

POLITECNICO DI TORINO

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

Indirizzo: Rischi naturali e Protezione civile



Tesi di Laurea Magistrale

Metodologie per la caratterizzazione di eventi idrologici
spazialmente distribuiti: un confronto su scala nazionale

Relatori:

Prof. Alberto Viglione

Prof. Daniele Ganora

Dott. Lorenzo Campo

Dott.ssa. Tatiana Ghizzoni

Candidato:

Alessandro Borre

Anno Accademico 2020/2021

Abstract [IT]

La valutazione di eventi alluvionali estremi negli ultimi anni è stata sempre più considerata nell'ambito degli studi idrologici a causa delle forti ripercussioni socioeconomiche verificatesi sul territorio. Fermarsi ad un approccio univariato del problema, conducendo quindi un'analisi di frequenza locale a sito singolo, potrebbe rappresentare una importante limitazione. Per questo motivo nel recente passato, sempre più ricerche si sono concentrate su una caratterizzazione regionale del problema, cercando quindi di stimare non più solamente la distribuzione temporale di un evento, ma anche quella spaziale. Il principale obiettivo del lavoro di tesi è quello di applicare tre differenti metodologie per la selezione e caratterizzazione di una serie di eventi alluvionali verificatesi sul territorio italiano. I tre metodi sono stati studiati e messi in pratica facendo fede alle ricerche che il Professor Alberto Viglione, la Dottoressa Manuela Brunner e la Fondazione CIMA hanno condotto in periodi precedenti ed in contesti diversi da quello nazionale italiano. Per l'applicazione dei tre metodi ho utilizzato sia dati osservati a terra che dati modellati, in modo da avere una visione più completa ed omogenea del problema. Lo scopo principale è quello di estrarre una lista di eventi idrologici estremi che hanno colpito il territorio italiano nell'intervallo temporale 2005-2019 su grande scala, interessando quindi simultaneamente più aree. Inoltre, ho definito per ogni metodo una classificazione degli eventi idrologici estremi al fine di effettuare un confronto più approfondito con una lista di eventi, selezionati tramite consultazione di database nazionali. I procedimenti applicati presentano tra loro differenze e analogie, che permettono un confronto sulla base della catena esecutiva dei parametri utilizzati e dei risultati ottenuti. Le differenze più considerevoli si riscontrano nel diverso processo di calcolo di tempi di ritorno empirici locali e in un differente utilizzo dei filtri e delle soglie per l'identificazione di un superamento e la conseguente caratterizzazione di un evento. Le metodologie del Professor Viglione e della Fondazione CIMA permettono il raggiungimento di risultati simili tra loro e paragonabili con l'analisi qualitativa svolta, mentre il metodo della Dottoressa Brunner sembra meno consistente, individuando una differente selezione di eventi alluvionali che risulta essere poco compatibile con quanto prodotto durante la consultazione dei differenti database nazionali. Gli eventi estremi contemporanei su più bacini risultano essere distribuiti in modo non omogeneo sul territorio nazionale; si evidenzia infatti la presenza di un numero maggiore di eventi nel nord e nel centro Italia, dove si trovano i grandi bacini italiani, come il Po, l'Adige, l'Arno e il Tevere. L'analisi di frequenza temporale di questi estremi sembra confermare un aumento progressivo della criticità degli eventi alluvionali provocata dal cambiamento climatico e da altri fattori antropici.

Abstract [EN]

The evaluation of extreme flood events in the past years is key in informing hydrological studies due to the powerful socioeconomic impacts that these events have caused. The univariate approach of the problem, based on the analysis of local flood frequency on a single site, could represent an important limitation. For this reason, in the recent past, more and more researches have been focusing on the regional characterization of the problem, trying to characterize not only the temporal distribution of events, but also their spatial one. The main objective of this thesis is the comparison of three different methods for the selection and the characterization of spatially distributed flood events that have occurred in Italy. The three methods considered here have been applied by Prof. Alberto Viglione, Doc. Manuela Brunner, and CIMA Foundation in different regions and periods and have not been compared on a consistent database before. For the application of these three methods, both observed and modeled discharge data have been used, to have a complete and homogeneous view of the problem. First, a list of extreme flood events that have affected the Italian territory in the time interval 2005-2019 involving simultaneously more areas is extracted from the database. These events are then ranked based on indices provided by each of the three methods to ease the comparison among them. The methods have been compared in terms of their technical analogies and differences, the values of the parameters used, and the results obtained. The most significant differences are observed in the different computation of the local empirical flow return times and the different use of filters and thresholds for the identification and characterization of the events. The methodologies of Prof. Viglione and the CIMA Foundation show similar results, comparable with the list of extreme flood events that have affected the Italian territory, while Doc. Brunner's method seems less consistent, with a different selection of flood events. The results show that contemporary extreme events on multiple basins are distributed in a non-homogeneous way on the national territory: it should be noted that the presence of a higher number of events in the North and Central Italy is to be expected because the largest Italian basins, as Po, Adige, Arno, and Tevere are located there. The temporal frequency analysis of these extremes seems to confirm a progressive rise in the magnitude of flood events due to climate change and other human factors.

Sommario

1. INTRODUZIONE.....	7
2. IL FENOMENO ALLUVIONALE	14
2.1 IDROLOGIA: LO STUDIO DELLE ACQUE.....	14
2.2 IL RISCHIO ALLUVIONALE	15
2.3 STUDIO DI UN FENOMENO ALLUVIONALE IN AMBITO STATISTICO.....	18
2.4 EVENTO SPAZIALMENTE DISTRIBUITO	19
3. ELABORAZIONE DEI DATI	22
3.1 DATI NECESSARI PER LO STUDIO DI UN EVENTO IDROLOGICO	22
3.2 STAZIONI IDROMETRICHE E MISURAZIONE DEI DATI IDROLOGICI	24
3.3 DATI IDROLOGICI IN ITALIA E BANCHE DATI DISPONIBILI.....	27
3.4 DATI CIMA.....	29
3.5 FITTING DEI DATI OSSERVATI	33
4. METODI ANALIZZATI	34
4.1 METODO CIMA.....	34
4.2 METODO ALBERTO VIGLIONE.....	39
4.3 METODO MANUELA BRUNNER	45
4.4 DATABASE DEI PRINCIPALI EVENTI ALLUVIONALI IN ITALIA NEL PERIODO 2000-2019.....	54
4.5 CONFRONTO TRA LE DIFFERENTI METODOLOGIE	58
5 ANALISI DEI RISULTATI.....	63
5.1 OUTPUT PRODOTTI	63
5.2 ANALISI DI SENSITIVITÀ	65
5.3 AFFINITÀ TRA LE DIVERSE METODOLOGIE E I LORO PRODOTTI	73
5.4 TENDENZA DELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEGLI EVENTI ALLUVIONALI	78
5.5 TENDENZA DELLE SINGOLE STAZIONI IDROMETRICHE	86
6. CONCLUSIONI	92
ALLEGATI	94
BIBLIOGRAFIA.....	104
SITOGRAFIA.....	106

1. Introduzione

Secondo lo studio (Honda et al.,2012) condotto dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), realizzato per esaminare come siano cambiati nel tempo gli impatti di eventi climatici estremi, si dimostra come negli ultimi decenni gli eventi alluvionali hanno avuto un impatto sempre più evidente sulla vita umana, colpendo fortemente il territorio, i beni economici e sociali in tutta Europa e non solo. Il rischio che un evento alluvionale, più comunemente chiamato alluvione, si presenti è sempre più alto, aggravandosi con il passare del tempo. Ciò è sicuramente dovuto al numero di persone che sono esposte al rischio, sempre più concentrate in aree metropolitane o urbane non protette. Un altro fattore, ancora di matrice umana, è il cambiamento climatico, che nel tempo causerà il moltiplicarsi di eventi naturali e il presentarsi di eventi considerati estremi, mai osservati nel passato e che prenderanno alla sprovvista le future popolazioni.

Un evento alluvionale, oltre che essere un fenomeno naturale, rappresenta anche un fenomeno sociale ed economico. L'Italia è sempre stato un paese colpito da eventi naturali come le alluvioni, si pensi all'evento che ha colpito il Piemonte meridionale e la Liguria in data 2-3 ottobre 2020, che oltre ad aver causato ingenti danni materiali, per cui è stato previsto lo stanziamento di 15 milioni di euro a carico del Fondo per le emergenze naturali, ha causato tre vittime e l'evacuazione di 550 persone dalle proprie abitazioni.

Dal 1988 il CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*) ha lanciato una campagna con l'obiettivo di costruire un database in cui fossero presenti eventi che costituissero un'emergenza per la popolazione mondiale. Il database è quindi uno strumento funzionale per proporre nuove azioni a livello nazionale e internazionale con l'obiettivo di razionalizzare nel miglior metodo possibile la catena di decisione che precede e segue ad un evento naturale. Dal 1994 al 2013 sono stati registrati 6.873 disastri naturali nel mondo, che hanno provocato la morte di 1.35 milioni di persone, con una media di 68.000 vite ogni anno. Gli eventi considerati dal Centro di Ricerca sono di tipo geofisico, terremoti, tsunami, eruzioni vulcaniche e frane, o legati in modo diretto ad eventi atmosferici, alluvioni o tempeste. Se per la prima tipologia di disastro naturale i numeri sono rimasti costanti durante il periodo di analisi, la stessa cosa non si può dire per i secondi. Infatti, gli eventi alluvionali dal 2000 in poi si sono duplicati in

numero, questo sicuramente a causa del forte legame che il presentarsi di questi eventi ha con il cambiamento climatico.

Analizzando maggiormente nel dettaglio l'aspetto economico del presentarsi di un evento naturale, può essere preso in considerazione uno studio condotto dalla EEA (*European Economic Area*) nel 2017. Le perdite di carattere economico, dovute ad eventi estremi legati all'ambiente climatico nel periodo 1980-2017 nei 33 Stati membri dell'Agenzia europea dell'Ambiente, ammontano approssimativamente a 453 bilioni di euro. In questo intervallo temporale si possono individuare tre principali periodi, a cui corrispondono impatti economici differenti.

- 1990-1989 danni stimati in 7.4 bilioni di euro;
- 1990-1999 danni stimati in 13.4 bilioni di euro;
- 2000-2009 danni stimati in 14 bilioni di euro;
- 2010-2017 danni stimati in 13 bilioni di euro.

L'incremento dell'impatto economico negli anni è dovuto ad una tendenza storica relativa allo studio degli impatti e delle diverse tipologie di eventi, geofisici, meteorologici, idrologici e climatologici. Come è stato esposto dallo studio di Kundzewicz (2015) e di Mangini et al. (2017), negli ultimi anni il numero di eventi che è stato analizzato è di gran lunga superiore a quello considerato negli anni Ottanta. Non può essere tralasciato l'aspetto legato al cambiamento climatico, sempre più preponderante nella vita di tutti noi: le precipitazioni sono molto più intense raggiungendo valori che non sono mai stati osservati in passato, i ghiacciai vanno incontro ad un progressivo scioglimento causando quindi una portata maggiore nei periodi primaverili ed estivi dei torrenti o bacini cui sono strettamente collegati. Un altro elemento da prendere in considerazione è sicuramente la conurbazione, fenomeno per il quale i centri abitati vengono inglobati in un'unica area urbana. Ciò comporta sicuramente dei benefici per quanto riguarda l'aspetto sociale ed economico, ma comporta anche un addensamento della popolazione, e nel caso di un evento estremo mai osservato in precedenza, sia di natura alluvionale che precipitativa o sismica, questo può provocare ingenti danni economici e la perdita di un gran numero di vite umane, in più può provocare la riduzione della capacità di laminazione del suolo con conseguente e progressiva impermeabilizzazione delle superfici a discapito delle aree naturali di espansione delle piene.

Nell'elenco prodotto dall'EEA è facile individuare come l'Italia sia storicamente una delle nazioni più colpite da eventi alluvionali e non solo. Per quanto riguarda le perdite totali, sempre nello stesso intervallo temporale, l'ammontare dei danni economici si aggira intorno ai 64.673 milioni di euro, seconda solo alla Francia in questa particolare classifica.

In merito al danno sociale invece, considerando il numero delle vittime dovute ad eventi estremi, si evidenzia come l'Italia si collochi in seconda posizione, sempre dietro la Francia, con 20.657 morti in 27 anni, che corrispondono ad una media di 766 morti in un anno.

A conferma dei dati appena riportati è possibile osservare in Figura 1 come l'Italia sia completamente colorata, e di conseguenza soggetta ad eventi franosi o alluvionali in un numero consistente di aree. I dati riportati in figura caratterizzano la pericolosità di un episodio franoso o alluvionale, esprimendo quindi la probabilità di accadimento di un evento di data intensità in un intervallo temporale fissato in una determinata zona.

Nello specifico, per la pericolosità idraulica vengono identificati tre possibili scenari a seconda del tempo di ritorno, l'estensione, i livelli, le velocità e le portate che hanno caratterizzato l'evento alluvionale.

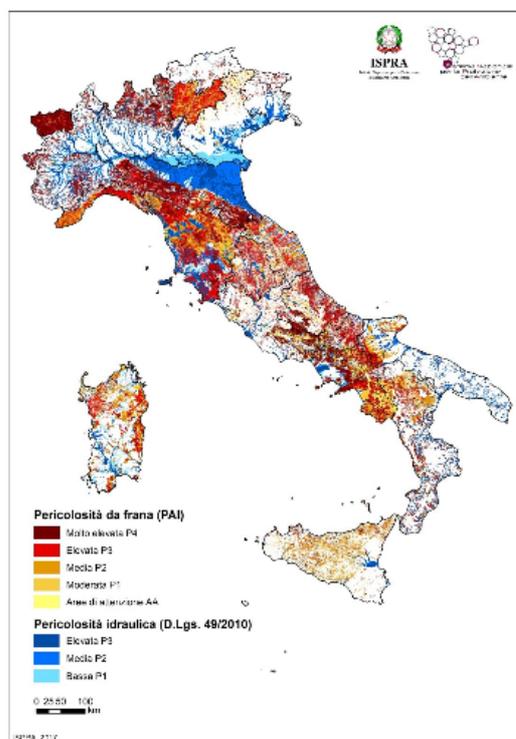


Figura 1: Mappa di pericolosità frane ed idraulica fornita dall'ISPRA. (Da <https://www.isprambiente.gov.it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2018/ispra-aggiorna-la-mappa-nazionale-del-dissesto-idrogeologico-nel-91-dei-comuni-italiani-oltre-3-milioni-di-famiglie-residenti-in-zone-a-rischio>)

Dopo aver evidenziato questa serie di dati che mostrano come i disastri naturali e nello specifico gli eventi alluvionali siano una delle problematiche maggiori per la vita e l'economia umana, l'obiettivo principale da raggiungere è quello di essere in grado di caratterizzare gli eventi nel modo più specifico possibile, ed agire preventivamente evitando azioni di protezione post evento, il più delle volte insufficienti per eventi successivi, oltre che ad avere un costo di realizzazione molto più elevato.

Come specificato dal rapporto ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) sul dissesto idrogeologico in Italia del 2018 (Triglia et al., 2018), anche se gli episodi legati a fenomeni alluvionali vengono definiti come eventi imprevedibili, esiste una peculiarità nella ripetitività del presentarsi dell'evento stesso, che andrà ad interessare nella maggior parte dei casi le medesime porzioni di territorio contraddistinte da particolari condizioni geomorfologiche e di uso del suolo. Proprio per questa ragione individuare le aree che sono state esposte al rischio durante eventi passati è fondamentale al fine di acquisire un quadro conoscitivo preliminare del rischio, nel quale saranno riportate tutte le informazioni disponibili come la localizzazione, l'andamento morfologico del terreno, l'estensione dell'area o il livello di antropizzazione, utili per individuare le zone da proteggere e in cui intervenire in modo strutturale.

Proprio nel contesto di prevenzione e identificazione di eventi estremi di tipo alluvionale che si inserisce la Fondazione CIMA, Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale, un ente di ricerca senza scopo di lucro e di interesse generale del Paese. Fin dalla sua istituzione, l'obiettivo era lo studio delle strategie per la mitigazione del rischio da inondazione e da frana, sviluppando modelli matematici che potessero svolgere un ruolo di supporto nel migliorare la previsione e la prevenzione di fenomeni alluvionali.

I miei contatti con la Fondazione CIMA hanno avuto inizio nei mesi di agosto 2020, con lo scopo di svolgere un tirocinio formativo con la sezione di idraulica ed idrologia della Fondazione coordinata dal Dottor. Simone Gabellani, ricercatore della Fondazione e capo del dipartimento Idrologia & Idraulica. Durante questo periodo ho portato a termine alcuni progetti, tra cui il completamento del database utilizzato per la modellazione idraulica di eventi alluvionali e la redazione di un elenco di eventi alluvionali storici da utilizzare per un confronto con i dati ottenuti in questo studio.

Per svolgere al meglio il lavoro di stesura e modellazione, fondamentale è stato l'aiuto dei Professori Alberto Viglione e Daniele Ganora, ma anche della sezione di idrologia idraulica e *risk management* della fondazione CIMA di Savona, composta da esperti ricercatori che si sono resi disponibili sin da subito ad integrare il lavoro di tesi con i diversi modelli e il database in loro possesso. In particolare, per la redazione del lavoro di tesi che non ha interesse puramente teorico, ma anche pratico, hanno seguito il mio lavoro i Dottori e ricercatori Simone Gabellani, Tatiana Ghizzoni, Lorenzo Campo e Giulia Bruno.

Le attività che sono state portate avanti da agosto 2020 in poi possono essere brevemente riassunte nei punti seguenti, in modo da facilitare la lettura del lavoro svolto in ottica più generale evidenziando i diversi passaggi compiuti e come questi si leghino tra di loro.

- Elaborazione dei dati: la prima parte dell'analisi si è concentrata sull'analisi dei dati di portata fluviale giornaliera in possesso della Fondazione CIMA relativa a 264 sezioni distribuite in tutta Italia; era necessario per alcune metodologie eliminare o sostituire i valori non presenti nel database in quanto potevano rappresentare un ostacolo per lo studio. In questa prima parte di progetto siamo riusciti ad utilizzare due database differenti di dati, quelli storici relativi alle scale di deflusso fornite dalle diverse regioni, e quelli modellati forniti dalla Fondazione CIMA grazie all'impiego del modello idrologico CONTINUUM. L'utilizzo di due *dataset* differenti ha comportato una differenza sostanziale nel numero di dati da dover trattare, in quanto le stazioni prese in considerazione dal modello e per cui erano disponibili i dati di portata modellata oraria risultavano essere 457.
- Modelli utilizzati: grazie all'aiuto del Professor Alberto Viglione e della Fondazione Cima sono riuscito ad applicare diverse metodologie per l'analisi di eventi idrologici spazialmente distribuiti, in modo da ottenere dati che correlassero i diversi eventi selezionati secondo parametri differenti. I modelli che sono stati utilizzati e approfonditi nei capitoli successivi sono quello studiato dal Professor Alberto Viglione, dalla Fondazione CIMA e da Manuela Brunner, ricercatrice svizzera che nella sua carriera universitaria si è spesso occupata dello studio di eventi estremi con analisi multivariate.
- Confronto tra i risultati ottenuti: l'obiettivo finale del progetto di tesi era quello di confrontare i diversi risultati ottenuti dalle metodologie applicate, in modo da poter

comprendere quelli che sono i metodi migliori e che si avvicinassero maggiormente all'elenco prodotto durante il periodo di tirocinio, e che quindi fossero maggiormente consistenti con i dati storici. Un obiettivo aggiuntivo che siamo riusciti a raggiungere grazie al tempo in nostro possesso è stato quello di confrontare i risultati delle diverse metodologie messe in pratica facendo fede a database differenti, questo era un lavoro richiesto dalla Fondazione in quanto poteva essere utile per le loro successive ricerche.

- Analisi dei risultati ottenuti: proseguendo il confronto tra le metodologie applicate nelle fasi precedenti, ho concentrato parte del progetto di tesi nell'analisi dei risultati ottenuti da ogni diverso metodo e come questi potessero essere interpretati e potessero facilitare la realizzazione di alcune importanti osservazioni sull'andamento degli eventi alluvionali sul territorio italiano in un prossimo futuro.

Come viene precisato nel titolo, lo scopo principale era quello di confrontare diverse metodologie per la caratterizzazione di eventi idrologici, in modo che questi possano essere classificati a seconda di diversi parametri e della loro pericolosità.

Il lavoro è partito da alcuni interrogativi che la fondazione CIMA si era posta nei confronti di questo ambito idrologico: il modello messo a punto per la selezione degli eventi, è adeguato al contesto italiano? Nell'applicazione della metodologia sono stati trascurati alcuni parametri che potevano modificare notevolmente i risultati ottenuti? Abbiamo quindi cercato di dare una risposta a queste domande, facendo prima un'analisi teorica dei metodi che sia il Professor Alberto Viglione che la Dottoressa Manuela Brunner hanno realizzato ed applicato in contesti diversi da quello italiano. Con i dati che il CIMA era in grado di fornirci, in termini di portata osservata e modellata, siamo stati in grado di poter anche applicare i modelli precedentemente citati ad un caso reale.

In Italia e non solo, la prevenzione è spesso sottovalutata e presa raramente in considerazione, soprattutto quando si parla di eventi idrogeologici. Ed è proprio in questo contesto di prevenzione che si inseriscono le diverse metodologie di caratterizzazione e selezione che analizzerò nello specifico. Individuare e conoscere tutte le informazioni possibili su un evento passato può essere fondamentale per la prima fase della valutazione del rischio, in questo modo una base di dati corrispondente ad eventi alluvionali passati consente di porre le basi per le analisi e le scelte future.

Lo studio svolto dalla tesi può essere facilmente inquadrato anche in ambito assicurativo e riassicurativo. Infatti, l'analisi degli eventi spazialmente distribuiti è frequentemente utilizzata dalle società per quanto riguarda la classificazione degli eventi e l'individuazione del rischio correlato ad un preciso evento e ad una specifica area. Le compagnie di assicurazioni hanno come obiettivo quello di quantificare gli impatti che i diversi eventi possono avere sul loro portafoglio. In questo studio l'accento risulta essere posto maggiormente sul confronto tra modelli più teorici e meno pratici, senza quindi considerare l'aspetto economico o l'aspetto del danno correlato fortemente alla vulnerabilità e all'esposizione del territorio preso in considerazione, può però essere considerato come un primo step nel processo di valutazione del rischio.

Sono sempre più negli ultimi anni le aziende o imprese che richiedono di stipulare polizze contro eventi naturali a carattere catastrofico. Negli Stati Uniti e nel Regno Unito questa pratica era spesso richiesta già ad inizio degli anni 2000, in Italia solamente negli ultimi anni sta maggiormente diffondendosi, forse anche grazie alla maggiore disponibilità di dati idraulici che permettono di identificare in modo più omogeneo le aree in cui si evidenzia un rischio alluvionale molto elevato.

2. Il fenomeno alluvionale

In questo secondo capitolo il mio obiettivo è quello di svolgere un'indagine teorica in cui vengono esaminati con maggiore dettaglio i fenomeni idrologici e il rischio idrogeologico in ambito statistico e teorico. Al termine del capitolo, spero quindi di aver reso disponibili tutte le informazioni per poter comprendere al meglio come studiare un evento alluvionale e nello specifico come poter distinguere, nelle prime fasi di un'analisi, eventi a carattere locale da eventi spazialmente distribuiti.

2.1 Idrologia: lo studio delle acque

L'idrologia, da enciclopedia Treccani, è la scienza che studia dal punto di vista chimico, fisico e meccanico le acque. Nel nostro caso un evento idrologico è un qualsivoglia fenomeno naturale che comporti l'interazione con acque marine, fluviali, glaciali e che provochi problematiche per la vita umana.

Nella pratica di questa tesi è interessante definire anche quella che è la disciplina dell'idrogeologia, differente dall'idrologia. Quest'ultima viene definita, secondo quanto scritto dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana, come la disciplina delle scienze geologiche che studia le acque sotterranee, anche in rapporto a quelle che sono le acque superficiali. Nel quotidiano però i dissesti idrogeologici vengono definiti, anche dai tecnici, come fenomeni e danni reali o potenziali causati dalle acque in generale, senza sottostare alle condizioni specifiche dell'idrogeologia. I fenomeni caratteristici e tipici che rientrano in questa categoria sono frane, alluvioni, erosioni costiere, subsidenze e valanghe. Il classico esempio di un evento idrologico è una piena fluviale, in cui un evento atmosferico di più o meno grandi dimensioni provoca problemi legati all'ambito fluviale che interferiscono con la sfera della salute umana, causando quindi problemi a strutture, edifici, veicoli e persone.

Nel 2018 è stata redatta la Direttiva Alluvioni, in cui la Corte dei conti europea ha voluto illustrare in sintesi i programmi dell'Unione Europea sul tema dell'uso sostenibile delle risorse naturali e nello specifico sui progressi nella valutazione dei rischi, migliorando le fasi di pianificazione e attuazione.

Nella sopracitata relazione vengono definiti alcuni termini che in questo studio saranno riproposti e quindi credo sia importante riprendere. Un'alluvione è indicata dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) come la fuoriuscita di un torrente o di altri corpi idrici dai loro alvei oppure l'accumulo di acqua in zone che non sono abitualmente sommerse. Più in dettaglio, è descritta una differenza tra un'alluvione fluviale e una pluviale: mentre la prima è prettamente dovuta al superamento della capacità di drenaggio, la seconda è causata da intense precipitazioni che comportano la presenza di acque in eccesso che non vengono assorbite dal terreno e si riversano su strade o pendii.

2.2 Il rischio alluvionale

Con l'obiettivo di fronteggiare gli eventi naturali che si presentano sul territorio italiano ed europeo gli stati membri dell'Unione Europea hanno l'obbligo di stilare un Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), un documento costruito su base nazionale che permetta di introdurre obiettivi e misure appropriate per la prevenzione, protezione e preparazione del territorio in materia di eventi alluvionali. Le azioni cardine che sono state riprese mirano ad ottenere la mitigazione del rischio. In particolare, la prevenzione intende prevenire i danni che si possono presentare durante e dopo l'evento, agendo in modo da anticipare possibili danni e vittime. La protezione mira invece a ridurre la probabilità che l'evento alluvionale si verifichi in un'area specifica modificando l'impatto che l'evento può avere sull'ambiente esterno. Infine, la preparazione prevede l'informazione della popolazione delle aree individuate nelle fasi precedenti sui rischi che possono avverarsi, cercando quindi di fornire tutte le procedure da effettuarsi in caso di evento.

In qualsivoglia disciplina ingegneristica il rischio viene definito come la possibilità che un fenomeno completamente naturale o frutto di attività umane possa provocare effetti dannosi per la popolazione all'interno di una particolare area ed in un preciso intervallo temporale.

Quando si parla di rischio bisognerà sempre analizzare le possibili conseguenze di un dato evento, per fare questo nelle pratiche quotidiane viene spesso utilizzata una semplice formula da applicarsi ai differenti scenari di rischio che si possono presentare:

$$R = P \times V \times E \quad (1)$$

Dove il rischio totale R è identificato in funzione dei tre parametri: P rappresenta la pericolosità in termini di probabilità del verificarsi dell'evento, V indica la vulnerabilità come propensione dell'elemento colpito a subire danni e, E rappresenta l'esposizione in termini di valore esposto degli elementi colpiti dall'evento, classificati secondo delle carte e le tabelle in cui vengono precisate le caratteristiche principali costruttive e le densità abitative specifiche della zona. Questi tre parametri interagiscono quindi tra loro come descritto figurativamente dall'immagine presentata in Figura 2, per la classificazione del rischio.

Il rischio, secondo il decreto-legge n. 180/98 e l'atto d'indirizzo e coordinamento del DPCM 29/9/1998, è invece contraddistinto in 5 classi, identificate nella tabella presentata successivamente nella Tabella 1. Per l'individuazione di una classe vengono utilizzati nella maggior parte delle casistiche dei sistemi matriciali che permettono la combinazione tra i parametri prima identificati.

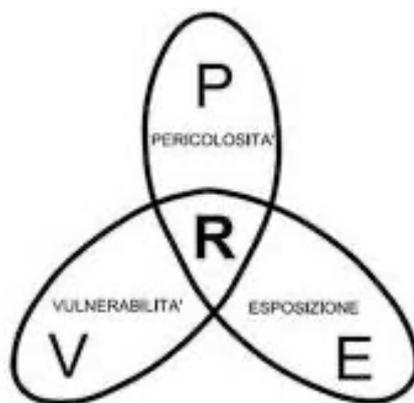


Figura 2: Interazione tra pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

Tabella 1: Classi di rischio alluvionale.

CLASSI DI RISCHIO	
R0	Rischio molto basso
R1	Rischio basso
R2	Rischio medio
R3	Rischio elevato
R4	Rischio molto elevato

Oltre che ad essere il risultato dell'interazione tra pericolosità, esposizione e vulnerabilità come rappresentato in Figura 2, la valutazione del rischio alluvionale e idraulico può essere

disposta in tre fasi successive, così come specificato dalla direttiva europea recepita dall'ordinamento italiano con il D. Lgs. Del 23/2/2010 n.49, le fasi che vengono individuati sono le seguenti:

- Valutazione preliminare del rischio alluvionale.
- Elaborazione delle mappe di pericolosità e rischio (come quella riportata in Figura 1 nel capitolo introduttivo).
- Predisposizione dei piani di gestione del rischio di alluvioni.

