



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali  
DICAM

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO  
Protezione del suolo e del territorio

**Studio idrologico e idraulico per l'aggiornamento e l'avanzamento  
del progetto della cassa di espansione "Secchezza" nel comune di  
Alfonsine (RA)**

Tesi di laurea in

Costruzioni idrauliche e Protezioni Idrauliche del Territorio M

**Relatore**

*Chiar.mo Prof. Ing. Alberto Montanari*

**Laureanda**

*Marika Mazzoni*

**Correlatore**

*Dott. Ing. Andrea Magnini*

*Ing. Alberto Zaffagnini*



*Si desidera ringraziare  
l'Ing. Paola Silvagni, l'Ing. Alberto Zaffagnin e l'Ing. Ilaria Filippi  
del Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale di Lugo,  
per la disponibilità con cui hanno contribuito a questa ricerca.*



# Indice

Introduzione .....	7
<b>Capitolo 1: Premessa .....</b>	<b>10</b>
1.1 Descrizione del problema.....	11
1.2 Inquadramento del territorio .....	13
<b>Capitolo 2: Raccolta ed analisi dei dati.....</b>	<b>15</b>
2.1 Ricerca dei dati.....	15
2.2 Stazioni pluviometriche .....	18
2.3 Dati di precipitazione .....	20
<b>Capitolo 3: Analisi idrologica.....</b>	<b>20</b>
3.1 Analisi locale di frequenza delle precipitazioni .....	22
3.2 Determinazione delle curve di possibilità pluviometrica.....	24
3.3 Coefficiente di ragguglio areale delle piogge.....	27
<b>Capitolo 4: Trasformazione afflussi-deflussi .....</b>	<b>31</b>
4.1 Uso del suolo.....	33
4.2 Coefficiente di deflusso .....	34
4.3 Calcolo della pioggia lorda .....	34
4.4 Calcolo del tempo di corrivazione del bacino.....	36
4.5 Modello dell'invaso lineare .....	39
<b>Capitolo 5: Analisi regionale di frequenza delle precipitazioni .....</b>	<b>44</b>
5.1 Metodo della pioggia indice mediante l'approccio di J.R.M. Hosking e J.R. Wallis .....	47
5.2 Metodo di regionalizzazione basato su <i>patched Kriging</i> .....	52
5.3 Confronto dei risultati di regionalizzazione delle piogge .....	55
<b>Capitolo 6: Calcolo del volume della cassa di espansione .....</b>	<b>58</b>
<b>Capitolo 7: Conclusioni .....</b>	<b>61</b>
7.1 Considerazioni finali .....	63
Allegato I: Dataset pluviografi.....	64

Allegato II: Uso del suolo .....	68
Allegato III: Codice di calcolo R.....	69
<b>Bibliografia .....</b>	<b>72</b>

# Introduzione

La presente tesi ha riguardato l'analisi idrologica e idraulica del fiume Secchezza nel comune di Alfonsine (RA) con lo scopo di revisionare il già esistente progetto della cassa di espansione realizzato nel 1996, con l'obiettivo di aggiornare i cambiamenti avvenuti necessariamente a distanza di 30 anni. L'elaborato nasce come lavoro conclusivo dell'attività di tirocinio svolto presso il Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, con sede a Lugo di Romagna (RA), nel periodo compreso tra ottobre 2023 e febbraio 2024.

Per la progettazione di opere idrauliche e la mitigazione del rischio idrogeologico, è necessario stimare il regime dei deflussi fluviali. In particolare, nel caso in esame la conoscenza del regime di portata è necessario per la stima del volume idrico invasato nella cassa di espansione.

Una delle vie per la stima del deflusso fluviale è la sua modellazione. Il deflusso fluviale, ovvero la portata di un corso d'acqua, è generato da un complesso sistema di fenomeni naturali, che costituiscono il cosiddetto ciclo idrologico, la cui completa comprensione e rappresentazione risulta piuttosto complessa. Infatti, la conoscenza dei processi fisici che danno origine agli eventi osservati, presentano numerosi fonti di incertezza, non permettendo la valutazione della portata di piena con approcci di tipo *deterministico*. Di conseguenza, risulta necessario ricorrere ad un *approccio probabilistico* e le grandezze idrologiche che descrivono l'insieme dei processi, responsabili della formazione dei deflussi e quindi della portata in alveo, vengono schematizzate come variabili aleatorie. La valutazione delle variabili idrologiche di progetto, pertanto, si traduce nell'applicazione della cosiddetta analisi di frequenza, che consente di stimare le grandezze di interesse e di quantificarne l'incertezza di stima sulla base delle osservazioni storiche disponibili. In questo modo è possibile determinare la portata di progetto, ovvero la portata massima al colmo di piena con assegnata probabilità di superamento.

Esistono numerosi approcci per la risoluzione di questo problema e vengono classificati in metodi diretti e indiretti. I *metodi diretti* consentono di determinare la portata di progetto sulla base dell'analisi delle osservazioni idrometriche disponibili nella sezione fluviale di interesse, o in altre sezioni di chiusura di bacini idrografici appartenenti alla medesima regione idrologica di quello preso in esame. I *metodi indiretti* invece, consentono di determinare la portata di progetto a partire dall'analisi statistica delle precipitazioni che investono il bacino idrografico sotteso dalla sezione fluviale di interesse. La scelta del metodo da adottare è fortemente condizionata dalla natura e dalla consistenza dei dati storici di osservazioni idrometriche e pluviometriche disponibili. Nel caso in cui per l'assegnata sezione siano disponibili osservazioni per un periodo di tempo sufficientemente

lungo si ricorre ai *metodi di analisi locale di frequenza*. Tali metodi diretti consistono nell'identificazione mediante tecniche di inferenza statistica della distribuzione di probabilità più adatta a rappresentare le osservazioni disponibili.

Tuttavia, risulta molto frequente il caso in cui sia necessario stimare la portata di progetto in sezioni fluviali del tutto prive di osservazioni o per le quali i dati osservati siano presenti in numero insufficiente a garantire una stima affidabile della portata di progetto. In questo caso è possibile ricorrere ai metodi di regionalizzazione dell'informazione idrometrica, ovvero alla cosiddetta analisi regionale di frequenza delle piene (RFFA; Regional Flood Frequency Analysis). Questi metodi si basano sulla sostituzione dello spazio con il tempo, in modo tale da ovviare la limitatezza nel tempo dell'informazione idrometrica disponibile, ampliando l'orizzonte di interesse nello spazio (v. ad es. Hosking e Wallis 1997).

Questi metodi si basano sulla ricerca e sull'individuazione di bacini idrografici che abbiano caratteristiche e proprietà statistiche comuni, in particolare si assume che bacini considerati idrologicamente affini siano descritti da una stessa distribuzione di frequenza delle portate di piena (indicati in letteratura anche come regioni o zone idrologicamente omogenee).

Il lavoro di Tesi che è illustrato nel presente elaborato, riguarda le verifiche idrologiche-idrauliche del fiume Secchezzo per la determinazione del volume della cassa di laminazione e si articola nel seguente modo.

Nel *primo capitolo* vengono descritti le problematiche della zona di interesse e le motivazioni che hanno portato alla progettazione e in seguito alla realizzazione della cassa di espansione. Il *secondo capitolo*, perciò, ha l'obiettivo di individuare tutti i dati necessari per il calcolo delle portate al colmo degli idrogrammi relativi a tempi di ritorno assegnati, mediante la raccolta e l'analisi delle serie storiche di precipitazioni registrate all'interno dei bacini nelle stazioni pluviometriche di interesse. Nel *terzo capitolo* viene fatta l'analisi idrologica mediante l'elaborazione statistica delle precipitazioni tramite la distribuzione di Gumbel, grazie alla quale sono state ricavate le curve di possibilità pluviometrica. Nel *quarto capitolo* viene illustrato il metodo utilizzato, in particolare il metodo dell'invaso lineare mediante la trasformazione afflussi-deflussi. Parallelamente a questo, nel *quinto capitolo* viene adottato un secondo metodo, in particolare quello di regionalizzazione per poter avere un confronto con i dati ottenuti con il precedente metodo. Infine, nel *sesto e settimo capitolo* vengono presentati e discussi i risultati ottenuti dalle diverse applicazioni con i due approcci utilizzati.



# Capitolo 1: Premessa

*Il rischio idrogeologico è un'emergenza a livello globale, strettamente connessa con sviluppo urbanistico e cambiamenti climatici. In Italia interessa quasi il 94% dei comuni mentre più di 8 milioni di persone abitano in aree ad alta pericolosità. L'urbanizzazione degli ultimi secoli ha contribuito ad incrementare gli elementi esposti e, conseguentemente, il potenziale danno derivante da un evento naturale (ENEA, 2020).*

Infatti, lo sviluppo delle attività industriali ed artigianali instauratesi in prossimità dei principali centri abitati della pianura, l'estensione delle aree residenziali, il conseguente aumento delle superfici impermeabilizzate, l'abbandono della manutenzione della rete idraulica privata e la trasformazione agricola del suolo, finalizzata a consentire la coltivazione meccanizzata dei terreni, hanno portato a trasformazioni economico-sociali, avvenute non sempre in armonia ed in equilibrio con le esigenze di difesa del suolo, ma spesso hanno contribuito ad innescare un processo di dissesto idrogeologico e l'impoverimento paesaggistico-naturalistico, oggi sempre più evidente. Il risultato è un territorio con una sicurezza idraulica notevolmente ridotta, nel quale sono assenti interventi di mitigazione e di riequilibrio ecologico.

In particolare, riguardo alla sicurezza idraulica si rileva che la rete scolante era stata dimensionata per dare sicurezza ad un territorio molto meno vulnerabile di quello attuale, per il quale danni da eventuale sommersione erano giudicati più che tollerabili; oggi il concetto di "rischio idraulico tollerabile" tende sempre più ad identificarsi con le catastrofi naturali, in quanto le attività produttive presenti sul territorio non sono più disponibili ad accettare alcun rischio di sommersione.

Nello specifico, il territorio Romagnolo negli ultimi anni è stato oggetto di numerose e devastanti alluvioni, che hanno portato alla luce l'estrema vulnerabilità del territorio.

In particolare, si ricorda quella del 7-8 ottobre 1996, dove piogge di eccezionale intensità, causarono le rotture di molti tratti arginali di diversi fiumi, provocando l'allagamento di una superficie di circa 1440 kmq di terreno, con conseguenze drammatiche che coinvolsero circa 40.000 abitanti delle provincie di Ravenna e Forlì.

Successivamente si ricorda l'evento del 21 settembre 2016, nel quale, un evento meteo breve, violento e di notevole intensità, si è abbattuto su un territorio di circa 5000 Ha, nello specifico nei comuni di Fusignano, frazioni di Rossetta, San Savino, Maiano Monti e di Bagnacavallo, frazioni di Villa Prati e Boncellino, dove è la rete artificiale di bonifica a farsi carico dello smaltimento di tutte le acque meteoriche fino al recettore finale (il Mar Adriatico). Questo ha fatto sì che il territorio

colpito da queste piogge eccezionali, riconducibili ad eventi con tempo di ritorno  $\geq 200$  anni, si comportasse da cassa di laminazione.

Infine, si ricorda l'alluvione che nel maggio del 2023 ha coinvolto 41 comuni in Emilia-Romagna, causato l'esondazione di 23 fiumi, 65.598 frane e 1.950 infrastrutture stradali coinvolte da dissesto. L'intensità e la vastità del territorio interessato, non ha precedenti nel passato, come descrivono li esperti Armando Brath (Università di Bologna), Nicola Casagli (Università di Firenze), Marzo Marani (Università di Padova), Paola Mercogliano (Cmcc, Centro euro-mediterraneo sui cambiamenti climatici), Renzo Motta (Università di Torino) nel Rapporto Commissione tecnico-scientifica: "In Emilia-Romagna evento senza precedenti". Come viene descritto nel documento, nelle esondazioni più significative, l'evento ha tempo di ritorno superiori ai 500 anni. I principali bacini coinvolti sono quelli del Senio, Lamone e Montone, che hanno un ruolo decisivo sulla rete di bonifica e sul Canale Emiliano-Romagnolo, che ha inciso sulla dinamica di propagazione delle inondazioni. Nello specifico l'evento riguarda due range temporali distinti: quello del 2-3 maggio e quello del 16-17 maggio, per questo motivo i terreni erano già saturi e impermeabilizzati, non riuscendo a ricevere più acqua. Gli esiti dello studio hanno portato alla conclusione che è necessaria una gestione territoriale basata sulla combinazione di interventi non strutturali e strutturali. Tra gli interventi strutturali sono proposte opere di laminazione delle piene. Infatti, le casse d'espansione rientrano tra i sistemi che consentono di invasare temporaneamente volumi d'acqua, anche rilevanti, in rapporto al volume di piena per restituirli successivamente, ottenendo così un'attenuazione e un ritardo del valore del colmo.

La seguente Tesi ha lo scopo di aggiornare la relazione idraulica che era stata eseguita nel 1996 dal Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, dall' Ing. Ezio Cangini, per fornire un'analisi aggiornata, in considerazione dei cambiamenti climatici e del possibile cambiamento dell'uso del suolo dell'area di interesse, che sono avvenuti a distanza di 30 anni dalla realizzazione dei due elaborati, inoltre, sono stati utilizzati dei metodi e delle accortezze più recenti per affrontare i calcoli.

## **1.1 Descrizione del problema**

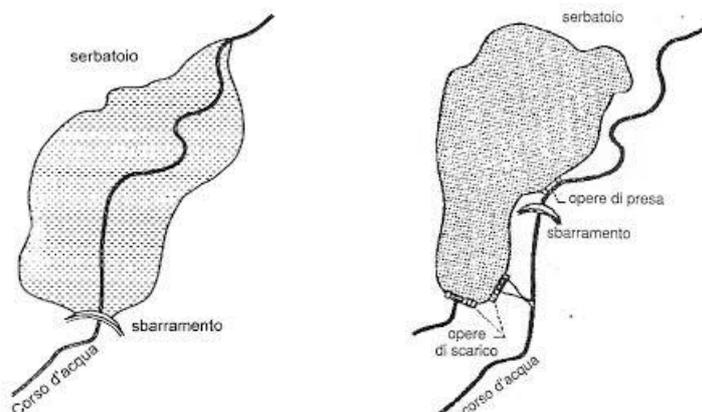
Oltre ai problemi di cui sopra, dal 1996 ad oggi la situazione morfologica del terreno in ordine e pendenze idrauliche di scolo disponibili rispetto al medio mare (subsidenza) e all'aumento percentuale delle aree impermeabili (antropizzazione) si è decisamente modificata.

Ciò ha comportato da un lato una diminuzione dell'efficienza idraulica del Canale di Bonifica in destra di Reno (amplificata peraltro dal progressivo interrimento dell'alveo stesso) e dall'altro un aumento delle portate da smaltire.

In ordine a questi fenomeni già da tempo è stata segnalata la necessità di intervenire sul collettore principale che provvede al frazionamento di tutte le acque del comprensorio di pianura verso il mare, attraverso una rimessa in sagoma dello stesso alla sezione originarie.

Ma, per far fronte agli incrementi di portata dovuti al fenomeno antropico, essendo improponibile in termini di costi provvedere ad un generale risizionamento e/o adeguamento dei cavi di bonifica e ad un allargamento del Canale di destra di Reno, l'unica possibilità, al fine di limitare in caso di piogge rilevanti l'afflusso di acqua al collettore principale, risulta quella di procedere alla costruzione a presidio delle varie aree ad esso afferenti di *casse di espansione* destinate a laminare la crescente portate di cui sopra si è discusso.

Le casse di espansione sono quindi, opere di accumulo dei volumi idrici comprendenti manufatti idraulici di imbocco e di sbocco che consentono di ottenere la riduzione della portata di colmo di un'onda di piena attraverso il temporaneo invaso di parte del suo volume. I fattori che influiscono su questo fenomeno sono la capacità della cassa, le caratteristiche geometriche e quelle idrauliche dei manufatti di alimentazione e di scarico. Le casse possono essere classificate in due categorie: in *linea* e in *derivazione*, rappresentate come mostra la figura 1.1



**Figura 1.1: Schemi di casse in linea a destra e casse in derivazione a sinistra (Adami 1998)**

Le prime sfruttano il volume ottenuto dal rigurgito provocato da un'opera trasversale realizzata in alveo, in genere una briglia o una traversa munita di luci a stramazzo o a battente che controllano la portata effluente in funzione del livello nella cassa, garantendo un funzionamento semplice ed affidabile.

Le casse in derivazione consentono di ottenere una più efficace laminazione dell'idrogramma di piena a parità di volume invasato, sfruttando porzioni di territorio che si sviluppino parallelamente all'alveo, alle quali sono idraulicamente connesse attraverso soglie tracimabili, sifoni od altri sistemi idraulici collocati nel corpo dell'argine fluviale. Questi manufatti vengono progettati in modo da garantire da un lato un valore accettabile della frequenza in corrispondenza della quale la cassa viene interessata dalle piene e dall'altro che la portata massima che defluisce a valle dell'opera non superi quella ritenuta accettabile per l'alveo, in questo modo, l'invaso viene allagata soltanto quando nel corso di una piena la portata supera il prefissato valore soglia.

Per il caso studio è stata prevista la costruzione di una cassa di espansione in derivazione la cui localizzazione, nell'area del "Secchezza", permetterà nel contempo sia di laminare le piene delle cosiddette acque esterne "acque alte", vettorate dal complesso Arginello-Tratturo-Canal Vela, sia di laminare le portate affluenti all'impianto idrovoro Tratturo nel caso di verificarsi eventi di pioggia eccezionali tali da rendere insufficiente la capacità di smaltimento dell'impianto idrovoro stesso.

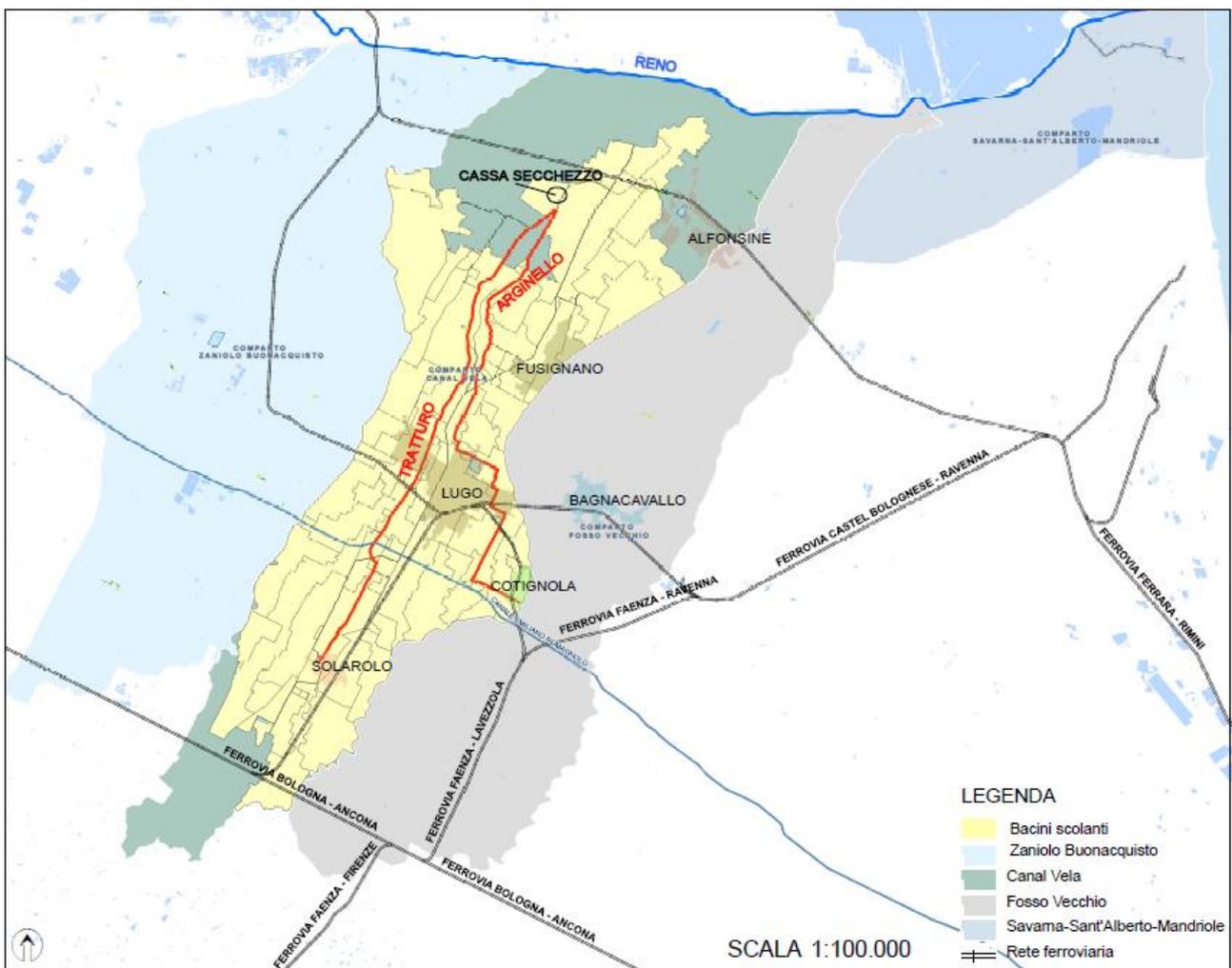
## **1.2 Inquadramento del territorio**

L'ambito di pianura del comprensorio consortile si estende per circa 76000 ettari dalla via Emilia al Reno, tra il Sillaro e il Lamone. È suddiviso in quattro comparti idraulici: Zaniolo-Buonacquisto, Canal Vela, Fosso Vecchio e Savarna-Sant'Alberto-Mandriole. Esso coincide con la vasta area il cui il sistema di scolo delle acque meteoriche è costituito esclusivamente da opere artificiali di bonifica in gestione al Consorzio, data la condizione di pensilità, rispetto al piano campagna, dei corsi d'acqua naturali che l'attraversano. Coincide anche con il bacino idrografico del collettore generale della rete scolante consortile, denominato Canale di bonifica in destra di Reno. Il territorio in esame è compreso nell'ambito di pianura del comprensorio consortile in particolare nel comparto del Canal Vela, per gli studi che verranno fatti in seguito, si è preso in considerazione un unico bacino compreso tra il comune di Castel Bolognese e Alfonsine. Il territorio preso in esame ha una dimensione complessiva di circa 176 Ha e comprende 62 sottobacini e i principali bacini scolanti sono l'Arginello e il Tratturo. Le principali caratteristiche dei due corsi d'acqua vengono specificati nella tabella 1.2.1.

	Comparto idraulico	Modalità di scolo	Sezione media [m <sup>2</sup> ]	Lunghezza [m]	Lunghezza [km]
<b>Arginello</b>	CV	Naturale	10,78	20185	20,185
<b>Tratturo</b>	CV	Naturale	15,25	21028	21,028

**Tabella 1.2.1: Caratteristiche principali dei bacini scolanti Arginello e Tratturo**

Nella figura 1.2.1 viene rappresentato il bacino scolante sul territorio con evidenziati alcuni punti di riferimento. In particolare, a sud è presente la rete ferroviaria Bologna-Ancona, a nord è rappresentato il Reno, nonché il collettore della rete scolante, a est il Mare Adriatico. Vengono inoltre mostrati anche i principali centri urbani presenti sul bacino imbrifero, come si può notare non sono particolarmente estesi. Infine, viene rappresentata la possibile posizione della cassa Secchezza sul territorio.



**Figura 1.2.1: estrazione dei bacini scolanti con riferimento alla posizione della cassa di espansione. Dati estratti dal Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale di Lugo (RA)**

## Capitolo 2: Raccolta ed analisi dei dati

Negli ultimi decenni, l'analisi delle precipitazioni è diventata una priorità, per via della crescente consapevolezza dell'innalzamento delle temperature e dei mutamenti climatici globali, con cambiamenti nella frequenza e nell'intensità degli eventi di precipitazione, cambiamenti che possono avere effetti significativi sulle risorse idriche, sull'agricoltura, sull'ambiente e sulla sicurezza delle comunità.

Con il termine "precipitazione" si indica l'afflusso meteorico sia in forma liquida - ovvero pioggia - che solida - in forma di neve, nevischio, grandine - che interessa una località assegnata o una superficie geografica. In genere la precipitazione solida si misura attraverso l'equivalente in forma liquida (Castellarin 2017).

In particolare, riferendosi al caso specifico della pioggia, l'altezza della pioggia si definisce come l'altezza della lama d'acqua che si accumulerebbe in un tempo assegnato su una superficie orizzontale, qualora tutta l'acqua raccolta dalla superficie fosse trattenuta ed in assenza di perdite di ogni tipo e si misura in millimetri su ore. Quando si parla di altezza di precipitazione è dunque necessario specificare sempre l'intervallo di tempo nel quale la precipitazione è caduta.

### 2.1 Ricerca dei dati

Come noto, condizione necessaria all'applicazione di un metodo di analisi stocastico, è la disponibilità di un numeroso campione di valori della grandezza in esame, al fine di poter correttamente operare durante le varie fasi successive.

La raccolta dei dati di precipitazione viene fatta attraverso i *pluviometri* e i *pluviografi*.

Un *pluviometro* è un recipiente cilindrico, nella cui bocca, disposto orizzontalmente, è sistemato un raccoglitore a imbuto. L'acqua si raccoglie sul fondo del pluviometro, quando questo è di dimensioni tali da poter essere agevolmente maneggiato, oppure in un secondo recipiente, più piccolo disposto al suo interno. Lo scopo dell'imbuto è quello di ridurre il più possibile le perdite per evaporazione. A questo scopo il foro, che è coperto da una sottile rete metallica, deve essere il più piccolo possibile. Il pluviometro viene installato ad un'altezza dal suolo di 1.5 m circa in luogo aperto, lontano da alberi e da fabbricati, in modo che la pioggia sia libera di cadere sul ricevitore del pluviometro. Il Servizio Idrografico Italiano, ora confluito nelle Aziende Regionali per la Protezione dell'Ambiente, ha adottato pluviometri con bocca di diametro pari a 0.357 m (corrispondente ad una superficie di un decimo di metro quadrato). Ad ogni litro di acqua raccolta corrispondono così 10

mm di altezza di precipitazione. Per la misura dell'afflusso meteorico nel caso di precipitazioni solide, il pluviometro deve essere riscaldato. Le altezze di precipitazione misurate dai pluviometri classici venivano in molti casi lette una volta al giorno, in genere alle 9.00 del mattino. Tale volume, diviso per la superficie superiore dell'imbuto, è definito altezza di precipitazione ed è espresso, di solito, in mm. Un esempio viene mostrato in figura 2.1.1.

