

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

***CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA
PER L' AMBIENTE E IL TERRITORIO***

Insegnamento: Costruzioni Idrauliche e Protezione Idraulica del Territorio LS

**ANALISI DI FREQUENZA CONGIUNTA DEGLI
ESTREMI PLUVIOMETRICI E IDROMETRICI NEL
BACINO DEL RENO**

Laureando:

Facondini Andrea

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. Armando Brath

Correlatori:

Dott. Ing. Attilio Castellarin

Dott. Ing. Elena Toth

ANNO ACCADEMICO 2006 – 2007

INDICE

INTRODUZIONE	5
Cap. 1 RACCOLTA ED ANALISI DEI DATI	11
1.1 Dati pluviometrici	12
1.1.1 Annali idrologici	12
1.1.2 Stazioni pluviometriche.....	15
1.2 Dati idrometrici	21
1.2.1 Eventi di riferimento	22
1.3 Cenni sugli eventi di piena più significativi	24
Cap. 2 STIMA DEI TEMPI DI RITORNO PER LE PORTATE DI PIENA	25
2.1 Trasformazione delle altezze idrometriche in portate	25
2.1.1 Il caso di Casalecchio Chiusa	27
2.1.2 Il caso di Pracchia	30
2.2 Stima dei tempi di ritorno	32
2.2.1 Il metodo della piena indice	32
2.2.2 Metodo della distribuzione di Gumbel	37
2.2.2 Metodo della Plotting Position	38
Cap. 3 COSTRUZIONE DELLE LSPP AREALI A SCALA DI BACINO	45
3.1 Costruzione delle LSPP puntuali	47
3.1.1 L' invarianza di scala	50
3.2 Raggiungimento all' area dei valori puntuali	55
3.2.1 Fattore di raggiungimento all' area 'ARF'	56
Cap. 4 COEFFICIENTE DI AFFLUSSO	63
4.1 Nozioni generali	63
4.2 Calcolo della pioggia lorda	65
4.3 Stima del deflusso di pioggia	66
4.4 Valutazione del tempo di corrivazione del bacino	72
4.5 Coefficienti di afflusso: applicazione al bacino del Reno	76
Cap. 5 CARATTERIZZAZIONE DELLA FREQUENZA PROBABILISTICA DEGLI EVENTI PLUVIOMETRICI STORICI A SCALA DI BACINO	77
5.2 Confronto delle massime altezze di precipitazione con le LSPP areali a scala di bacino	79
5.2.1 Ricerca delle massime altezze di precipitazione	79
5.2.2 Eventi per il Reno a Pracchia	82
5.2.3 Eventi per il Reno a Casalecchio Chiusa.....	89
5.3 Equazione RDDFE	107
5.3.1 Eventi per il Reno a Pracchia	108
5.3.2 Eventi per il Reno a Casalecchio Chiusa.....	109
Cap. 6 ANALISI DI FREQUENZA DEGLI ESTREMI PLUVIOMETRICI E IDROMETRICI	111
6.1 Applicazione: Reno a Pracchia	112
6.1 Applicazione: Reno a Casalecchio Chiusa	118
Cap. 7 ANALISI DEL COEFFICIENTE DI AFFLUSSO	129

<i>Cap. 8 CONCLUSIONI</i>	135
<i>ALLEGATO I</i>	139
Piena del Febbraio 1951.....	139
Piena del Novembre 1966	142
Piena del Novembre 1990 (3_90).....	146
Piena del Settembre 1994 (5_94).....	151
Piena del novembre 2000 (2_00)	156
<i>ALLEGATO II</i>	161
Campioni di osservazioni.....	161
LSPP puntuali.....	173
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	181

INTRODUZIONE

In molti interventi di sistemazione degli alvei fluviali si pone il problema della valutazione della portata di piena di progetto.

Com'è noto, data la difficoltà di descrivere le portate di piena (al pari di numerose altre grandezze idrologiche) attraverso modelli di tipo deterministico ed il conseguente ricorso alla schematizzazione delle stesse come variabili aleatorie, questo problema va affrontato in ambito probabilistico: si tratterà pertanto di determinare la portata che può essere superata (o non superata) con probabilità assegnata.

Una variabile si dice aleatoria o casuale quando i valori che essa può assumere dipendono da un numero elevatissimo di cause mal conosciute o sconosciute del tutto; all'interno della categoria delle variabili aleatorie ricadono anche una serie di grandezze idrologiche rispetto alle quali ci si riferisce più frequentemente.

Possono essere ricordati il massimo annuale della portata al colmo alla sezione di chiusura del bacino o la massima altezza di pioggia annua che, in una durata assegnata, è caduta in un punto qualsiasi del bacino o il valore medio spaziale di questa grandezza sull'area del bacino.

Normalmente, anziché fare riferimento alla scala delle probabilità, si preferisce riferire le stime delle portate di piena al tempo di ritorno.

Il tempo di ritorno viene definito come il tempo medio che intercorre tra, un superamento del valore assegnato della grandezza di interesse ed il successivo; questo può essere associato ad una qualsiasi variabile aleatoria.

La rarità dell'evento è quindi misurata dal valore della probabilità di non superamento P o, in alternativa, da quello del tempo di ritorno T , legato alla probabilità di non superamento dalla relazione

$$T = \frac{1}{1 - P}$$

Il concetto di tempo di ritorno risulta molto comodo per le applicazioni, in quanto 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.

I metodi attraverso i quali si può pervenire alla stima del legame $x = x(T)$ tra la portata al colmo x e il tempo di ritorno T possono essere distinti in diretti ed indiretti.[2] 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.

I *metodi diretti* pervengono alla determinazione del legame $x = x(T)$ sulla base dell'analisi 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.

I *metodi 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 $x = x(T)$. Tali modelli per quanto raffinati, rappresentano solamente una schematizzazione della reale dinamica dei fenomeni fisici; questa circostanza, unita alla costante carenza dei dati idrometeorologici necessari alla calibrazione dei modelli può influenzare negativamente, e spesso in maniera sensibile, l'affidabilità delle stime indirette delle portate di massima piena.

Perciò riveste una importanza fondamentale per i metodi indiretti, uno studio adeguato delle proprietà statistiche delle precipitazioni. Inoltre anche la previsione quantitativa delle piogge intense che vengono a rovesciarsi su una data località durante un nubifragio, riveste un'importanza fondamentale in diversi campi dell'ingegneria, infatti: tutti i manufatti soggetti, in modo diretto o indiretto, all'azione meteorica ed in particolare, le opere idrauliche e gli interventi di difesa e conservazione del suolo necessitano lo studio delle sollecitazioni dovute alle precipitazioni più intense.

Poiché gli eventi pluviometrici costituiscono la principale sollecitazione idrometeorologica sul territorio, la loro previsione è un requisito essenziale per valutare il rischio idrologico e geologico, sia dal punto di vista strettamente alluvionale, sia per quanto riguarda la stabilità dei versanti e l'erosione superficiale.

Attraverso un approccio di tipo probabilistico, o stocastico, il progettista effettua una previsione delle piogge intense valutando la sollecitazione meteorica temibile con assegnata frequenza, opportunamente prefissata in base alla potenziale pericolosità di una eventuale inadeguatezza dell' opera. Infatti, la conoscenza del fenomeno delle precipitazioni, nel suo complesso, e dei processi fisici di natura deterministica, che ne controllano la genesi e la dinamica, risulta tuttora abbastanza frammentaria e di limitata applicabilità, almeno in campo tecnico. Basti pensare alle incertezze con cui le previsioni meteorologiche, pur sostanzialmente migliorate negli ultimi anni, rispondono a quesiti quali: dove, quando, fino a quanto e , soprattutto, quanto pioverà. Quindi ancora meno noti, almeno dal punto di vista quantitativo, lo sono i meccanismi specifici che controllano la formazione e la dinamica dei rovesci di elevata quantità.

Nella previsione delle piogge intense riveste, quindi, un ruolo fondamentale la descrizione probabilistica del processo in esame e bisogna, studiarne le proprietà statistiche che emergono dalle osservazioni sperimentali.

La previsione statistica delle precipitazioni comporta, in prima istanza, l' analisi del comportamento locale della pioggia nel tempo in termini globali; analizzare il comportamento locale significa studiare il fenomeno in un punto dello spazio. Se questo punto corrisponde alla localizzazione di una stazione di misura pluviometrica dotata di una serie di osservazioni sufficientemente lunga, l'analisi si basa sull' elaborazione statistica di tale serie. In caso contrario, l' informazione ottenuta dalle stazioni della rete pluviometrica viene estrapolata nello spazio al fine di fornire indicazioni sul sito in esame. Analizzare il comportamento globale del nubifragio significa valutare l' afflusso idrico complessivamente rovesciato sul sito esaminato, durante un certo lasso di tempo, indipendentemente dalla variabilità del fenomeno stesso all' interno di questo intervallo temporale. Poiché il tasso di precipitazione varia nel tempo in modo assai marcato, l' afflusso idrico rilasciato dal nubifragio, in termini di volume specifico o di tasso medio della precipitazione, varia notevolmente con la lunghezza dell' intervallo temporale considerato e bisogna quindi studiare la natura di tale variabilità. Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica forniscono una risposta a questa necessità, in quanto esprimono il legame tra la durata della precipitazione, l' intensità della stessa e quindi l' altezza d'acqua caduta ed il tempo di ritorno di tale evento. [5]

Va inoltre specificato, che se viene attribuito un determinato tempo di ritorno ad un evento pluviometrico, questo non implica necessariamente che all' onda di piena che ne è conseguita, in particolare a qualche sua grandezza caratteristica (portata di colmo, volume) si possa attribuire lo stesso tempo di ritorno. Infatti, un medesimo volume di pioggia caduta sul bacino, può generare valori anche molto diversi delle portate al colmo di piena, a seconda di come questo volume è distribuito nel tempo e nello spazio, e delle caratteristiche di imbibizione del terreno che compone il bacino al momento in cui si verifica l' evento meteorico intenso, quindi in definitiva a seconda del regime delle precipitazioni antecedenti l' evento.