Queste tre fasi devono essere sempre mantenute aggiornate in tempo reale, in modo da permettere una valutazione del rischio con un approccio di pianificazione a lungo termine, cercando di non farsi trovare impreparati durante l'evento. Proprio per la realizzazione delle sopraccitate mappe di rischio è importante che queste riportino le potenziali conseguenze negative per le persone, per i beni materiali, per l'ambiente e per i beni culturali; tutte queste informazioni devono essere quindi riconoscibili in una mappa di rischio e, unitamente all'analisi degli eventi passati in termini statistici, identificano la base di partenza per qualsivoglia studio sul rischio alluvionale.

Per la aiutare la massima comprensione dello studio che abbiamo condotto è importante ricordare come il rischio che noi prendiamo in considerazione e vogliamo analizzare è sia quello idrogeologico che quello idraulico; il primo è fortemente legato agli effetti indotti sul territorio dal superamento dei livelli pluviometrici critici tipici della rete idrografica minore e relativa allo smaltimento delle acque piovane, invece il rischio idraulico è sempre strettamente correlato agli effetti indotti dal superamento dei livelli idrometrici critici relativi in questo caso ai corsi d'acqua principali e non secondari.

Il nostro studio rientra proprio nella casistica di analisi di rischio idrogeologico e idraulico, più comunemente chiamato rischio alluvionale, in quanto l'obiettivo di individuare la miglior metodologia per la caratterizzazione degli eventi può essere uno strumento utile per individuare i migliori sistemi di allertamento e sorveglianza dei fenomeni, oltre che ad aiutare nella programmazione di una pianificazione a livello comunale, regionale e anche nazionale per la mitigazione del rischio.

2.3 Studio di un fenomeno alluvionale in ambito statistico

Lo studio del presentarsi dei fenomeni alluvionali è spesso inserito all'interno del contesto statistico. Si analizzano infatti i fenomeni del passato allo scopo di agire preventivamente, evitando dunque possibili danni, e andando ad intervenire nelle zone in cui si può ipotizzare il verificarsi di eventi di grossa portata.

I dati che vengono quindi analizzati e valutati con metodi statistici sono spesso le *time series* dei valori di portata, di temperatura e delle precipitazioni. Utilizzando questi valori siamo in grado di valutare la variabilità spazio-temporale delle serie di dati e quindi di come questi si siano distribuiti nel tempo e nello spazio; analizzare il trend dei valori risulta quindi fondamentale per agire preventivamente e poter predire quelli che saranno i valori raggiunti durante gli eventi alluvionali futuri.

In questo sotto capitolo il mio scopo è quello di mostrare quali possono essere le potenzialità dello studio statistico di eventi idrologici e perché quelli che si presentano con una estesa distribuzione spaziale possono avere una considerazione maggiore allo scopo di evitare danni ingenti nei prossimi anni. Come detto in precedenza, nella maggior parte dei casi durante gli studi idrologici la base di dati con cui si lavora è una serie storica di dati. Per approcciarsi al meglio alla serie e poterla caratterizzare è necessario eseguire un'analisi statistica, considerando quindi la serie in nostro possesso come un'estrazione casuale di un numero finito di valori secondo un ordine temporale.

Il processo statistico in questo caso consiste quindi nel lavorare con alcuni parametri che caratterizzano la serie di dati, quali la lunghezza intesa come indicazione relativa al primo e ultimo anno di rilevamento, la continuità, la completezza e la frequenza, che invece forniscono maggiori informazioni sui dati presenti o mancanti e come questi si distribuiscano nell'intervallo temporale selezionato.

Dopo aver effettuato un primo lavoro sui parametri citati precedentemente, le operazioni successive possono essere presentate come analisi esplorative in cui si esplorano i dati con appositi grafici diagnostici, dunque in maniera quantitativa. In questo modo si è in grado di individuare possibili *outlier*, trend, stagionalità o cambiamenti. Tra le analisi esplorative più rilevanti e che verranno utilizzate nei passaggi successivi ci sono i *time plot*, le distribuzioni di frequenza campionaria e quelle di frequenza cumulata campionaria.

Dopo aver eseguito un'analisi di tipo quantitativo, la fase successiva comporta alcune analisi statistiche di base che sono spesso utilizzate per valutare la dipendenza temporale tra i dati con la funzione di autocorrelazione, la stazionarietà delle serie e la normalità dei dati.

Elementi riguardanti l'analisi dei valori estremi vengono menzionati spesso nella tesi, questo perché risulta essere di particolare interesse per il mio studio lavorare con i fenomeni idrologici più estremi, come fenomeni di inondazione o di precipitazioni intense. In questo modo, conoscendo nel dettaglio l'evento estremo, si è in grado di definire il livello di rischio e di pericolo che questo comporta.

Lo scopo dell'analisi dei valori estremi è quello di stimare in quale intervallo temporale possa ripresentarsi un evento con un determinato valore di un parametro idrologico che lo caratterizza; per fare questo è necessario, in primo luogo, attribuire una corretta distribuzione di probabilità calibrando i relativi parametri con i dati che sono a disposizione, estrapolando così quella che viene definita come la distribuzione dei valori di interesse. In sostanza, un'analisi statistica permette di determinare la rarità e la severità degli eventi estremi. Esistono in letteratura diverse distribuzioni che possono essere utilizzate e che vengono affiancate da diverse stime di parametri, i quali se interrogati forniscono le informazioni sui dati in nostro possesso e come questi si distribuiscono.

Per la nostra analisi non verranno utilizzate particolari tecniche statistiche, ma i modelli che saranno presentati nei capitoli successivi hanno forti basi matematiche e statistiche che permettono di comprendere la distribuzione spazio-temporale dei dati di portata.

2.4 Evento spazialmente distribuito

Nel contesto dell'analisi statistica dei dati di portata, precipitazione e temperature si inserisce per lo studio di eventi alluvionali un approccio multivariato e non univariato, che contraddistingue quindi l'analisi di un evento, che non verrà più esaminato osservando i dati di una singola stazione idrometrica, ma incorporando i dati di altre stazioni distribuite spazialmente in aree differenti. Dovremmo quindi lavorare con dati in forma matriciale e non più solamente in forma vettoriale, se con un approccio univariato siamo in grado di compiere un'analisi di frequenza locale, quindi andando ad esaminare i dati di portata in una singola

stazione idrometrica, quando si opera con un approccio multivariato è necessario analizzare l'evento e i dati di portata in più stazioni in un selezionato intervallo temporale.

Gli eventi che ho individuato con i differenti metodi, presentati nei capitoli successivi, sono considerati come eventi spazialmente distribuiti, il che significa che l'analisi compiuta non è di tipo locale, ma di tipo regionale. I dati considerati sono valori di portata giornaliera in un determinato intervallo temporale, seguendo un approccio multivariato negli ultimi anni lo studio è stato sempre più utilizzato, in quanto permette di determinare la variabilità di un evento sia nello spazio che nel tempo, cosa che prima non era considerata. Infatti, veniva principalmente analizzato l'andamento dei valori di portata di una particolare stazione senza mettere gli stessi in relazione con i dati disponibili nelle altre stazioni delle zone limitrofe. Questo è stato un vero e proprio cambiamento nello studio di questi fenomeni, che prima erano difficili da decifrare in quanto non si comprendeva come potessero evolvere nello spazio, ma solo nel tempo.

Nella Tabella 2 sono stati riportati i valori in ($\frac{m^3}{s}$) delle portate giornaliere massime in alcune sezioni selezionate in un determinato intervallo temporale caratterizzato dal presentarsi di un evento alluvionale. Grazie ad un approccio multivariato sono in grado di osservare più portate contemporaneamente e plottarle su una cartina italiana con colori differenti a seconda dei valori che queste assumono nelle diverse stazioni durante l'evento selezionato. Nel caso preso in esempio sono state evidenziate due stazioni, ma possono essere scelte un numero di stazioni a piacere.

Tabella 2: Portate giornaliere massime ($\frac{m^3}{s}$) in più stazioni idrometriche sul territorio italiano in un intervallo temporale selezionato.

Date	Montegalda	Borgofrassine	Barzizza	Panesi	Piana Crixia	Cartosio	Tronto
12-11-05	22.88	4.13	45.76	15.05	0.20	1.32	2.44
26-11-05	43.95	8.64	61.69	15.05	0.43	3.88	69.07
04-01-06	24.19	3.00	39.31	15.05	0.28	2.26	62.93
27-02-06	37.21	9.50	73.65	15.05	11.91	61.99	34.50
27-11-07	195.78	53.04	276.74	14.11	5.37	26.87	5.72
25-05-08	83.85	15.88	260.74	10.64	46.44	20.66	13.98
12-07-08	26.88	9.22	103.12	3.26	2.19	0.25	7.27
09-11-08	250.65	61.58	540.43	163.38	54.45	29.97	4.63
08-12-08	244.09	78.77	236.07	112.91	150.00	72.01	91.48
27-01-09	172.67	62.09	169.73	464.89	33.58	26.45	23.57
03-02-09	211.06	61.63	256.68	172.95	80.82	54.53	23.64
01-03-09	155.48	49.58	186.40	41.69	26.13	32.21	26.68
24-04-09	324.60	100.00	604.83	46.96	92.36	50.81	266.59
26-05-09	26.04	7.64	168.77	2.37	0.15	1.35	12.83

Successivamente, dopo una prima analisi con approccio multivariato, esistono molte tecniche che in questa tesi non verranno riprese, ma credo sia giusto citare per completare l'argomento e darne una visione più ampia, per la valutazione della correlazione spaziale e stagionale tra eventi alluvionali che si presentano.

Per descrivere la dipendenza spaziale tra gli eventi che vengono selezionati la Dottoressa Manuela Brunner ha elencato una serie di modelli in un articolo del 2019, il più semplice e intuitivo dei quali considera la distanza euclidea tra le stazioni considerate e l'altitudine di queste, in modo da legare le stazioni a seconda della loro posizione geografica. Per la valutazione delle distribuzioni marginali dei valori estremi è consigliato utilizzare alcuni parametri dedotti da distribuzioni statistiche, come i parametri di forma e posizione; osservando questi parametri siamo in grado di capire la distribuzione dei valori nel tempo e tra le diverse stazioni.

Esistono poi due metodi principali che permettono di trattare la dipendenza spaziale degli eventi alluvionali: l'approccio basato su una copula oppure l'approccio di massima di stabilità. I modelli che si concentrano sull'utilizzo di una copula si basano sull'identificare una funzione di distribuzione cumulativa congiunta di due variabili casuali continue, per il calcolo di questa distribuzione è necessario conoscere le distribuzioni marginali delle due variabili. Nel caso prodotto da Manuela Brunner sono state utilizzate differenti tipologie di copule che si differenziano per i parametri che utilizzano e producono: la copula gaussiana, la copula Student t, la copula di Gumbel, la R-vine copula e la copula di Fisher.

I modelli che garantiscono una massima stabilità, invece, permettono di estendere i modelli estremi al contesto spaziale utilizzando una matrice che corrisponde alle distanze tra i fiumi e le diverse stazioni. In questo modo, grazie a differenti metodi statistici che possono essere utilizzati e scelti a seconda del caso che si prende in considerazione, è possibile legare la selezione di eventi alluvionali alla propria distribuzione spaziale in una regione più o meno estesa, fornendo quindi un valido aiuto nella prima fase di calcolo del rischio alluvionale e dei danni che questo può comportare non solamente in un sito localizzato, ma anche in una zona più vasta in cui possono essere presenti un maggior numero di abitazioni ed edifici.

3. Elaborazione dei dati

L'obiettivo del capitolo seguente è quello di dare più informazioni possibili per quanto riguarda l'elaborazione dei dati durante uno studio di un evento alluvionale o di un generico evento a carattere idrologico o idraulico, identificando quelli che sono i parametri su cui concentrarsi maggiormente e come poterli analizzare nel dettaglio. Per questo lavoro mi sono concentrato sul documento prodotto dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) dal titolo: 'Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici'.

3.1 Dati necessari per lo studio di un evento idrologico

La prima considerazione da fare quando si lavora con eventi di tipo idraulico e idrogeologico è quella di conoscere i dati con cui dovremmo interfacciarci e sapere quali possono essere utili a seconda del contesto che si sta analizzando; ad esempio nel caso si faccia riferimento ad eventi di piena fluviale saranno necessari alcuni parametri per eseguire la caratterizzazione dell'evento, mentre se siamo di fronte ad un'intensa precipitazione o ad una erosione costiera i valori da osservare saranno differenti in quanto il contesto tende a cambiare passando da un ambito fluviale ad uno marino.

Le grandezze idrologiche spesso utilizzate durante un'analisi statistica o una caratterizzazione d'evento possono essere riassunte nell'elenco seguente:

- Temperatura dell'aria: parametro la cui unità di misura può essere espressa secondo la scala Celsius (°C), Kelvin (K) o Fahrenheit (°F), molte volte sottovalutato, che però risulta essere particolarmente significativo nella valutazione dell'evapotraspirazione, processo che descrive il fenomeno inverso delle precipitazioni, e nello specifico definisce la quantità di acqua che dal terreno in forma liquida si trasforma in vapore per l'effetto congiunto della traspirazione provocata dalle piante presenti e l'evaporazione dovuta alle caratteristiche del terreno stesso.

Tale parametro permette, con l'ausilio del parametro dell'umidità, di comprendere la quantità d'acqua presente nel suolo che se saturo può provocarne la completa impermeabilizzazione, con conseguenti problemi nel caso in cui ci fossero

precipitazioni intense che non possono essere assorbite dal terreno e che possono provocare accumuli d'acqua piovana, causa di gravi danni non solo alle persone, ma anche ai beni materiali presenti sul territorio.

- Precipitazione: misurato nella maggior parte dei casi in millimetri (mm) da particolari stazioni pluviometriche che saranno analizzate più nel dettaglio nel sotto capitolo successivo.

La precipitazione può presentarsi sia in forma solida che liquida e risulta essere una delle grandezze più interessanti dal punto di vista idrologico, le serie storiche possono essere costituite da precipitazioni cumulate annuali, mensili, giornaliere, orarie o su intervalli temporali. Le misure dei fenomeni precipitativi risultano essere fondamentali per convalidare o aiutare misure di portata o altezze idrometriche eseguite nella stessa area in uno specifico intervallo temporale. Un tipico esempio che spesso viene analizzato è quello di correlare le precipitazioni che si possono presentare a monte di una stazione idrometrica e analizzare se si verificano variazioni evidenti della portata a valle e con quale intervallo temporale.

- Altezza idrometrica: misurata in metri (m) è una grandezza definita relativa, in quanto è misurata rispetto ad un riferimento chiamato zero idrometrico, che non risulta essere fisso ma variabile, presentando quindi un'elevata non stazionarietà legata alla diversa morfologia dei corsi d'acqua.

In questo caso il valore dell'altezza idrometrica può quindi assumere anche valori negativi nel caso in cui il bacino selezionato abbia un livello molto basso e sia in periodo di magra. Il suo utilizzo nell'idrologia statistica è fortemente legato all'economicità della misurazione e alla relazione matematica, che permette di calcolare il valore della portata che transita in una determinata sezione.

- Portata liquida: misurata in $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ è una delle grandezze più utili per le analisi idrologiche, definisce il volume d'acqua che attraversa una specifica sezione nell'unità di tempo.

Nella quotidianità si parla principalmente di portate medie giornaliere, annue o massime annue e giornaliere. La definizione appena data dimostra come questa grandezza non possa essere misurata in modo diretto, ma come sia necessario effettuare una trasformazione matematica con la scala di deflusso. Risulta però essere uno dei parametri più importanti per la caratterizzazione di un evento in quanto spesso viene

associata al tempo di ritorno, questo non è altro che l'intervallo temporale che intercorre tra portate con valori simili in uno stesso bacino fluviale in una differente data, maggiore sarà il tempo di ritorno maggiore sarà l'entità della portata che è stata analizzata e considerata. Per effettuare questo tipo di valutazione è però necessario valutare le *time series* delle portate e come queste si siano distribuite nel tempo, in modo da poter correlare e confrontare i valori di portata passati con quelli misurati.

- Trasporto solido al fondo e in sospensione: ricopre particolare importanza nell'analisi morfologica dei differenti corsi d'acqua, coinvolge principalmente porzioni di sedimenti fluviali o detriti che durante gli eventi di piena vengono trasportati dalla corrente fluviale e che possono rimanere in sospensione oppure depositarsi sul fondo dell'alveo nella fase successiva all'evento. Molte volte questi possono creare problematiche legate all'ostruzione delle luci di ponti o passaggi stradali da parte non solo di fiumi, ma anche di torrenti montani che risultano essere molto più impetuosi e con elevato trasporto solido.

Nel documento (Braca et al.,2013) sono riportati anche altri parametri che possono essere presi in considerazione, ma non trattati in questo studio.

3.2 Stazioni idrometriche e misurazione dei dati idrologici

L'obiettivo del presente sotto capitolo è quello di riassumere tutte le tecniche che possono essere utilizzate per la misura dei valori di precipitazione e di portata e che sono spesso utilizzati durante studi idrologici ed in parte anche nel mio lavoro di tesi.

Come visto in precedenza, con il termine precipitazione si intende un afflusso meteorico in forma liquida o in forma solida. Il metodo più comunemente usato per misurare il livello di pioggia è quello che comporta l'utilizzo di un pluviometro. Questo ha la forma di un recipiente cilindrico in parte composto da un imbuto che serve da raccoglitore dell'acqua meteorica, la lettura del livello dell'acqua all'interno del raccoglitore veniva eseguita manualmente da un operatore con una cadenza non regolare, ora sono stati posizionati dei sensori all'interno dell'apparecchio che permettono una misurazione continua del livello ed un invio con intervallo orario o giornaliero dei valori ad un centro di controllo che può operare a livello provinciale o comunale.

Per molti studi risulta importante studiare anche i valori di intensità di precipitazione, che non sono altro che il rapporto tra l'altezza di precipitazione e l'intervallo temporale in cui viene eseguita la misura, per fare questo è necessario disporre di un pluviografo in grado di produrre uno ietogramma, andamento dell'intensità di precipitazione nel tempo. Il pluviografo è un sistema automatico che permette, con l'ausilio di un sensore, di misurare il valore dell'altezza della pioggia caduta, il pluviografo più utilizzato e conosciuto è quello a bascula. Negli ultimi anni molti studi si sono concentrati sulla misura delle precipitazioni con sistemi satellitari o radar, queste metodologie risultano però ancora poco utilizzate a causa delle imprecisioni tecniche che comportano e scansioni temporali eccessivamente grossolane.

Come già detto nel capitolo precedente, la misura della portata per i grandi corsi d'acqua non può essere fatta in modo diretto, ma è necessario utilizzare altre grandezze caratteristiche del bacino disponibili, a tal fine spesso si utilizzano i valori di velocità della corrente o il livello idrometrico.

I deflussi dei corsi d'acqua non si possono misurare in modo diretto, raccogliendo l'acqua che attraversa una specifica sezione in un dato intervallo temporale, operazione impossibile da compiere sul campo. Per questa ragione il calcolo della portata viene effettuato in modo indiretto, impiegando i valori del livello idrometrico misurati, questo rappresenta il livello del pelo libero, misurato rispetto ad un determinato riferimento. Lo strumento utilizzato per la misura del livello dell'acqua o altezza idrometrica nei fiumi e nei laghi si chiama idrometro. La sezione in cui si installa l'idrometro deve essere stabile e deve permettere la valutazione di una variazione sensibile del livello. L'idrometro più semplice è l'asta idrometrica, un'asta graduata che è spesso fissata alla spalla di un ponte o ad un muro di protezione, la lettura del livello si svolge generalmente ad ora fissa. Lo zero idrometrico si trova generalmente ad una quota tale che le misure di livello siano quasi tutte positive. In questo caso la registrazione della misura avviene con l'ausilio di un operatore, quando questa invece risulta essere automatica ci sono diversi modelli di idrometri, come quello galleggiante, a depressione, o ad ultrasuoni. Quest'ultimo è quello che viene utilizzato per la misura della maggioranza dei dati di livello delle scale di deflusso italiane, è anche riportato in Figura 3. Il principio su cui si basa è la trasmissione di onde ad ultrasuoni verso la superficie da misurare e rileva l'eco ricevuto che viene convertito in una distanza.



Figura 3: Idrometro ad ultrasuoni. (<https://www.zetalab.it/prodotto/stazioni-allarme-livello-idrometrico/>)

Il problema dell'osservazione delle portate dei corsi d'acqua si risolve quindi facendo ricorso a misure indirette, si misura quindi il livello idrometrico, e da questo si stima, sulla base di una relazione tra livelli e portate, il dato di portata. Si assume quindi che per una data sezione esista una relazione biunivoca tra portate e livelli che permette di trasformare le osservazioni di altezza d'acqua in osservazioni di portata. Questa tecnica si basa sul principio che la corrente si muova di moto uniforme, condizione che non sempre si verifica e che può causare diversi problemi legati all'incertezza della valutazione.

Ogni regione italiana ha identificato una relazione generale per associare il valore della portata a quello del livello, queste scale sono state identificate dopo approfondite analisi sui bacini che caratterizzano la regione seguendo l'evoluzione naturale dell'alveo.

Dopo aver presentato brevemente i metodi classici che sono utilizzati per la misurazione dei dati idrologici su bacini fluviali, il mio obiettivo è quello di analizzare più nel dettaglio la rete meteo-idro-pluviometrica che la Protezione Civile Italiana ha disposto su buona parte del territorio nazionale. La strumentazione che è stata utilizzata permette il monitoraggio in tempo reale dei principali parametri meteorologici (precipitazioni, temperatura, umidità, vento), idrogeologici (livello idrometrico) e nivologici (spessore e temperatura stratificata del manto nevoso), in modo da garantire la massima efficienza e tempestività nell'attuazione delle operazioni di previsione e prevenzione dai rischi idrogeologici.

I principali vantaggi dell'utilizzo di questa metodologia possono dunque essere riassunti nell'elenco seguente:

- La conoscenza in tempo reale dell'andamento dei parametri.
- La possibilità di archiviare, visualizzare ed elaborare i dati meteorologici e idrologici.
- La pronta disponibilità dei dati rilevati per la produzione degli annali idrologici.

Esistono due grandi sottosistemi che compongono la rete: il sistema delle stazioni periferiche e il sistema radio ed i centri di controllo. Il primo sistema è composto da tutti gli apparecchi che hanno il compito di rilevare i valori dei parametri monitorati e poi inviarli tramite un sistema di trasmissione dati. Il secondo sistema permette invece il passaggio dei dati dalle stazioni periferiche ai Centri di Controllo e Supervisione Regionale (CCSR), questa connessione è resa possibile da un doppio sistema di ponti radio in modo da poter funzionare anche in caso di avaria di uno dei due. Il centro di controllo è il cuore della rete, è il luogo in cui avviene in modo automatico l'acquisizione, la gestione, l'elaborazione e il trasferimento dei dati della rete, nella gran parte delle regioni italiane il centro è dislocato presso la sala operativa unificata permanente del servizio Protezione civile e sicurezza regionale.

3.3 Dati idrologici in Italia e banche dati disponibili

Il sotto capitolo seguente ha l'obiettivo di illustrare brevemente i progetti italiani che hanno lo scopo di identificare i passati eventi e caratterizzarli il più possibile, questi rappresentano delle vere e proprie banche dati da cui attingere informazioni. Sono principalmente programmi alquanto datati e che nel recente periodo tendono ad essere costantemente aggiornati, la loro consultazione non risulta però facile, in quanto non sempre sono intuitivi e accessibili.

Tra i programmi che hanno contribuito ad aumentare la mole di dati idrologici e climatologici nel passato si annoverano:

- La banca dati Annali ex SIMN, contenente tutti i dati idrologici che sono stati raccolti nel periodo tra il 1917 e il 2002. L'elenco è stato reso disponibile dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), che dal 2002 si limita a raccogliere i dati provenienti dai diversi centri regionali, rendendoli disponibili.
- I centri funzionali, costituiti nel febbraio del 2004 forniscono servizi tecnico-scientifici.

- L'unità CRA-CMA, il Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura (CRA) è composto da un'unità di Climatologia e Meteorologia applicate all'Agricoltura (CMA) che raccoglie dati con l'utilizzo di propri sensori.
- Il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica, i cui dati non sono disponibili in modo gratuito e la cui acquisizione può avvenire previa verifica del dato di cui si ricercano i valori.

I dati idrologici negli ultimi vent'anni vengono spesso rilevati e trattati da diversi centri pubblici presenti sul territorio regionale e comunale, come ad esempio le diverse Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (ARPA), enti di pubblica amministrazione che hanno il compito, tra i tanti, di gestire i dati idrologici della regione in cui lavorano. Queste agenzie rappresentano per noi studenti un punto di riferimento per il reperimento di qualsivoglia dato ambientale.

Nella mia analisi i dati idrologici erano già in possesso della Fondazione Cima, mi sono però avvalso di alcuni progetti italiani ed europei che presentassero i diversi eventi storici in modo poi da definire un elenco di eventi estremi che può essere utilizzato come confronto con la lista prodotta dalle diverse metodologie.

Il primo progetto che ho visionato è quello CNR-POLARIS, redatto dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) e dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Si pone l'obiettivo di raccogliere i diversi eventi meteo-climatici che si sono presentati sul territorio italiano dal 1962 ad oggi. Generalmente l'elenco è correlato ai diversi rapporti d'evento che vengono stilati. La pagina del sito relativa all'archivio eventi è stata molto utile per la redazione del documento di confronto.

Inoltre, quasi ogni regione ha a disposizione un archivio storico di eventi che è disponibile per la consultazione via internet, come per esempio quello della regione Piemonte. Esistono anche diverse carte che vengono prodotte in seguito ad un evento alluvionale, che lo caratterizzano nella sua distribuzione spaziale e temporale. Queste possono essere scaricate sul sito dell'ISPRA nella sezione specifica Direttiva Alluvioni, dal geoportale MinAMBIENTE, dai diversi geoportali specifici del distretto idrografico interessato.

Anche in ambito europeo la ricerca di dati su tutto il territorio risulta essere un compito alquanto complicato ed è necessario avvalersi dei dati forniti dai singoli stati dovendoli poi combinare in un unico *dataset*.

3.4 Dati CIMA

Durante il mio studio di tesi sono stati utilizzati una serie di dati idrologici messi a disposizione dalla Fondazione CIMA, la quale gestisce i dati idrologici provenienti dalle diverse regioni per conto della Protezione Civile Italiana. La sala situazioni della Fondazione raccoglie, archivia ed elabora tutti i dati, presentati precedentemente, con un intervallo giornaliero. Il lavoro che viene richiesto alla Fondazione risulta essere di fondamentale importanza per ottenere nel minor tempo possibile una serie di dati che continuano ad essere utilizzati per la realizzazione di differenti progetti in tutta Italia, un aspetto che non deve essere sottovalutato quando si studiano eventi alluvionali.

In una prima fase ho testato i vari modelli per la selezione degli eventi con dati osservati, che quindi erano stati trasmessi alla Fondazione dalle diverse stazioni meteo-idro-pluviometriche attive sul territorio italiano. In una fase successiva ho potuto ampliare il mio studio all'utilizzo delle medesime metodologie, ma con una base di dati differente; non si faceva più riferimento a dati osservati, ma erano dati modellati. Per chiarire meglio qual è la differenza tra i due *dataset* citati e come questa differenza possa influenzare il risultato di un metodo, è importante spiegare come i dati storici su cui ho lavorato e che ho adattato in un primo momento derivavano da uno studio di dottorato svolto da Giulia Bruno, dottoranda dell'Università di Genova in collaborazione con la Fondazione CIMA, Giulia si occupa all'interno della Fondazione della gestione dei dati idrologici.

Il lavoro diretto all'ottenimento dei dati di carattere storico è stato affrontato durante il percorso di tirocinio formativo con la Fondazione, in cui il mio compito era quello di individuare per alcune specifiche regioni delle sezioni di cui erano disponibili i dati e le scale di deflusso, allo scopo di ampliare il *dataset* in possesso della Fondazione CIMA, con cui ogni giorno lavorano e usano come base per la creazione di modelli idrologici. I dati dovevano essere presenti in un intervallo temporale di almeno 10 anni affinché la loro consistenza potesse essere effettiva per le analisi.

I parametri che sono stati ricercati erano quindi i valori di portata e altezza idrometrica, in modo da poter estrarre i valori di portata osservata per le singole sezioni con un intervallo temporale giornaliero. Come è possibile osservare dalla Figura 4, le sezioni di cui sono disponibili i dati idrologici in un intervallo temporale superiore ai 10 anni non sono tante e non coprono in modo omogeneo l'intero territorio italiano. Molte stazioni che si trovano nel sud

Italia o nelle isole risultano essere non attive o hanno trasmesso dati per un periodo limitato di tempo e non continuativamente.

Testare diverse metodologie e confrontare anche i risultati ottenuti con rapporti d'evento, utilizzando come base di dati serie di portate osservate che non sono distribuite in modo omogeneo nello spazio, può portare ad effettuare alcuni errori nelle valutazioni finali. Infatti, considerando l'esempio di un evento alluvionale che ha interessato il sud Italia in modo abbastanza distribuito, anche con la metodologia di selezione e caratterizzazione più adatta l'evento non può essere identificato, in quanto non sono presenti i dati idrologici di base.

Durante la prima fase di studio ho quindi deciso di affidarmi ai dati provenienti dalle 145 sezioni le cui posizione geografiche sono riportate nella figura sottostante.