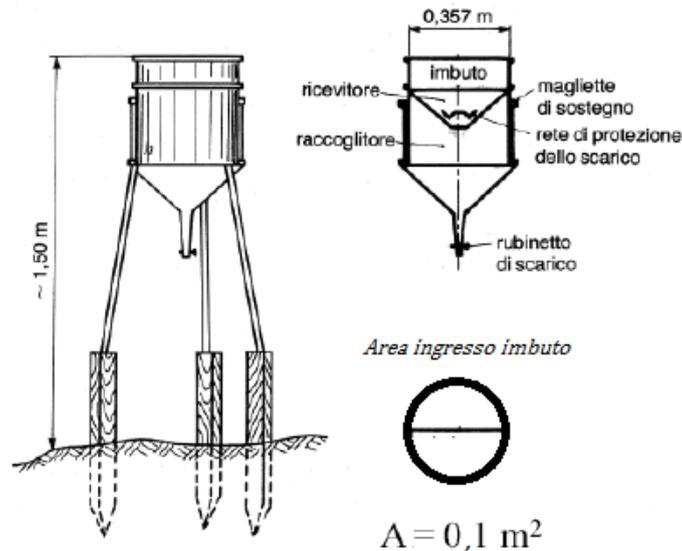


Figura 2.1.1: Schema di una stazione pluviometrica (Manuale del Geologo 2020)

Questo tipo di strumento non permette di registrare l'andamento nel tempo dell'intensità di pioggia e, soprattutto si permette di conoscere solamente le piogge giornaliere, mentre per l'analisi di un bacino di piccole dimensioni è indispensabile conoscere le piogge di durata inferiore alle 24 ore. Vengono usati perciò i dati provenienti dai *pluviografi*, strumenti nei quali l'acqua caduta nell'imbuto aziona una vaschetta basculante che, associata ad uno strumento di registrazione su carta, (o di memorizzazione in continuo su supporti magnetici), consente di conoscere la quantità d'acqua precipitata nell'unità di tempo. Dall'analisi della registrazione si ricavano le altezze di precipitazione con riferimento a durate prefissate: in genere 1h, 3h, 6h, 12h, 24h e con qualche difficoltà per durate inferiori.

I dati delle osservazioni pluviometriche vengono fornite da diverse fonti: osservatori meteorologici e geofisici, società idroelettriche consorzi di bonifica, enti locali e servizi meteorologici e idrografici. Un ente pubblico poi si occupa della raccolta e della pubblicazione dei dati e se gli strumenti vengono gestiti da altri, devono provvedere a trasmettere regolarmente le osservazioni all'ente pubblico.

Il Servizio Idrografico provvedeva in modo sistematico alla pubblicazione dei risultati delle osservazioni, per mezzo dei Bollettini Idrografici, denominati successivamente Annali Idrologici.

Le pubblicazioni periodiche sono iniziate con il 1911 per l'Ufficio Idrografico del R. Magistrato alle acque, con il 1913 per l'Ufficio Idrografico del Po e, infine, con il 1918 per il Servizio Centrale. A partire dal 1951 la pubblicazione delle osservazioni ha assunto la veste tipografica degli Annali Idrologici. Questi risultati erano sottoposti ad un esame critico, con l'intenzione di ricavarne delle conclusioni generali e di fornire già calcolati, tutti gli elementi di uso più frequente nelle ricerche idrografiche. A partire dagli anni '80 circa, il Servizio Idrografico cominciava a registrare un progressivo e generalizzato rallentamento nella pubblicazione degli Annali Idrologici, fino ad arrivare ad una condizione di abbandono, che ha comportato una sua riorganizzazione presso le Regioni al fine di garantire la raccolta sistematica, l'archiviazione e l'elaborazione delle osservazioni e misure, dedicate alla conoscenza dei regimi idrologici.

In Emilia-Romagna viene istituita la struttura tematica ARPA Servizio IdroMeteorologico (ARPA SIM) quando le competenze vengono trasferite dal livello nazionale agli organi regionali. L'Area Idrologia di ARPA SIM svolge le funzioni di monitoraggio quantitativo delle acque meteoriche nelle varie fasi del loro ciclo evolutivo e quindi principalmente delle precipitazioni, dei corsi d'acqua e delle falde acquifere superficiali e profonde che interessano il territorio della Regione Emilia-Romagna. A tale scopo effettua sistematici rilievi idrometrici e misure di portata dei corsi d'acqua; provvede alla raccolta, alla validazione, all'elaborazione dei dati idrologici ed infine alla loro diffusione.

In Emilia-Romagna tutte le osservazioni e misure idrologiche che interessano il proprio territorio vengono estratte sistematicamente dagli Annali Idrologici pubblicati a scala di bacino e sintetizzate in appositi periodici, uguali nella veste tipografica agli stessi Annali, in modo da avere un rapido riferimento delle attività regionali eseguite nel campo del monitoraggio, studio e ricerca da parte dell'Area Idrologia di ARPA SIM.

Il contenuto degli Annali Idrologici durante gli anni si è modificata a causa del cambiamento dell'organizzazione degli Enti, ad oggi (e indicativamente dal 1977 in avanti) esso comprende la parte I che riguarda i valori di termometria e pluviometria, in termini di compendi delle osservazioni e misure effettuate nella Regione Emilia-Romagna, pubblicati a scala di bacino; la parte II comprende l'idrometria, i bilanci idrologici, le scale di deflusso e la torbiometria.

A titolo di esempio vengono riportate in figura 2.1.2 le immagini degli Annali Idrologici consultabili nella I parte sezione B intitolata *pluviometria*, che sono state utilizzate in questo elaborato di Tesi e che identificano a sinistra le precipitazioni di massima intensità registrate ai pluviografi relative a periodi con inizio in un istante qualsiasi di durata di 1, 3, 6, 12, 24 ore, mentre a destra le massime altezze di pioggia annuali per eventi di durata 1, 2, 3, 4, 5 giorni.

Tabella III - Precipitazioni di massima intensità registrate ai pluviografi Anno 2021

Tabella III' - Massime precipitazioni dell'anno per periodi di più giorni consecutivi Anno 2021

BACINO E STAZIONE	INTERVALLO DI ORE											
	1		2		4		12		24			
	mm.	giorno	mm.	giorno	mm.	giorno	mm.	giorno	mm.	giorno	mm.	giorno
Castel del Rio	22,6	6	38,2	6	39,8	6	39,8	6	50,4	6		
Le Taverne	12,4	31	18,4	6	21,8	6	36,6	6	51,4	6		
Borgo Tossignano	33,8	23	37,2	23	37,4	23	37,4	23	37,4	23		
Imola	45,6	30	55,6	30	56,8	30	56,8	30	56,8	30		
Sant'Agata Santeramo	51,0	26	57,0	26	71,0	26	71,2	26	71,2	26		
Bibbiana	24,6	6	38,0	6	39,4	6	37,6	6	38,4	6		
Monte Faggiola	17,4	13	24,0	6	24,6	6	26,8	6	32,6	6		
Palazzuolo sul Senio	44,2	6	54,8	6	55,8	6	55,8	6	72,2	6		
Monte Albano	33,6	31	34,0	31	34,0	31	34,0	31	34,0	31		
Castella Vallesio	40,4	31	40,4	31	40,4	31	40,4	31	40,4	31		
Tebano	27,2	30	39,6	30	40,2	30	40,2	30	40,2	30		
Canale in destra di Reno												
Alfonsine	35,2	21	48,0	26	48,0	26	48,0	26	48,0	26		
Lamone												
Casaglia	36,8	8	47,8	8	50,4	8	50,4	8	54,4	23		
Monte Romano	18,4	8	27,2	6	31,8	6	46,4	6	73,4	6		
Marradi	34,0	8	39,4	8	39,4	8	39,4	23	47,8	23		
Saa Casciano	22,4	13	23,0	13	23,6	7	40,6	6	72,6	6		
Rozzano	23,4	13	24,6	13	25,6	13	26,8	6	42,4	6		
Bisighella - P.ve del Trio	23,4	13	23,4	13	27,4	26	29,2	6	47,6	6		
Modigliana	19,8	13	26,6	26	31,2	6	40,8	7	79,8	6		
Trebbio	17,0	13	26,6	7	42,6	6	52,6	6	94,6	6		
Lodolone	19,6	6	25,4	7	32,4	7	38,8	6	62,6	6		
Canale Corini												
Saa Pancrazio	36,8	26	36,8	26	52,0	26	52,0	26	52,0	26		
Ravenna Urbana	28,2	31	28,2	31	28,8	31	28,8	31	28,8	31		
Marina di Ravenna	31,8	26	31,6	26	42,2	26	42,2	26	42,4	26		
Fiumi Uniti												
Pratacci	36,0	13	46,0	8	51,0	8	51,0	8	90,0	6		
Monte Grosso	22,0	13	25,6	7	46,4	6	58,4	6	105,6	6		
Saa Benedetto in Alpe	22,2	20	29,0	26	29,0	26	29,0	26	29,0	26		
Rocca San Casciano	13,9	1	22,3	7	34,4	7	41,7	7	53,7	7		
Castrocaro	11,0	13	16,2	6	23,2	2	33,6	2	62,6	6		
Pezze Braldo	16,2	13	20,8	30	21,8	30	26,8	2	31,8	6		
Pezze Vico	31,7	26	32,7	26	46,7	26	46,7	26	46,7	26		
Saa Martiano in Strada	19,0	13	21,2	13	28,6	6	39,4	6	65,6	6		
Forlì	17,8	6	18,4	6	22,2	2	29,2	2	43,6	6		
Coccolia	27,7	13	28,3	13	31,4	26	31,4	26	36,6	6		
Cornolo	42,5	26	42,6	26	62,7	7	119,6	7	134,7	6		
Cornolo	18,4	26	34,2	7	49,8	7	68,6	6	111,4	6		

BACINO E STAZIONE	NUMERO DEI GIORNI DEL PERIODO															
	1			2			3			4			5			
	mm.	dal	al	mm.	dal	al	mm.	dal	al	mm.	dal	al	mm.	dal	al	
Castel del Rio	39,8	7	12,8	7	12,8	7	56,4	6	12,8	8	56,4	6	12,8	8	56,4	6
Le Taverne	36,6	7	12,8	7	12,8	8	54,8	6	12,8	8	54,8	6	12,8	8	54,8	6
Borgo Tossignano	37,4	24	40,0	14	15	40,0	14	15	40,0	14	15	40,0	14	15	40,0	14
Imola	56,0	30	56,8	30	56,8	30	56,8	30	56,8	30	56,8	30	56,8	30	56,8	30
Sant'Agata Santeramo	71,2	27	71,2	27	71,2	27	71,2	27	71,2	27	71,2	27	71,2	27	71,2	27
Bibbiana	37,0	7	104,8	7	104,8	7	104,8	7	104,8	7	104,8	7	104,8	7	104,8	7
Monte Faggiola	37,0	7	94,2	7	94,2	7	94,2	7	94,2	7	94,2	7	94,2	7	94,2	7
Palazzuolo sul Senio	33,8	7	88,2	7	88,2	7	88,2	7	88,2	7	88,2	7	88,2	7	88,2	7
Monte Albano	34,0	1	55,6	7	55,6	7	55,6	7	55,6	7	55,6	7	55,6	7	55,6	7
Castella Vallesio	40,4	1	52,2	7	52,2	7	52,2	7	52,2	7	52,2	7	52,2	7	52,2	7
Tebano	48,0	30	48,0	30	48,0	30	48,0	30	48,0	30	48,0	30	48,0	30	48,0	30
Canale in destra di Reno																
Alfonsine	48,0	27	48,0	27	48,0	27	48,0	27	48,0	27	48,0	27	48,0	27	48,0	27
Lamone																
Casaglia	54,2	24	76,8	23	76,8	23	76,8	23	76,8	23	76,8	23	76,8	23	76,8	23
Monte Romano	44,2	7	83,8	7	83,8	7	83,8	7	83,8	7	83,8	7	83,8	7	83,8	7
Marradi	44,0	24	61,8	23	61,8	23	61,8	23	61,8	23	61,8	23	61,8	23	61,8	23
Saa Casciano	42,4	8	81,2	7	81,2	7	81,2	7	81,2	7	81,2	7	81,2	7	81,2	7
Rozzano	26,4	7	43,2	7	43,2	7	43,2	7	43,2	7	43,2	7	43,2	7	43,2	7
Bisighella - P.ve del Trio	29,8	7	32,0	7	32,0	7	32,0	7	32,0	7	32,0	7	32,0	7	32,0	7
Modigliana	48,4	8	85,6	7	85,6	7	85,6	7	85,6	7	85,6	7	85,6	7	85,6	7
Trebbio	51,6	7	106,6	7	106,6	7	106,6	7	106,6	7	106,6	7	106,6	7	106,6	7
Lodolone	41,4	7	68,0	7	68,0	7	68,0	7	68,0	7	68,0	7	68,0	7	68,0	7
Canale Corini																
Saa Pancrazio	21,8	3	27,6	3	27,6	3	27,6	3	27,6	3	27,6	3	27,6	3	27,6	3
Ravenna Urbana	28,8	1	28,8	1	28,8	1	28,8	1	28,8	1	28,8	1	28,8	1	28,8	1
Marina di Ravenna	42,3	27	42,4	27	42,4	27	42,4	27	42,4	27	42,4	27	42,4	27	42,4	27
Fiumi Uniti																
Pratacci	66,4	8	111,4	7	111,4	7	111,4	7	111,4	7	111,4	7	111,4	7	111,4	7
Monte Grosso	61,0	8	119,0	7	119,0	7	119,0	7	119,0	7	119,0	7	119,0	7	119,0	7
Saa Benedetto in Alpe	29,0	27	29,0	27	29,0	27	29,0	27	29,0	27	29,0	27	29,0	27	29,0	27
Rocca San Casciano	33,1	3	38,3	3	38,3	3	38,3	3	38,3	3	38,3	3	38,3	3	38,3	3
Castrocaro	36,2	7	71,4	7	71,4	7	71,4	7	71,4	7	71,4	7	71,4	7	71,4	7
Pezze Braldo	27,0	3	26,0	7	26,0	7	26,0	7	26,0	7	26,0	7	26,0	7	26,0	7
Pezze Vico	46,7	27	46,7	27	46,7	27	46,7	27	46,7	27	46,7	27	46,7	27	46,7	27
Saa Martiano in Strada	47,2	7	77,6	7	77,6	7	77,6	7	77,6	7	77,6	7	77,6	7	77,6	7
Forlì	38,0	7	53,8	7	53,8	7	53,8	7	53,8	7	53,8	7	53,8	7	53,8	7
Coccolia	31,4	27	44,4	7	44,4	7	44,4	7	44,4	7	44,4	7	44,4	7	44,4	7
Cornolo	131,4	7	238,4	7	238,4	7	238,4	7	238,4	7	238,4	7	238,4	7	238,4	7
Cornolo	79,0	7	133,6	7	133,6	7	133,6	7	133,6	7	133,6	7	133,6	7	133,6	7

Figura 2.1.2: Esempi tabelle Annali idrologici

## 2.2 Stazioni pluviometriche

Il bacino di nostro interesse, compreso tra Castel Bolognese e Alfonsine, risulta essere caratterizzato da una rete non particolarmente ricca di pluviometri, per questo motivo viene preso in esame anche il pluviometro di Imola, il quale presenta l'altimetria più elevata e che si discosta leggermente dalla zona di interesse in termini di distanza dal bacino idrografico.

I dati pluviometrici utilizzati provengono da una rete di pluviometri scelti sulla base di considerazioni di omogeneità di distribuzione sul bacino di interesse, ma anche a seconda della disponibilità di serie di dati sufficientemente numerose, infatti, è stato necessario verificare che, le stazioni prese in considerazione avessero delle serie sufficientemente ampie che riguardassero i periodi di interesse.

Le stazioni pluviometriche prese come riferimento per lo studio in oggetto sono: Lugo, Imola, Sasso Morelli, Alfonsine, Sant'Agata sul Santeramo, Idrovo Tratturo.

In particolare, nella tabella 2.2.1, vengono riportate l'altitudine, l'ubicazione, il comune e la provincia, il bacino a cui fanno riferimento, il gestore e il loro periodo di attività.

<b>Pluviometro</b>	<b>Altitudine m slm</b>	<b>Comune</b>	<b>Provincia</b>	<b>Bacino</b>	<b>Gestore</b>	<b>Periodo di attività</b>
Lugo	14	Lugo	Ravenna	Pianura Reno	Canale Romagna Occidentale	08.04.2013 – attuale
Imola	66	Imola	Bologna	Santerno	ARPAE Emilia-Romagna Servizio Idro-Meteo-Clima	31.12.1918 – attuale
Sasso Morelli	19	Imola	Bologna	Pianura Reno	ARPAE Emilia-Romagna Servizio Idro-Meteo-Clima	27.09.2004 – attuale
Alfonsine	5	Fusignano	Ravenna	Reno	ARPAE Emilia-Romagna Servizio Idro-Meteo-Clima	01.01.1916 – attuale
S. Agata sul Santerno	10	Sant'Agata sul Santerno	Ravenna	Pianura Reno	ARPAE Emilia-Romagna Servizio Idro-Meteo-Clima	01.01.2007 – attuale
Idrovo Tratturo	6	Alfonsine	Ravenna	Pianura Reno	Canale Romagna Occidentale	07.06.2005 – attuale

**Tabella 2.2.1: Specifiche stazioni pluviometriche**

Dagli annali idrologici si è potuto notare che molte stazioni pluviometriche non hanno la quantità di dati sufficiente per poter procedere alle analisi successive, di conseguenza si è scelto come pluviometri di riferimento quelli con più dati a disposizione, in particolare quindi, i pluviografi di: Lugo, Alfonsine e Imola, che presentano una quantità di dati dal 1932 al 2024 (ad esclusione del periodo della guerra), con un totale di circa cinquant'anni, sufficienti per le analisi che si andranno a fare in seguito, mentre i pluviografi di Sant'Agata sul Santerno, di Sasso Morelli e l'Idrovo Tratturo, presentano dati solo per 30 anni di dati osservati, una serie troppo corta messa in confronto a quella degli altri pluviografi e poco cospicua per il nostro caso.

Si ritiene necessario precisare che per una migliore analisi, sarebbe necessario disporre di un numero maggior di stazioni pluviometriche, in modo da confrontare un numero maggiore di dati di precipitazione vista l'area di interesse, ma in seguito sono state eseguiti dei confronti con altri dataset, che hanno potuto confermare la positività dell'utilizzo dei dati ricavati dai soli tre pluviografi presi in esame. Si rimanda alla lettura del capitolo 5 per ulteriori approfondimenti.

## 2.3 Dati di precipitazione

Per ognuna delle stazioni pluviometriche elencate nella tabella 2.2.1 è stato necessario individuare i seguenti dati:

- Piogge intense, cioè le precipitazioni di massima intensità annue, registrate ai pluviografi relative a periodi con inizio in un istante qualsiasi di durata di 1, 3, 6, 12, 24, ore; disponibili grazie all'archivio pluviometrico di Arpa costruito sulla base degli annali idrologici e con il medesimo schema tabellare. Queste informazioni sono necessarie per la costruzione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica puntuali per ognuna delle stazioni in considerazione.
- Cumulati 1-5 d, cioè le precipitazioni di massima intensità annue, registrate ai pluviografi relative alle durate di un giorno e di 5 giorni consecutivi. Attraverso questi dati è possibile costruire i quantili puntuali per i vari tempi di ritorno per le varie stazioni.

Nell'Allegato I vengono riportate le tabelle rispettivamente i valori delle piogge intense e le precipitazioni di massima intensità annue dei pluviografi di Lugo, Alfonsine e Imola.

Dalla raccolta dei dati si può notare nello specifico il numero mancante degli elementi per le prime serie, infatti, per il pluviografo di Alfonsine ci sono 52 anni di dati mancanti, per quello di Lugo 53 e per quello di Imola 8 su una serie storica complessiva di 90 dati (dal 1932 al 2022).

Tralasciando gli anni della guerra, questa mancanza di dati può essere spiegata da un possibile mal funzionamento dello strumento, per questo motivo è di notevole importanza il lavoro di manutenzione delle reti pluviometriche operative, che non è detto sia svolto regolarmente, soprattutto nei luoghi più impervi. Ciò comporta che ogni lavoro di analisi dei data set pluviometrici sia preceduto da un accurato controllo della qualità dei dati.

Osservando invece i dati relativi ai valori cumulati in più giorni 1-5d, si può notare che il numero mancante di dati è notevolmente minore rispetto ai precedenti.

## Capitolo 3: Analisi idrologica

Nell'ambito degli interventi di sistemazione degli alvei fluviali, si pone il problema della determinazione della portata di progetto associata ad una probabilità di accadimento. Risulta quindi necessario, per i motivi già enunciati, ricorrere ad un approccio di tipo probabilistico

schematizzando le portate di piena come variabili aleatorie caratterizzate da una propria distribuzione di probabilità.

Una variabile si dice *aleatoria* o *casuale* quando i valori che essa può assumere dipendono da un numero elevatissimo di cause sconosciute. Generalmente, anziché fare riferimento alla scala delle probabilità, si preferisce riferire le stime delle portate di piena al tempo di ritorno  $T(x)$ , definito come l'intervallo di tempo che intercorre mediamente tra il verificarsi di due successivi eventi, in cui il valore  $x$  assegnato viene raggiunto o superato.

L'eccezionalità di un evento è quindi misurata dal valore della sua frequenza di accadimento o, in alternativa, da quello del tempo di ritorno  $T$ , legato alla probabilità di non superamento dalla relazione sottostante:

$$T(x) = \frac{1}{P[X < x]} = \frac{1}{1 - P[X \geq x]} = \frac{1}{1 - F_x(x)}$$

Ove  $T(x)$  è espresso in anni e  $F_x(x) = P(x \leq X)$  indica la funzione di distribuzione di probabilità (CDF, Cumulative Distribution Function) del massimo della variabile casuale in esame, esprime la probabilità di non superamento in un anno generico del valore assegnato  $x$ .

Il concetto di tempo di ritorno consente di esprimere in maniera sintetica ed immediatamente comprensibile la frequenza attesa con cui una certa portata viene eguagliata o superata e quindi la frequenza con cui i manufatti dimensionati con riferimento a tale portata si vengono a trovare in condizioni di crisi.

Una volta fissato il tempo di ritorno di progetto, si potrà valutare, mediante il legame  $x = x(T)$  la portata che può transitare, con quel valore del tempo di ritorno, nella sezione fluviale considerata e quindi dimensionare il manufatto di interesse.

L'obiettivo è quello di determinare il legame  $x = x(T)$ , di conseguenza una volta fissato il tempo di ritorno  $T$ , è possibile stimare il quantile  $x$ , ovvero la portata di progetto  $Q_T$ , la quale viene uguagliata o superata mediamente ogni  $T$  anni.

Alcuni tempi di ritorno di interesse tecnico tipicamente adottati e suggeriti nei piani di bacino riguardano ad esempio: il dimensionamento dei sistemi di drenaggio urbano, per cui si suggeriscono tempi di ritorno di 10 ÷ 20 anni, per gli interventi in ambito montano 50 ÷ 100 anni, per la sistemazione delle aste di pianura 100 ÷ 200 anni, mentre per gli sfiori delle dighe si fa riferimento a tempi di ritorno di 1000 ÷ 5000 anni (EU Floods Directive, i.e. Direttiva 2007/60/EC, recepita in Italia con il Decreto Legislativo del 49/2010).

Nel caso in esame sono stati valutati tre tempi di ritorno, in particolare di: 50, 100 e 200 anni.

Per la valutazione della portata di progetto  $Q_T$  si può ricorrere a due possibili approcci: *diretti* ed *indiretti*. La scelta del metodo da adottare è fortemente condizionata dalla natura e dalla consistenza dei dati storici di osservazione idrometrica e pluviometrica disponibili per il bacino idrografico sotteso dalla sezione di interesse.

Gli *approcci diretti* consistono nella determinazione della variabile di progetto sulla base delle osservazioni idrometriche eventualmente disponibili nella sezione fluviale di interesse o in altre sezioni chiusura di bacini idrografici appartenenti alla medesima regione idrologica in cui ricade quello esaminato.

Gli *approcci indiretti*, invece, sono indirizzati alla derivazione di tale legame a partire dall'analisi statistica delle precipitazioni che investono il bacino idrografico. Quindi data la precipitazione critica con assegnato tempo di ritorno, i metodi indiretti, mediante opportuni modelli afflussi – deflussi, giungono alla stima del legame  $x = x(T)$ .

Il presente lavoro di tesi riguarda la stima delle portate di progetto con entrambi i metodi in particolare riferimento al modello dell'invaso lineare per il metodo indiretto e l'analisi regionale di frequenza delle piene per il metodo di tipo diretto.

### **3.1 Analisi locale di frequenza delle precipitazioni**

Nel caso in cui per l'assegnata sezione siano disponibili osservazioni per un periodo di tempo sufficientemente lungo in relazione al tempo di ritorno di interesse, la stima del legame  $x = x(T)$  può essere effettuata mediante metodi di analisi locale di frequenza.

Tali metodi di tipo diretto, consistono nell'identificazione, mediante tecniche di inferenza statistica, della distribuzione di probabilità più adatta a rappresentare le osservazioni disponibili (Brath, 1995). Per studiare il regime di frequenza degli estremi idrologici, ovvero per eseguire l'analisi di frequenza, occorre in primis procedere all'individuazione del campione di osservazioni sul quale eseguire le analisi. A tal fine in letteratura sono stati proposti due diversi approcci. Il primo di questi prevede la costruzione della serie alle durate parziali (*POT, Peaks Over Threshold*): a partire dalla serie temporale delle portate defluenti in alveo, fissato un valore di soglia della variabile in esame, il campione POT risulta costituito dai colmi di portata che superano la soglia. Questo metodo ha il vantaggio di avere un maggiore numero di dati, ma occorre verificare (mediante tecniche empiriche) che gli eventi considerati non siano tra loro correlati, ovvero che un evento considerato non risulti influenzato dal precedente.

Il secondo approccio prevede invece la costruzione della serie dei massimi annuali (*AMS*, *Annual Maximum Series*), ottenuta considerando i valori massimi assunti dalla grandezza in esame per ciascuno degli anni di osservazione. In questo caso, considerando un solo evento all'anno, l'ampiezza dell'intervallo di tempo tra due eventi successivi risulta molto maggiore sia della durata caratteristica dei singoli eventi di piena che del tempo medio intercorrente tra due eventi successivi e dunque è generalmente lecito ritenere che due generici massimi annuali consecutivi siano tra loro indipendenti. Ciò ha il grande vantaggio di poter analizzare la serie da un punto di vista puramente probabilistico, considerando cioè i singoli valori come realizzazioni della variabile casuale massimo annuale delle portate al colmo di piena. Per questi motivi, anche in virtù del fatto che risultano essere più facilmente reperibili, le serie AMS sono quelle di gran lunga più utilizzate nell'ambito dell'analisi di frequenza degli estremi idrologici.

All'interno degli stati europei le linee guida nazionali per l'analisi di frequenza degli estremi idrologici raccomandano preferibilmente l'utilizzo di distribuzioni a due e tre parametri. Tra quelle a due parametri sono incluse *Gumbel* (GUM), *Gamma* (GAM), *Log-Normale* a due parametri (LN2) e *l'Esponenziale* (EXP), caratterizzate da una maggiore robustezza, ma anche da una minore adattabilità ai cambiamenti che si possono verificare nelle serie osservate. Tra quelle a tre parametri invece è opportuno menzionare la *Generalized Logistic* (GLO), la *distribuzione generalizzata del valore estremo*, detta GEV (Generalized Extreme Value), *Log-Normale a tre parametri* (LN3) e *Pearson type III* (PE3).