Oggetto principale di questo studio è l'analisi di frequenza congiunta degli estremi pluviometrici e idrometrici per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa e per il suo sottobacino con chiusura a Pracchia.

Tale analisi si prefigge lo scopo di indagare l' accettabilità dell' ipotesi che sta alla base dei metodi indiretti, per la determinazione della portata di progetto, vale a dire che il tempo di ritorno della generica portata al colmo, sia pari a quello della pioggia critica che l' ha generata. Lo studio sviluppato, mediante opportune tecniche espone di seguito, ha valutato il tempo di ritorno, per i principali eventi di piena osservati per i due bacini di interesse, in particolare della loro portata al colmo.

Inoltre, partendo dalle osservazioni pluviometriche raccolte da una rete di sensori, lo studio ha permesso di quantificare la frequenza degli eventi meteorici che hanno prodotto gli aventi di piena menzionati.

All' analisi di frequenza fa seguito lo studio del *coefficiente di afflusso* per gli eventi di interesse di cui erano disponibili gli idrogrammi di piena osservati, essendo le piogge già trasformate a scala areale è stato sufficiente calcolare i volumi piovuti sul bacino e i volumi del deflusso superficiale transitati attraverso la sezione di chiusura, stimati a partire dagli idrogrammi mediante tecniche di tipo empirico.

Inoltre è stato possibile confrontare il *tempo di corrivazione* del bacino calcolato attraverso la formula di Giandotti, comunemente utilizzata in Italia, con il tempo di corrivazione osservato sperimentalmente.

I risultati di queste analisi sono utili per caratterizzare l' applicabilità dell' ipotesi alla base dei metodi indiretti comunemente utilizzati per la stima della portata di progetto in assenza di osservazioni idrometriche alla sezione fluviale di interesse. Come noto detta portata costituisce un elemento fondamentale per la progettazione di opere idrauliche di difesa del territorio volte a prevenire gli eventi alluvionali, tali interventi

possono essere sia di carattere strutturale (arginature, serbatoi di laminazione, casse di espansione, diversivi, scolmatori), ma anche di carattere non strutturale (regolamentazione del territorio, assicurazione obbligatoria, preannuncio delle piene) attraverso i quali si modifica la danneggiabilità degli elementi esposti al rischio di piena.

Cap. 1 RACCOLTA ED ANALISI DEI DATI

Fondamentale importanza riveste all'interno di un lavoro scientifico di tipo sperimentale, la fase preliminare in cui attraverso una analisi degli obbiettivi preposti si indaga sulla tipologia e sulla qualità dei dati necessari.

Dato il carattere spiccatamente sperimentale dello studio che verrà esposto nei capitoli successivi, anche in questo caso è stato necessario svolgere una importante fase iniziale di analisi e di raccolta dati al fine di poter correttamente operare durante le varie fasi successive.

I dati idrologici di interesse fondamentale per lo svolgimento delle varie analisi statistiche, possono essere sia già elaborati dalle autorità che li hanno pubblicati, ma anche dati grezzi e, nonostante la multiforme tipologia ed i vari formati in cui sono stati utilizzati è possibile suddividerli in due grandi categorie che verranno presentate ed analizzate separatamente: dati pluviometrici e dati idrometrici.

I dati pluviometrici utilizzati provengono da una rete di pluviometri scelti sulla base di considerazioni di omogeneità di distribuzione sul bacino del Reno, ma anche a seconda della disponibilità di serie di dati sufficientemente numerose e che riguardassero i periodi di interesse. I dati di portata riguardanti le sezioni idrometriche di Casalecchio Chiusa e Pracchia sono ottenuti a partire dalle altezze idrometriche mediante opportuna scala di deflusso, infatti le misure dirette di portata sono decisamente onerose, perché la loro esecuzione richiede un notevole impegno di attrezzature, di personale e di tempo.

Per questa ragione il problema delle osservazioni di portata dei corsi d' acqua si risolve facendo ricorso a misure indirette; la grandezza che si misura con regolarità è l' altezza del pelo libero, in funzione della quale si calcola la portata.

1.1 Dati pluviometrici

1.1.1 Annali idrologici

Le osservazioni pluviometriche possono provenire, in uno stesso paese, anche da più fonti diverse: osservatori meteorologici e geofisici, consorzi di bonifica, società idroelettriche, enti locali e servizi meteorologici e idrografici. Le osservazioni poi devono essere raccolte e pubblicate, per quanto riguarda questa fase normalmente se ne occupa un ente pubblico, che può anche gestire direttamente la rete pluviometrica, oppure gli strumenti possono essere gestiti da altri, che provvedono a trasmettere regolarmente le osservazioni all'ente pubblico. Alla pubblicazione dei risultati delle osservazioni raccolte nelle numerosissime stazioni corrispondenti, il Servizio Idrografico provvedeva in modo sistematico a mezzo dei Bollettini Idrografici, denominati successivamente Annali Idrologici. La serie di queste pubblicazioni periodiche è iniziata 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. I bollettini venivano preparati direttamente dagli Uffici e dalle Sezioni secondo uno schema generale pressoché uniforme, che era stato concretato dalla Presidenza della 3° Sezione del Consiglio Superiore. A partire dal 1951 la pubblicazione delle osservazioni ha assunto la veste tipografica degli Annali Idrologici, rimasta pressoché invariata fino alle ultime edizioni. Le suddette pubblicazioni avevano raggiunto nel tempo un grado di notevole perfezione, sia per la mole del materiale e per la sollecitudine con la quale veniva pubblicato, sia per i criteri rigorosamente scientifici che ne ispirano l'elaborazione. Non ci si limitava infatti a riprodurre nella loro nuda veste numerica i risultati delle osservazioni che venivano trasmesse dalle stazioni, ma questi risultati erano sottoposti ad un esame critico assai completo, con l'intendimento 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 desolato abbandono, che ha comportato una sua riorganizzazione presso le Regioni al fine di garantire preziose attività idrologiche, quali la raccolta sistematica, l'archiviazione e l'elaborazione delle osservazioni e misure, dedicate alla conoscenza dei regimi idrologici.

L'art. 92 del D.Lgs. 31 marzo 1998 n. 112 dispone che gli Uffici periferici del Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali (DSTN) siano trasferiti alle Regioni ed incorporati nelle strutture operative regionali competenti in materia. In particolare, gli accordi intercompartimentali garantiscono il funzionamento delle reti di rilevamento sulla base degli standard fissati dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) del Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali, d'intesa con le Regioni, nonché la continuità del rilevamento delle stazioni storiche del SIMN e l'analisi, validazione e pubblicazione dei dati idrologici a scala di bacino idrografico.

Il trasferimento delle competenze dal livello nazionale agli organi regionali ha prodotto in Emilia Romagna l'istituzione della struttura tematica ARPA Servizio IdroMeteorologico (ARPA SIM).

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 e all'elaborazione dei dati idrologici. Si occupa infine della diffusione, sotto varie forme, degli stessi dati e dei risultati delle elaborazioni e degli studi che su di essi vengono condotti.

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 compendiate 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.

Gli annali idrologici sono costituiti da due parti, le osservazioni pluviometriche sono contenute nella sezione B della prima parte, insieme con la termometria; mentre la seconda parte comprende l'idrometria, i bilanci idrologici, la freatimetria e la torbiometria. A titolo di esempio nelle pagine seguenti viene riportata una pagina degli *Annali Idrologici* per ogni tipologia di tabella di interesse.

La tabella I riporta, le osservazioni di pioggia giornaliere, con lettura alle 9 del mattino e il risultato è attribuito al giorno della lettura. Un esempio della tabella I è riportato nella Figura 1.1.

La tabella II riporta, la pioggia totale annua e i totali mensili delle precipitazioni. Un esempio della tabella II è riportato nella Figura 1.2.

La tabella III riporta 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. Un esempio della tabella III è riportato nella Figura 1.3.

La tabella IV riporta, le massime precipitazioni dell' anno per periodi di più giorni consecutivi; rispettivamente 1, 2, 3, 4 e 5 giorni. Un esempio della tabella IV è riportato nella Figura 1.4.

Tutti i dati pluviometrici, relativi alle stazioni di misura di interesse, che verranno descritti nel paragrafo seguente e che sono stati utilizzati per le varie analisi, sono parte dei dati pubblicati negli Annali Idrologici, trasformati in digitale per essere più facilmente fruibili.

