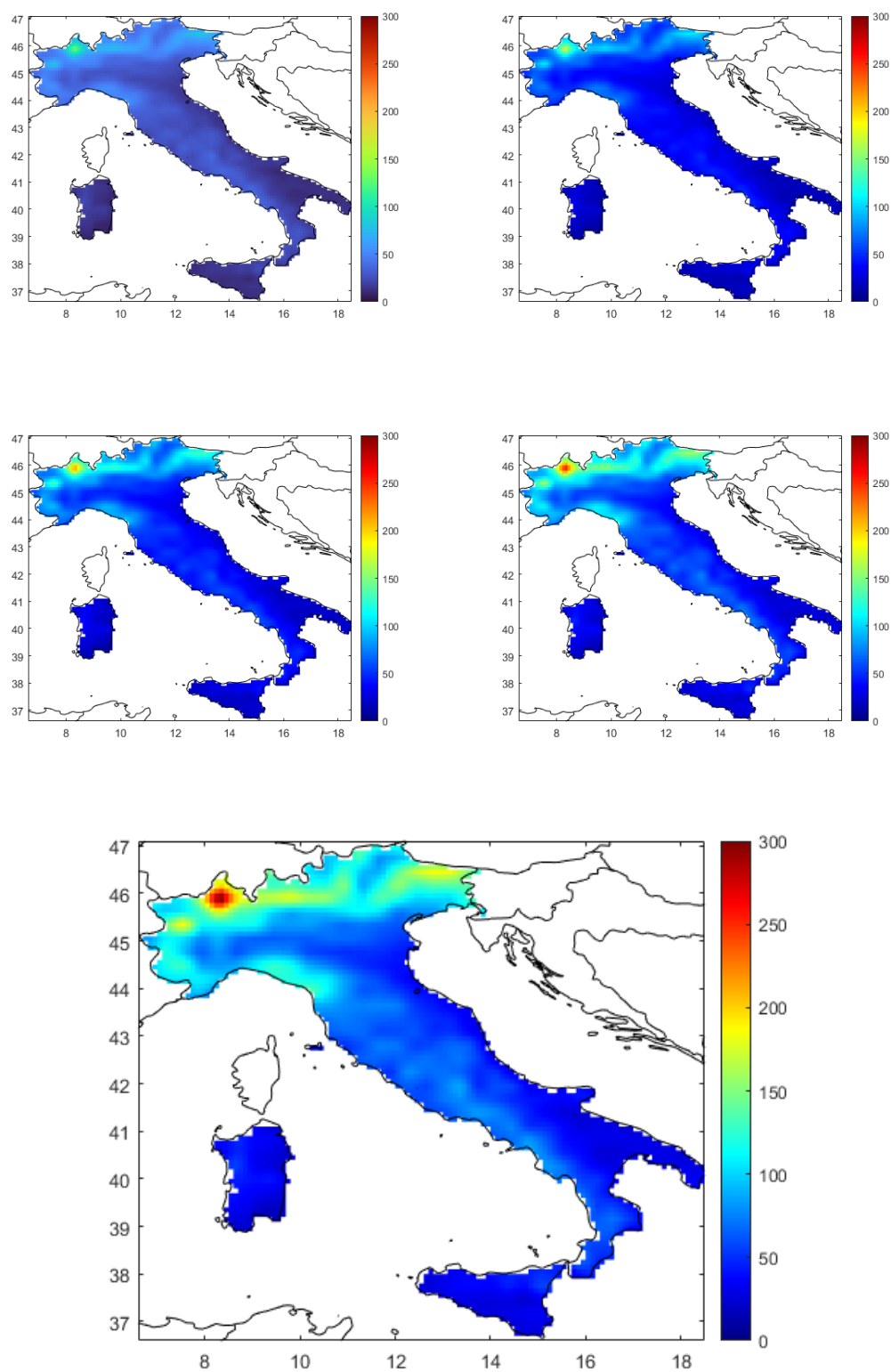


Figura 13 Matrici soglia pluviometriche con diverse percentuali PMA (spostandosi dall'alto verso il basso si possono osservare i risultati ottenuti con percentuali che variano dal 3% fino a 7% di PMA). Valori espressi in mm.

Tutte le matrici nella Figura 13 sono state utilizzate per l'individuazione degli eventi estremi di pioggia nell'arco di tempo considerato.

5.4. Raccolta dati di eventi reali per il confronto (EM-DAT e ESWD)

Per poter effettuare una valutazione sugli eventi piovosi estremi che vengono individuati dal programma attraverso l'applicazione di queste soglie a partire dai dati ERA5-Land vi è la necessità di disporre di un *database* all'interno del quale siano ripotati tutti gli eventi di pioggia estrema accaduti nella realtà. Eventi che hanno provocato delle conseguenze. In particolare, sono stati presi in considerazione tutti gli eventi che hanno causato danni a cose o persone o che hanno portato al verificarsi di eventi idrogeologici come frane, colate di fango, allagamenti e altro.

La selezione degli eventi alluvionali viene fatta poiché l'obiettivo primo di questa tesi è quello di individuare la soglia di piovosità migliore per l'identificazione preventiva degli eventi di pioggia estrema e non per la sola identificazione di un evento piovoso.

Un *database* completo e liberamente usufruibile al momento non esiste, ma ne esistono diversi più o meno completi. Per questo lavoro sono stati utilizzati il *database* di EM-DAT e quello di ESWD.

5.4.1. Database di EM-DAT

EM-DAT è un *database* nato nel 1988, realizzato dal *Centre of Research on the Epidemiology of Disaster* (CRED). In EM-DAT vengono registrati tutti i grandi disastri che hanno colpito il mondo intero. Detto *database* contiene informazioni geografiche, temporali, umane ed economiche sui disastri avvenuti nelle diverse parti del mondo. EM-DAT, infatti, contiene informazioni su qualunque tipo di calamità o disastro naturale e non che ha colpito la Terra. Durante la scelta della tipologia di evento calamitoso che si vuole scaricare dal sito è possibile selezionare il tipo di disastro che si intende approfondire o su cui si vogliono avere maggiori informazioni e attraverso un sistema di selezione successiva si può arrivare nel dettaglio. Per esempio, nel caso di eventi idrogeologici, si può decidere di selezionare solo quelli legati ad alluvioni repentine, o dovuti a frane o altro.



Figura 14- Scherma di home del sito di EM-DAT (The International Disaster Database). Fonte: <https://www.emdat.be/>

Nella Figura 14 è possibile vedere la schermata di home della pagina web del sito di EM-DAT. Nella Figura 15 invece è riportata la possibile selezione e personalizzazione del disastro che può essere eseguita nel *database*. È possibile selezionare principalmente il tipo di disastro scegliendo tra naturale o artificiale e poi proseguire aumentando il livello di dettaglio scegliendo ancora, per esempio, tra disastri di tipo idrologico, meteorologico o altro. Il livello di personalizzazione è molto elevato tanto da poter richiedere informazioni solo su un particolare tipo di evento come le tempeste convettive, cicloni tropicali o per qualunque altro evento calamitoso.

Disaster Classification

Select records for a specific category of disaster

- ☒ Natural
 - ☐ Geophysical
 - ☒ Meteorological
 - ☐ Extreme temperature
 - ☐ Fog
 - ☒ Storm
 - ☒ Convective storm
 - ☒ Extra-tropical storm
 - ☒ Tropical cyclone
 - ☒ Hydrological
 - ☐ Wave action
 - ☒ Landslide
 - ☒ Avalanche
 - ☒ Landslide
 - ☒ Subsidence
 - ☒ Rockfall
 - ☒ Mudslide
 - ☒ Flood
 - ☐ Coastal flood
 - ☒ Flash flood
 - ☐ Ice jam flood
 - ☒ Riverine flood
 - ☐ Climatological
 - ☐ Wildfire
 - ☐ Glacial lake outburst

Location

Select a specific region

- ☐ Asia
- ☐ Africa
- ☐ Americas
- ☒ Europe
 - ☐ Southern Europe
 - ☐ Albania
 - ☐ Andorra
 - ☐ Azores Islands
 - ☐ Bosnia and Herzegovina
 - ☐ Spain
 - ☐ Gibraltar
 - ☐ Greece
 - ☐ Croatia
 - ☒ Italy
 - ☐ Macedonia (the former Yugoslav Republic of)
 - ☐ Malta
 - ☐ Portugal
 - ☐ San Marino
 - ☐ Canary Is
 - ☐ Serbia Montenegro
 - ☐ Slovenia
 - ☐ Vatican The (Holy See)
 - ☐ Yugoslavia
 - ☐ Serbia

from 2000 to 2020

2000 2020

Figura 15- Finestra di selezione tipologia di eventi estremi scaricabili con la nazione di riferimento e la finestra temporale selezionabile, Fonte: <https://www.emdat.be/>

Inoltre, nella parte destra della Figura 15 è riportato l'elenco delle nazioni per le quali è possibile scaricare i dati riguardanti gli eventi estremi ricercati, in più si può anche scegliere l'arco temporale che si intende analizzare. Il *database* di EM-DAT raccoglie informazioni sui disastri che hanno colpito l'umanità a partire dal 1900.

Il livello di dettaglio geografico, fornito nel *database* degli eventi che viene scaricato, una volta effettuata la selezione, è suddiviso in:

- "Adm1": eventi la cui geolocalizzazione è suddivisa su base regionale;
- "Adm2": gli eventi in cui è riportata la provincia dove si sono verificati.

5.4.1.1. Problemi Database EM-DAT

Uno dei problemi riscontrati durante l'utilizzo di questo *database* consiste nel fatto che non vi è omogeneità nella distribuzione dei dati dei disastri. Infatti, alcuni di questi eventi vengono forniti solamente su scala regionale, con la sigla *Adm1*, mentre altri in modo molto dettagliato su scala provinciale, con la sigla *Adm2*. Questo rende difficile attribuire correttamente la provincia di appartenenza di un fenomeno quando

l'evento, nel *database*, è riferito solo alla regione in cui è avvenuto. Il problema sostanziale è legato al fatto che se si cercasse di suddividere l'evento avvenuto a scala regionale in scala provinciale non vi sarebbe modo di restringere o limitare il numero di province colpite all'interno della regione. Ciò implica suddividere lo stesso evento avvenuto per tutte le province in essa contenute, il che farebbe aumentare in modo sensibile il numero di eventi reali da utilizzare per il confronto con gli eventi ERA5-Land. In sostanza, quindi, a livello regionale si hanno tutte le informazioni di cui vi è bisogno, a parte rari casi, mentre a livello provinciale, a causa di questo problema e in mancanza di informazioni aggiuntive ottenibili da fonti terze come dal sito di Arpa Piemonte, si è preferito evitare di introdurre molti eventi di cui non si avesse l'effettiva certezza di veridicità.

Il numero di eventi alluvionali riportati dal *database* di EM-DAT per gli anni che vanno dal 2000 al 2020 non è però sufficiente per affrontare in modo corretto l'associazione di cui abbiamo precedentemente parlato. Gli eventi riportati, infatti, sono stati verificati in modo molto scrupoloso e tendenzialmente si basano su eventi di grande entità, o che hanno portato a gravi conseguenze in genere, mentre tendono a trascurare gli eventi più piccoli o di minor entità. Per questo motivo è sorta la necessità di integrare EM-DAT con altri *database*.

5.4.2. Database ESWD

Il secondo *database* utilizzato per colmare il più possibile le lacune e per avere un registro di eventi reali che fosse più completo e scrupoloso è quello del *European Severe Weather Database* (ESWD). L'obiettivo di ESWD è quello di raccogliere e fornire informazioni dettagliate sui diversi eventi calamitosi che hanno interessato il territorio europeo. Gli eventi che vengono riportati all'interno di questo *database* presentano diversi livelli di verificabilità che verranno successivamente esaminati più nel dettaglio.

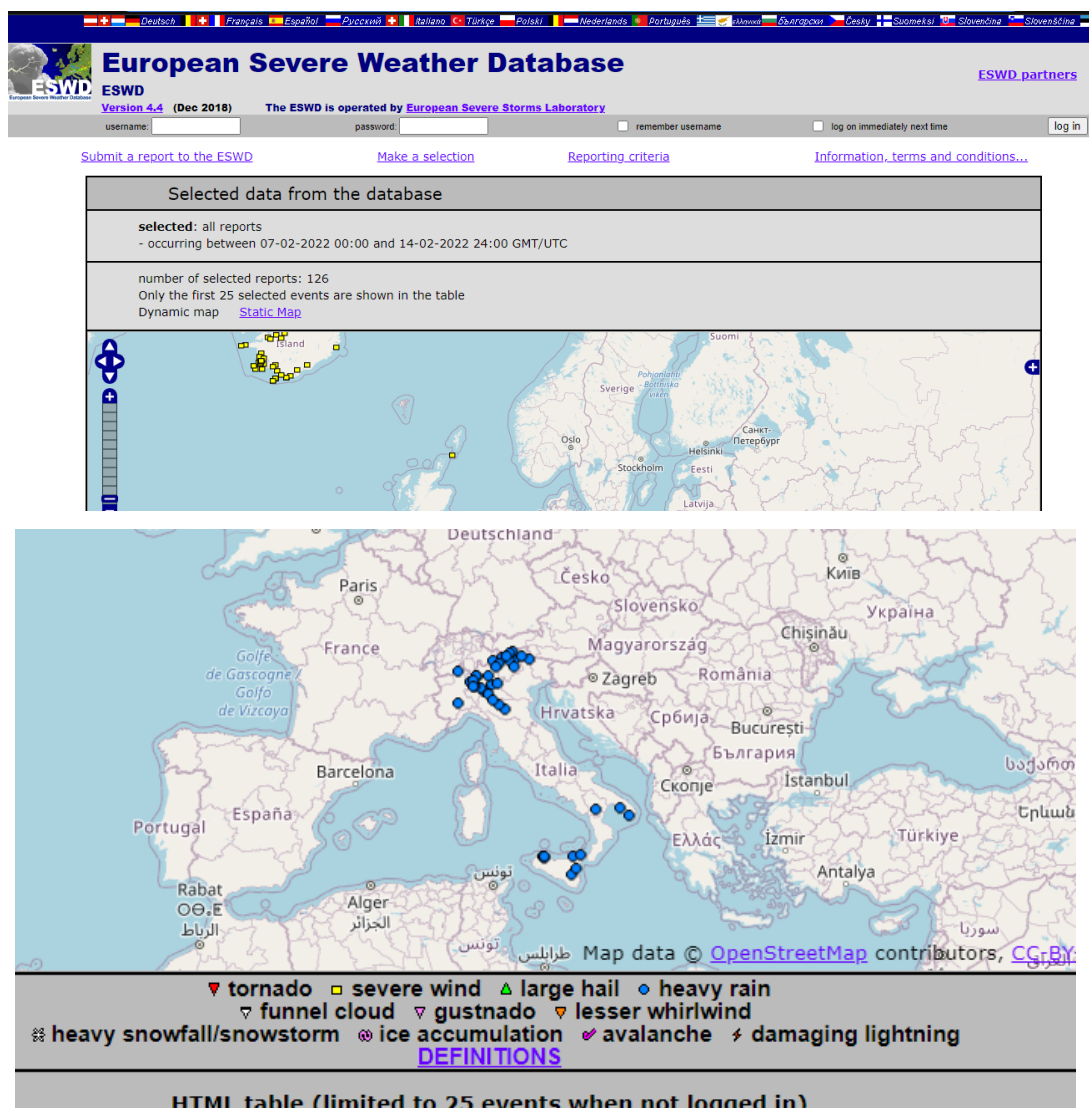


Figura 16 – Schermata di home del sito ESWD ma con la carta di dislocazione dei report di pioggia estrema.
Fonte: <https://eswd.eu/cgi-bin/eswd.cgi>

Nella Figura 16 viene riportata la schermata principale del sito web di ESWD. Si può osservare la *dashboard* con tutte le possibili operazioni che possono essere svolte e la mappa di un esempio di selezione di eventi calamitosi avvenuti in Italia. Gli eventi climatici estremi che possono essere selezionati dal *database* di ESWD sono visibili nella Figura 17.

Make a selection		submit query
Make sure to select the checkbox on the left when selecting a specific time period area.		
☒	07-02-2022 00:00 and 14-02-2022 24:00 (dd-mm-yyyy hh:mm)	
Map selection: Europe		
Select all...		
☐ dust, sand- or steam devils ☐ gustnadoes ☐ large hail ☒ heavy rain ☐ tornadoes ☐ severe wind gusts ☐ heavy snowfalls/snowstorms ☐ ice accumulations ☐ avalanches ☐ damaging lightning strikes		
occurring in Italy		over land, water and unknown
Make sure to select the checkboxes on the left when selecting a latitude/longitude bounded area.		

Figura 17- Parametri personalizzabili per le ricerche nel sito di ESWD. Fonte: <https://eswd.eu/cgi-bin/eswd.cgi>

In Figura 17, come nel caso precedente, è possibile personalizzare e selezionare il dato che si intende visionare. La selezione in questo caso considera un ventaglio più ristretto di tipologie di eventi estremi rispetto al precedente, ma allo stesso tempo riporta un numero maggiore di eventi rispetto a EM-DAT. Oltre alla tipologia di evento è inoltre possibile selezionare anche la nazione che si intende controllare e la finestra temporale.

Facendo riferimento alla Figura 17 sono stati evidenziati con un riquadro di colore rosso i principali parametri impostati per scaricare e completare il *database* degli eventi realmente accaduti da utilizzare per il successivo confronto. Partendo dall'alto il primo riquadro rosso evidenzia la finestra temporale che si intende ispezionare alla ricerca degli eventi calamitosi. In generale non vi sono limiti legati al mese o anno di selezione, si possono quindi fare scansioni su periodi anche molto lunghi con la limitazione dei 25 eventi visionabili per volta. Il secondo riquadro rosso identifica invece la tipologia di evento calamitoso che si intende ricercare che, in questo caso, è "Heavy Rain" ovvero gli eventi di pioggia molto intensa. Questo, tuttavia, non è l'unico parametro a disposizione; infatti, come vediamo è possibile effettuare ricerche riguardanti le tempeste di sabbia, valanghe, trombe d'aria o tornado, tempeste di vento e le nevicate intense. L'ultimo riquadro riportato in Figura 17 evidenzia la nazione/i all'interno delle quali si vuole effettuare la ricerca. In questo caso

ovviamente si è limitata la ricerca solamente al territorio italiano, ma è possibile eseguire la medesima ricerca su tutto il territorio europeo.

Il *database* ESWD è uno dei più completi, efficienti e fruibili a disposizione. Gli eventi di pioggia intensa che vengono riportati hanno tre caratteristiche principali, che lo rendono effettivamente utile ai fini di questo lavoro, riportate nella Figura 18.

heavy rain to map 	Terlano Trentino-Alto Adige Italy (46.53 N, 11.25 E) < 3 km 30-07-2020 (Thursday) 20:15 UTC (+/- 15 min.)	based on information from: photo or video of the event, a report on a web site, a trained storm spotter, an eyewitness report of the damage, an eyewitness report Impacts: Road(s) impassable or closed https://www.facebook.com/ifvsuedtiro/photos/pcb.3285147664878589/3285255598201129 report status: report confirmed by reliable source (QC1) contact: MeteoNetwork Pretemp
heavy rain to map 	Valdidentro Lombardia Italy (46.49 N, 10.32 E) 30-07-2020 (Thursday) 20:00 UTC (+/- 30 min.)	based on information from: photo or video of the event, a report on a web site, a trained storm spotter, an eyewitness report of the damage, an eyewitness report convective. https://www.facebook.com/BPPMeteo/posts/2624608681185879 report status: report confirmed by reliable source (QC1) contact: MeteoNetwork Pretemp

Figura 18- Esempio di eventi ESWD di pioggia estrema, dove vengono riportati il comune, regione e data nel riquadro arancio a sinistra e una breve descrizione dell'evento e il sito di riferimento nel riquadro a destra. Fonte: <https://eswd.eu/cgi-bin/eswd.cgi>

In Figura 18 è riportato il risultato della ricerca dopo la definizione dei parametri visti precedentemente. Gli eventi riportati sono accompagnati da una serie di attributi che ne descrivono i dettagli. Le principali caratteristiche, infatti, sono:

in primo luogo, nel riquadro arancio di sinistra in Figura 18, viene riportato il comune in cui si è verificato l'evento, la regione, le coordinate geografiche (latitudine e longitudine), il giorno e anche l'ora con il relativo scarto. Questi attributi consentono di avere un ottimo livello di dettaglio per quanto riguarda la geolocalizzazione dell'evento, cosa che, rappresenta il principale motivo per cui è stato utilizzato in modo così ampio per questo lavoro. In secondo luogo, invece, nel riquadro arancio a destra, viene riportata genericamente una breve descrizione dell'evento, il tipo di impatto che ha avuto al suolo ed eventualmente le persone che sono state ferite o morte. Inoltre, sempre nello stesso riquadro, viene riportato un link di riferimento per

ulteriori informazioni sull'evento e un codice alfanumerico che descrive il livello di conferma che si ha dell'evento stesso. I codici utilizzati nel *database* di ESWD sono:

- QC0: evento riportato a seguito della segnalazione degli utenti;
- QC0+: evento che ha superato il controllo primario di veridicità;
- QC1: evento per cui è stato prodotto un report da un ente affidabile;
- QC2: evento che è stato confermato o utilizzato per uno studio scientifico.

Per avere un registro di eventi reali che fosse il più possibile veritiero e verificato sono stati utilizzati solamente gli eventi riportanti il codice QC1 o QC2. In questo modo si tralasciano gli eventi meno verificati e su cui si possono nutrire maggiori dubbi. Va tenuto conto comunque che il numero di eventi classificati come QC1 o QC2 è molto elevato e sufficiente a garantire un *database* completo.

5.5. Analisi regionale e provinciale dei dati ERA5-LAND

Il metodo di analisi seguito durante questo lavoro prevede, come già accennato in precedenza e parzialmente spiegato nei capitoli precedenti, l'utilizzo di dati di pioggia cumulata giornaliera di ERA5-Land riguardanti solamente il territorio italiano e il loro confronto con il *database* di eventi reali provenienti da EM-DAT e ESWD.

In sintesi, il procedimento consiste nel confrontare la pioggia cumulata su 24 ore di ogni giorno del *dataset* di ERA5-Land con le soglie determinate nel paragrafo precedente. Il confronto viene eseguito al fine di individuare le celle che hanno superato il valore della stessa cella nella matrice soglia pluviometriche.

Questo procedimento viene effettuato per tutte le celle che rientrano all'interno del territorio nazionale, infatti, uno degli incrementi che si intende apportare a questo lavoro rispetto ai precedenti è non solo individuare la soglia di piovosità migliore, ma bensì individuare tutte le celle che in un dato giorno hanno superato il valore della soglia pluviometrica. Così da poter determinare, a sua volta, tutte le regioni interessate dall'evento precipitativo e anche tutte le province.

L'incremento di dettaglio a livello provinciale rappresenta uno delle migliorie più evidenti che sono state applicate agli studi in campo precipitativo sui dati di rianalisi

di ERA5-Land. Diversi studi, infatti, si sono occupati dell'analisi di questo tipo di dati, considerando soprattutto la distribuzione spaziale delle precipitazioni. I diversi articoli citati nel capitolo 4 sottolineano in modo molto marcato questo aspetto e hanno concluso che il dato di ERA5-Land e ERA5 possiede un'elevata congruenza nella distribuzione spaziale del dato di pioggia rispetto alla distribuzione ottenuta dai pluviometri *in situ*.

La suddivisione di un evento precipitativo nelle regioni e nelle province interessate va necessariamente approfondita per far capire meglio al lettore quello che è stato il procedimento seguito. A scopo esemplificativo viene riportato in Figura 18 un esempio di pioggia cumulata su 24 ore di ERA5-Land che supera il valore limite della matrice di soglia pluviometrica almeno in un punto. Nella Figura 19 viene riportato sia il massimo di pioggia stimato dalla rianalisi, sia dove esso si è verificato e sia le celle che hanno superato il valore soglia di pioggia.

Come primo approccio allo studio si è cercato di individuare preliminarmente tutti i giorni in cui è stato osservato un superamento della soglia in un qualsiasi punto. Nel caso di esito positivo, quindi, è stato considerato solamente il massimo di pioggia che si è verificato all'interno della giornata e la cella che lo contiene.

Nella Figura 19 viene riportato un esempio di questa analisi preliminare con sull'asse delle ordinate e delle ascisse, oltre all'intervallo di latitudine e longitudine, anche rispettivamente la provincia e la regione in cui si è verificato il massimo di pioggia.