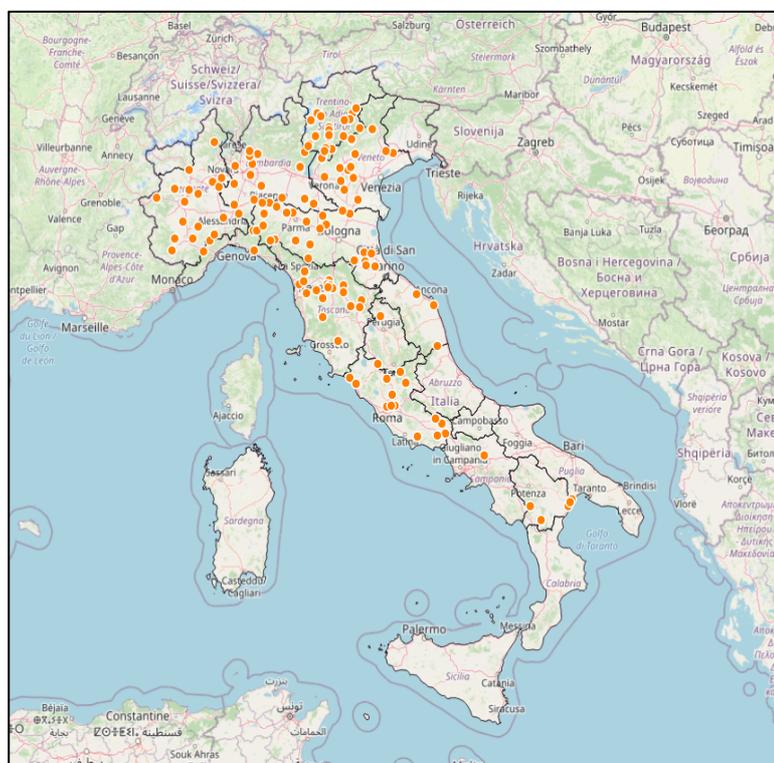


Figura 4: Mappatura delle 145 stazioni di cui erano disponibili valori di portata osservata forniti dalla Fondazione CIMA.

Durante la seconda fase di studio sono entrato in possesso dei dati prodotti dal modello idrologico CONTINUUM fiore all'occhiello della Fondazione CIMA in ottica di previsione e monitoraggio di un evento. Questo modello permette di identificare i valori di portate modellate in sezioni che non sono calibrate e di cui non si dispongono dati storici. Il modello viene fatto girare ad intervalli regolari e ha come input, oltre ai dati disponibili con le stazioni a terra, dati satellitari, radar non solamente relativi ai bacini fluviali, ma anche della morfologia del terreno,

in modo da individuare più facilmente i bacini da considerare e le portate che li caratterizzano, questi parametri permettono quindi di calibrare il modello rispetto a variabili come l'umidità del suolo o la temperatura del terreno che raramente sono presenti in altri modelli disponibili.

Risulta quindi essere un processo che va ripetuto per ogni pixel del territorio italiano, la durata di un ciclo è abbastanza lunga e ogni ciclo sarà impostato come l'aggiornamento di quello precedente.

Il modello CONTINUUM è caratterizzato quindi da alcune qualità che possono essere brevemente descritte con l'elenco puntato che segue e che sono state indicate da un articolo redatto da un gruppo di ricercatori della Fondazione CIMA tra cui il Dottor. Simone Gabellani:

- Permette la descrizione completa del ciclo idrologico a scala di bacino.
- Consente la risoluzione del Bilancio energetico e di massa.
- Risulta essere un modello distribuito.
- Si attiene ad una rappresentazione del bacino da parte del DEM (Modello digitale di elevazione).
- Supporta e descrive l'evoluzione nello spazio e nel tempo dei valori di portata, evapotraspirazione, ritenzione della vegetazione, temperatura del suolo, umidità del suolo e falda.
- Si dimostra un modello calibrato utilizzando dati satellitari.
- Gli output del modello sono mappe di portata nel contesto nazionale preso in considerazione in questo studio.

Durante il mio percorso di tesi mi sono stati forniti i valori delle portate modellate per le 145 stazioni che corrispondevano a quelle riprese dal modello storico, successivamente ho anche voluto introdurre altre sezioni con relativi dati di portata modellata, in modo da avere una distribuzione dei dati più omogenea sul territorio italiano. In questo modo ho potuto estrarre sotto la guida della Dottoressa Giulia Bruno i valori delle portate modellate nell'intervallo temporale gennaio 2008 - dicembre 2019. Il procedimento non è stato particolarmente complesso e può essere riassunto nelle fasi seguenti.

Estrazione delle serie dei valori di portata modellata da tutta la catena Floodproof Italia, che si basa sul modello del CIMA, CONTINUUM, che recentemente è stato fatto girare per ottenere dei *run* sul lungo periodo, con intervallo temporale 2008-2019.

Il modello CONTINUUM risulta essere spazialmente distribuito, ciò significa che quando questo viene lanciato si ottengono come output delle mappe di portata proprie del dominio che si sta modellando. La catena italiana copre quasi tutto l'intero territorio e viene fatta girare giornalmente per essere utilizzata dal Dipartimento di Protezione Civile in ottica di previsione e monitoraggio del corretto funzionamento dei sistemi di allerta che sono stati messi a punto sul territorio italiano.

Le stazioni così distribuite hanno permesso una valutazione più omogenea del territorio rispetto ai dati osservati. La maggiore copertura si può osservare in Figura 5, mappa del territorio italiano in cui i punti di colore arancione rappresentano le sezioni di cui ho estratto i valori di portata modellata. Grazie all'implementazione delle portate modellate e del metodo CONTINUUM sono stato in grado di lavorare con un numero maggiore di valori distribuiti in modo più omogeneo sul territorio italiano, in modo da compiere quindi un confronto e un'analisi dei risultati più completa.

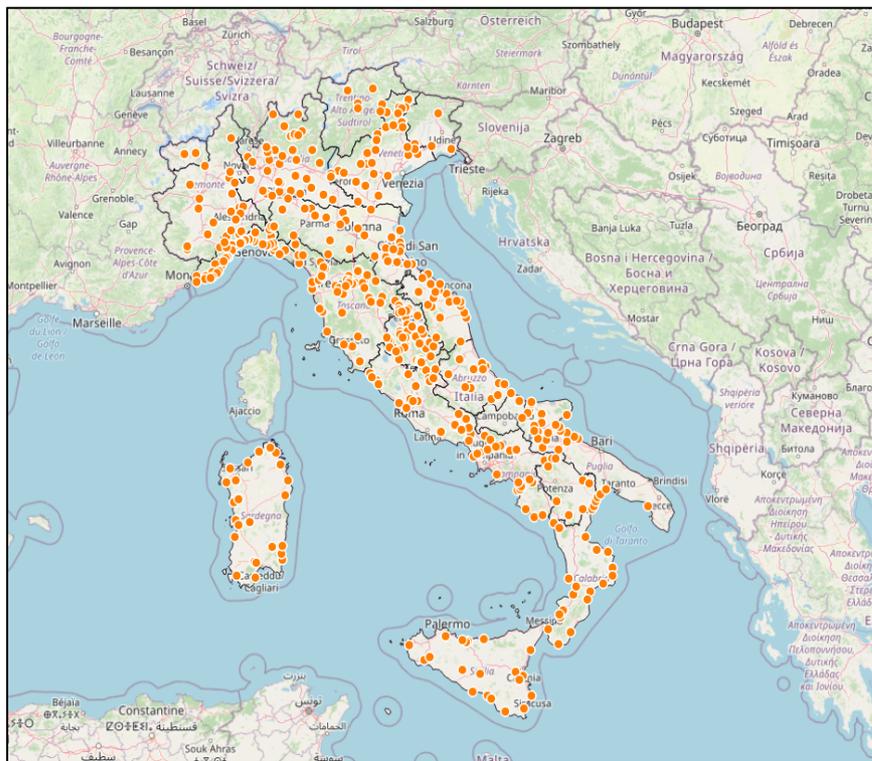


Figura 5: Mappatura delle 457 sezioni individuate nei diversi domini aggiunti in cui erano presenti dati di portata modellata, utilizzate nella caratterizzazione degli eventi.

3.5 Fitting dei dati osservati

Durante la prima fase di studio relativa ai dati osservati, si è reso necessario porre particolare attenzione ai valori di portata in nostro possesso, soprattutto quando siamo in presenza di dati mancanti, i cosiddetti *missing values*.

Nelle serie di dati di portate giornaliere con cui abbiamo lavorato erano spesso presenti intervalli temporali senza dati, questo può essere un problema causato dal malfunzionamento dello strumento di misura utilizzato oppure dall'interruzione del servizio a causa di manutenzioni, o ancora, come nella maggior parte dei nostri casi, per la giovane età degli strumenti che vengono utilizzati dalle diverse regioni. Solo negli ultimi anni i dati delle portate delle aste fluviali italiane sono disponibili ed è possibile reperirle nei diversi database. Per questo motivo è sempre importante, quando si studiano le portate fluviali, caratterizzare anche quelle che sono le precipitazioni e le altezze idrometriche della sezione studiata nel medesimo intervallo temporale, al fine di studiare la portata nel modo più completo possibile.

La prima analisi che ho dovuto svolgere riguardava la mancanza di dati all'interno delle serie di valori relativi alle portate storiche in mio possesso, uno studio quantitativo, in cui era necessario identificare il numero di sezioni da utilizzare e l'intervallo temporale da considerare. Mi sono quindi, affidato al giudizio di persone esperte come i Dottori e Ricercatori Lorenzo Campo e Tatiana Ghizzoni della Fondazione CIMA, i quali dopo aver visionato lo studio quantitativo sulla statistica della distribuzione temporale e spaziale delle stazioni mi hanno consigliato di lavorare in un intervallo temporale di 14 anni, dal 2005 al 2019, con una percentuale massima del 20% di valori mancanti. Questo ci ha permesso di poter lavorare con 145 sezioni sulle 264 iniziali osservate.

La posizione geografica delle sezioni che abbiamo preso in considerazione è riportata nella Figura 5. La scelta consigliata da Tatiana e Lorenzo ha permesso di poter poi sostituire i dati mancanti senza alterare in maniera significativa la serie, problema in cui si poteva facilmente incorrere, con dati di portata mediati sull'anno solare per le singole stazioni.

4. Metodi analizzati

Nel capitolo 4 vengono trattati ed analizzati i 3 modelli che sono stati presi in considerazione per la realizzazione di questo studio. I modelli sono stati applicati ai dati in mio possesso con codici nei software di programmazione Matlab R2019b e R-studio.

Lo scopo principale dei modelli che ho utilizzato è quello di selezionare nell'intervallo temporale definito una serie di eventi alluvionali che hanno interessato in modo più critico diverse zone del territorio italiano. I modelli utilizzeranno differenti parametri e produrranno un *dataset* di eventi diverso, il confronto tra i diversi modelli verrà poi svolto al termine di questo capitolo in modo più dettagliato. Di seguito riporto la base teorica delle metodologie e come queste sono state applicate ai dati in mio possesso.

4.1 Metodo CIMA

Il metodo che analizzo per primo nel dettaglio è quello fornito dalla Fondazione CIMA; la metodologia mi è stata proposta dalla ricercatrice del reparto risk management della Fondazione Tatiana Ghizzoni, che mi ha seguito durante la parte di scrittura e modifica del codice, nonché durante l'analisi dei risultati ottenuti.

Il modello che ho utilizzato durante il periodo di analisi è stato estrapolato da una ricerca realizzata ad hoc per alcuni bacini non europei, specialmente africani e asiatici. Proprio per questo motivo e quindi per la grande differenza tra il contesto italiano e quello per cui era stato adottato in origine, si è reso necessario apportare alcune modifiche agli script con il linguaggio matlab, allo scopo di rendere il modello consistente con i dati di cui ero in possesso.

Il codice principale riprende alcune funzioni che saranno analizzate nel dettaglio nelle righe successive e che sono il cuore del modello, in quanto permettono di eseguire diversi passaggi che possono essere svolti anche singolarmente senza far necessariamente riferimento a quello principale, il quale comunque fornisce una visione generale sugli input necessari e gli output prodotti dal software Matlab.

Gli input necessari per la corretta esecuzione del codice sono i seguenti:

- Una matrice che ha come numero di righe il numero di giorni per cui si esegue l'analisi, nel nostro caso i giorni considerati all'interno dell'intervallo temporale dall'1° settembre 2009 al 31 agosto 2019 per il caso delle portate osservate, e come numero di colonne rispettivamente l'anno, il mese e il giorno della data selezionata in modo scomposto.
- I valori di portata massima annuali per ogni stazione idrometrica presa in considerazione; queste portate sono state ottenute con alcune semplici righe di programmazione in Matlab.
- Le portate registrate nelle diverse sezioni analizzate nel periodo dal 2004 al 2018; come detto in precedenza il metodo Cima non permetteva la presenza di dati non numerici o pari a zero, si è quindi provveduto a sostituire i valori delle portate di cui non eravamo in possesso con i valori di portate medie annuali per ciascuna sezione.

Forniti i dati di input iniziali, il codice fissa i tre parametri fondamentali per la prosecuzione dell'analisi. Questi risultano essere determinanti per la selezione degli eventi, in quanto al variare di uno di questi, il numero di eventi alluvionali che il codice produce risulta essere differente. I tre parametri sono riassunti nell'elenco puntato che segue:

- La finestra temporale massima su cui si il software andrà a lavorare per la selezione degli eventi. Viene espressa in termini di giorni e indica l'intervallo temporale in cui è possibile identificare un evento. Nel nostro caso il valore è stato fatto variare tra un minimo di 3 giorni ad un massimo di 15 giorni; lavorare con una finestra relativamente piccola permette di ottenere un numero maggiore di eventi, che però possono appartenere ad un unico macro-evento da analizzare integralmente.
- MIT, viene definito dalla Fondazione come la finestra di interarrivo degli eventi. Anche questo parametro è espresso in giorni e identifica la durata per la quale non devono verificarsi eventi in modo da definire l'inizio e la fine di una piena alluvionale; nella norma il valore di questa misura è 7 giorni. Nell'applicazione pratica al programma occorre sapere quanti giorni senza rilevamenti sono necessari per definire il termine della caratterizzazione e analisi di evento.
- Un Tempo di ritorno locale soglia, definito come limite dei valori di tempo di ritorno locali che vengono analizzati ed estratti secondo un'analisi di frequenza. L'utilizzo di

questa soglia risulta essere fondamentale per la selezione di un evento, in quanto se i tempi di ritorno che vengono estratti per le sezioni analizzate risultano essere superiori a questa soglia, è individuato l'inizio dell'evento che avrà termine, come detto in precedenza, dopo che per 7 giorni non sono rilevati superamenti. In questo studio il tempo di ritorno è espresso in anni, e il limite massimo individuato come parametro è di 5 anni.

La prima operazione che viene richiamata è quella che permette la scelta della distribuzione statistica che meglio si adatta ai massimi valori annuali delle portate per le singole stazioni. Vengono prese in considerazione nove distribuzioni statistiche differenti (log-normale, GEV, gamma, Weibull, gumbel, normale, esponenziale, Pareto generalizzata e logaritmica di Pearson), valutate e classificate in accordo con il criterio correlato alla funzione di massima verosimiglianza in forma logaritmica e con l'utilizzo di quantili. Per la scelta della tipologia di distribuzione, nel caso una di queste non fosse più adatta delle altre, si ricorre al test di Kolmogorov Smirnov. Con il primo codice appena descritto relativo al *fitting* delle diverse distribuzioni si ottengono importanti informazioni sulle serie di portata nel tempo, sui parametri che sono stati utilizzati e su quelli che sono stati oggetto della scelta della distribuzione più appropriata.

La seconda funzione invece viene utilizzata per la definizione del tempo di ritorno relativo alle portate osservate. Per fare questo viene impiegata la distribuzione delle portate osservate che più si adatta ai dati, scelta come descritto nel paragrafo precedente. Il tempo di ritorno giornaliero calcolato per ogni stazione risulta quindi calcolato come il rapporto tra uno e la differenza tra uno e la distribuzione cumulata delle portate osservate.

La terza ed ultima funzione che viene richiamata è quella per la selezione degli eventi secondo il metodo applicativo utilizzato dalla Fondazione in alcuni bacini africani.

In queste righe di programmazione si richiamano altre funzioni. La prima permette di definire la finestra temporale massima su cui il software lavorerà nella fase di selezione degli eventi. La seconda invece permette di introdurre una maschera per la creazione di un filtro gaussiano allo scopo di identificare i picchi di portata. Questo filtro serve quindi a smussare il Tempo di ritorno soglia, che rimane costante, in modo da non selezionare alcuni eventi identificati da picchi del tempo di ritorno locale non elevati, e riconoscendo solamente gli apici più rilevanti. Con l'ausilio di questo filtro, che si sovrappone ai valori di portata giornalieri per

le singole stazioni, sono stato in grado di definire le finestre temporali in cui si verificano gli eventi, riportando l'inizio, la fine, la durata e il picco dell'evento.

Dopo aver identificato per ogni stazione quando avviene un superamento della soglia, si definisce come data in cui si verifica un evento il giorno in cui su tutte le stazioni si misura almeno un superamento, considerato che dopo un superamento sono necessari 7 giorni, valore definito dalla finestra di interarrivo, senza nessun superamento in tutte le stazioni analizzate, così da precisare il termine dell'evento.

Durante questa parte di progetto viene inoltre identificato un vettore in cui sono riportate le varie aree di competenza, nel nostro caso le stazioni idrometriche in cui si è verificato il superamento della soglia smussata durante un evento selezionato. In questo modo maggiore sarà il numero di stazioni che vengono interessate dal superamento durante quell'intervallo temporale, più l'evento sarà distribuito nello spazio e tenderà ad interessare un numero maggiore di regioni.

A differenza del metodo del Professor Viglione, questo non incorporava al suo interno una classificazione degli eventi, ma solo una selezione di quelli che potevano essere identificati come gli eventi maggiormente critici. Per il nostro studio è stato necessario inserire una classificazione degli eventi, in modo da poter confrontare un numero di eventi simile, selezionato dalle diverse metodologie prese in considerazione. Ho quindi ritenuto con l'ausilio della Dottoressa Tatiana Ghizzoni di utilizzare un parametro che ci permettesse di classificare gli eventi selezionati secondo la loro distribuzione ed estensione spaziale, e precisamente la somma dei tempi di ritorno calcolati per le singole stazioni durante il verificarsi di un evento. In questo modo maggiore è la somma dei tempi di ritorno di un evento, maggiore sarà la sua estensione spaziale sul territorio italiano. Siamo così riusciti a procedere con la classificazione degli eventi secondo parametri spaziali e non solo temporali.

Per gli eventi selezionati, il cui numero varia a seconda dei valori dei parametri utilizzati, verranno quindi prodotti diversi output più o meno utili, tra i quali possono essere identificati:

- Le date degli eventi, in una matrice il cui numero di righe dipende dai tre parametri di input e il numero di colonne è definito dall'anno, mese e giorno relativo al massimo della portata osservata.
- La durata dell'evento espressa in giorni. Per l'analisi sulla spaziatura degli eventi effettuata in questa tesi, gli eventi che hanno la durata di un giorno difficilmente

verranno considerati, in quanto sono eventi localizzati e che non hanno un'estensione rilevante, mentre quelli con una durata maggiore ai tre o quattro giorni sono interessanti per la presente ricerca.

- Portate e tempi di ritorno relativi ai giorni individuati come giorni in cui si è verificato l'evento. Le matrici in questione avranno il numero di righe pari al numero di eventi selezionati e il numero di colonne pari al numero di stazioni analizzate. I valori di tempi di ritorno saranno poi quelli che plotteremo e da cui potremmo trarre informazioni importanti sull'estensione del fenomeno.

Prendendo in considerazione proprio i tempi di ritorno locali che caratterizzano ogni singola stazione idrometrica e quindi gli eventi selezionati e come questi sono stati classificati, abbiamo prodotto alcune mappe del territorio italiano che descrivessero l'estensione spaziale degli eventi selezionati secondo i singoli tempi di ritorno locali. Sono così state prodotte delle mappe come quella riportata in Figura 6 per ogni evento.

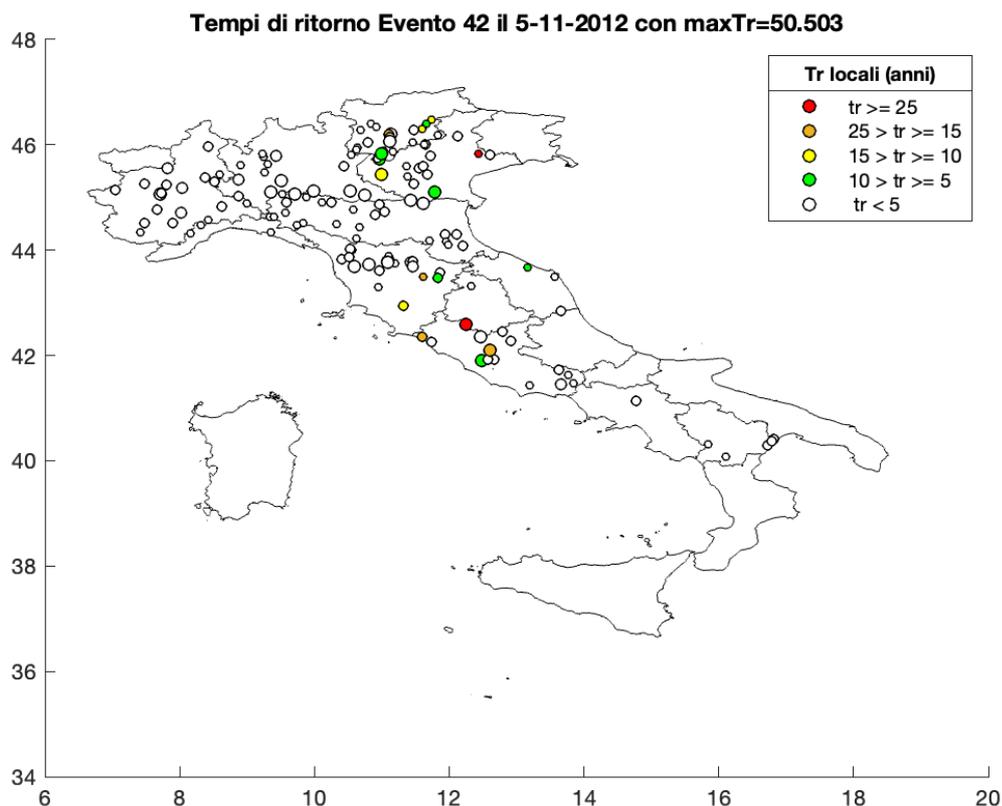


Figura 6: Distribuzione dei tempi di ritorno locali sul territorio italiano, per un evento alluvionale selezionato dal metodo fornito dalla Fondazione CIMA.

4.2 Metodo Alberto Viglione

Il secondo metodo che analizzo ed approfondisco è quello ideato dal Professor Alberto Viglione durante i suoi studi in Austria. Il modello che ho utilizzato corrisponde alla prima bozza realizzata, in un secondo momento questo è stato migliorato e sono state aggiunte alcune implementazioni per una più corretta definizione degli eventi.

Come per il caso approcciato con il metodo CIMA, l'obiettivo di questo modello è di selezionare e classificare gli eventi alluvionali in un certo intervallo temporale e in una determinata regione. Nel caso studio analizzato il periodo interessato andava dal 1951 al 2016 ed erano considerate 421 stazioni in tutto il territorio austriaco.

Il metodo è stato utilizzato per questo studio in maniera quasi identica a quanto fatto dal professore andando a variare alcuni parametri di input per il sistema. Nel caso preso in considerazione dalla mia tesi il numero di stazioni risulta essere minore, come risulta essere minore anche il periodo in cui si lavora. Il metodo è stato sviluppato ed eseguito con il software Rstudio.

Nelle prime fasi dell'applicazione del metodo, l'obiettivo è quello di utilizzare i dati di input corrispondenti ai dati di portata osservata e trasformarli prima in valori di frequenza empirica di non superamento e poi in tempi di ritorno empirici.

Le formule che sono state utilizzate dal sistema sono le seguenti:

$$F(i, j) = \frac{\text{ranks}}{\max(\text{ranks})+1} \quad (2)$$

$$t_r(i, j) = \frac{1}{1-F(i, j)} \quad (3)$$

Nella prima formula le frequenze si riferiscono al giorno i e alla stazione numero j , nel nostro caso il valore di i varia tra il giorno 0 ed il giorno numero 5113 corrispondente al 31 agosto 2019, e il valore j varia tra le 145 stazioni di cui abbiamo i dati relativi alle portate osservate. Le frequenze sono calcolate a seconda della posizione della portata (*ranks*) tra tutti i valori, come sviluppato dallo studio di Weibull sulla *plotting position* che ha portato all'utilizzo della prima formula.

La seconda formula permette di calcolare tempi di ritorno empirici e locali. In sostanza per ogni giorno in ogni stazione viene valutata la portata osservata in termini di giorni che dovranno intercorrere per ottenere un valore simile a quello riportato nella stazione considerata.

I valori dei tempi di ritorno locali empirici sono stati organizzati in una matrice, questi valori sono stati poi utilizzati per calcolare un tempo di ritorno empirico regionale, mediato su tutte le stazioni e determinato per ciascun giorno i , con la seguente formula:

$$T_r(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g(j) * \text{window}(t_r(i, j), w) \quad (4)$$

Questo tempo di ritorno, espresso sempre in giorni, a differenza di quello espresso in precedenza ha un riferimento regionale, interessa quindi tutte le diverse stazioni nello stesso giorno, misurando cosa succede in uno specifico giorno nelle stazioni prese in considerazione nello studio, e dando quindi informazioni su come sono distribuiti spazialmente i valori del tempo di ritorno locali.

Nella formula vengono introdotti due parametri da cui dipende l'intero modello, il primo è il peso che viene dato alle diverse stazioni e ai diversi bacini, espresso nell'equazione con la forma $g(j)$. Nel mio caso ho esaminato due possibili valori del parametro in questione, assegnando il valore uno al peso e considerando quindi tutte le stazioni nello stesso modo, oppure valutando il peso pari al logaritmo dell'area drenata a monte della stazione. Più importante sarà il bacino e più alto sarà il valore dell'area drenata, e quindi il tempo di ritorno empirico regionale dipenderà direttamente dalle caratteristiche della stazione e del bacino fluviale.

Il secondo parametro utilizzato è il parametro w che, in termini di giorni, indica il valore della finestra temporale scelta e su cui lavora la funzione *window*, richiamata nell'Equazione 4. Questa funzione permette di ricercare il valore massimo del tempo di ritorno empirico locale $t_r(i, j)$ nella finestra temporale definita in tutte le 145 sezioni. Nella mia analisi il valore di w è stato fatto variare tra diversi valori in modo da ottenere più casistiche possibili da esaminare. I valori del tempo di ritorno regionali sono quindi organizzati in un vettore di lunghezza 5113, corrispondente ai giorni su cui si esegue l'analisi e plottando i valori nel tempo si ottengono i grafici presenti in Figura 7 e 8. Nel primo caso l'intervallo temporale considerato corrisponde ai 5113 giorni, mentre nel secondo caso viene preso in esame l'ultimo anno idrologico che va da settembre 2018 a settembre 2019.

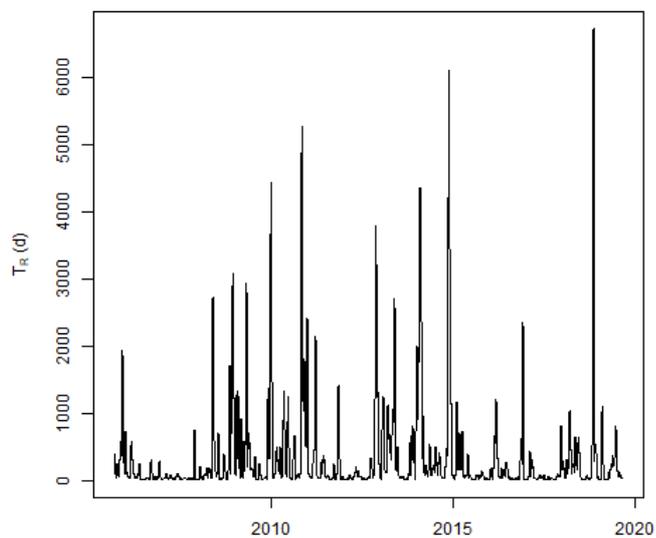


Figura 7: Tempi di ritorno empirici regionali nell'intervallo temporale 2005-2019.

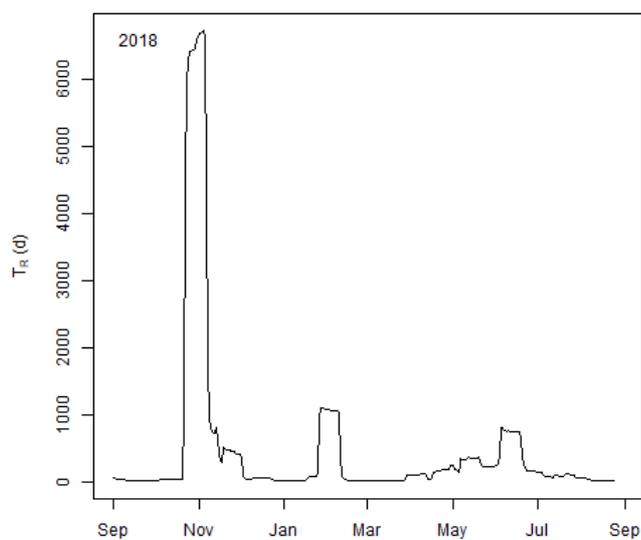


Figura 8: Tempi di ritorno empirici regionali nell'anno idrologico 2018-2019.