1.1.2 Stazioni pluviometriche

Il bacino del Reno risulta essere caratterizzato da una rete particolarmente ricca di pluviometri, le stazioni di misura sono particolarmente dense nel tratto montano che va da Piastre fino a Vergato, data inoltre la notevole differenza altimetrica tra le stazioni si può ipotizzare che questa differenza di quota si ripercuoterà anche sulle altezze di precipitazione passando dal tratto montano a quello di pianura.

La scelta delle stazioni pluviometriche utilizzate per descrivere l' area presa in considerazione è stata fatta sulla base di due criteri:

I Disponibilità dei dati: è stato necessario verificare che, le stazioni prese in considerazioni avessero delle serie di dati sufficientemente ampie per costruire in maniera robusta le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, ed inoltre fossero attive negli anni in cui vengono estratti gli eventi di piena analizzati (a meno di periodi di fuori servizio) per poter utilizzare i dati di precipitazione oraria.

II Omogeneità: per descrivere nel modo più omogeneo possibile il regime pluviometrico sul bacino del Reno, è stato necessario verificare che non ci fossero zone tali da non essere ben rappresentate da un numero sufficiente di pluviometri.

Come è possibile notare nella Figura 1.5, il tratto montano (porzione meridionale) in cui la variabilità climatica è maggiore viene descritto da un numero maggiore di stazioni, mentre nel tratto di pianura il numero di pluviometri è inferiore, data la minore disponibilità, ma anche la minore variabilità climatica.

Bacino del Reno

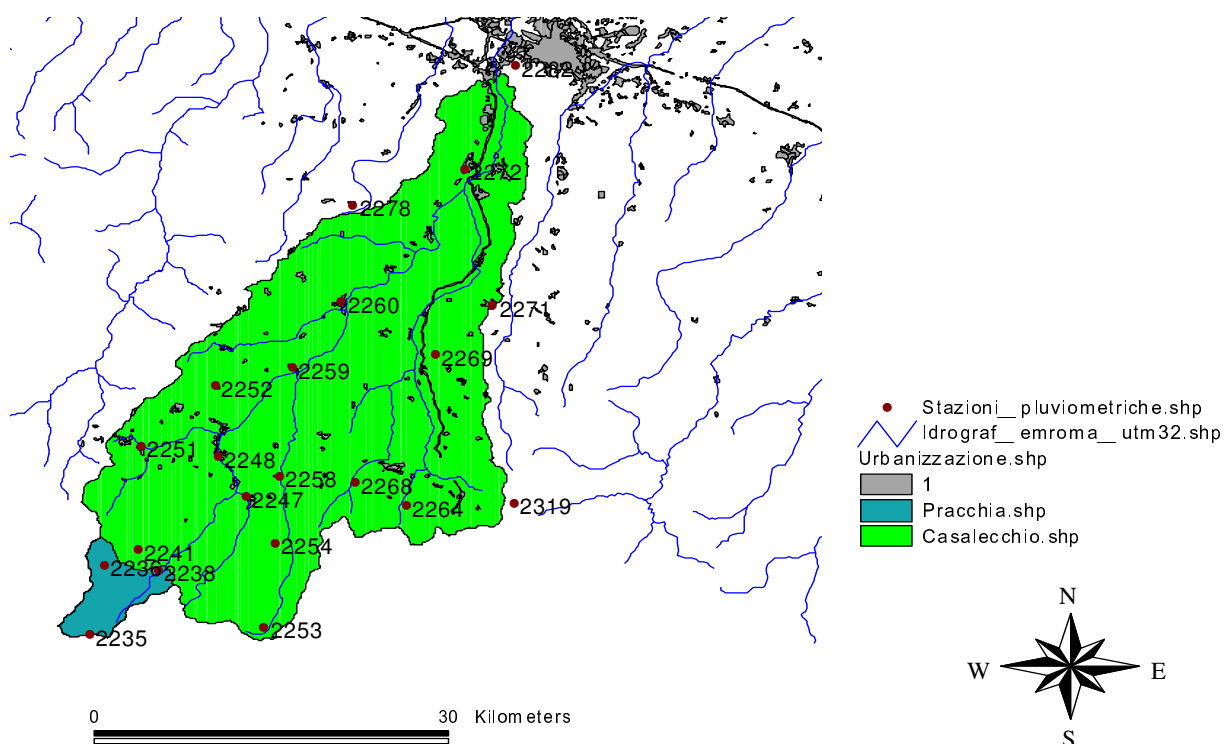


Fig. 1.5: Bacino del Reno con chiusura a Casalecchio e Pracchia; i puntini indicano le stazioni pluviometriche scelte.

Nella Tabella 1.3 viene riportato l'elenco completo delle stazioni pluviometriche di interesse, inoltre vengono riportate le loro caratteristiche, comprensive degli elementi necessari per la loro ubicazione in termini di latitudine, longitudine e quota; oltre al comune, provincia, bacino di appartenenza, ed infine il codice utilizzato per identificarle.

Per ognuna delle stazioni pluviometriche elencate 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.

- **Piogge orarie**, cioè i dati di precipitazione oraria, relativi ai periodi di interesse; necessari per caratterizzare gli eventi pluviometrici generatori delle piene prese in considerazione.

Inoltre ad ogni stazione di misura è stato associato un peso, calcolato con il metodo dei **poligoni di Thiessen** o **Topoieti**, sfruttando le potenzialità del softwareGIS Arcwiev. Il metodo di Thiessen assume che in qualsiasi punto del bacino la pioggia caduta sia la stessa del pluviometro più vicino; in questo modo si suppone che la misura di ogni strumento possa essere rappresentativa di un' area che si estende radialmente dallo strumento fino alla semidistanza dallo strumento adiacente, in ogni direzione. In pratica si procede come segue: si tracciano sulla pianta del bacino le linee congiungenti pluviometri adiacenti, di esse si disegnano gli assi; questi ultimi vengono a comporre una serie di poligoni, ognuno dei quali racchiude una singola stazione, come è possibile osservare in Figura 1.6.

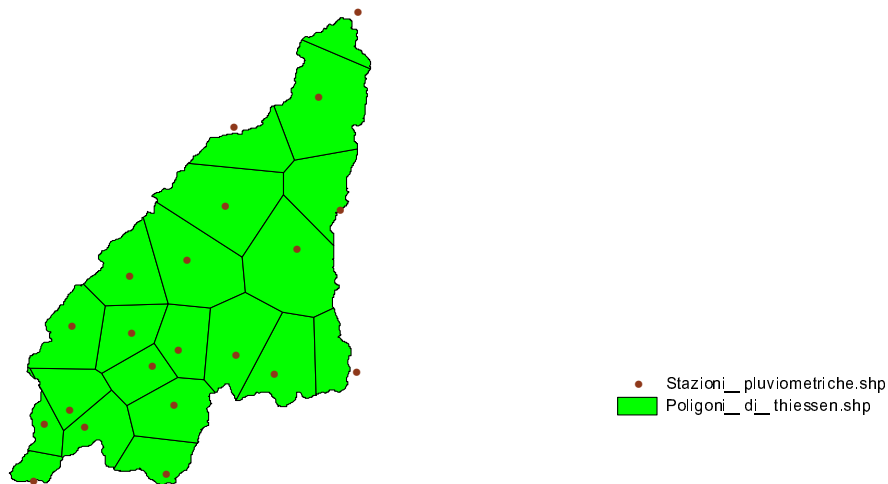


Fig. 1.6: Poligoni di Thiessen applicati al Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

Indicata con j la generica stazione e con A_j l' area del poligono che la contiene, si determina il peso w_j come rapporto tra A_j e l' area totale A . Questo metodo sfrutta anche pluviometri esterni al bacino, con l' importante accorgimento di considerare, per i poligoni di confine, l' area di competenza A_j pari all' intersezione della superficie del poligono con quella del bacino.[7] Se con n si indica il numero totale di pluviometri, il calcolo della precipitazione media puntuale sull' area A si effettua con la seguente formula:

$$P_A = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^n A_j P_j = \sum_{j=1}^n w_j P_j \quad (1)$$

Nella Tabella 1.1 vengono riportati i risultati ottenuti per le stazioni pluviometriche che interessano il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

Nome stazione	w_j	DIGA DI SUVIANA	4%
PIASTRE	1%	RIOLA DI VERGATO	8%
MARESCA	2%	VERGATO	9%
PRACCHIA	4%	COTTEDE	6%
ORSIGNA	3%	DIGA DEL BRASIMONE	6%
DIGA DI PAVANA	3%	MONTEACUTO VALLESE	9%
PORRETTA TERME	4%	MONZUNO	5%
LIZZANO IN BELVEDERE	5%	SASSO MARCONI	9%
BOMBIANA	5%	MONTEPASTORE	4%
ACQUERINO	3%	BOLOGNA (San Luca)	2%
TREPPIO	5%	TRAVERSA	3%

Tab. 1.1: Pesì ottenuti per le 21 stazioni di interesse sul bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

Allo stesso modo i pesì sono stati calcolati anche per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia (Figura 1.7) e i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 1.2.