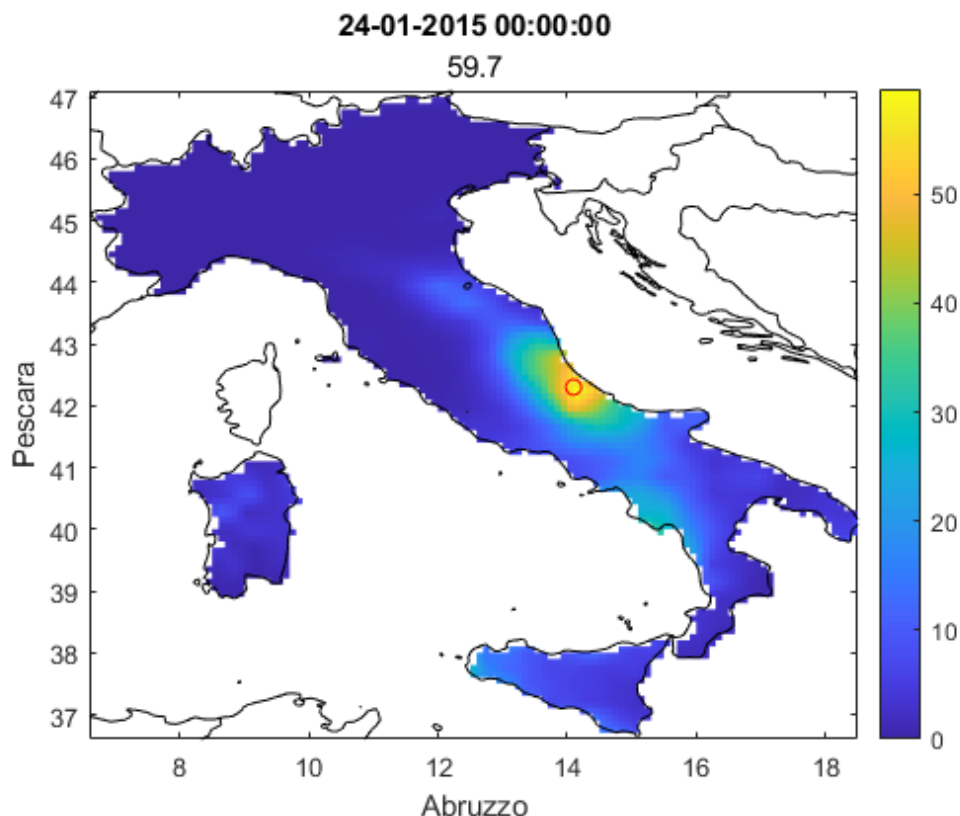


Figura 19- Cumulata di pioggia su 24 ore del giorno 23/1/2015 dove viene riportato la distribuzione spaziale delle piogge e il massimo con il cerchio rosso il sottotitolo riporta il massimo in millimetri, oltre a regione e provincia in cui si è verificato il massimo). Altezze di pioggia in mm.

Nella Figura 19 si può osservare inoltre la distribuzione spaziale della cumulata di pioggia su 24 ore con la rispettiva scala cromatica che identifica l'altezza di pioggia cumulata in millimetri. Sull'asse delle ordinate, dove ovviamente il valore numerico rappresenta la latitudine, viene riportata la provincia all'interno della quale si è verificato il massimo dell'evento piovoso. Allo stesso modo sull'asse delle ascisse, dove i valori numerici rappresentano la longitudine, viene riportata invece la regione in cui si è verificato. Nella parte alta è stato riportato il giorno, mese ed anno in cui si è verificato l'evento e l'altezza di pioggia massima come sottotitolo. Inoltre, sempre in Figura 19, è possibile notare che è presente un piccolo cerchio di colore rosso che identifica il punto in cui si è verificato il massimo di pioggia indicato.

Individuato il superamento in un punto qualsiasi della matrice, e identificato il massimo, è necessario identificare tutte le celle la cui pioggia cumulata ha superato il valore della soglia pluviometrica applicata. Ogni cella della matrice di ERA5-Land e

l'altezza di pioggia cumulata in essa contenuta, è stata confrontata con la soglia pioggia di riferimento e sono state evidenziate tutte le celle che superavano in valore il corrispettivo nella stessa cella della matrice soglia piovosità. Il risultato consiste in una seconda matrice che riporta solamente le celle in cui si è verificato il superamento rispetto a quelle in cui non si è avvenuto.

Facendo riferimento al caso precedente, si vede che l'evento piovoso che ha interessato il giorno 23/01/2015 possiede una certa distribuzione spaziale sul territorio nazionale e il massimo identificato riporta solo una regione e una provincia colpite, ma l'evento piovoso in sé è molto più grande e interessa una porzione decisamente superiore di territorio.

Applicando una soglia pluviometrica al 3% di PMA si verifica il superamento in tutte le celle riportate in Figura 20.

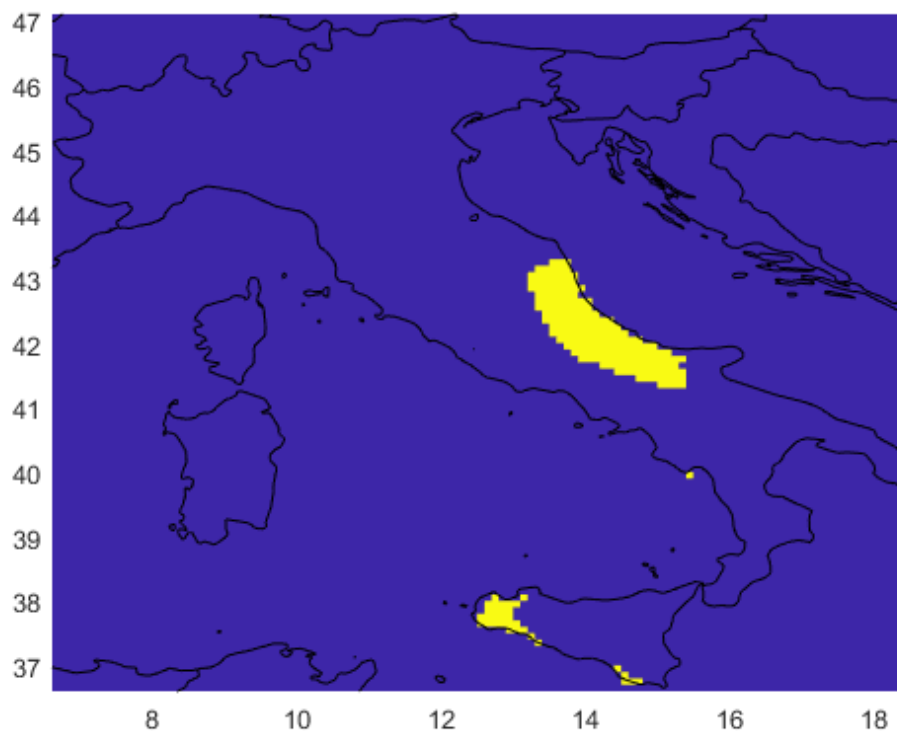


Figura 20 – Celle del dato ERA5-Land che hanno superato la soglia di pioggia al 3% di PMA della Figura 19, in giallo tutte le Celle che hanno superato il valore imposto dalla soglia, mentre in blu tutte quelle che non hanno superato

Per identificare e rappresentare tutte le celle sono stati sostituiti al valore di pioggia cumulata sulle 24 ore, che superava il valore soglia pluviometrica nella cella corrispettiva, il valore unitario, mentre nel caso contrario, ovvero di un valore di pioggia cumulata giornaliera inferiore, un valore pari a zero. Come evidenzia la Figura 20 diversamente da quanto veniva rappresentato nella Figura 19, si può osservare l'identificazione di più regioni e più province che sono state interessate rispetto a quelle riportate in Figura 19, dove era presente solo la regione e la provincia in cui si è verificato il massimo.

In questo modo si riesce ad accrescere il livello di dettaglio geografico di ogni singolo evento piovoso che si verifica nell'arco di tempo considerato, ovvero dal 2010 al 2020.

Riassumendo, questa prima parte dell'analisi viene effettuata per tutta la finestra temporale analizzata e i passaggi fondamentali sono stati:

- determinare la matrice di Piovosità Media Annua (PMA) riportata in Figura 12;
- calcolare le matrici soglia pluviometrica considerando il 3, 4, 5, 6 e 7% del valore di PMA nel punto, come in Figura 13;
- analizzare e confrontare ogni singola cumulata giornaliera dal 1° gennaio 2010 al 31 dicembre 2020 e confrontarla con tutte le matrici soglia ottenute al punto precedente;
- suddividere tutti gli eventi in cui si è verificato un superamento di soglia pluviometrica in base alle regioni e alle province interessate.

Nelle immagini seguenti sono stati riportati alcuni degli eventi in cui si è verificato il superamento della soglia pluviometrica in almeno un punto. Le immagini sono accoppiate in orizzontale per mettere a confronto l'individuazione del massimo giornaliero (nella colonna di destra) con le celle che effettivamente hanno superato il valore limite della soglia nello stesso giorno (colonna a sinistra). Tutti gli eventi riportati nelle Figure 21, 22 e 23 fanno riferimento al superamento della soglia pluviometrica al 3, 5 e 7% di PMA.

Infine, in Figura 24, viene riportata la variazione delle celle in cui si verifica il superamento per l'evento del 10/10/2015 al variare della soglia pluviometrica applicata, sempre dal 3 al 7% di PMA.

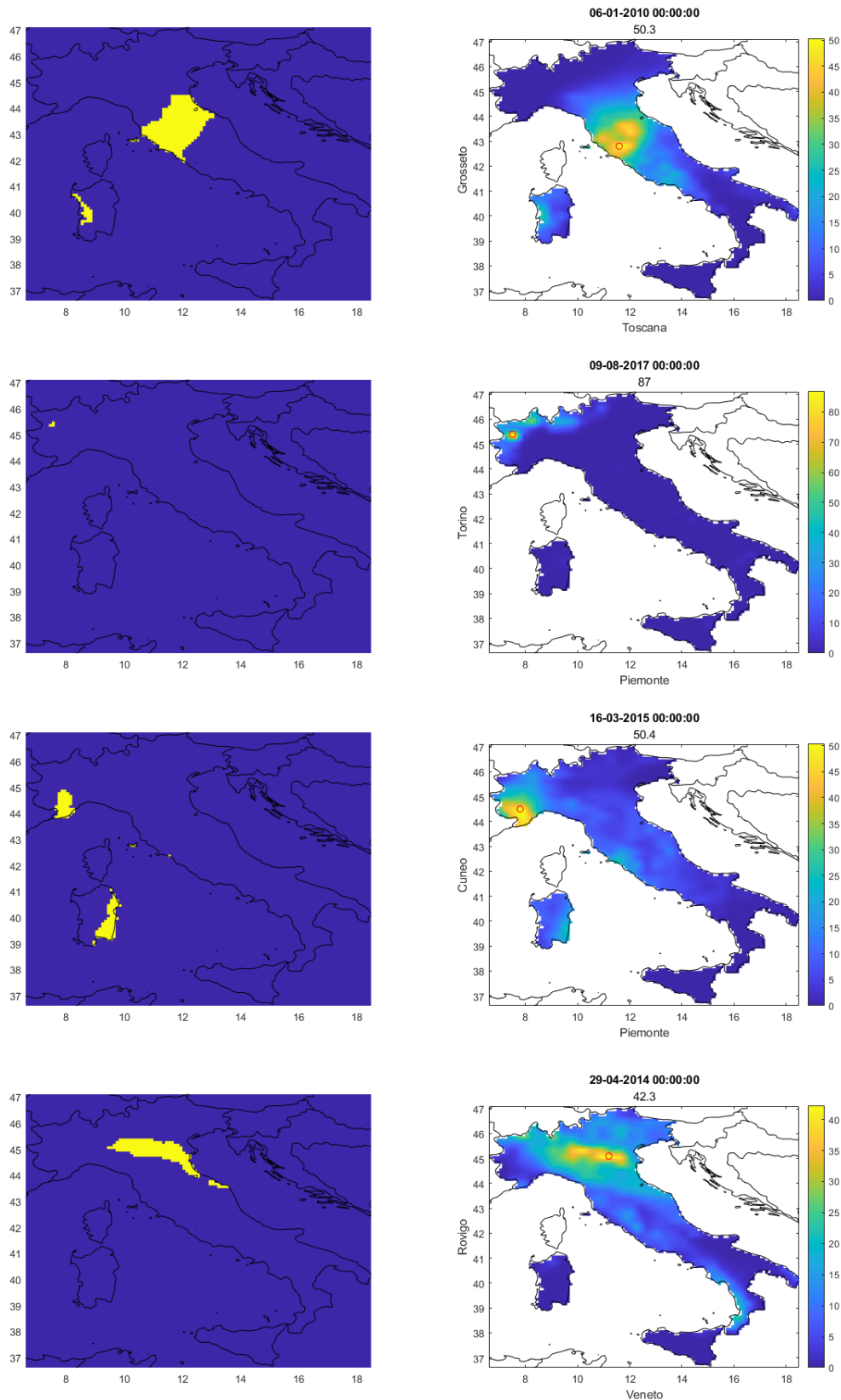


Figura 21-Eventi di pioggia estrema Individuati con soglia pluviometriche al 3% PMA, A sinistra evidenziate in giallo le celle allertate, a destra la distribuzione spaziale delle altezze di pioggia cumulate su 24h dell'evento di pioggia. Tutte le altezze di pioggia sono riportate in mm.

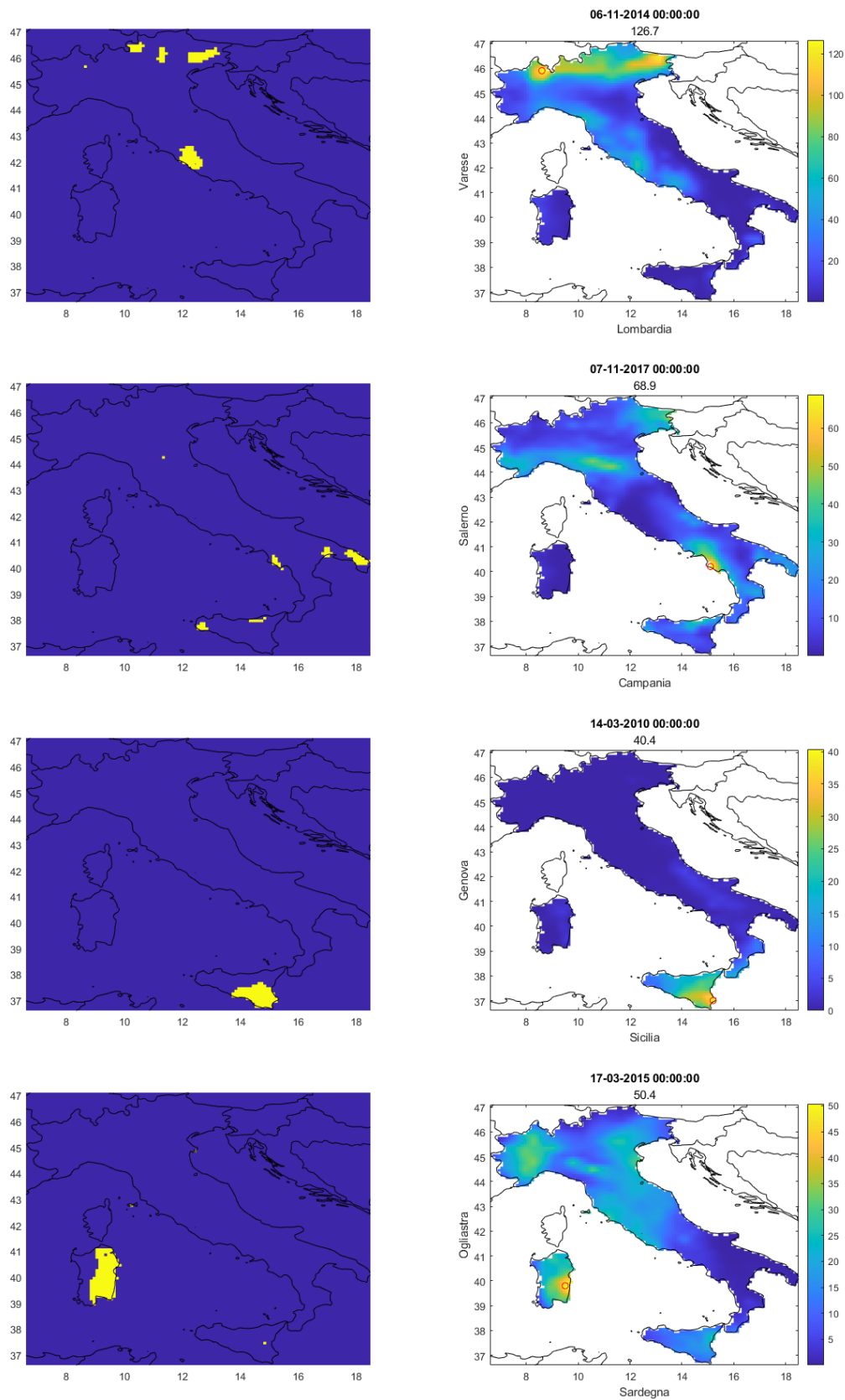


Figura 22-Eventi di pioggia estrema Individuati con soglia pluviometriche al 5% PMA, a sinistra evidenziate in giallo le celle allertate, a destra la distribuzione spaziale delle altezze di pioggia cumulate su 24h dell'evento di pioggia. Tutte le altezze di pioggia sono riportate in mm.

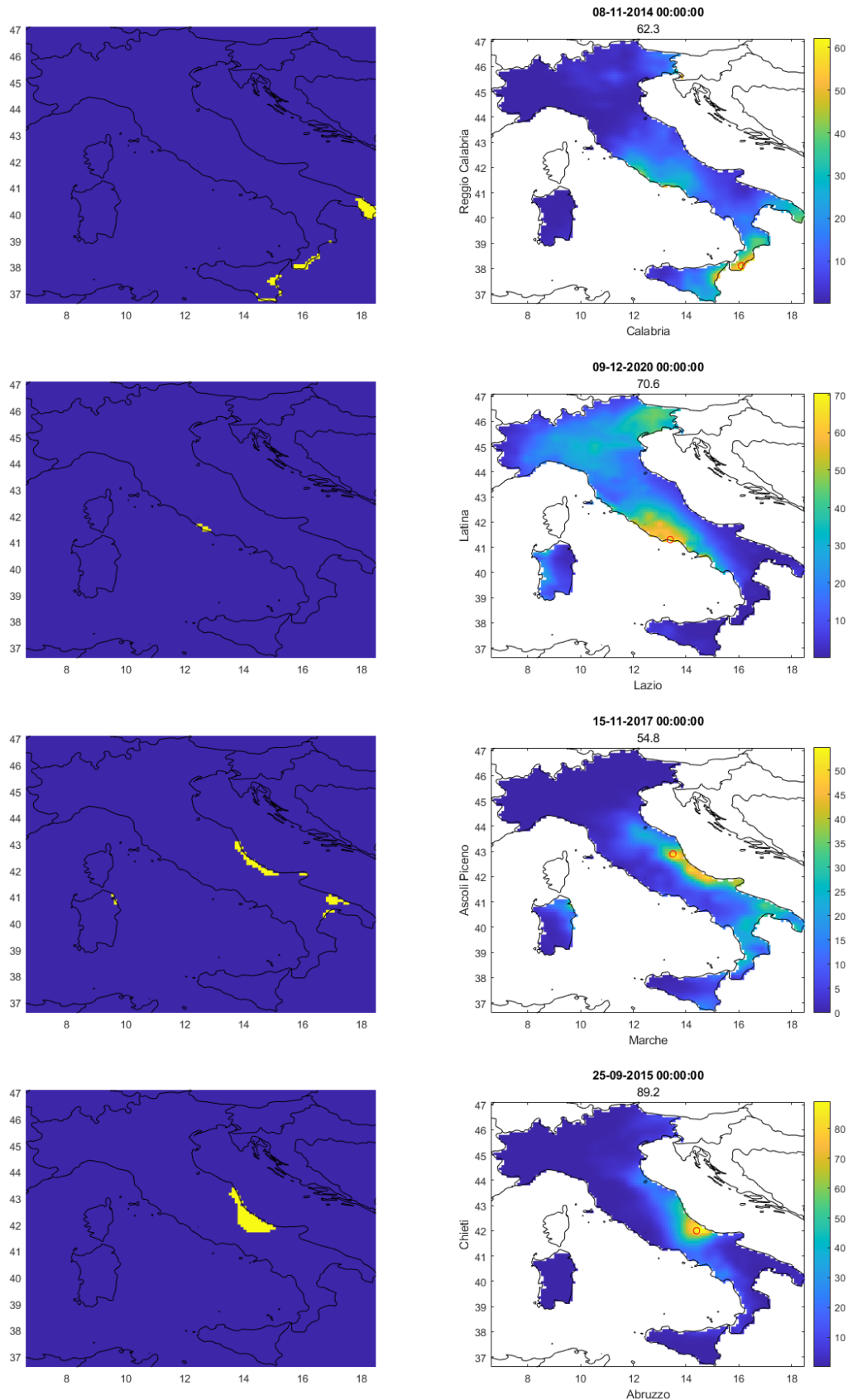


Figura 23-Eventi di pioggia estrema individuati con soglia al 7% PMA, a sinistra evidenziate in giallo le celle allertate, a destra la distribuzione spaziale delle altezze di pioggia cumulate su 24h in mm dell'evento di pioggia.

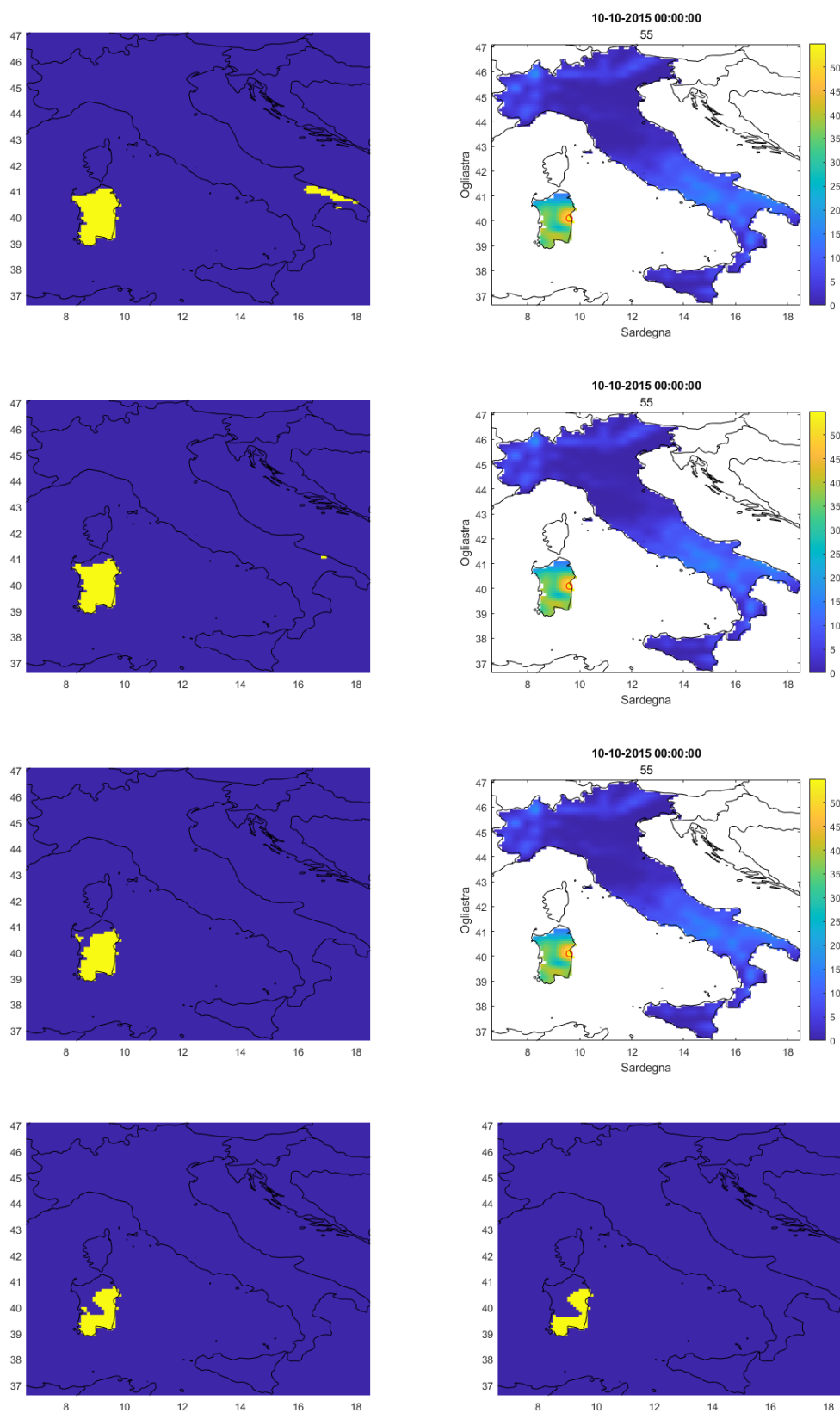


Figure 24- Evoluzione delle celle allertate durante l'evento piovoso del 16 ottobre 2015 applicando rispettivamente partendo dall'alto le soglie pluviometriche al 3%, 4%, 5%, 6% e 7% del PMA. Le altezze di pioggia in mm.