Le distribuzioni a tre o più parametri risultano più flessibili e meglio adattabili ai dati; tuttavia, si può incorrere nel pericolo di sovra-parametrizzazione, od overfitting.

Per quanto concerne le distribuzioni a due parametri, l'approccio più utilizzato in ambito tecnico per valutare la probabilità associata ai deflussi massimi annuali, si basa sull'utilizzo della distribuzione di Gumbel, proposta da Emil Julius Gumbel nel 1958, la quale può essere espressa dalla seguente relazione:

$$F_X(x) = e^{-e^{-\frac{x-\xi}{\alpha}}}$$

dove  $x$  rappresenta la variabile idrologica di interesse, ovvero la portata massima annuale al colmo di piena ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\xi$  e  $\alpha$  rappresentano i parametri di posizione e scala della distribuzione da stimare sulla base delle osservazioni disponibili. Infatti, essi sono funzione rispettivamente della media e dello scarto quadratico medio del campione di osservazioni.

$$\alpha = \sigma / \sqrt{1,645}$$

$$\xi = \bar{x} - 0,5772\alpha$$

Quindi, a partire dalle serie AMS, si stimano i parametri e si ricava  $F_X(x)$ , ovvero la distribuzione cumulata, associata alla funzione di distribuzione prescelta. Poiché, come precedentemente dimostrato, la  $F_X(x)$  può essere associata al tempo di ritorno  $T$  è possibile stimare il quantile  $x_T$ , che non è altro che la variabile di progetto ricercata (quella portata che mediamente viene eguagliata o superata una volta ogni  $T$  anni):

$$x_T = Q_T = \xi - \alpha \cdot \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)$$

## 3.2 Determinazione delle curve di possibilità pluviometrica

Le curve di possibilità pluviometrica esprimono la relazione fra le altezze di precipitazioni  $h$  e la loro durata  $t$ , per un assegnato valore del periodo di ritorno  $T$ . Tale relazione viene spesso indicata anche come *curva di possibilità climatica* o *linea segnalatrice di possibilità pluviometrica* (LSPP). Solitamente si considera un fascio di curve, ciascuna delle quali corrisponde ad un valore diverso del tempo di ritorno. L'altezza di precipitazione  $h$  presa in considerazione è quella massima annuale relativa alla durata in esame.

Dopo aver determinato i parametri di cui sopra e aver definito tempi di ritorno che nel nostro caso sono di 50, 100 e 200 anni, si costruiscono le curve segnalatrici di possibilità pluviometrica (Figura 3.2.1) che sono rappresentata con la seguente equazione:

$$h(t, T) = at^n \quad (1)$$

dove:  $h$  è l'altezza di pioggia espressa in millimetri,  $t$  è la durata espressa in ore e  $a$  ed  $n$  sono parametri che dipendono dal tempo di ritorno  $T$ .

Per la stima dei parametri  $a$  ed  $n$  di ciascuna curva, conviene considerare la trasformata logaritmica dei valori delle precipitazioni e delle durate ed applicare il metodo dei minimi quadrati.

Quindi la formula (1), passando ai logaritmi in base 10, diventa un'espressione lineare:

$$\log_{10}h = \log_{10}a + n\log_{10}t \quad (2)$$

Ponendo:

$$Y = \log_{10}h; \quad A = \log_{10}a; \quad X = \log_{10}t;$$

si ottiene:

$$Y = A + nX \quad (3)$$

Che non è altro che l'equazione di una retta di intercetta  $A$  e coefficiente angolare  $n$ .

Note  $M$  coppie di valori  $(h, t)$  riferite ad uno stesso periodo di ritorno, i coefficienti  $A$  ed  $n$  possono essere determinati approssimando la retta dell'equazione (3) con la retta di interpolazione dei minimi quadrati. Tale retta di interpolazione è quella che minimizza la somma dei quadrati delle distanze tra la retta stessa ed i punti individuati dalle  $M$  coppie di valori noti.

I parametri, date le  $M$  coppie di valori noti  $(\log h, \log t)$ , possono essere stimati attraverso le equazioni:

$$A = \frac{M \sum \log t \sum (\log h)^2 - \sum \log t \sum (\log t)(\log h)}{M \sum (\log t)^2 - (\sum \log t)^2}$$

$$n = \frac{M \sum (\log t)(\log h) - \sum \log t \sum \log h}{M \sum (\log t)^2 - (\sum \log t)^2}$$

Da queste equazioni si ricavano  $a$  ed  $a = 10^A$ .

Di seguito vengono riportate le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica puntuali dei tre pluviometri presi in esame.

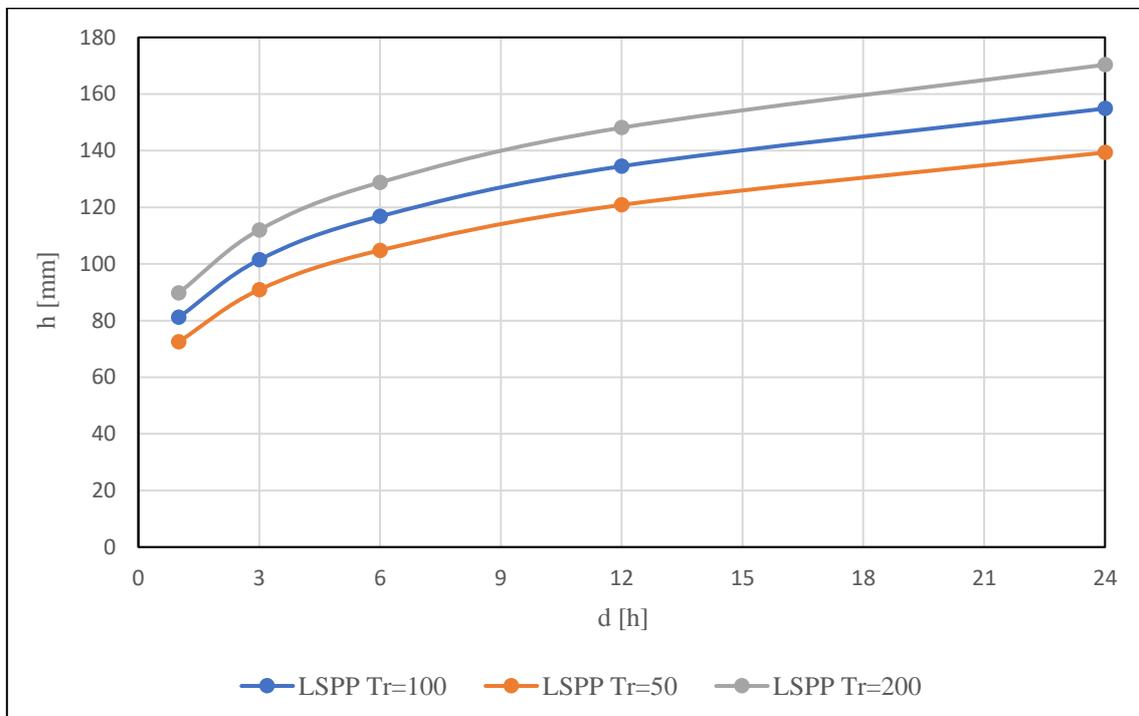
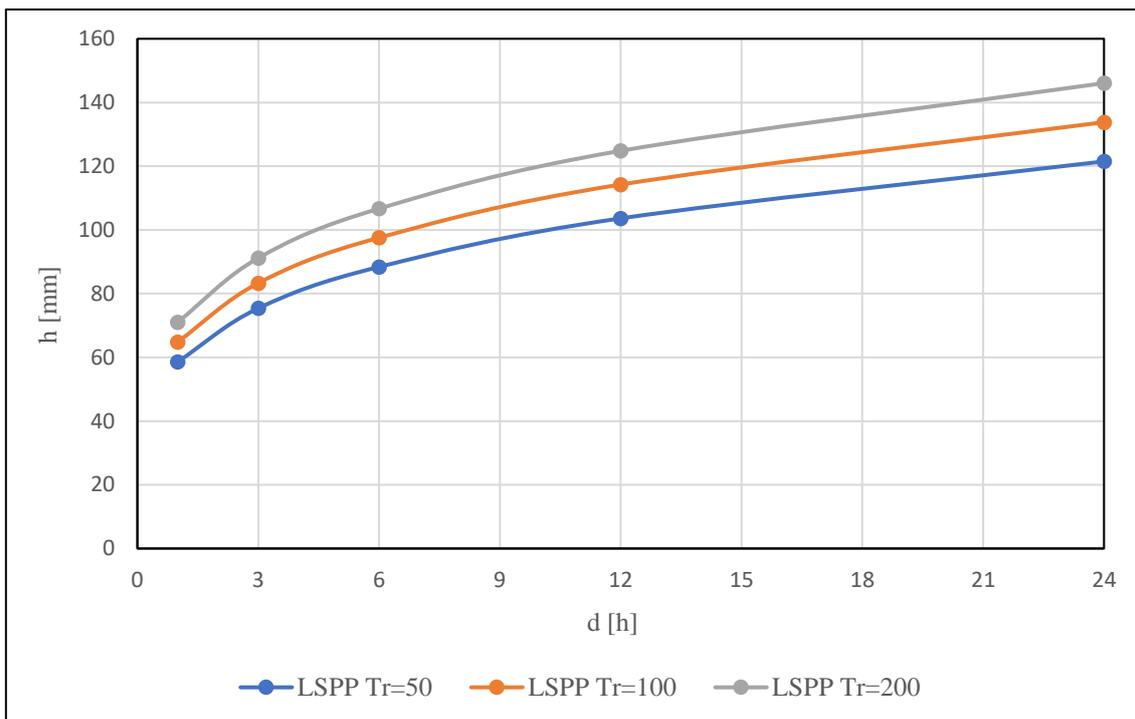
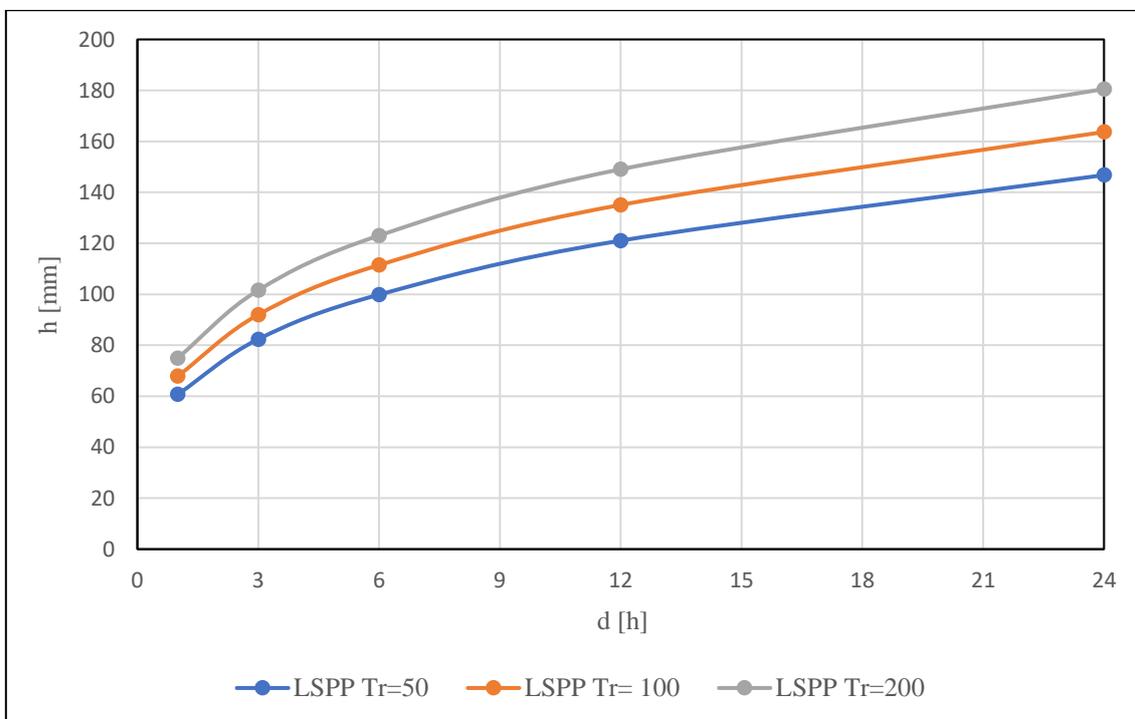


Figura 3.2.1: Linea segnalatrice di possibilità pluviometrica puntuale del pluviometro di Alfonsine



**Figura 3.2.2: Linee segnalatrice di possibilità pluviometrica puntuale del pluviometro di Lugo**



**Figura 3.2.3: Linea segnalatrice di possibilità pluviometrica puntuale del pluviometro di Imola**

### 3.3 Coefficiente di ragguglio areale delle piogge

Il comportamento altamente variabile delle precipitazioni ha diverse implicazioni in molte questioni idrologiche, come la progettazione dei sistemi fognari, le misure di controllo delle alluvioni nei sistemi di drenaggio urbano, la progettazione di reti di sensori di pioggia e la previsione delle alluvioni, poiché è necessaria una risoluzione fine delle precipitazioni nello spazio e nel tempo. Infatti, la comprensione del comportamento a livello spaziale e temporale delle precipitazioni è di fondamentale importanza per la progettazione efficiente di infrastrutture idrauliche.

Un'informazione il più possibile rappresentativa della variabilità del fenomeno sull'area considerata può essere ricavata dall'elaborazione opportuna di osservazioni contemporanee di precipitazioni verificatesi per diversi eventi alle stazioni di misura. Essendo questa procedura troppo complessa, generalmente la pioggia areale viene stimata attraverso l'applicazione di un coefficiente di riduzione correttivo alla precipitazione puntuale. Il fattore che consente la trasformazione da precipitazione puntuale a precipitazione areale è il coefficiente di riduzione areale (*Areal Reduction Factor*, ARF), definito come il rapporto tra le precipitazioni su un'area specifica e le precipitazioni misurate in un punto da un pluviometro ed è funzione della durata  $d$ , dell'area  $A$  e dal tempo di ritorno:

$$h_A(d, T) = h_p(d, T)ARF(d, A, T)$$

Dove:

- $h_p(d, T)$  è l'altezza della precipitazione puntuale, misurata da un pluviometro centrale durante un evento di pioggia intensa con durata  $d$ ;
- $h_A(d, T)$  è l'altezza di pioggia media areale sull'area  $A$  alla durata  $d$ .

L'ARF dipende da diversi elementi, come per esempio i processi di precipitazione, infatti secondo alcuni studiosi, l'ARF degli eventi di precipitazione su piccola scala spaziale, registrati a passo giornaliero, diminuiscono più rapidamente all'aumentare dell'area rispetto agli eventi di precipitazione frontali su larga scala; altri studi hanno riscontrato ARF più bassi in estate che in inverno; altri autori hanno riscontrato valori diversi in funzione della posizione geografica e nelle aree urbanizzate e in campagna; mentre alcuni autori hanno riportato che il coefficiente di riduzione areale diminuisce all'aumentare del tempo di ritorno. Inoltre, l'ARF è influenzato anche dalla forma del bacino (Asquith, 1999), in genere, però, la dipendenza dalla forma si trascura.

In letteratura esistono innumerevoli soluzioni, proposte negli anni da ricercatori e studiosi, per il problema della riduzione delle piogge intense all' area, a volte dato il carattere empirico di questi studi, le tecniche proposte sono applicabili solo in ristrette zone geografiche. Comunque, esistono anche tecniche che possono essere applicate su larga scala; nonostante questo, è possibile osservare come alla base di ogni studio ci siano le seguenti ipotesi di fondo:

- Il pluviometro considerato si trova al centro dello scroscio durante il verificarsi degli eventi di massima intensità;
- L'evento pluviometrico è più intenso lì che altrove.
- Ci si aspetta che il coefficiente ARF,  $ARF = hA / h$ , assume valori tra 0 e 1;
- Ci si aspetta un andamento decrescente di ARF col crescere dell'area del bacino e che cresca al crescere della durata della precipitazione.

Le prime due ipotesi si basano su alcuni concetti intuitivi: quando un pluviometro ha rilevato il suo massimo valore annuale di precipitazione, è scontato che ciò sia accaduto per il nubifragio che in quel punto è stato il più intenso di tutti; inoltre, se si suppone ragionevolmente che quel nubifragio sia stato più intenso lì che altrove, di conseguenza si può ritenere che il pluviometro si trovasse proprio nel centro di scroscio. Questo spiega perché l'altezza di pioggia ragguagliata è sempre minore di quella puntuale e quindi  $r$  è sempre minore o uguale a 1; questo fattore è tanto più accentuato quanto maggiore è l'area di ragguaglio.

La quarta ipotesi è giustificata dal fatto che piogge di durata più lunga tendono ad avere una distribuzione spaziale più omogenea rispetto piogge di durata inferiore.

Dal punto di vista matematico è possibile schematizzare l'ARF come composizione di due funzioni, una dell'area sottesa e una della durata:

$$ARF(A, t) = 1 - f_1(A)f_2(t)$$

Dove

- $f_1(A) = 0$  per  $A = 0$ ;
- $f_1(A) = 1$  per  $A \rightarrow \infty$ ;
- $f_2(t) = 1$  per  $t = 0$ ;
- $f_2(d) = 0$  per  $d \rightarrow \infty$ .

Le espressioni  $f_1$  e  $f_2$  saranno diverse a seconda dell'autore che le ha stimate in funzione del bacino studiato.

Per il nostro studio viene utilizzata la formula dell'*U.S. Weather Bureau* (USWB), il Servizio Meteorologico degli Stati Uniti, che tra il 1957 e il 1960 ha raccolto ed elaborato dati di precipitazione al fine di fornire una relazione empirica per la stima del fattore di riduzione delle piogge all'area. Il Technical Paper No. 29 (TP-29, U.S. Weather Bureau, 1958) rappresenta il primo sviluppo sistematico degli ARF per gli Stati Uniti, fornendo stime per durate che vanno da 30 minuti a 24 ore e aree dai 250 fino a 1036 km<sup>2</sup>. L'analisi del TP-29 si basava sulle osservazioni di vari eventi piovosi registrati in sette stazioni provenienti da fitti network di pluviometri estesi negli Stati Uniti, per un periodo variabile dai 7 ai 15 anni circa. Principalmente a causa della limitata durata dei dati e delle piccole aree di studio, le curve ARF del TP-29 non caratterizzano alcuna dipendenza dal periodo di ritorno, dalla stagione o dalla posizione geografica. Anche se questo studio è stato pubblicato decenni fa, è ancora utilizzato in molte applicazioni ingegneristiche oggi, anche se le curve sviluppate possono differire significativamente quando valutate in diverse parti del mondo.

Quindi, a partire dalle serie storiche dei dati medi puntuali e dei dati medi areali per ogni durata considerata, dal confronto dei valori massimi di assegnato tempo di ritorno estratti da queste, si definisce il fattore di riduzione di ragguaglio all'area:

$$ARF(A, d, T) = I_A(t, T) / I_p(t, T)$$

Dove per una fissata area A si definiscono:

- $I_p(t, T)$  rappresenta il valore medio massimo puntuale di pioggia per assegnata durata  $t$  e tempo di ritorno  $T$ ;
- $I_A(t, T)$  corrisponde al massimo valore dell'intensità di pioggia areale, per uguale durata  $t$  e tempo di ritorno  $T$ .

Nel 1972 Eagleson, utilizzando l'elaborazione dei dati dell'*U.S. Weather Bureau*, ha formulato una relazione dell'ARF in funzione della durata  $t$  della precipitazione e dell'area su cui si vuole spazializzare la misura puntuale, previa considerazione della dipendenza dal tempo di ritorno  $T$  come trascurabile.

Secondo Eagleson, le funzioni  $f_1$  e  $f_2$  hanno le seguenti forme:

$$f_1(A) = 1 - \exp(-c_1 \cdot A)$$

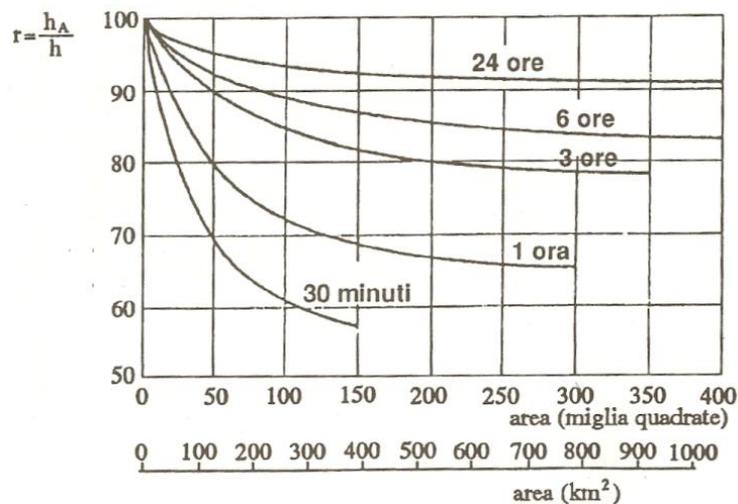
$$f_2(t) = \exp(-c_2 \cdot t^{c_3})$$

In conclusione, gli studi empirici dell'USWB hanno portato come risultato alla seguente relazione dell'ARF:

$$ARF = 1 - \exp\{-c_2 t^{c_3} [1 - \exp(-c_1 A)]\}$$

Questa relazione rispetta tutte le condizioni precedentemente illustrate, per qualunque valore di  $A$  e di  $t$ .

Di seguito, sono riportate le curve proposte dall'USWB (Eagleson) per la determinazione dell'ARF.



**Figura 3.3.1: Rapporto tra pioggia puntuale ed areale al variare della durata e dell'area (US Weather Bureau)**

È importante tenere presente che queste curve sono state calibrate per il territorio degli USA, e quindi vanno impiegate con cautela in applicazioni su quello italiano, in quanto caratterizzato da condizioni meteorologiche distinte.

Per la tesi in questione sono stati utilizzati dei parametri  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  ricalibrati sul bacino del Reno:

$$c_1 = -0,01298$$

$$c_2 = -0,6786$$

$$c_3 = 0,3320$$

Questi parametri sono stati presi dalla Tesi di laurea di Chiara Benaglia, *Il Fattore di Riduzione delle Piogge all'Area*, Facoltà di Ingegneria, Bologna. Si è ritenuto opportuno utilizzarli perché sono calibrati sul bacino del Reno e nel caso studio, i due corsi d'acqua principali, il Tratturo e l'Arginello, hanno come collettore finale il Canale destra di Reno e quindi ritenuti adatti anche per il caso oggetto di studio.

<b>Durata [h]</b>	<b>ARF</b>
<b>1</b>	0,544646
<b>3</b>	0,662278
<b>6</b>	0,737777
<b>12</b>	0,809301
<b>24</b>	0,872287
<b>48</b>	0,922898
<b>72</b>	0,94587
<b>96</b>	0,95915
<b>120</b>	0,96779

**Tabella 3.3.1: Coefficienti di raggaglio areale calcolati per i pluviometri di interesse**

## **Capitolo 4: Trasformazione afflussi-deflussi**

Il processo "trasformazione afflussi-deflussi" comprende l'insieme dei diversi processi idrologici che concorrono alla formazione del deflusso a partire dalla precipitazione meteorica, prima ancora che il deflusso si incanali nella rete idrografica. Il processo fondamentale è costituito dalla precipitazione, che origina gli scambi idrici fra l'atmosfera ed il sistema terrestre. Tale precipitazione viene in parte intercettata da parte della eventuale copertura del suolo, che spesso è di natura vegetale, in parte s'infiltra nel suolo, in parte va ad accumularsi in piccoli invasi naturali e/o artificiali (laghi, avvallamenti del terreno, impluvi artificiali); la parte rimanente, infine, va a costituire il deflusso superficiale che scorrerà verso la rete idrografica secondo le linee di massima pendenza del terreno. Il sistema suolo - vegetazione, quindi, costituisce una naturale capacità di invaso, che tende a decurtare la quantità d'acqua precipitata che arriverà alla rete idrografica (precipitazione efficace).

Tale riduzione dipenderà, istante per istante, dalla capacità complessiva di tali invasi, che varierà nel tempo sia a causa del loro progressivo riempimento durante prolungati eventi di pioggia, sia a causa di altri importanti processi di trasferimento dell'acqua che agiscono nel sistema suolo-atmosfera. Ad esempio, parte dell'acqua intercettata e trattenuta dalle superfici foliarie e nelle pozzanghere si disperderà di nuovo nell'atmosfera per evaporazione. Analogamente, una piccola parte dell'acqua infiltrata nel suolo evaporerà direttamente e una parte più consistente verrà assorbita dalle radici della vegetazione e quindi rimessa in atmosfera per evaporazione dagli stomata delle foglie (traspirazione).

Ancora, parte dell'acqua infiltrata negli strati superficiali del suolo proseguirà il moto di filtrazione verso gli strati più profondi e le falde (percolazione), mentre una parte, tanto maggiore quanto più elevata è la pendenza del terreno, filtrerà verso la rete idrografica mantenendosi negli strati superficiali (deflusso ipodermico). Parte dell'acqua infiltrata, quindi, andrà ancora a contribuire al deflusso nella rete idrografica, ma con tempi di ritardo, rispetto alla precipitazione, più elevati (per il deflusso ipodermico) o notevolmente maggiori (per il deflusso dagli strati profondi e dalle falde, detto anche deflusso di base) dei tempi caratteristici del deflusso superficiale.

La modellazione del processo di trasformazione degli afflussi in deflussi si inserisce come componente essenziale nella più generale modellistica per la ricostruzione e/o la previsione di idrogrammi di piena, in una o più sezioni di un bacino imbrifero, a partire dalla distribuzione spazio-temporale delle piogge insistenti sul bacino. Dal punto di vista matematico, il problema della previsione di un idrogramma di piena può essere visto come la messa a punto di un filtro, il cui ingresso è costituito da misure di una variabile  $P(x, t)$  di tipo distribuito, ovvero dipendente sia dalla coordinata temporale  $t$  che dalla coordinata spaziale  $x$ , e la cui uscita la portata nella sezione di chiusura del bacino ovvero la variabile  $Q(t)$  di tipo integrato nello spazio, ovvero dipendente solo dal tempo.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi, ciascuno dei quali può essere rappresentato tramite un sub modello specializzato. In particolare, l'input al modello sarà costituito da una serie di misure di pioggia, di tipo puntuale (registrazioni pluviometriche) e/o distribuito (radar meteorologico), da interpolare in modo da ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo in termini di afflusso per unità di area (ovvero con dimensioni di portata per unità di area). L'aliquota di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale (ed eventualmente anche in deflusso ipodermico, nei limiti precedentemente accennati), detta anche precipitazione efficace o deflusso efficace, verrà stimata con un opportuno modello di trasformazione afflussi - deflussi, che valuterà la produzione di deflusso  $Q(x, t)$  idealmente in ciascun punto del bacino, avente questo ancora le dimensioni di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi superficiali nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo sino alla sezione di chiusura del bacino verrà rappresentato tramite un modello di formazione dell'onda di piena.