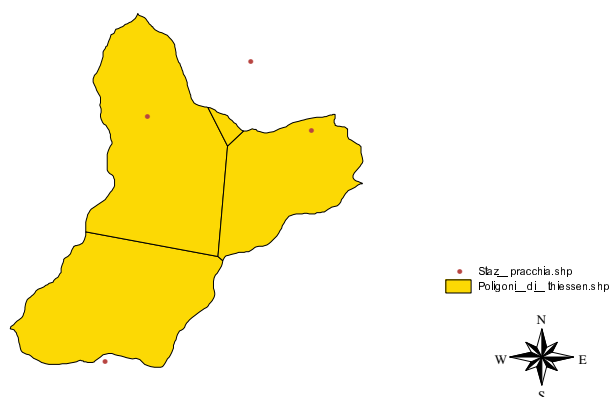


Fig. 1.7: Poligoni di Thiessen applicati al Reno con chiusura a Pracchia.

Nome stazione	w_j
PIASTRE	34%
MARESCA	41%
PRACCHIA	24%
ORSIGNA	1%

Tab. 1.2: Pesì ottenuti per le 4 stazioni di interesse sul bacino del Reno, con chiusura a Pracchia.

Nome stazione	Prov.	Comune	Bacino
ACQUERINO	PT	Sambuca Pistoiese	Reno (Limentra di Riola)
BOLOGNA SAN LUCA	BO	Bologna	Navile-Savena abb.
BOMBIANA	BO	Gaggio Montano	Reno (Silla)
COTTEDE	BO	Castiglione de Pepoli	Setta
DIGA DEL BRASIMONE	BO	Camugnano	Setta
DIGA DI PAVANA	PT	Sambuca Pistoiese	Reno (Limentra di Sambuca)
DIGA DI SUVIANA	BO	Camagnano	Reno (Limentra di Riola)
LIZZANO IN BELVEDERE	BO	Lizzano in Belvedere	Reno (Silla)
MARESCA	PT	S. Marcello Pistoiese	Reno (Maresca)
MONTEACUTO VALLESE	BO	S. Ben. Val Sambro	Setta
MONTEPASTORE	BO	Monte S. Pietro	Samoggia (Lavino)
MONZUNO	BO	Monzuno	Savena-Idice
ORSIGNA	PT	Pistoia	Reno (Orsigna)
PIASTRE	PT	Pistoia	Reno
PORRETTA TERME	BO	Porretta Terme	Reno
PRACCHIA	PT	Pistoia	Reno
RIOLA DI VERGATO	BO	Vergato	Reno
SASSO MARCONI	BO	Sasso Marconi	Setta
TRAVERSA	FI	Firenzuola	Santerno
TREPPIO	PT	Sambuca Pistoiese	Reno (Limentra di Riola)
VERGATO	BO	Vergato	Reno

Tab. 1.3-a: Caratteristiche delle stazioni pluviometriche di interesse.

Nome stazione	Cod. S.I.M.N.	Latitudine	Longitudine ¹	Quota s.l.m. ²
ACQUERINO	2253	44° 00' 25"N	01° 26' 00"W	890
BOLOGNA SAN LUCA	2282	44° 29' 00"N	01° 09' 00"W	286
BOMBIANA	2252	44° 12' 52"N	01° 28' 40"W	804
COTTEDE	2264	44° 06' 30"N	00° 16' 50"W	850
DIGA DEL BRASIMONE	2268	44° 07' 45"N	01° 20' 00"W	830
DIGA DI PAVANA	2247	44° 07' 10"N	01° 26' 57"W	480
DIGA DI SUVIANA	2258	44° 08' 10"N	01° 24' 45"W	500
LIZZANO IN BELVEDERE	2251	44° 09' 50"N	01° 33' 30"W	640
MARESCA	2236	44° 03' 39"N	01° 36' 13"W	830
MONTEACUTO VALLESE	2270	44° 14' 15"N	01° 14' 40"W	747
MONTEPASTORE	2278	44° 22' 00"N	01° 19' 36"W	596
MONZUNO	2271	44° 16' 40"N	01° 10' 55"W	589
ORSIGNA	2241	44° 04' 60"N	01° 33' 50"W	855
PIASTRE	2235	44° 00' 12"N	01° 37' 00"W	741
PORRETTA TERME	2248	44° 09' 15"N	01° 28' 37"W	349
PRACCHIA	2238	44° 03' 30"N	01° 32' 36"W	627
RIOLA DI VERGATO	2259	44° 13' 42"N	01° 23' 49"W	270
SASSO MARCONI	2272	44° 23' 44"N	01° 12' 28"W	130
TRAVERSA	2319	44° 06' 30"N	01° 10' 00"W	851
TREPPIO	2254	44° 04' 45"N	01° 25' 10"W	650
VERGATO	2260	44° 17' 04"N	01° 20' 32"W	195

Tab. 1.3-b: Caratteristiche delle stazioni pluviometriche di interesse.

¹ Riferimento a Monte Mario, 12° 27' 08'' EST da Greenwich.

² Espressa in metri.

1.2 Dati idrometrici

Prima di procedere nella discussione dei dati di piena utilizzati, è necessario specificare il significato che assume il termine “Piena”:

- *l'evento idraulico in cui si è verificato il superamento del “livello di attenzione” in più sensori idrometrici consecutivi di almeno un corso d'acqua del bacino.*

Le stazioni idrometriche d'interesse per questo studio sono quella di Pracchia e di Casalecchio Chiusa; alle quali viene associato un valore di attenzione rispettivamente di 100 e 80 cm, rispetto allo zero idrometrico delle sezioni.

Come già detto in precedenza, le portate essendo particolarmente oneroso stimarle attraverso misurazioni dirette, perciò viene rilevato il livello idrometrico; l'archivio delle piene registrate in telemisura nel bacino del Reno risale al 1981, quindi dispone già di una notevole serie d'informazioni. Queste informazioni, opportunamente organizzate per una visione rapida, potranno far parte del bagaglio necessario allo svolgimento del “Servizio di Piena”.

I livelli delle punte max di tutte le piene, messi in ordine decrescente, sono riportati in diciannove schede, ogni scheda contiene i dati di tre o quattro stazioni di misura; le schede di interesse in cui sono registrati i dati di Pracchia e Casalecchio Chiusa sono: *pmcreno-Pracchia* e *pmcreno-SassoMarconi*¹ ogni evento di piena è identificato da un codice costruito dal numero progressivo della piena nell' anno in cui è accaduta e dalle ultime due cifre dell' anno stesso.

Altre informazioni fondamentali si ottengono dai file: *pm81_90*, *pm91_00*, *pm01_10*; dove vengono riportate tutte le piene registrate suddivise per decenni e in ordine cronologico con la rispettiva altezza al colmo, giorno e orario di passaggio alla determinata sezione idrometrica; da qui è possibile associare ad ogni codice la piena che gli corrisponde.

¹ I dati citati sono disponibili in versione digitale dal sito dell' autorità di bacino del Reno, www.regione.emilia-romagna.it/bacinoreno.

1.2.1 Eventi di riferimento

La scelta degli eventi di piena di riferimento, cioè rispetto ai quali condurre le analisi preposte, è stata condizionata dalla disponibilità di dati pluviometrici orari.

• Il caso di Casalecchio

Nel caso del bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa, sebbene le registrazioni di piena sono disponibili dall'anno 1981, è stato necessario ridurre gli eventi di interesse tralasciando quelli caduti negli anni tra 1981 e 1989; in quanto in questi anni non sarebbero stati disponibili i dati di precipitazione oraria necessari per caratterizzare le piogge generatrici.

L'analisi è stata condotta su un totale di undici eventi, elencati nella Tabella 1.4, verificati tra il 1990 e il 2004 e tali da superare l'*altezza di piena ordinaria*¹ (1.49 m) definita come:

“L' altezza di piena ordinaria, in una sezione fornita di idrometro, e per un lungo periodo di osservazione (parecchie decine d'anni), è il livello superato o uguagliato dalle massime altezze annuali verificate nella sezione in 3/4 degli anni di osservazione (durata 75%)”.

Piena	Data	h (m)
3_90	25-nov-90	2.55
5_94	22-set-94	2.48
2_00	07-nov-00	2.2
5_92	05-dic-92	1.95
4_94	13-giu-94	1.87
4_90	10-dic-90	1.81
3_92	31-ott-92	1.76
4_03	08-nov-03	1.75
5_03	28-nov-03	1.71
4_04	31-ott-04	1.65
4_91	12-ott-91	1.58

Tab. 1.4: Eventi di piena relativi alla sezione di Casalecchio Chiusa analizzati, elencati in ordine decrescente.

Inoltre sono stati studiati anche due eventi storici di maggiore rilievo, per i quali però non essendo disponibili i dati di precipitazione oraria si è condotta una analisi solamente in riferimento ai quantili giornalieri cioè 1 e 5 giorni.

¹ Definizione data dal Servizio Idrografico Nazionale al XV Congresso Internazionale di Navigazione tenutosi a Venezia nel settembre 1931.

Le piene storiche sopra citate sono rispettivamente quella del 4 novembre 1966 con una portata di 1647 m³/s e quella del 5 febbraio 1951 che ha fatto registrare una portata di 1940 m³/s.

Per gli eventi: 3_90, 5_94, 2_00, è stato possibile calcolare il coefficiente di deflusso, grazie alla disponibilità delle portate semiorarie defluite.

• Il caso di Pracchia

Nel caso del bacino del Reno con chiusura a Pracchia, le analisi sono state limitate dal fatto che le portate in formato digitale sono disponibili a partire dal 2002, quindi in totale sono stati analizzati otto eventi, elencati nella Tabella 1.5.