Esaminando maggiormente nel dettaglio la Figura 8, emerge con chiarezza come la finestra temporale influisca sul calcolo del tempo di ritorno regionale, in questo caso il valore del parametro w è stato considerato pari a 15 giorni e il peso attribuito ad ogni stazione pari al logaritmo dell'area drenata a monte, il plateau che si viene a formare nei casi in cui i tempi di

ritorno regionali hanno valori più alti della media, consiste nell'intervallo temporale di 15 giorni deciso in precedenza.

A questo punto l'obiettivo finale della selezione degli eventi deve passare dall'analisi dei valori dei tempi di ritorno regionali e da un loro filtraggio, è stato quindi creato un filtro passa-basso mediato sui valori dei tempi di ritorno empirici regionali che quindi tende a seguirne l'andamento nel tempo. Con uno specifico comando siamo in grado di scegliere di lavorare con in media due eventi per anno e definire così il numero di eventi da considerare che saranno caratterizzati da alcuni valori riproposti nella Tabella 3.

Tabella 3: Parte dell'elenco eventi individuati dal filtro passa-basso applicato ai tempi di ritorno empirici regionali.

start	end	tmaxT_R	maxT_R
08-09-05	20-09-05	13-09-05	383.53
12-11-05	13-11-05	12-11-05	583.75
19-11-05	13-12-05	26-11-05	1924.92
26-12-05	09-01-06	04-01-06	724.73
18-02-06	19-03-06	27-02-06	587.60
08-09-06	03-10-06	21-09-06	307.73
17-11-07	02-12-07	27-11-07	737.40
15-05-08	07-06-08	25-05-08	2724.45

Nella prime due colonne vengono individuate le date di inizio e di fine del plateau, identificato come evento e in cui si riconosce la presenza di valori di tempo di ritorno empirico regionale superiori a quelli del filtro. Tra questi valori viene identificato quello massimo nell'intervallo compreso tra l'inizio e la fine dell'evento con data connessa, riportati nelle ultime due colonne.

Il metodo presentato nella tabella appena citata può essere facilmente correlato con il grafico riportato in Figura 9. In cui l'inizio dell'evento è rappresentato da un pallino di colore bianco, ed indica il punto da cui i valori del tempo di ritorno regionale iniziano ad essere superiori al filtro, mentre il punto giallo identifica la fine dell'evento, dopo il quale quindi i valori del tempo di ritorno torneranno ad essere inferiori a quelli del filtro. Il punto rosso segnala invece la presenza del massimo valore dell'evento.

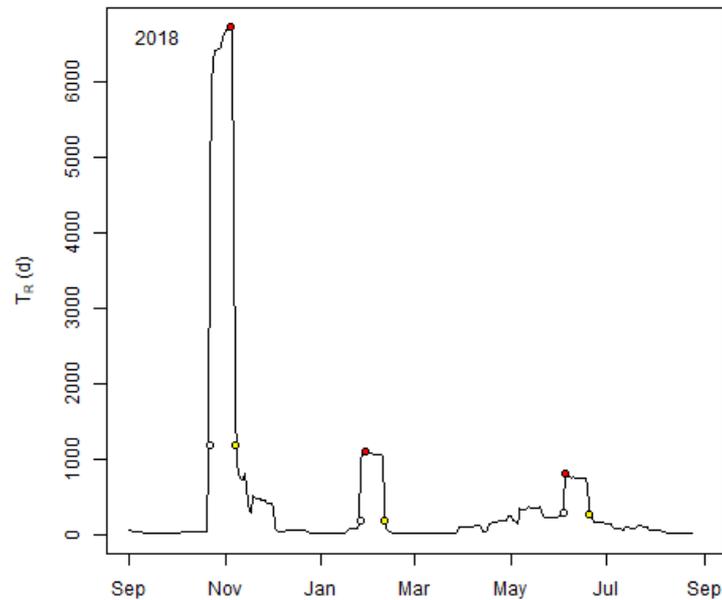


Figura 9: Intersezione tempi di ritorno empirici regionali e filtro passa-basso per l'anno idrologico 2018-1019.

A questo punto dell'analisi risulta necessario studiare il fenomeno come una serie parziale multivariata per ogni stazione j . Per ogni intervallo temporale definito come evento vengono estratti i valori massimi per ogni stazione di portata e dei tempi di ritorno locali. In questo modo sono in grado di presentare una classificazione degli eventi a seconda del valore del tempo di ritorno empirico regionale, più alto sarà questo valore e maggiori saranno le aree interessate dall'evento alluvionale. Si può quindi affermare che l'evento sarà più distribuito spazialmente.

Per ogni evento classificato a seconda del valore del tempo di ritorno regionale sono disponibili i valori delle portate e dei tempi di ritorno massimi per ogni stazione e le date in cui si è verificato il massimo valore del tempo di ritorno regionale. I valori dei tempi di ritorno locali per ogni sezione sono stati poi plottati sulla cartina italiana per ogni evento individuato tra i primi 60 per tempo di ritorno regionale per avere un'idea di come questi si potessero distribuire spazialmente sul territorio italiano, e in modo da poter confrontare le mappe ottenute con il metodo della Fondazione CIMA riportate con l'esempio in Figura 6. In Figura 11 è riportata l'estensione spaziale dei tempi di ritorno locali che hanno caratterizzato l'evento del 4 novembre 2018, considerato il primo in classifica per il metodo del Professor Viglione. Gli intervalli dei tempi di ritorno locali sono stati decisi seguendo la loro distribuzione per ogni stazione, individuando 5 classi. Qualora la stazione si colori di rosso, arancione o giallo

significa che l'evento nella stazione è abbastanza importante e può essere rischioso per la popolazione.

Per svolgere l'operazione di plottaggio è stato necessario definire un codice scritto con il software Matlab R2019b che permettesse di sovrapporre la carta delle regioni italiane in formato *shape*, disponibile sul sito dell'ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) nella sezione confini delle unità amministrative a fini statistici, e la coppia di coordinate geografiche delle 145 stazioni prese in considerazione, sotto forma di latitudine e longitudine. Ogni sezione è stata rappresentata da un pallino le cui dimensioni cambiano a seconda dell'area drenata, il colore della sezione varia a seconda del tempo di ritorno locale massimo che si è registrato durante l'intervallo temporale in cui si è presentato lo specifico evento.

Per questo studio ho considerato situazioni critiche quelle in cui il tempo di ritorno locale empirico superasse i 10 anni. Gli intervalli sono stati poi completati facendo riferimento a diversi istogrammi, generati dall'elaborazione, come quello in Figura 10, in cui viene riportata la distribuzione dei tempi di ritorno di tutte le stazioni per ogni evento.

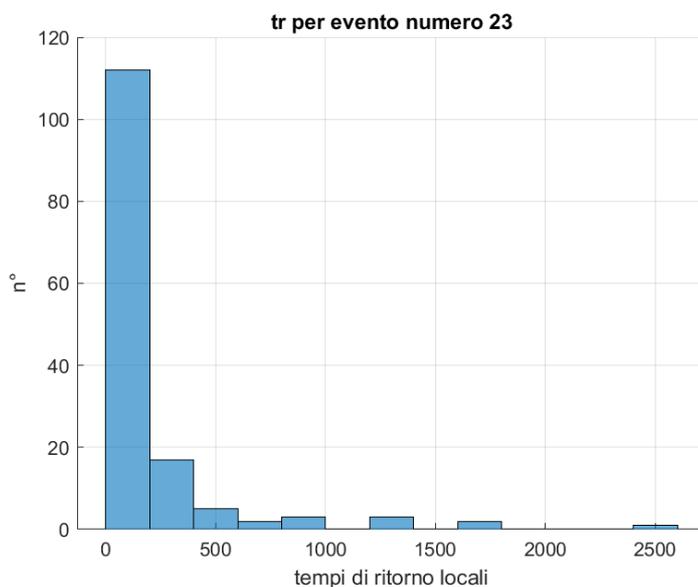


Figura 10: Distribuzione dei tempi di ritorno empirici locali per tutte le stazioni per l'evento numero 23.

La Figura 11 ha uno scopo puramente grafico, in quanto serve per poter osservare come si sia distribuito l'evento nello spazio e come detto in precedenza confrontare le mappe prodotte per ogni evento selezionato dalla metodologia CIMA.

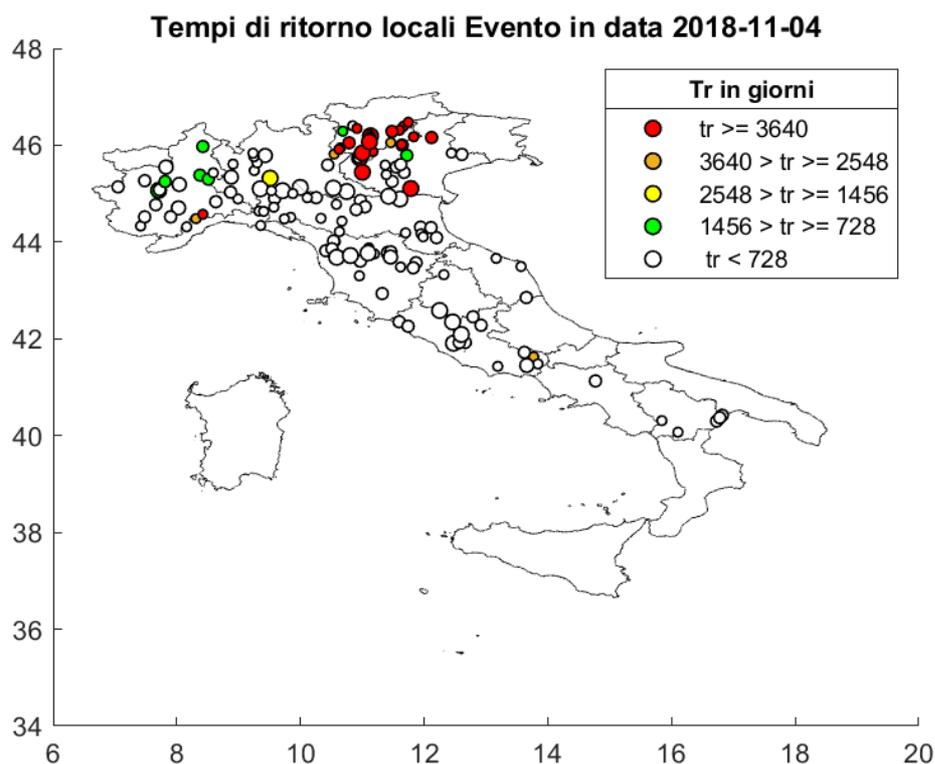


Figura 11: Distribuzione spaziale dei tempi di ritorno locali su carta italiana per l'evento del 4 Novembre 2018.

4.3 Metodo Manuela Brunner

Lo studio che ho elaborato durante il periodo della redazione della tesi ha avuto inizio, dietro suggerimento del Professor Viglione, dagli articoli scritti dalla ricercatrice dell'NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) Manuela Brunner, che nel suo percorso universitario si è spesso occupata degli estremi idrologici e della risorsa acqua. Nello specifico i due articoli che ho approfondito riguardano studi in diverse regioni di eventi spazialmente distribuiti e come questi possano essere correlati tra loro secondo alcuni parametri.

Il primo articolo cui mi sono approcciato è intitolato *Spatial dependence of floods shaped by spatiotemporal variations in meteorological and land-surface processes* (Brunner et al. 2020), in cui l'obiettivo principale degli autori era quello di introdurre e cercare quelle che potessero essere le connessioni che legano i diversi eventi alluvionali, mappandone la dipendenza spaziale. Nello studio appena citato la nazione presa in esame è stata quella del Nord America e nello specifico sono state considerate 671 stazioni distribuite nello stato

americano. Una regione che quindi non può essere messa a confronto con quella italiana, per questa ragione il metodo applicato dovrà essere variato o contenere parametri differenti.

Lo studio si compone di tre parti principali, brevemente descritte in questo elenco puntato:

- La selezione degli eventi: a differenza dei metodi che abbiamo affrontato nei capitoli precedenti la selezione degli eventi varia notevolmente, si utilizza un POT (*peak-over-threshold*), un semplice limite definito come il 0.9975 quantile specifico per le singole sezioni. Il superamento del valore di portata nelle diverse sezioni durante l'intervallo temporale prescelto del limite comporta una prima definizione di evento. Questa prima selezione porterà all'ottenimento di 3 *datasets*, uno relativo ai valori di portata che superano il limite, uno delle date in cui avviene questo superamento e un set di eventi che vengono definiti come regionali e non locali.
- La definizione di un evento come regionale: la differenziazione tra eventi di tipo locale e di tipo regionale viene definita secondo due criteri base che devono essere soddisfatti, l'evento deve avere un'importanza simile in un buon numero di sezioni e la magnitudo dell'evento deve essere sufficientemente alta. Questi due criteri permettono quindi una prima classificazione degli eventi. Per ogni data in cui si verifica un evento si controlla anche che avvenga un superamento in termini di precipitazioni, per cui è stato definito un limite in modo analogo a quanto fatto per le portate.
- Vengono poi applicati diversi modelli spaziali per gli eventi alluvionali definiti, che hanno come obiettivi quelli di definire una stagionalità degli eventi, specificando quindi i periodi stagionali in cui si verificano il maggior numero di eventi regionali, e di definire la connessione tra i valori di portata ottenuti per il superamento del limite e i dati di precipitazioni estreme nelle stesse date. Per individuare poi quelle che sono le regioni con comportamento simile durante l'evento sono state testate alcune procedure, tra le quali quella finale che permette la misura della dipendenza spaziale tra una coppia di stazioni in funzione della distanza euclidea h tra queste e comparando l'ordine degli eventi estremi tra due *time series* di eventi estremi.
- La fase finale dello studio condotto dalla ricercatrice è quello di analizzare diversi portatori idro-meteorologici che influiscano in modo diretto sulla dipendenza spaziale tra eventi. Tra questi sono stati presi in considerazione le precipitazioni medie, le temperature medie, lo SWE (*Snow Water Equivalent*) e l'umidità del suolo. L'analisi di

questi parametri ha portato alla realizzazione di coefficienti di correlazione secondo il criterio di classificazione di Kendall.

Il primo risultato ottenuto da questo studio ha dimostrato come la connessione tra gli eventi alluvionali varia nello spazio e nel tempo, evidenziando quindi una forte variazione stagionale.

La prima parte dello studio svolto da Manuela Brunner risultava essere interessante per la redazione della Tesi, all'interno dell'articolo però non è disponibile una descrizione dettagliata delle operazioni da compiere per effettuare la prima selezione degli eventi di mio interesse. Per andare maggiormente nel dettaglio è stato necessario ricorrere ad un altro articolo di Manuela Brunner del 2019, antecedente a quello appena analizzato. In questo articolo l'interesse si concentrava su una regione più piccola come quella Svizzera, avvicinandosi maggiormente a quella che è la nostra area di competenza. La ricercatrice definisce in modo più dettagliato i passaggi delle prime operazioni che consentono l'identificazione degli eventi, sia regionali che locali, che verranno poi riprese durante il mio studio per l'elaborazione del modello.

In questo articolo è anche maggiore il risalto che viene dato alla differenziazione tra eventi di tipo locale, per cui è sufficiente un'analisi delle frequenze di tipo univariato, ed eventi di tipo regionale, che necessitano invece di un'analisi di frequenza multivariata tale da consentire di considerare la dipendenza spaziale degli eventi alluvionali in più stazioni sul territorio.

Come già detto in precedenza, per stimare la probabilità di diffusione degli eventi alluvionali è necessario lavorare con un approccio di analisi di frequenza multivariato a livello regionale, che permetta di valutare i valori di portata osservata su più stazioni contemporaneamente. Il metodo permette di lavorare sia in presenza di valori di portate osservate riferiti a stazioni di cui sono disponibili i dati che valori di portata modellati.

Fino a qualche anno fa, gli studi sugli eventi spazialmente distribuiti interessavano la concomitanza dei valori massimi annui delle portate, questo metodo però consente di conoscere solamente quando si è verificato il massimo valore. L'utilizzo dello scenario governato da un *peak-over-threshold* (POT) permette di superare alcuni limiti che si sono presentati negli studi precedenti.

Come già detto, la parte di studio su cui mi sono concentrato maggiormente è stata quella della definizione degli eventi, utilizzando un approccio multivariato che permettesse di analizzare un set di eventi alluvionali non più solamente sulla base di una scala locale, ma anche di una scala regionale. Il processo che è stato svolto scrivendo un codice programmabile sul

software Matlab R2019b si può riassumere brevemente in tre passaggi riportati nella Figura 12 e nell'elenco puntato sottostante:

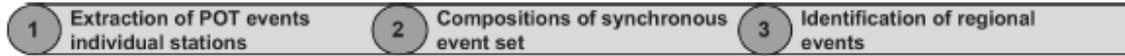


Figura 12: Procedura per l'identificazione degli eventi alluvionali tratta dall'articolo di M.Brunner.

- 1) Estrazione degli eventi per le singole stazioni: la prima operazione da compiere per definire gli eventi era quella di definire un limite per i valori di portata osservata. Questo limite, da cui prende il nome il metodo POT (*peak-over-threshold*), è stato definito per ogni stazione come il 0.9975 quantile dei valori di portata. In questo modo, a scala locale, ogni superamento dei valori di portata osservata del limite era considerato come un evento. La prima operazione che il codice svolge è quella di definire il limite corrispondente al 0.9975 quantile per ogni stazione, per farlo la prima operazione è stata quella di ordinare in modo ascendente i 5113 valori di portata in nostro possesso, successivamente utilizzando una formula statistica che permette di calcolare in modo semplificato il quantile o la sua posizione all'interno delle osservazioni considerate:

$$\text{posizione. osservazione} = \text{quantile} * (\text{n}^\circ\text{osservazioni} + 1) \quad (5)$$

In questo modo, dovendo ottenere il 0.9975 quantile, ho calcolato la posizione stimata dell'osservazione che potesse essere considerata come limite per ogni singola stazione, ottenendo così un vettore contenente 145 valori limite, uno per ogni stazione.

Nella seconda fase del primo punto ho definito una matrice “superamenti” dove erano indicate le posizioni in cui si presentavano i valori di portata che superavano il limite precedentemente definito. Le posizioni in questione erano poi trasformate in termini di giorno, mese e anno. Per avere anche un concetto visivo e confermare che il lavoro svolto fino ad ora fosse svolto correttamente, ho deciso di plottare i valori delle portate nell'arco temporale identificato e il limite, per verificare che questo selezionasse in modo visivamente corretto quelli che erano i superamenti, di questa operazione riporto un grafico specifico di una sezione in Figura 13.

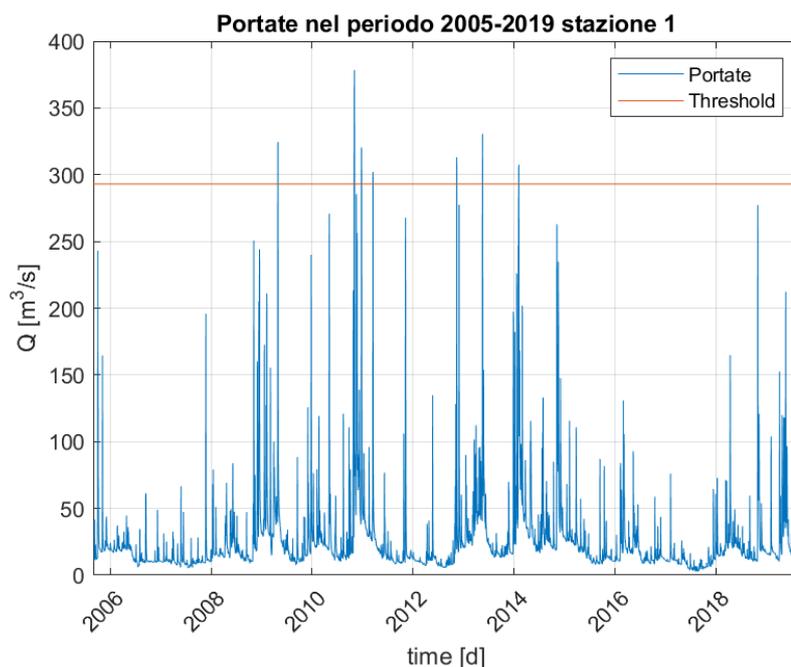


Figura 13: Valori di portata per la sezione Montegalda del bacino Bacchiglione dal 2005 al 2019.

La seconda parte di questo primo step era quella di individuare eventi indipendenti che quindi si verificassero con un intervallo minimo di 7 giorni, in modo da non selezionare alcuni superamenti che appartenessero allo stesso evento. Per fare questa operazione mi sono servito del software Excel con cui ho identificato i 123 eventi indipendenti che si sono presentati su tutte le stazioni analizzate.

- 2) Composizione di un set di eventi alluvionali sincronizzato: il primo obiettivo del secondo step è quello di identificare gli eventi secondo la massima magnitudine per ogni intervallo temporale definito come evento per ogni singola stazione. In questo modo viene definito un set di eventi le cui date corrispondono a quelle del paragrafo precedente e le cui portate osservate si riferiscono al massimo toccato durante il periodo d'evento per singola stazione. Verrà quindi identificato come evento un intervallo temporale in cui in almeno una stazione delle 145 analizzate sarà caratterizzata da un superamento.

Con questo step si è in grado di definire il primo insieme di eventi che può essere identificato come scenario di rischio. All'interno di questo set però saranno presenti sia eventi rilevanti a scala locale, per cui è sufficiente un'analisi di frequenza univariata, sia eventi rilevanti a scala regionale, per cui invece è necessaria un'indagine di tipo

multivariato al fine di ottenere maggiori considerazioni sulla dipendenza degli eventi su scala spazio-temporale.

In un primo momento ho creato una matrice che permettesse di comprendere per ogni evento in ogni sezione se la data in cui questo si verifica si ripetesse in altre sezioni, in modo da ottenere più informazioni possibili sul verificarsi degli eventi, anche al fine di ottenere una lista di eventi non ripetuti che si verificassero su tutte le stazioni analizzate. Fatto ciò, sono riuscito a lavorare su un set di eventi che non si ripetessero e che sono stati caratterizzati dal numero di stazioni interessate dall'evento, infatti più alto è il numero di stazioni interessate da un superamento maggiore è la distribuzione spaziale dell'evento e dai dati di portata massima per le singole sezioni nell'intervallo temporale dell'evento, caratterizzato da una data di inizio ed una di fine.

3) Identificazione di eventi regionali all'interno del set sincronizzato: il terzo step, conclusivo per la selezione degli eventi, consiste nella separazione tra eventi di tipo localizzato ed eventi a scala regionale. Per poter qualificare un evento come regionale, durante il quale più stazioni contemporaneamente sono affette dal verificarsi di un evento alluvionale, devono essere soddisfatti due criteri:

- l'evento deve avere simile importanza nelle singole stazioni;
- su tutte le stazioni l'evento deve appartenere a quelle più importanti.

Come si può vedere nella Figura 14, sono evidenziati due casi differenziati da due aree di colore diverso. Il caso evidenziato dal colore rosso indica un superamento del limite per la sezione 5 e per la sezione 10 nello stesso giorno, l'evento potrà quindi essere considerato nella preselezione per essere classificato come evento regionale; si dovrà poi passare anche al controllo delle altre sezioni. Diverso è invece il caso evidenziato dal colore giallo. Nella stazione 5 nel mese di marzo si misura un superamento che però sembra non essere presente nella stazione 5, questo risulta quindi essere una controindicazione alla definizione dell'evento specifico come di tipo regionale; anche in questo caso sarà necessario osservare il comportamento delle altre stazioni nel periodo evidenziato.

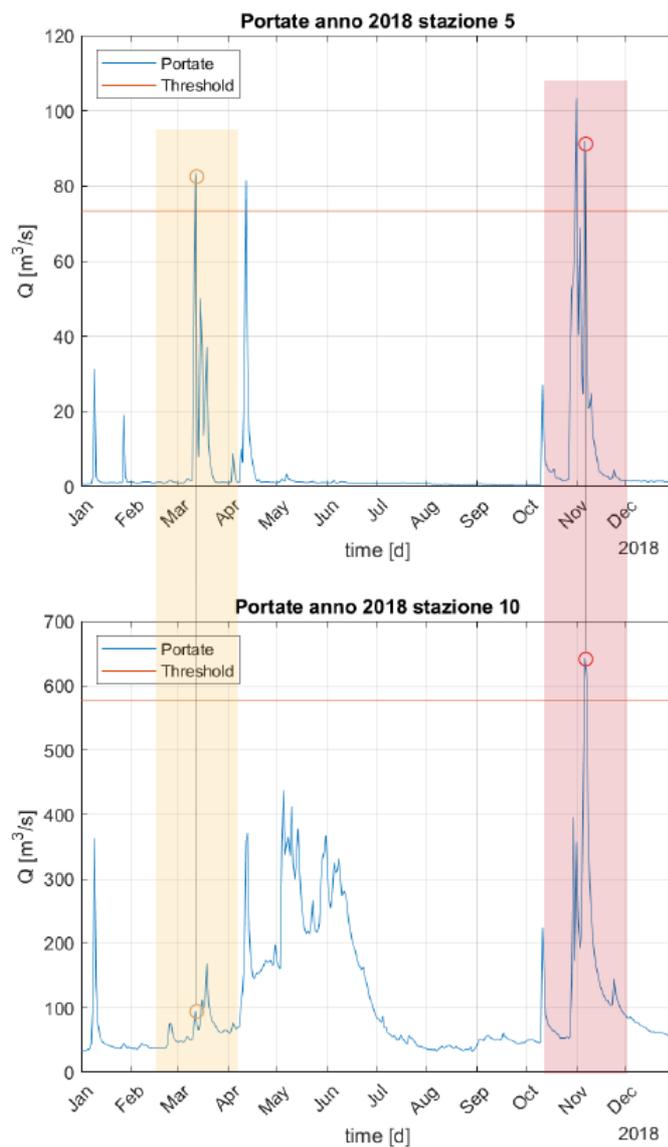


Figura 14: Confronto dei valori di portata per le stazioni numero 5 e 10 nel 2018.

I criteri appena citati devono tuttavia essere quantificati in termini di classificazione eventi tra le serie di portata delle singole stazioni, in modo da poter svolgere alcune osservazioni su stazioni che possono avere un'area drenata differente, ma una magnitudo dell'evento alluvionale comparabile.

Si può quindi dimostrare come un evento possa classificarsi in una fascia alta per alcune stazioni e contemporaneamente in una fascia bassa per altre stazioni, questo comporta un'elevata variabilità delle classificazioni per le diverse sezioni interessate.

Il primo criterio può essere quantificato secondo il principio della variabilità delle classificazioni dell'evento nelle diverse stazioni. È stato proposto, come parametro da utilizzare, la deviazione standard delle classificazioni che deve essere minore di 50 nel caso portato da Manuela Brunner. Per quantificare il secondo criterio invece si è deciso di utilizzare la somma delle classificazioni su tutte le stazioni, perché l'evento possa essere considerato come di tipo regionale la somma per ogni evento deve essere superiore a 1500.

Sono stati poi svolte alcune osservazioni riguardanti distribuzioni marginali per gli eventi di tipo locale e regionale, comparate per controllare in quali parametri fossero realmente distinte, confrontando quindi i valori dei parametri di forma e di posizione. Questi dimostravano come per un evento regionale il parametro di posizione avesse un valore notevolmente maggiore rispetto ad un evento di tipo locale, e il parametro di forma era chiaramente distinto tra le due tipologie di evento.

Nel mio caso di studio ho quindi dovuto calcolare per ogni evento e per ogni stazione i valori massimi di portata osservata, in modo da considerare e classificare solo le portate più interessanti che si presentavano contemporaneamente.

Per ogni evento ho poi calcolato la somma totale delle classificazioni, questa potrebbe essere utilizzata come criterio di classificazione ulteriore degli eventi, infatti una somma totale minore è la conseguenza di valori di portata relativamente più alti. Inoltre, per ogni evento ho calcolato i valori di deviazione standard per ottenere il maggior numero di informazioni sulle classificazioni, questi sono riportati in Figura 15 con l'utilizzo di un istogramma.

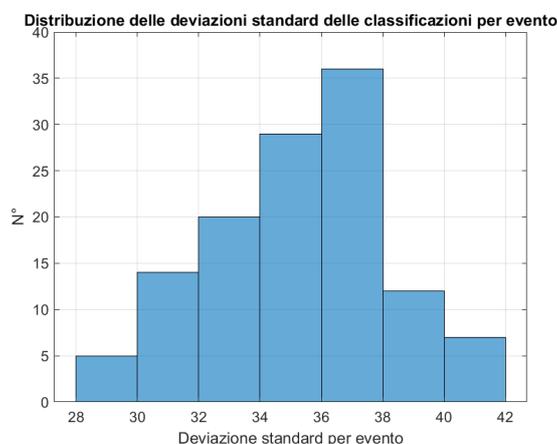


Figura 15: Distribuzione delle deviazioni standard delle classificazioni per evento.

Per avere un'idea più precisa su come si distribuivano le classificazioni e nello specifico la somma di queste per ogni evento, ho plottato i valori delle somme e la media di queste come visibile in Figura 16, calcolando anche che 65 eventi su 123 avevano un valore della somma di classificazioni inferiore alla media e che quindi potevano essere considerate come potenziali eventi da analizzare secondo una scala regionale.