Componenti superficiali e sotterranee di un idrogramma di piena → Afflusso diretto: è la precipitazione che cade direttamente sugli specchi d'acqua della rete drenante → Scorrimento superficiale (run off): ha origine inizialmente sul suolo e si propaga quindi all'interno della rete idrografica. Costituisce il contributo più rapido e, in molti casi, di gran lunga più importante alla piena → Scorrimento ipodermico: è costituito dall'aliquota di precipitazione infiltrata che si muove

orizzontalmente nel suolo, nello strato immediatamente sottostante la superficie, ed è generalmente causato da strati impermeabili che ne impediscono la percolazione profonda. — Scorrimento sotterraneo (o profondo): è l'aliquota d'acqua affluita che raggiunge la sezione di chiusura attraverso lenti fenomeni di filtrazione negli strati più profondi del terreno. Questo contributo all'idrogramma di piena varia, dunque, piuttosto poco durante l'evento perché risente in maniera limitata degli effetti della pioggia.

## 4.1 Uso del suolo

La permeabilità del suolo è una proprietà che viene indicata come conducibilità idrica satura ed esprime la capacità del suolo in condizioni di saturazione, di essere attraversato da un flusso d'acqua, in direzione verticale. Suoli molto permeabili facilitano l'assorbimento e il movimento al loro interno di notevoli quantità d'acqua in poco tempo; la falda viene quindi facilmente raggiunta mentre i processi di scorrimento superficiale sono limitati. Suoli molto permeabili risultano quindi protettivi rispetto a fenomeni erosivi e di conseguenza la quantità delle acque superficiali, in particolare in condizioni di pendenza, mentre poco protettivi nei confronti delle acque sotterranee. Le condizioni risultano opposte in presenza di suoli poco permeabili caratterizzati da bassa infiltrabilità e spiccati processi di scorrimento superficiale.

La permeabilità dipende prevalentemente dalla distribuzione e dalle dimensioni dei pori presenti nel terreno, essendo il movimento dell'acqua facilitato in presenza di pori grandi e continui, rispetto a situazioni con pori piccoli e scollegati tra loro, la porosità del suolo a sua volta è collegata dalla tessitura: i suoli argillosi presentano in genere conducibilità idraulica satura più bassa rispetto a quella dei suoli sabbiosi e ghiaiosi, dove i pori, meno numerosi ma con sezione più ampia, permettono il passaggio di notevoli volumi d'acqua. Influenza la permeabilità anche la presenza di vuoti planari (fessure e spazi tra gli aggregati) più frequenti invece negli orizzonti argillosi e in particolare in quelli poco profondi. Il tipo di copertura presente sul territorio influisce sulle dinamiche di deflusso in modo determinante. Un terreno coperto da una fitta vegetazione può intercettare ed assorbire notevoli quantità di acqua, facendo anche aumentare il tempo di corrivazione e smorzare i picchi di portata.

L'area oggetto di studio è composta prevalentemente da seminativi semplici irrigui, ovvero superfici coltivate, regolarmente arate e generalmente sottoposte ad un sistema di rotazione (cereali, leguminose, foraggiere e colture erbacee in genere) e irrigate periodicamente o sporadicamente, in genere grazie a infrastrutture permanenti. Oltre a questi, sono presenti anche zone residenziali in

prossimità dei comuni di Lugo, Solarolo, Fusignano e Cotignola e tessuto residenziale rado, nonché tessuti composti da palazzine e/o villini con spazi aperti di pertinenza, occupati da piccoli giardini condominiali, fasce di verde e alberature dove comunque gli edifici, la viabilità e le superfici ricoperte artificialmente coprono oltre il 50% della superficie totale e generalmente gli edifici non raggiungono più di tre piani o i 10 metri d'altezza.

Data l'omogeneità riscontrata e in considerazione delle caratteristiche morfologiche, idrologiche ed idrauliche, nonché la destinazione di uso del suolo che sono state rilevate, si è optato di utilizzare il modello dell'invaso lineare applicato su tutta l'area di studio con una precipitazione costante.

Per maggiori dettagli, in Allegato II viene riportato l'uso del suolo nello specifico su tutta l'area di studio.

## 4.2 Coefficiente di deflusso

Il coefficiente di deflusso  $\phi$  è il parametro che determina la trasformazione degli afflussi in deflussi, dato dal rapporto tra il volume defluito attraverso una assegnata sezione in un definito intervallo di tempo e il volume meteorico precipitato nell'intervallo stesso.

Il coefficiente di deflusso viene valutato considerando le caratteristiche di permeabilità delle diverse superfici presenti nel bacino scolante, infatti tiene conto della riduzione dell'afflusso meteorico per effetto della permeabilità dei suoli del bacino ed esprime la percentuale d'acqua piovuta che contribuisce al deflusso.

Il valore del coefficiente di deflusso stimato è pari a 0,7 per l'intero bacino e il valore assunto è considerato costante durante tutto l'evento meteorico.

## 4.3 Calcolo della pioggia lorda

Il valore della pioggia lorda deve essere depurato delle perdite. La pioggia lorda, da associare ad ogni evento in considerazione, viene ottenuta mediante i valori di pioggia oraria ragguagliati sul bacino, più ampiamente descritti nel Capitolo 3.3, applicando la media pesata tra le varie stazioni.

In particolare, si ottengono le curve di possibilità climatica ragguagliate sul bacino per ogni tempo di ritorno considerato, che possono essere rappresentate con un'equazione del tipo:

$$h(d, T) = a \cdot d^n \quad \text{dove } a = a(T)$$

dalle quali poi, definito un tempo di corrivazione, si determina il valore della pioggia lorda corrispondente. Per semplicità grafica vengono divisi i due LSPP con tempi di corrivazione rispettivamente di 8h, 11h, 19h e 36h, 48h, 120h.

In tabella 4.3.1 e 4.3.2 vengono riportati i millimetri delle piogge lorde per i rispettivi tempi di corrivazione considerati.

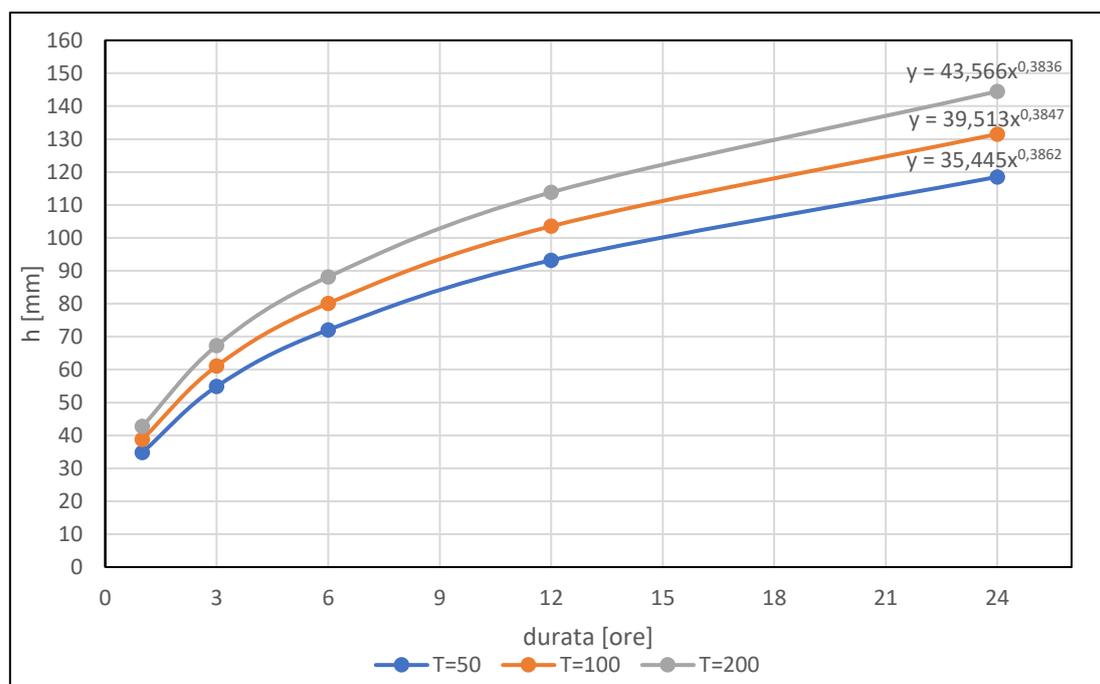


Figura 4.3.1: LSPP per i rispettivi tempi di ritorno per pioggia di durata di 1h, 3h, 6h, 12h, 24h

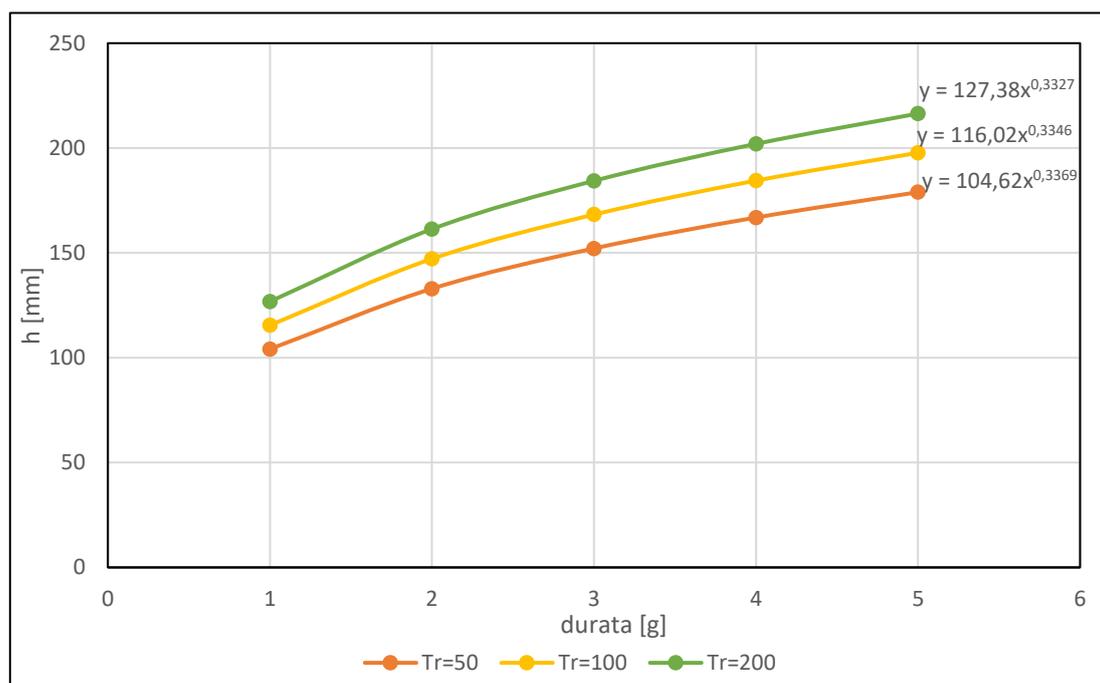


Figura 4.3.2: LSPP per i rispettivi tempi di ritorno per pioggia di più giorni 1g, 2g, 3g, 4g, 5g

Occorre specificare che i valori sono stati ricavati con dati di pioggia differenti, infatti per la prima tabella, sono stati analizzati i dati di piogge intense, cioè le precipitazioni di massima intensità annue, registrate ai pluviografi relative a periodi con inizio in un istante qualsiasi di durata di 1, 3, 6, 12, 24, ore, mentre per la seconda tabella sono state utilizzate le piogge cumulate in 1-5 d, cioè le precipitazioni di massima intensità annue, relative alle durate di un giorno e di 5 giorni consecutivi. La differenza dei valori dei millimetri di pioggia per la durata delle 24h, sta proprio nella differenza di registrazione di dati, ovvero che i primi sono relativi ad un inizio qualsiasi, mentre per le piogge cumulate iniziano dalla mezzanotte.

Durata [h]	h <sub>50</sub> [mm]	h <sub>100</sub> [mm]	h <sub>200</sub> [mm]
1	34,82	38,82	42,80
3	54,89	61,09	67,27
6	72,06	80,13	88,16
8	79,13	87,93	96,73
11	89,48	99,39	109,30
12	93,21	103,54	113,83
19	110,51	122,65	134,80
24	118,51	131,53	144,49

Tabella 4.3.1: Valori di precipitazioni lorde relative alle rispettive durate in ore

Durata [g]	h <sub>50</sub> [mm]	h <sub>100</sub> [mm]	h <sub>200</sub> [mm]
1	104,13	115,48	126,79
1,5	119,95	132,90	145,79
2	132,93	147,17	161,36
3	152,13	168,27	184,35
4	166,86	184,45	201,98
5	178,95	197,73	216,43

Tabella 4.3.2: Valori di precipitazioni lorde relative alle rispettive durate in ore

## 4.4 Calcolo del tempo di corrivazione del bacino

Nei modelli di trasformazione afflussi - deflussi si fa l'ipotesi che il tempo impiegato da una goccia di pioggia per raggiungere la sezione di chiusura del bacino scorrendo sempre in superficie sia una costante, che dipende soltanto dalla posizione del punto in cui è caduta. Questa assunzione ovviamente ha dei limiti, tenendo conto del fatto che lo scorrimento superficiale avviene per la maggior parte in canalizzazioni naturali, anche di dimensioni molto ridotte, infatti, in esse, la velocità dell'acqua che scorre in superficie dipende dall'altezza d'acqua, che ovviamente varia al

variare della portata. A favore della affermazione precedentemente descritta, vi è la considerazione che la velocità dell'acqua si mantiene pressoché costante da monte verso valle, dal momento che la diminuzione di pendenza è bilanciata dai cambiamenti di larghezza, di profondità e di scabrezza.

Il tempo impiegato da una goccia d'acqua per raggiungere la sezione di chiusura prende il nome di *tempo di corrivazione*. Secondo la definizione classica, il tempo di corrivazione  $T_c$  di un bacino è il tempo che impiega una "goccia d'acqua" caduta nel punto idraulicamente più lontano del bacino per giungere alla sezione di chiusura, ovvero il tempo necessario perché il bacino sia integralmente contribuente, quindi, ad ogni punto del bacino corrisponde un particolare valore del tempo di corrivazione, dunque, un importante punto del bacino è quello idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, cioè il punto dello spartiacque da cui ha origine l'asta principale della rete idrografica. La definizione di tempo di corrivazione consente di spiegare perché la piena si verifica proprio se l'evento meteorico ha una durata almeno pari al tempo di corrivazione, dato che in questo caso tutta l'area scolante contribuisce ai fini del deflusso superficiale. Il concetto di tempo di corrivazione permette anche di giustificare perché nei piccoli bacini sono sufficienti piogge brevi per determinare eventi di piena.

Il tempo di corrivazione solitamente, viene stimato utilizzando formule empiriche derivate dall'analisi di casi reali, che esprimono il legame esistente tra il tempo di corrivazione e alcune grandezze caratteristiche del bacino di facile determinazione.

Di seguito vengono descritte alcune delle relazioni più usate per determinare il tempo di corrivazione del bacino, a partire dalla espressione più utilizzata in Italia, ovvero la formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A_b} + 1.5 \cdot L_b}{0.8 \cdot \sqrt{H_m}}$$

Dove:

$A_b$  = area del bacino (km<sup>2</sup>);

$L_b$  = lunghezza asta principale (km);

$H_m$  = quota media sulla sezione di chiusura (m).

La formula di Giandotti viene utilizzata per bacini idrografici con area che varia fra i 170 e i 70000 km<sup>2</sup>, per questo motivo è stata successivamente modificata da Aronica e Paltrinieri per consentire l'applicazione a bacini di piccole dimensioni (minori di 10 km<sup>2</sup>).

$$T_c = \frac{\frac{1}{M \cdot d} \cdot \sqrt{A_b} + 1.5 \cdot L_b}{0.8 \cdot \sqrt{H_m}}$$

Dove  $M$  e  $d$  sono costanti numeriche che assumono in funzione del tipo di suolo e della permeabilità dei terreni del bacino in studio come riporta la tabella 5.2.1.

<b>Tipo di copertura</b>	<b>M</b>
Terreno nudo	0,667
Terreni coperti con erbe rade	0,25
Terreni coperti da bosco	0,2
Terreni coperti da prato permanente	0,167
<b>Permeabilità</b>	<b>d</b>
Terreni semi-permeabili	1,27
Terreni poco permeabili	0,96
Terreni mediamente permeabili	0,81
Terreni molto permeabili	0,69

**Tabella 5.2.1: Valori delle costanti M e d della formula di Aronica e Paltrinieri (Ferro, 2013).**

Nella scelta del tempo di corrivazione occorre tenere conto delle incertezze insite nelle formule che consentono di stimarlo; ogni formula, vista la natura prevalentemente empirica, è valida per i bacini per i quali è stata ricava e tarata. Nel caso oggetto di studio, è stata utilizzata la formula di Giandotti, ottenendo un tempo di 27,3 h; ma considerando gli errori insiti nella stima di questo parametro, per la determinazione del tempo di corrivazione è stato anche usato un secondo metodo, ovvero: sono state considerate delle velocità del tratto crescenti e moltiplicandole per la lunghezza del canale, hanno portato alla determinazione di diversi tempi di corrivazione come viene mostrato in tabella 6.2.2.

<b>Tc [h]</b>	<b>Velocità [m/s]</b>
<b>8</b>	0,72
<b>11</b>	0,52
<b>19</b>	0,30
<b>36</b>	0,16
<b>48</b>	0,12
<b>120</b>	0,05

**Tabella 6.2.2: Valori di tempi di corrivazione in relazione alle velocità.**

In definitiva, tenendo in considerazione anche l'opinione di esperti che operano sul campo nella sezione di chiusura del bacino in esame, si è ritenuto opportuno considerare un tempo di corrivazione di 48h, visto che valori di velocità superiori o inferiori risultano non idonei per le

caratteristiche del bacino di interesse. Per scopi didattici, nelle analisi seguenti verranno confrontati i diversi tempi di corrivazione ricavati con le varie soluzioni.

## 4.5 Modello dell'invaso lineare

Il metodo dell'invaso, concepito inizialmente come metodo di verifica da Paladini (1901) e Fantoli (1904) come un metodo di verifica, fu trasformato alla fine degli anni 20 da Massari (1927), Puppini (1923) e Supino (1929) in un metodo di progetto.

Il modello dell'invaso lineare è un modello integrato, in quanto contempla più processi del ciclo idrologico; concettuale, schematizzando il processo fisico da pioggia a portata ed è concentrato, in quanto si applica generalmente per aree che comprendono 100-200 km<sup>2</sup>.

Nel modello dell'invaso lineare, il bacino è schematizzato come un serbatoio lineare, trascurando il fenomeno del ritardo (caratteristica del metodo cinematico):

$$W = k \cdot q \quad (1)$$

Dove  $W$  è il volume immagazzinato nel bacino,  $k [T]$  è una costante che dipende dalla forma del serbatoio, ossia della morfologia della rete idrografica, denominata costante d'invaso. Questa relazione ci dice che in un serbatoio lineare, in ogni istante la portata uscente è proporzionale al volume invasato nel serbatoio. La relazione lineare tra  $W$  e  $q$  può apparire azzardata dato che, in realtà, la portata uscente da un serbatoio attraverso una luce è normalmente proporzionale al battente idrico  $h$  elevato ad un esponente pari a  $\frac{1}{2}$  luce a battente o  $\frac{3}{2}$  luce a stramazzo. Si è riscontrato però che lo schema concettuale adottato, dovendo rappresentare il funzionamento di un bacino idrografico (rurale o urbano) e non di un verso serbatoio, fornisce risultati molto apprezzabili.

Il metodo dell'invaso si basa sull'equazione di continuità: la differenza tra il volume in ingresso (pioggia netta) e volume uscente, in un intervallo di tempo  $dt$ , costituisce una variazione di volume invasato:

$$p(t) - q(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (2)$$

Dove  $p$  e  $q$  rappresentano la portata rispettivamente entrante e uscente nel serbatoio al tempo  $t$  e con  $W$  è indicato il volume contenuto nel serbatoio al tempo  $t$ .

Inoltre, viene ipotizzato che la precipitazione si realizzi con una intensità costante nel tempo e pari ad  $i$ , pertanto la portata meteorica di può scrivere:

$$p = \phi i A \quad (3)$$

Dove  $\phi$  è il coefficiente di deflusso e  $A$  la superficie del bacino idrografico.

Sostituendo la relazione (1) nell'equazione di continuità si ottiene:

$$p(t) - q(t) = \frac{dW(t)}{dt} = \frac{d(kq(t))}{dt} = k \frac{dq}{dt}$$

$$p(t) = k \frac{dq}{dt} + q(t)$$

Moltiplicando tutti i termini per  $e^{\frac{t}{k}}$  si ottiene:

$$p(t)e^{\frac{t}{k}} = ke^{\frac{t}{k}} \frac{dq}{dt} + q(t)e^{\frac{t}{k}}$$

Osservando che:

$$ke^{\frac{t}{k}} \frac{dq}{dt} + q(t)e^{\frac{t}{k}} = \frac{d}{dt} \left[ ke^{\frac{t}{k}} q(t) \right]$$

$$p(t)e^{\frac{t}{k}} = \frac{d}{dt} \left[ ke^{\frac{t}{k}} q(t) \right]$$

Integrando si ottiene:

$$ke^{\frac{t}{k}} q(t) = \int_0^t p(\tau) e^{\frac{\tau}{k}} d\tau + cost$$

$$q(t) = \int_0^t \frac{e^{-\frac{(t-\tau)}{k}}}{k} p(\tau) d\tau \quad [+cost]$$

Se si ipotizza l'intensità di pioggia costante allora anche  $p(t)$  risulta costante nel tempo.

Integrando l'equazione scritta e considerando il tempo  $t$  inferiore alla durata della pioggia  $T$ , si ottiene:

$$q(t) = \int_0^t \frac{e^{-\frac{(t-\tau)}{k}}}{k} p(\tau) d\tau = p \int_0^t \frac{e^{-\frac{(t-\tau)}{k}}}{k} d\tau = p \left( 1 - e^{-\frac{t}{k}} \right) \quad \text{per } 0 < t < T$$

Considerando invece un tempo  $t$  superiore alla durata della pioggia  $T$ , si ha che  $p(t) = 0$  e quindi l'equazione di continuità diventa:

$$-q(t) = k \frac{dq}{dt}$$

Integrando si ottiene:

$$q(t) = p \left( 1 - e^{-\frac{T}{k}} \right) e^{-\frac{(t-T)}{k}} = Q_{max} e^{-\frac{(t-T)}{k}} \quad \text{per } t > T$$

Al variare della durata dell'evento pluviometrico varia la portata massima  $Q_{max}$

$$Q_{max} = p \left( 1 - e^{-\frac{T}{k}} \right)$$

Nelle pagine seguenti vengono riportati i grafici, prodotti a partire dal modello dell'invaso lineare, con i diversi tempi di corrivazione e tempi di ritorno presi in considerazione.

Per semplicità grafica, gli idrogrammi vengono divisi in due con i rispettivi tempi di ritorno:

1. Tempi di pioggia di 8h, 11h, 19h;
2. Tempi di pioggia di 36h, 48h, 120h.

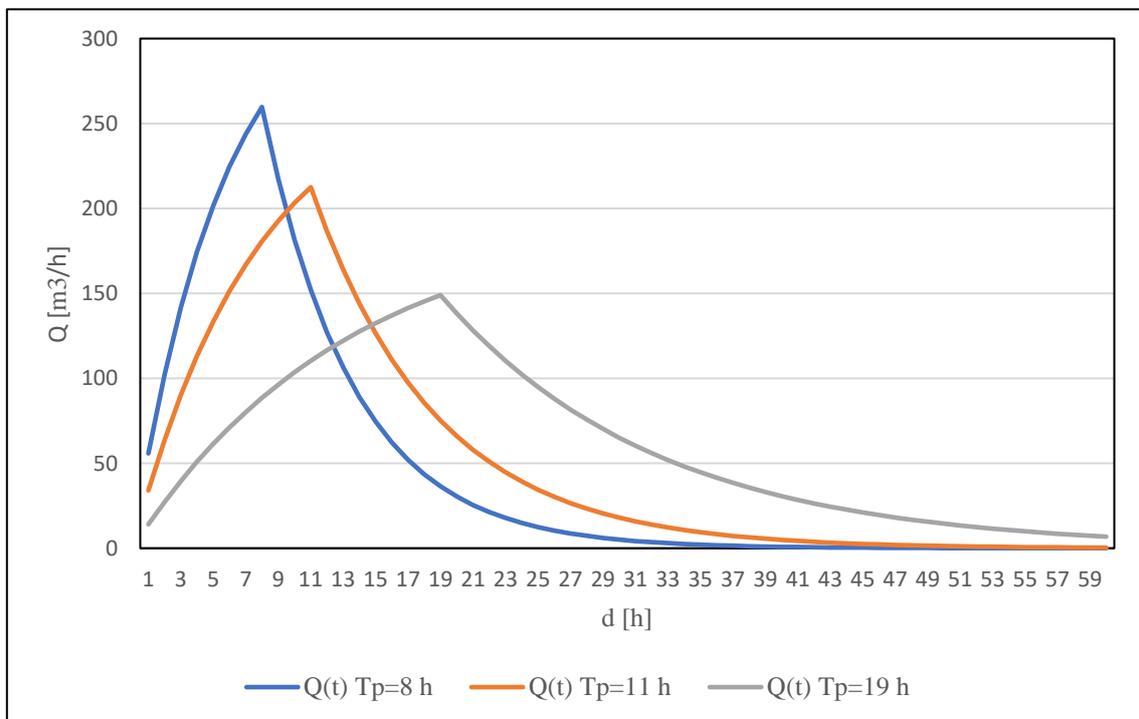


Figura 4.5.1: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $p=\text{cost}$ )  $Tr=50$  anni  $Tc= 8h, 11h, 19h$

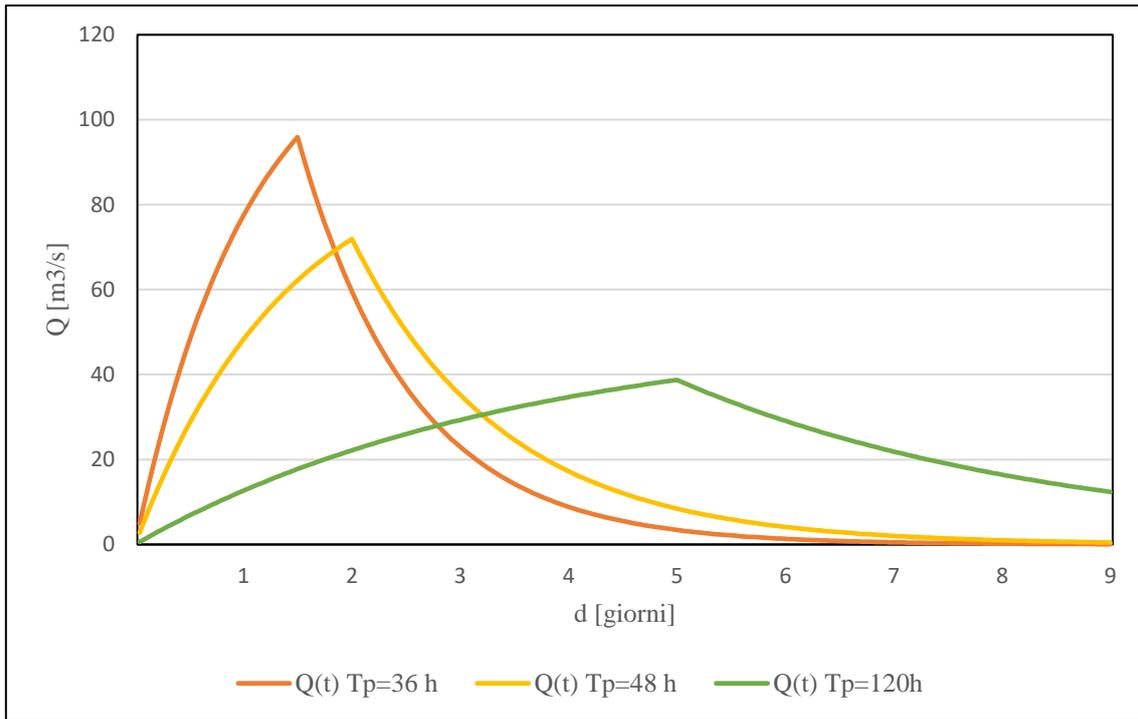


Figura 4.5.2: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $p=\text{cost}$ )  $T_r=50$  anni  $T_c= 36\text{h}, 48\text{h}, 120\text{h}$