Piena	Data	h (m)
3_02	23-ott-02	2.39
4_02	17-nov-02	1.57
5_03	27-nov-03	1.32
4_03	8-nov-03	1.3
1_02	4-mag-02	1.25
6_03	29-dic-03	1.16
1_04	17-gen-04	1.1
1_03	21-gen-03	1.05

Tab. 1.5: Eventi di piena relativi alla sezione di Pracchia analizzati, elencati in ordine decrescente.

1.3 Cenni sugli eventi di piena più significativi

In Allegato I si riportano le descrizioni¹ di alcuni degli eventi di piena presi in considerazione: le piene storiche del 5 febbraio 1951 e del 4 novembre 1966; inoltre anche le tre piene più importanti analizzate cioè la 3_90 (25 novembre 1990), la 5_94 (22 settembre 1994) e la 2_00 (7 novembre 2000).

Tali descrizioni, sebbene ogni piena è differente da ogni altra, possono essere utili per avere dei riferimenti riguardo a modalità, tempi e quantità in gioco.

Le informazioni che hanno portato a redigere il lavoro che segue risultano, in massima parte, dalle relazioni e dai dati idro-pluviometrici pubblicati sugli Annali Idrologici del Servizio Idrografico, dalle registrazioni di piena dell' Ufficio speciale del Genio Civile per il Reno e dall'archivio dell'impianto di telemisure funzionante dal 1981.

Per ogni piena si sono raccolti i valori di pioggia, i livelli e le portate al colmo, i tempi di propagazione dell'onda. Al termine di ogni esposizione è stata effettuata una sintesi da cui si può immediatamente rilevare: - lo stato del terreno all'atto della piena, - il tipo di pioggia che ha provocato la piena, - il numero dei colmi registrati alla chiusura del bacino montano del Reno, - la portata al colmo nella sezione di Casalecchio, - la singolarità che ha caratterizzato la piena, - gli effetti che la piena ha prodotto in termini di danni.

¹ Pubblicate sul sito dell' Autorità di Bacino del Reno, a cura di Enrico Cerioni, Bologna, Aprile 2001.

Cap. 2 STIMA DEI TEMPI DI RITORNO PER LE PORTATE DI PIENA

2.1 Trasformazione delle altezze idrometriche in portate

Come si è già avuto modo di dire nel capitolo precedente, le misure dirette di portata sono particolarmente onerose, perché la loro esecuzione richiede un notevole impegno di attrezzature, di personale e di tempo; per questa ragione il problema dell'osservazione delle portate dei corsi d'acqua si risolve facendo ricorso a misure indirette. La grandezza che si misura con regolarità è il livello del pelo libero in funzione del quale si calcola la portata; infatti le misurazioni di portata si eseguono normalmente allo scopo di determinare la relazione tra altezze idrometriche e portate, che prende il nome di *scala di deflusso*, o scala delle portate.

L'uso della scala delle portate implica che la relazione tra altezze idrometriche e portate sia costante nel tempo e dunque che l'alveo sia stabile e la pendenza del pelo libero sia costante, per una data altezza d'acqua. Queste condizioni a rigore non sussistono mai nei corsi naturali, ma in pratica nella maggior parte dei casi si può assumere senza apprezzabile errore che una sezione di un corso d'acqua sia caratterizzata dalla relativa scala di deflusso, valida per qualunque condizione idrometrica e costante nel tempo, almeno finché non intervengano consistenti cambiamenti dell'alveo.

La scala delle portate si individua interpolando con una curva i punti che rappresentano, in un diagramma cartesiano in cui sono riportate in ascissa le altezze idrometriche h e in ordinata le portate Q , le osservazioni contemporanee di livello e di portata. Della curva interpolante è bene dare, per rendere più agevole l'utilizzazione, una rappresentazione analitica.

La rappresentazione più comune è quella costituita dall'espressione seguente:

$$Q = Q_0 + a(h - h_0)^b \quad (1)$$

Qualche volta delle particolari condizioni causano delle irregolarità nella disposizione dei punti sperimentali che non si possono facilmente interpretare con un' espressione analitica semplice. Le irregolarità, in quanto significative e non spiegabili con la normale dispersione delle misure, devono comunque essere rispettate dalla curva interpolante. Un problema importante che si presenta nell' uso della scala di deflusso è quello dell' estrapolazione. A causa della difficoltà di effettuare delle misure dirette di portata in condizioni di piena, le osservazioni di portata si fermano spesso a livelli che non sono quelli massimi. Per determinare le portate corrispondenti a questi livelli si deve dunque prolungare la scala delle portate al di là del campo delle osservazioni. L' estrapolazione richiede alcune cautele, perché dei due fattori della portata uno solo, la velocità, cresce in modo abbastanza regolare al crescere del livello. L' altro fattore, l'area della sezione bagnata, cresce in un modo che rispetta la forma della sezione¹. Se la sezione ha una forma regolare, per esempio all' incirca rettangolare, o trapezia, si può estendere alle altezze idrometriche maggiori la curva adottata per interpolare le osservazioni.

Se invece la sezione ha forma irregolare, si deve procedere in modo diverso. Si costruisce un grafico in cui si riportano le velocità medie, anziché le portate, in funzione dell' altezza idrometrica e si interpolano i punti corrispondenti alle osservazioni con una curva , che si estende fino all' altezza voluta. Il tratto della curva ottenuto per estrapolazione si trasforma quindi nel tratto corrispondente della scala delle portate moltiplicando le velocità medie per le aree relative, che sono facilmente ricavabili dal rilievo topografico della sezione. Procedendo in questo modo si limita l' errore alla sola stima della velocità, evitando di estenderlo senza necessità alla stima dell' area.

Come si è già osservato gli alvei dei corsi d'acqua naturali non sono mai del tutto stabili. Nel caso di alvei rocciosi, caratterizzati dalla presenza di grossi macigni, modifiche apprezzabili possono avere luogo soltanto il occasione di piene notevoli, dopo le quali è necessario eseguire misure di controllo. Nel caso di alvei costituiti da materiale sciolto, che vengono continuamente rimodellati dalla corrente, le modifiche sono più facili e frequenti, ma è anche comune il caso che gli spostamenti dei banchi di sabbia e ghiaia tendano a ricompensarsi tra loro, così che la scala di deflusso resti

¹ Roche, 1963.

praticamente immutata (eccetto che, eventualmente, per i livelli molto bassi) anche per periodi piuttosto lunghi. In ogni caso, comunque, le scale di portata devono essere controllate, compatibilmente con le disponibilità economiche, con osservazioni periodiche, tanto più frequenti quanto meno stabile è l' alveo, e aggiornate ogni volta che si riscontra un cambiamento significativo.

2.1.1 Il caso di Casalecchio Chiusa

La sezione idrometrica di Casalecchio Chiusa sottende un bacino idrografico di 1057 Km² (Vedi Figura 1.5) con una altitudine massima di 1945 m s. l. m. e una altitudine media di 639 m s. l. m.; inoltre si presta bene al calcolo delle portate, in quanto essendo una sezione artificiale (Figura 2.1), la si può ritenere sufficientemente stabile nel tempo. Infatti la sezione dal 1950 può essere descritta con il seguente schema geometrico: traversa principale della larghezza di 161,60 metri con profilo che a partire dalla sponda destra degrada di metri 0,15 verso il centro per 41,00 metri, quindi rimane orizzontale per 10,00 metri e risale, verso lo spartiacque di metri 0,33 dopo 110,60 metri. Spartiacque fra la traversa principale e lo sfioratore della larghezza di 18,00 metri, con altezza al cordolo, dal punto più depresso della traversa principale, di metri 3,90. Sfiatore di sponda sinistra, orizzontale, della larghezza di 85,00 metri sovrastante, il punto più depresso della traversa principale, di 1,48 metri (teoricamente si può considerare che con una altezza di metri 1,50 lo sfioratore venga interessato dall'acqua di piena; di fatto, in conseguenza della possibile vegetazione delle sponde di monte, ciò avviene fra 1,60 / 1,80 metri dallo zero idrometrico); La larghezza complessiva della traversa principale, dello spartiacque e dello sfioratore è quindi pari a metri 264,60; il pelo libero di monte interessato dalla traversa principale e dallo sfioratore di sponda sinistra è quindi pari a metri 246,60.



Fig. 2.1: La Chiusa di Casalecchio.