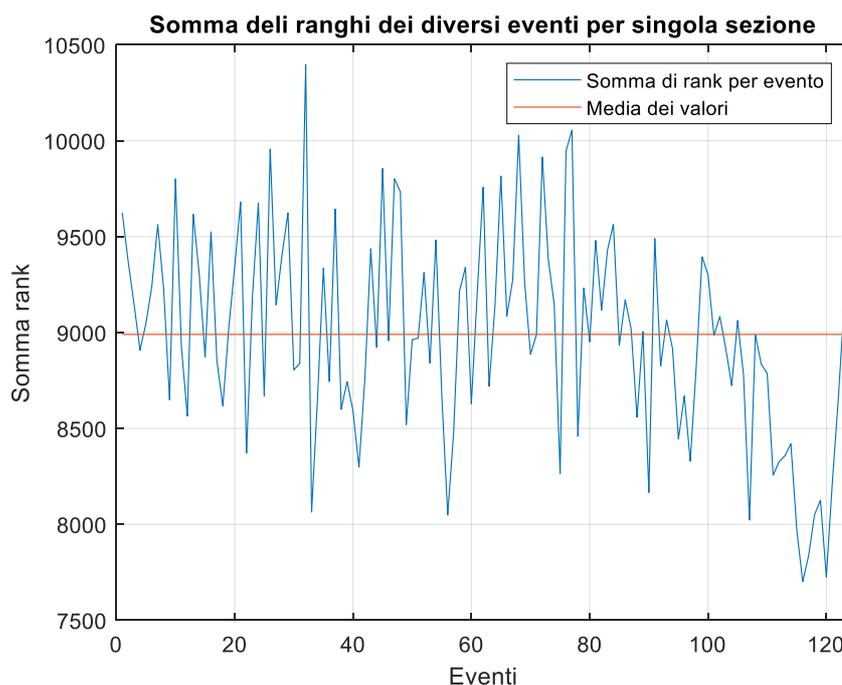


Figura 16: Distribuzione della somma delle classificazioni per evento.

Come step finale ho deciso, in accordo con il Professor Viglione, che fosse corretto analizzare e confrontare i primi 60 eventi selezionati in base a quelli con valore minore della somma delle classificazioni di ogni sezione.

4.4 Database dei principali eventi alluvionali in Italia nel periodo 2000-2019

Durante lo stage curricolare che ho svolto con la Fondazione CIMA da luglio a novembre 2020 in modalità telematica, ho effettuato alcune operazioni riprese durante lo svolgimento della tesi. La prima operazione è stata descritto nel Capitolo 3 e riguardava la lavorazione dei dati di portata e non solo.

In un secondo momento ci siamo concentrati sulla realizzazione di un database di eventi idrologici passati che si sono presentati sul territorio italiano e che potessero essere utili per una caratterizzazione degli eventi secondo criteri di distribuzione spaziale e temporale.

Per la realizzazione del database e allo scopo di prendere in considerazione il maggior numero di eventi, la Fondazione CIMA mi ha permesso di entrare in contatto con un ricercatore della Fondazione, Luca Molini, il quale si occupa tra le altre cose della redazione dei rapporti d'evento che hanno interessato l'Italia dal 2000 ad oggi per conto della Protezione Civile Italiana. Quest'ultima per questione giuridiche richiede alla Fondazione specifici rapporti ogni volta che si presentano una o più vittime a causa di eventi alluvionali.

Come viene specificato nella pagina web della Fondazione CIMA, i rapporti di collaborazione tra la Fondazione CIMA e il Dipartimento di Protezione Civile spaziano dalla realizzazione di strumenti per la previsione e il monitoraggio di eventi estremi, al supporto operativo nell'utilizzo di tali strumenti tramite la Sala Situazioni attiva 24 ore su 24 e 365 giorni l'anno. La Fondazione CIMA, su richiesta del Dipartimento di Protezione Civile e sotto il suo coordinamento, partecipa a missioni internazionali di valutazione delle necessità e dei rischi di diversi paesi e alla predisposizione ed esecuzione di programmi di cooperazione su attività di protezione civile.

Con l'ausilio di questo prodotto che il ricercatore della Fondazione Luca Molini conosce in modo dettagliato, ha consigliato di visionare alcuni dei database e dei rapporti d'evento prodotti dalla Fondazione per conto del Dipartimento di Protezione Civile.

Tra i database che ho consultato per la realizzazione della lista di eventi alluvionali sul territorio italiano nell'intervallo temporale 2000-2019 ci sono:

- I rapporti d'evento catalogati dalla *wiki* del CIMA e il cui accesso è limitato ai ricercatori della Fondazione. Grazie all'aiuto di Luca Molini ho avuto accesso con un

account ospite. I rapporti presenti all'interno della *wiki* si presentavano come in Figura 17.

Italia

Anno	Evento
2008	DR_RE_20081023 (Sardegna - Capoterra)
2009	DR_RE_20091002 (Sicilia / Giampiglieni - Scaletta Zanclea)
2010	DR_RE_20101004 (Liguria / Varazze - Sestri Ponente)
	DR_RE_20101031 (Veneto - Bacchiglione / Toscana - Massa Carrara)
2011	DR_RE_20110301 (Marche / Casette d'Ete - Sant'Elpidio)
	DR_RE_20111025 (Liguria - 5 Terre, Val di Vara / Toscana - Val Magra)
	DR_RE_20111104 (Liguria / Piemonte)
2012	DR_RE_20111122 (Sicilia Nord-Orientale / Calabria)
	DR_RE_20121110-11 (Liguria orientale / Toscana - Massa-Carrara)
2013	DR_RE_20121112 (Umbria - Orvieto / Toscana - Grossetano)
	DR_RE_20130517 (Veneto)
	DR_RE_20130624 (Emilia Romagna - Rimini)
	DR_RE_20130922 (Sicilia - Acireale)
	DR_RE_20131005 (Toscana - Massa Marittima / Lazio / Campania)
	DR_RE_20131007 (Puglia - Ginosola / Basilicata - Metapontino)
	DR_RE_20131021 (Toscana - Garfagnana_Senese / Liguria - Carasco)
	DR_RE_20131112 (Marche - Pesaro)
	DR_RE_20131118 (Sardegna - Olbia/Nuoro)
	DR_RE_20131201 (Abruzzo / Basilicata / Calabria / Puglia)
DR_RE_20131225 (Liguria - dettaglio su Porto Vado)	

Figura 17: Elenco dei rapporti d'evento presente sulla wiki del CIMA.

I rapporti d'evento presenti sono stati consultati durante il periodo di tirocinio e contenevano molte informazioni utili per l'identificazione dell'evento. Tra queste, nei rapporti più recenti per le quali era disponibile una mole di dati molto maggiore, abbiamo potuto trovare una breve descrizione dell'evento che comprende la dinamica di come questo si sia evoluto, e una serie link di articoli giornalistici relativi all'evento. Erano inoltre disponibili diverse mappe tematiche del territorio italiano, come quelle attinenti ai bollettini di vigilanza meteo-climatica, ai bollettini di criticità idrogeologica per la definizione della criticità prevista nell'area interessata dall'evento, ai dati osservati dalla rete radar-pluviometrica con dettagli della rete nel tempo, ai dati osservati dalla rete idrometrica, alla pericolosità dell'area interessata investigata per mezzo del PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico). A sostegno del rapporto è stata poi fornita una documentazione multimediale, composta da foto di repertorio e video.

A riprova della questione giuridica per cui è stato stilato il rapporto, erano anche presenti conseguenze giuridiche con link ai diversi fascicoli che sono stati aperti per individuare eventuali disponibilità, a cui si aggiungono consulenze tecniche e relazioni stilate da tecnici competenti nel post evento.

Nella *wiki* fornita dal CIMA sono presenti 89 rapporti d'evento dal 2008 al 2020, scritti per ogni evento sia di tipo alluvionale che franoso o sismico. Per i miei studi sono stati presi in considerazione solamente i rapporti d'evento nell'arco temporale dal 2008 al 2019, non esaminando quelli dell'ultimo anno e quelli che si riferivano ad eventi sismici o franosi.

- Il secondo database che è stato preso in considerazione è quello fornito dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI), che con il Progetto Polaris hanno deciso di contribuire alla valutazione del rischio geo-idrologico per la popolazione italiana. L'Istituto ha quindi deciso di raccogliere ed elaborare il maggior numero di informazioni storiche sui diversi eventi che nel tempo hanno provocato danni alla popolazione.

Dal sito web è possibile consultare un archivio di eventi meteo-climatici che si sono presentati sul territorio italiano dal 1962 ad oggi. Questi report si presentano con una breve descrizione dell'evento che evidenzia la data, il luogo o le regioni che sono state colpite e alcuni dati di tipo sia climatico che idrologico che caratterizzano in modo più specifico l'evento. Come nella *wiki* del CIMA, anche in questo caso le informazioni sono assistite da file di tipo multimediale con foto e video.

Per il nostro studio sono state presi in considerazione una serie di eventi le cui date sono state confrontate con quelle selezionate nella fase precedente allo scopo di formare un vero e proprio database di eventi.

Durante il lavoro di tirocinio ho quindi evidenziato la presenza di 40 eventi più o meno localizzati in tutta Italia. Il primo evento è stato selezionato a settembre del 2000 e l'ultimo a novembre 2019. Gli eventi selezionati sono stati poi raggruppati in una tabella rappresentata in Tabella 4, prendendo come esempio i primi eventi selezionati.

In questa tabella sono presenti diverse voci che riprendono le informazioni reperite durante le operazioni di consultazione delle banche dati citate in precedenza. Nella prima colonna sono presentati gli eventi con un nome che caratterizzi il più possibile l'evento e faciliti una sua individuazione. Nella seconda e nella terza colonna sono invece presenti indicazioni sulla zona che è stata colpita dall'evento, in un primo momento più generali con la regione italiana ed in un secondo momento con la città in cui si sono presentati maggiori danni sia alle persone che agli edifici. Nella quarta colonna sono proposte invece le date in cui si sono verificati gli eventi, se l'evento ha interessato un intervallo temporale più ampio è stata considerata la data in cui i

dati idrologici fossero più critici. La quinta colonna riprende e riassume le informazioni relative ai danni sia economici che in termini di vite umane causati nel territorio. In queste caselle trovano quindi posto sia dati numerici come i danni oppure informazioni meno specifiche, ma che riassumono alcuni aspetti importanti per la valutazione di un evento, come la forma con cui questo si è presentato, se in formato nevoso, detritico o piovoso, oppure informazioni aggiuntive su possibili evacuazioni o allagamenti di certe zone. La sesta colonna indica invece la fonte da cui sono state tratte le informazioni, nel caso l'evento fosse considerato da entrambe le banche dati consultate, queste vengono citate.

Tabella 4: Porzione di tabella caratteristica degli eventi selezionati durante il periodo di tirocinio.

Evento	Regione/i	Luogo	Data	Importanza	Fonti	Voto	Commento
Soverato 2000	Calabria	Soverato (CZ)	10-09-00	13 persone morte, innesco di varie frane	polaris	1	dati poco presenti per poter fare un'analisi dettagliata
Vibo Valentia 2006	Calabria	Vibo Valentia (VV)	03-07-06	3 persone morte, molti detriti	polaris	1	dati poco presenti per poter fare un'analisi dettagliata
Colata di detrito Villar Pellice	Piemonte	Villar Pellice (TO)	28-05-08	colata di detrito che ha travolto il paese e la strada	polaris	2	evento che si sviluppa nella parte occidentale del Piemonte, abbastanza isolato nello spazio
Evento alluvionale Italia 2008	Sardegna, Piemonte, Campania, Calabria,	/	10-10-08	vari problemi, allagamenti sparsi in tutta Italia, frane e strade chiuse	de wiki	1	dati poco presenti per poter fare un'analisi dettagliata
Maltempo generale Nord-est e Centro Italia	Toscana, Friuli, Veneto	Arezzo (AR)	07-07-09	diverse problematiche legate alla viabilità e all'esondazione di canali,	dewiki	4	piogge presenti nella regione Marche, senza però evidenziare superamenti di livelli idrici rilevanti
Inondazione nel Messinese	Sicilia, Calabria, Puglia	Messina (ME)	01-10-09	31 morti, frane detritiche su strade e case	polaris + dewiki	0	dati non presenti per i livelli siciliani
Alluvione ad Atrani	Campania	Atrani (SA)	09-09-10	colate detritiche ed evacuazioni	polaris	2	evento relativamente concentrato, non sembra essere ben distribuito spazialmente
Evento meteorologico avverso Savona e Genova	Liguria	Genova (GV)	04-10-10	chiusure strade, esondazioni e allagamenti vari	dewiki	5	evento e superamenti che si concentrano in Liguria per poi spostarsi verso la Lombardia. I superamenti sono

Nelle ultime due colonne vengono ripresi alcuni chiarimenti sulla distribuzione spaziale dell'evento, il voto è un numero da uno a dieci che ho attribuito ad ogni singolo evento dopo averlo localizzato e visionato su alcune mappe tematiche fornite dalla Fondazione CIMA, riguardanti le mappe di pioggia o le portate dei bacini fluviali nelle varie stazioni durante l'intervallo temporale di riferimento. Più l'evento sarà distribuito nello spazio ed interesserà un numero maggiore di regioni, più alto sarà il voto che attribuito all'evento in questione. In questo caso eventi molto localizzati, che si sono presentati in una sola città, saranno classificati con un voto molto basso. L'ultima colonna, invece precisa e commenta il voto che è stato assegnato

all'evento, definendo le motivazioni del voto e come si è evoluto il fenomeno alluvionale nel tempo e nello spazio.

I 40 eventi selezionati dalla consultazione delle banche dati presentate sono stati poi confrontati sia in termini di dimensione spaziale che temporale con gli eventi selezionati dagli altri metodi. Nel mio progetto sarebbero quindi serviti come base su cui lavorare per il confronto vero e proprio e per stabilire la consistenza dei tre metodi spiegati nel capitolo.

4.5 Confronto tra le differenti metodologie

Prima di osservare e analizzare nel dettaglio i prodotti delle differenti metodologie e il confronto con gli eventi selezionati in termini qualitativi e quantitativi, ritengo opportuno fare un piccolo riepilogo sulle maggiori differenze e analogie tra i metodi applicati, in modo da poter osservare più chiaramente i risultati e comprendere da dove provengano le affinità e le discrepanze tra le conclusioni prodotte.

Lo scopo della tesi, che ci eravamo posti come primo obiettivo da raggiungere, era proprio quello di confrontare differenti metodologie per la selezione e caratterizzazione di eventi alluvionali del passato, in modo da comprendere se alcune di queste potessero essere migliorate e applicate sul territorio italiano, in quanto alcune, quelle del Professor Viglione e della Dottoressa Brunner, erano state impiegate in contesti esteri.

Il confronto si svolgerà definendo in un primo momento le differenze tra i metodi, che saranno illustrate nel dettaglio in un elenco puntato, per poi concludersi con l'analisi delle analogie.

Le differenze tra le metodologie possono quindi essere riassunte in:

- Differenti parametri utilizzati per la caratterizzazione delle diverse metodologie applicate. Questi parametri possono essere fatti variare in modo da svolgere un'analisi di sensitività dei risultati ottenuti.

Per il metodo del Professor Viglione i parametri caratterizzanti sono quelli che vengono utilizzati nel calcolo dei tempi di ritorno regionali giornalieri, soggetti poi all'applicazione del filtro passa-basso. Questi sono il peso $g(j)$ che viene attribuito ai

diversi bacini a seconda dell'area che questi drenano, e l'intervallo temporale w che caratterizza l'inizio e la fine dell'evento.

Per la metodologia impiegata dalla Fondazione CIMA invece, i parametri sono tre e sono stati riassunti nel sotto-capitolo precedente. Questi sono il MIT, la finestra temporale e un Tempo di ritorno soglia, quest'ultimo è l'unico che non è presente nel metodo del Professor Viglione, in quanto non viene definito un limite fisso espresso in anni che, se superato, comporta la presenza di un evento in una singola sezione. Gli altri due parametri sono entrambi ripresi dal primo metodo presentato per definire l'intervallo temporale in cui è possibile selezionare l'evento a carattere alluvionale.

Il metodo della Dottoressa Brunner non risulta invece dipendere direttamente da parametri caratterizzanti, viene individuata la presenza di un limite identificato secondo un'analisi dei quantili che analizzeremo nel dettaglio successivamente. Per la selezione dell'evento occorre però anche in questo caso identificare le diverse date tipiche in cui si verifica un evento; per poterle individuare è stato necessario utilizzare una finestra temporale di 6 giorni allo scopo di differenziare due superamenti che si verificavano in giorni ravvicinati e poterli quindi includere in un unico macro-evento.

- La seconda differenza, forse quella più evidente, è l'utilizzo dei tempi di ritorno per svolgere l'analisi di frequenza multivariata nelle metodologie del Professor Viglione e in quella della Fondazione, mentre la Dottoressa Brunner utilizza i valori di portata per la fase di selezione dell'evento senza fare ricorso ai tempi di ritorno. Questo può comportare una notevole differenza nella fase di valutazione dei superamenti.

E' presente un'ulteriore differenza tra i tempi di ritorno utilizzati dai primi due metodi: mentre il tempo di ritorno locale calcolato dal Professore dipende dalla frequenza di non superamento e segue la regola del posizionamento di Weibull, il metodo della Fondazione si serve della distribuzione statistica più adatta dei valori massimi annuali delle portate per ogni singola stazione, definendo così il tempo di ritorno locale come il rapporto tra uno e la differenza tra uno e le funzioni cumulate di distribuzione dei massimi valori di Q . Per questa ragione i tempi di ritorno empirici locali, oltre ad essere espressi in modo differente, in giorni e in anni, risultano essere differenti in valore.

- La terza differenza che è possibile osservare riguarda l'applicazione dei diversi filtri per individuare i superamenti che si verificano nelle stazioni selezionate durante le date che identificano i differenti eventi.

Il metodo del Professore Viglione si concentra sul filtrare i tempi di ritorno regionali, calcolati giornalmente nell'intervallo temporale deciso, con l'utilizzo di un filtro passa-basso mediato sui valori dei tempi di ritorno nazionali che permette l'individuazione dell'inizio, della fine e del picco nella finestra temporale evidenziata. Il metodo della Fondazione CIMA permette di utilizzare un tempo di ritorno soglia che risulta essere smussato da un filtro gaussiano in modo da non considerare picchi che risultano non essere importanti per estensione spaziale e in termini di tempi di ritorno. La soglia smussata è applicata ad ogni valore delle singole stazioni in modo giornaliero e non ad un singolo vettore come per quanto svolto nel metodo Viglione. In questo modo un singolo superamento della soglia in un'unica stazione consente l'individuazione dell'inizio di un evento alluvionale, la cui fine coinciderà con il giorno che precederà un periodo di giorni, pari al valore definito dal parametro MIT, in cui non si verificano superamenti in nessuna stazione. Il metodo della Dottoressa Brunner risulta essere invece simile a quanto elaborato dalla Fondazione perché utilizza un *threshold* calcolato con l'ausilio del quantile. Questa soglia non risulta essere smussata come quella citata in precedenza; anche in questo caso il filtro è applicato per ogni singola stazione in modo giornaliero ai valori di portata.

La differenza nell'applicazione dei filtri risulta essere secondo la mia opinione una delle più rilevanti tra i metodi, comportando l'ottenimento di differenti risultati e tendenze che saranno analizzati con maggiore dettaglio nel capitolo successivo.

- Un'ulteriore sostanziale differenza che ho rilevato durante il progetto di tesi riguarda l'ultima fase delle applicazioni dei diversi metodi. Solamente il metodo del Professor Viglione incorporava una classificazione degli eventi secondo un criterio che permettesse di valutarne la distribuzione spaziale. Infatti, il parametro utilizzato dal Professore per il suo studio è quello del tempo di ritorno regionale caratterizzante per ogni specifico evento selezionato, maggiore sarà il valore di questo parametro maggiore sarà la distribuzione spaziale dell'evento. In questo modo sono stato in grado di estrarre un numero di eventi classificati secondo la loro estensione spaziale sul territorio italiano. Il metodo del Professore durante la sua permanenza in Austria era stato implementato con la valutazione del danno per gli eventi selezionati, per questo motivo risultava fondamentale per la ricerca inserire una classificazione degli eventi per cui calcolare in una seconda fase il danno potenzialmente prodotto. Quest'obiettivo non era perseguito

dalla Fondazione e dalla Dottoressa Brunner, in quanto la ricercatrice Tatiana Ghizzoni ha utilizzato il metodo del CIMA in un ambito di ricerca in contesti extra europei per valutare la distribuzione spaziale e temporale degli eventi selezionati durante la fase di caratterizzazione, mentre la Dottoressa Brunner con i suoi studi ha cercato di confermare e valutare alcune connessioni che potessero legare i diversi eventi che si sono presentati nel passato. Solamente nella seconda fase del suo studio vengono valutati alcuni parametri come la stagionalità o la correlazione spaziale.

Questi ultimi aspetti dei due metodi della Fondazione e di Manuela Brunner sono legati fortemente ad aspetti di ricerca, mentre il metodo del Professore può essere utilizzato anche in campo assicurativo e riassicurativo, in quanto permette di compiere una prima fase del processo di valutazione del rischio e del danno per gli eventi passati.

Per questa ragione con l'obiettivo di individuare un pool di eventi alluvionale per ogni metodo che potesse essere confrontabile in termini quantitativi, ho valutato l'ipotesi di inserire una classificazione di eventi anche per i metodi della Fondazione e per quello della Dottoressa Brunner. Per il primo metodo citato ho deciso, dopo essermi consultato con il Dottor Simone Gabellani e la Dottoressa Tatiana Ghizzoni, di utilizzare come parametro per realizzare la classificazione la somma dei tempi di ritorno empirici locali massimi calcolati nel periodo in cui è stato identificato l'evento. In questo modo sono stato in grado di valutare come si distribuivano i tempi di ritorno empirici locali nelle diverse stazioni durante gli eventi alluvionali, maggiore risulterà essere la somma dei tempi di ritorno, maggiore sarà la distribuzione spaziale stimata.

Per la classificazione degli eventi secondo il metodo della Dottoressa Brunner ho deciso invece, dopo aver consultato il Professor Viglione, di utilizzare la somma dei ranghi delle portate di ogni singola stazione. Per ogni stazione, il metodo citato consente il calcolo di un rango su tutto il periodo studiato del valore di portata giornaliera, minore sarà questo rango più sarà ritenuta rilevante la portata in questione per la specifica stazione idrometrica. Allo stesso modo, calcolando la somma dei ranghi per tutte le stazioni considerate, minore sarà la somma maggiore sarà la distribuzione spaziale degli eventi considerati. In questo modo sono in grado di lavorare solo sugli eventi che sono considerati essere maggiormente estesi sul territorio nazionale. Questa fase di classificazione, come detto in precedenza, è stata inserita per il corretto svolgimento del confronto dei risultati, trattato nel successivo capitolo.

Per quanto riguarda invece le analogie tra i diversi metodi, si evidenzia l'impiego per tutte le metodologie di un intervallo temporale più o meno esteso che permettesse l'individuazione della fine di un evento alluvionale nel momento in cui non si presentassero superamenti delle diverse soglie o filtri per la durata della finestra temporale decisa in partenza. Una seconda analogia che si può indicare come affinità tra i modelli è la produzione dei dati di output, che risultano essere principalmente gli stessi. Infatti, ogni metodologia dopo aver selezionato gli eventi consente la visualizzazione della data di inizio, la data di fine, la data del picco e il valore del picco, sia di tempi di ritorno empirici che di portata osservata o modellata, in questo modo la caratterizzazione degli eventi permette un confronto tra i risultati delle diverse metodologie.

L'ultima analogia che ho riscontrato è l'approccio multivariato al problema di selezione di eventi passati. Tutte le metodologie osservano il problema valutando sia l'aspetto temporale sia l'aspetto spaziale, provvedendo quindi a prendere in considerazione i valori di portata e i tempi di ritorno in diverse stazioni idrometriche distribuite sul territorio italiano, e valutando questo aspetto per la classificazione degli eventi scelti come maggiormente distribuiti.

5 Analisi dei risultati

In questo capitolo l'obiettivo prefissato è quello di analizzare nel dettaglio tutti i risultati e le possibili differenze tra gli output delle diverse metodologie applicate durante la redazione della tesi.

Inoltre, mi sono concentrato sulle differenze che comporta utilizzare diversi parametri, formule e *dataset* di base, cercando di dare delle risposte ai risultati che nel tempo ottenevo, senza quindi dare nulla per scontato, motivando le diverse scelte e le discrepanze tra i metodi.

5.1 Output prodotti

Per prima cosa ritengo necessario descrivere in modo più approfondito i prodotti delle metodologie analizzate nei capitoli precedenti e applicate sui dati disponibili del territorio italiano. Come detto, gli output di ogni modello sono simili tra loro per forma, ma non per contenuto; ogni metodologia permette di selezionare un numero di eventi conforme a quella che è la pratica di caratterizzazione svolta durante l'applicazione del metodo ai dati.

Per il metodo del Professor Viglione i risultati consistono in una lista di eventi, per cui viene riportato il valore del tempo di ritorno regionale massimo che ha caratterizzato l'evento, espresso in giorni, e la data in cui questo si verifica. Il metodo permette anche l'ottenimento di alcune matrici numeriche, come quelle in cui vengono riportati i valori di portata e i tempi di ritorno empirici locali per ogni evento nelle singole stazioni idrometriche. Queste matrici permettono di visualizzare su mappa come si distribuiscono spazialmente, durante l'evento, i valori più alti di questi parametri nelle specifiche sezioni. Una porzione della tabella in cui vengono riportati i diversi eventi selezionati con i diversi parametri che ne permettono la caratterizzazione per il metodo appena citato è riportata in Tabella 5.

Tabella 5: Porzione della tabella che riporta gli output prodotti secondo il metodo Viglione per il confronto degli eventi selezionati.

Evento	Giorno	Mese	Anno	Data	MAX TR
1	12	11	2005	12/11/05	583.75
2	26	11	2005	26/11/05	1924.92
3	04	01	2006	04/01/06	724.73
4	27	02	2006	27/02/06	587.60
5	27	11	2007	27/11/07	737.40
6	25	05	2008	25/05/08	2724.45
7	12	07	2008	12/07/08	700.67
8	09	11	2008	09/11/08	1700.47

Analizzando invece, i risultati della metodologia realizzata dalla Fondazione CIMA, si nota come questi non siano molto simili a quelli prodotti dal metodo precedentemente citato. In questo caso vengono riportati, come è possibile osservare dalla Tabella 6, il valore massimo dei tempi di ritorno empirici locali su tutte le stazioni durante l'evento (a differenza del metodo precedente il tempo di ritorno viene espresso in anni), il numero di stazioni in cui durante la finestra temporale dell'evento si verifica un superamento del tempo di ritorno soglia definito in questo caso di 5 anni, e la somma dei tempi di ritorno empirici locali per le diverse stazioni idrometriche considerate durante l'evento alluvionale. Questi ultimi tre parametri sono stati aggiunti alla prima applicazione del metodo CIMA per consentire una classificazione degli eventi secondo la loro distribuzione spaziale sul territorio, per cui è stata presa in considerazione la somma dei tempi di ritorno locali per le singole stazioni idrometriche.

Tabella 6: Porzione della tabella che riporta gli output prodotti secondo il metodo CIMA per il confronto degli eventi selezionati.

n	Giorno	Mese	Anno	Data	Maxtr	Somma di stazioni sopra soglia (5 anni)	Sumtr
3	26	11	2005	26/11/05	59.76	6	290.39
4	1	1	2006	01/01/06	11.52	3	198.02
5	1	3	2006	01/03/06	53.65	1	202.80
6	20	5	2006	20/05/06	75.76	1	222.63
8	24	11	2007	24/11/07	35.12	2	223.68
12	22	5	2008	22/05/08	75.05	12	457.17
13	15	7	2008	15/07/08	42.30	1	189.82
15	4	11	2008	04/11/08	24.05	9	264.26

Per quanto riguarda il terzo metodo analizzato, quello dedotto dallo studio della Dottoressa Manuela Brunner, è stata sempre presa in considerazione la data in cui si verifica l'evento e la somma dei ranghi riferiti ai valori di portata per ogni singola stazione. In questo modo quest'ultimo parametro permette la classificazione e la selezione degli eventi secondo la loro distribuzione spaziale, esattamente come quanto fatto per il metodo utilizzato dalla Fondazione CIMA. Una parte della tabella in cui vengono riportati i diversi eventi selezionati per il metodo appena citato è riportata in Tabella 7.

Tabella 7: Porzione della tabella che riporta gli output prodotti secondo il metodo Brunner per il confronto degli eventi selezionati.

n	Giorno	Mese	Anno	Data	Somma del ranking per ogni sezione
4	19	11	2005	19/11/05	8908
9	18	4	2006	18/04/06	8649
11	15	9	2006	15/09/06	8924
12	9	12	2006	09/12/06	8564
15	7	3	2008	07/03/08	8872
17	23	4	2008	23/04/08	8851
18	31	5	2008	31/05/08	8618
22	6	12	2008	06/12/08	8371

Per quanto riguarda invece la selezione degli eventi che è stata messa in pratica durante il periodo di tirocinio con la Fondazione CIMA, per poter osservare una porzione di tabella simile a quelle appena presentate, che permettesse la consultazione dei diversi parametri presi in considerazione durante la fase di selezione degli eventi alluvionali, si rimanda alla Tabella 4.