5.6. Suddivisione degli eventi in base alle regioni e province

Suddividere l'evento estremo di pioggia individuato per le regioni e per le province che sono state interessate è fondamentale per il proseguo del lavoro. L'idea di base è stata quella di suddividere l'evento, avvenuto in un qualsiasi giorno, in una serie di singoli eventi suddivisi in base alla regione o alla provincia, riportanti però la medesima data. Il risultato è stato una serie di file, uno per anno e per soglia applicata, all'interno dei quali sono state riportate tutte le date in cui si è verificato un evento piovoso estremo con annesse la provincia o la regione colpita.

Per comprendere meglio l'aspetto della suddivisione degli eventi viene riportato un esempio effettuato sia su base regionale che su quella provinciale. La suddivisione regionale presenta alcuni vantaggi rispetto a quella provinciale che naturalmente va a favore di un minor numero di eventi individuati e di conseguenza di una minore quantità di falsi segnali, mentre la suddivisione per province ovviamente restituirà, a parità di evento e soglia pluviometriche considerate, un numero maggiore di eventi.

Nella Figura 25 viene riportato l'evento utilizzato a scopo esemplificativo.

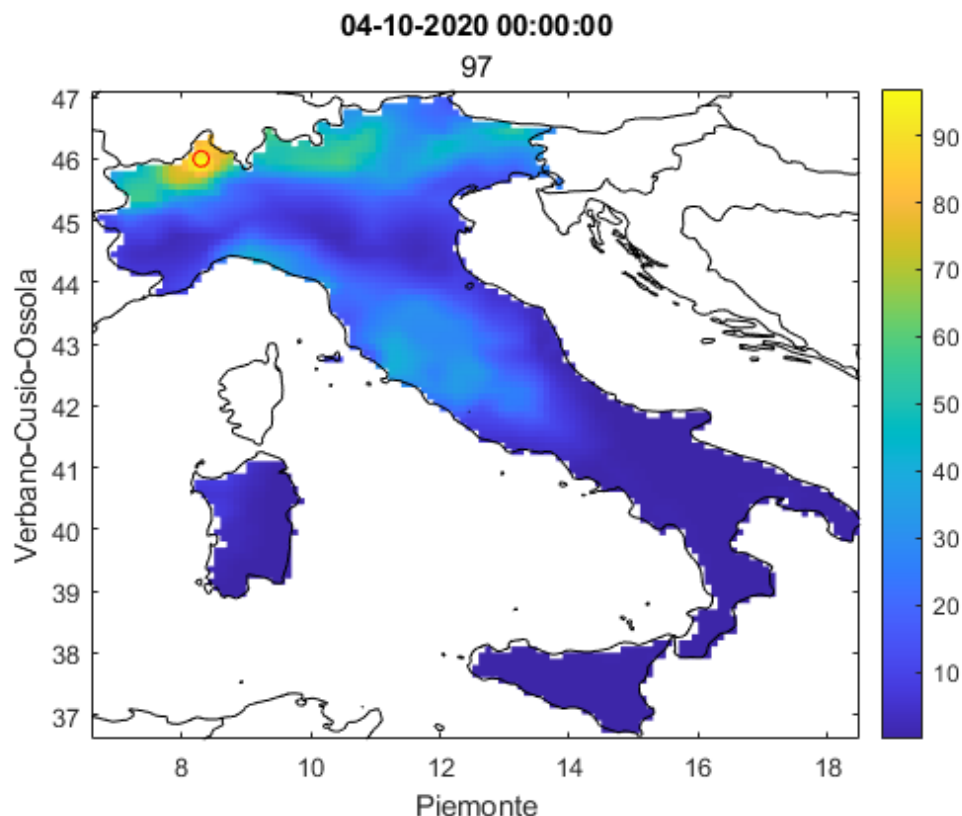


Figura 25- Esempio evento pioggia estrema del dato di ERA5-Land che fa riferimento al giorno effettivo 3/10/2020, con massimo di pioggia in mm e la regione e provincia in cui si è verificato. Altezze di pioggia in mm.

Prendendo come esempio l'evento verificatosi il 3 ottobre 2020, caratterizzato da un massimo di pioggia valutato intorno a 96 mm, avvenuto nella provincia del Verban-Cusio-Ossola in Piemonte, si può vedere come le celle in cui si è verificato il superamento sembrano essere solamente quelle rientranti all'interno di quella provincia o comunque nella parte settentrionale della regione Piemonte. La soglia pluviometrica applicata in questo caso è stata quella al 3% di PMA. Analizzando la Figura 26, dove vengono riportate, in colore giallo, tutte le celle in cui si è verificato il superamento, allo stesso modo come è stato fatto in tutte le immagini precedenti, si può vedere in modo chiaro quali siano le zone in cui si è superato il limite di pioggia imposto e dove queste siano posizionate. Infatti, si osserva un superamento non solo delle celle nel Piemonte settentrionale ma anche principalmente nelle regioni della Lombardia, Toscana ed Emilia-Romagna.

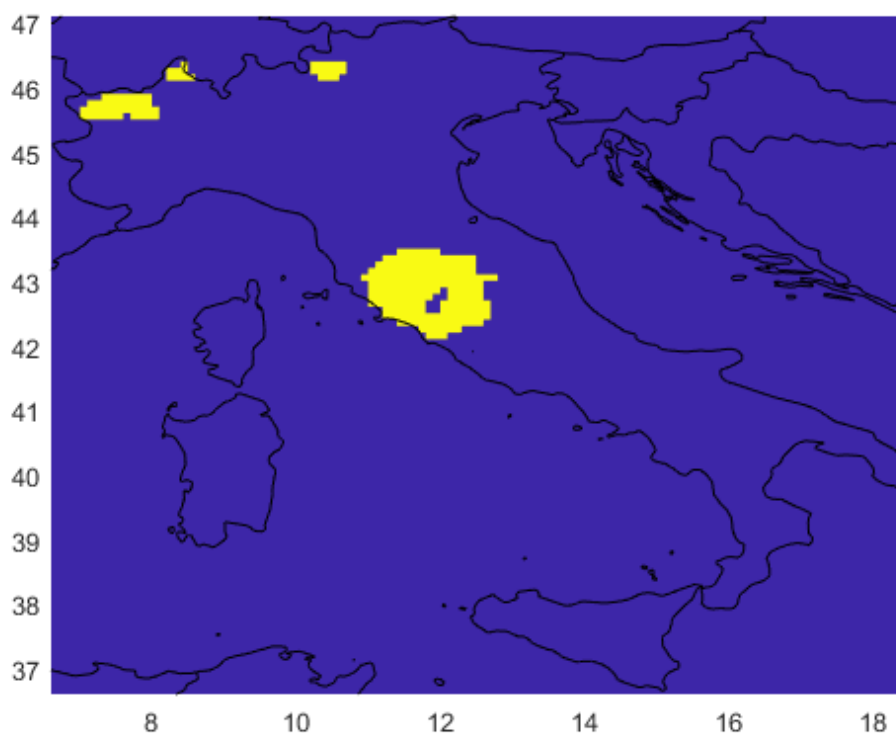


Figura 26 – Celle che hanno superato il valore di soglia dell'evento in Figura 25, sempre in giallo le celle che hanno superato e in blu quelle che non hanno superato

In questo esempio è palese come la distribuzione dell'evento piovoso e il superamento della soglia pluviometrica sia diversa da come ci si immagina dalla Figura 25. Infatti, vengono colpite e interessate molte più regioni e province rispetto al solo Piemonte o alla sola provincia del Verbano.

A partire dalla matrice rappresentata in Figura 26 è possibile suddividere l'evento che si è verificato in data 3 ottobre 2020 in una serie di eventi riportanti la stessa data, ma con associata una ed una sola provincia o regione. Questo passaggio è fondamentale poiché il confronto tra gli eventi ERA5-Land e quelli reali dei *database* EM-DAT e ESWD, che verrà eseguito con il programma Matlab, sarà realizzato imponendo una relazione di corrispondenza sia rispetto alla data in cui si è verificato l'evento e sia rispetto al luogo dello stesso.

Il risultato della suddivisione legato all'evento del 3 ottobre 2020 su base regionale è riportato nella Figura 27 che riporta il file di testo generato.

03-10-2020	00:00:00	Lombardia
03-10-2020	00:00:00	Trentino Alto Adige
03-10-2020	00:00:00	Piemonte
03-10-2020	00:00:00	Valle D'Aosta
03-10-2020	00:00:00	Liguria
03-10-2020	00:00:00	Emilia Romagna
04-10-2020	00:00:00	Piemonte
04-10-2020	00:00:00	Lombardia
04-10-2020	00:00:00	Trentino Alto Adige
04-10-2020	00:00:00	Valle D'Aosta
04-10-2020	00:00:00	Toscana
04-10-2020	00:00:00	Umbria
04-10-2020	00:00:00	Lazio
08-10-2020	00:00:00	Emilia Romagna
08-10-2020	00:00:00	Puglia
08-10-2020	00:00:00	Campania
12-10-2020	00:00:00	Veneto
12-10-2020	00:00:00	Friuli Venezia Giulia
12-10-2020	00:00:00	Lombardia
12-10-2020	00:00:00	Emilia Romagna
12-10-2020	00:00:00	Toscana
12-10-2020	00:00:00	Lazio

Figura 27- Eventi generati dopo la suddivisione per regioni dell'evento in Figura 25

Come riportato in Figura 27 infatti si evidenzia come l'evento che ha colpito il territorio italiano abbia superato la soglia di pioggia in molte più regioni di quanto ci si aspettasse. Infatti, oltre al Piemonte, sono state interessate anche la Lombardia, Trentino-Alto Adige, Valle d'Aosta, Toscana, Umbria e Lazio.

In modo analogo è stata eseguita la suddivisione dello stesso evento anche in base alle province interessate come riportato in Figura 28.

```
03-10-2020 00:00:00,La Spezia
03-10-2020 00:00:00,Imperia
04-10-2020 00:00:00,Verbano-Cusio-Ossola
04-10-2020 00:00:00,Sondrio
04-10-2020 00:00:00,Brescia
04-10-2020 00:00:00,Trento
04-10-2020 00:00:00,Aosta
04-10-2020 00:00:00,Vercelli
04-10-2020 00:00:00,Biella
04-10-2020 00:00:00,Siena
04-10-2020 00:00:00,Arezzo
04-10-2020 00:00:00,Perugia
04-10-2020 00:00:00,Grosseto
04-10-2020 00:00:00,Terni
04-10-2020 00:00:00,Viterbo
04-10-2020 00:00:00,Rieti
04-10-2020 00:00:00,Roma
08-10-2020 00:00:00,Ravenna
```

Figura 28- Eventi generati dopo la suddivisione per province dell'evento in Figura 25

Nella Figura 28 si osserva come il numero di province, così com'era prevedibile, risulta notevolmente più grande rispetto al numero di regioni interessate. Questo però può anche avere degli svantaggi, infatti, nel momento in cui si andrà successivamente ad analizzare e confrontare gli eventi ERA5-Land con quelli reali di EM-DAT ed ESWD, il fatto che vi siano tante province interessate contemporaneamente senza che sia effettuata un'ulteriore discriminazione su quali siano realmente interessate genera un numero elevato di singoli eventi. Eventi che, inevitabilmente, comportano l'aumento di falsi segnali. Allertare tante province significa incrementare il numero di falsi segnali che nella seconda parte dell'analisi, svolta in questo lavoro, occuperà un ruolo fondamentale per la valutazione della soglia pluviometrica migliore da utilizzare per individuare gli eventi estremi.

Per il confronto che è stato eseguito successivamente con il programma Matlab si è reso necessario suddividere gli eventi nel modo di seguito specificato. Separando gli eventi avvenuti lo stesso giorno per il numero di regioni o province interessate si rende più semplice la gestione e l'individuazione di eventi ERA5-Land che trovano un corrispettivo negli eventi reali provenienti dai *database* EMDAT o ESWD. Il problema principale, infatti, sta nel riconoscimento tra le stringhe, poiché, se in termini di

posizione geografica o di intervallo temporale presente tra i due eventi non vi sono particolari problemi, in quanto si tratta comunque di gestire dei numeri, il riconoscimento di stringhe, ovvero di vettori contenenti dall'interno caratteri o lettere, dev'essere gestito e controllato in modo più preciso. Il problema sussiste nel momento in cui si verificano delle disuguaglianze tra i due vettori di stringhe che riportano i luoghi in cui si sono verificati gli eventi di pioggia di ERA5-Land e quelli reali. In questo caso il diverso utilizzo di caratteri nella nomenclatura tra i due eventi influirebbe sulla corretta associazione tra gli stessi.

Questo è il caso, per esempio, della provincia di Verbano-Cusio-Ossola dove la differenza tra una scrittura "Verbano-Cusio-Ossola" e "Verbano Cusio Ossola" può dare vita a dei problemi di riconoscimento che viene effettuato tra le due stringhe.

5.6.1. Shapefile utilizzati per Il riconoscimento

Per la suddivisione degli eventi in base alle regioni ed alle province sono stati utilizzati all'interno del codice di Matlab due *shapefile* differenti, uno per le regioni e uno per le province. In questo caso lo *shapefile* di riferimento dev'essere un file validato e bisogna essere sicuri che i confini siano certificati e congrui con quanto contenuto nel *dataset* di ERA5-Land. Per questo motivo il file utilizzato per la suddivisione regionale e provinciale è stato scaricato dal sito di GADM.

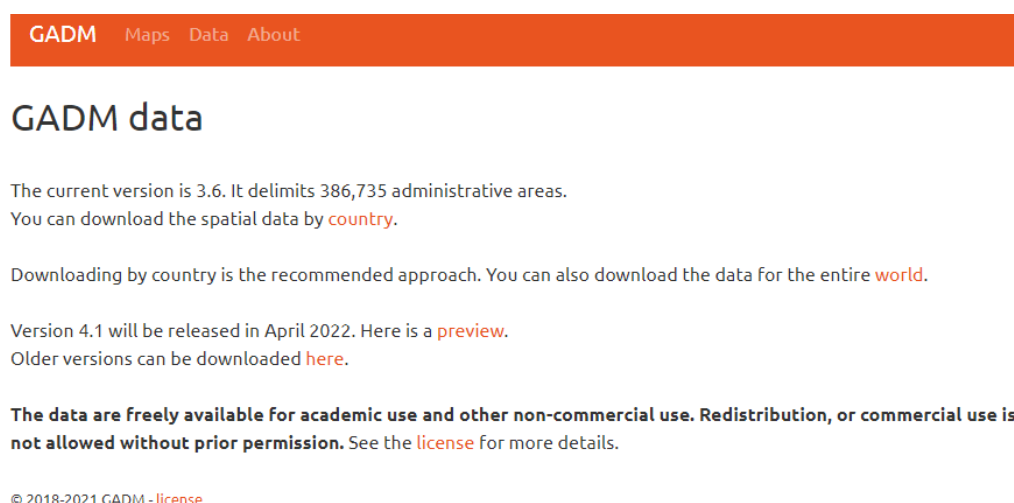


Figura 29- Schermata di home del sito di GADM

In questo sito (Figura 29) sono presenti gli *shapefile* che riportano i confini e la suddivisione in regioni, province e comuni per tutti gli stati dell'Europa e della maggior parte del mondo. I file presenti all'interno del sito sono suddivisi per ogni nazione su più livelli, in generale i livelli non sono costanti per tutti gli Stati ma variano in base alla grandezza e alla tipologia di suddivisione dei confini politici caratteristici di ogni singolo stato. La suddivisione politica del territorio nazionale viene genericamente divisa in quattro livelli:

- *Livello 0*: riporta i confini nazionali dello Stato interessato;
- *Livello 1*: riporta i confini politici della prima sotto suddivisione rispetto ai confini nazionali che, nel caso dell'Italia, corrisponde alle regioni;
- *Livello 2*: l'ulteriore suddivisione dei confini politici che, sempre nel caso italiano, fa riferimento alle province;
- *Livello 3*: l'ultimo livello che invece riporta i confini comunali.

Gli *shapefile* utilizzati per questo lavoro riguardano il Livello 1 e 2, ovvero regioni e province. Nella Figura 30 sono riportati i due *shapefile* utilizzati.

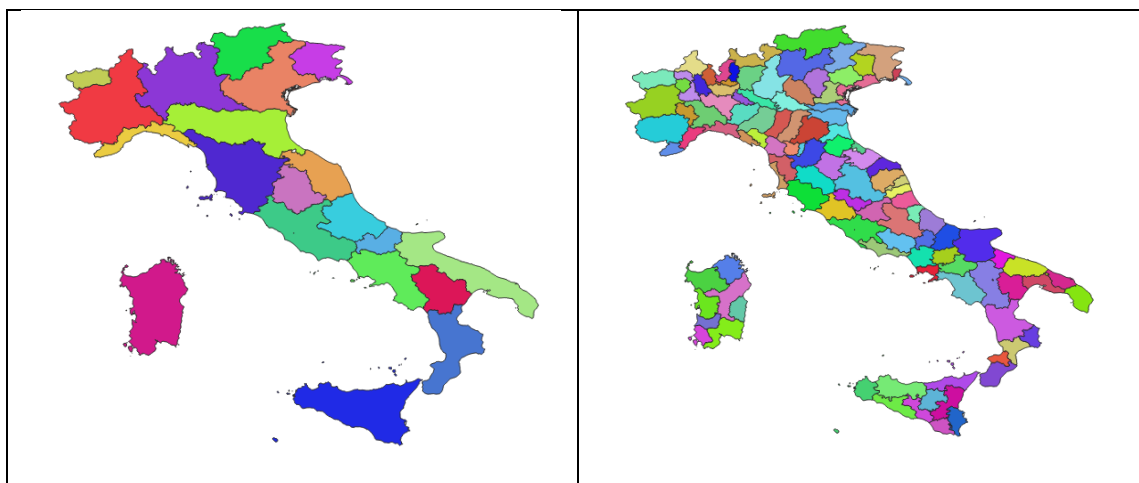


Figura 30- A sinistra *shapefile* regioni GADM, mentre a destra *shapefile* province sempre da GADM

I nomi delle regioni e delle province riportati all'interno di questi file però, alle volte, non sono congrui con quanto viene riportato generalmente in letteratura, per questo motivo si è reso necessario modificare e controllare alcuni nomi al fine di renderli uguali sia per gli eventi ERA5-Land che per quelli reali EM-DAT e ESWD.

5.6.1.1. Attribuzione regione o provincia alle celle ERA5-Land

Un'ulteriore aspetto che deve essere approfondito è di come effettivamente sia stata effettuata l'associazione tra le celle in cui si è verificato il superamento di soglia pluviometrica delle matrici di ERA5-Land con le regioni e le province contenute all'interno degli shapefile di GADM.

Per eseguire la corretta associazione tra le celle e le regioni o le province è stata utilizzata una funzione del codice di Matlab che permette di definire se un punto all'interno della matrice, avente un valore di latitudine e di longitudine specifico, rientri o meno all'interno dell'area di una provincia o di una regione. La funzione utilizzata è "*inpolygon*", funzione già presente all'interno del pacchetto base di Matlab e che opera restituendo un risultato sulla base della logica booleana di vero o falso.

$$in = inpolygon(Var1, Var2, Var3, Var4)$$

La stringa di codice utilizzata in questo lavoro è riportata sopra dove sono presenti:

- *Var1*: la latitudine della cella dove si è verificato il superamento della soglia di pioggia;
- *Var2*: la longitudine della cella in cui si è verificato il superamento della soglia pluviometrica;
- *Var3*: il vettore contenente tutti i valori di latitudine dei confini regionali o provinciali derivanti dallo shapefile di GADM;
- *Var4*: il vettore contenente tutti i valori di longitudine dei confini regionali o provinciali del medesimo shapefile di GADM;
- *in*: indica il risultato dell'applicazione della funzione *inpolygon* che può essere "1" in caso sia verificata, ovvero il punto (indicato da *Var1* e *Var2*) ricade all'interno della regione o provincia, e "0" nel caso contrario;

Attraverso le variabili *Var3* e *Var4* vengono ricostruiti i confini regionali o provinciali della regione o provincia interessata e poi questi valori vengono confrontati con i valori delle variabili *Var1* e *Var2* che caratterizzano la singola cella. La risposta della funzione al confronto è di tipo logico; infatti, restituisce il valore 1 nel caso in cui la cella ricada all'interno dei confini e 0 nel caso contrario.

Attraverso l'interazione di questa procedura per tutte le celle in cui si è verificato il superamento di soglia pluviometrica di un evento è possibile suddividere tutti gli eventi estremi di pioggia per le regioni e le province interessate, come dimostrato in Figura 27 e 28.

6. Risultati analisi regionali e provinciali

I risultati dell'analisi verranno illustrati all'interno di questo capitolo e sono stati divisi in base alla suddivisione regionale o provinciale dell'evento in modo da rendere il più ordinato possibile il resoconto.

Nelle Tabelle 5 e 6 riportate di seguito sono stati suddivisi i risultati sulla base dell'anno analizzato e della soglia pluviometrica applicata per individuare gli eventi di pioggia estrema. Sulla base del numero di eventi individuato dai dati di ERA5-Land e su quello di eventi reali EM-DAT e ESWD sono stati calcolati il numero di *falsi segnali*, *mancati segnali* e *corretti segnali*. Inoltre, all'interno di ogni tabella, quindi per ogni anno e per ogni soglia pluviometrica applicata, è stato eseguito il confronto tra eventi reali ed eventi ERA5-Land utilizzando diverse finestre temporali. In particolare, si è scelto di utilizzare finestre temporali che avessero diversa grandezza per valutare la diversa corrispondenza tra il giorno in cui si è verificato l'evento piovoso estremo e quello in cui si è verificata l'alluvione.

Poiché gli eventi ERA5-Land vengono riportati come cumulata giornaliera che fa riferimento alle ore 00:00 del giorno successivo si è scelto di utilizzare anche finestre temporali che comprendessero il giorno seguente. Per spiegare meglio questo fatto si prende ad esempio l'evento reale che si è verificato il 3 ottobre 2020. Se consideriamo questo evento e consideriamo la cumulata di pioggia di ERA5-Land riferita al giorno 3 ottobre 2020 questa fa riferimento al giorno 2 ottobre poiché, come già detto, la cumulata di pioggia viene riportata alle ore 00:00 del giorno dopo, che in questo caso è il 3 ottobre, e non alle ore 24:00 del 2 ottobre. Questo è un problema che può essere facilmente aggirato nel momento in cui se ne viene a conoscenza. Inoltre, la distanza in giorni, calcolata come differenza tra la data dell'evento reale EM-DAT e ESWD e quello ERA5-Land, viene eseguita secondo l'equazione:

$$Data_{EM-DAT\backslash ESWD} - Data_{ERA5-Land}$$

Per questo motivo si utilizzano finestre temporali che considerano anche il giorno dopo rispetto alle date riferite al dato di ERA5-Land. Poiché se l'evento si è verificato lo stesso giorno, per esempio il 3 ottobre, la data dell'evento nel *database* di EM-DAT

sarebbe effettivamente il 3 ottobre, ma la cumulata di ERA5-Land riferita al giorno 3 ottobre verrebbe riportata sotto la data del 4 ottobre. Utilizzando queste date nell'equazione precedente il risultato sarebbe "-1" poiché la data di ERA5-Land è successiva a quella EM-DAT. Per questo motivo è stato considerato anche il giorno dopo degli eventi ERA5-Land nell'analisi di confronto tra le due serie di eventi.

Riassumendo quindi rispetto agli eventi reali sono state considerate le piogge di EM-DAT e ESWD fino a 3 giorni prima, mentre rispetto alle date di ERA5-Land vengono considerati 2 giorni prima e il giorno dopo, che, come detto, corrisponde al giorno stesso dell'evento reale EM-DAT e ESWD.

Sono stati utilizzati 5 intervalli temporali che fanno riferimento alla data di ERA5-Land riportati di seguito:

- **1gp e 0gd**: (1 giorno prima e 0 giorni dopo) quindi si considera il giorno prima e quello esatto dell'evento ERA5-Land;
- **2gp e 0gd**: (2 giorno prima e 0 giorni dopo) due giorni prima e quello esatto dell'evento ERA5-Land;
- **2gp e 1gd**: (2 giorno prima e 1 giorni dopo) due giorni prima e uno dopo l'evento ERA5-Land;
- **1gp e 1gd**: (1 giorno prima e 1 giorni dopo) un giorno prima e uno dopo l'evento ERA5-Land;
- **0gp e 1gd**: (0 giorno prima e 1 giorni dopo) il giorno stesso e quello dopo.