E' stato possibile calibrare la relazione (1) sulla base di una serie storica di portate di piena e le relative altezze idrometriche. Il metodo utilizzato è sostanzialmente quello dei minimi quadrati, cioè si sono cercati i parametri Q_0 , a , h_0 , b della relazione (1) tali che rendessero minima la somma delle differenze al quadrato tra il valore calcolato di portata e il valore disponibile. I dati utilizzati per il calcolo dei parametri sono riportati in Tabella 2.1; questi non necessariamente coincidono con gli eventi che si è scelto di analizzare.

anno	h(m)	Q(mc/s)	anno	h(m)	Q(mc/s)
1950	2.04	1047	1976	1.55	582
1951	3.12	2143	1977	1.55	582
1952	1.79	806	1978	1.72	741
1953	1.24	385	1979	1.65	675
1954	1.50	540	1980	1.45	508
1955	1.64	666	1981	1.65	675
1956	1.90	908	1982	1.90	908
1957	2.00	1003	1983	1.67	694
1958	1.72	741	1984	2.00	1003
1959	1.75	770	1985	1.90	908
1960	1.86	870	1986	1.07	329
1961	2.18	1183	1987	2.09	1097
1962	1.40	478	1988	1.24	386
1963	1.56	592	1989	1.17	348
1964	1.48	527	1990	2.55	1545
1965	1.88	889	1991	1.58	611
1966	2.65	1647	1992	1.95	955
1967	1.56	592	1993	1.29	413
1968	1.85	861	1994	2.48	1476
1969	2.15	1152	1995	1.37	460
1970	1.40	478	1996	1.27	402
1971	1.60	630	1997	1.34	442
1972	1.90	908	1998	1.09	307
1973	1.61	639	1999	1.33	436
1974	1.30	419	2000	2.20	1203
1975	1.60	630			

Tab. 2.1: Eventi di piena utilizzati per il calcolo dei parametri della scala di deflusso.

I risultati ottenuti sono:

a	425.14
b	1.59
ho	0.30
Qo	0.00

In Figura 2.2 è stata rappresentata la legge analitica stimata e la distribuzione dei punti noti, è possibile osservare come tutti i dati siano ben allineati e la dispersione sia minima o inesistente, questo è dovuto alla sezione della Chiusa che essendo artificiale crea un legame univoco tra portata e altezza idrometrica; inoltre la chiusa “sconnette” idraulicamente monte da valle producendo un salto non rigurgitabile in condizioni di piena.

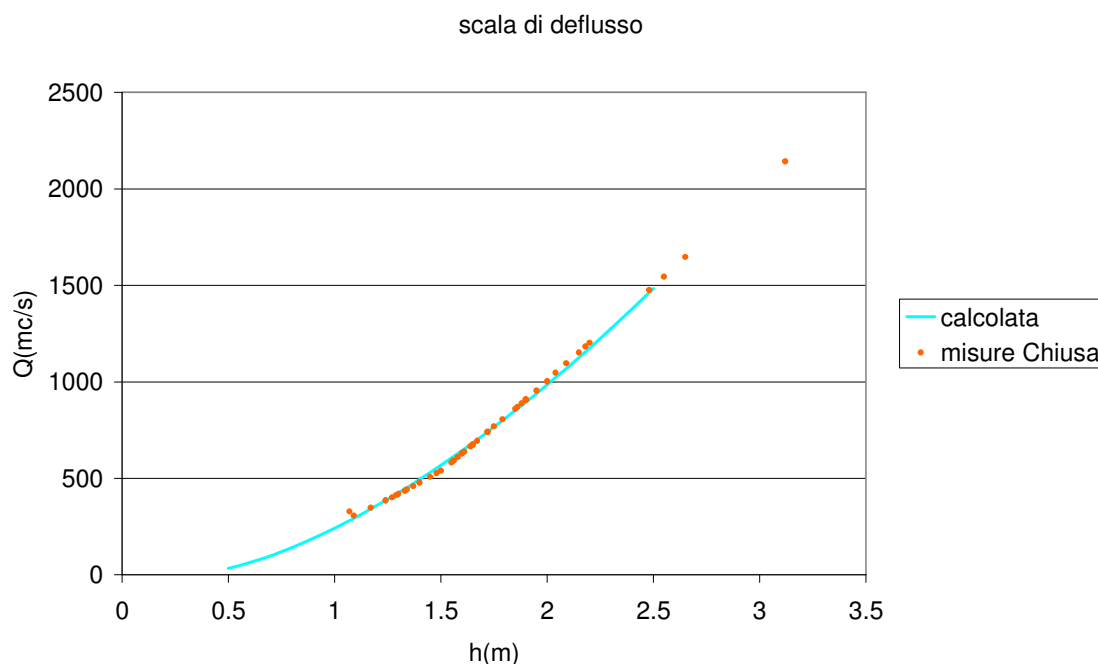


Fig. 2.2: Scala di deflusso analitica stimata per la sezione di Casalecchio Chiusa.

L’ utilizzo dei risultati ottenuti, ha dato luogo alle portate di Tabella 2.2 per gli eventi di interesse:

Piena	Mese	h idr. (cm)	Q(m³/s)
3\90	NOVEMBRE	255	1537.5
5\94	SETTEMBRE	248	1462.4
2\00	NOVEMBRE	220	1176.0
5\92	DICEMBRE	195	940.4
4\94	GIUGNO	187	869.1
4\90	DICEMBRE	181	817.1
3\92	OTTOBRE	176	774.6
4\03	NOVEMBRE	175	766.2
5\03	NOVEMBRE	171	733.0
4\04	NOVEMBRE	165	684.1
4\91	OTTOBRE	158	628.8

Tab. 2.2: Portate ottenute mediante scala di deflusso per gli eventi di interesse nella sezione di Casalecchio Chiusa.

Essendo la formula (1), della scala delle portate, stata calibrata sulla base di soli dati di piena, si ottengono dei risultati tali che la rendono particolarmente affidabile quando si vanno a trasformare delle altezze di piena; mentre può essere instabile nel caso in cui si trasformano dati di portate ordinarie, infatti l' altezza idrometrica deve essere sufficientemente differente da h_0 , si può considerare come valore limite una altezza di 0.45 m. Questo problema però non va ad inficiare i risultati ottenuti, in quanto in questo studio si analizzeranno solamente dati di piena.

2.1.2 Il caso di Pracchia

La sezione di Pracchia sottende un bacino molto più modesto rispetto a quello di Casalecchio, di solamente 41 Km² con caratteristiche tipicamente montane, una altitudine massima di 1640 m s.l.m. e una altitudine media di 890 m s.l.m., con una distanza dalla foce di circa 197 Km.

La sezione considerata è in corrispondenza di un ponte denominato “Ponte Appennino”, per questo può essere ritenuta sufficientemente stabile nel tempo.

La scala delle portate è stata fornita dall' Autorità di Bacino del Reno con un andamento numerico, proposto nella Tabella 2.3 per altezze idrometriche fino a 0.96 m sopra lo zero idrometrico, oltre questa soglia è fornita la formula analitica (2).

H (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)
-0.12	0	0.25	3.03	0.65	17.55
-0.1	0.01	0.3	4.06	0.7	20
-0.05	0.04	0.35	5.28	0.75	22.52
0	0.12	0.4	6.8	0.8	25.14
0.05	0.37	0.45	8.58	0.85	27.83
0.1	0.82	0.5	10.6	0.9	30.6
0.15	1.41	0.55	12.84	0.95	33.43
0.2	2.14	0.6	15.14	0.96	34

Tab. 2.3: Scala delle portate numerica per la sezione di Pracchia, valida fino al valore 0.96 m sopra lo zero idrometrico.

Per $H > 0.96\text{m}$
$$Q = AH^{\frac{3}{2}} - B \quad (2)$$

Con $A = 38.89$ e $B = 2.58$.

L' utilizzo della scala di deflusso appena esposta ha dato luogo alle portate di Tabella 2.4 per gli eventi di interesse nella sezione di Pracchia.

Piena	Mese	h. idr. (cm)	Q(m³/s)
3\02	OTTOBRE	239	141.1
4\02	NOVEMBRE	157	74.0
5\03	NOVEMBRE	132	56.4
4\03	NOVEMBRE	130	55.1
1\02	MAGGIO	125	51.8
6\03	DICEMBRE	116	46.0
1\04	GENNAIO	110	42.3
1\03	GENNAIO	105	39.3

Tab. 2.4: Portate ottenute mediante scala di deflusso per gli eventi di interesse nella sezione di Pracchia.

2.2 Stima dei tempi di ritorno

Il calcolo dei tempi di ritorno per le varie portate di piena è stato condotto utilizzando tre metodi differenti, due basati su una stima *parametrica*, mentre l'altro di tipo *non parametrico*.

Per quanto riguarda il primo metodo parametrico si è scelto di utilizzare il metodo della *portata indice*, la distribuzione di probabilità adottata è la TCEV¹, costituita da un modello a doppia componente, in pratica questo suddivide l'insieme degli eventi in due popolazioni, la prima rappresentativa degli eventi medio-alti, la seconda degli eventi estremi o rari. La stima dei parametri di tale distribuzione è stata condotta utilizzando il *metodo regionale* che individua regioni omogenee nelle quali i parametri sono costanti, nel caso in considerazione sono stati utilizzati i parametri del compartimento di Bologna. Il secondo metodo parametrico si basa sull'applicazione del modello teorico della *distribuzione di Gumbel* i cui parametri si ricavano a partire dall'analisi del campione di osservazioni.

Il metodo non parametrico utilizzato si basa esclusivamente sull'osservazione del campione di dati, si giunge alla stima della frequenza $f(x_i)$ mediante l'operazione di *Plotting Position*.