5.2 Analisi di sensitività

La prima analisi che ho scelto di svolgere riguardava un'osservazione più approfondita sulle differenze che seguivano ad una differente assegnazione dei parametri caratterizzanti dei metodi che sono stati applicati.

Mi sono quindi chiesto come potessero variare sotto l'aspetto sia quantitativo che qualitativo i risultati e gli output dei modelli, alterando e modificando i parametri che più identificavano e contraddistinguevano tra di loro le metodologie applicate.

Prima di descrivere nel dettaglio le diverse variazioni applicate alle metodologie, è necessario fare un chiarimento sui dati utilizzati per il confronto e la realizzazione dell'analisi. Sono stati individuati tre scenari, che variano a seconda dell'impiego di un diverso numero di stazioni idrometriche. La differenza tra i tre scenari non è solamente data dal numero di stazioni, ma anche dalla tipologia dei valori impiegati. Per la realizzazione del progetto di tesi sono stati utilizzati sia valori di portata osservata che modellata. Valutando le differenze appena descritte, sono stati individuate le tre tipologie di scenario che si caratterizzano nel modo seguente:

- Scenario 1: 145 stazioni idrometriche considerate, impiego di portate osservate e intervallo temporale 2005-2019. Per questo scenario sono stati impiegati 60 eventi selezionati per effettuare il confronto tra le diverse metodologie.
- Scenario 2: 145 stazioni idrometriche considerate, impiego di portate modellate e intervallo temporale 2008-2019. Impiegati 45 eventi selezionati per effettuare il confronto tra le diverse metodologie. Per questo caso, come per quello successivo, sono stati considerati un numero minore di eventi a causa del minore intervallo temporale su cui sono stati studiati gli eventi ed impiegate le diverse metodologie.
- Scenario 3: 457 stazioni idrometriche considerate, impiego di portate modellate e intervallo temporale 2008-2019. Per questo scenario sono stati impiegati 45 eventi selezionati per effettuare il confronto tra le diverse metodologie.

Tornando alla realizzazione dell'analisi di sensitività dei modelli, il primo metodo preso in esame è quello del Professor Viglione. Per questo studio mi sono concentrato sul far variare i parametri che permettessero il calcolo dei diversi tempi di ritorno regionali per ogni singolo evento. Questi sono la finestra temporale, che individua l'intervallo in cui si verifica l'evento alluvionale. Questa finestra mi ha consentito di identificare data di inizio e di fine dell'evento, valutando i giorni in cui avvengono il primo e l'ultimo superamento del filtro in termini di tempo di ritorno regionale. Il valore del parametro in questione è quindi stato fatto variare tra 3 giorni e 15 giorni, riducendone il valore mi aspettavo che il numero di eventi selezionati dal modello fossero maggiori in numero, in quanto sono stati selezionati più micro-eventi che non incorporati in un unico macro-evento, che si estende temporalmente su un numero maggiore di giorni. La mia aspettativa è stata confermata dall'analisi di sensitività che ho prodotto per questa metodologia e che è riportata nelle Tabelle 8-9-10, indicanti ciascuna uno dei tre scenari che sono stati considerati durante lo studio.

Il secondo parametro utilizzato per svolgere questa analisi è il peso che viene attribuito ad ogni stazione idrometrica. Questo è stato fatto variare tra il valore 1 per ogni sezione, considerandole quindi tutte uguali e di pari peso sul calcolo del tempo di ritorno regionale, e il valore pari al logaritmo dell'area drenata. In questo modo mi aspetto che una stazione di un bacino più rilevante, che drena quindi un'area più estesa, sia maggiormente considerata per i calcoli del tempo di ritorno nazionale. In questo caso l'andamento del numero di eventi selezionati dal metodo del Professor Viglione risulta essere molto simile e non variare in modo significativo attribuendo un peso differente alle diverse stazioni idrometriche.

Tabella 8: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia Viglione per il primo Scenario.

FINESTRA TEMPORALE (GIORNI)	PESO STAZIONE	n. EVENTI
15	logA	104
15	1	103
11	logA	111
11	1	115
7	logA	144
7	1	143
3	logA	209
3	1	211

Tabella 9: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia Viglione per il secondo Scenario.

FINESTRA TEMPORALE (GIORNI)	PESO STAZIONE	n. EVENTI
15	logA	68
15	1	68
11	logA	81
11	1	82
7	logA	103
7	1	100
3	logA	146
3	1	143

Tabella10: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia Viglione per il terzo Scenario.

FINESTRA TEMPORALE (GIORNI)	PESO STAZIONE	n. EVENTI
15	logA	67
15	1	70
11	logA	86
11	1	86
7	logA	110
7	1	109
3	logA	157
3	1	166

Indagando maggiormente nel dettaglio le Tabelle 8-9-10, si può osservare come il numero di eventi selezionati nei tre scenari dipenda in modo molto simile dal valore attribuito al parametro della finestra temporale. Inoltre, si nota una sostanziale differenza nel numero di eventi selezionati nel caso in cui si utilizzino i dati di portate osservate o modellate; impiegando questi ultimi valori gli eventi selezionati risultano essere in numero molto minore, 40 eventi in meno in media, rispetto al numero di eventi selezionati su base di valori di portata osservata a terra. La variazione considerevole che si ottiene impiegando con la stessa metodologia valori di portata osservati e modellati è sicuramente causata dal differente intervallo temporale su cui la metodologia lavora. Nel caso delle portate osservate l'intervallo temporale interessato è da settembre 2005 a settembre 2019, 15 anni in totale. Nel caso delle portate modellate, come già detto in precedenza nel capitolo dell'elaborazione dei dati, questi sono disponibili secondo il modello CONTINUUM da gennaio 2008, riducendo quindi l'intervallo in cui vengono applicate le metodologie di 4 anni. Per questa ragione il numero di eventi selezionati con portate modellate risulterà essere in numero minore rispetto a quelli che utilizzano le portate osservate, a causa di una differente finestra temporale di lavoro.

Per la seconda metodologia presa in considerazione il lavoro e l'analisi di sensitività svolti sono stati condotti maggiormente nel dettaglio, in quanto questo metodo era stato applicato in precedenza in paesi asiatici ed africani. Non eravamo quindi sicuri che i valori attribuiti in un primo momento ai parametri caratterizzanti potessero essere consistenti con i risultati che si voleva ottenere. Per questa ragione si è reso necessario, in una prima fase di studio, applicare il metodo attribuendo differenti valori ai tre parametri, la finestra temporale, quella di

interarrivo e il tempo di ritorno soglia, per poi analizzare il numero di eventi ottenuti e decidere quindi quali parametri potessero essere quelli da utilizzare durante la fase di confronto dei risultati. Come è possibile osservare nelle Tabelle 11-12-13, sono riportati i numeri di eventi selezionati per i diversi scenari considerati. Come già visto in precedenza con il metodo del Professor Viglione, anche in questo caso, il numero di eventi tende ad aumentare notevolmente quando si riduce la finestra temporale su cui viene eseguita la selezione, e l'intervallo temporale durante il quale non si devono presentare eventi sulle stazioni; si osservi infatti che se questi periodi temporali vengono considerati pari a 15 e 7 giorni o 7 e 3 giorni, applicando la stessa soglia, il numero di eventi selezionati varia di 24 unità. In quest'analisi compare un termine aggiuntivo rispetto al metodo precedentemente trattato: viene fatto variare anche il tempo di ritorno soglia che permette il filtro dei valori dei tempi di ritorno locali. Logicamente se viene impiegato una soglia più alta in termini di anni, il numero di eventi selezionati dovrebbe ridursi, in quanto si ipotizza che vengano identificati gli eventi più importanti, tralasciando quelli di minore rilevanza. Ciò è stato accertato dai dati in nostro possesso. Dalle Tabelle seguenti si può infatti notare come il numero di eventi selezionati diminuisca in modo consistente con l'aumentare del tempo di ritorno soglia, come da ipotesi.

Per quanto riguarda invece, il confronto tra i tre scenari diversi che impiegano come *dataset* iniziale portate osservate e modellate in un diverso numero di stazioni, si può osservare che anche in questo caso, come in quello precedentemente trattato, il numero di eventi selezionati sia minore se vengono utilizzate le portate modellate e non quelle osservate. Come già menzionato, questa differenza è principalmente dovuta al diverso intervallo temporale su cui lavora la metodologia.

Tabella 11: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia CIMA per il primo Scenario.

FINESTRA TEMP (GIORNI)	MIT (GIORNI)	TR SOGLIA (ANNI)	n. EVENTI
15	7	5	88
15	7	8	69
15	7	10	63
15	7	15	56
15	7	20	51
15	7	30	42
15	15	5	65
11	7	5	89
11	7	8	69
11	7	10	64
11	7	15	57
11	7	20	52
11	7	30	42
7	7	5	91
7	7	8	70
7	7	10	65
7	7	15	57
7	7	20	52
7	7	30	42
7	3	5	112
3	7	5	91
3	7	8	70
3	7	10	65
3	7	15	57
3	7	20	52
3	7	30	42
3	3	5	113

Tabella 12: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia CIMA per il secondo Scenario.

FINESTRA TEMP (GIORNI)	MIT (GIORNI)	TR SOGLIA (ANNI)	n. EVENTI
15	7	5	56
15	7	8	44
15	7	10	41
15	7	15	37
15	7	20	33
15	7	30	28
15	15	5	48
11	7	5	56
11	7	8	44
11	7	10	41
11	7	15	37
11	7	20	33
11	7	30	28
7	7	5	56
7	7	8	44
7	7	10	41
7	7	15	37
7	7	20	33
7	7	30	28
7	3	5	62
3	7	5	56
3	7	8	44
3	7	10	41
3	7	15	37
3	7	20	33
3	7	30	28
3	3	5	62

Tabella 13: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia CIMA per il terzo Scenario.

FINESTRA TEMP (GIORNI)	MIT (GIORNI)	TR SOGLIA (ANNI)	n. EVENTI
15	7	5	105
15	7	8	88
15	7	10	83
15	7	15	71
15	7	20	65
15	7	30	53
15	15	5	73
11	7	5	104
11	7	8	89
11	7	10	84
11	7	15	71
11	7	20	65
11	7	30	53
7	7	5	104
7	7	8	89
7	7	10	84
7	7	15	72
7	7	20	66
7	7	30	53
7	3	5	140
3	7	5	104
3	7	8	89
3	7	10	84
3	7	15	72
3	7	20	66
3	7	30	53
3	3	5	141

Prendendo in considerazione la terza metodologia applicata, quella della Dottoressa Manuela Brunner, si ottengono risultati simili, in termini di numero di eventi selezionati, agli altri due metodi trattati in precedenza. In questo caso il parametro che viene fatto variare è il quantile, scelto per la selezione della portata soglia con cui poi identificare i superamenti che si verificano nelle diverse stazioni. Come era possibile prevedere, se riduco il valore del quantile applicato per la definizione del limite, il numero di eventi che la metodologia selezionerà tenderà a crescere, dal momento in cui vengono considerati anche gli eventi che risultavano essere di minore importanza sull'intero territorio. Seguendo il medesimo ragionamento, se invece di diminuire il valore del quantile si prova ad aumentarlo, il numero di eventi selezionati tenderà a diminuire in numero, in quanto alzando la soglia per la selezione il metodo individuerà gli eventi che considera più importanti e maggiormente distribuiti sul territorio.

I risultati ottenuti dall'analisi di sensitività del metodo Brunner sono disponibili nelle Tabelle 14-15-16 sottostanti.

Tabella14: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia Brunner per il primo Scenario.

145 Stazioni Portate Osservate	
Quantile scelto	n°Eventi
0.9975	123
0.9980	115
0.9960	141
0.9800	171

Tabella 15: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia Brunner per il secondo Scenario.

145 Stazioni Portate Modellate	
Quantile scelto	n°Eventi
0.9975	101
0.9980	90
0.9960	106
0.9800	134

Tabella16: Analisi di sensitività sui parametri della metodologia Brunner per il terzo Scenario.

457 Stazioni Portate Modellate	
Quantile scelto	n°Eventi
0.9975	133
0.9980	130
0.9960	139
0.9800	152

L'analisi di sensitività che è stata presentata in questa parte di capitolo ha l'obiettivo di confrontare i diversi metodi in maniera maggiormente quantitativa, analizzando quindi il numero totale di eventi selezionati, che risulterà essere differente dal numero di eventi presi in considerazione nei paragrafi successivi per svolgere un confronto più qualitativo.

Inoltre, è interessante notare come al variare dei diversi parametri che caratterizzano la metodologia, varii il numero di eventi selezionati, in modo più o meno significativo. Questo processo è utile anche per decidere i parametri da utilizzare per ogni specifico metodo durante la fase di confronto dei risultati.

5.3 Affinità tra le diverse metodologie e i loro prodotti

Dopo aver analizzato nel dettaglio gli output prodotti dalle differenti metodologie considerate, ho cercato di confrontare le date dei diversi eventi selezionati.

La prima operazione da compiere è stata quella di scegliere i valori dei parametri con cui applicare le diverse metodologie studiate, in modo da avere output che potessero essere confrontabili in termini quantitativi e qualitativi. Per questa ragione ho deciso quindi di confrontare e prendere in considerazione gli output prodotti utilizzando i parametri riportati in Tabella 17.

Tabella 17: Parametri utilizzati per l'applicazione delle diverse metodologie al fine di realizzare un confronto consistente.

Metodi	Parametri	Valori
Viglione	Finestra temporale w	15 giorni
	Peso della stazione idrometrica $g(i,j)$	$\log(A)$
CIMA	Finestra temporale	15 giorni
	MIT	7 giorni
	TR soglia	5 anni
Brunner	Quantile	0.9975

Dopo aver fatto la scelta sui parametri, questi sono stati utilizzati per l'applicazione dei diversi metodi, ho ottenuto così gli eventi selezionati sotto forma di diverse tabelle brevemente richiamate nel sotto capitolo 5.1 ed utilizzate per la descrizione degli output prodotti. Le tabelle in questione sono riportate come allegato in un file Excel per ciascun scenario considerato. Per poter confrontare i risultati ottenuti dalle diverse metodologie e comprendere se potessero essere compatibili e consistenti tra di loro, è stato necessario, per ogni scenario considerato, comparare le date degli eventi selezionati. Per realizzare il confronto sono state quindi utilizzate le date degli eventi selezionati, scelti secondo i diversi criteri per la distribuzione spaziale precedentemente descritti, differenti per ogni metodo.

In questo modo, sono state inserite tutte le date degli eventi selezionati dai diversi metodi in un unico foglio di calcolo Excel. Si è potuto così realizzare un'unica tabella per scenario, in cui le date degli eventi non si ripetessero, raggruppando poi i diversi eventi selezionati che differivano per un massimo di 7 giorni in un unico macro-evento.

Come è possibile osservare dalla porzione di tabella riportata in Tabella 18, i macro-eventi selezionati dalle diverse metodologie applicate sono caratterizzati dalla data in cui si sono verificati riportata nella prima colonna. Nelle altre colonne sono riportati gli operatori logici (0-1) che evidenziano la possibile selezione di un evento da parte di una determinata metodologia. Se l'evento è stato selezionato da una metodologia, ed è presente nei primi eventi per i parametri della distribuzione spaziale, sarà riportato il valore 1, diversamente sarà riportato il valore 0. Nel caso in cui l'evento sia stato individuato da tutte e 3 le metodologie applicate e sia anche presente nell'elenco stilato durante il periodo di tirocinio, la loro somma corrisponderebbe al valore 4.

Tabella18: Porzione della tabella relativa allo Scenario 1, per confrontare i diversi eventi selezionati dalle metodologie impiegate.

Data	Viglione	Cima	Brunner	Tirocinio	Somma (1-4)
12/11/05	1	0	0	0	1
26/11/05	1	1	1	0	3
04/01/06	1	1	0	0	2
27/02/06	1	1	0	0	2
18/04/06	0	0	1	0	1
20/05/06	0	1	0	0	1
03/07/06	0	0	0	1	1
15/09/06	0	0	1	0	1

Queste tabelle sono state realizzate per ogni scenario e sono riportate negli Allegati 1-2-3. Sono state realizzate per confrontare le diverse metodologie e comprendere se la lista di eventi selezionati da ognuna potesse essere confrontabile. Inoltre, può essere utile conoscere quanto le diverse metodologie risultino essere consistenti con l'elenco realizzato durante il periodo di tirocinio, che tiene conto delle diverse banche dati italiane.

Nelle Tabelle 19-20-21 sono riportate delle statistiche su quanto viene proposto dalle diverse tabelle, nelle quali vengono impiegati gli operatori logici. Sono state confrontate prima in coppia le diverse metodologie, in modo da descrivere i rapporti tra tutte quelle impiegate durante l'analisi, poi sono stati confrontati i dati relativi a tre e quattro metodi simultaneamente. Nella prima riga viene riportata una statistica relativa alla percentuale di eventi sul totale, derivato da tutte e quattro le metodologie, che risultano essere concordi tra i metodi analizzati. Nel primo caso del primo scenario, gli eventi selezionati dai metodi Viglione e Cima, concordi sia nella selezione che nella non selezione, sono il 73.28% sul totale degli eventi, che nel primo scenario risultano essere 116. La seconda e la terza riga indicano, sempre con il valore

percentuale, il numero di eventi, che concordano tra le metodologie rispettivamente sulla non selezione dell'evento e poi sulla selezione, sul totale di eventi considerato. Nelle ultime due righe invece sono riportati i valori percentuali di eventi che concordano nell'individuazione e nell'esclusione sul totale di eventi concordanti tra quelli totali, differente per ogni relazione tra metodologia.

Ottenuti i risultati riportati nelle tabelle successive, è possibile fare alcune osservazioni:

- Una delle percentuali di cui interessava maggiormente osservare l'andamento è quella che lega le diverse metodologie applicate con la lista di eventi selezionati durante il tirocinio. Ci siamo chiesti se questo parametro potesse essere un consistente metodo per misurare la validità dei metodi applicati e studiati. Per i metodi CIMA e Viglione, questo valore rimane praticamente inalterato per i tre scenari riportati, essendo sempre compreso nell'intervallo 12-15% sul totale di eventi selezionati. Invece, il metodo della Dottoressa Brunner sembra essere meno consistente rispetto agli altri due rispetto alla lista di eventi considerata per il confronto, il suo valore percentuale si attesta infatti intorno al 7-8%.
- Dopo aver descritto i diversi metodi, mi aspettavo che quelli CIMA e Brunner fossero molto più simili nei risultati ottenuti, invece così non sembra. Analizzando i dati prodotti le metodologie che più paiono somigliarsi nella selezione degli eventi sono il metodo CIMA e quello Viglione, il cui rapporto di eventi selezionati concordi risulta quasi sempre invariato tra gli scenari, pari al 35%. Invece il rapporto che lega gli eventi selezionati sul totale dei metodi CIMA e Brunner risulta compreso in un intervallo 18-22%, valore molto più basso rispetto a quello precedentemente citato. Questa sostanziale differenza, come suggerito dal ricercatore Lorenzo Campo del CIMA, con cui mi sono confrontato sui risultati ottenuti, è dovuta principalmente al fatto che il limite delle portate applicato dalla ricercatrice svizzera non sia smussato e mediato sui valori di portata misurata, rimane costante per tutti i periodi considerati. Per questa ragione se viene applicato ad una serie di dati crescenti nel tempo, come quelli delle portate nei bacini esaminati, il numero di eventi selezionati tenderà a variare nel tempo e non essere proporzionale negli anni. In questo modo negli ultimi anni, quando le portate misurate e modellate sono più alte in media, il numero di eventi selezionati sarà in numero molto maggiore se confrontato con quello relativo ai primi anni di analisi.

- Un'ulteriore domanda che mi sono posto riguarda l'utilizzo del numero di eventi che vengono selezionati nei diversi scenari per validare ulteriormente le metodologie applicate. Il numero totale di eventi selezionati per il primo scenario risulta essere pari a 116, valore che si attesta tra il minimo di 60 nel caso in cui gli eventi combaciassero perfettamente tra le diverse metodologie, e il massimo di 220, per il quale nessun evento coinciderebbe. Per il secondo e terzo scenario sono stati invece selezionati rispettivamente 96 e 102 eventi, tra un minimo di 45 e un massimo di 160 eventi.

Il parametro non risulta cambiare in modo drastico tra i tre scenari proposti. Questo può significare che le analisi svolte con portate osservate e modellate non sono così distanti nei risultati, anche se i dati di partenza sono diversi tra loro e il numero di stazioni prese in considerazione varia notevolmente. Quest'ultima osservazione risulta essere secondo me molto importante per la caratterizzazione spaziale degli eventi, in quanto dimostra come utilizzando un numero di stazioni maggiore e più distribuite sul territorio italiano, coperto quindi in modo più omogeneo, la consistenza tra le diverse metodologie e la lista di eventi selezionati non cambia sensibilmente nel terzo scenario, ma risulta essere stabile. Questo fenomeno porta pertanto alla conclusione che molti degli eventi più severi e maggiormente distribuiti sul territorio italiano si presentino nel Nord-Centro Italia, per cui si hanno i dati sia in termini di portate osservate che di portate modellate. In queste zone geografiche si trovano i principali fiumi italiani in termini di portata come l'Adige, l'Arno, il Po e il Tevere. Mentre, nel Sud Italia e nelle Isole, coperte solamente dai dati di portata modellata e il cui andamento viene ripreso solamente nel terzo scenario, sembra che non si verificano eventi significativi dal punto di vista spaziale e siano molto più localizzati in alcune città o zone la cui estensione è molto limitata.

Questa osservazione è confermata dalla morfologia e topografia del territorio italiano, che conferma la difficoltà di espansione di un fenomeno alluvionale nei territori del Sud Italia. Per ottenere un'ulteriore conferma sarebbe necessario lavorare con gli eventi selezionati nel terzo scenario, senza considerare quelli che sono stati identificati nel primo scenario, studiando maggiormente nel dettaglio gli eventi che interessano il Sud Italia, e confrontando i risultati ottenuti con database storici, in modo da osservare se questi fossero realmente molto localizzati. Questo lavoro è stato affrontato solamente

nell'ultimo periodo della scrittura della Tesi e non sono stato in grado di includerlo in questo progetto, ma può rappresentare comunque un'implementazione al lavoro svolto.

Tabella 19: Statistica sul confronto dell'applicazione delle diverse metodologie per lo Scenario 1.

Scenario 1	Viglione-Cima	Viglione-Brunner	Viglione-Tirocinio	Cima-Brunner	Cima-Tirocinio	Brunner-Tirocinio	Viglione-Cima-Brunner	Viglione-Cima-Brunner-Tirocinio
% di concordi su tot eventi	73.28	49.14	43.97	43.10	43.10	32.76	32.76	3.45
% di non ev su tot eventi	36.21	24.14	31.90	20.69	31.03	25.86	15.52	0.00
% di eventi su tot eventi	37.07	25.00	12.07	22.41	12.07	6.90	17.24	3.45
% di non ev su concordi	49.41	49.12	72.55	48.00	72.00	78.95	47.37	0.00
% di ev su concordi	50.59	50.88	27.45	52.00	28.00	21.05	52.63	100.00

Tabella 20: Statistica sul confronto dell'applicazione delle diverse metodologie per lo Scenario 2

Scenario 2	Viglione-Cima	Viglione-Brunner	Viglione-Tirocinio	Cima-Brunner	Cima-Tirocinio	Brunner-Tirocinio	Viglione-Cima-Brunner	Viglione-Cima-Brunner-Tirocinio
% di concordi su tot eventi	69.79	45.83	46.88	51.04	47.92	30.21	33.33	6.25
% di non ev su tot eventi	38.54	26.04	31.25	29.17	32.29	22.92	19.79	0.00
% di eventi su tot eventi	31.25	19.79	15.63	21.88	15.63	7.29	13.54	6.25
% di non ev su concordi	55.22	56.82	66.67	57.14	67.39	75.86	59.38	0.00
% di ev su concordi	44.78	43.18	33.33	42.86	32.61	24.14	40.63	100.00

Tabella 21: Statistica sul confronto dell'applicazione delle diverse metodologie per lo Scenario 3.

Scenario 3	Viglione-Cima	Viglione-Brunner	Viglione-Tirocinio	Cima-Brunner	Cima-Tirocinio	Brunner-Tirocinio	Viglione-Cima-Brunner	Viglione-Cima-Brunner-Tirocinio
% di concordi su tot eventi	77.45	38.24	49.02	41.18	46.08	36.27	28.43	4.90
% di non ev su tot eventi	45.10	24.51	34.31	26.47	33.33	27.45	15.69	0.00
% di eventi su tot eventi	32.35	13.73	14.71	14.71	12.75	8.82	12.75	4.90
% di non ev su concordi	58.23	64.10	70.00	64.29	72.34	75.68	55.17	0.00
% di ev su concordi	41.77	35.90	30.00	35.71	27.66	24.32	44.83	100.00

5.4 Tendenza della distribuzione spaziale degli eventi alluvionali

La prima osservazione che mi è sorta spontaneo fare, dopo aver applicato le differenti metodologie ai diversi *dataset* di base in mio possesso, è stata quella di confrontare e rappresentare l'andamento nel tempo. per le diverse stazioni idrometriche considerate, dei parametri che hanno permesso la classificazione e la caratterizzazione degli eventi secondo l'ottica spaziale e non solo più temporale.

Per fare questo, per la metodologia prodotta dal Professor Viglione è stato quindi necessario rappresentare con un grafico l'andamento temporale del tempo di ritorno nazionale per i diversi eventi che sono stati selezionati. L'andamento di questo parametro nei tre differenti scenari presi in considerazione è rappresentato dalle Figure 18-19-20. In questi grafici sulle ordinate sono riportati i valori dei tempi di ritorno nazionale, sull'asse delle ascisse sono indicati gli eventi selezionati ordinati in ordine cronologico crescente, il primo evento considerato sarà quindi il primo cronologicamente. Come già detto in precedenza, il numero di eventi varierà a seconda del *dataset* utilizzato. Nel caso di portate osservate saranno studiati 60 eventi, mentre se sono impiegate per le analisi le portate modellate il numero di eventi scende a 45. Con la linea rossa viene restituito il valore medio dei tempi di ritorno nazionale nell'intervallo valutato.

Mentre, con la linea verde viene evidenziato l'andamento dei valori dei tempi di ritorno che superano il valore medi.

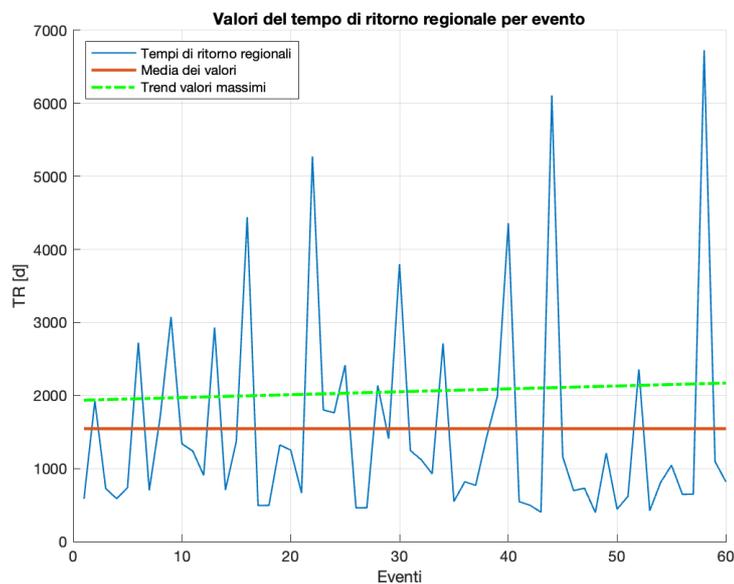


Figura 18: Andamento del tempo di ritorno nazionale per il metodo Viglione, per il primo Scenario.

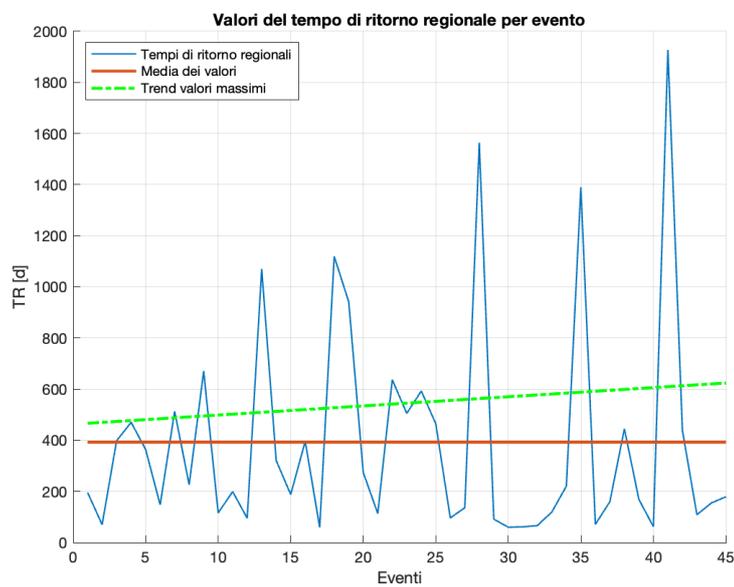


Figura 19: Andamento del tempo di ritorno nazionale per il metodo Viglione, per il secondo Scenario.