Inoltre, all'interno delle tabelle dei risultati sono stati calcolati alcuni parametri che vengono riportati di seguito:

- **Intervallo**: le finestre temporali utilizzate rispetto alla data ERA5-Land per effettuare l'associazione tra evento reale ed evento ERA5-Land;
- Il **Numero Eventi Estremi** di pioggia individuati dai dati ERA5-Land suddivisi per giorno e per singola regione o provincia;
- Numero di **Eventi Realmente Accaduti** provenienti dai database EM-DAT e ESWD;

- Il numero di *Eventi Verificati* dal confronto tra gli eventi ERA5-Land e quelli ESWD e EM-DAT del punto precedente;
- Il numero di *Mancati Segnali*;
- Il numero di *Falsi Segnali*;
- Il *Costo* dovuto all'ammontare tra il costo di falsi segnali e mancati segnali.

Nel precedente elenco sono stati introdotti alcuni termini che necessitano di una maggiore spiegazione. I *falsi segnali*, *mancati segnali* e *corretti segnali* utilizzati per quantificare quelle che sono le statistiche legate alla qualità del confronto tra eventi modellati e reali. Vengono utilizzati molto per gli studi in campo idrologico e idrogeologico poiché si rendono molto utili per un approccio anche solo di tipo preliminare al problema della valutazione statistica.

Falso Segnale

Con il termine *falso segnale* si intende quindi la differenza in termini quantitativi tra il numero di segnali individuato dall'analisi nel *dataset* di ERA5-Land e gli eventi verificati.

$$Falsi\ Segnali = Eventi\ ERA5_{Land} - Eventi\ Verificati$$

I *falsi segnali* infatti rappresentano quel segnale che in teoria verrebbe lanciato poiché l'evento supera la soglia pluviometrica imposta in partenza ma che, di contro, non consegue nessun evento alluvionale o idrogeologico estremo nel *database* EM-DAT o ESWD.

Mancato Segnale

Con il termine *mancato segnale* invece si intende il numero di eventi reali (EM-DAT o ESWD) che non trova un riscontro negli eventi di ERA5-Land. In questo lavoro il numero di mancati segnali viene indicato come la differenza tra il numero di eventi reali meno il numero di eventi verificati.

$$Mancati\ Segnali = Eventi\ Reali - Eventi\ Verificati$$

Il *mancato segnale*, quindi, identifica quegli eventi per i quali non vi è stato il superamento di soglia pluviometrica in nessuna delle celle della regione o della provincia del *dataset* di ERA5-Land. In altre parole, esiste l'evento per EM-DAT o ESWD ma non quello ERA5-Land.

Corretto Segnale

Infine, con il termine *corretto segnale* si identificano i segnali che sono stati individuati durante l'analisi dei dati di ERA5-Land e che, allo stesso tempo, hanno un riscontro nel *database* di eventi reali EM-DAT o ESWD. Il riscontro deve essere effettuato sia in termini di distanza temporale, quindi lo stesso giorno o i giorni prima, sia in termini geografici quindi la stessa regione o la stessa provincia.

Costo

L'ultimo termine introdotto nell'elenco precedente è quello del costo, parametro con cui si intende quantificare in termini quantitativi la scelta adottata e quindi il numero di mancati segnali e falsi segnali. Ognuna di queste voci implica dei costi sia dovuti, per esempio, all'attivazione del servizio di protezione civile e dell'eventuale dislocamento delle unità di soccorso, mentre, nel caso di mancato segnale si fa riferimento ai danni materiali e immateriali che subiscono oggetti e persone a seguito della mancata emissione di un segnale di allarme legato ad un evento estremo di pioggia.

Numerosi studi hanno preso in considerazione i costi derivanti da questo tipo di eventi e hanno provato a definire un valore quantitativo, da poter essere utilizzato durante le analisi, per determinare quale sia il miglior valore di soglia pluviometrica da applicare per minimizzare i costi totali. In generale la definizione del costo legato ad un falso segnale e ad un mancato segnale è soggetta a molte variabili che cambiano da luogo a luogo e alle caratteristiche di antropizzazione del territorio.

La relazione e i valori che generalmente vengono utilizzati per questa relazione sono stati presi da Mazzoglio et al. (2019). In particolare, si parla di un rapporto che definisce che per ogni euro speso per le attività, le attivazioni, il personale e il

materiale spiegato sul territorio a seguito di un falso segnale se ne spendono circa cinque per gli interventi dovuti ad un mancato segnale. Questo è dovuto alla maggiore ingerenza dei danni provocati dall'evento alluvionale nel momento in cui non si riescono a prendere le adeguate contromisure. Si parla infatti di costi legati, come per esempio, a ricostruzioni, restauri, consolidamenti di terreni e strutture, risarcimenti a persone e aziende e a tutta la parte di danni immateriali che si generano. Infatti una parte non trascurabile dei costi è legata ai danni immateriali che subiscono le aziende o le persone, danni che non dipendono direttamente dal contatto con l'alluvione, con la frana o qualsiasi altro evento idrogeologico provocato dalle forti piogge, ma che sono dovuti all'interruzione dei servizi, alla distruzione di vie di comunicazione fondamentali per il trasferimento di beni e merci e a tutte quelle conseguenze che derivano dal verificarsi di un evento alluvionale ma che non vengono direttamente coinvolte con esso.

La formula utilizzata in questo lavoro:

$$\text{Costo Totale} = \text{Mancati Segnali} * 5 + \text{Falsi Segnali} * 1$$

Il confronto tra le soglie nei diversi anni avviene sulla base di quanto detto precedentemente; alla fine dell'analisi e dopo aver valutato tutti i costi per tutti gli anni e per tutte le soglie verrà poi definita la soglia pluviometrica migliore tra quelle prese in considerazione. Soglia pluviometrica che minimizza questo valore ma che mantiene sufficientemente alto il rapporto tra gli eventi reali EM-DAT e ESWD e quelli verificati dal confronto eventi reali ed eventi ERA5-Land.

6.1. Risultati analisi regionale

Anno 2020

2020	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	480	140	40	100	440	940
2gp e 0gd	480	140	47	93	433	898
2gp e 1gd	480	140	80	60	400	700
1gp e 1gd	480	140	76	64	404	724
0gp e 1gd	480	140	71	69	409	754

2020	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	268	140	32	108	236	776
2gp e 0gd	268	140	34	106	234	764
2gp e 1gd	268	140	57	83	211	626
1gp e 1gd	268	140	57	83	211	626
0gp e 1gd	268	140	50	90	218	668

2020	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	166	140	21	119	145	740
2gp e 0gd	166	140	23	117	143	728
2gp e 1gd	166	140	38	102	128	638
1gp e 1gd	166	140	36	104	130	650
0gp e 1gd	166	140	30	110	136	686

2020	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	106	140	15	125	91	716
2gp e 0gd	106	140	16	124	90	710
2gp e 1gd	106	140	29	111	77	632
1gp e 1gd	106	140	28	112	78	638
0gp e 1gd	106	140	23	117	83	668

2020	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	70	140	10	130	60	710
2gp e 0gd	70	140	10	130	60	710
2gp e 1gd	70	140	18	122	52	662
1gp e 1gd	70	140	18	122	52	662
0gp e 1gd	70	140	16	124	54	674

Anno 2019

2019	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	538	163	50	113	488	1053
2gp e 0gd	538	163	66	97	472	957
2gp e 1gd	538	163	109	54	429	699
1gp e 1gd	538	163	104	59	434	729
0gp e 1gd	538	163	100	63	438	753

2019	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	309	163	33	130	276	926
2gp e 0gd	309	163	47	116	262	842
2gp e 1gd	309	163	86	77	223	608
1gp e 1gd	309	163	80	83	229	644
0gp e 1gd	309	163	76	87	233	668

2019	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	191	163	25	138	166	856
2gp e 0gd	191	163	35	128	156	796
2gp e 1gd	191	163	71	92	120	580
1gp e 1gd	191	163	64	99	127	622
0gp e 1gd	191	163	59	104	132	652

2019	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	121	163	12	151	109	864
2gp e 0gd	121	163	16	147	105	840
2gp e 1gd	121	163	46	117	75	660
1gp e 1gd	121	163	42	121	79	684
0gp e 1gd	121	163	41	122	80	690

2019	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	78	163	10	153	68	833
2gp e 0gd	78	163	12	151	66	821
2gp e 1gd	78	163	33	130	45	695
1gp e 1gd	78	163	31	132	47	707
0gp e 1gd	78	163	31	132	47	707

Anno 2018

2018	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	584	134	39	95	545	1020
2gp e 0gd	584	134	47	87	537	972
2gp e 1gd	584	134	67	67	517	852
1gp e 1gd	584	134	62	72	522	882
0gp e 1gd	584	134	58	76	526	906

2018	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	361	134	25	109	336	881
2gp e 0gd	361	134	33	101	328	833
2gp e 1gd	361	134	54	80	307	707
1gp e 1gd	361	134	49	85	312	737
0gp e 1gd	361	134	46	88	315	755

2018	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	209	134	16	118	193	783
2gp e 0gd	209	134	23	111	186	741
2gp e 1gd	209	134	42	92	167	627
1gp e 1gd	209	134	35	99	174	669
0gp e 1gd	209	134	34	100	175	675

2018	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	134	134	12	122	122	732
2gp e 0gd	134	134	18	116	116	696
2gp e 1gd	134	134	34	100	100	600
1gp e 1gd	134	134	28	106	106	636
0gp e 1gd	134	134	28	106	106	636

2018	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	84	134	9	125	75	700
2gp e 0gd	84	134	12	122	72	682
2gp e 1gd	84	134	20	114	64	634
1gp e 1gd	84	134	17	117	67	652
0gp e 1gd	84	134	16	118	68	658

Anno 2017

2017	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	419	57	11	46	408	638
2gp e 0gd	419	57	16	41	403	608
2gp e 1gd	419	57	24	33	395	560
1gp e 1gd	419	57	22	35	397	572
0gp e 1gd	419	57	22	35	397	572

2017	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	243	57	8	49	235	480
2gp e 0gd	243	57	10	47	233	468
2gp e 1gd	243	57	19	38	224	414
1gp e 1gd	243	57	19	38	224	414
0gp e 1gd	243	57	19	38	224	414

2017	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	152	57	7	50	145	395
2gp e 0gd	152	57	9	48	143	383
2gp e 1gd	152	57	18	39	134	329
1gp e 1gd	152	57	18	39	134	329
0gp e 1gd	152	57	18	39	134	329

2017	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	90	57	6	51	84	339
2gp e 0gd	90	57	7	50	83	333
2gp e 1gd	90	57	15	42	75	285
1gp e 1gd	90	57	15	42	75	285
0gp e 1gd	90	57	15	42	75	285

2017	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	60	57	4	53	56	321
2gp e 0gd	60	57	5	52	55	315
2gp e 1gd	60	57	12	45	48	273
1gp e 1gd	60	57	12	45	48	273
0gp e 1gd	60	57	12	45	48	273

Anno 2016

2016	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	496	97	22	75	474	849
2gp e 0gd	496	97	24	73	472	837
2gp e 1gd	496	97	57	40	439	639
1gp e 1gd	496	97	55	42	441	651
0gp e 1gd	496	97	54	43	442	657

2016	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	264	97	13	84	251	671
2gp e 0gd	264	97	15	82	249	659
2gp e 1gd	264	97	44	53	220	485
1gp e 1gd	264	97	44	53	220	485
0gp e 1gd	264	97	44	53	220	485

2016	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	153	97	11	86	142	572
2gp e 0gd	153	97	11	86	142	572
2gp e 1gd	153	97	34	63	119	434
1gp e 1gd	153	97	34	63	119	434
0gp e 1gd	153	97	33	64	120	440

2016	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	93	97	9	88	84	524
2gp e 0gd	93	97	9	88	84	524
2gp e 1gd	93	97	29	68	64	404
1gp e 1gd	93	97	29	68	64	404
0gp e 1gd	93	97	29	68	64	404

2016	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	56	97	6	91	50	505
2gp e 0gd	56	97	6	91	50	505
2gp e 1gd	56	97	23	74	33	403
1gp e 1gd	56	97	23	74	33	403
0gp e 1gd	56	97	23	74	33	403

Anno 2015

2015	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	499	95	30	65	469	794
2gp e 0gd	499	95	33	62	466	776
2gp e 1gd	499	95	59	36	440	620
1gp e 1gd	499	95	57	38	442	632
0gp e 1gd	499	95	54	41	445	650

2015	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	293	95	19	76	274	654
2gp e 0gd	293	95	21	74	272	642
2gp e 1gd	293	95	48	47	245	480
1gp e 1gd	293	95	46	49	247	492
0gp e 1gd	293	95	44	51	249	504

2015	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	184	95	14	81	170	575
2gp e 0gd	184	95	15	80	169	569
2gp e 1gd	184	95	37	58	147	437
1gp e 1gd	184	95	36	59	148	443
0gp e 1gd	184	95	35	60	149	449

2015	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	126	95	13	82	113	523
2gp e 0gd	126	95	14	81	112	517
2gp e 1gd	126	95	29	66	97	427
1gp e 1gd	126	95	28	67	98	433
0gp e 1gd	126	95	27	68	99	439

2015	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	85	95	11	84	74	494
2gp e 0gd	85	95	11	84	74	494
2gp e 1gd	85	95	23	72	62	422
1gp e 1gd	85	95	23	72	62	422
0gp e 1gd	85	95	22	73	63	428

Anno 2014

2014	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	530	142	49	93	481	946
2gp e 0gd	530	142	56	86	474	904
2gp e 1gd	530	142	88	54	442	712
1gp e 1gd	530	142	84	58	446	736
0gp e 1gd	530	142	78	64	452	772

2014	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	274	142	36	106	238	768
2gp e 0gd	274	142	43	99	231	726
2gp e 1gd	274	142	68	74	206	576
1gp e 1gd	274	142	64	78	210	600
0gp e 1gd	274	142	55	87	219	654

2014	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	150	142	23	119	127	722
2gp e 0gd	150	142	27	115	123	698
2gp e 1gd	150	142	47	95	103	578
1gp e 1gd	150	142	44	98	106	596
0gp e 1gd	150	142	38	104	112	632

2014	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	88	142	13	129	75	720
2gp e 0gd	88	142	14	128	74	714
2gp e 1gd	88	142	28	114	60	630
1gp e 1gd	88	142	27	115	61	636
0gp e 1gd	88	142	23	119	65	660

2014	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	54	142	12	130	42	692
2gp e 0gd	54	142	13	129	41	686
2gp e 1gd	54	142	24	118	30	620
1gp e 1gd	54	142	23	119	31	626
0gp e 1gd	54	142	19	123	35	650

Anno 2013

2013	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	521	101	30	71	491	846
2gp e 0gd	521	101	35	66	486	816
2gp e 1gd	521	101	61	40	460	660
1gp e 1gd	521	101	60	41	461	666
0gp e 1gd	521	101	57	44	464	684

2013	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	282	101	23	78	259	649
2gp e 0gd	282	101	27	74	255	625
2gp e 1gd	282	101	48	53	234	499
1gp e 1gd	282	101	46	55	236	511
0gp e 1gd	282	101	45	56	237	517

2013	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	159	101	19	82	140	550
2gp e 0gd	159	101	19	82	140	550
2gp e 1gd	159	101	35	66	124	454
1gp e 1gd	159	101	33	68	126	466
0gp e 1gd	159	101	32	69	127	472

2013	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	96	101	12	89	84	529
2gp e 0gd	96	101	15	86	81	511
2gp e 1gd	96	101	28	73	68	433
1gp e 1gd	96	101	25	76	71	451
0gp e 1gd	96	101	25	76	71	451

2013	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	67	101	11	90	56	506
2gp e 0gd	67	101	14	87	53	488
2gp e 1gd	67	101	24	77	43	428
1gp e 1gd	67	101	21	80	46	446
0gp e 1gd	67	101	21	80	46	446

Anno 2012

2012	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	481	67	20	47	461	696
2gp e 0gd	481	67	23	44	458	678
2gp e 1gd	481	67	47	20	434	534
1gp e 1gd	481	67	46	21	435	540
0gp e 1gd	481	67	46	21	435	540

2012	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	285	67	12	55	273	548
2gp e 0gd	285	67	15	52	270	530
2gp e 1gd	285	67	35	32	250	410
1gp e 1gd	285	67	33	34	252	422
0gp e 1gd	285	67	33	34	252	422

2012	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	165	67	9	58	156	446
2gp e 0gd	165	67	10	57	155	440
2gp e 1gd	165	67	22	45	143	368
1gp e 1gd	165	67	22	45	143	368
0gp e 1gd	165	67	21	46	144	374

2012	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	112	67	9	58	103	393
2gp e 0gd	112	67	10	57	102	387
2gp e 1gd	112	67	19	48	93	333
1gp e 1gd	112	67	19	48	93	333
0gp e 1gd	112	67	18	49	94	339

2012	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	75	67	8	59	67	362
2gp e 0gd	75	67	9	58	66	356
2gp e 1gd	75	67	17	50	58	308
1gp e 1gd	75	67	17	50	58	308
0gp e 1gd	75	67	16	51	59	314

Anno 2011

2011	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	420	71	24	47	396	631
2gp e 0gd	420	71	26	45	394	619
2gp e 1gd	420	71	46	25	374	499
1gp e 1gd	420	71	46	25	374	499
0gp e 1gd	420	71	45	26	375	505

2011	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	238	71	19	52	219	479
2gp e 0gd	238	71	19	52	219	479
2gp e 1gd	238	71	39	32	199	359
1gp e 1gd	238	71	39	32	199	359
0gp e 1gd	238	71	39	32	199	359

2011	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	154	71	15	56	139	419
2gp e 0gd	154	71	15	56	139	419
2gp e 1gd	154	71	34	37	120	305
1gp e 1gd	154	71	34	37	120	305
0gp e 1gd	154	71	34	37	120	305

2011	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	98	71	11	60	87	387
2gp e 0gd	98	71	11	60	87	387
2gp e 1gd	98	71	25	46	73	303
1gp e 1gd	98	71	25	46	73	303
0gp e 1gd	98	71	24	47	74	309

2011	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	67	71	8	63	59	374
2gp e 0gd	67	71	8	63	59	374
2gp e 1gd	67	71	22	49	45	290
1gp e 1gd	67	71	22	49	45	290
0gp e 1gd	67	71	21	50	46	296

Anno 2010

2010	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	604	88	37	51	567	822
2gp e 0gd	604	88	38	50	566	816
2gp e 1gd	604	88	64	24	540	660
1gp e 1gd	604	88	64	24	540	660
0gp e 1gd	604	88	64	24	540	660

2010	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	342	88	25	63	317	632
2gp e 0gd	342	88	25	63	317	632
2gp e 1gd	342	88	51	37	291	476
1gp e 1gd	342	88	51	37	291	476
0gp e 1gd	342	88	51	37	291	476

2010	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	212	88	17	71	195	550
2gp e 0gd	212	88	17	71	195	550
2gp e 1gd	212	88	32	56	180	460
1gp e 1gd	212	88	32	56	180	460
0gp e 1gd	212	88	31	57	181	466

2010	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	125	88	10	78	115	505
2gp e 0gd	125	88	10	78	115	505
2gp e 1gd	125	88	22	66	103	433
1gp e 1gd	125	88	22	66	103	433
0gp e 1gd	125	88	20	68	105	445

2010	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Regione	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	81	88	6	82	75	485
2gp e 0gd	81	88	6	82	75	485
2gp e 1gd	81	88	20	68	61	401
1gp e 1gd	81	88	20	68	61	401
0gp e 1gd	81	88	18	70	63	413

Tabella 5 - Risultati analisi Matlab per gli eventi di pioggia estrema di ERA5-Land tra il 2010 e 2020 per le regioni

6.2. Risultati analisi provinciale

Anno 2020

2020	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1349	152	21	131	1328	1983
2gp e 0gd	1349	152	25	127	1324	1959
2gp e 1gd	1349	152	56	96	1293	1773
1gp e 1gd	1349	152	55	97	1294	1779
0gp e 1gd	1349	152	53	99	1296	1791

2020	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	690	152	16	136	674	1354
2gp e 0gd	690	152	17	135	673	1348
2gp e 1gd	690	152	42	110	648	1198
1gp e 1gd	690	152	41	111	649	1204
0gp e 1gd	690	152	36	116	654	1234

2020	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	381	152	9	143	372	1087
2gp e 0gd	381	152	10	142	371	1081
2gp e 1gd	381	152	26	126	355	985
1gp e 1gd	381	152	25	127	356	991
0gp e 1gd	381	152	22	130	359	1009

2020	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	232	152	6	146	226	956
2gp e 0gd	232	152	7	145	225	950
2gp e 1gd	232	152	20	132	212	872
1gp e 1gd	232	152	19	133	213	878
0gp e 1gd	232	152	16	136	216	896

2020	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	146	152	3	149	143	888
2gp e 0gd	146	152	3	149	143	888
2gp e 1gd	146	152	7	145	139	864
1gp e 1gd	146	152	7	145	139	864
0gp e 1gd	146	152	6	146	140	870

ANNO 2019

2019	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1558	266	40	226	1518	2648
2gp e 0gd	1558	266	62	204	1496	2516
2gp e 1gd	1558	266	132	134	1426	2096
1gp e 1gd	1558	266	122	144	1436	2156
0gp e 1gd	1558	266	116	150	1442	2192

2019	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	841	266	20	246	821	2051
2gp e 0gd	841	266	37	229	804	1949
2gp e 1gd	841	266	100	166	741	1571
1gp e 1gd	841	266	87	179	754	1649
0gp e 1gd	841	266	81	185	760	1685

2019	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	479	266	10	256	469	1749
2gp e 0gd	479	266	21	245	458	1683
2gp e 1gd	479	266	74	192	405	1365
1gp e 1gd	479	266	64	202	415	1425
0gp e 1gd	479	266	61	205	418	1443

2019	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	293	266	10	256	283	1563
2gp e 0gd	293	266	21	245	272	1497
2gp e 1gd	293	266	74	192	219	1179
1gp e 1gd	293	266	64	202	229	1239
0gp e 1gd	293	266	61	205	232	1257

2019	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	178	266	1	265	177	1502
2gp e 0gd	178	266	3	263	175	1490
2gp e 1gd	178	266	35	231	143	1298
1gp e 1gd	178	266	33	233	145	1310
0gp e 1gd	178	266	33	233	145	1310

ANNO 2018

2018	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1704	164	34	130	1670	2320
2gp e 0gd	1704	164	42	122	1662	2272
2gp e 1gd	1704	164	66	98	1638	2128
1gp e 1gd	1704	164	60	104	1644	2164
0gp e 1gd	1704	164	58	106	1646	2176

2018	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	913	164	24	140	889	1589
2gp e 0gd	913	164	29	135	884	1559
2gp e 1gd	913	164	50	114	863	1433
1gp e 1gd	913	164	45	119	868	1463
0gp e 1gd	913	164	44	120	869	1469

2018	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	517	164	17	147	500	1235
2gp e 0gd	517	164	20	144	497	1217
2gp e 1gd	517	164	39	125	478	1103
1gp e 1gd	517	164	36	128	481	1121
0gp e 1gd	517	164	35	129	482	1127

2018	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	297	164	12	152	285	1045
2gp e 0gd	297	164	15	149	282	1027
2gp e 1gd	297	164	33	131	264	919
1gp e 1gd	297	164	30	134	267	937
0gp e 1gd	297	164	29	135	268	943

2018	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	180	164	9	155	171	946
2gp e 0gd	180	164	10	154	170	940
2gp e 1gd	180	164	18	146	162	892
1gp e 1gd	180	164	17	147	163	898
0gp e 1gd	180	164	17	147	163	898

ANNO 2017

2017	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1131	68	10	58	1121	1411
2gp e 0gd	1131	68	10	58	1121	1411
2gp e 1gd	1131	68	30	38	1101	1291
1gp e 1gd	1131	68	30	38	1101	1291
0gp e 1gd	1131	68	30	38	1101	1291

2017	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	607	68	9	59	598	893
2gp e 0gd	607	68	9	59	598	893
2gp e 1gd	607	68	27	41	580	785
1gp e 1gd	607	68	27	41	580	785
0gp e 1gd	607	68	27	41	580	785

2017	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	346	68	7	61	339	644
2gp e 0gd	346	68	7	61	339	644
2gp e 1gd	346	68	20	48	326	566
1gp e 1gd	346	68	20	48	326	566
0gp e 1gd	346	68	20	48	326	566

2017	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	209	68	6	62	203	513
2gp e 0gd	209	68	7	61	202	507
2gp e 1gd	209	68	18	50	191	441
1gp e 1gd	209	68	18	50	191	441
0gp e 1gd	209	68	18	50	191	441

2017	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	134	68	4	64	130	450
2gp e 0gd	134	68	4	64	130	450
2gp e 1gd	134	68	14	54	120	390
1gp e 1gd	134	68	14	54	120	390
0gp e 1gd	134	68	14	54	120	390

ANNO 2016

2016	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1254	115	14	101	1240	1745
2gp e 0gd	1254	115	16	99	1238	1733
2gp e 1gd	1254	115	57	58	1197	1487
1gp e 1gd	1254	115	56	59	1198	1493
0gp e 1gd	1254	115	56	59	1198	1493