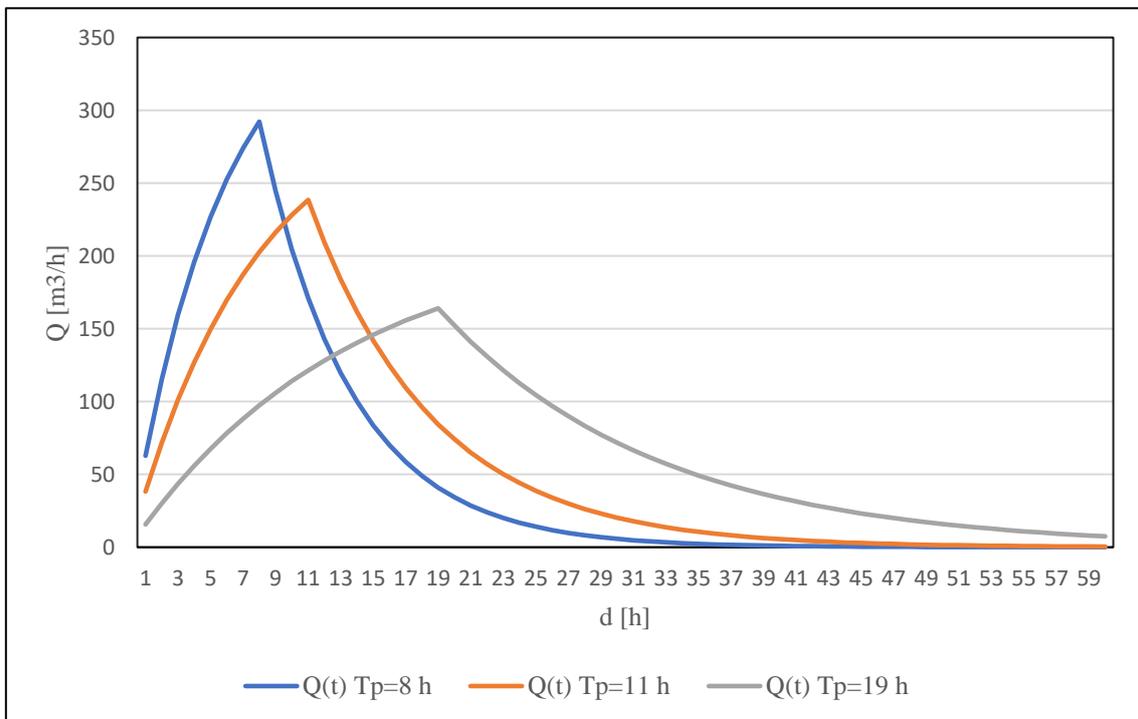


Figura 4.5.3: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $p=\text{cost}$ )  $T_r=100$  anni  $T_c= 8\text{h}, 11\text{h}, 19\text{h}$

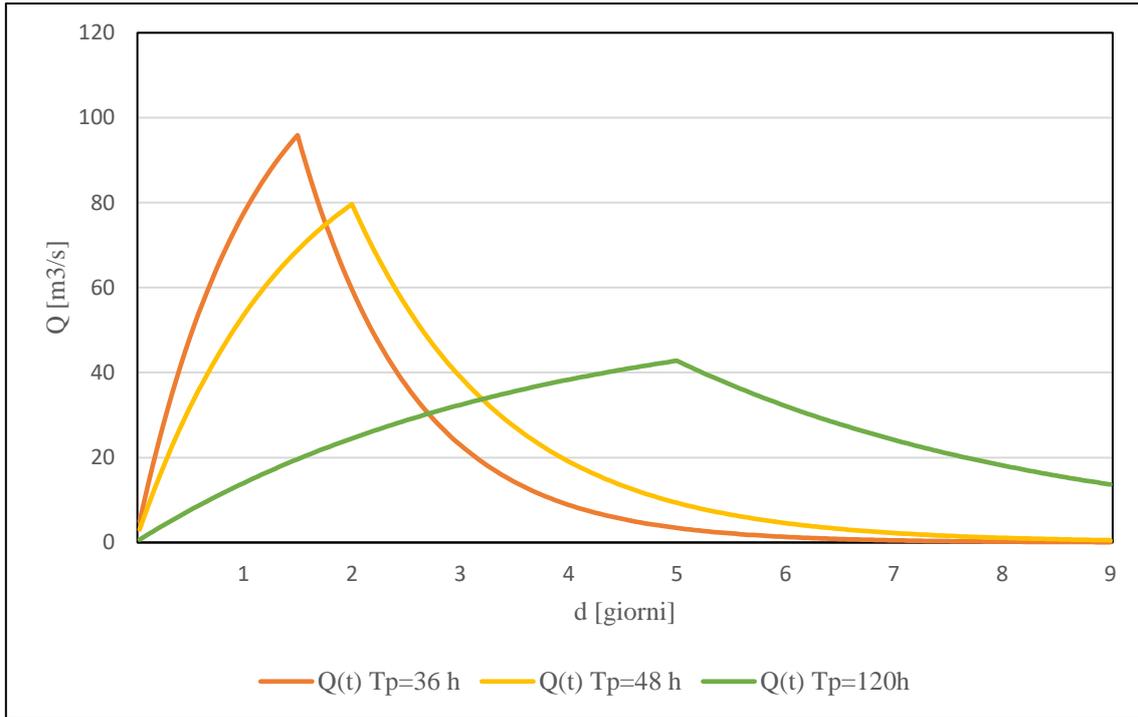


Figura 4.5.4: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $p=cost$ )  $T_r=100$  anni  $T_c= 36h, 48h, 120h$

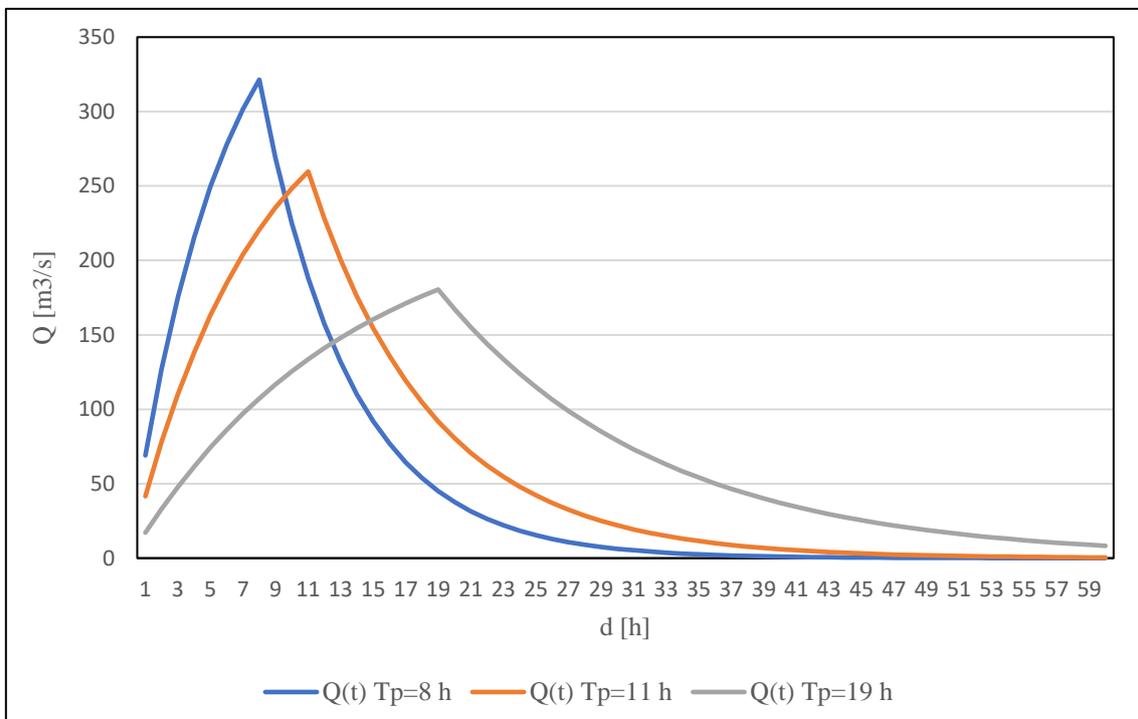


Figura 4.5.5: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $p=cost$ )  $T_r=200$  anni  $T_c= 8h, 11h, 19h$

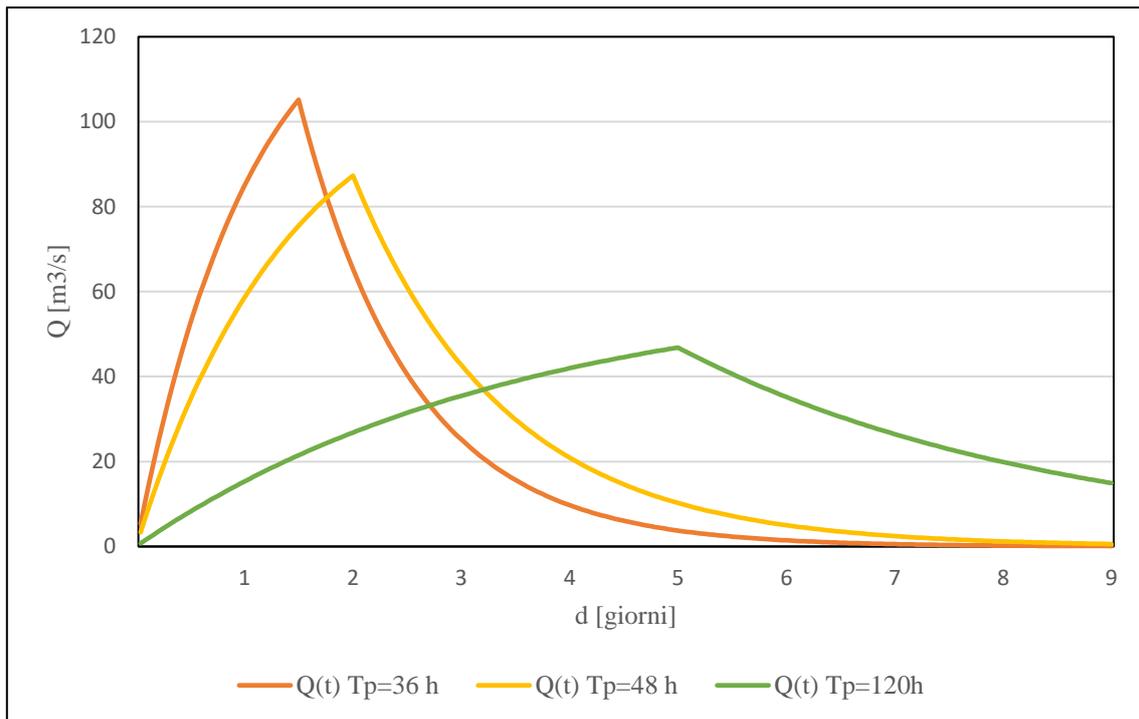


Figura 4.5.6: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $p=cost$ )  $Tr=200$  anni  $Tc= 36h, 48h, 120h$

## Capitolo 5: Analisi regionale di frequenza delle precipitazioni

Nel presente capitolo, viene descritta l'analisi regionale di frequenza delle precipitazioni nell'area di studio, eseguita per confrontare i risultati con quelli ottenuti dall'analisi locale descritta nei capitoli precedenti. In questo modo, possono essere selezionati i risultati più idonei per la determinazione del volume dell'invaso obiettivo principale dello studio.

L'analisi regionale di frequenza delle precipitazioni permette di determinare dei valori di progetto di adeguato rischio per grandezze idrologiche quali le precipitazioni in punti privi di misure all'interno del bacino idrografico. La disponibilità dei dati nelle stazioni di misura di interesse raramente supera i 50 anni. Facendo riferimento al dataset utilizzato per l'analisi locale (Capitolo 2), 50 anni o più di dati sono presenti nell'area di studio solo in tre pluviometri (Alfonsine, Lugo, Imola), un numero limitato per l'estensione del bacino idrografico oggetto di studio, comportando pertanto, un notevole grado di incertezza durante la stima delle distribuzioni di probabilità e dei loro parametri. Pertanto, sembra logico fare uso di curve regionali che, come dimostrato in diversi studi (ad esempio, Greis e Wood, 1981), porta alla

riduzione di questa indeterminazione avvalendosi di un maggior numero di osservazioni fornito dall'insieme dati-stazioni.

La regionalizzazione, quindi, è un metodo utilizzato per la determinazione della variabile di progetto sulla base dell'analisi di frequenza di dati di portata, dove, le osservazioni idrometriche sono prese in altre sezioni di chiusura di bacini idrografici appartenenti alla stessa regione idrologica in cui ricade quello esaminato, utilizzando la cosiddetta *analisi regionale di frequenza delle piogge*. Il concetto fondamentale che sta alla base di questa analisi è la sostituzione dello spazio al tempo: sfruttando tutta l'informazione (idrometrica, climatica e geomorfologica) di una certa regione, per aumentare l'accuratezza delle stime nei siti della stessa regione sprovvisti di osservazioni di portata, cercando di ovviare alla limitatezza nel tempo dell'informazione, (v. ad es. Dalrymple, 1960; Hosking e Wallis, 1997).

I modelli di stima della pioggia per bacini fluviali non strumentati o scarsamente strumentati, si propongono quindi, di combinare le informazioni regionali e locali di natura diversa rispetto ai dati di precipitazione, che possono riferirsi al corso d'acqua considerato, al relativo bacino imbrifero e alla climatologia della zona, in modo da ridurre notevolmente le incertezze di stima. Dunque, è necessario individuare un insieme di sezioni fluviali in cui si disponga di serie storiche delle portate al colmo di piena e il cui bacino sotteso risulti, in base ad opportuni criteri di similitudine, idrologicamente affine a quello sotteso dalla sezione di interesse, è possibile utilizzare l'informazione idrometrica disponibile nelle stazioni strumentate per stimare la distribuzione di probabilità nel sito di interesse, permettendo di determinare le cosiddette *regioni omogenee*.

In questo modo attraverso l'opportuno accorpamento delle osservazioni disponibili nelle sezioni strumentate, è possibile ottenere campioni con dimensioni molto maggiori di quelle caratteristiche della singola stazione idrometrica e sulla base dei quali risulta quindi possibile ottenere stime della distribuzione di probabilità delle portate di piena più affidabili di quelle ottenute in un'analisi di tipo locale.

Nell'analisi fatta dal Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale nel 1996 per la valutazione del volume della cassa di espansione presa in esame, veniva utilizzato un metodo di regionalizzazione ovvero la procedura utilizzata nello studio del Prof. Ezio Todini "Analisi regionale degli eventi estremi delle precipitazioni e delle portate di piena", POSTER, IDEA (Ottobre 1994). Tale studio è stato condotto sull'intero bacino idrografico del Fiume Reno adottando una legge probabilistica per le piogge estreme a tre parametri del tipo GEV (Generalized Extreme Value), la quale fornisce un adattamento ai dati migliore della legge di Gumbel.

Nel seguente studio invece sono stati utilizzati dei dataset dell'Emilia-Romagna, ricavati da un lavoro di collaborazione tra l'Autorità di Bacino distrettuale del Fiume Po (ADBPO) i dipartimenti

DIATI, del Politecnico di Torino, DICAM, dell'Università di Bologna DICA, del Politecnico di Milano, e le Università di Brescia e Parma. Tale progetto denominato “Caratterizzazione del regime di frequenza degli estremi idrologici nel Distretto Po, anche considerando scenari di cambiamento climatico”, ha previsto lo sviluppo e sperimentazione di tecniche di stima del regime degli estremi di precipitazione a scala puntuale, nel Distretto del Fiume Po. Essendo eseguito, sulla base dei dati idro-pluviometrici più recenti e delle tecniche più avanzate ad oggi disponibili, si ritiene che tale studio possa essere più aggiornato di quello eseguito nel 1996, e si è pertanto preso a riferimento per l'analisi regionale dell'area di studio.

In particolare, tra i risultati ottenuti nell'ambito del progetto di cui sopra, quelli utilizzati nel presente lavoro di Tesi sono i seguenti:

- dataset puntuale di massimi annui di precipitazione relativi alle durate di 1h, 3h, 6h, 12h, 24h;
- dataset in formato raster dei parametri di una relazione media regionale per le curve di possibilità pluviometrica (LSPP).

Per quanto riguarda il dataset distrettuale degli estremi pluviometrici sub-giornalieri dell'Emilia-Romagna, dopo varie integrazioni, è stato possibile costruire un dataset con copertura dal 1927 al 2020, ottenendo un totale di 11800 massimi annui per ogni durata, acquisiti da 454 stazioni. Tale dataset fa parte di una rete più ampia di serie di massimi annuali distribuiti su tutto il territorio italiano (I2-RED), edito da Mazzoglio et al, 2020, il cui accesso è consentito previa richiesta agli autori. Nell'ambito della presente Tesi, da I2-RED, è stato creato un dataset specifico per l'area oggetto di studio con un buffer di 5km, che comprende i pluviometri di Alfonsine, Bagnacavallo, Faenza, Granarolo Faentino, Imola Mario Neri, Lugo, Lugo di Romagna, Massa Lombarda, Voltana, Lavezzola, Sant'Agata sul Santerno, Tebano, Villa San Martino. Le serie storiche disponibili in tali stazioni di misura sono state utilizzate per eseguire il metodo di regionalizzazione della pioggia indice, tramite l'approccio di Hosking e Wallis (1993, 1997). I dataset raster per le curve LSPP medie regionali sono invece state ottenute tramite la tecnica di *Patched Kriging*, recentemente sviluppata da Libertino et. Al. (2018). Entrambe le tecniche vengono di seguito descritte.

## 5.1 Metodo della pioggia indice mediante l'approccio di J.R.M. Hosking e J.R. Wallis

Il metodo della pioggia indice consiste nell'individuare una regione omogenea nei riguardi della variabile idrologica di interesse e caratterizzarla con una distribuzione di probabilità degli eventi idrologici estremi adimensionali. Tale distribuzione si ritiene valida, a meno di un fattore di scala, per ogni sito appartenente alla regione e i suoi parametri sono stimati utilizzando unitamente l'insieme dei dati osservati nella regione stessa.

Indicando con  $X$  la variabile idrologica considerata, avente probabilità di non superamento  $F(x)$ , ovvero assegnato tempo di ritorno  $T = 1/[1 - F(x)]$ , l'analisi regionale consiste nel definire, in riferimento alla regione omogenea, la funzione di probabilità di non superamento  $F(x')$  della variabile casuale  $X' = X/\mu$ , ottenuta adimensionalizzando la variabile originaria  $X$  rispetto ad una grandezza indice  $\mu$  chiamata anche fattore di scala. Questo significa che in una regione omogenea, la stima del quantile con assegnato tempo di ritorno  $T$  può essere espresso come il prodotto tra la grandezza indice  $\mu(X)$  e il quantile adimensionale  $X'(T)$ :

$$X(T) = X'(T) \cdot \mu(X)$$

La funzione  $F(x')$ , la sua inversa  $x'(F)$  e l'equivalente legge  $X'(T)$  vengono generalmente indicate, nel campo idrologico, con il termine di curve di crescita.

Il procedimento più utilizzato è quello proposto da Dalrymple nel 1960, alla base del quale c'è l'ipotesi che si possa definire un'unica curva di crescita  $X'(T)$  per ogni regione omogenea. Questo comporta che tutte le curve di crescita, dei siti che ricadono all'interno di una determinata regione omogenea, seguano la stessa distribuzione di probabilità e i parametri vengono stimati utilizzando unitamente l'insieme dei dati osservati nella regione stessa. Inoltre, secondo Dalrymple, il fattore di scala  $\mu(X)$  viene definito come il valore medio della serie osservata di precipitazioni massime annuali (*Annual Maximum Series, AMS*), per la specifica sezione di interesse e può essere valutato se si dispongono siti caratterizzati da almeno 5÷10 anni di osservazioni. Il vantaggio di questo indice è che l'incertezza associata alla stima della media è molto minore rispetto alla stima diretta della variabile di progetto.

Nel caso studio, per la determinazione del quantile adimensionale  $X'(T)$  viene utilizzato l'approccio di Hosking e Wallis, fondato sull'uso degli L-momenti, che hanno significato analogo ai momenti tradizionali (possono essere utilizzati per descrivere e caratterizzare un modello probabilistico e un campione di osservazioni), ma i loro stimatori sono combinazioni lineari delle osservazioni

riordinate, per questo motivo le loro stime risultano meno affette dai problemi di distorsione dei momenti statistici convenzionali.

Gli autori propongono tre fasi per l'applicazione di questo approccio:

1. *Analisi dell'attendibilità dei dati (Misura di anomalia)*: viene effettuato un controllo di qualità sui dati relativi ad ogni sito strumentato al fine di individuare ed eventualmente eliminare errori grossolani di raccolta, trasmissione, registrazione, editing e di verificare che la serie storica sia omogenea nel tempo, ovvero che non presenti effetti di non stazionarietà. Nel caso in esame, sono state eliminate tutte le stazioni che non presentavano meno di 5 anni di osservazioni (in particolare i dati relativi ai pluviometri di Bagnacavallo, Massa Lombarda e Voltana).
2. *Omogeneità della regione (Misura di eterogeneità)*: viene effettuato confrontando la dispersione degli L-momenti adimensionali campionari del gruppo di stazioni con la dispersione attesa per un gruppo omogeneo (dovuta alla sola variabilità campionaria). In generale quindi prevede la stima di tre indici di eterogeneità  $H_1, H_2, H_3$  basati rispettivamente su L-CV, L-CV e L-skewness, L-skewness e L-kurtosis. A seconda del valore dell'eterogeneità, una regione può essere dichiarata sufficientemente omogenea rispetto ai corrispondenti L-momenti per  $H_k < 1$ , per  $1 \leq H_k < 2$  la regione è probabilmente eterogenea, per  $H_k > 2$  si ha una regione assolutamente eterogenea e in questo caso l'ipotesi dell'omogeneità della regione è da scartare. In riferimento al caso studio, vengono riportati rispettivi valori di  $H_1, H_2$  e  $H_3$  per le durate di 1h, 3h, 6h, 12h, 24h.

<b>Misure di eterogeneità per 1000 simulazioni</b>			
	$H_1$	$H_2$	$H_3$
<b>1h</b>	-0,81	0,21	0,4
<b>3h</b>	0,6	-0,49	-0,34
<b>6h</b>	-1,49	-1,28	-0,9
<b>12h</b>	-1,23	-0,94	-0,83
<b>24h</b>	-1,35	-0,95	-0,52

**Tabella 7.1.1: misure di eterogeneità del test di Hosking e Wallis**

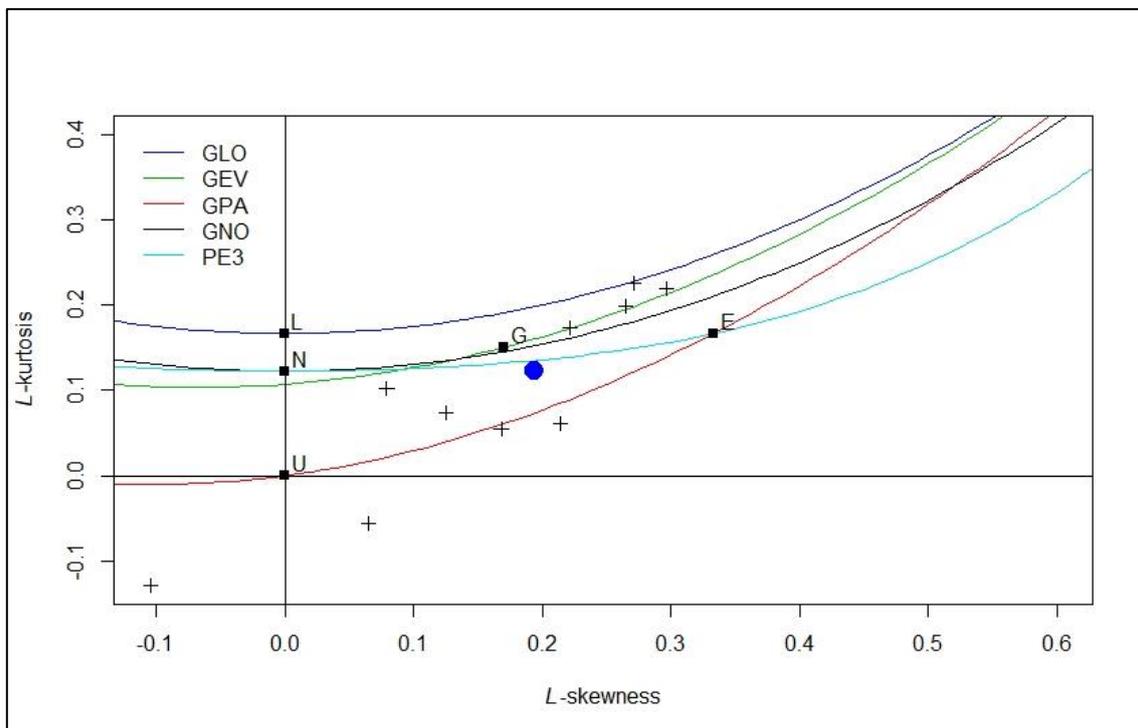
Considerando che la regione oggetto di studio è molto piccola, si attende che sia omogenea (come confermano i dati in tabella 7.1.1) e che quindi i dati siano attendibili e non presentino particolari tipi di anomalie.