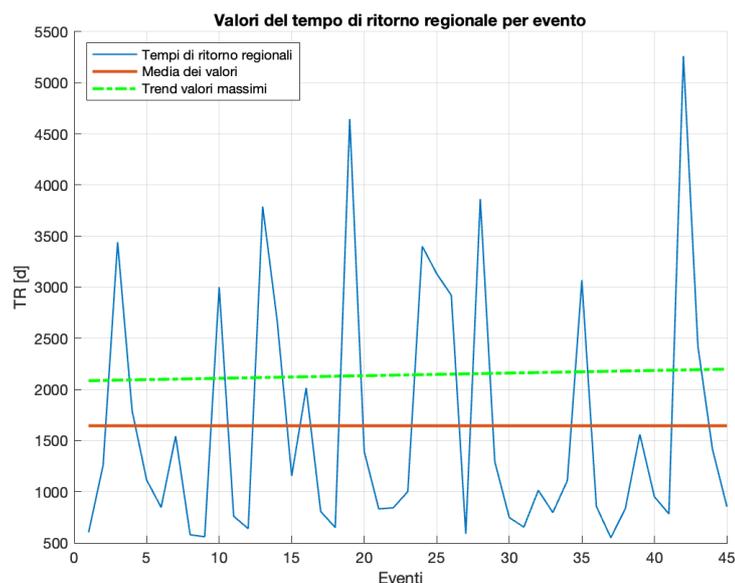


Figura 20: Andamento del tempo di ritorno nazionale per il metodo Viglione, per il terzo Scenario.

Per poter confrontare quanto appena fatto con il primo metodo, è stato necessario fare la stessa operazione con gli altri due metodi. Per il metodo impiegato dalla Fondazione CIMA, è stato necessario utilizzare come parametro caratterizzante la somma dei tempi di ritorno locali delle diverse stazioni idrometriche considerate per i singoli eventi. Come nel caso precedente, sono stati utilizzati i medesimi tre *dataset* di base, da cui si ottengono le Figure 21-22-23, le cui caratteristiche grafiche riprendono quelle analizzate precedentemente.

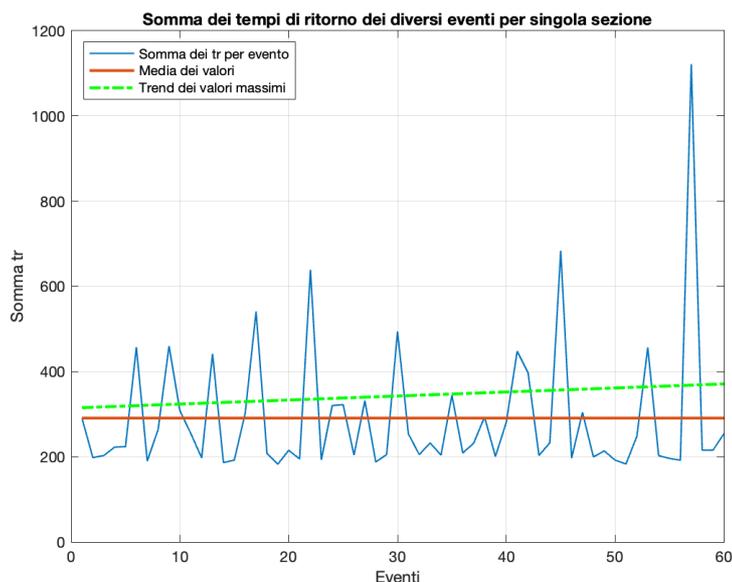


Figura 21: Andamento della somma dei tempi di ritorno locali per il metodo CIMA, per il primo Scenario.

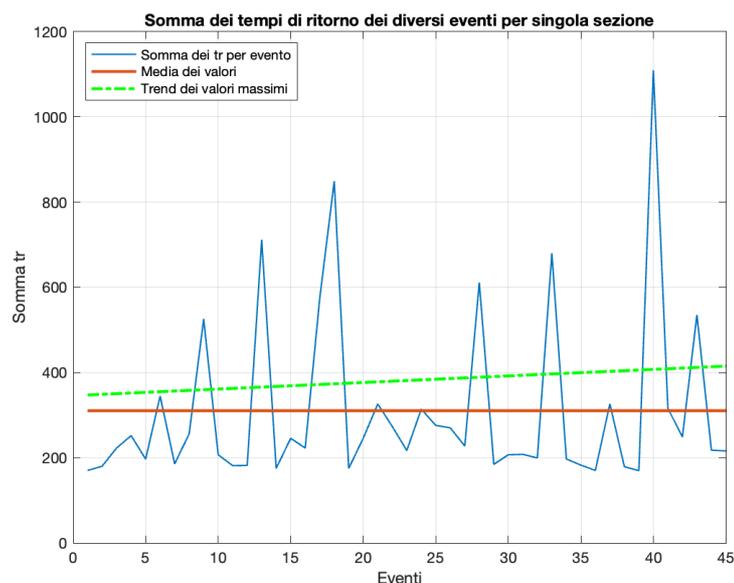


Figura 22: Andamento della somma dei tempi di ritorno locali per il metodo CIMA, per il secondo Scenario.

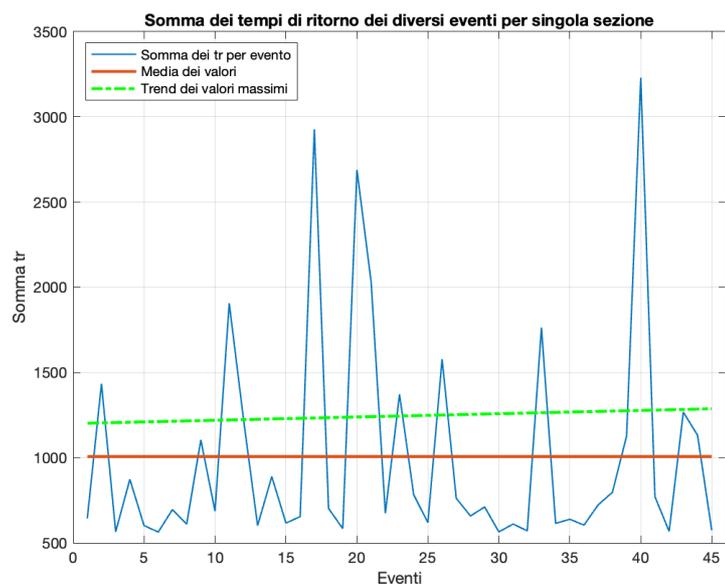


Figura 23: Andamento della somma dei tempi di ritorno locali per il metodo CIMA, per il terzo Scenario.

Il terzo metodo considerato invece, quello legato allo studio prodotto dalla Dottoressa Brunner, risultava leggermente differente rispetto a quelli appena trattati. Il parametro caratterizzante in questo caso è la somma dei ranghi delle diverse portate nelle singole stazioni durante l'evento considerato. Per questa ragione più basso è il valore della somma dei ranghi più l'evento risulterà essere distribuito sul territorio nazionale. Se dovessimo rappresentare

graficamente l'andamento temporale della somma dei ranghi, questo avrebbe un andamento contrario rispetto a quelli precedentemente trattati, per questo motivo è stato necessario specchiare il valore della somma in modo che potesse essere più semplice effettuare il confronto con le tendenze degli altri grafici prodotti in precedenza. I grafici che indicano l'andamento delle somme delle classificazioni per evento sono quindi simili a quelli del metodo CIMA e Viglione, e ne hanno le stesse proprietà grafiche. Queste sono quindi riportate nelle Figure 24-25-26 e riportano i diversi *dataset* di base impiegati.

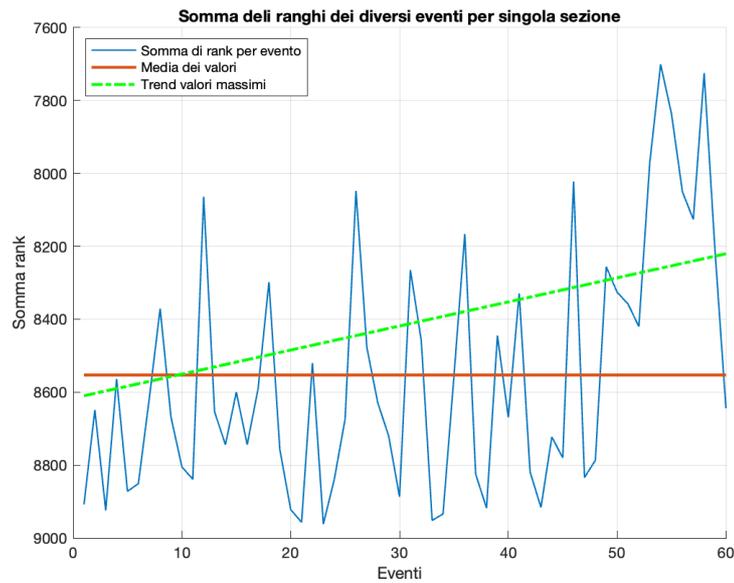


Figura 24: Andamento della somma dei ranghi delle portate per stazione per il metodo Brunner, per il primo Scenario.

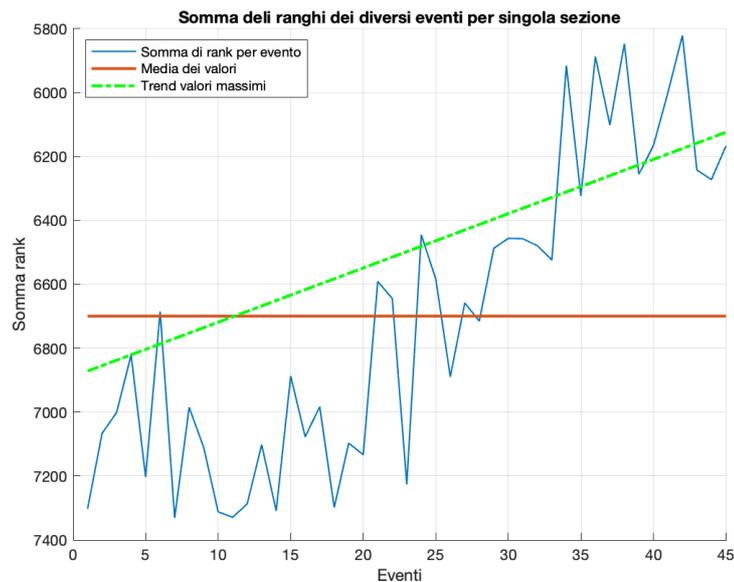


Figura 25: Andamento della somma dei ranghi delle portate per stazione per il metodo Brunner, per il secondo Scenario.

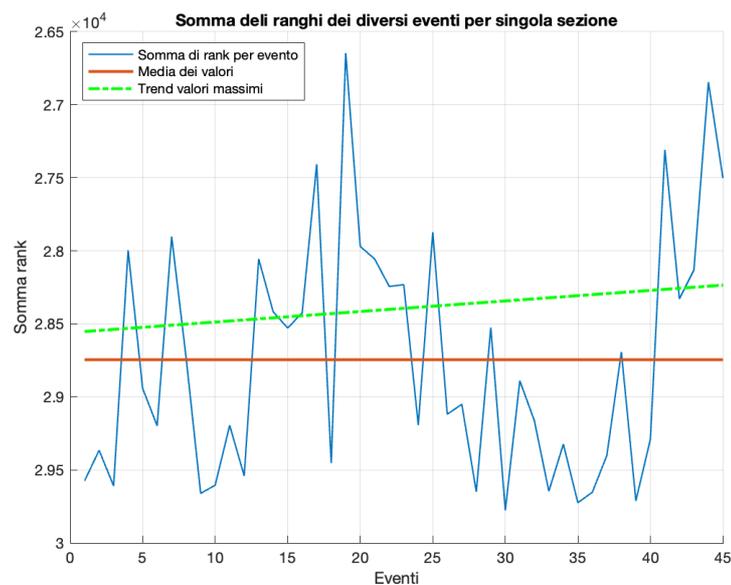


Figura 26: Andamento della somma dei ranghi delle portate per stazione per il metodo Brunner, per il terzo Scenario.

La prima cosa che salta all'occhio osservando i diversi grafici che sono stati proposti è il trend valutato: tutte e tre le metodologie evidenziano come i parametri che caratterizzano la distribuzione spaziale degli eventi sul territorio italiano abbiano la tendenza a crescere nel tempo. Il trend, che è stato calcolato per i valori massimi che superavano i valori medi, risulta essere quasi sempre positivo e crescente nel tempo, come è possibile da osservare dalla Tabella 22, in cui sono stati riportate le pendenze delle linee di tendenza dei valori massimi, nei grafici precedenti di colore verde e tratteggiate.

Tabella 22: Tabella riassuntiva delle pendenze dei diversi trend dei valori massimi per ogni scenario considerato.

Scenario	Pendenza
Viglione	
145 oss	3,976
145 mod	3,581
457 mod	2,564
CIMA	
145 oss	0,944
145 mod	1,541
457 mod	1,925
Brunner	
145 oss	6,603
145 mod	16,986
457 mod	7,221

Si può quindi ipotizzare che l'estensione spaziale degli eventi alluvionali e la loro magnitudine stia crescendo nel tempo, questa ipotesi è confermata da più articoli che brevemente saranno ripresi in queste pagine. L'intervallo temporale per cui sono in grado di avere i dati di portate osservate e modellate non è molto lungo, ma può permetterci di pensare che l'andamento sia confermato anche andando più indietro nel passato.

Il primo articolo che conferma quanto appena osservato con i dati in mio possesso è stato pubblicato sull'*IWA Publishing (International Water Association Publications)* da un gruppo di ricercatori polacchi (Zbigniew et al., 2018). In questo articolo vengono presi in considerazione valori di portata osservate in diverse località europee, lo studio conferma come a causa dei principali problemi legati al cambiamento climatico e all'innalzamento dei valori di umidità del suolo, il trend del numero di eventi che interessa diverse regioni sia crescente nel tempo, sia in termini numerici che in termini di severità e magnitudine. Il gruppo di ricercatori prende in considerazione dati nell'intervallo temporale 1985-2016, e conferma il trend positivo del numero di eventi alluvionali estesi con una certa magnitudine e severità sul territorio europeo, valutando la frequenza e l'intensità delle precipitazioni estreme. Quanto appena riassunto può essere rappresentato dal grafico in Figura 27, ripreso sempre dall'articolo del gruppo di ricercatori di Poznan.

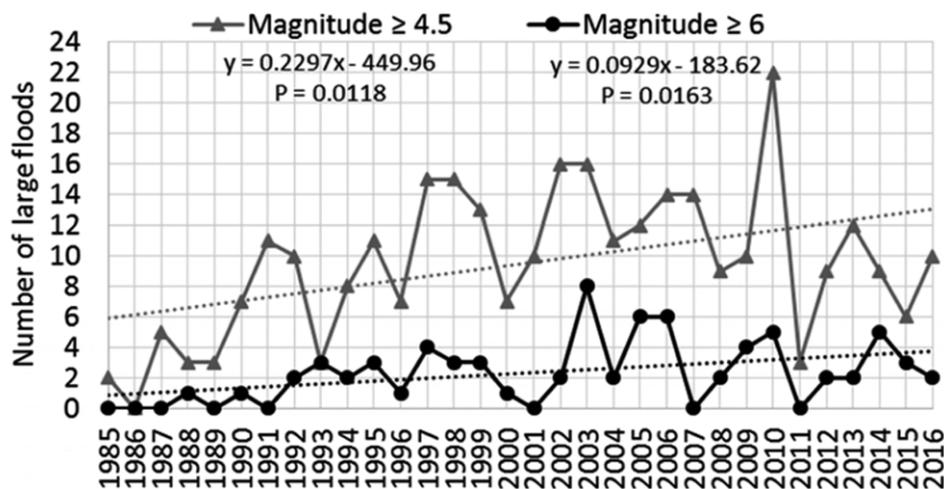


Figura 27: Numeri di eventi alluvionali estesi sul territorio europeo dal 1985 al 2016, con magnitudine e severità. Da Zbigniew et al (2018; <https://doi.org/10.2166/nh.2017.016>)

Il secondo studio che vorrei citare e presentare brevemente in questo progetto di tesi è quello prodotto da un gruppo di ricercatori dell'Università di Zurigo e pubblicato sulla rivista dell'AGU (*American Geophysical Union*) (Berghuijs et al., 2019). In questa analisi viene

identificato e calcolato un parametro, la scala di sincronia di un evento alluvionale, su più di 4000 stazioni distribuite su tutto il continente europeo nell'intervallo temporale 1960-2010.

Il parametro in questione è valutato come il raggio massimo, espresso in km, per cui se viene misurata un'inondazione in una determinata stazione idrometrica, almeno in metà delle stazioni vicine deve verificarsi un superamento della soglia; in questo modo si determina la correlazione tra il verificarsi di un evento tra più stazioni vicine contemporaneamente. Anche in questo studio viene utilizzata una finestra in inter-arrivo di 7 giorni per valutare al meglio la connessione tra stazioni appartenenti allo stesso bacino, ma distanti alcuni chilometri.

Come è possibile osservare dal grafico riportato in Figura 28, il trend delle scale di sincronia di eventi alluvionali mediati sulle stazioni disponibili in tutta Europa è in netto aumento, basti pensare che dal 1960 al 2010 il suo valore è quasi raddoppiato. Questo dato conferma quindi che il numero di stazioni vicine in cui si sono verificati superamenti ha una tendenza crescente nel tempo. Nella seconda immagine viene evidenziata la differenziazione regionale dell'andamento crescente della scala di sincronia, in alcune zone sembra essere maggiore il legame tra le stazioni impiegate per lo studio, questa differenza è dovuta principalmente alle caratteristiche morfologiche e topografiche che caratterizzano il territorio europeo.

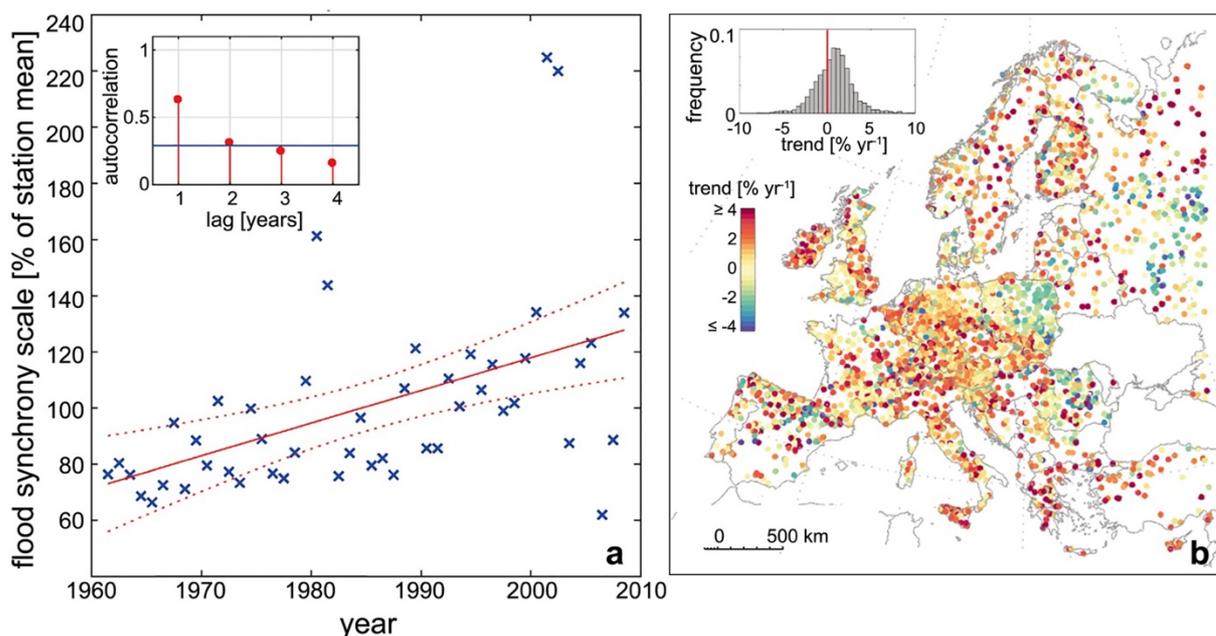


Figura 28: Trend scale di sincronia degli eventi alluvionali europei mediate su tutte le stazioni disponibili e tendenze per i singoli bacini che variano regionalmente. Da Berghuijs et al. (2019, <https://doi.org/10.1029/2018GL081883>).

Il trend crescente sia della severità che dell'estensione spaziale degli eventi in Europa negli ultimi 50 anni, descritto dai due articoli brevemente riassunti nelle pagine precedenti, conferma quanto ipotizzato dal mio studio. La distribuzione degli eventi alluvionali in Italia risulta avere una tendenza crescente, sia in termini di magnitudine che in termini di estensione spaziale.

Quanto confermato da questi studi può essere di particolare aiuto per la caratterizzazione del rischio alluvionale nella fase di elaborazione degli scenari di pericolosità e rischio, sia per le istituzioni locali e nazionali, sia per le compagnie di assicurazione e riassicurazione che sono particolarmente interessate alla valutazione di un rischio maggiormente distribuito nello spazio.

5.5 Tendenza delle singole stazioni idrometriche

Per ottenere un'ulteriore conferma del fatto che nell'ultimo periodo storico la severità e la distribuzione spaziale degli eventi alluvionali sul territorio europeo siano caratterizzati da una tendenza crescente, ho cercato di analizzare maggiormente nel dettaglio il trend delle portate osservate e modellate e dei tempi di ritorno empirici locali ottenuti con le diverse metodologie per le singole stazioni. Per quanto riguarda le metodologie studiate dal Professor Viglione e dalla Fondazione CIMA, ho lavorato con valori di portata e tempo di ritorno locali definiti secondo i tre scenari presentati nel sotto capitolo 5.2. Per il metodo sviluppato dalla Dottoressa Brunner mi sono confrontato con i valori di portata, sempre considerati nei tre scenari, poiché il metodo non impiega valori di tempi di ritorno locali nella prima fase di selezione degli eventi.

Sono stati prodotti quindi, dei grafici come quelli riportati in Figura 29 e 30, in cui per ogni stazione idrometrica, analizzata nei tre scenari descritti in precedenza, sono stati rappresentati i valori di portata e i tempi di ritorno locali massimi misurati nella specifica stazione durante gli eventi selezionati, che sono disposti sull'asse delle ascisse in ordine cronologico. In questo modo, procedendo similmente a quanto fatto nel sotto capitolo precedente, è stato individuato per ogni grafico il trend della stazione mediante interpolazione lineare, al fine di comprendere l'andamento di questi parametri nel tempo.

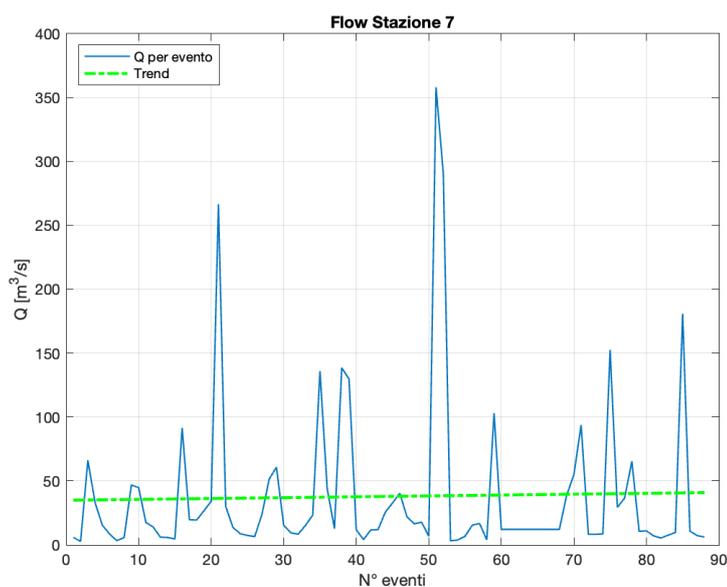


Figura 29: Andamento della portata nelle diverse date degli eventi selezionati per la Stazione di Tronto del bacino Tronto, individuate dalla metodologia CIMA secondo il primo Scenario.

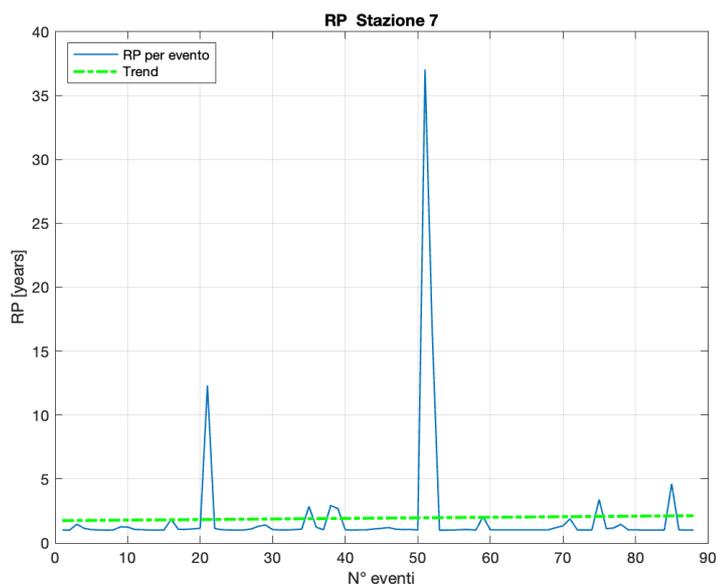


Figura 30: Andamento dei tempi di ritorno locali nelle diverse date degli eventi selezionati per la Stazione di Tronto del bacino Tronto, individuate dalla metodologia CIMA secondo il primo Scenario.

Dopo aver rappresentato graficamente l'andamento nel tempo di tutte le stazioni idrometriche considerate in questo studio e in tutti gli scenari presentati, ho deciso di lavorare ed analizzare maggiormente nel dettaglio la pendenza che caratterizza l'interpolazione lineare dei valori per ogni stazione, in modo da comprendere come si comporti l'andamento dei parametri di portata e tempi di ritorno locali. I risultati ottenuti sono presentati nella Tabella 23,

dove ho riportato i valori di pendenza medi delle linee di tendenza per le singole stazioni, allo scopo di avere un quadro generale sul comportamento dei parametri studiati.

Osservando questa tabella nel dettaglio è possibile fare alcune osservazioni che riporto nell'elenco puntato sottostante:

- Le pendenze medie del trend dei valori di portata sono quasi sempre negative, eccezion fatta per un valore, da questo esame si può quindi dedurre come l'andamento medio delle portate nel tempo sembri non seguire quello della distribuzione spaziale analizzata precedentemente. Sembra quindi, che le portate nel nostro intervallo temporale non abbiano un andamento medio crescente.
- Le pendenze medie del trend dei valori di portata sono quasi sempre negative, eccezion fatta per un valore. Da questo esame si può quindi dedurre come l'andamento medio delle portate nel tempo sembri non seguire quello della distribuzione spaziale analizzata precedentemente. Pare che le portate nel nostro intervallo temporale non abbiano un andamento medio crescente.
- Le pendenze dei valori dei tempi di ritorno locali, considerati dai metodi CIMA e Viglione, non sono quasi mai valori negativi come il trend dei valori di portata, ma valori molto piccoli e quasi prossimi allo zero. Questo però sembra essere dovuto al fatto che i valori dei tempi di ritorno espressi in anni dal metodo CIMA siano molto piccoli e che quindi ci sia una scarsa differenza tra i valori per i diversi eventi. Si può pertanto osservare che l'andamento dei tempi di ritorno nel tempo sia differente da quello dei valori di portata e sia crescente, come quello dei parametri che caratterizzano la distribuzione spaziale nel tempo osservati nei paragrafi precedenti
- Anche in questo caso, come in precedenza, si osserva un comportamento simile delle tre metodologie nei tre scenari considerati. Se si esaminano i valori medi delle pendenze per i tre metodi, si osserva come questi per il parametro della portata siano mediamente alti nel primo scenario, molto più bassi nel secondo scenario e ritornino poi a valori più alti nel terzo scenario. Questo potrebbe far pensare che i dati modellati evidenzino maggiormente un andamento decrescente delle portate nel tempo per i bacini del Nord-Centro Italia, trend che viene riequilibrato dall'inserimento delle stazioni del Sud Italia e delle Isole nel terzo scenario. Per quanto riguarda invece l'andamento dei valori dei tempi di ritorno, un comportamento simile è osservato solo dalla metodologia CIMA, per cui il trend sembra crescere nel secondo scenario ed essere meno pendente negli

altri due. Questa osservazione non è però confermata dal metodo del Professor Viglione, la differenza prodotta è quasi certamente causa del differente metodo con cui vengono calcolati i tempi di ritorno empirici locali.

Tabella 23: Media delle pendenze dei trend delle portate e dei tempi di ritorno locali delle singole stazioni idrometriche, per i 3 diversi scenari e le 3 metodologie applicate.

Metodo	Scenario	Pendenza	Valore
CIMA	1	Media Q	0.1346
		Media RP	0.0015
	2	Media Q	-2.5649
		Media RP	0.0063
	3	Media Q	-0.2735
		Media RP	0.0017
Viglione	1	Media Q	-0.4226
		Media RP	-0.0240
	2	Media Q	-3.4520
		Media RP	0.8281
	3	Media Q	-0.9577
		Media RP	0.8334
Brunner	1	Media Q	-0.2480
	2	Media Q	-1.3232
	3	Media Q	-0.2154

In seconda battuta dopo aver osservato in modo generale il trend dei parametri di portata e tempi di ritorno per le singole stazioni, ho voluto rappresentare sulla cartina italiana come per ogni scenario si distribuivano gli andamenti dell'interpolazione lineare delle singole stazioni, in modo da comprendere se potesse essere presentata qualche relazione spaziale tra i dati in nostro possesso. Ho proceduto quindi riportando valori di pendenza del trend per ogni singola stazione sul territorio italiano, ottenendo per ogni scenario una mappa come quelle riportate in Figura 31 e 32.