2016	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	628	115	9	106	619	1149
2gp e 0gd	628	115	9	106	619	1149
2gp e 1gd	628	115	40	75	588	963
1gp e 1gd	628	115	40	75	588	963
0gp e 1gd	628	115	40	75	588	963

2016	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	356	115	8	107	348	883
2gp e 0gd	356	115	8	107	348	883
2gp e 1gd	356	115	28	87	328	763
1gp e 1gd	356	115	28	87	328	763
0gp e 1gd	356	115	28	87	328	763

2016	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	213	115	4	111	209	764
2gp e 0gd	213	115	4	111	209	764
2gp e 1gd	213	115	21	94	192	662
1gp e 1gd	213	115	21	94	192	662
0gp e 1gd	213	115	21	94	192	662

2016	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	130	115	3	112	127	687
2gp e 0gd	130	115	3	112	127	687
2gp e 1gd	130	115	15	100	115	615
1gp e 1gd	130	115	15	100	115	615
0gp e 1gd	130	115	15	100	115	615

ANNO 2015

2015	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1432	81	19	62	1413	1723
2gp e 0gd	1432	81	19	62	1413	1723
2gp e 1gd	1432	81	41	40	1391	1591
1gp e 1gd	1432	81	41	40	1391	1591
0gp e 1gd	1432	81	40	41	1392	1597

2015	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	817	81	11	70	806	1156
2gp e 0gd	817	81	11	70	806	1156
2gp e 1gd	817	81	33	48	784	1024
1gp e 1gd	817	81	33	48	784	1024
0gp e 1gd	817	81	33	48	784	1024

2015	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	480	81	7	74	473	843
2gp e 0gd	480	81	7	74	473	843
2gp e 1gd	480	81	26	55	454	729
1gp e 1gd	480	81	26	55	454	729
0gp e 1gd	480	81	26	55	454	729

2015	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	320	81	7	74	313	683
2gp e 0gd	320	81	7	74	313	683
2gp e 1gd	320	81	19	62	301	611
1gp e 1gd	320	81	19	62	301	611
0gp e 1gd	320	81	19	62	301	611

2015	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	208	81	3	78	205	595
2gp e 0gd	208	81	3	78	205	595
2gp e 1gd	208	81	17	64	191	511
1gp e 1gd	208	81	17	64	191	511
0gp e 1gd	208	81	17	64	191	511

ANNO 2014

2014	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1404	160	40	120	1364	1964
2gp e 0gd	1404	160	46	114	1358	1928
2gp e 1gd	1404	160	87	73	1317	1682
1gp e 1gd	1404	160	85	75	1319	1694
0gp e 1gd	1404	160	76	84	1328	1748

2014	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	638	160	26	134	612	1282
2gp e 0gd	638	160	30	130	608	1258
2gp e 1gd	638	160	57	103	581	1096
1gp e 1gd	638	160	54	106	584	1114
0gp e 1gd	638	160	48	112	590	1150

2014	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	326	160	18	142	308	1018
2gp e 0gd	326	160	19	141	307	1012
2gp e 1gd	326	160	39	121	287	892
1gp e 1gd	326	160	38	122	288	898
0gp e 1gd	326	160	34	126	292	922

2014	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	187	160	11	149	176	921
2gp e 0gd	187	160	12	148	175	915
2gp e 1gd	187	160	26	134	161	831
1gp e 1gd	187	160	25	135	162	837
0gp e 1gd	187	160	23	137	164	849

2014	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	111	160	9	151	102	857
2gp e 0gd	111	160	9	151	102	857
2gp e 1gd	111	160	20	140	91	791
1gp e 1gd	111	160	20	140	91	791
0gp e 1gd	111	160	18	142	93	803

ANNO 2013

2013	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1450	138	27	111	1423	1978
2gp e 0gd	1450	138	35	103	1415	1930
2gp e 1gd	1450	138	71	67	1379	1714
1gp e 1gd	1450	138	64	74	1386	1756
0gp e 1gd	1450	138	63	75	1387	1762

2013	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	692	138	17	121	675	1280
2gp e 0gd	692	138	22	116	670	1250
2gp e 1gd	692	138	49	89	643	1088
1gp e 1gd	692	138	44	94	648	1118
0gp e 1gd	692	138	44	94	648	1118

2013	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	374	138	10	128	364	1004
2gp e 0gd	374	138	15	123	359	974
2gp e 1gd	374	138	34	104	340	860
1gp e 1gd	374	138	29	109	345	890
0gp e 1gd	374	138	29	109	345	890

2013	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	211	138	8	130	203	853
2gp e 0gd	211	138	13	125	198	823
2gp e 1gd	211	138	28	110	183	733
1gp e 1gd	211	138	23	115	188	763
0gp e 1gd	211	138	23	115	188	763

2013	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	154	138	7	131	147	802
2gp e 0gd	154	138	11	127	143	778
2gp e 1gd	154	138	22	116	132	712
1gp e 1gd	154	138	18	120	136	736
0gp e 1gd	154	138	18	120	136	736

ANNO 2012

2012	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1328	85	18	67	1310	1645
2gp e 0gd	1328	85	20	65	1308	1633
2gp e 1gd	1328	85	41	44	1287	1507
1gp e 1gd	1328	85	41	44	1287	1507
0gp e 1gd	1328	85	41	44	1287	1507

2012	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	728	85	14	71	714	1069
2gp e 0gd	728	85	17	68	711	1051
2gp e 1gd	728	85	33	52	695	955
1gp e 1gd	728	85	33	52	695	955
0gp e 1gd	728	85	33	52	695	955

2012	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	422	85	12	73	410	775
2gp e 0gd	422	85	15	70	407	757
2gp e 1gd	422	85	27	58	395	685
1gp e 1gd	422	85	26	59	396	691
0gp e 1gd	422	85	26	59	396	691

2012	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	275	85	10	75	265	640
2gp e 0gd	275	85	12	73	263	628
2gp e 1gd	275	85	22	63	253	568
1gp e 1gd	275	85	21	64	254	574
0gp e 1gd	275	85	21	64	254	574

2012	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	181	85	7	78	174	564
2gp e 0gd	181	85	7	78	174	564
2gp e 1gd	181	85	18	67	163	498
1gp e 1gd	181	85	18	67	163	498
0gp e 1gd	181	85	18	67	163	498

ANNO 2011

2011	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1190	98	23	75	1167	1542
2gp e 0gd	1190	98	24	74	1166	1536
2gp e 1gd	1190	98	61	37	1129	1314
1gp e 1gd	1190	98	60	38	1130	1320
0gp e 1gd	1190	98	60	38	1130	1320

2011	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	616	98	13	85	603	1028
2gp e 0gd	616	98	13	85	603	1028
2gp e 1gd	616	98	50	48	566	806
1gp e 1gd	616	98	50	48	566	806
0gp e 1gd	616	98	49	49	567	812

2011	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	371	98	8	90	363	813
2gp e 0gd	371	98	8	90	363	813
2gp e 1gd	371	98	41	57	330	615
1gp e 1gd	371	98	41	57	330	615
0gp e 1gd	371	98	41	57	330	615

2011	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	232	98	8	90	224	674
2gp e 0gd	232	98	8	90	224	674
2gp e 1gd	232	98	31	67	201	536
1gp e 1gd	232	98	31	67	201	536
0gp e 1gd	232	98	31	67	201	536

2011	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	153	98	6	92	147	607
2gp e 0gd	153	98	6	92	147	607
2gp e 1gd	153	98	27	71	126	481
1gp e 1gd	153	98	27	71	126	481
0gp e 1gd	153	98	27	71	126	481

ANNO 2010

2010	Soglia 3%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	1799	117	34	83	1765	2180
2gp e 0gd	1799	117	34	83	1765	2180
2gp e 1gd	1799	117	74	43	1725	1940
1gp e 1gd	1799	117	74	43	1725	1940
0gp e 1gd	1799	117	73	44	1726	1946

2010	Soglia 4%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	979	117	19	98	960	1450
2gp e 0gd	979	117	19	98	960	1450
2gp e 1gd	979	117	47	70	932	1282
1gp e 1gd	979	117	47	70	932	1282
0gp e 1gd	979	117	46	71	933	1288

2010	Soglia 5%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	563	117	10	107	553	1088
2gp e 0gd	563	117	10	107	553	1088
2gp e 1gd	563	117	32	85	531	956
1gp e 1gd	563	117	32	85	531	956
0gp e 1gd	563	117	31	86	532	962

2010	Soglia 6%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	353	117	6	111	347	902
2gp e 0gd	353	117	6	111	347	902
2gp e 1gd	353	117	21	96	332	812
1gp e 1gd	353	117	21	96	332	812
0gp e 1gd	353	117	20	97	333	818

2010	Soglia 7%					
Intervallo	Numero Eventi Provincia	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT)	Eventi Verificati/ Corretto Segnale	Mancato Segnale	Falso Segnale	Costo
1gp e 0gd	220	117	5	112	215	775
2gp e 0gd	220	117	5	112	215	775
2gp e 1gd	220	117	16	101	204	709
1gp e 1gd	220	117	16	101	204	709
0gp e 1gd	220	117	16	101	204	709

Tabella 6 - Risultati analisi Matlab per gli eventi di pioggia estrema di ERA5-Land tra il 2010 e 2020 per le province

7. Controllo eventi ERA5-LAND con eventi noti

Com'è stato descritto e accennato nei precedenti capitoli, il *dataset* di ERA5-Land può presentare dei problemi nel rappresentare correttamente alcuni fenomeni. Nel caso delle piogge questo è stato già trattato, infatti il dato precipitativo viene ricavato come dato derivato e ottenuto attraverso la simulazione del modello previsionale. Di conseguenza non è un dato validato o forzato ad essere congruo con i dati di pioggia reali, ma ottenuto a partire da altri parametri e che quindi può presentare dei difetti nella corretta rappresentazione di alcuni fenomeni precipitativi. Alcuni fenomeni di natura convettiva, caratterizzati da grandi intensità ma con durate relativamente brevi, tendono a non essere correttamente simulate, mentre gli eventi più grandi, che interessano porzioni maggiori di superficie terrestre e che si sviluppano con tempi relativamente più lunghi, vengono simulate in modo sensibilmente migliore. Nei paragrafi successivi verranno approfonditi alcuni di questi eventi realmente accaduti e verranno messi a confronto con le simulazioni degli stessi giorni di ERA5-Land.

7.1. Evento del 14/15 luglio 2020, Palermo

L'evento in questione è avvenuto a Palermo tra il 14 e 15 luglio 2020. È stato caratterizzato da uno sviluppo rapido di una cella temporalesca violenta che nel pomeriggio di mercoledì 15 luglio 2020 ha colpito principalmente la città di Palermo. I report disponibili riportano che siano stati scaricati a terra oltre 130 mm di pioggia in due ore nella parte più settentrionale della città. Le caratteristiche dell'evento eccezionale sono state osservate dal SIAS (*Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano*) che ha riportato intensità istantanee molto elevate con picchi di pioggia di 168 mm/h intorno alle 17 e 30 del 15 luglio, ovvero nel momento di massima intensità della bomba d'acqua. Il principale problema è stato rappresentato dal fatto che la maggior parte dell'acqua precipitata a terra è caduta su un suolo urbanizzato e molto antropizzato che ha portato al rapido sviluppo di allagamenti in molte parti della città.

Le cumulate di pioggia del *dataset* di ERA5-Land sono riportate nella Figura 36.

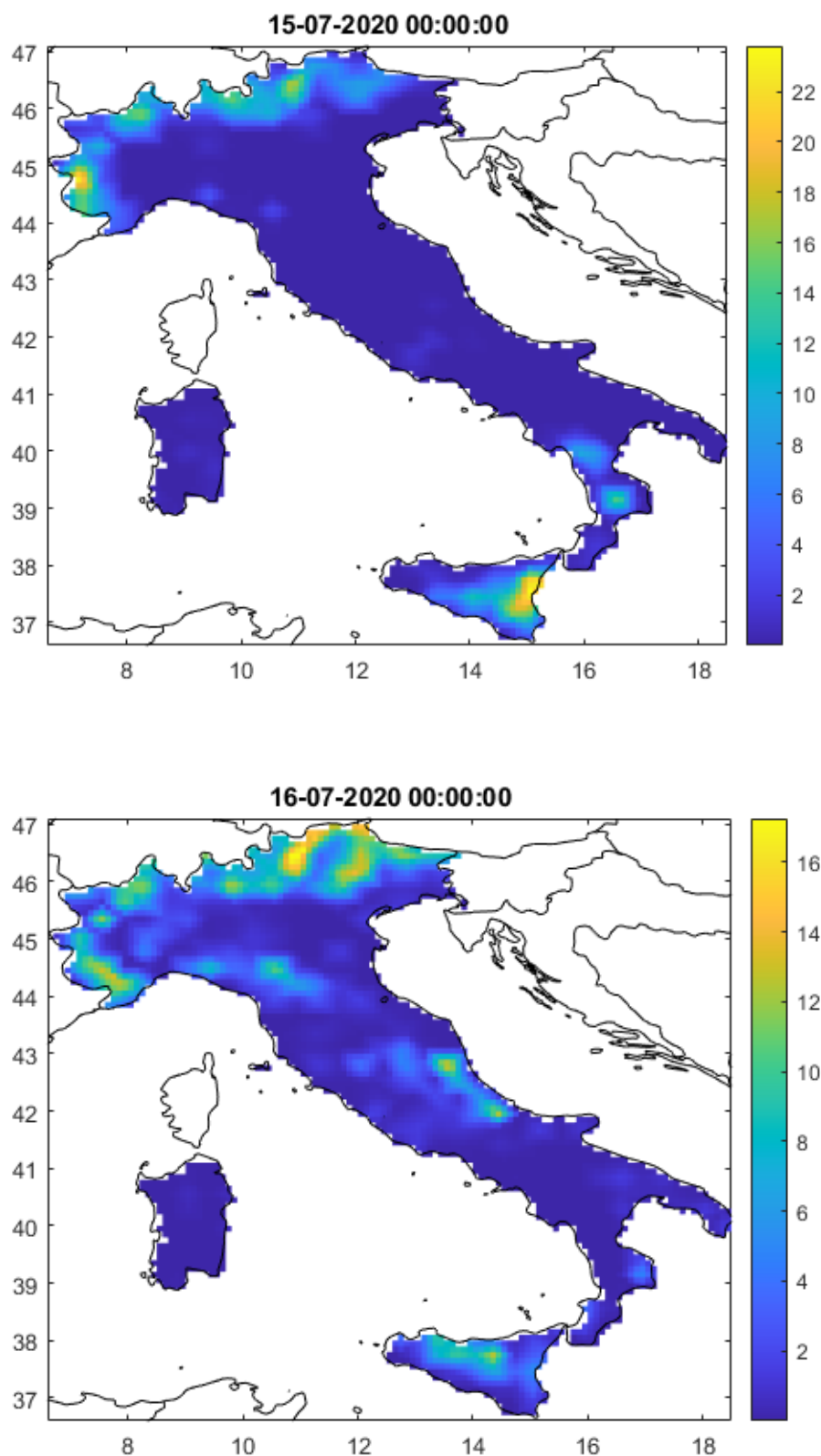


Figura 31- Cumulate di pioggia del dataset di ERA5-Land del 14 e 15 luglio 2020 per l'evento di Palermo. Altezze di pioggia in mm.

Osservando il fenomeno e analizzandolo dal punto di vista sinottico si percepisce quanto effettivamente l'evento sia risultato difficile da interpretare per i modelli di ERA5-Land. Infatti, dalla Figura 31 si evince come l'evento non sia stato simulato correttamente dai modelli di previsione del *dataset* di rianalisi. Da come si osserva per la cumulata del 15/07/2020 non sono stati raggiunti nemmeno lontanamente le altezze di pioggia superiori ai 100 mm misurate dai pluviometri a terra. Le stime di ERA5-Land si limitano ad un massimo che si attesta intorno ai 20 mm ma che non rispecchia neanche la distribuzione spaziale delle piogge, in quanto l'evento si è verificato nel palermitano e non nella zona orientale della Sicilia. Questo esempio evidenzia la difficoltà di questo *dataset* nel ricostruire particolari eventi meteorologici che dal punto di vista atmosferico sono molto complicati e concentrati in piccole porzioni di territorio.

7.2. Evento del 19/24 ottobre 2019, Piemonte

Un secondo evento che è stato riportato come esempio per verificare la bontà delle simulazioni del *dataset* di rianalisi di ERA5-Land, è quello che si è verificato in Piemonte tra il 19 e il 24 ottobre 2019. L'evento in questione, a differenza del precedente, è caratterizzato da un più lungo e strutturato fronte precipitativo. Non vi sono infatti particolari celle temporalesche o strutture convettive che hanno interessato la regione, ma bensì una struttura ciclonica più consistente. Nella Figura 37 è riportata l'evoluzione dell'evento secondo il *dataset* di ERA5-Land nei giorni interessati.

Anticipatamente si può affermare che questo fenomeno è stato ricostruito in modo sensibilmente migliore rispetto al precedente (Figura 32), infatti, possiamo notare come nel giorno 24 ottobre 2019 siano state stimate altezze di pioggia congrue con quanto osservato a terra dalle stazioni meteorologiche. I massimi di pioggia, infatti, si possono attestare su valori congrui rispetto a quelli osservati in sito a meno di eventuali picchi che sono stati registrati per zone relativamente piccole, troppo, rispetto alla risoluzione spaziale del *dataset*.

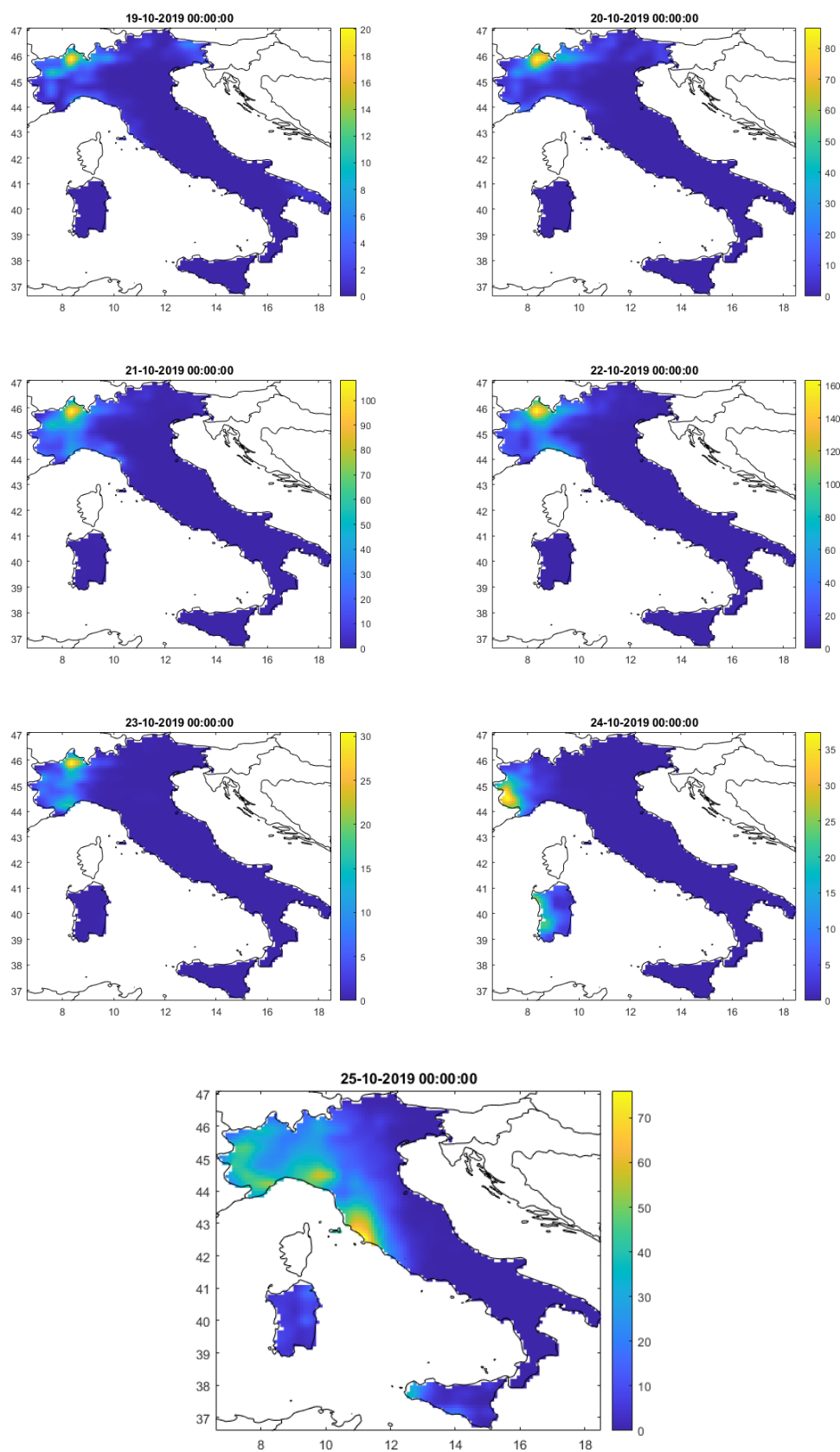


Figura 32- Cumulate di pioggia in mm del dataset di ERA5-Land del 18 al 24 ottobre 2019 per l'evento in Piemonte

Il rapporto stilato da Arpa Piemonte sull'evento in questione lo divide in due fasi: una prima fase che va dal 19 al 21 ottobre che è stata caratterizzata da precipitazioni convettive accompagnate da una perturbazione a scala sinottica quasi stazionaria e da una seconda fase, che va dal 22 al 24 ottobre, dove ha prevalso una forte convergenza di flussi umidi nei bassi strati dell'atmosfera che ha interagito in modo forte con l'orografia del territorio. Durante la prima fase si sono convogliate masse d'aria umida provenienti dalle isole britanniche verso il nord-ovest italiano, che hanno causato, tra sabato 19 e domenica 20, delle precipitazioni abbastanza intense tra le province di Biella, Vercelli e Verbania di carattere principalmente convettivo. Negli stessi giorni la parte più meridionale del Piemonte e la Liguria sono state caratterizzate allo stesso modo da precipitazioni localmente molto forti ma tuttavia di carattere temporalesco; infatti, sono state simulate in modo più approssimativo da ERA5-Land, ma comunque migliore del caso precedente. In termini quantitativi domenica 20 ottobre sono state osservate precipitazioni cumulate intorno agli 80 mm su un arco di 24 ore ad eccezione fatta per alcune zone come Settepani (SV) o Montenotte Inferiore (SV) dove si sono toccati picchi di ben oltre i 200 mm giornalieri.

Durante la seconda fase invece, che ricordando va dal 22 al 24 ottobre, si è verificato un flusso umido proveniente da est che è converso nella zona pedemontana settentrionale e nordoccidentale del Piemonte. Nel rapporto viene indicato che nella serata del 23 ottobre le precipitazioni sono aumentate a seguito di un'intensificazione dei venti sia a quote basse che in quelle più elevate e che nel corso della notte la perturbazione si è spostata andando ad interessare le zone più orientali del Piemonte e della Liguria, fino a raggiungere la Lombardia. La mattina del 24 ottobre si sono verificate precipitazioni un po' su tutto il territorio piemontese ma con intensità non molto elevate; infatti, questa situazione viene ricreata in modo coerente con le rianalisi ERA5-Land. In Figura 33 viene riportato inoltre lo ietogramma preso dal rapporto di Arpa Piemonte sull'evento in questione delle piogge dei giorni interessati.