3. *Scelta distribuzione di frequenza per il campione regionale e la stima dei parametri (parent distribution)*: L'obiettivo è quello di scegliere la distribuzione che fornisca la migliore stima del campione regionale. La scelta della distribuzione è basata sugli L-momenti regionali, ottenuti come media pesata della numerosità dei campioni degli L-momenti stimati in ogni

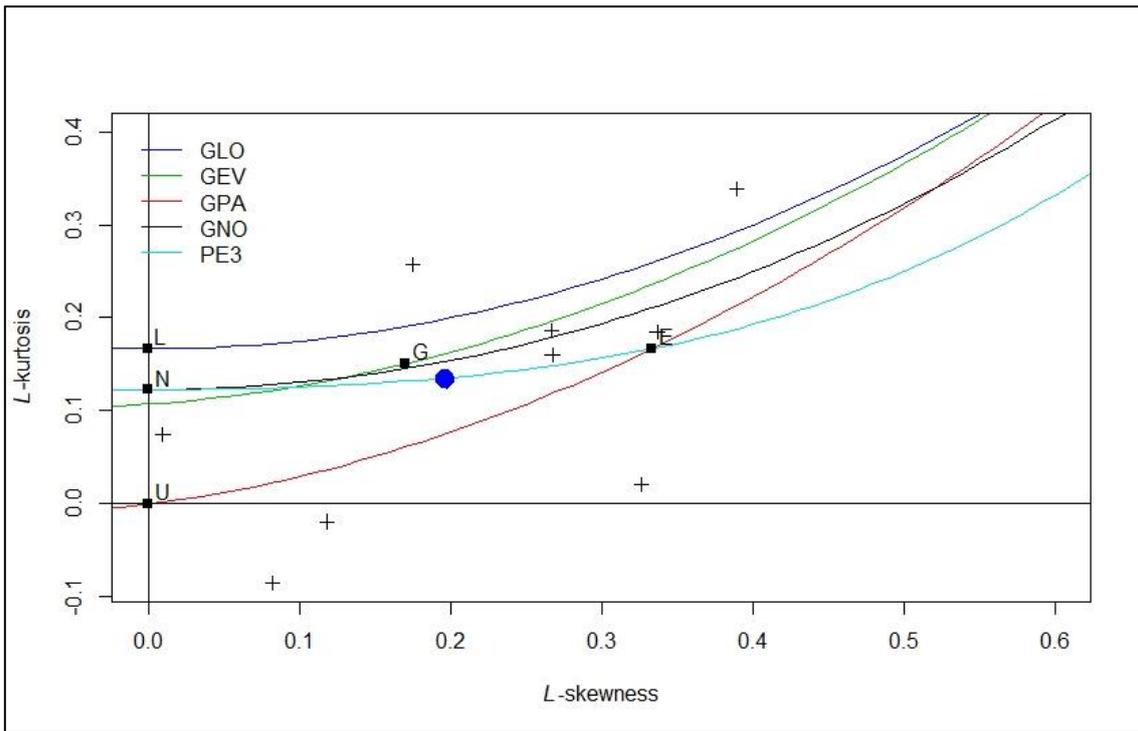
stazione. La scelta viene effettuata sulla base di test di adattamento che valutano la bontà della stima (*i.e. goodness-of-fit*) sulla base di quanto L-Cs e L-kurtosis della distribuzione teorica interpolata, si adatti alla media regionale degli L-Cs e L-kurtosis dei dati osservati.

Per ulteriori approfondimenti delle varie fasi si rimanda alla pubblicazione originale: (*Hosking e Wallis, 1993, 1997*).

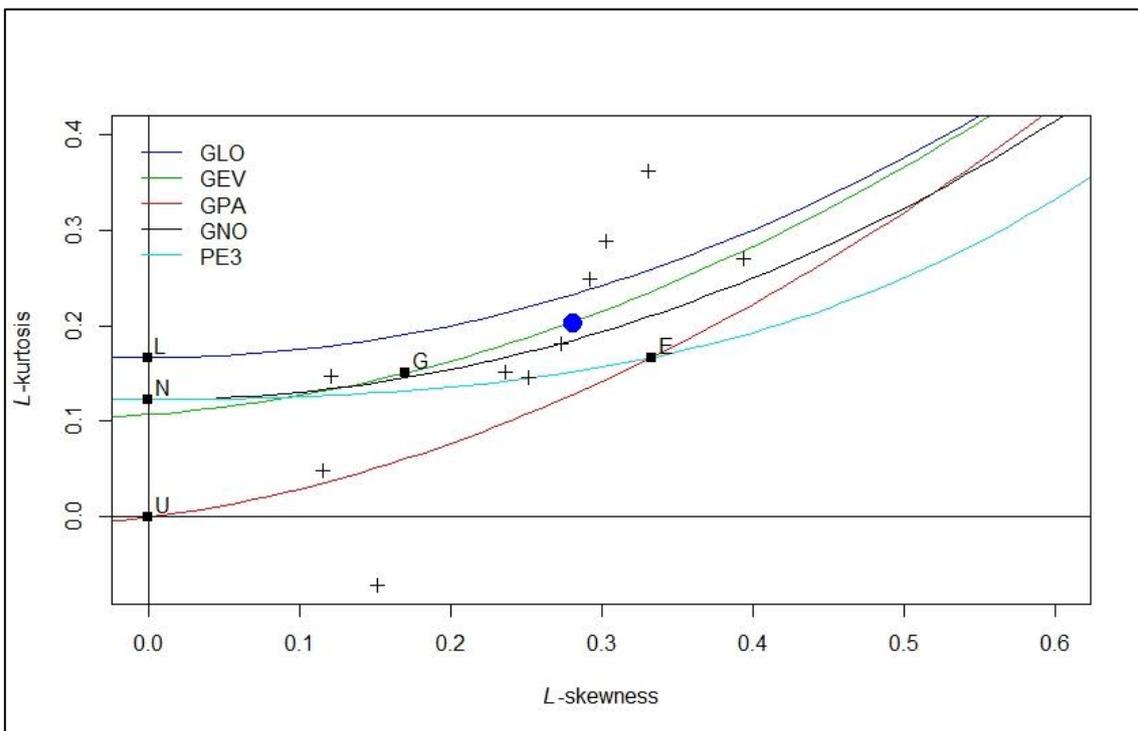
Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il caso specifico in esame. In particolare, vengono mostrati i diagrammi diagnostici ricavati tramite il codice di calcolo di R, per le rispettive durate di precipitazioni di 1h, 3h, 6h, 12h, 24h. Nel grafico, vengono rappresentati sul piano delle ascisse L-skewness e sull'asse delle ordinate L-kurtosis, che insieme identificano il carattere statistico di una distribuzione. Tali diagrammi riportano l'andamento teorico delle distribuzioni a tre parametri (rappresentate come linee) e a due parametri (rappresentate come punti). In questi diagrammi, il punto blu rappresenta la media del regime di frequenza regionale ed è ottenuto tramite la media pesata dei momenti delle diverse stazioni, ovvero, i punti contrassegnati con l'indicatore "+". La vicinanza, in termini di distanza, dal punto della regione considerata alla curva rappresentante una distribuzione teorica, ne suggerisce l'adozione per quella particolare serie storica.



**Figura 5.1.1: Diagramma diagnostico di Hosking e Wallis per durata di 1h**



**Figura 5.1.2: Diagramma diagnostico di Hosking e Wallis per durata di 3h**



**Figura 5.1.3: Diagramma diagnostico di Hosking e Wallis per durata di 6h**

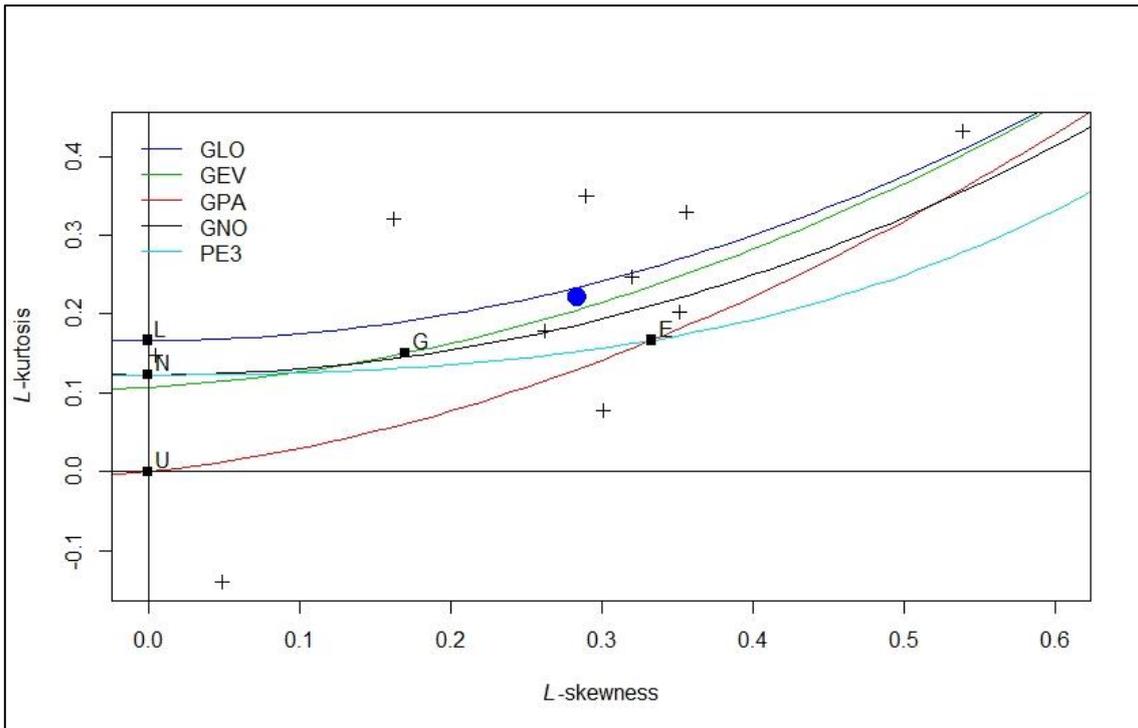


Figura 5.1.4: Diagramma diagnostico di Hosking e Wallis per durata di 12h

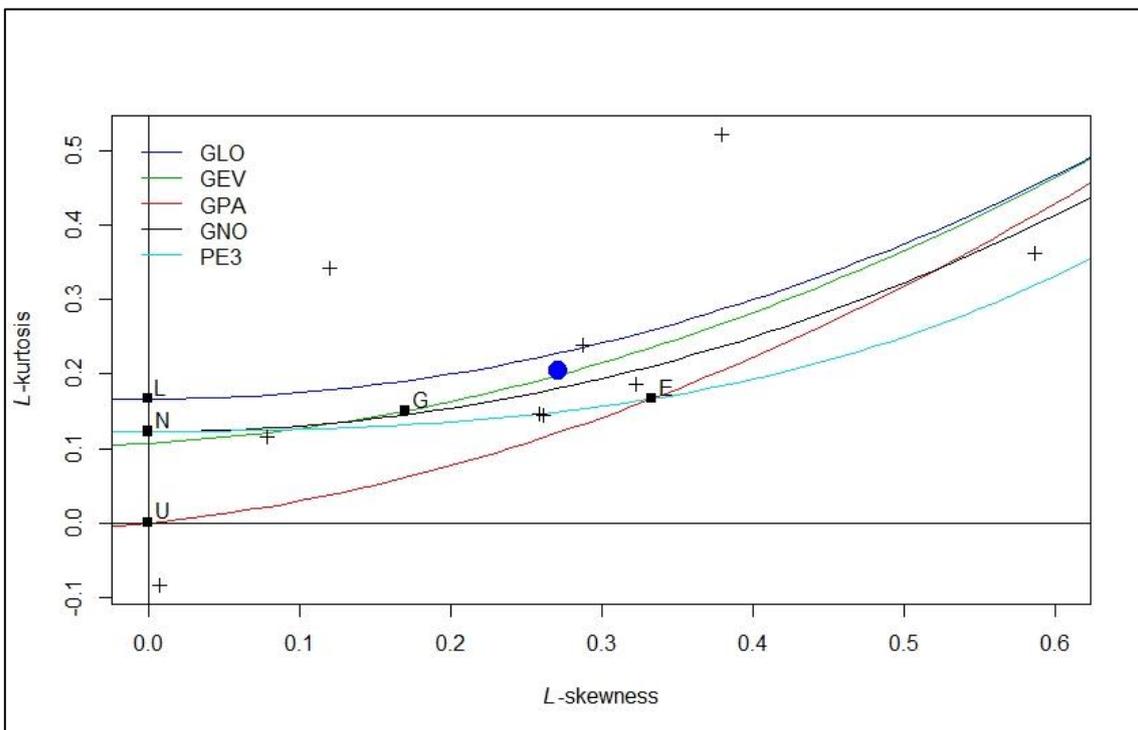


Figura 5.1.5: Diagramma diagnostico di Hosking e Wallis per durata di 24h

La scelta della distribuzione influenza in maniera rilevante i risultati che si ottengono nell'analisi regionale, perché le distribuzioni hanno andamenti molto diversi per periodi di elevato ritorno. Nel caso in esame, le distribuzioni di frequenza che approssimano meglio la regione sono: Generalized Logistic, Generalized Extreme Value, Generalized Normal e in altri casi anche Person type 3. Si è ritenuto opportuno prendere per le varie durate la distribuzione a tre parametri GEV, perché è quella che si adatta meglio ai dati e risulta più flessibile, inoltre è presente in tutte le durate, mentre le altre distribuzioni erano presenti solo in alcune durate di precipitazione. Inoltre, la *Distribuzione Generalizzata dei Valori Estremi GEV* ( $\mu, \sigma, \xi$ ) è una famiglia di distribuzioni di probabilità che comprende la distribuzione di Frechet, la distribuzione di Weibull e la distribuzione di Gumbel (come caso limite). Dunque, costituisce un'opzione migliore rispetto alle altre distribuzioni proposte, in quanto a continuità con la distribuzione di Gumbel che invece è stata utilizzata nell'analisi locale fatta nei precedenti capitoli.

Una volta scelta la distribuzione ed ottenuti i diversi parametri ( $\mu, \sigma, \xi$ ) per ogni durata, è stato possibile quindi determinare i quantili adimensionali ottenuti per i tempi di ritorno di interesse, rispettivamente di 50, 100 e 200 anni. Essi sono stati successivamente moltiplicati per le medie pesate per ogni durata, ricavando così i valori delle altezze di precipitazioni secondo il metodo della pioggia indice, come mostra la tabella 5.1.6.

<b>d [h]</b>	<b>h<sub>50</sub> [mm/h]</b>	<b>h<sub>100</sub> [mm/h]</b>	<b>h<sub>200</sub> [mm/h]</b>
1	53,5	60,0	67,1
3	66,4	73,9	81,8
6	85,0	98,3	113,2
12	102,7	118,6	136,6
24	124,5	143,1	163,9

**Tabella 5.1.8: Altezze di precipitazioni**

## **5.2 Metodo di regionalizzazione basato su *patched Kriging***

Il metodo denominato di *patched Kriging*, sviluppato dal Politecnico di Torino (Libertino et al.2028), permette di sfruttare tutta l'informazione pluviometrica disponibile basandosi su una robusta procedura di gap-filling ottenuta mediante interpolazione *kriging* sequenziale, realizzata anno per anno, in modo da utilizzare anche le informazioni derivanti da stazioni pluviometriche

recenti o ricollocate in altre posizioni, che altrimenti, creano una situazione critica quando un evento molto rilevante è misurato in una stazione con poche osservazioni storiche.

Nello specifico il termine *kriging* indica una famiglia di metodi usati nell'ambito dell'analisi spaziale (geostatistica) che permettono di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio. Questa interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione della grandezza, cioè l'assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità, in base al quale le cose più vicine sono più simili rispetto alle cose più lontane (Legge di Tobler). Il valore incognito in un punto viene calcolato con una media pesata dei valori noti, i cui pesi vengono definiti da un modello di correlazione spaziale. Per una descrizione più accurata delle metodologie di kriging, si rimanda ad esempio ad Hengl, 2007.

Il metodo di regionalizzazione basato su patched kriging si compone principalmente in tre fasi:

1. Nella prima fase si effettua un'interpolazione dei dati dei massimi annuali di precipitazione effettuata anno per anno, separatamente per ogni durata che ci consente di ottenere un cubo di dati di pioggia, con estensione spaziale coincidente con l'area di analisi e numero di strati pari al numero di anni considerati (figura 5.2.1);
2. Nella seconda fase viene effettuata l'analisi di frequenza locale per singole stazioni con serie storiche complete (ricostruite e non). In particolare, una volta individuata una distribuzione di probabilità adeguata a rappresentare le serie dei massimi, il "cubo di dati" ottenuto (figura 5.2.1), formato da valori misurati e da valori ricostruiti, viene utilizzato per definire l'altezza di pioggia  $h_{d,T}$  relativa ad una determinata durata  $d$  e ad un determinato periodo di ritorno  $T$  avvalendosi della curva di probabilità pluviometrica media (calcolabile tramite l'espressione  $a \cdot d^n$  con  $a$  il coefficiente pluviometrico orario ed  $n$  l'esponente di invarianza di scala) e del fattore di crescita  $K(T)$ :

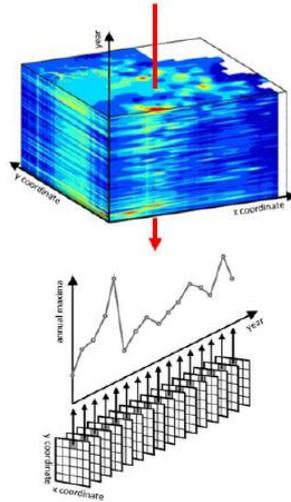
$$h_{d,T} = K(T) \cdot a \cdot d^n$$

3. Nella terza fase si effettua l'interpolazione dei parametri. Si utilizza in questo caso il metodo *regression kriging* basato su un modello di regressione in grado di analizzare localmente la relazione fra estremi di precipitazione e quota.

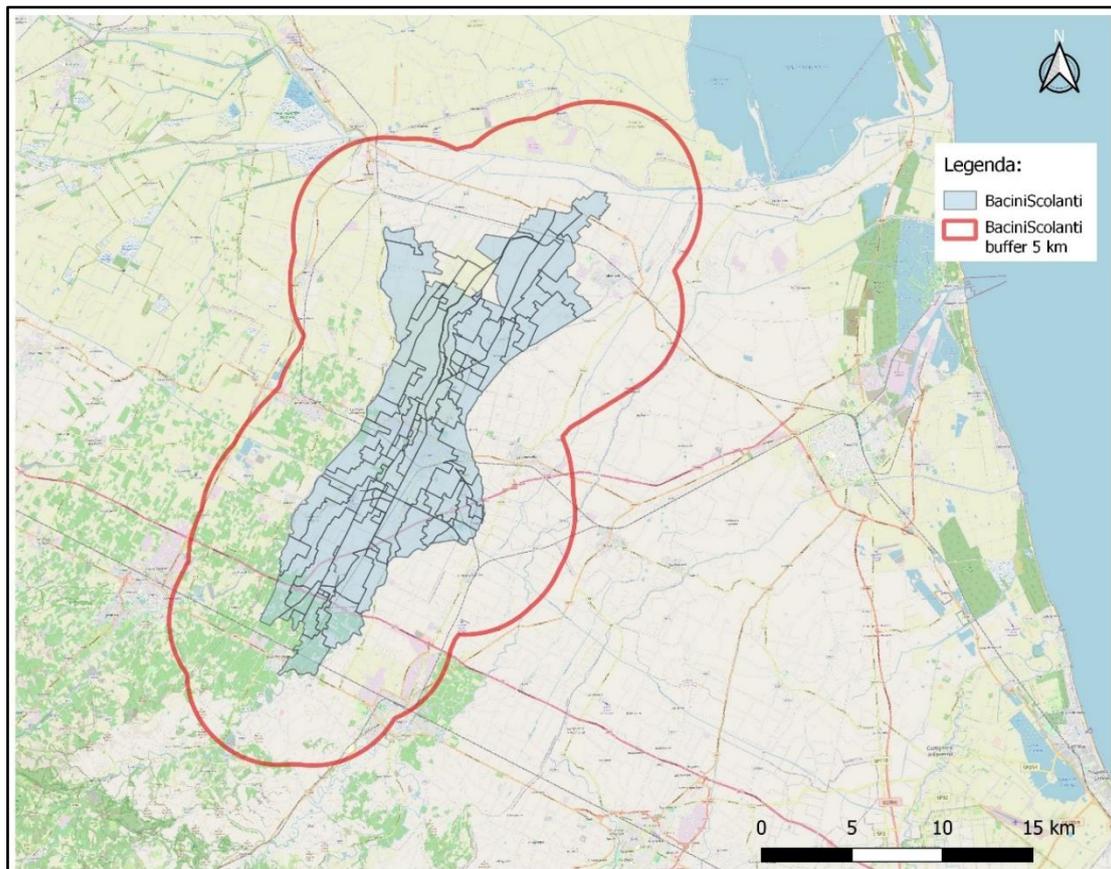
L'approccio non richiede la definizione di aree omogenee e si presta agevolmente a revisioni anche frequenti, ad esempio in presenza di nuove osservazioni di notevole entità.

Nell'ambito della conversazione detta sopra con ADBPO, tale metodo è stato applicato per l'intero Distretto del Fiume Po. Tra i diversi prodotti dello studio, sono presenti i file raster con i parametri  $K(T)$  per diverse distribuzioni e tempi di ritorno,  $n$  ed  $a$  delle curve di possibilità pluviometriche ( $h(d, T) = K(T) * a * d^n$ ). Ai fini delle analisi della presente Tesi, sono stati

estratti i valori dei file raster di  $n$ ,  $a$  e  $K(T)$  relativi alla distribuzione di Gumbel ed i tempi di ritorno di interesse (50, 100 e 200 anni), per l'area del caso studio, con un buffer di 5km in un sistema di riferimento EPSG:32632, come viene mostrato nella figura 5.2.2.



**Figura 5.2.1: Visualizzazione dell'estrazione di una serie storica di estremi di precipitazione dal cubo di dati di pioggia (Libertino et. al 2018)**



**Figura 5.2.2: Immagine dei bacini scolanti di riferimento con buffer di 5 km**

Attraverso il software QGIS, tramite le statistiche zonali sono stati ricavati direttamente le medie pesate di ogni valore di  $a$ ,  $n$  e  $K$  e vengono riportati nella tabella seguente.

Valori medi	
<b>a</b>	25,46
<b>n</b>	0,2704
<b>K<sub>50</sub></b>	1,952
<b>K<sub>100</sub></b>	2,152
<b>K<sub>200</sub></b>	2,352

**Tabella 5.2.1: valore medio di coefficiente pluviale orario  $a$ , esponente di invarianza di scala  $n$ , fattore di crescita  $K$**

Grazie a questi parametri è stato possibile determinare le curve di possibilità pluviometriche per le varie durate e con i diversi tempi di ritorno (tabella 5.2.2.)

<b>d [h]</b>	<b>Tr= 50 [mm/h]</b>	<b>Tr=100 [mm/h]</b>	<b>Tr=200 [mm/h]</b>
1	49,72	54,81	59,89
3	66,92	73,77	80,60
6	80,71	88,98	97,22
12	97,35	107,32	117,26
24	117,42	129,45	141,43

**Tabella 5.2.2: Valori delle altezze di precipitazioni medie**

## 5.3 Confronto dei risultati di regionalizzazione delle piogge

I risultati così ottenuti dai due metodi di regionalizzazione, si possono confrontare con quelli ottenuti dall'analisi locale di frequenza delle precipitazioni, utilizzando i dataset estratti dagli annali idrologici per i pluviometri di Alfonsine, Imola e Lugo, in modo tale da poter scegliere il risultato ottimale per poi definire il volume della cassa di espansione, obiettivo finale della seguente Tesi.

Di seguito vengono riportate le linee segnalatrici di possibilità pluviometriche dei tre metodi usati.