2.2.1 Il metodo della piena indice

Ai fini della difesa idraulica del territorio, risulta spesso fondamentale calcolare la portata di piena temibile, con assegnato tempo di ritorno, in una determinata sezione fluviale. Se per la sezione di interesse esiste un campione di dati sufficientemente ampio, il problema può essere affrontato mediante metodi di analisi puntuale di frequenza delle piene; cioè mediante tecniche di inferenza statistica viene individuata la distribuzione di probabilità più adatta a rappresentare le osservazioni disponibili e viene estrapolato il valore di interesse. Molto spesso può capitare di dover però calcolare la portata in sezioni per le quali il campione di dati disponibile risulta essere insufficiente o addirittura non sono disponibili osservazioni; in questi casi è opportuno fare ricorso a metodi di analisi regionale di frequenza delle piene.

L'analisi regionale, mediante l'individuazione di regioni omogenee per quanto riguarda i fenomeni di piena, cioè le osservazioni in stazioni di misura diverse sono

¹ Two Component Extreme Value distribution; Rossi et al. 1984.

caratterizzate dalla stessa distribuzione, consente di estrapolare l' informazione idrometrica presso le sezioni strumentate per poterla utilizzare presso il sito di interesse. Le tecniche disponibili per la regionalizzazione sono numerose, nello studio effettuato si è scelto di utilizzare la procedura specificata dal progetto VAPI (Valutazione Piene) la cui finalità è quella di definire una metodologia omogenea per l' intero territorio nazionale. La metodologia prescelta si basa sul *metodo della piena indice*; il modello probabilistico adottato come già anticipato è quello a doppia componente TCEV. [4]

- Nel caso di **sezioni dotate di misurazioni**, queste possono essere utilizzate per la stima dei quantili $x(T)$, che devono essere sufficientemente attendibili¹; spesso data la dimensione ridotta delle serie storiche questo non accade, per risolvere il problema si può utilizzare il metodo della portata indice. Il termine portata indice deriva dalla sua prima applicazione, ma dato che il metodo potrebbe essere applicato anche ad altre grandezze idrologiche lo si potrebbe anche definire metodo della grandezza indice.

Se sono disponibili le osservazioni per N stazioni, appartenenti alla medesima zona omogenea, l' ipotesi fondamentale del metodo della portata indice consente di dire che le distribuzioni di probabilità delle varie stazioni sono tutte uguali tra di loro a meno di un fattore di scala, specifico per ogni stazione, cioè la *portata indice*.

Sia $x_i(F)$ la funzione quantile associata alla stazione i-ma.

$$X_i(F) = \mu_i x'(F), \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Nell' Equazione (3) μ_i rappresenta la portata indice, viene definito anche come fattore di scala e di solito lo si assume pari alla media. Il fattore $x'(F)$ è detto anche fattore di crescita regionale, rappresenta il quantile adimensionale, ed è valido per l' intera regione. Il suo inverso $F(x')$ rappresenta invece la funzione distribuzione di probabilità delle variabile casuale $x' = x_i / \mu_i$ che è stata ipotizzata uguale per ogni sito i . Nell' analisi regionale si assume nota la distribuzione di probabilità $F(x')$ a meno di p parametri $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_p$. Con varie tecniche è possibile eseguire, mediante i dati di tutte le stazioni appartenenti all' area omogenea, per ogni parametro θ_k , una stima regionale $\hat{\theta}_k^R$. Sostituendo queste stime nella funzione $x'(F)$ si ottiene il fattore

¹ Sono ritenuti attendibili quantili calcolati con un campione che rispetta la relazione: $T < 2n$, dove n rappresenta la numerosità del campione.

di crescita regionale $\hat{x}'(F) = x'(\hat{\theta}_1^R, \hat{\theta}_2^R, \dots, \hat{\theta}_p^R)$. A questo punto è possibile effettuare la stima del quantile nella i-ma stazione:

$$\hat{x}_i(F) = \hat{\mu}_i \cdot \hat{x}'(F) \quad . \quad (4)$$

Dove $\hat{\mu}_i$ rappresenta la stima del valore medio della portata massima annua nella stazione i-ma, ottenuta mediante media aritmetica delle osservazioni disponibili per tale sezione.

• Nel caso di **sezioni non dotate di misurazioni**, può essere utilizzata allo stesso modo la relazione (4), risulta però necessario stimare la portata indice mediante opportune tecniche. Essa viene di solito stimata mediante una relazione statistica tra $\hat{\mu}$ e i parametri geomorfoclimatici (area, altitudine media, pioggia media annua, ecc.) che può essere espressa in forma di prodotto di potenze:

$$\hat{\mu} = aA_1^b A_2^c A_3^d \dots \quad (5)$$

Di seguito vengono brevemente elencati i passi fondamentali su cui è basata l'analisi regionale di frequenza.

- 1) *Verifica dei dati*: in questa fase va verificata la qualità dei dati, individuare ed eliminare, se possibile, errori grossolani.
- 2) *Identificazione delle regioni omogenee*: in questa fase vanno individuati i siti caratterizzati dalla stessa distribuzione di frequenza dei picchi di piena massimi annuali, a meno di un fattore di scala; e vanno accorpati in aree omogenee.
- 3) *Scelta della distribuzione di probabilità*: questa viene fatta mediante test statistici che verificano la consistenza con i dati attesi.
- 4) *Stima dei parametri della distribuzione scelta*: può essere fatta valutandoli separatamente nei vari siti e poi combinandoli opportunamente si ottiene la stima regionale¹; oppure adimensionalizzando rispetto la propria media ciascun campione disponibile nei vari siti, in modo da creare un unico campione di dati in base al quale stimare le varie statistiche necessarie per la parametrizzazione della distribuzione regionale prescelta.
- 5) *Siti privi di misurazioni: assegnazione del sito ad una regione omogenea*: mediante i parametri geomorfoclimatici ed alla posizione geografica si associa la stazione ad una regione omogenea.

¹ Hosking e Wallis, 1997.

- 6) *Siti privi di misurazione: stima della portata indice*: nel caso di sezioni dotati di misurazioni la portata indice coincide con la media aritmetica delle osservazioni, nel caso di siti privi di osservazioni la stima della portata indice viene fatta per via indiretta.

Nel caso in cui il modello probabilistico adottato sia il TCEV, nella procedura descritta, pur rimanendo sostanzialmente uguale, vengono accorpati i punti due, tre e quattro. La distribuzione di probabilità TCEV tratta i massimi annuali delle portate di picco come se provenissero da una popolazione costituita, a sua volta, da una miscela di due popolazioni, una rappresentativa degli eventi medio-alti, l'altra degli eventi estremi o rari. L'espressione generale della distribuzione TCEV è la seguente:

$$F(x) = \exp\left[-\lambda_1 \exp\left(\frac{-x}{\theta_1}\right) - \lambda_2 \exp\left(\frac{-x}{\theta_2}\right)\right] \quad (6)$$

Dove i valori λ_1 e λ_2 rappresentano rispettivamente il numero medio annuo di eventi della componente e della componente straordinaria, mentre i parametri θ_1 e θ_2 ($\theta_2 > \theta_1 > 0$) rappresentano le rispettive medie. In particolare μ , valore atteso di x risulta:

$$\mu = E[x] = \theta_1 \left[(\ln \lambda_1 + 0.577) - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j \Lambda_*^j}{j!} \Gamma(j / \Theta_*) \right] = \theta_1 \cdot \eta \quad (7)$$

Avendo indicato con η la funzione tra parentesi quadra e con Γ la funzione gamma completa. Introducendo la variabile ridotta $Y = x / \theta_1 - \ln \lambda_1$ ed indicando con y il generico valore, l'equazione (6) può essere scritta come:

$$F(y) = \exp\left[-\exp(-y) - \Lambda_* \exp(-y / \Theta_*)\right] \quad (8)$$

Dove:

$$\Theta_* = \theta_2 / \theta_1 \quad (9a)$$

$$\Lambda_* = \lambda_2 / \lambda_1^{1/\Theta_*} \quad (9b)$$

Considerata l'eq. (7) e le posizioni (9a) e (9b) ed introducendo la variabile ridotta adimensionale $x' = x/\mu$ è possibile scrivere l'eq. (6) come:

$$F(x') = \exp\left[-\lambda_1 \exp(-x'\eta) - \Lambda_* \lambda_1^{1/\Theta_*} \exp\left(-\frac{x'}{\Theta_*} \eta\right)\right] \quad (10)$$

La funzione inversa della (10) $x' = x'(F)$ rappresenta la curva di crescita della variabile x' secondo il modello TCEV ed è caratterizzata da tre parametri: $\hat{\Lambda}_*$, $\hat{\Theta}_*$, $\hat{\lambda}_1$; il valore medio μ di x rappresenta la portata indice.

Nel caso dello studio in questione, i valori dei parametri sopra citati sono riportati in Tabella 2.5, quelli utilizzati appartengono alla zona unica del compartimento SIMN di Bologna, per completezza si riportano anche i parametri degli altri compartimenti SIMN per il Nord-Italia.

Compartimento	Zona	$\hat{\Lambda}_*$	$\hat{\Theta}_*$	$\hat{\lambda}_1$	η
Genova	Unica	0.3	4.9	9.74	4.11
Parma	Regione 1	1.21	3.28	24.74	6.51
	Regione 2	0.22	7.33	16.31	4.8
	Regione 3	0.56	5.21	13.68	5.55
	Regione 4	0.13	1.34	9.39	2.97
Bologna	Unica	0.75	2.51	9.5	4.22
Venezia	Unica	0.89	2.02	15.86	4.56

Tab. 2.5: Parametri delle curve di crescita.