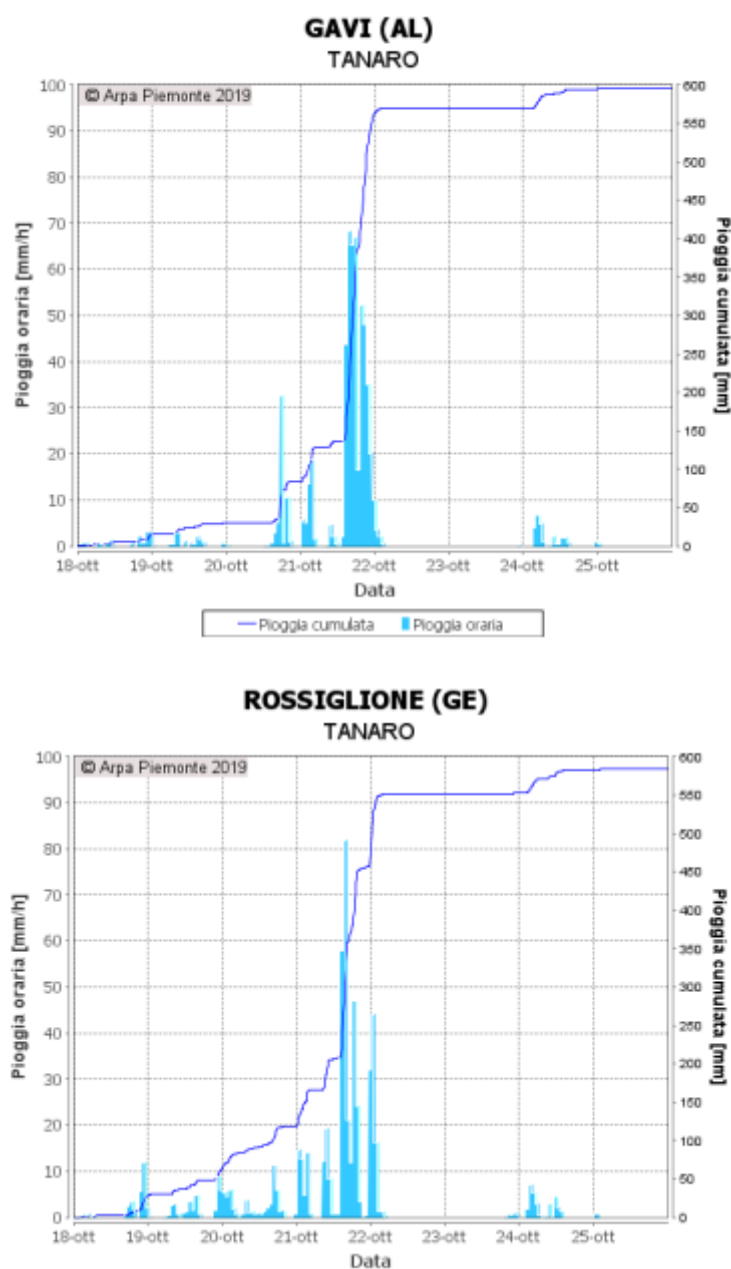


Figura 33- Alcuni degli ietogrammi di pioggia delle stazioni meteo che hanno registrato le precipitazioni maggiori.
Fonte: EVENTI IDROMETEOROLOGICI DAL 19 al 24 OTTOBRE 2019, di ARPA PIEMONTE

Come evidenziano i rapporti di Arpa Piemonte gli ietogrammi sono consistenti con quanto viene simulato per gli stessi giorni dalle piogge di ERA5-Land.

7.3. Evento del 27/29 novembre 2020, Sardegna

L'evento piovoso si è svolto tra i giorni del 27 e del 29 novembre 2020. Dai rapporti presenti in rete si osserva come l'evento abbia raggiunto proporzioni molto grandi con precipitazioni anche molto intense in alcune zone della Sardegna. Infatti, un rapporto

di evento di *Polaris* indica che sono stati raggiunti picchi di oltre 400 mm. La precipitazione in analisi è stata abbastanza diluita nel tempo e protratta su una finestra temporale di alcuni giorni ma, d'altro canto, le precipitazioni maggiori sono state osservate a seguito di eventi di tipo convettivo con intensità molto elevata e durata relativamente breve. Per questo motivo i picchi di piovosità non sono stati riportati correttamente da ERA5-Land. Comunque, i valori del dataset di ERA5-Land riportano altezze di pioggia utili al fine di individuare l'evento estremo. Le principali province colpite sono la provincia di Nuoro, la parte meridionale dell'oristanese e il Medio Campidano. Le piogge più intense, comunque, hanno interessato principalmente la provincia interna di Nuoro (Figura 34), dove si sono verificati i picchi di piovosità più alti. Il paese di Bitti è stato quello che ha subito i maggiori danni a seguito dell'arrivo della piena poiché in quel paese è presente un tratto tombato che ha ostacolato il flusso dell'acqua favorendone l'esondazione. L'acqua ha così invaso il paese, provocando diverse vittime a causa sia degli allagamenti che degli smottamenti di tipo idrogeologico.



Figura 34 -Foto dell'alluvione avvenuta in Sardegna tra il 27 e 29 novembre 2020 . Fonte: <https://agronotizie.imaginenetwork.com>

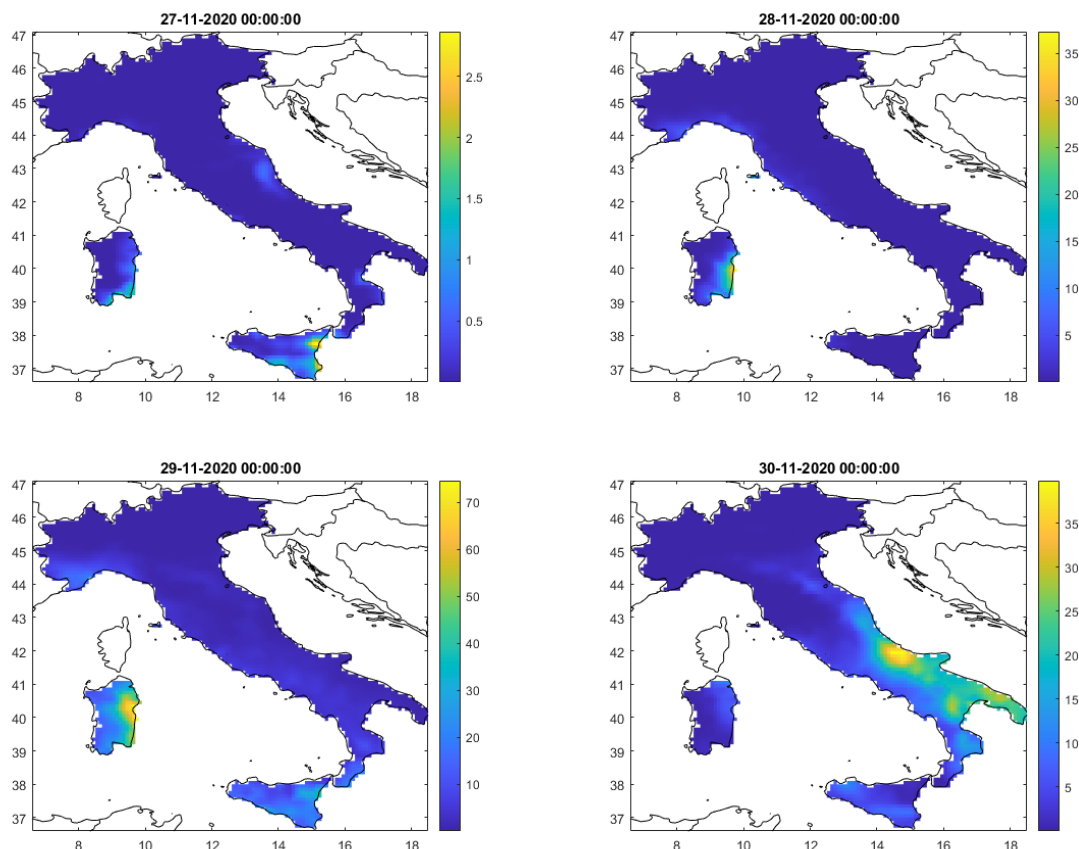


Figura 35- Cumulate di pioggia del dataset di ERA5-Land tra il 26 e 30 novembre 2020 per l'evento della Sardegna

Da come si vede in Figura 35 le piogge cumulate di ERA5-Land dell'evento che ha interessato alla Sardegna durante le date dal 27 al 29 è stato segnalato in modo corretto. Infatti, si osservano piogge che raggiungono e superano gli 80 mm giornalieri che mediamente rispecchiano l'andamento delle precipitazioni reali. I picchi di precipitazione segnalati precedentemente però, un po' come accade sempre, non vengono stimati correttamente, ma questo è dovuto proprio alla risoluzione interna del *dataset* che non è sufficiente per rappresentare eventi così dettagliati e alla simulazione di eventi convettivi. A meno dei picchi di precipitazione dovuti a celle convettive si ritenere che l'evento sia stato individuato in modo corretto e sufficiente per essere segnalato come evento precipitativo estremo durante l'analisi. Le cumulate di pioggia stimate a cavallo dei giorni 28 e 29 restituiscono valori cumulati intorno ai 100 mm che sono congrui con quanto osservato nei rapporti sull'evento. In tutti i casi analizzati va ricordato che le cumulate riportate per il dato ERA5-Land fanno sempre riferimento alla somma delle precipitazioni sulle 24 ore giornaliere dalle 00:00

alle 24:00 e, nel caso di precipitazioni notturne o comunque che si verificano a cavallo della mezzanotte esse vengono separate e riportate nei due giorni successivi.

7.4. Evento del 2/3 ottobre 2020, Limone Piemonte

Nel periodo tra il 2 e il 3 ottobre 2020 il Piemonte, in particolare nell'alta val Tanaro, nelle province di Biella, Vercelli e Verbania si sono verificate precipitazioni molto intense. Nella giornata del 2 ottobre sono state osservate nella parte più settentrionale della regione e al confine con la Liguria le precipitazioni maggiori. Durante la giornata del 3 ottobre invece le precipitazioni hanno coinvolto principalmente il Verbano con valori puntuali anche molto elevati.

Le forti precipitazioni hanno portato al verificarsi di piene su tutta la rete idrografica principale e secondarie della regione; infatti, sia il Toce che il Sesia hanno superato i livelli di riferimento storici della piena dell'ottobre del 2000. La piena del Sesia, conferma Arpa Piemonte, è risultata abbondantemente superiore a quella che si è verificata nel 2000 e nel 1993. L'analisi di Arpa riporta le precipitazioni che sono state osservate dagli strumenti *in sito* e, in particolare, sono stati raggiunti picchi nel Verbano di oltre i 600 mm. Anche nelle altre parti del Piemonte sono state registrate precipitazioni molto intense, infatti nel cuneese sono stati raggiunti livelli di oltre 500 mm di pioggia cumulata giornaliera così come nel Verbano. L'evento in questione è stato talmente intenso che alcune delle precipitazioni osservate per le province interessate hanno riportato che più del 50% della piovosità media annua (PMA) è stata scaricata a terra durante l'evento. Infatti, dalle curve di possibilità pluviometrica realizzate da Arpa per l'evento si osserva come questo sia stato talmente eccezionale da superare il tempo di ritorno di 200 anni (Figura 36).

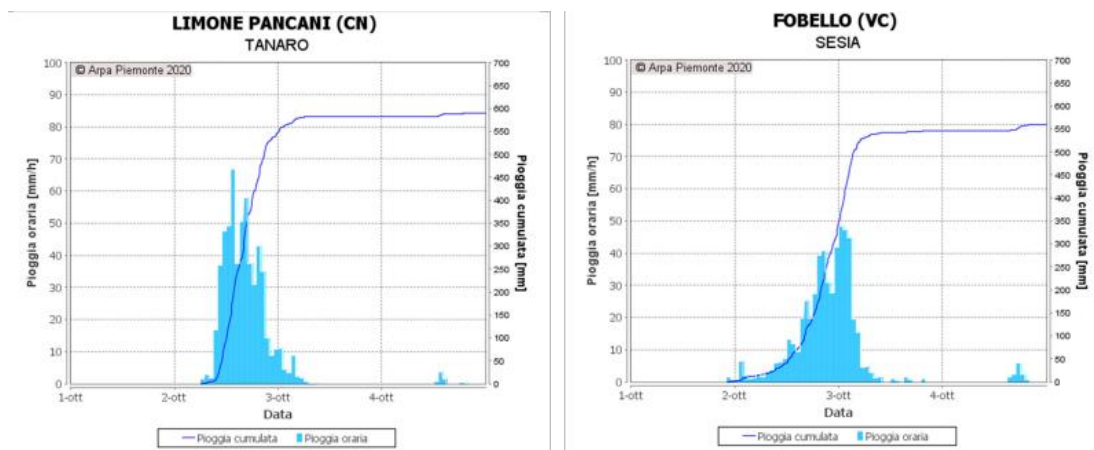


Figura 36- Ietogrammi evento 2/3 ottobre 2020, mostrano altezze di pioggia evento. Fonte: EVENTO ALLUVIONALE 2-3 OTTOBRE 2020 IN PIEMONTE Analisi meteorologica ed idrologica preliminare

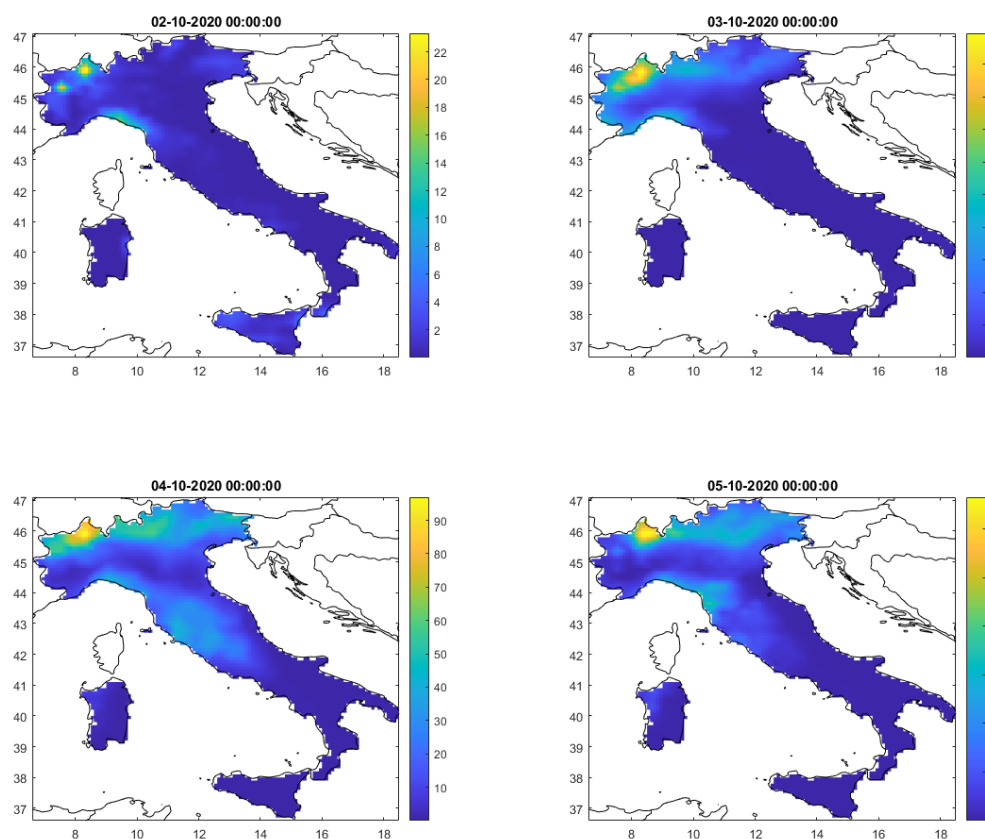


Figura 37- Cumulate di pioggia in mm del dataset di ERA5-Land del 1 e 4 luglio 2020 per l'evento in Piemonte

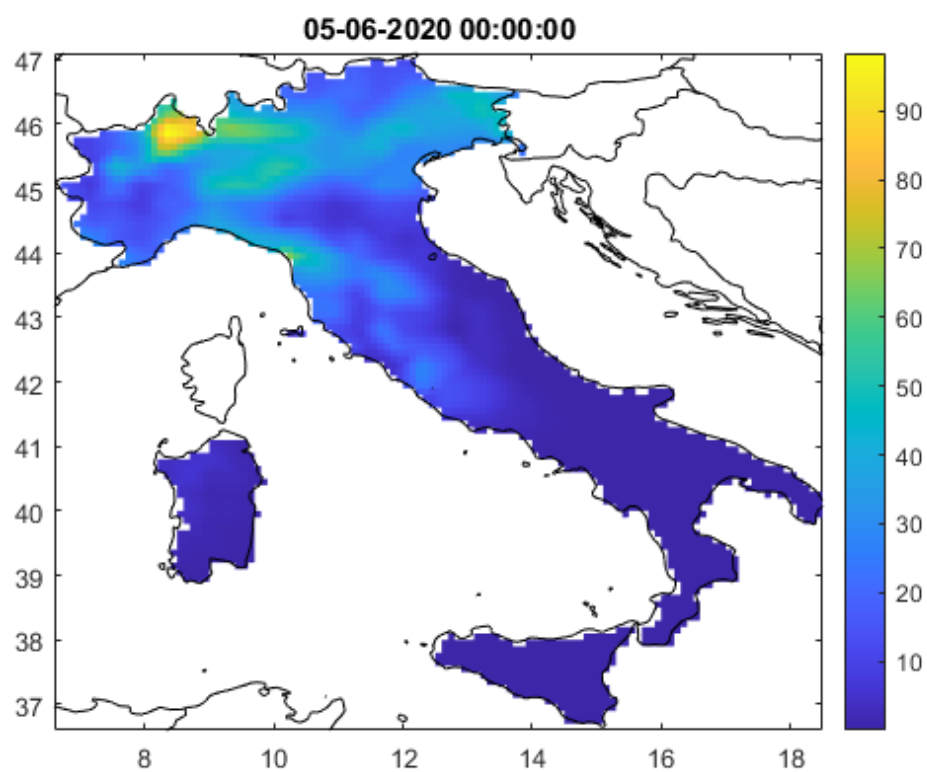
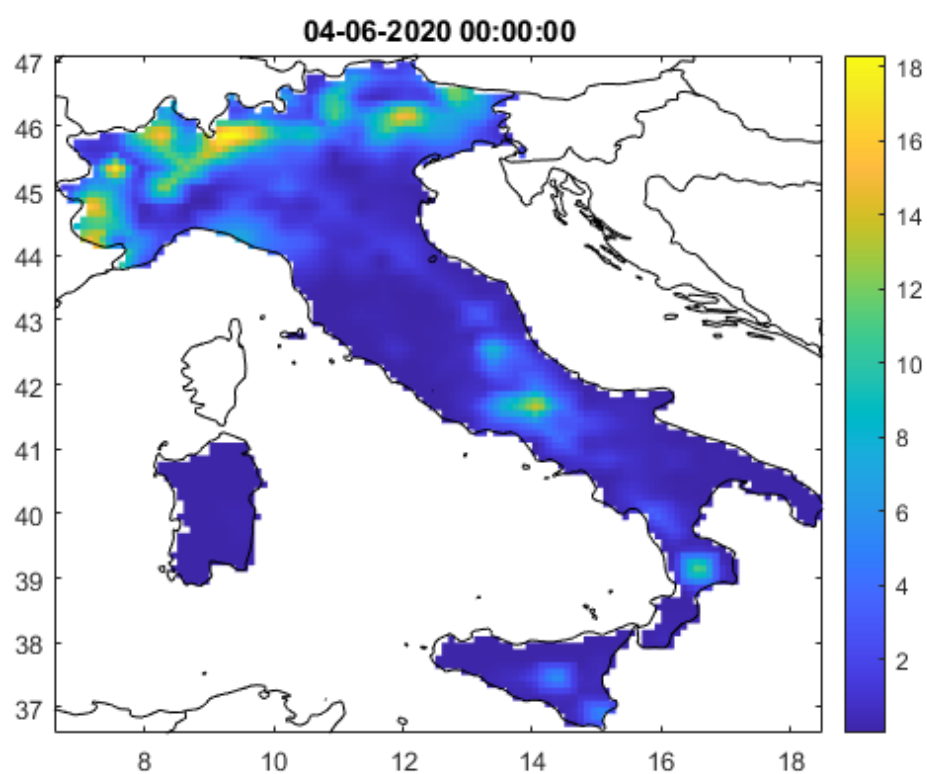
Come viene riportato in Figura 37 la cumulata sulle 24 ore di ERA5-Land per l'evento nel 2- 3 ottobre 2020 viene identificato in modo sufficientemente corretto come nel caso precedente, ma la distribuzione spaziale delle piogge è da considerarsi corretta o almeno molto prossima a quella reale. Lo stesso non accade per i massimi di pioggia.

L'intensità, riportate dalle osservazioni di Arpa Piemonte sono nettamente più elevate rispetto a quelle stimante da ERA5-Land ma è anche vero che questi valori sono valori puntuali quindi difficilmente ricostruibili utilizzando una risoluzione spaziale di ERA5-Land.

7.5. Evento del 4/5 giugno 2020, Toscana ed Emilia-Romagna

L'evento piovoso avvenuto tra il 4 e il 5 giugno ha colpito soprattutto la parte nordoccidentale della Toscana, interessando principalmente le province di Lucca e Pistoia. Ha generato diversi problemi in tutta la zona, infatti risultano all'attivo 106 interventi tra vigili del fuoco e mezzi di soccorso ripartiti sempre tra le suddette province. Le piogge cumulate registrate su 24 ore nelle zone colpite arrivano a circa 140 mm come è accaduto per gli idrometri di Casotti Cutigliano (sul Lima) e Fornoli (sul Serchio), mentre nelle zone limitrofe, comunque, superiori ai 100 mm (<https://www.toscana-notizie.it/>).

Da come è possibile vedere in Figura 38 il prodotto di rianalisi ERA5-Land per questi due giorni non riesce ad inquadrare in modo corretto, o almeno completamente corretto, le piogge che hanno interessato queste zone nei giorni del 2-3 ottobre. Come per gli altri eventi, in generale, si riscontra il solito problema della sottostima delle altezze di pioggia; infatti, in questo caso i massimi ERA5-Land riportati per le zone dell'Emilia-Romagna e Toscana si aggirano intorno ai 60/70 mm, ben lontani dai 100 mm e oltre registrati dai pluviometri a terra. La sottostima che si è verificata in questo caso però può inficiare sulla corretta segnalazione dell'evento; infatti, non è detto che utilizzando soglie di piovosità elevate, quali per esempio il 6 o 7% della PMA, si riesca ad allertare in modo corretto le celle ERA5-Land presenti sul territorio toscano ed emiliano ed a segnalare correttamente l'evento.



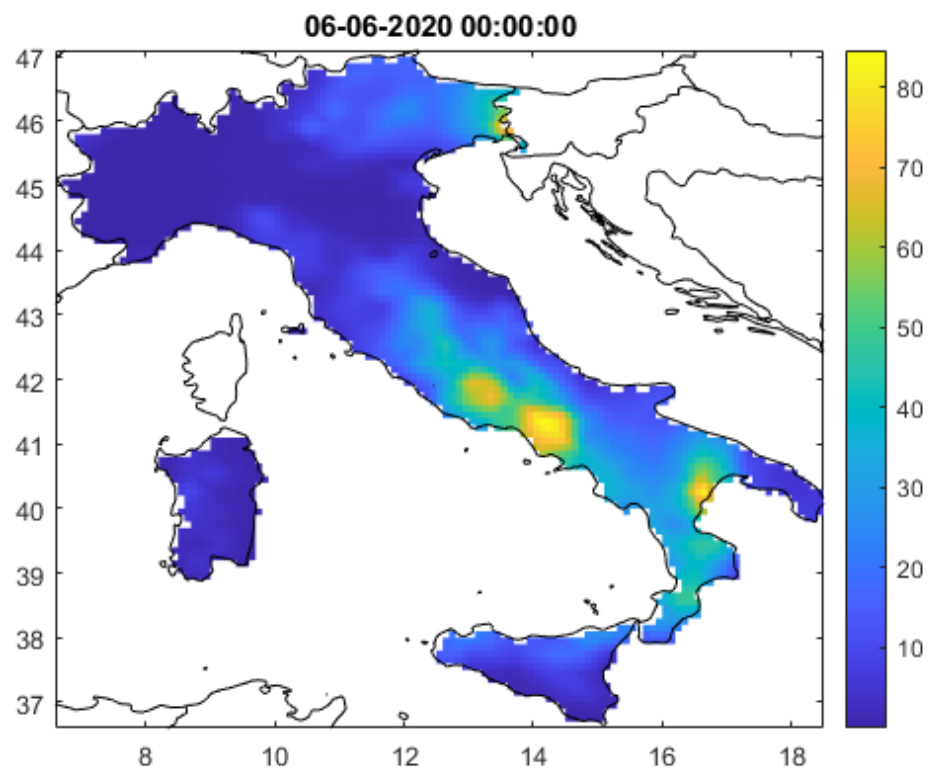


Figura 38- Cumulate di pioggia in mm del dataset di ERA5-Land del 3 e 5 luglio 2020 per l'evento in Emilia-Romagna e Toscana

8. Risultati e scelta della soglia pluviometrica migliore per l'identificazione di eventi estremi

8.1. Analisi risultati regioni

Dalle Tabelle 5 e 6 riportate nelle pagine precedenti si può riscontrare come l'intervallo migliore per associare un evento di ERA5-Land con un evento reale sia quello che considera i due giorni prima e il giorno dopo. In particolare, si ottengono i risultati migliori quando si utilizza il giorno dopo poiché, come già detto, il dato di ERA5-Land che riguarda la cumulata di pioggia di 24 ore, viene restituito alla 00:00 del giorno successivo. In altre parole, significa che la maggior parte degli eventi si verifica il giorno stesso dell'evento di pioggia estrema, mentre solo una componente minore fa riferimento al giorno precedente o ancora più difficilmente a due giorni prima.