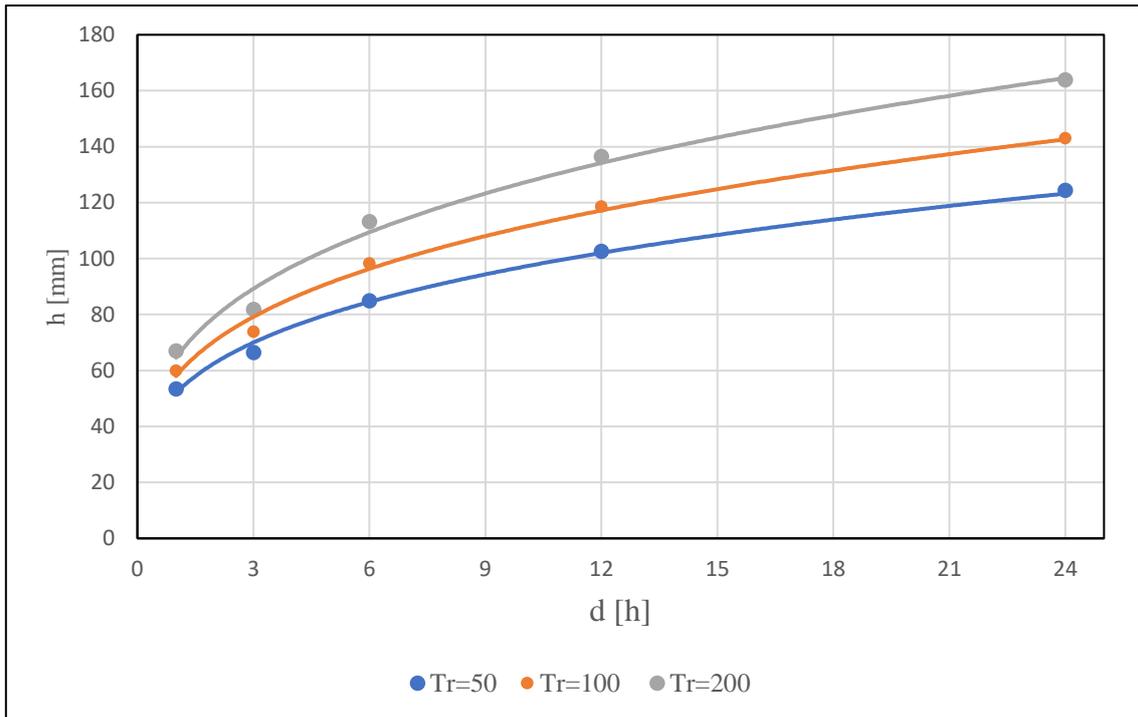


Figura 5.3.1: LSPP areale metodo di regionalizzazione Hosking e Wallis

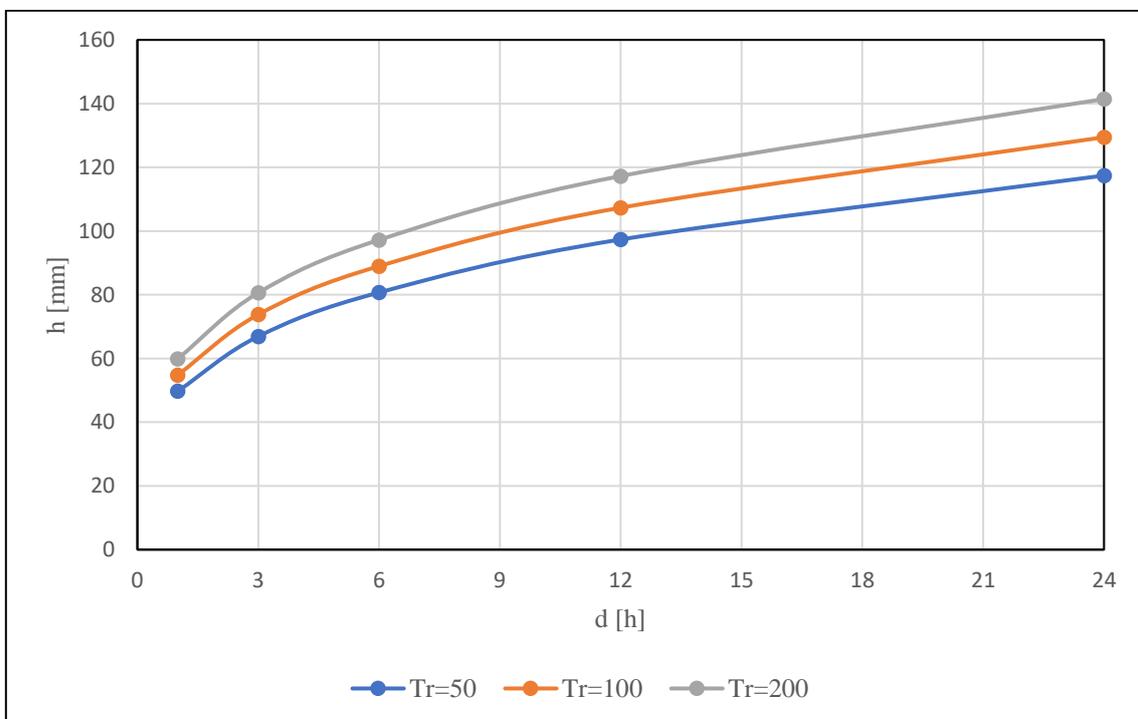


Figura 5.3.2: LSPP areale metodo di regionalizzazione basato su patched kriging

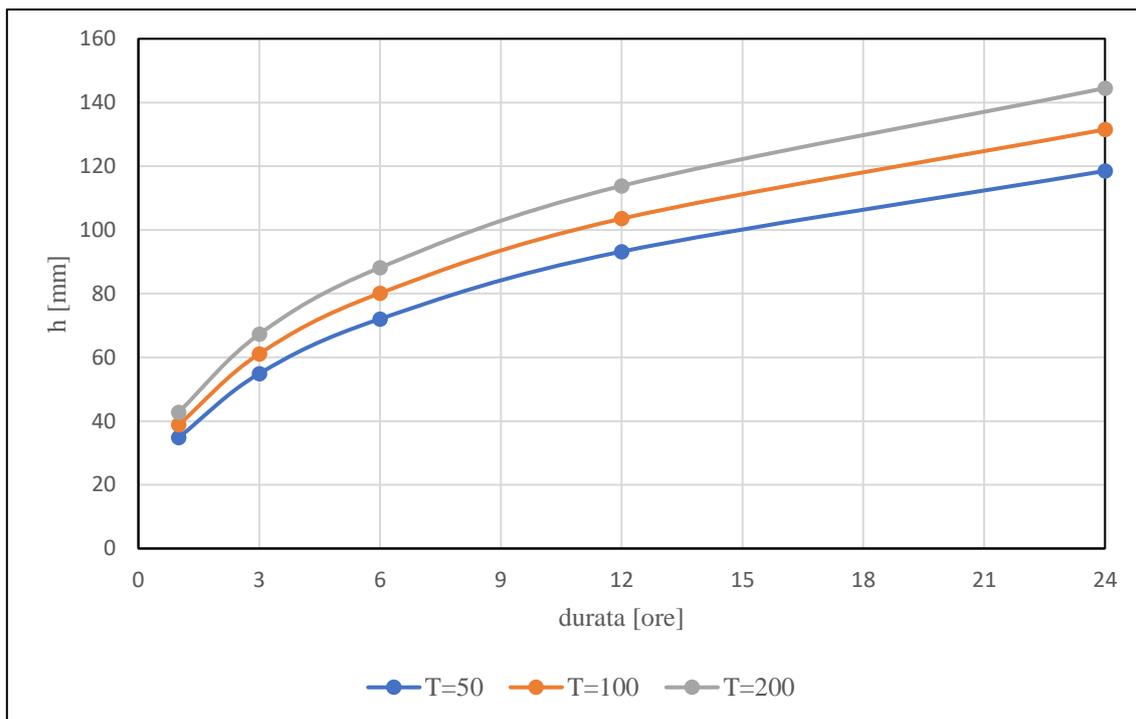


Figura 4.3.3: LSPP areale analisi locale della distribuzione di frequenza con Gumbel

<b>Metodo di regionalizzazione con approccio di Hosking e Wallis</b>			
d [h]	h50 [mm]	h100 [mm]	h200 [mm]
1	53,50	59,98	67,06
3	66,43	73,93	81,84
6	84,99	98,30	113,24
12	102,67	118,58	136,59
24	124,47	143,06	163,93
<b>Metodo di regionalizzazione basato su patched Kriging</b>			
d [h]	h50 [mm]	h100 [mm]	h200 [mm]
1	49,72	54,81	59,89
3	66,92	73,77	80,60
6	80,71	88,98	97,22
12	97,35	107,32	117,26
24	117,42	129,45	141,43
<b>Metodo locale di Gumbel</b>			
d [h]	h50 [mm]	h100 [mm]	h200 [mm]
1	34,82	38,82	42,80
3	54,89	61,09	67,27
6	72,06	80,13	88,16
12	93,21	103,54	113,83
24	118,51	131,53	144,49

Tabella 5.3.1: Confronto altezze di precipitazioni con i vari metodi utilizzati

Come viene mostrato dalla tabella 5.3.1, i dati di precipitazione per quanto riguarda i due metodi di regionalizzazione si discostano solo di alcuni millimetri per tutte le durate analizzate, ottenendo così un risultato soddisfacente. Per quanto riguarda l'analisi locale, per alcune durate (1h, 3h, 6h) si discostano di una decina di millimetri, mentre aumentando la durata delle precipitazioni (12h, 24h), i risultati sono pressoché uguali. Per questo motivo, si è ritenuto opportuno, per la determinazione del volume dell'invaso, utilizzare i dati di precipitazione estratti manualmente dai dataset ufficiali forniti dalla Regione, in quanto più facilmente riproducibili.

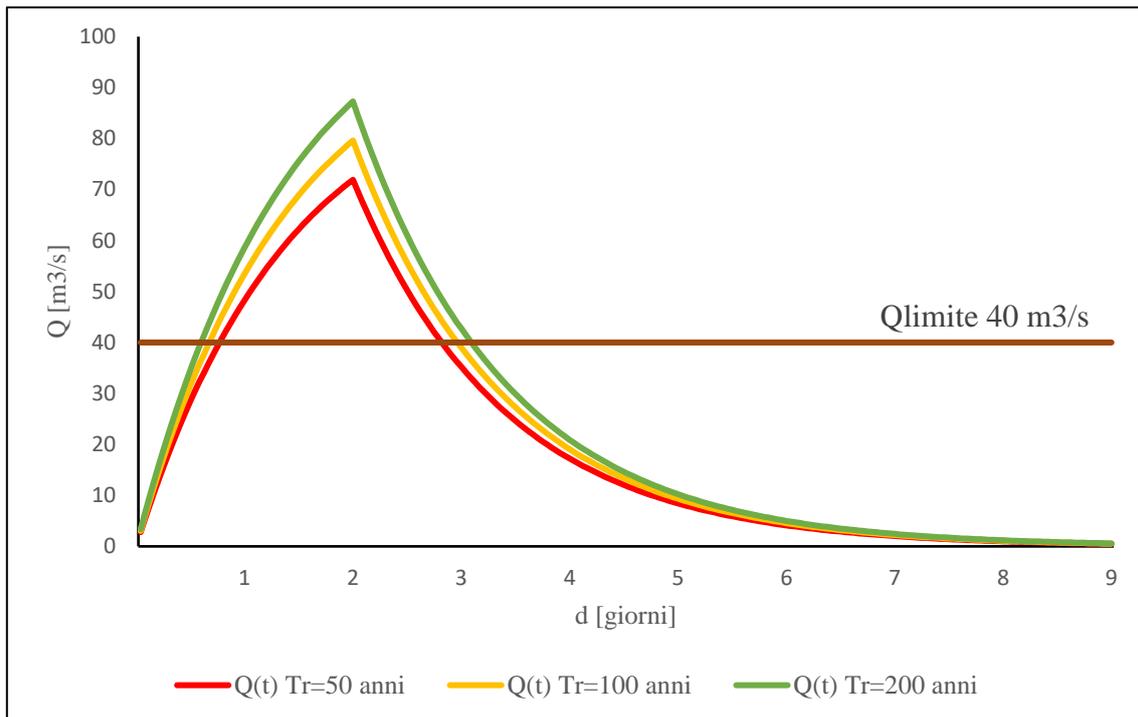
## Capitolo 6: Calcolo del volume della cassa di espansione

Il proporzionamento di una cassa di espansione viene generalmente condotto in due fasi: si procede inizialmente al dimensionamento di massima del volume necessario per ottenere l'abbattimento del colmo di piena desiderato; in seguito si procede a valutazione idrauliche più precise mediante l'uso di modelli che simulano i fenomeni idraulici attraverso cui si attua il processo di laminazione. Nel presente lavoro di Tesi verrà approfondita solo la prima parte relativa al calcolo del volume, nella quale, le scelte progettuali sono state fatte ponendosi l'obiettivo di massima flessibilità, affidabilità, sicurezza ed efficienza delle opere e della stessa. Infatti, le onde di piena calcolate tramite il modello dell'invaso lineare, riferite a diverse durate di pioggia con tempo di ritorno di 50, 100 e 200 anni, sono evidentemente molto alte rispetto a quelle che il canale è in grado di trasportare nella sua realtà attuale. Il modello afflussi-deflussi, quindi, non dà risultati sbagliati o troppo elevati ma, anzi, descrive quelle che sarebbero le onde di piena alla sezione di chiusura del bacino se questa fosse in grado di contenerle.

Per la progettazione della cassa è necessario definire il valore della portata limite  $Q^*$  compatibile con la portata massima che può transitare a valle delle opere di derivazione della cassa di espansione stessa. Nella presente Tesi, grazie all'esperienza e ai lavori di manutenzione del tratto arginale subito a valle della sezione di chiusura di nostro interesse, eseguiti dal Consorzio di Bonifica si è potuto risalire al valore della portata limite di  $Q^* = 40 \text{ m}^3/\text{s}$  che può defluire a valle. È importante specificare che è stato rispettato un franco arginale minimo di circa 0,5 metri per la valutazione della portata limite, ciò garantisce di contenere nei canali eventi eccezionali con tempo di ritorno  $> 50$  anni. Inoltre, per il caso studio, è stato preso in considerazione un tempo di

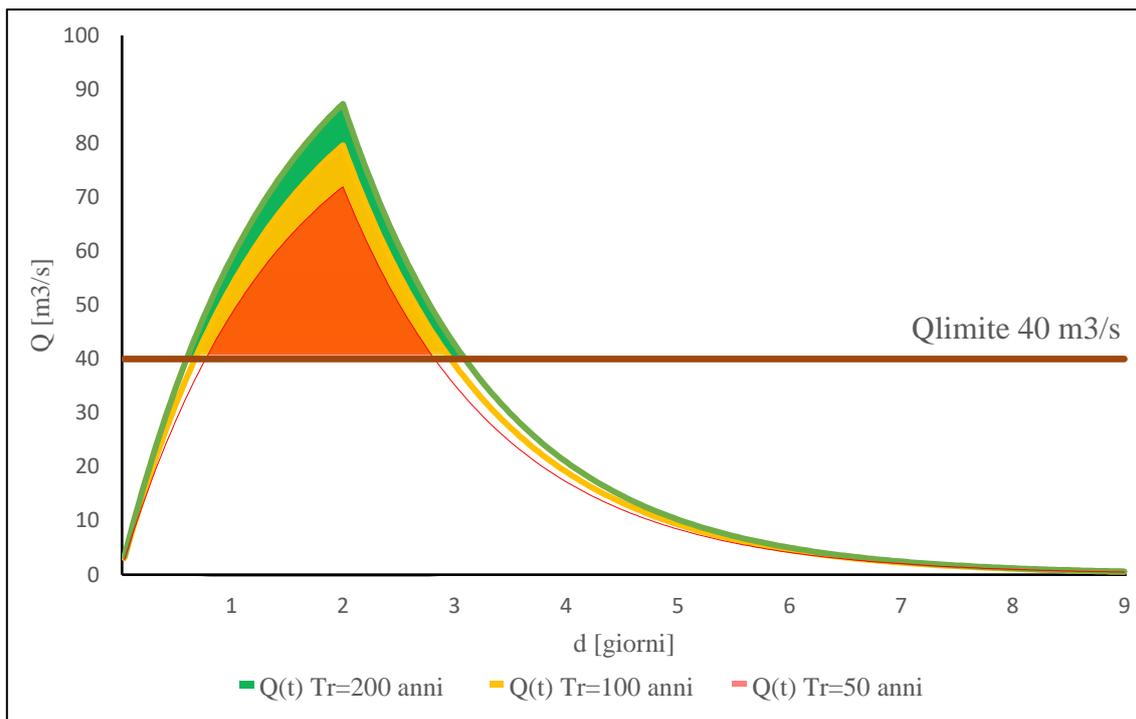
corrivazione coincidente con il tempo di pioggia di 48h, ed è stata fatta l'analisi per tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni.

Per determinare il volume della cassa, si sono semplicemente sommati i valori della portata al di sopra del valore soglia considerato  $Q^*$ , integrando le curve degli idrogrammi negli intervalli in cui superano la portata limite. In questo modo si sono ricavati i grafici che mettono in relazione i volumi sfioranti e le durate di pioggia, come mostra la figura 6.1.



**Figura 5.1: Idrogramma di piena del modello dell'invaso lineare ( $P=\text{cost}$ )  $T_c=T_p=48\text{h}$**

Dal grafico sopra, si è potuto ricavare il volume massimo necessario per una cassa di espansione progettata con diversi tempi di ritorno. In particolare, l'area campita in rosso rappresenta il volume con tempo di ritorno di 50 anni, quella in arancione che comprende anche la rossa, riferita ad un tempo di ritorno di 100 anni e quella in verde (complessivamente la somma dell'arancione e della rossa), corrispondente al tempo di ritorno di 200 anni.



**Figura 6.2: Idrogramma di piena con rappresentazione dei volumi con differenti tempi di ritorno**

In definitiva, si ottengono i volumi con i rispettivi tempi di ritorno, come mostra la tabella 6.1

	<b>Q [m³/s]</b>	<b>V [m³]</b>
<b>Tr=50 anni</b>	72	2964331
<b>Tr=100 anni</b>	80	4086261
<b>Tr=200 anni</b>	87	5276280

**Tabella 6.1: Portate al colmo e volumi corrispondenti ad un tempo di ritorno di 48h**

I valori ottenuti sono ritenuti accettabili in quanto si discostano di circa un 30% dal valore ottenuto nella precedente analisi fatta dal Consorzio di Bonifica nel 1996. Questo aumento è giustificato dal cambiamento dell'intensità di precipitazioni negli anni; infatti, al giorno d'oggi le precipitazioni sono molto più intense, rispetto a 30 anni fa dove gli stessi millimetri di pioggia ricadevano in un tempo molto maggiore. Inoltre, l'aumento della portata è dovuto, anche se in una minima parte per il caso di interesse, ad un cambiamento dell'uso del suolo; infatti, una maggiore impermeabilizzazione contribuisce ad un aumento del deflusso superficiale, conseguentemente un aumento delle portate di piena. Come si può notare, aumentando il tempo di ritorno aumenta anche la portata al colmo e con lei anche il volume, per la scelta di una di esse bisogna tenere in considerazioni diversi fattori quali la disponibilità effettiva del suolo sul quale poter realizzare l'invaso, i limiti di legge e i finanziamenti a disposizione per la realizzazione, che verranno considerate e analizzate in una seconda fase del progetto, dopo aver eseguito l'analisi idraulica.

## Capitolo 7: Conclusioni

L'idea di questo studio nasce dalla necessità, da parte del Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, di pensare ad una soluzione per i problemi legati al rischio idraulico nel territorio del Secchezzo nel comune di Alfonsine. In questo senso, la scelta di una cassa d'espansione si prefigura come l'intervento di protezione più adeguato.

L'analisi è partita dall'estrazione dei dati di pioggia disponibili nell'area contigua al bacino preso in esame. In questa fase, si è potuto notare che la disponibilità dei pluviometri con serie storia sufficiente non era molto cospicua, infatti si sono potuti prendere solo tre stazioni, un numero relativamente basso per eseguire una corretta analisi statistica. Nonostante questo, si è deciso di procedere con l'elaborazione statistica dei dati di pioggia perché si sarebbe fatto un confronto dei risultati con un secondo metodo nei capitoli successivi, con un altro dataset relativi alla stessa zona di interesse. Attraverso l'analisi statistica è stata ricavata la linea segnalatrice di possibilità climatica con tempo di ritorno cinquantenario, centenario e duecentenario.

Il passo successivo è stato quello di determinare il coefficiente di riduzione areale delle piogge utilizzando la formula dell'U.S. Weather Bureau (USWB) opportunamente calibrata sul bacino del Reno. Quindi, le altezze di pioggia locali sono state ragguagliate all'area mediante media pesata tra le varie stazioni, ottenendo le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali a scala di bacino.

Le analisi successive si basano sul calcolo del tempo di ritorno, delle precipitazioni e delle portate al colmo di una serie di eventi di piena, che è la grandezza che consente un confronto in modo chiaro della frequenza degli eventi idrometrici e pluviometrici che li hanno generati.

Il tempo di ritorno è stato determinato in diversi modi per tenere in considerazione la forte incertezza che lega la determinazione di questa grandezza e al fine di ottenere dei risultati confermati da più tecniche. In particolare, si è utilizzata la formula di Giandotti, e diverse velocità ipotizzate per il tratto di corso d'acqua. Si è visto successivamente, che prendendo un tempo di ritorno inferiore alle 24h, le portate alla sezione di chiusura a valle erano estremamente elevate e non adatte a rappresentare la realtà, per questo motivo si è optato di prendere in considerazione un tempo di corrivazione di 48h, ritenuto un tempo idoneo, sia per la velocità del tratto corrispondente, sia per l'esperienza del Consorzio di Bonifica e confermato anche dalla formula di Giandotti.

Successivamente si sono determinati gli idrogrammi di piena tramite il modello dell'invaso lineare. Grazie all'identificazione dell'uso del suolo ritenuto sufficientemente omogeneo e senza grossi centri abitati, si è potuto ipotizzare un unico bacino e una pioggia costante su tutta l'area. Inoltre, si

è ipotizzato che il tempo di corrivazione corrisponda al tempo di pioggia, dalla quale si è ricavata la portata al colmo.

Come accennato in precedenza, i dati di pioggia e le linee di segnalazione di possibilità pluviometrica sono stati confrontati con i risultati ottenuti mediante due metodi: il metodo della pioggia indice mediante l'approccio di Hoskin e Wallis e il metodo di regionalizzazione basato sull'approccio di patchet kriging, grazie ai quali si è potuto notare che i valori delle altezze di precipitazioni ottenute mediante l'analisi di frequenza locale con Gumbel, si discostano solo di pochi millimetri di pioggia per durate di tempo corrispondenti al tempo di corrivazione preso in esame, per questo possono essere utilizzati per i calcoli finali perché ritenuti adeguati.

A questo punto, si è potuto determinare il volume di una possibile cassa d'espansione posta nel sito individuato dall'ente di gestione del canale.

I volumi calcolati per le tre ipotesi di tempi di corrivazione cambiano notevolmente: si è calcolato che la cassa debba avere un volume di circa 3.000.000 m<sup>3</sup> per un tempo di ritorno di 50 anni 4.000.000 m<sup>3</sup> per un tempo di ritorno di 100 anni e 5.000.000 m<sup>3</sup> per un tempo di ritorno di 200 anni, ritenuti ragionevoli confrontandoli con i risultati nella prima analisi realizzata.

Per la scelta effettiva del tempo di ritorno più idoneo, si possono fare delle riflessioni sulla sicurezza dei serbatoi di laminazione, infatti se si prendono dei tempi di ritorno di progetto relativamente bassi, a parità di volume disponibile nel serbatoio, significa una minor sicurezza nell'alveo a valle, ma in compenso, avendo un certo invaso a disposizione, se si assume in sede di progetto un'onda di piena "esagerata" e su di questa vengono dimensionate le opere, si ottiene un serbatoio che non si riempie mai, mentre il territorio a valle viene cimentato da piene elevate (Adami, 1998).

Si ritiene doveroso inoltre specificare che i volumi ottenuti sono stati ricavati da un'analisi teorica e a favore di sicurezza, con molte approssimazioni che possono essere ulteriormente approfondite; infatti, per la realizzazione vera e propria dell'opera è necessario procedere a valutazioni idrauliche precise mediante l'uso di modelli che simulano i fenomeni idraulici attraverso cui si attua il processo di laminazione, valutazione che non è stata presa in carico nel seguente lavoro di Tesi.

## 7.1 Considerazioni finali

Gli effetti sempre più evidenti del cambiamento climatico, la variazione del territorio in termini di urbanizzazione, hanno portato il territorio emiliano romagnolo ad essere estremamente fragile e vulnerabile agli eventi estremi come le forti precipitazioni.

Secondo un'intervista rilasciata dal Professor Armando Brath ad AGI (Agenzia Giornalistica Italiana), le casse di espansione sono una soluzione indispensabile per ovviare ai disastri delle sempre più frequenti e devastanti alluvioni. Sul territorio romagnolo sono state ipotizzate diverse opere, ma per diversi motivi non sono mai state realizzate.

Le casse di espansioni quanto ad impatto ambientale, generalmente, hanno un basso impatto locale sull'ambiente, in quanto viene simulato il comportamento naturale del fiume (aree golenali), ma occupano un'area in genere molto estesa, creando un grosso impatto sul territorio, inoltre l'ampio sviluppo degli argini di contenimento delle casse e la necessità di dover ricorrere frequentemente alla realizzazione di diaframmi al piede di essi, per scongiurare il rischio di collasso per sifonamento, possono comportare costi molto elevati che si vanno ad aggiungere a quelli da sostenere per l'esproprio di estese superfici e per i necessari movimenti di terra. Probabilmente questi sono i motivi che frenano la comunità a favorire consensi e i fondi necessari per realizzarle. Nonostante questo, si è visto che il territorio ne ha un'estrema esigenza e necessità per intervenire al meglio durante le piene alluvionali sempre più estreme e frequenti.

# Allegato I: Dataset pluviografici

Tabella I: Dati di precipitazione di massima intensità annua registrate ai pluviografi di Alfonsine, Lugo, Imola per le durate di 1,3,6,12,24 ore, estratti dagli annali idrologici forniti da ARPAE Emilia-Romagna.

	Precipitazione di massima intensità registrate al pluviografo di Alfonsine (Canale destra del Reno)					Precipitazione di massima intensità al pluviografo di Lugo di Romagna (Canale destra del Reno)					Precipitazione di massima intensità al pluviografo di Imola (Reno)				
	1	3	6	12	24	1	3	6	12	24	1	3	6	12	24
2022	18,6	28,6	31,8	49,8	67,2						24,8	32,4	46,2	54	68,4
2021	35,2	48	48	48	48						45,6	55,6	56	56,8	56,8
2020	30,8	33,4	38,6	38,6	42						13,8	22,8	34,4	49,6	59,4
2019	24,4	25,4	28,8	39,2	52,8						26,2	26,2	35	58	67,4
2018	34,7	63	63,3	63,3	63,7						20,8	23,6	31,6	38	46
2017	50,8	74	82,4	82,4	83,2						32,6	32,6	46,6	64,2	91,4
2016	28,4	51,8	72,6	80	80	32,6	40,2	51,7	60	60,4	23,4	40	65	71,6	71,6
2015	23,4	26,2	37,6	57,8	81,2						14,8	27	32,8	46,2	57,4
2014	21,4	21,4	28,6	41	50,2						17,6	20,6	20,8	30,8	45,8
2013	12,2	18,2	25	29,4	33,4	14,2	30,2	43	50,2	62,2	38	38,4	38,4	38,4	38,4
2012	38,8	51	64	72,8	76	40,2	60,4	69	70,2	70,6	27,6	36,6	48,6	48,6	53,6
2011	12,6	18,6	23,2	33,2	41,8	19	21,8	25,6	31,8	36,6	21,6	23	23	23	24,4
2010	34,8	36,6	36,6	37,6	42,2	27,4	37	43,8	43,8	46,4	13,2	17	21,6	30,4	38,6
2009	16,8	19,4	32,8	41,2	47,2	24,4	33,6	33,6	33,6	38,4	15,8	23,6	24,6	35,2	45,4
2008	17,8	26	29,6	31,8	36,2	14,2	18	23,8	28	40,2	29,2	30,2	30,2	35,4	42,6
2007	23,8	24,2	32	40,8	57	25,6	27,4	27,6	27,8	45,8	19,4	21,4	26,4	33	33,4
2006	23,2	47,4	47,6	47,6	50,4	15,4	28,4	43,2	51	54,6	28,6	37,4	52,2	59,2	60,2
2005	13,6	29	43,6	73,6	86,8	21,8	34,6	43,6	76,2	90,4	33,2	49,2	67,8	111,2	118,6
2004	21,6	28,4	36,2	36,8	51,8	43,6	59,6	71,8	71,8	71,8	34	39,8	53	53	53,6
2003	11,2	17	20,6	30,4	37,6	15	23,4	31	43,2	47,2	25,2	28,4	37	49,8	53,6
2002	38,6	46,8	48,2	48,2	48,2	20	22,4	24,8	39,8	44,4	37	48,4	81,8	114,6	132
2001	28	44,8	46,4	46,4	46,8	20	37	37,8	37,8	41,2	16,2	19,4	23	33,8	55,6
2000	15,6	19,4	27,6	34,2	36,2	34,8	44,2	44,2	44,2	44,2	25,8	37,4	37,4	37,4	43,4
1999	30,6	35,8	37	40,4	54,8	37	37,8	40,2	45,6	54,4					
1998	23	27,6	27,6	34,8	38,4	24,4	26	36,6	41,4	46,6					
1997	24,8	30,2	32,2	42,4	56,2	13,2	26	26,6	37,2	54,8					
1996	22	53,8	68,4	72	99,4	21,2	52,6	96,4	122,6	153	17,8	17,8	24	31	39,6
1995	31,4	35	47,2	63,6	86,4	17,4	24,4	44,8	64,8	89,2	19,2	29,4	50,2	69,2	109,4
1994	28,6	39,2	43	43	66,6	39,6	60,2	64,6	64,6	71,6	22,8	29,8	31	47	85,4
1993	37,8	44,2	44,8	44,8	47,8	21,4	34,2	34,8	34,8	41	30,6	37,2	37,2	37,2	59,4
1992	17,8	22,8	24	30,4	40	32,8	33,6	37,6	37,6	44	34,4	52	52	52	52,4
1991	21,2	31,4	31,8	33	41,2	23,6	29	43,2	44,4	44,4	23,8	29,8	31,4	40,4	67,8
1990	32,2	49,2	52,2	53	57	46	57	64,6	70,4	71,2	19,6	28,4	31,4	38,6	47,4
1989											18,2	35	52	93,4	112,6
1988											20,6	26,6	32,6	40,4	40,8
1987											40	67	67,6	69,4	69,4
1986						55,4	68	68,6	68,6	68,6	20	33,4	40,2	66,2	76,8
1985											13,6	13,8	17	22	27
1984											20,6	29,4	36,4	51,2	53,8
1983											42	42	42,2	42,2	44
1982											22	26,4	32	44	59,4
1981											30	70,6	78,6	101,8	121,4
1980											33,8	38,2	38,6	47,6	61,4
1979											37,8	40	69	102,8	111,4
1978											23,4	34,2	41	52,4	52,8
1977											15,6	22	19,2	45	61,2
1976											21,2	39	54,6	79,6	83,4
1975											25,2	35	60	90,4	119
1974											36,2	37	37,2	37,4	37,4
1973											44	55,6	66	71,8	108,2
1972	53,1	92,1	93	93	125						76	119	120,4	120,6	142,8
1971						16,6	33,8	36,6	44,8	59	19	21,6	27,6	34,4	46,6
1970						22,2	22,4	29,8	32	34,8	11,4	19,2	25,2	31,4	35,2
1969						44,6	44,6	44,6	44,6	73,6	21,6	23,2	23,2	24,2	37,2
1968						38	38,2	42,8	52,2	89,2	28	45,4	45,4	45,6	54,2
1967						28	40	54,6	69,4	96,4	42	47,8	51	64	79,2
1966						51	67,2	70	91,8	100	34,8	39,4	46,4	68,4	94,6