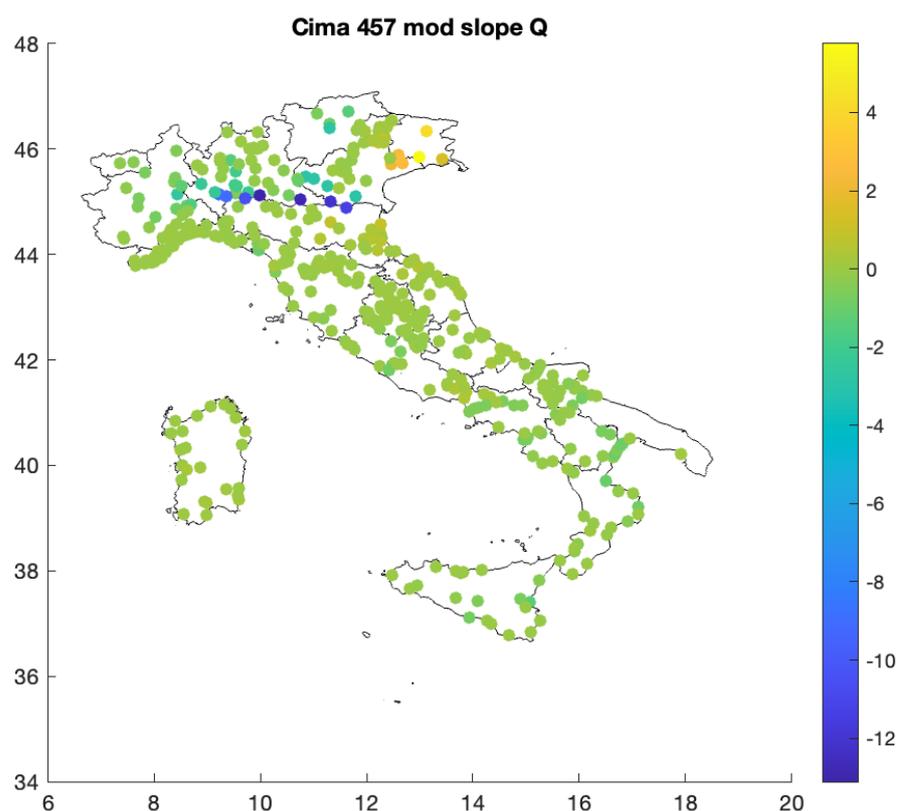


Figura 31: Mappa dell'andamento della portata nelle singole stazioni idrometriche italiane, individuate dalla metodologia CIMA per il terzo Scenario.

Dall'analisi di queste mappe si possono trarre alcune osservazioni. In primo luogo, sembra essere presente una serie di stazioni idrometriche sul bacino del Po che hanno avuto nel tempo un andamento fortemente decrescente in termini di portata. Questa riflessione può essere causata da una serie di errori di misura su quell'asta fluviale, da analizzare nel dettaglio per ottenere una miglior descrizione della distribuzione dei valori sul territorio italiano.

La seconda considerazione che si deduce dall'osservazione delle mappe riportate, principalmente quella dell'andamento dei valori dei tempi di ritorno empirici locali in Figura 32, è che esistano delle zone che si ripetono anche nelle altre mappe prodotte, in cui l'andamento dei tempi di ritorno sembra essere crescente nel tempo; le zone in particolare sono quella del Piemonte Occidentale, un'area compresa tra il Friuli Venezia Giulia e il Trentino, una parte dell'Emilia Romagna occidentale e una porzione del Lazio meridionale e del Nord della Campania. Queste zone, caratterizzate da un andamento crescente, sono anche quelle in cui si sono verificati gli eventi alluvionali più severi nell'intervallo temporale 2008-2019.

Grazie a questa analisi siamo quindi in grado di osservare le zone di una specifica regione o nazione in cui nell'intervallo di tempo selezionato si siano verificati eventi alluvionali contraddistinti da una magnitudine ed una estensione spaziale maggiore.

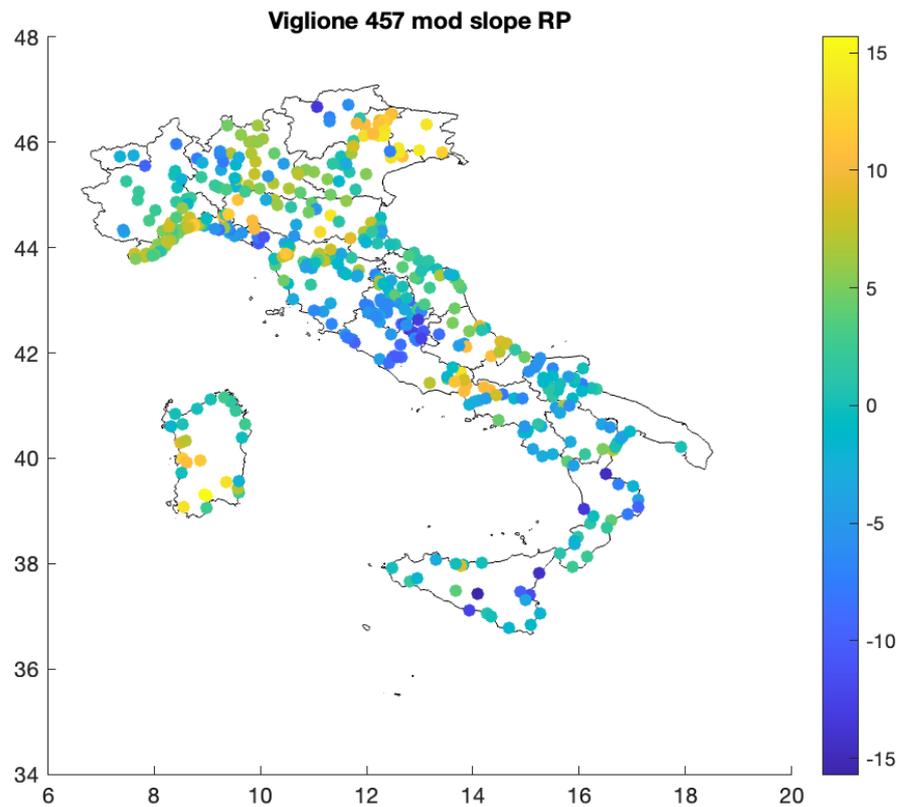


Figura 32: Mappa dell'andamento dei tempi di ritorno nelle singole stazioni idrometriche italiane, individuate dalla metodologia Viglione per il terzo Scenario.

Quest'ultima analisi è stata prodotta per approfondire ulteriormente il tema dell'andamento dei valori che caratterizzano un evento alluvionale come le portate e i tempi di ritorno nelle singole stazioni, in modo da confermare o meno gli studi che sono stati prodotti nei paragrafi precedenti.

6. Conclusioni

L'obiettivo di quest'ultimo capitolo è quello di trarre le fila del lavoro svolto durante la redazione del progetto di Tesi. Il primo obiettivo che mi sono posto nel momento in cui ho iniziato questo percorso con il Professor Alberto Viglione, il Professor Daniele Ganora e tutti i ricercatori della Fondazione CIMA era quello di confrontare diversi modelli che servissero per lo studio della distribuzione spaziale di un insieme di eventi selezionati sul territorio italiano.

Dopo aver applicato le diverse metodologie (Brunner, Cima, Viglione), analizzate nel dettaglio nei capitoli precedenti, mi sono concentrato sui risultati, confrontando le diverse metodologie e analizzandone analogie e differenze. Durante la fase di confronto ho poi esaminato come le diverse metodologie fossero consistenti tra loro nella fase di selezione degli eventi, e con la lista di eventi prodotta durante il periodo di tirocinio alla Fondazione CIMA. Le metodologie più simili tra di loro sono quelle del Professor Viglione e della Fondazione CIMA, che presentano un maggior numero di eventi comuni selezionati in percentuale. Il metodo della Dottoressa Brunner sembra invece distaccarsi maggiormente dagli altri ed essere meno consistente con la lista di eventi prodotta consultando diverse banche dati italiane.

Sono state fatte alcune poi alcune osservazioni sui risultati che sono stati prodotti durante la fase di selezione degli eventi alluvionali distribuiti sul territorio. Il trend dei parametri che caratterizzano l'estensione spaziale di un evento è un aspetto importante da prendere in considerazione, in quanto permette di comprendere come questi fenomeni naturali stiano evolvendo nel tempo. Il trend è stato osservato per tutte e tre le metodologie e identificato come crescente, questo conferma quanto è stato valutato in molti studi europei e non solo, certificando come gli eventi alluvionali stiano diventando nel tempo molto importanti non solamente per aspetti economici, ma anche sociali, in quanto interesseranno nel futuro un numero sempre maggiore di aree e di persone. Questa problematica è spesso legata al fenomeno del cambiamento climatico che ha causato nel tempo una crescita in numero di eventi naturali estremi sul territorio europeo.

Questo studio può essere esteso con la realizzazione diverse implementazioni che permettono di descrivere in modo più approfondito il problema. Ad esempio, potrebbe essere utilizzato per confermare il verificarsi di eventi alluvionali maggiormente estesi sui territori del Nord e Centro Italia. Questa ipotesi è stata proposta, dopo aver osservato come impegnando un numero maggiore di stazioni idrometriche che si distribuissero in modo più omogeneo sul

territorio italiano, gli eventi selezionati non variassero secondo l'aspetto qualitativo e quantitativo, evidenziando come gli eventi meno localizzati e con una maggiore severità si verificano nel Nord e nel Centro Italia, dove sono presenti i bacini più rilevanti sotto l'aspetto idraulico.

La seconda osservazione che può essere realizzata in studi futuri, è la valutazione delle aree che sono interessate contemporaneamente dallo stesso evento alluvionale, con lo scopo quindi di individuare, anche con l'ausilio di alcune mappe e informazioni satellitari, l'estensione spaziale delle piogge nell'intervallo temporale in cui si è verificato l'evento. In questo modo, impiegando una finestra spaziale mobile sarebbe possibile individuare con maggiore dettaglio la zona o la regione che è stata interessata dallo stesso fenomeno, mentre in questo studio due eventi che si verificano in zone opposte del territorio italiano nello stesso intervallo temporale vengono considerati insieme in un unico macro-evento.

Come ultima implementazione, non per importanza, sottolineo come il ricercatore del Politecnico di Torino Matteo Pesce abbia utilizzato parte di questo studio e di quello del Professor Alberto Viglione, per studiare la relazione tra eventi spazialmente distribuiti e la selezione di eventi idrologici estremi con aspetti morfo climatici. Nello specifico, viene preso in considerazione il caso del Piemonte e delle regioni del Nord-Ovest dell'Italia. In questo studio vengono ripresi quindi sia aspetti idrologici legati all'applicazione della metodologia Viglione per la selezione di eventi estremi distribuiti nello spazio, sia aspetti meteorologici come le precipitazioni che hanno colpito le regioni durante il verificarsi dell'evento. Questo aspetto risulta essere, secondo la mia opinione, molto interessante per studi futuri, considerato il cambiamento climatico che stravolgerà nel tempo i parametri valutati per lo studio dei fenomeni meteo climatici. Proprio riguardo a questo studio, è stato proposto da Matteo Pesce un *abstract*, all'assemblea generale 2021 dell'EGU (*European Geosciences Union*). La proposta di studio è stata accettata e sarà discussa nella sessione di aprile di *Space-time dynamics of floods: processes, controls, and risk*, l'*abstract* che è stato prodotto ed ha partecipato alla selezione è disponibile come Allegato 4.

Allegati

Allegato 1: 145 Stazioni Idrometriche, considerando le portate osservate. 116 eventi selezionati nell'intervallo temporale 2005-2019.

Date	Viglione	Cima	Brunner	Tirocinio	TOT (1-4)
12/11/05	1	0	0	0	1
26/11/05	1	1	1	0	3
04/01/06	1	1	0	0	2
27/02/06	1	1	0	0	2
18/04/06	0	0	1	0	1
20/05/06	0	1	0	0	1
03/07/06	0	0	0	1	1
15/09/06	0	0	1	0	1
09/12/06	0	0	1	0	1
24/11/07	1	1	0	0	2
07/03/08	0	0	1	0	1
23/04/08	0	0	1	0	1
28/05/08	1	1	1	1	4
12/07/08	1	1	0	0	2
10/10/08	0	0	0	1	1
09/11/08	1	1	0	0	2
06/12/08	1	1	1	0	3
14/01/09	1	1	0	0	2
03/02/09	1	1	0	0	2
01/03/09	1	1	1	0	3
20/04/09	1	1	0	0	2
26/05/09	1	1	0	0	2
07/07/09	0	0	0	1	1
18/07/09	0	0	1	0	1
01/09/09	0	1	1	0	2
01/10/09	0	0	0	1	1
07/12/09	1	1	0	0	2
30/12/09	1	1	1	0	3
20/02/10	1	1	1	0	3
29/03/10	1	0	1	0	2
11/05/10	1	0	1	0	2
16/06/10	1	1	1	0	3
15/08/10	0	1	1	0	2
09/09/10	0	0	0	1	1
04/10/10	0	0	0	1	1

01/11/10	0	1	0	1	2
07/11/10	1	1	1	0	3
26/11/10	1	0	0	0	1
03/12/10	1	1	1	0	3
19/12/10	1	1	0	0	2
19/02/11	1	0	1	0	2
01/03/11	1	1	0	1	3
16/03/11	1	1	1	0	3
17/05/11	0	1	0	0	1
19/06/11	0	0	1	0	1
19/09/11	0	0	1	0	1
05/11/11	1	1	0	1	3
22/11/11	0	0	0	1	1
04/08/12	0	0	0	1	1
07/11/12	1	1	1	1	4
28/11/12	0	1	0	0	1
08/12/12	0	0	1	0	1
15/12/12	0	0	1	0	1
21/01/13	1	1	1	0	3
12/03/13	1	1	0	0	2
05/04/13	0	1	0	0	1
27/04/13	1	0	1	0	2
17/05/13	1	1	1	0	3
24/06/13	0	0	0	1	1
08/08/13	0	0	1	0	1
21/09/13	0	0	0	1	1
04/10/13	0	0	0	1	1
27/10/13	1	0	0	0	1
16/11/13	1	1	0	1	3
01/12/13	1	1	0	1	3
21/12/13	1	0	0	0	1
31/12/13	1	1	0	0	2
05/01/14	0	1	1	1	3
17/01/14	0	1	0	0	1
30/01/14	0	1	0	0	1
11/02/14	1	1	0	0	2
05/03/14	0	1	0	0	1
03/05/14	1	1	1	1	4
08/07/14	1	0	1	0	2
07/08/14	1	0	1	0	2
05/09/14	0	0	0	1	1
12/10/14	0	0	0	1	1
12/11/14	1	1	0	1	3

01/12/14	0	1	0	0	1
30/01/15	1	1	1	0	3
25/02/15	1	1	0	1	3
26/03/15	1	1	1	0	3
23/05/15	1	1	1	0	3
13/09/15	0	0	0	1	1
14/10/15	0	0	0	1	1
11/01/16	0	0	1	0	1
23/02/16	1	1	0	0	2
29/02/16	0	1	0	0	1
24/04/16	0	0	1	0	1
20/05/16	0	0	1	0	1
17/06/16	0	0	1	0	1
09/09/16	0	0	0	1	1
13/11/16	1	0	1	0	2
24/11/16	1	1	0	1	3
31/01/17	1	0	0	0	1
07/06/17	0	0	1	0	1
01/07/17	0	0	1	0	1
09/09/17	0	0	0	1	1
15/11/17	0	0	1	0	1
30/11/17	0	0	1	0	1
10/12/17	1	0	1	1	3
09/01/18	0	0	1	0	1
14/03/18	1	1	0	0	2
12/04/18	0	0	1	0	1
07/05/18	1	1	1	0	3
02/06/18	1	1	1	0	3
04/10/18	0	0	0	1	1
28/10/18	0	1	1	1	3
03/11/18	1	0	0	1	2
20/11/18	0	1	1	0	2
30/01/19	1	1	1	1	4
14/05/19	0	0	1	0	1
01/06/19	1	0	1	1	3
12/06/19	0	1	1	0	2
27/06/19	0	0	1	0	1
12/07/19	0	0	1	0	1

Allegato 2:145 Stazioni Idrometriche, considerando le portate modellate. 96 eventi selezionati nell'intervallo temporale 2008-2019.

Data	Viglione	Cima	Brunner	Tirocinio	Somma
10/09/00	0	0	0	1	1
03/07/06	0	0	0	1	1
04/05/08	0	1	0	0	1
28/05/08	1	1	0	1	3
14/09/08	1	0	0	0	1
21/09/08	0	1	0	0	1
10/10/08	0	0	0	1	1
05/11/08	1	1	0	0	2
01/12/08	0	1	0	0	1
08/12/08	1	1	0	0	2
27/12/08	0	0	1	0	1
27/01/09	1	1	0	0	2
03/02/09	1	0	0	0	1
27/04/09	1	1	0	0	2
07/07/09	0	0	0	1	1
01/10/09	0	0	0	1	1
07/12/09	1	0	0	0	1
25/12/09	0	1	1	0	2
31/12/09	1	1	0	0	2
03/03/10	1	0	1	0	2
23/04/10	0	0	1	0	1
11/05/10	1	1	1	0	3
16/06/10	0	0	1	0	1
22/08/10	1	1	1	0	3
09/09/10	0	0	0	1	1
04/10/10	0	0	0	1	1
01/11/10	1	1	1	1	4
24/11/10	1	1	0	0	2
28/12/10	1	0	1	0	2
01/03/11	1	1	1	0	3
01/05/11	0	0	1	0	1
09/06/11	1	0	1	0	2
01/11/11	1	1	0	1	3
22/11/11	0	0	0	1	1
20/04/12	0	0	1	0	1
04/08/12	0	0	0	1	1
11/11/12	1	1	1	1	4
23/11/12	1	1	0	0	2

09/12/12	0	0	1	0	1
18/01/13	0	0	1	0	1
12/03/13	1	0	0	0	1
17/05/13	1	1	0	1	3
24/06/13	0	0	0	1	1
21/09/13	0	0	0	1	1
04/10/13	0	0	0	1	1
13/11/13	1	1	0	1	3
18/11/13	0	0	0	1	1
01/12/13	0	1	0	1	2
02/01/14	1	1	0	1	3
19/01/14	0	1	0	0	1
31/01/14	0	1	0	0	1
07/02/14	1	1	0	0	2
03/05/14	1	0	0	1	2
07/07/14	1	1	0	0	2
31/07/14	0	0	1	0	1
05/09/14	0	0	0	1	1
12/10/14	0	0	1	1	2
12/11/14	1	1	0	1	3
30/01/15	1	0	0	0	1
25/02/15	0	0	0	1	1
01/03/15	1	0	0	0	1
25/03/15	1	0	0	0	1
13/09/15	1	1	0	1	3
14/10/15	1	1	0	1	3
29/02/16	1	1	1	0	3
17/03/16	0	0	1	0	1
09/09/16	0	0	0	1	1
06/11/16	0	1	1	0	2
24/11/16	1	1	1	1	4
31/01/17	1	0	0	0	1
28/04/17	0	1	1	0	2
30/06/17	0	1	1	0	2
09/09/17	0	0	0	1	1
14/11/17	1	1	1	0	3
12/12/17	1	1	1	1	4
28/12/17	0	0	1	0	1
09/01/18	0	0	1	0	1
17/01/18	0	1	1	0	2
03/02/18	0	1	1	0	2
23/02/18	0	0	1	0	1
12/03/18	1	0	1	0	2

21/03/18	0	0	1	0	1
15/04/18	1	0	1	0	2
02/09/18	0	0	1	0	1
22/09/18	0	0	1	0	1
04/10/18	0	0	0	1	1
18/10/18	0	0	1	0	1
28/10/18	1	1	1	1	4
03/11/18	0	0	0	1	1
20/11/18	0	1	1	0	2
18/12/18	0	1	1	0	2
30/01/19	1	1	1	1	4
25/03/19	0	0	1	0	1
02/04/19	1	0	1	0	2
24/04/19	1	1	1	0	3
13/05/19	1	1	1	0	3

Allegato 3: 457 Stazioni Idrometriche, considerando le portate modellate. 102 eventi selezionati nell'intervallo temporale 2008-2019.

Date	Viglione	Cima	Brunner	Tirocinio	Somma (1-4)
10/09/00	0	0	0	1	1
03/07/06	0	0	0	1	1
24/05/08	1	0	0	1	2
24/09/08	0	0	1	0	1
10/10/08	0	0	1	1	2
06/11/08	1	1	1	0	3
01/12/08	1	1	0	0	2
03/01/09	0	1	0	0	1
20/01/09	1	1	0	0	2
03/02/09	1	1	1	0	3
07/03/09	1	1	1	0	3
22/04/09	1	1	0	0	2
09/05/09	0	0	1	0	1
26/05/09	0	0	1	0	1
07/07/09	0	0	0	1	1
17/08/09	0	0	1	0	1
24/09/09	1	1	1	1	4
29/10/09	1	0	0	0	1
22/12/09	0	1	0	0	1
01/01/10	1	1	0	0	2
03/03/10	1	0	0	0	1
09/04/10	0	0	1	0	1
11/05/10	1	0	0	0	1
16/06/10	0	0	1	0	1
31/07/10	0	0	1	0	1
16/08/10	0	0	1	0	1
29/08/10	0	0	1	0	1
09/09/10	0	0	0	1	1
04/10/10	0	0	1	1	2
19/10/10	0	0	1	0	1
01/11/10	1	1	1	1	4
26/11/10	1	1	1	0	3
15/12/10	0	0	1	0	1
24/12/10	0	0	1	0	1
02/02/11	0	0	1	0	1
02/03/11	1	1	1	1	4
28/04/11	0	0	1	0	1

01/05/11	0	0	1	0	1
08/06/11	0	0	1	0	1
30/06/11	0	0	1	0	1
06/09/11	0	0	1	0	1
01/11/11	1	1	1	1	4
22/11/11	0	0	0	1	1
29/02/12	1	1	1	0	3
22/04/12	1	1	1	0	3
04/08/12	0	0	0	1	1
11/11/12	1	1	0	1	3
04/12/12	1	1	0	0	2
19/01/13	1	1	0	0	2
12/03/13	1	0	0	0	1
16/05/13	1	0	0	1	2
24/06/13	0	0	0	1	1
21/09/13	0	0	0	1	1
04/10/13	0	0	0	1	1
11/11/13	0	1	0	1	2
16/11/13	1	0	0	1	2
01/12/13	1	1	0	1	3
25/12/13	0	1	0	1	2
26/01/14	1	1	0	0	2
03/05/14	0	0	0	1	1
30/06/14	0	1	0	0	1
07/07/14	1	0	0	0	1
05/09/14	0	0	0	1	1
12/10/14	0	0	0	1	1
12/11/14	1	1	0	1	3
30/01/15	1	1	0	0	2
25/02/15	1	0	0	1	2
24/03/15	1	0	0	0	1
13/09/15	0	0	0	1	1
14/10/15	1	1	1	0	3
26/10/15	1	1	0	0	2
27/11/15	0	1	0	0	1
29/02/16	0	1	0	0	1
13/03/16	1	1	0	0	2
09/09/16	0	0	0	1	1
19/11/16	1	1	0	1	3
22/01/17	1	1	0	0	2
28/04/17	1	1	0	0	2
29/06/17	0	1	0	0	1
09/09/17	0	0	0	1	1

15/11/17	1	1	0	0	2
10/12/17	1	1	0	1	3
09/01/18	0	0	1	0	1
18/01/18	0	0	1	0	1
03/02/18	0	0	1	0	1
14/03/18	1	0	0	0	1
07/04/18	0	0	1	0	1
20/04/18	0	0	1	0	1
08/05/18	1	1	0	0	2
22/08/18	0	0	1	0	1
01/09/18	0	0	1	0	1
18/09/18	0	0	1	0	1
05/10/18	0	1	0	1	2
28/10/18	1	0	1	1	3
03/11/18	0	0	0	1	1
24/11/18	0	1	1	0	2
18/12/18	0	1	1	0	2
30/01/19	1	1	1	1	4
03/04/19	0	0	1	0	1
29/04/19	1	1	0	0	2
13/05/19	1	1	1	0	3
29/05/19	0	0	1	1	2

Allegato 4:

Identification of meteo-hydrological extreme events at the regional scale: the Northwestern Italy case study

Abstract.

Extreme value theory (EVT) is commonly applied in hydrology to study extreme events. The univariate approach has been widely used in literature on this topic, but this limits the analysis to single sites. A more recent approach considers multivariate techniques applied to larger datasets, to detect the spatial structure of these events. However, how to properly define events and which variables should be considered for their identification and characterization in a regional domain is still a matter of debate. Moreover, recent studies have pointed out the increasing need of establishing connections between the different processes entering the hydrological cycle at larger spatial scales, especially in the context of global climate change. This work presents a non-parametric method for extracting the largest hydrological events occurring over the Northwestern Italy in the last decades and correlates them to spatially averaged extreme climate indices (ETCCDI). In particular, the extraction of extreme hydrological events started from the calculation of the empirical non-exceedance probability of the daily runoff values, at each station of the stream gauge network, and of a corresponding empirical return time. Then, a daily regional return time was determined by averaging the return time values over all stations for each day, with a sliding time window and site-related weights. Finally, the local maxima of the regional return time were extracted by intersecting the signal with a filter of the return time itself and the largest annual event was considered for each year. The spatial dependence of these events was analysed by extracting the local maximum discharge values at each station, corresponding to the occurrence of the maximum regional return times. A correlation with regional values of the ETCCDI indices was also performed to get some insights on the meteorological extremes playing a role in the formation of floods. Results show a rank of the extracted events for the study area and some considerations on their relative impact in terms of damage are provided. This gives an indication of the long-term variability of extreme events at the regional scale.

Bibliografia

- Berghuijs, W. R., Allen, S. T., Harrigan, S., & Kirchner, J. W. (2019). Growing spatial scales of synchronous river flooding in Europe. *Geophysical Research Letters*, *46*, 1423–1428.
- Braca, G., Bussetini, M., Lastoria, B., & Marianini, S. (2013), *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici*, ISPRA.
- Brunner, M. I., Furrer, R., & Favre, A.-C. (2019). Modeling the spatial dependence of floods using the Fisher copula. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*, 107–124.
- Brunner, M. I., & Gilleland, E. (2020). Stochastic simulation of streamflow and spatial extremes: a continuous, wavelet-based approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. Discussion, under review.
- Honda, Y., Kundzewicz, Z.W., Arnell, N., Benito, G., Hatfield, J., Mohamed, I.F., Peduzzi, P., Wu, S., Sherstyukov, B., Takahashi, K., & Yan, Z. (2012). Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., & Midgley, P.M. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (pp. 231-290). Cambridge, UK: Cambridge University Press, UK.
- Kundzewicz, Z. (2015). Climate change track in river floods in Europe. In Cudennec, C., Eicker, A., Pilon, P., Stoffel, M., Viglione, A., & Xu, Z. (Eds). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences: Vol.369* (pp.189-194). Prague, Czech Republic.
- Mangini, W., Viglione, A., Hall, J., Hundecha, Y., Ceola, S., Montanari, A., Rogger, M., Luis Salinas, L., Borzì, J., & Parajka, J. (2018). Detection of trends in magnitude and frequency of flood peaks across Europe. *Hydrological Sciences Journal*, *63:4*, 493-512.

Silvestro, F., Gabellani, S., Delogu, F., Rudari, R., & Boni, G. (2013). Exploiting remote sensing land surface temperature in distributed hydrological modelling: the example of the Continuum model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 39–62.

Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio* - Edizione 2018. ISPRA, Rapporti 287/2018.

Zbigniew W. Kundzewicz, Iwona Pińskwar, G. Robert Brakenridge. (2018). Changes in river flood hazard in Europe: a review. *Hydrology Research*, 49 (2), 294–302.

Sitografia

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2015). The human cost of natural disasters. A global perspective. Disponibile presso:

<https://reliefweb.int/report/world/human-cost-natural-disasters-2015-global-perspective>

Corte dei Conti Europea. (2018). Direttiva Alluvioni: progressi nella valutazione dei rischi, ma occorre migliorare la pianificazione e l'attuazione. *Direttiva Alluvioni n.25*. Disponibile presso:

<https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/floods-directive-25-2018/it/#chapter0>

Decreto Legislativo n.49 del 23 febbraio 2010. Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni. Gazzetta Ufficiale n.77 del 2 Aprile 2010. Disponibile presso: <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10049dl.htm>

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri n.180 del 29 settembre 1998. Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania. Gazzetta Ufficiale n.134 del 11 giugno 1998. Disponibile presso: <https://www.parlamento.it/parlam/leggi/decreti/98180d.htm>

Sito European Environment Agency:

<https://www.eea.europa.eu/>

Sito Fondazione di Ricerca CIMA:

<https://www.cimafoundation.org/>

Sito progetto CNR-POLARIS, redatto dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) e dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR):

<http://polaris.irpi.cnr.it/>

Sito Protezione Civile Italiana:

<http://www.protezionecivile.gov.it/>