L'estensione a due giorni prima può invece essere motivata dal fatto che in database come EM-DAT viene spesso registrata la data in cui sono stati registrati effetti al suolo e non la data effettiva dell'evento precipitativo che li ha prodotti.

Per scegliere la migliore soglia pluviometrica da utilizzare bisogna andare ad evidenziare e mettere a confronto quelli che sono i *costi totali* ottenuti per ogni soglia pluviometrica. Oltre al *costo totale* bisogna tenere presente anche la percentuale di segnali che vengono effettivamente verificati. Questi due aspetti sono fondamentali al fine di garantire che la soglia di pioggia scelta come riferimento sia la migliore sia in termini di costo sia in termini di numero di eventi individuati. L'utilizzo della formula precedente tiene in considerazione questo aspetto poiché, nella formulazione stessa, viene utilizzato sia il numero di mancati segnali che quello di falsi segnali. L'impiego di questi due parametri ovviamente vincola il costo totale a considerare il numero di eventi, ma come vedremo non è sufficiente a garantire un buon risultato in tutti i casi. Il problema è legato sostanzialmente al fatto che nella formula non vengono considerati i corretti segnali, per questo motivo è necessario affiancare a questo parametro un secondo che tenga in considerazione il numero di segnali corretti che si ottiene.

Per quanto riguarda le regioni si può notare che si sono ottenuti risultati migliori; infatti, si sono toccati picchi anche del 60% di eventi verificati rispetto agli eventi reali EM-DAT e ESWD (Tabella 7). Nella tabella successiva viene restituita una panoramica dei risultati ottenuti per le regioni dove vengono sommati e divisi per soglia pluviometrica tutti gli eventi ottenuti per tutti gli anni analizzati. Per aver un risultato che considerasse il numero di eventi in generale si è deciso di sommare tutti gli eventi ERA5-Land, quelli EM-DAT, i falsi segnali, i mancati segnali e quelli corretti per tutti gli anni anziché mediarli all'interno dell'anno.

La Tabella 7 riepiloga i risultati totali ottenuti per le regioni.

Soglia %PMA	Eventi per Regione Tot.	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT) Tot.	Eventi Verificati Tot.	Mancati Segnali Tot.	Falsi Segnali Tot.	COSTO Totale	Percentuale Segnali Reali Individuati (%)
3	5572	1155	702	453	4870	7135	60.8
4	3159	1155	549	606	2610	5640	47.5
5	1895	1155	410	745	1485	5210	35.5
6	1189	1155	304	851	885	5140	26.3
7	777	1155	236	919	541	5136	20.4

Tabella 7- Risultati eventi regionali totali, ottenuti sommando tutti i risultati di tutti gli anni per ogni soglia, l'intervallo utilizzato è quello che considera 2gp e 1gd

Dalla Tabella 7 precedente si vede come la percentuale maggiore di segnali reali verificati, ovvero di quegli eventi osservati durante l'analisi dei dati ERA5-Land che hanno effettivamente riscontrato una controparte negli eventi reali, è massima nella soglia pluviometrica al 3% di PMA. Di contro però si osserva che alla soglia pluviometrica del 3% corrisponde anche un elevato valore di falsi segnali che fa notevolmente alzare il costo totale. Di conseguenza bisogna valutare qual è il miglior compromesso tra il costo totale che si ottiene rispetto alla percentuale di eventi reali verificati.

Soglie %PMA	Rapporto Falsi/Mancati	Rapporto Mancato/Corretto	Rapporto Falso/Corretto
3	10.75	0.65	6.94
4	4.31	1.10	4.75
5	1.99	1.82	3.62
6	1.04	2.80	2.91
7	0.59	3.89	2.29

Tabella 8- Andamento rapporto tra Falsi Segnali, Mancati Segnali e Corrotti Segnali per le Regioni

Nei grafici seguenti (da Figura 39 a Figura 41) vengono restituiti i valori riportati nella Tabella 7.

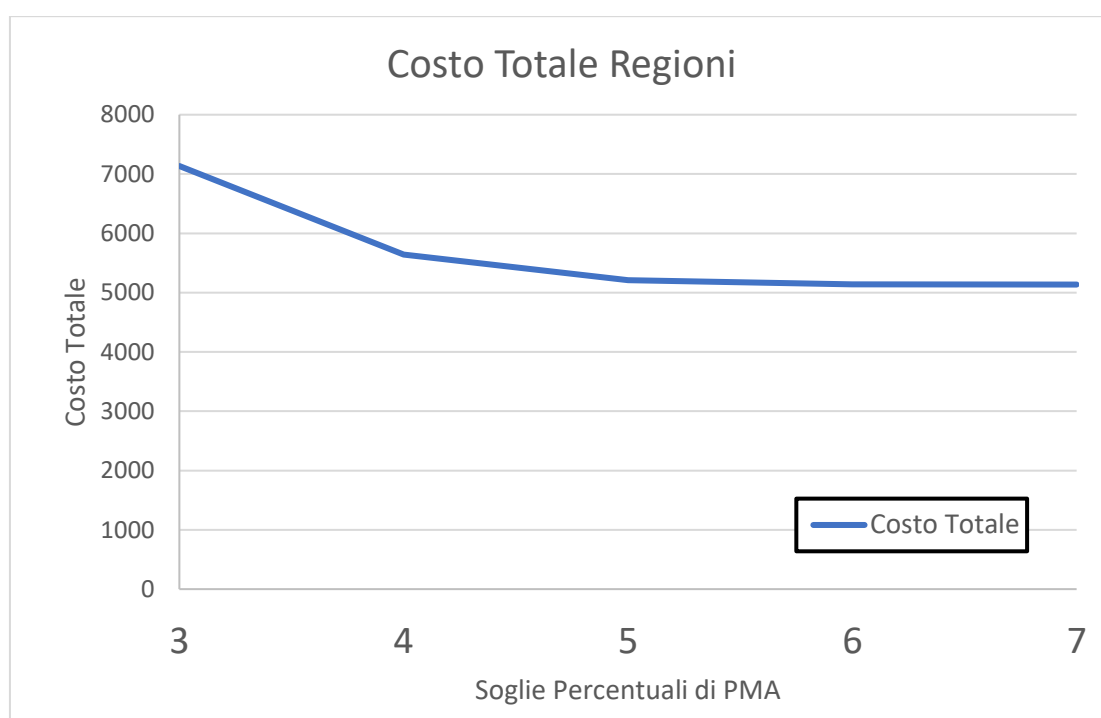


Figura 39- Grafico dell'andamento del costo totale in funzione delle diverse soglie percentuali di PMA

Mentre nel grafico successivo l'andamento della percentuale di eventi che sono stati correttamente individuati durante l'analisi in base alla soglia pluviometrica utilizzata.

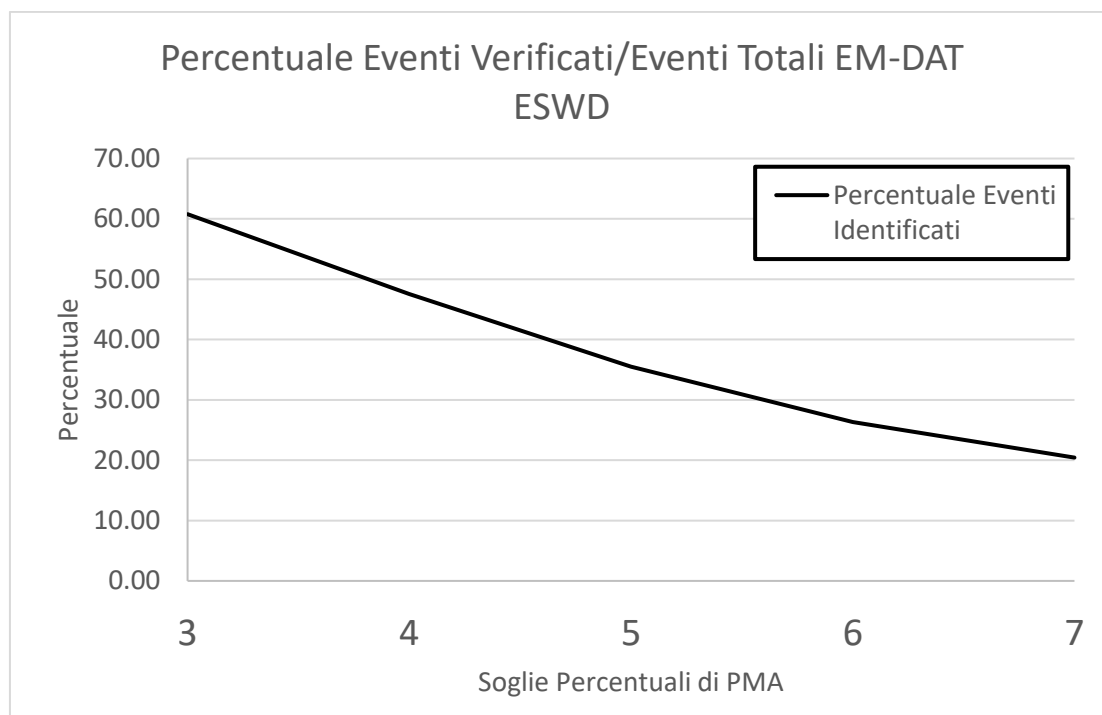


Figura 40- Grafico andamento percentuale di eventi identificati degli eventi EM-DAT e ESWD

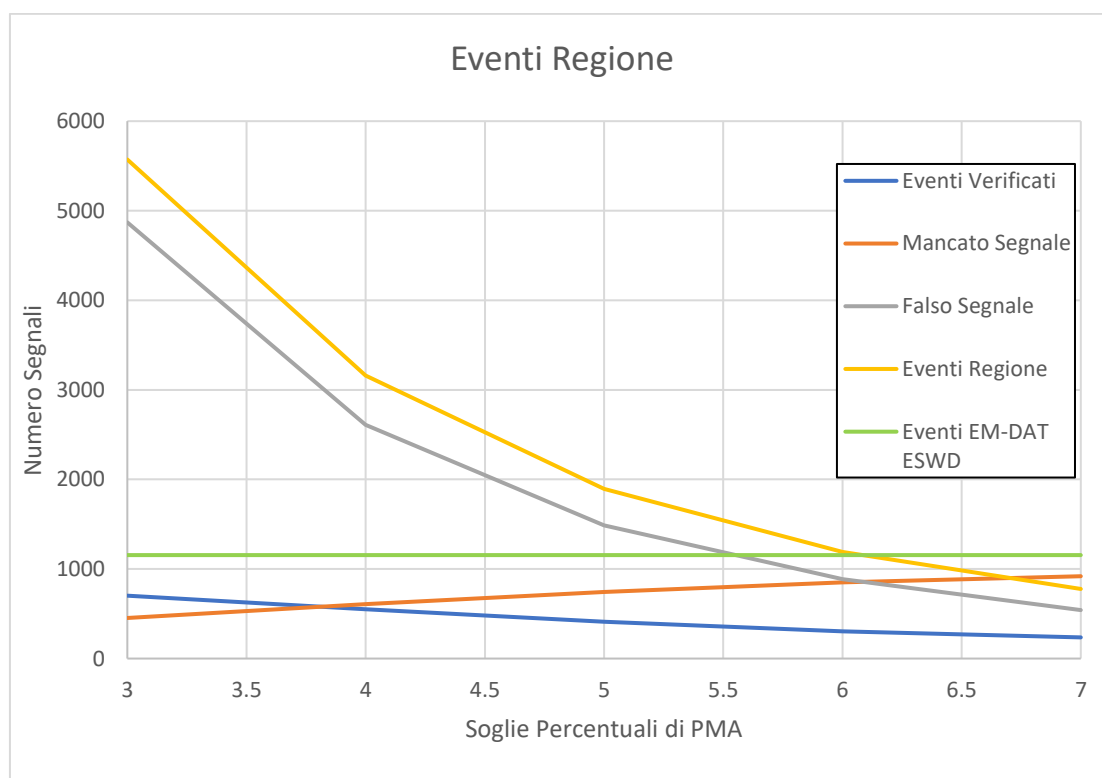


Figura 41 – Grafico che riporta l'andamento degli Eventi Verificati, Mancati Segnali, Falsi Segnali, Eventi Regionali ed Eventi di EM-DAT e ESWD

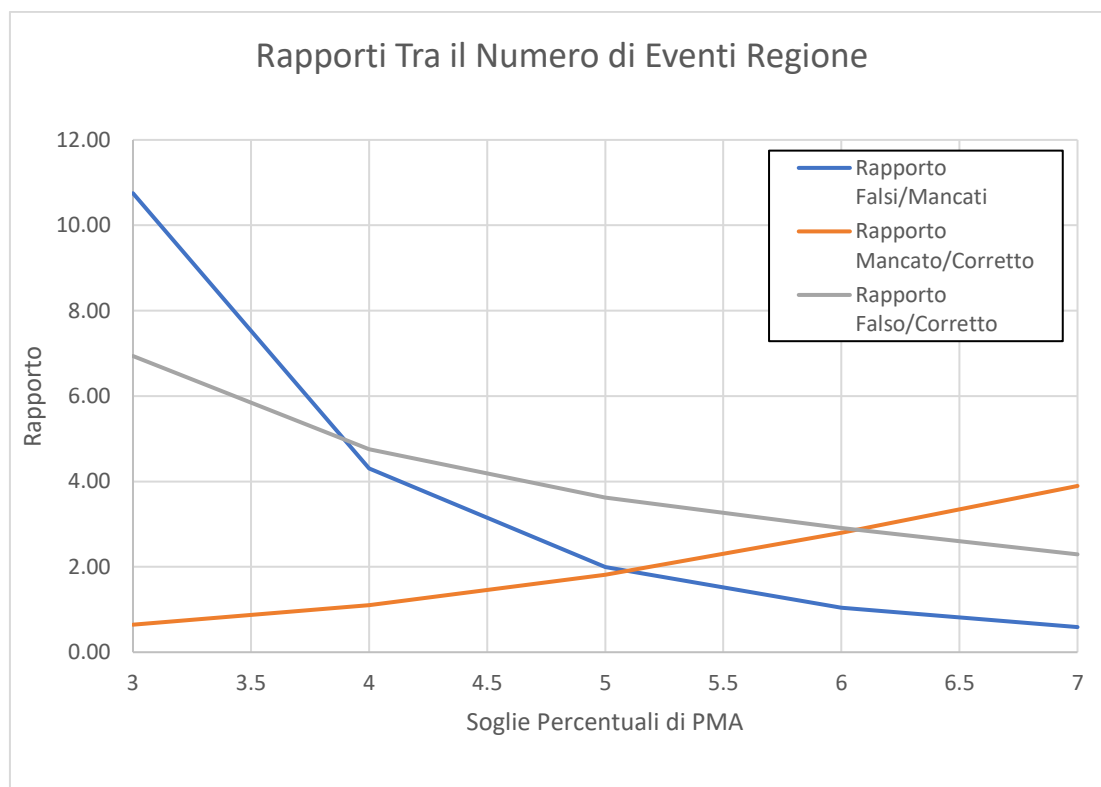


Figura 42- Grafico che riporta l'andamento dei Rapporti tra Falsi Segnali, Mancati Segnali e Segnali Corretti

Dai grafici riportati nelle Figure 39 e 41 la scelta migliore per l'identificazione di eventi piovosi estremi su base regionale plausibilmente è la soglia pluviometrica al 4% poiché si riescono a individuare circa il 47% di eventi riuscendo ad avere un costo totale che differisce di poco dalle soglie maggiori, quali quella al 5, 6 e 7%. A discapito di questa leggera differenza in termini di costo totale che vi è con l'utilizzo di soglie con percentuali più elevate, si può osservare una netta diminuzione percentuale degli eventi reali identificati.

In sintesi, quindi la scelta migliore a livello regionale ricade sulla soglia pluviometrica al 4%, o eventualmente, nel caso si volesse essere più cautelativi in termini di falsi segnali, su quella al 5% a cui corrisponde però solamente il 35% di eventi identificati. Di seguito, in Figura 43, viene riportata matrice di soglia pluviometrica al 4% di PMA utilizzata.

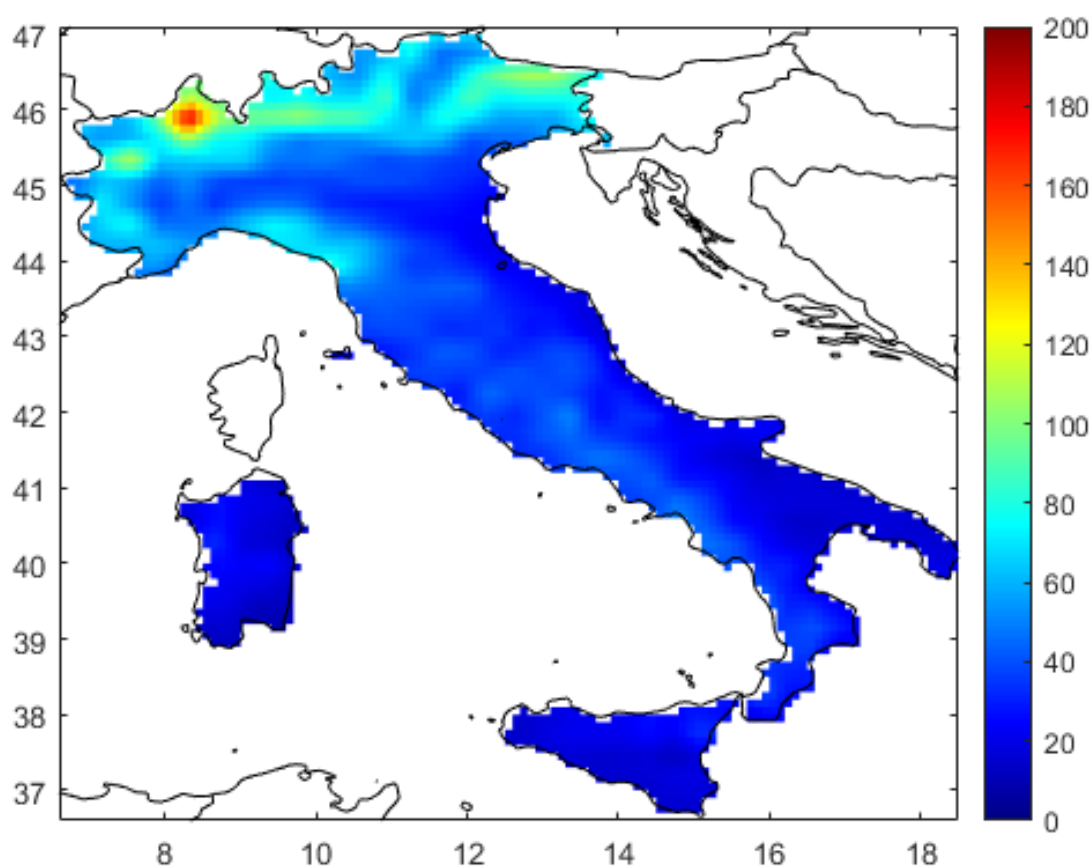


Figura 43- Matrice soglia pluviometrica al 4% di PMA migliore per l'identificazione di eventi a scala regionale

8.2. Analisi risultati province

Lo stesso procedimento è stato seguito per le province, andando a sommare tutti i parametri visti nel paragrafo precedente in base alla soglia pluviometrica applicata.

Da cui si è ottenuto in Tabella 9.

Soglia %PMA	Eventi per Provincia Tot.	Eventi Reali (ESWD/ EM-DAT) Tot.	Eventi Verificati Tot.	Mancati Segnali Tot.	Falsi Segnali Tot.	COSTO Totale	Percentuale Segnali Reali Individuati (%)
3	15599	1444	716	728	14883	18523	49.6
4	8149	1444	528	916	7621	12201	36.6
5	4615	1444	386	1058	4229	9519	26.7
6	2822	1444	313	1131	2509	8164	21.7
7	1795	1444	209	1235	1586	7761	14.5

Tabella 9- Risultati eventi provinciali totali, ottenuti sommando tutti i risultati di tutti gli anni per ogni soglia pluviometrica, l'intervallo utilizzato è quello che considera 2gp e 1gd

Dalla quale si sono ottenuti i seguenti grafici (da Figura 44 a Figura 46).

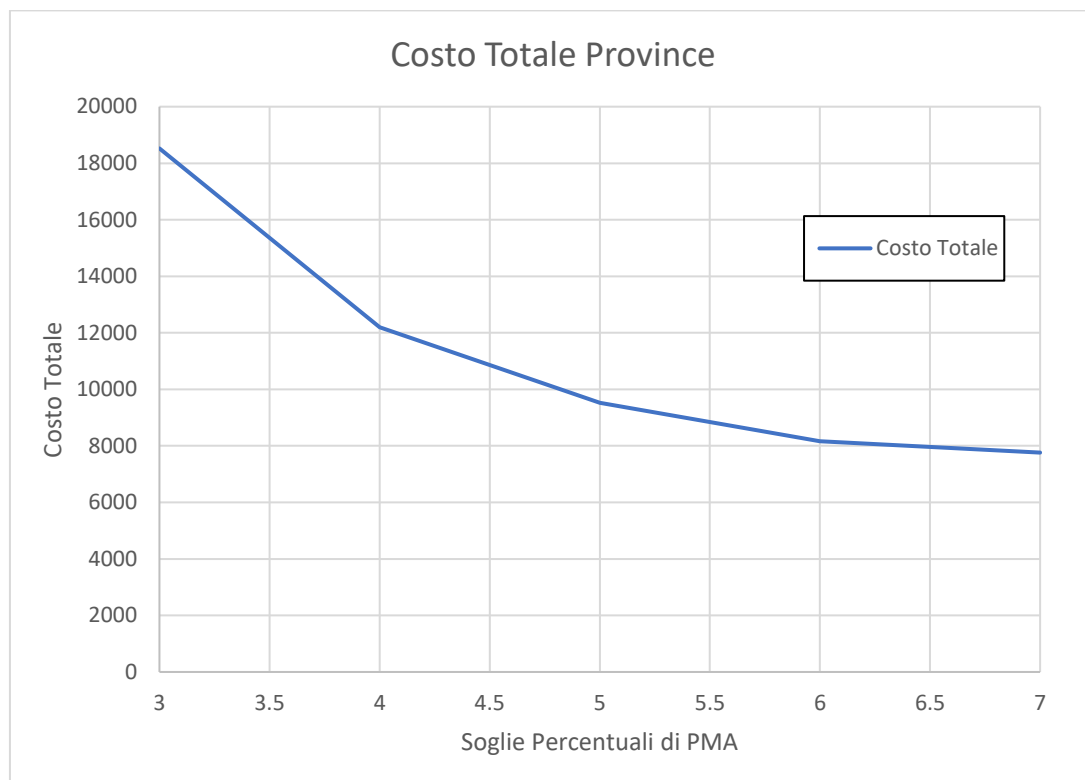


Figura 44- Grafico dell'andamento del costo totale in funzione delle diverse soglie percentuali di PMA

E quello relativo alla percentuale di eventi reali verificati (Figura 45).