1965												21,6	41	50,8	50,8	54
1964												37,8	39	39	43,2	60,2
1963												17,2	21,8	32,8	53,2	78,6
1962												16,8	17	25,2	35	48,2
1961												29	39,2	48,8	50,8	56,4
1960	43,2	66,2	76,3	81,2	85,5											
1959												27,4	43,8	53,6	78	92
1958												14,6	23,8	34,4	49,4	61,8
1957												23,6	24	25,2	39,6	54,2
1956												11,8	18	23,6	33,8	42,2
1955												30,4	57,2	59,2	59,8	59,8
1954												28,4	28,4	28,4	54,2	67,6
1953	63	64,3	95,3	114,8	116											
1952												21	43,4	62	66,4	66,6
1951												27,8	35,4	44,4	49,2	76,8
1950												40	43,2	43,2	43,2	43,2
1949												23,6	26	37	57	70,8
1948						62	62	80,4	80,8	84,4		38	39,4	67,4	112,4	131,6
1947						21,8	25,4	28,4	52,4	74,2		14,8	21,4	34,2	38,4	51,2
1946						26,2	32,2	41	58,6	64,8		22,2	28,8	37,8	68	64,8
1945																
1944												21,8	29	32,4	47	68,8
1943												15,2	22,4	26,4	34,8	61,8
1942												32	32,6	32,6	32,6	45,2
1941						22,2	36,2	36,2	50,6	63,4		15,2	21,8	29,2	41,2	45
1940												24,4	29,4	31,2	46	64
1939						27,6	32,8	37	63,2	70		15,2	19,2	30	35,6	59,6
1938						32,4	32,8	33,2	37,8	38,2		28	28	28,6	32	37,2
1937	71	89	91,4	91,4	91,4											
1936	62,4	91,7	136,2	141,7	148							78,4	139	177,4	184,2	190,8
1935	53	54	65	68,5	89,2							54,2	55,2	65,8	66,4	88,2
1934																
1933												18,6	25,8	36,2	44	56,4
1932												47	71,8	74,6	74,6	74,6

**Tabella II: Dati di precipitazione di massima intensità annua cumulata registrate ai pluviografi di Alfonsine, Lugo, Imola per le durate di 1,2,3,4,5 giorni, estratti dagli annali idrologici forniti da ARPAE Emilia-Romagna.**

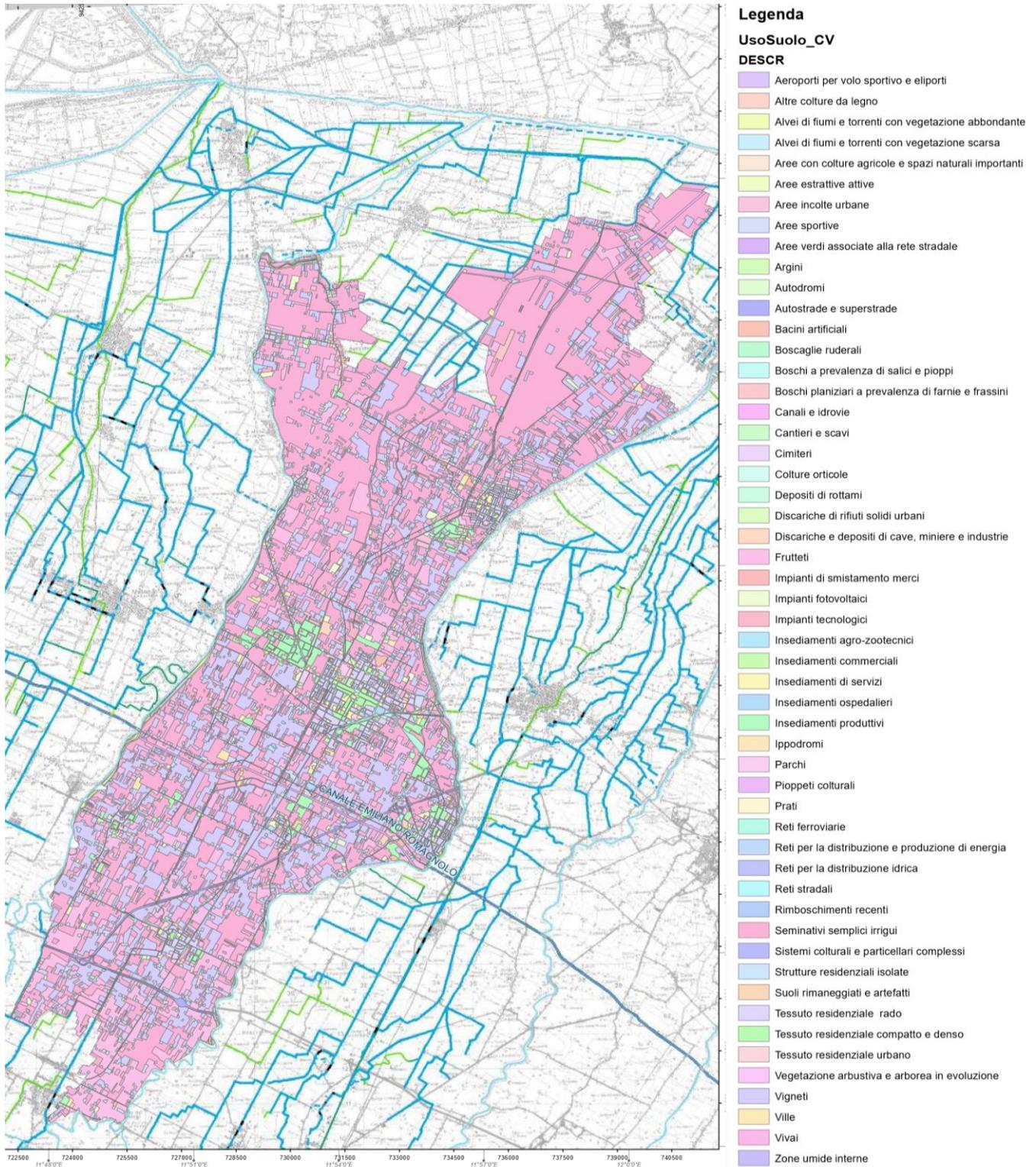
anno	Pluviografo di Alfonsine (Canale destra del Reno)					Pluviografo di Lugo di Romagna (Canale destra del Reno)					Pluviografo di Imola (Canale destra del Reno)				
	numero dei giorni del periodo					numero dei giorni del periodo					numero dei giorni del periodo				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2022	60,6	71	71	83,6	83,6						62	68,6	71	75	77,4
2021	48	48,2	48,2	48,6	48,8						56	56,8	56,8	100,8	101,6
2020	38,6	42,4	43,2	47,4	53,4						50	66,4	66,4	77,8	89,8
2019	52	66,8	67,6	77,4	97						66,8	80,8	81,6	92,2	115,4
2018	63,3	67,2	67,6	67,6	67,6						42,6	57,2	66,6	67,4	92,8
2017	50,8	74	82,4	82,4	83,2						82,4	103,2	103,4	103,8	105,2
2016	56,6	80	80,4	80,4	83	49,8	60,4	60,4	60,4	62,4	60,2	71,6	71,6	72,8	72,8
2015	79,4	98,6	109,4	114	114						57,4	62,2	84,6	87,6	105,2
2014	35,2	53,8	55	55,6	55,6						34,2	50,2	52,2	52,4	52,8
2013	29,4	38,8	51,2	72	72	62,4	62,8	63	63	63	38,4	39,4	61,2	73,2	80
2012	38,8	51	64	72,8	76	40,2	60,4	69	70,2	70,6	48,8	54,6	55,6	56,8	60
2011	32,4	44,8	56,2	61,8	64	31,6	48	56,4	63	64	23,2	32,8	36,8	56,8	66,4
2010	37,6	42,2	52,8	55,6	65,2	43,8	48,8	67	67,2	69,4	36,2	38,6	44,4	49,6	55,1
2009	47	51	60,2	60,2	60,2	35,8	44,4	48,4	57	61,2	45,4	49,6	56,2	56,2	56,2
2008	31	41,4	50	51	52,2	27,6	49,8	61,2	61,8	62,4	41,8	42,6	46,8	47	48
2007	53	61,6	78,4	80,8	80,8	42	49	62,4	63,4	63,4	29,4	52,6	63	65,2	65,2
2006	47,6	63,2	63,2	68,8	68,8	52,6	65,2	65,2	71,6	71,6	60,2	73,6	73,6	84,4	84,4
2005	64,2	89,4	89,4	91,6	95,2	60,2	91	91	92,6	102,2	91,8	121,8	122	123,2	123,2
2004	45,8	58,2	58,6	69,4	79,6	71,8	71,8	71,8	74,2	85,6	53	65,2	65,2	76,4	92,4
2003	37	38,8	43,2	55	57,6	45,4	47,6	48,2	57	57,2	50,6	55,8	71	71	71
2002	48,2	60	83,8	108,2	123,6	42	48,6	53,8	56,4	72	119,2	136	145,2	152	161,2

2001	34,2	49,4	49,4	49,4	57,4	36,4	43,2	44,2	44,6	44,6	44	60,4	64,8	65	65
2000	35,4	45	49	54,8	69,4	44,2	44,2	55,8	59,2	66,8	41,4	55	70,8	71,6	71,6
1999	54,4	63	78,4	115,4	115,4	53,8	66,2	87,6	97,4	99,8					
1998	35,2	56,2	62,8	62,8	62,8	41,4	62,6	69	69	69					
1997	54,4	65,8	71,2	75,6	76	52,2	68,2	75	81,2	81,4					
1996	91,6	140,8	142	142,2	142,4	147,2	196	199	199,8	199,8	37,4	56	58,4	58,6	58,6
1995	63	96	102	102	102,2	61,8	101,4	111,4	111,4	111,4	83,2	126,2	136,4	136,4	136,4
1994	43,2	67,2	88	91,6	103,6	64,6	95,4	111,6	120,8	128	78,8	126,6	167,4	179,4	192,2
1993	45,4	47,8	47,8	47,8	48	34,8	41	41	41	41	37,2	59,4	59,4	59,4	59,4
1992	17,8	22,8	24	30,4	40	32,8	33,6	37,6	37,6	44	34,4	52	52	52	52,4
1991	33,8	51,2	51,2	60,6	71,4	44,4	53	53,4	66,6	77	53,2	84,4	87,4	91,4	94,4
1990	52,2	72,2	79,2	81,2	88,2	69	71,2	79,6	80,4	90,2	38	57	74	85,6	94,6
1989	110,2	125	137,6	137,8	137,8	105,6	125,6	142,2	142,4	142,4	91	115	138,2	138,2	138,2
1988	42,5	68,6	71,1	71,1	71,1	32,4	44,4	53	53	53	28	40,8	51	51	51
1987	49,1	54,4	76,6	76,6	76,6	46,8	46,8	48,6	56	64	69,4	69,4	79,2	85,4	85,4
1986	71,7	96,6	101,3	101,3	101,3	55,4	68	68,6	68,6	68,6	41	77,6	86	86	86
1985	28,2	30,6	33,1	33,4	33,6	36	46,4	57,2	64	74,8	23,4	36,8	42,8	56,6	63
1984	38,6	50,9	53,8	66,1	67	59,4	76,8	77,6	77,6	77,6	49	63,4	64,6	75,6	79,2
1983	27,1	36,1	37,5	37,5	37,7	26,4	31,2	48,8	48,8	60,6	42,2	48,4	51,2	51,4	51,8
1982	42	44	51,1	55	60	46,8	53,8	60,4	66,6	72,2	58	88	108,2	130,8	135,6
1981	83,9	97,9	98,3	99,5	99,5	96	128	137,4	141,8	143,6	116,2	155,4	165	166	166,2
1980	45	86,2	110,8	115,8	116,4	44	71,8	103,6	108,8	113,6	52,4	82,2	108,2	118,2	122,4
1979	125,5	131,3	131,3	131,3	131,3	74	100	100,8	102,6	103,4	92	120,4	122	123,4	125
1978	47,1	66,5	81,3	82	82	61,8	70,8	84,4	91,4	96	45	73,4	96	112,8	114
1977	50,3	69,5	69,7	73,9	73,9	45,8	72,6	74	74,2	74,2	61,2	69	69	69,6	99
1976	88	93,7	93,7	96,5	96,6	114,2	118,8	120,2	124,8	124,8	82,4	83,4	83,4	91,2	100,2
1975	55,6	95	127,1	137,4	138,4	92,6	158,6	197	202	204,4	69	129,2	182,4	188,4	188,6
1974	48	62,1	62,1	62,1	63,1	44,8	54,6	57,6	57,6	58	37,4	50,6	58,8	60,8	61,2
1973	80,4	108,8	130,8	145,6	148,5	74	120,8	150,6	172	179,6	102,2	157	203	214,6	225,6
1972	53,1	92,1	93	93	125	75,6	124	124,8	125,2	159,2	76	119	120,4	120,6	142,8
1971	23,3	29,5	41,1	47,2	57,1	47,4	61,6	63,4	87	100	33,2	50,2	51,8	62,2	69,4
1970	44,9	49,6	49,6	49,6	50,2	29,8	41,4	50,8	65	66,6	34	35,2	41,2	52	55,2
1969	39,8	59,8	60,6	61	64,5	58,4	90,2	91,4	91,8	92	36,8	56,2	69	73,8	78,2
1968	52,5	70,9	74,9	75,1	76	60,8	96,6	103,2	104,8	106,4	53,2	65,6	81,6	87,6	92,6
1967	48,7	69,2	86,3	86,9	96,9	57,8	103,8	104	119,8	121,4	67,2	80	81,4	86,4	87
1966	69,5	105	106,7	106,7	106,7	93	120,8	127	127	127	88,2	104	104,8	104,8	104,8
1965	62,3	88,7	91,2	91,2	92,5	69,2	69,2	69,2	69,2	70,8	50,8	65,6	66,6	66,6	80,4
1964	41,8	68,4	79,7	90,2	98	52	82,2	103,6	124,4	139	52	86,8	113,4	135	150,8
1963	140,5	149,8	149,8	149,8	150,1	63,4	67,6	67,6	67,6	68,8	57,4	79,8	79,8	79,8	80
1962	28,9	39,9	44,9	56,5	58,5	39,2	58,2	61,4	77,2	77,4	32,6	56,6	57,2	68,4	71,8
1961	47	51,8	51,8	57	66,5	46,8	76,2	76,2	76,2	76,2	46,6	58,8	69,2	76,8	87
1960	43,2	66,2	76,3	81,2	85,5	59	66,4	73,4	79	81,6	60	86,2	99,2	103,2	107
1959	67	70,3	70,5	70,5	78,8	69,2	74,6	77	81	83,6	92	100,8	100,8	100,8	110,4
1958	35,5	62,7	67,9	69	71,9	88,8	123,8	124	125	125,2	49,6	92,8	101,2	103,6	105,2
1957	49	55	64,2	67,9	68,8	47,6	57,8	57,8	74	74,2	42,4	54,4	70,2	82,2	85,6
1956	38,7	39,4	48,1	53,4	55,4	40,8	53,8	57,2	69,2	72,2	36,6	43,2	51,6	62,4	64,8
1955	57,2	57,2	57,9	64	72	83,2	87,4	89,6	98,2	100,4	59,8	63,4	64,2	76,2	83,8
1954	75,5	92,4	93	93	93,5	67	86	88,4	101	103,2	67,6	89,4	94,2	105,8	108,2
1953	63	64,3	95,3	114,8	116,1	101,2	101,8	167	168	168,6	90,2	91	101,2	126,8	127,4
1952	41,7	43,9	45,3	46,3	53,5	88,2	91,4	93,6	98,2	104,8	66,6	66,6	66,6	66,6	68,8
1951	85,8	140,9	145,7	145,7	145,7	71	121,4	138,4	142,4	142,4	65,2	96,8	111,8	112	112
1950	32,6	45,3	48,1	58,1	86,5										
1949	46,3	55,5	73,7	79,3	82										
1948	46	51,8	53,8	53,8	80										
1947	68,8	74,2	75,5	78	89,9						62,8	64,8	64,8	64,8	79
1946	46,3	48,1	48,1	51,4	58										
1945															
1944	110,3	126,3	127	131,9	132,6										
1943	85,7	115,9	115,9	115,9	115,9										
1942	50,1	50,1	52	59,5	80,1										
1941	41,1	77,9	77,9	77,9	77,9	60	76,2	90	90,2	90,2	46	63,6	71,8	71,8	72
1940	55	61	61	61	85,5	63	112	112,3	112,3	112,3	44,2	75,4	77,8	80,2	80,4
1939	38	66	91	98	105,5	62,8	90	107,6	127,2	140,8	52,8	76,2	93,6	117	134
1938	30,6	41,4	47,6	53,8	53,8	38,2	44	52,8	55,6	57,4	36	59,6	65,6	69,6	70,8
1937	71	89	91,4	91,4	91,4	59	65,8	67	75	93,8	48,8	74,8	91	91,2	98,8
1936	62,4	91,7	136,2	141,7	147,7	69	91,2	128	132,7	139	78,4	139	177,4	184,2	190,8
1935	53	54	65	68,5	89,2	44	47,2	50,2	59,2	84,2	54,2	65,2	65,8	66,4	88,2
1934	40	59	60	60	62	65	81,5	97,5	112,5	112,5	77,5	84	86	87,8	87,8

1933	81	83	123	124	124	66,5	102,5	132	141	153	47,8	84,2	105,2	105,2	105,2
1932	39	57	57	57	57	64,2	68,8	68,8	70,3	81,2	74,6	75,6	75,6	84,8	85,8
1931	24	38	58	60	67	43	43	43	43	43	29,5	36,6	39,6	41,4	57,2
1930	60	101	105	105	105	45	47	48,2	48,2	48,7	54,5	65,7	65,8	66	66,4
1929	86	86	86	93	95	47			80	80	45,1	67,1	80,9	80,9	85,3
1928	80	80	80	82	82	46,2	56	66,7	75,7	100	192	219,3	231,6	244	249,6
1927	38	64	68	68	71	41	58	64,6	67,6	68,6	65	102	103,1	103,1	103,1
1926	140	140	145	149	149	65	92,3	99,8	100,3	104,8	69,1	82,5	88,8	94,1	100,3
1925	48	48	54	66	74	25,1	39,9	44,6	45,7	53,4	32,5	52,9	52,9	52,9	52,9
1924	52	58	66	82,5	84	23,8	33,8	36,2	41,9	44,4	85,6	87,4	94,6	96,6	97,2
1923	68	68	68	83	86	42,5	73,2	74,5	87,8	96,2	34,8	41,3	43,6	45,1	46,4
1922	89	126	130	136	141		63,8	63,8	67,3	73	39,6	43,9	50,8	54	54
1921	38	45	51	62	62	47,8	53,9	63,6	79,9	84	64	109,5	130,1	131,8	131,8
1920	28	43	48	59	64	38,7	50	67,7	83,2	83,2	77	98,3	103,3	111,8	117,3
1919	34	40,5	43	70,5	70,5	29,5	40,7	43,1	43,1	43,6					
1918	53	95,5	114	114	122,5										

# Allegato II: Uso del suolo

Figura I: Mappa dell'uso del suolo in dettaglio, riferiti all'anno 2020, del bacino di interesse estratto dai dataset del Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, Lugo (RA).



SCALA 1:100.000



## Allegato III: Codice di calcolo R

In questo allegato viene mostrato lo script utilizzato per l'esecuzione dei vari passaggi della procedura di valutazione dei quantili con il metodo di Hosking e Wallis adottata nel lavoro illustrato:

- Database WP1;
- Caricamento del file CSV di riferimento per ogni durata di precipitazione (1, 3, 6, 12, 24 ore);
- Memorizzazione delle stazioni in una variabile;
- Utilizzo del test di Hosking e Wallis;
- Calcolo gli L momenti regionali e li memorizzo in una variabile, assieme alla lunghezza di ogni serie;
- Visualizzo i risultati della regionalizzazione;
- Calcolo il quantile per un tempo di ritorno di 200 anni.

```
# Analisi di frequenza regionale: #
#####

# Carico il dataset
AMS<-read.csv(file = "AMS_24h.csv", sep = ";")
# Salvo i nomi delle stazioni in una variabile Nomi.Staz
Nomi.Staz<-colnames(AMS)
# Costruzione della curva di crescita adimensionale regionale
#####
# Utilizzo un approccio alla Hosking and Wallis
# SE NECESSARIO - Installo i pacchetti lmom e lmomRFA
#install.packages("lmom")
#install.packages("lmomRFA")
library("lmomRFA")
# Hosking & Wallis tests:
# A - Discordanza
# B - Eterogeneita' regionale
# C - Scelta distribuzione adimensionale regionale (parent distribution)
# D - Stima dei parametri della parent
# Calcolo gli L momenti regionali e li memorizzo in una variabile,
# assieme alla lunghezza di ogni serie
```

```

LMOM<-regsamlmu(AMS,nmom=5,sort.data=TRUE, lcv=TRUE)
RLMOM<-regavlmom(LMOM,LMOM$n)
# Rappresento il diagramma degli L momenti
# (L moment ratio)
lprd(LMOM$t_3,LMOM$t_4) ## singole stazioni
points(RLMOM[[3]],RLMOM[[4]],pch=19,col="blue",cex=2)## punto regionale
# Test regionale di Hosking and Wallis
# il comando regst esegue l'intera regionalizzazione secondo Hosking e Wallis
rfa<-summary(regtst(LMOM))
# visualizzo i risultati della regionalizzazione
rfa
param <- rfa$para$gev
#install.packages('lmomco')
library(lmomco)
# non-exceedance probability
#  $T = 1/P(X \geq x) = 1/(1 - P(X < x))$ 
Tr <- 200
nep <- 1 - (1/Tr)
q <- quagev(f=nep, para=param)
q

```



## Bibliografia

- A. Adami, 1998, *Casse d'espansione fluviali e aspetti idraulici - La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati*, Milano, Editoriale BIOS, Cosenza Atti del corso di aggiornamento 6-10 ottobre 1997.
- Artina S. *Sistemi di Fognatura - Cap.6: Piogge intense et al.HOEPLI*.
- Benaglia C., *Il fattore di Riduzione delle piogge all'Area*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Relatore: Università di Bologna, A.A 2019/2020.
- Benassi P., *Stima della portata di progetto in bacini appenninici non strumentati: approcci regionali a confronto*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Relatore: Castellarin A., Università di Bologna, A.A 2015/2016.
- Brath A., Casagli N., Marani M., Mercogliano P., Motta R., *In Emilia-Romagna evento senza precedenti*, Regione Emilia-Romagna 2023.
- Brath A., *Modelli matematici di formazione dei deflussi di piena*, in "La sistemazione dei corsi d'acqua naturali", a cura di Maione U. – Brath A., Milano, 1995, 1996.
- Cangini E. *Costruzione della cassa d'espansione in comune di Alfonsine (RA)*, Relazione idraulica, Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, 17 Gennaio 2018.
- Castellarin A., *Metodi di tipo locale per l'analisi di frequenza delle piene, Metodi di analisi regionale basati sul concetto di regioni di influenza, ROI*, Università di Bologna 2019.
- Castellarin A., Montanari A., *Appunti delle lezioni corso di Metodi e Modelli per l'Idrologia*, Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Civile, Università di Bologna, 2022.
- Facondini A., *Analisi di frequenza congiunta degli estremi pluviometrici e idrometrici nel bacino del Po*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Relatore: Brath A., Università di Bologna, A.A 2006/2007.
- Hengl, T., *A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2007.
- Hosking J.R.M., Wallis, J.R.: Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resour. Res.*, 29, 271–281, doi:10.1029/92WR01980, 1993.
- Libertino A., Allamano P., Laio F., Claps P. *Regional-scale analysis of extreme precipitation from short and fragmented records. Advances in Water Resources*, 2018.
- Maione U. *Le casse di espansione*, Corso di Idrologia Politecnico di Torino, 2015.
- Marzo A., Falconi L., Candigliota E., Immordino E., Puglisi C., Screpanti A., *Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la Prevenzione del rischio sismico e idrogeologico – ENEA*, 2020.
- Mazzoglio P., Butera I., Claps P. I2-RED: A massive update and quality control of the Italian annual extreme rainfall dataset. *Water*, 12, 3308, 2020 <https://doi.org/10.3390/w1212330>
- P. S. Eagleson. *Dynamics of flood frequency*. *Water Resour. Res.* 8, 878-898, 1972. G. Supino, *Le reti idrauliche*. Patron, Bologna, 1964.

Silvagni P., *Studio e progetto di una cassa d'espansione sul canale dei Mulini Protezione di Solarolo* Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Relatore: Università di Bologna, A.A 2006/2007.

Smerilli G., *Studio sperimentale del fattore di ragguaglio delle precipitazioni nell'Appennino Emiliano-Romagnolo*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Relatore: Castellarin A., Università di Bologna, A.A 2022/2023.

Struttura Idro-Meteo-Clima, Servizio Idrografia e Idrologia regionale e distretto Po, *Annali Idrologici*, ARPAE [www.arpae.it](http://www.arpae.it)

Tennani N., *Progetto e verifica del funzionamento della cassa d'espansione di Caldogno (VI)*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria, Relatore: Salandin P., Università di Padova, A.A 2013/2014.

Todini E. *Analisi regionale degli eventi estremi delle precipitazioni e delle portate di piena*, POSTER, IDEA, 1994.

US Weather Bureau. *Rainfall Intensity-Frequency Regime: Part I - The Ohio Valley*. Technical Paper No. 29, US Weather Bureau, Washington, D.C, 1957.

Valtancoli E., *Analisi di frequenza a scala regionale degli estremi idrometrici osservati nel distretto idrografico del fiume Po*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Relatore: Castellarin A., Università di Bologna, A.A 2019/2020.