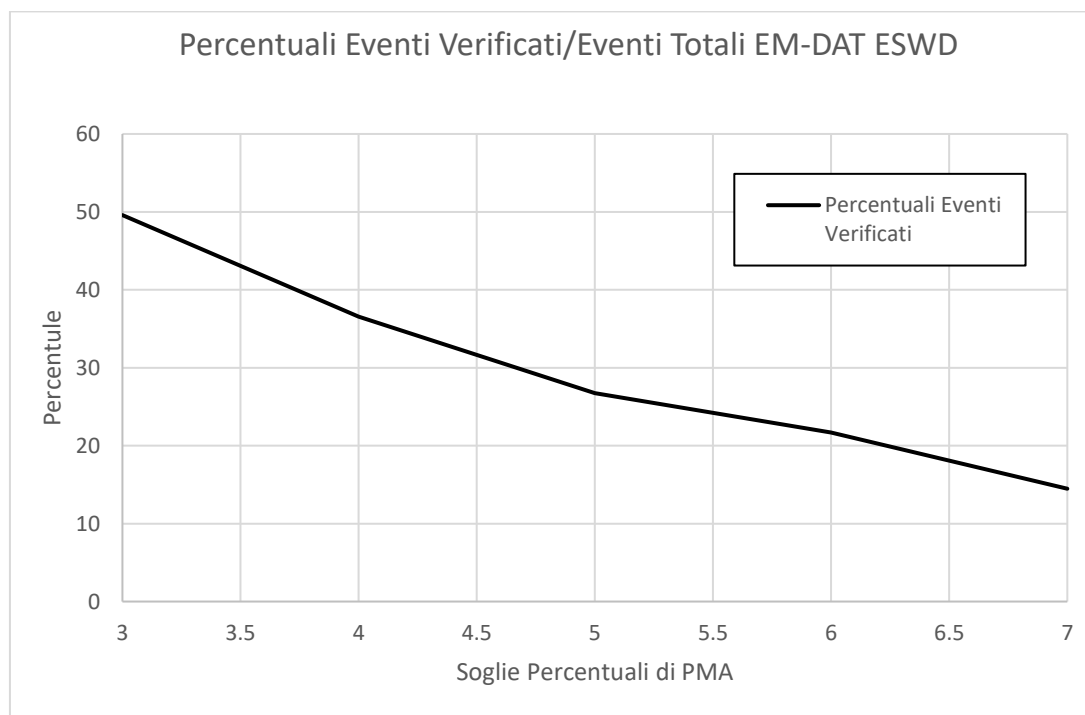


Figura 45- Grafico andamento percentuale di eventi identificati degli eventi EM-DAT e ESWD

Soglie % PMA	Rapporto Falsi/Mancati	Rapporto Mancato/Corretto	Rapporto Falso/Corretto
3	20.44	1.02	20.79
4	8.32	1.73	14.43
5	4.00	2.74	10.96
6	2.22	3.61	8.02
7	1.28	5.91	7.59

Tabella 10- - Andamento rapporto tra Falsi Segnali, Mancati Segnali e Corrotti Segnali per le Province

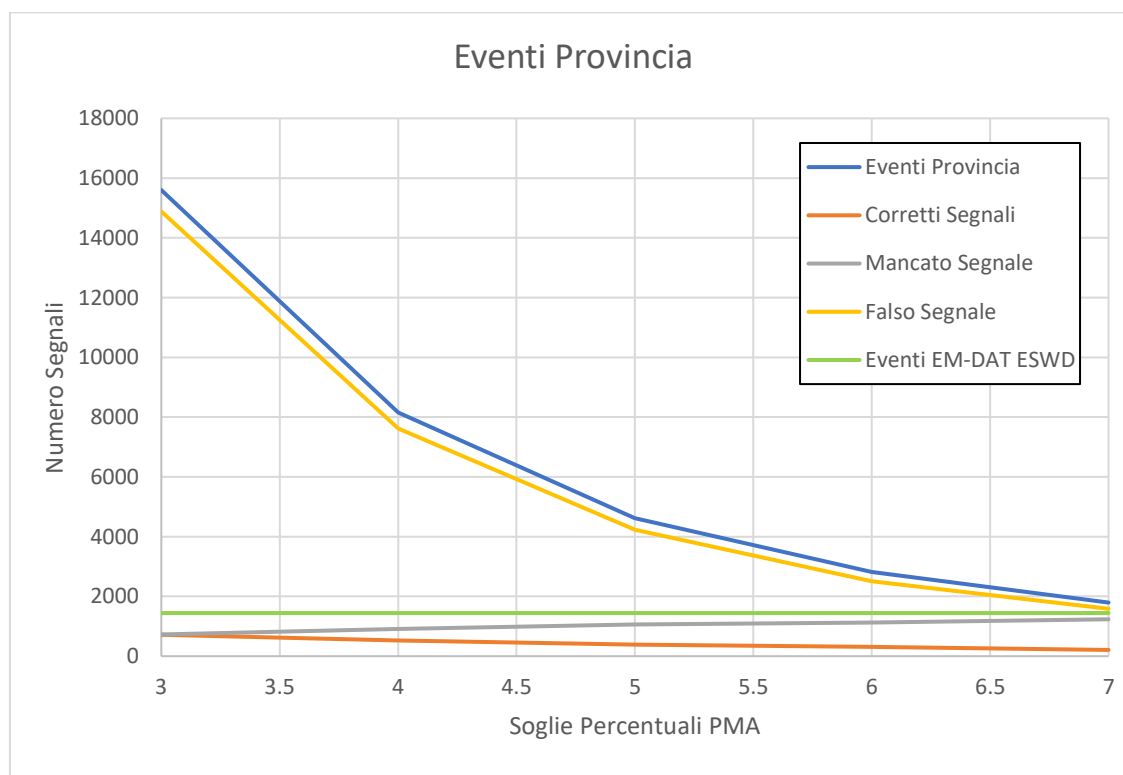


Figura 46- Grafico che riporta l'andamento degli Eventi Verificati, Mancati Segnali, Falsi Segnali, Eventi Regionali ed Eventi di EM-DAT e ESWD per le province

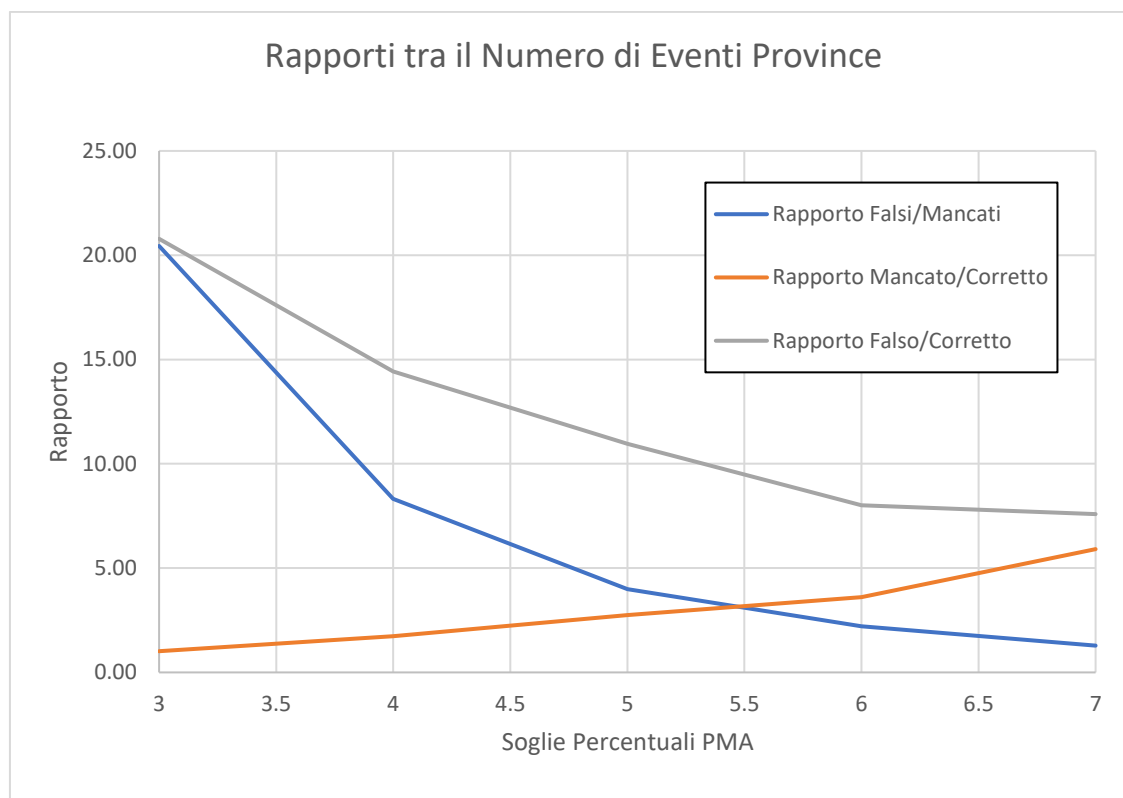


Figura 47- Grafico che riporta l'andamento dei Rapporti tra Falsi Segnali, Mancati Segnali e Segnali Corretti per le province

Per quanto riguarda invece le province la scelta migliore potrebbe essere quella riferita al 5% PMA poiché a differenza di quanto accadeva per le regioni, il costo totale continua a decrescere in modo più sensibile con l'aumentare della soglia pluviometrica percentuale. Questo è dovuto sostanzialmente al fatto che si osserva un numero molto maggiore di eventi nella suddivisione per province e di conseguenza anche un numero maggiore di falsi segnali. L'aumento della soglia pluviometrica determina una riduzione degli eventi che si verificano nelle diverse province a cui consegue una diminuzione del costo totale. Scegliendo di utilizzare una soglia pluviometrica al 5% di PMA si identificano circa il 27% di eventi reali EM-DAT o ESWD con un costo di 9519, mentre con una soglia pluviometrica al 4% si identificano il 36% di eventi, quindi +10% rispetto al precedente, ma con un costo che raggiunge i 12.201. Sulla base di questo la scelta della soglia pluviometrica migliore, nel caso di eventi suddivisi per province, potrebbe essere, a meno di specifici utilizzi successivi, quella al 5% riportata in Figura 48.

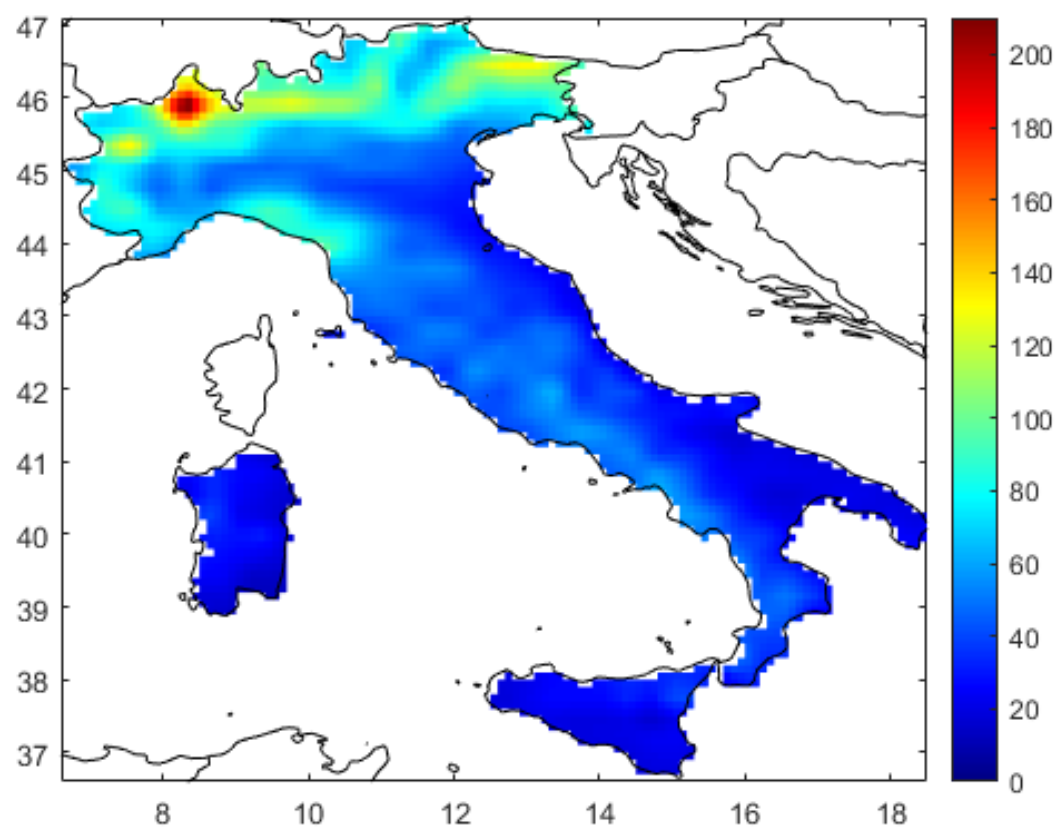


Figura 48 - Matrice soglia pluviometrica al 5% di PMA migliore per l'identificazione di eventi a scala provinciale.

9. Conclusioni

In questo lavoro sono stati analizzati i dati di precipitazione totale del *dataset* di ERA5-Land. Questo *dataset* di analisi retrospettiva è uno dei migliori liberamente utilizzabili al giorno d'oggi. Le caratteristiche che lo rendono utile a questi fini sono appunto la copertura globale della superficie terrestre, la sua risoluzione spaziale e la risoluzione temporale che lo rendono uno tra i migliori disponibili. L'analisi delle piogge che è stata effettuata in questo lavoro è stata suddivisa, come abbiamo già avuto modo di vedere, sulla base regionale e su quella provinciale. I risultati ottenuti sono stati comunque soddisfacenti in quanto per entrambe le classificazioni si è riusciti ad associare tra gli eventi ERA5-Land e quelli reali di EM-DAT e ESWD un numero comunque consistente. Infatti, utilizzando le soglie comprese tra il 4% e 5% di PMA si riesce ad identificare percentuali non trascurabili di eventi estremi reali di pioggia.

Vi sono comunque dei limiti che, come riporta in particolare l'ultimo paragrafo del capitolo 6, riguardano le simulazioni del modello previsionale adottato per realizzare il *dataset* e la stima di precipitazione in merito agli eventi di natura convettiva. Questi risultano comunque sempre molto complicati da stimare correttamente non essendovi una correzione effettuata in *post-processing* del dato di pioggia ed essendo quest'ultimo un dato derivato da altri parametri meteo climatici.

Da questo lavoro, comunque, si possono trarre delle conclusioni ed individuare eventuali indirizzi degli sviluppi futuri e studi che potrebbero ulteriormente approfondire l'argomento:

- La sottostima degli eventi convettivi, come riportato nel caso studio della Sicilia, dove la precipitazione è stata caratterizzata da eventi di tipo temporalesco che nel giro di poco tempo hanno generato rovesci piovosi di notevole intensità. Approfondire lo studio in questa direzione ed analizzare e tenere in considerazione solo eventi di questo tipo potrebbe ulteriormente migliorare la conoscenza relativa di questi in riferimento alle stime prodotte ERA5-Land;

- In secondo luogo, invece vi è proprio la natura del metodo di studio che è stato utilizzato per identificare gli eventi estremi. Come descritto precedentemente il dato di ERA5-Land di riferimento della precipitazione totale viene fornito come cumulata sulle 24 ore e restituita alle ore 00:00 del giorno successivo. In questo lavoro, infatti, si è scelto di utilizzare solamente le cumulate già fornite dal *dataset* ERA5-Land. L'impiego di solo questo dato potrebbe, anzi quasi sicuramente, costituire un problema per l'individuazione di tutti gli eventi estremi dal momento che le piogge che si verificano a cavallo della 00:00, o comunque durante le ore notturne, vengono suddivise e ripartite nei due giorni consecutivi. Di conseguenza se la soglia pluviometrica utilizzata ha un valore alto, come per esempio accade per le zone del Nord Italia, è possibile che non venga superato il valore soglia pluviometrica in entrambi i giorni e, di conseguenza, non segnalato nessun evento nel *dataset* di ERA5-Land. Questo aspetto è uno di quelli che deve essere necessariamente tenuto in considerazione e sviluppato negli studi futuri per migliorare ulteriormente le informazioni che abbiamo a riguardo delle stime prodotte da ERA5-Land rispetto agli eventi precipitativi. Non trascurabile, infatti, potrebbe essere questo aspetto rispetto agli eventi identificati applicando la soglia pluviometrica al 7% di PMA. Poiché, appunto, alcuni degli eventi che non vengono identificati nel *dataset* di ERA5-Land potrebbero essere legati in parte sia alla sottostima del dato di pioggia in sé e sia alla suddivisione e separazione delle cumulate di pioggia rispetto alle 24 ore;
- Inoltre, il mancato segnale o il falso segnale legato alla suddivisione in regioni o province è un altro degli aspetti che deve essere approfondito in modo marcato poiché molte di queste regioni o province vengono allertate, o comunque viene segnalato un evento piovoso estremo, anche se una sola delle celle di ERA5-Land ricade in quella regione o provincia, generando così un falso segnale. Questo aspetto è molto evidente nel caso della suddivisione in province poiché il grado di dettaglio richiesto in questo caso è molto elevato e utilizzando le celle di dimensione 9 km per 9 km di ERA5-Land è molto

probabile che vengano interessate anche le province limitrofe a quella in cui si è verificato l'evento reale;

- I risultati ottenuti per la classificazione risultano comunque avere un buon grado di rappresentatività; infatti, utilizzando le soglie ottimali come quella al 4% o al 5% si riesce a raggiungere un buon compromesso tra il numero di eventi che vengono verificati dal confronto tra ERA5-Land e quelli EM-DAT o ESWD, minimizzando, o comunque avvicinandosi molto al valore più basso, il costo totale derivato dal numero di mancati segnali e di falsi segnali. D'altro canto, le soglie 4% e 5% sono la miglior soluzione, se viene considerato oltre al costo anche il numero e la percentuale di eventi verificati rispetto a quelli dei database EM-DAT e ESWD. Soprattutto per quanto riguarda la suddivisione in eventi regionali, dove si ottengono i risultati migliori scegliendo una soglia pluviometrica al 4% di PMA, da cui si ottiene una stima pari al 47% degli eventi EM-DAT e ESWD verificati. Applicando la suddivisione provinciale invece si ottengono risultati leggermente peggiori; infatti, scegliendo di utilizzare la medesima soglia pluviometrica del 4% di PMA si intercettano solo più il 36% dei segnali EM-DAT e ESWD.

In conclusione, questo lavoro ha dimostrato in modo preliminare che i dati di rianalisi possono essere effettivamente utilizzati per l'identificazione di soglie pluviometriche e per lo studio di eventi piovosi estremi che sono avvenuti in passato. Vi è comunque la necessità di approfondire ulteriormente l'applicazione dei metodi di analisi retrospettiva in questi termini, mettendoli a confronto con altri *dataset* di rianalisi per verificarne ulteriormente le loro capacità. Ciononostante, viene confermata l'effettiva utilità di questi *dataset*, in particolare quella di ERA5-Land, anche nel caso in cui il dato utilizzato sia un dato derivato e non direttamente acquisito come dato di *input*. Il *dataset* di ERA5-Land riesce in modo generalmente buono a simulare e stimare le precipitazioni. Sono stati riscontrati alcuni *deficit* nella rappresentazione di alcuni eventi che non sono stati correttamente simulati e in generale si manifesta una leggera sottostima delle piogge, che in alcuni casi diventa più marcata. A parte questi

particolari eventi è stata riscontrata una effettiva possibilità di impiego di questi metodi per queste analisi e per altre di diversa natura.

Bibliografia

- Adler R.F., Negri A.J., *A Satellite Infrared Technique to Estimate Tropical Convective and Stratiform Rainfall*, 1988, 27, 30 - 51, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1988\)027%3C0030:ASITTE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1988)027%3C0030:ASITTE%3E2.0.CO;2)
- Albergel C., Balsamo G., de Rosnay P., Muñoz-Sabater J. e Boussetta S., *A bare ground evaporation revision in the ECMWF land-surface scheme: evaluation of its impact using ground soil moisture and satellite microwave data*, Hydrology and Earth System Sciences, 2012, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3607-2012>
- Balsamo G., Beliaeva A., Scipal K, Viterbo P., van den Hurk B., Hirschi M., Betts A.K., 2009, *A revised hydrology for the ECMWF model: verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System*, Journal of Hydrometeorology, 2009, 10, 623 - 643, <https://doi.org/10.1175/2008JHM1068.1>
- Bechtold, P., Semane, N., Lopez, P., Chaboureaud, J.-P., Beljaars, A. and Bormann, N., *Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models*. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71, 734 - 753, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0163.1>
- Belmonte Rivas, Stoffeln A., *Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT*, Ocean Science, 2019, 15, 831 - 852, <https://doi.org/10.5194/os-15-831-2019>
- Crespi M., Ferrari G., *QUADERNO DI METEOROLOGIA APERTA n° 2 DELLA RIANALISI, O ANALISI RETROSPETTIVA, IN METEOROLOGIA*, 2020, https://www.radarmeteo.com/wp-content/uploads/2020/11/Quaderno2_Meteorologia_Aperta_Rianalisi.pdf
- Dutra E., Balsamo G, Viterbo P., Miranda P., Mironov D. e Schär C., *Impact of lakes on the ECMWF surface scheme*, ECMWF Technical Memorandum, 2009
- ECMWF R&D (2016), *IFS documentation* cy41r2, <https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation>
- Elisabetta C., Tesi di Laurea Magistrale - *Realizzazione di un simulatore di pioggia di laboratorio in scala reale*, 2020, pg. 42
- Fehlmann M., Rohrer M., von Lerber A. e Stoffel M., *Automated precipitation monitoring with the Thies disdrometer biases and ways for improvement*, 2020, 13, 4683-4698, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4683-2020>
- Forbes R.M., Ahlgrimm, M., *On the representation of high-latitude boundary-layer mixed-phase cloud in the ECMWF global model*, Monthly Weather Review, 2014, 142, 9, 3425 - 3445, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00325.1>
- Galvano E., Tesi di Laurea Magistrale - *Ricostruzione delle forzanti meteo da sensori remoti dell'evento alluvionale del 19-24 ottobre 2019 in Piemonte*, 2020, pg 10

- Graham R.M., Hudson S.R., Maturilli M., *Improved Performance of ERA5 in Arctic Gateway Relative to Four Global Atmospheric Reanalyses*, Geophysical Research Letters, 2019, 46, 6138 – 6147, <https://doi.org/10.1029/2019GL082781>
- Graham, R.M., Hudson, S.R. and Maturilli, M., *Improved Performance of ERA5 in Arctic Gateway Relative to Four Global Atmospheric Reanalyses*. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46, 6138– 6147. <https://doi.org/10.1029/2019GL082781>
- Gunn R., D.Kinzer G., *The Terminal velocity for fall water droplets in stagnant air*, 1949, 16, 243-248, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2)
- Hersbach H. et al., *The ERA5 global reanalysis*, 2020, 146, 730, 1999 – 2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hou A.Y., Kakar R.K., Neck S., Azarbarzin AA, Kummerow CD, Kojima M., Iguchi T., La missione globale di misurazione delle precipitazioni. *Bollettino dell'American Meteorological Society*, 2014, 95, 701 – 722
- Janssen P.A.E.M. e Bidlot J., *On the extension of the freak wave warning system and its verification*, Technical Memorandum, 2009, <https://doi.org/10.21657/uf1sybog>
- Malardel S., Ricard D., *An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141, 2114 – 2126, <https://doi.org/10.1002/qj.2509>
- Marshall J.S. e McK. Palmer W., *The distribution of raindrops with size*, 1948
- Mazzoglio P., Laio F., Balbo F., Boccardo P. e Disabato F., *Improving as Extreme Rainfall Detection System with GPM IMERG data*, 2019, <https://doi.org/10.3390/rs11060677>
- Mazzoglio P., Parodi A. e Parodi A., *Detecting Extreme Rainfall Events Using the WRF-ERDS Workflow: The 15 July 2020 Palermo Case Study*, 2022, <https://doi.org/10.3390/w14010086>
- Sandu, I., Beljaars, A., Bechtold, P., Mauritsen, T. and Balsamo, G., Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models?. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 5, 117– 133, <https://doi.org/10.1002/jame.20013>
- Singh T., Saha U., Prasad V.S., Das Gupta M., *Assessment of newly-developed high resolution reanalyses (IMDAA, NGFS and ERA5) against rainfall observations for Indian region*, 2021, Atmospheric Research, 259, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105679>
- Sun Q., Miao C., Duan Q., Ashouri H., Sorooshian S., Hsu K.L., *A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons*, 2017, 56, 79-107, <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>

Tetzner D., Thomas E., Allen C., *A validation of ERA5 reanalysis data in the Southern Antarctic peninsula – Ellsworth Land region, and its implications for ice core studies*, Geosciences, 2019, 9, <https://doi.org/10.3390/geosciences9070289>

Xu J., Ma Z., Yan S., Peng J., *Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products? A comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China*, Journal of Hydrology, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127353>

Xu X., Frey S.K., Boluwade A., Erler A. R., Khader O., Lapen D. R., Sudicky E., *Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains*, Journal of Hydrology, 2019, 24, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100608>

Sitografia

Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

Centro Geofisico Prealpino – Statistiche Meteorologiche, 2021, *Funzionamento del Disdrometro*, <https://www.astrogeo.va.it/statistiche/disdrometro.php>

Coldiretti, 2 settembre 2021, *Onu: in Italia 1400 eventi climatici estremi ne 2021(+65%)*, https://www.coldiretti.it/meteo_clima/onu-in-italia-1400-eventi-climatici-estremi-nel-2021-65

Copernicus European Eyes on Earth

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>

Dato Climate-data.org, <https://it.climate-data.org/>

EM-DAT, <https://www.emdat.be/>

ESWD, <https://eswd.eu/cgi-bin/eswd.cgi>

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro, desidero menzionare e ringraziare tutte le persone che hanno contribuito a renderlo possibile, senza le quali non sarei arrivato fino a questo punto.

Ringrazio il mio relatore Pierluigi Claps perché in questi mesi ha saputo guidarmi con suggerimenti sia teorici che pratici e dare un indirizzo preciso al lavoro svolto.

Ringrazio molto la mia correlatrice Paola Mazzoglio, che è sempre stata disponibile in ogni momento per ogni mio dubbio e senza la quale non avrei raggiunto l'obiettivo.

Ringrazio anche particolarmente i miei genitori, mia sorella, i miei zii che in tutti questi anni mi hanno sopportato e supportato, spronato e soprattutto aiutato a raggiungere questo traguardo.

Ringrazio i miei compagni di classe e tutti miei amici che hanno contribuito, ognuno a modo suo, a rendere speciale questo percorso.

Ed infine ringrazio anche me stesso per non aver mai mollato in questi anni, anche quando le difficoltà erano tante e mi auguro che questo traguardo possa essere un punto fermo e un nuovo inizio della mia vita.