La tecnica descritta in questo paragrafo consente di aumentare, in qualche modo, il numero dei dati sui quali vengono effettuate le deduzioni relative a tale sezione, sfruttando quelli disponibili in altre. L'ipotesi fondamentale su cui essa si basa è che la distribuzione di probabilità delle portate al colmo massime annue sia la stessa in tutti i siti di una regione, preventivamente definita come omogenea, a meno di un fattore di scala, chiamato *portata indice*.

I risultati dei tempi di ritorno ottenuti, per gli eventi di piena di interesse, con il metodo della portata indice sono illustrati in Tabella 2.8.a e 2.8.b a fine capitolo dove vengono confrontati con i risultati ottenuti con il metodo della distribuzione di Gumbel e della Plotting Position.

2.2.2 Metodo della distribuzione di Gumbel

Il metodo della distribuzione di Gumbel consente attraverso l'analisi di un campione di osservazioni, che per la sezione di Casalecchio Chiusa è riportato in Tabella 2.1 e coincide con i dati utilizzati per la calibrazione della scala di deflusso, mentre per la sezione di Pracchia è riportato in Tabella 2.6 di assegnare una determinata frequenza, mediante la funzione di probabilità (11), e quindi un tempo di ritorno ad ogni evento. Come verrà più ampiamente descritto nel prossimo capitolo i parametri della distribuzione sono funzione della media \bar{x} e della deviazione standard s del campione, le relazioni che legano α e ξ ai momenti campionari sono riportati nella (12) e nella (13).

$$F_x(x) = \exp\{-\exp[-(x - \xi) / \alpha]\} \quad (11)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{s}{\sqrt{1.645}} \quad (12)$$

$$\hat{\xi} = \bar{x} - 0.5772\hat{\alpha} \quad (13)$$

anno	Q(mc/s)	anno	Q(mc/s)	anno	Q(mc/s)
1924	54.8	1943	32.8	1966	141
1925	92.5	1948	111	1967	141
1926	64	1949	81.7	1968	92
1927	32.7	1950	160	1969	147
1928	64.8	1951	214	1970	79.5
1929	44.9	1952	87.3	1971	48.25
1930	55.4	1953	80.6	1972	179
1931	69.2	1954	66.8	1973	62.75
1932	66.5	1955	50.1	1974	55.91
1933	42.7	1956	48.2	1975	65.7
1934	69.9	1957	42	1976	83.93
1935	90.8	1958	72	1977	94.37
1936	50.1	1959	63.7	1978	79.5
1937	191	1960	68.8	1979	148.9
1938	74.1	1961	113	1980	55.9
1939	49.2	1962	57.8	1981	103.1
1940	160	1963	58.8	1982	148.9
1941	85	1964	77.3	1983	98
1942	54	1965	65.7		

Tab. 2.6: Massimi annuali di portata osservati nella sezione di Pracchia.

I risultati dei tempi di ritorno ottenuti, per gli eventi di piena di interesse, con il metodo della distribuzione di Gumbel sono illustrati in Tabella 2.8.a e 2.8.b a fine capitolo dove vengono confrontati con i risultati ottenuti con il metodo della portata indice e della Plotting Position.

2.2.2 Metodo della Plotting Position

L'operazione di Plotting Position consente, dati un set di dati, di andare a calcolare la frequenza relativa, per ogni dato e di attribuire una distribuzione di frequenza all'intero set di dati. Esistono vari tipi di distribuzioni che effettuano Plotting Position. La più classica Plotting Position è quella data da:

$$F = \frac{i}{N} \quad (14)$$

ove N è il numero di dati, e i un fattore che va da 1 ad N con il campione di dati ordinato in modo crescente. È evidente che questo tipo di Plotting Position assegna frequenza cumulata pari ad 1 all' n -esimo valore del set di dati. Questo può non essere corretto, soprattutto quando con l'analisi si intende valutare un valore estremo (Teoria dei valori estremi). Si procederà quindi ad utilizzare tutta una famiglia di distribuzioni, generate da una formulazione del tipo:

$$F = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (15)$$

con α coefficiente che può variare tra 0 ed 1. Due le distribuzioni notevoli più utilizzate, quella di Weibull con $\alpha=0$:

$$F = \frac{i}{N + 1} \quad (16)$$

e quella di Hazen, con $\alpha=0,5$:

$$F = \frac{i - 0,5}{N} \quad (17)$$

La prima, quella di Weibull, è una "Distribution Free", ossia è caratterizzata da un'indipendenza dalla distribuzione, mentre quella di Hazen fa parte, con molte altre della classe delle "Distribution Dependent".

La distribuzione scelta, per l' applicazione dello studio in questione, è quella di Hazen; per la stazione di Pracchia il campione è costituito da 56 osservazioni, la curva della distribuzione di frequenza è riportata in Fig. 2.3; mentre per Casalecchio è stato utilizzato un campione di 51 dati, la curva di distribuzione di frequenza è riportata in Fig. 2.4.

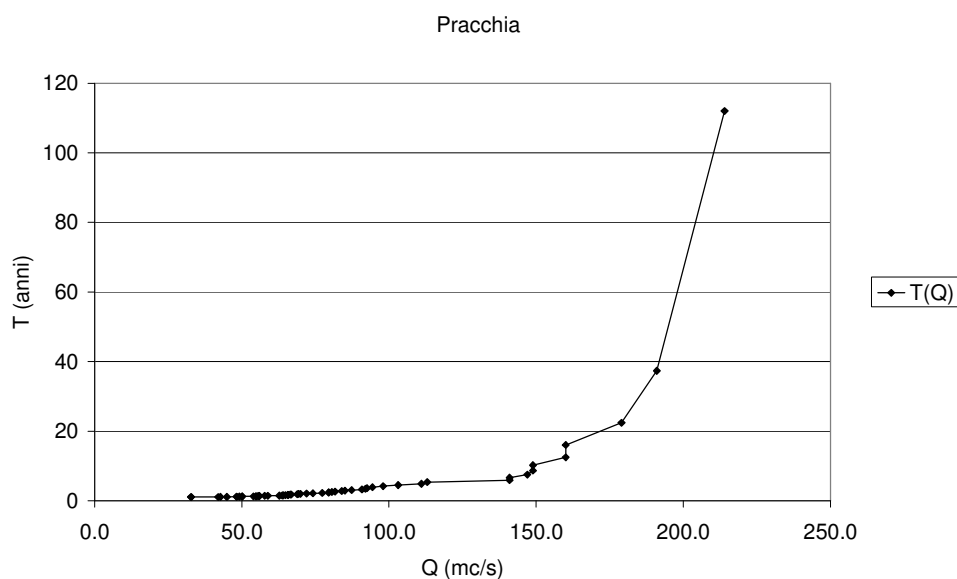


Fig. 2.3: Curva della distribuzione di frequenza, in funzione del tempo di ritorno, per Pracchia.

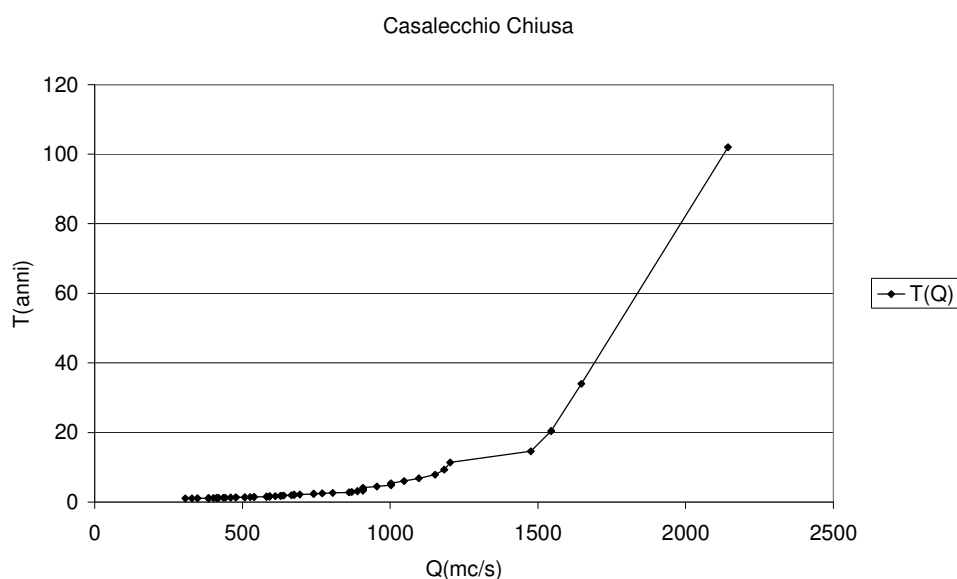


Fig.2.4: Curva della distribuzione di frequenza, in funzione del tempo di ritorno, per Casalecchio Chiusa.

In Figura 2.5 e 2.6 vengono riportate in carta probabilistica di Gumbel, rispettivamente per le stazioni di Pracchia e di Casalecchio Chiusa, le osservazioni con la loro distribuzione probabilistica, determinata sperimentalmente mediante la Plotting Position di Hazen e teorica mediante il modello della distribuzione di Gumbel. La carta probabilistica di Gumbel presenta in ascissa le portate e in ordinata la variabile y così definita: $y = -\ln(-\ln(f(x)))$.

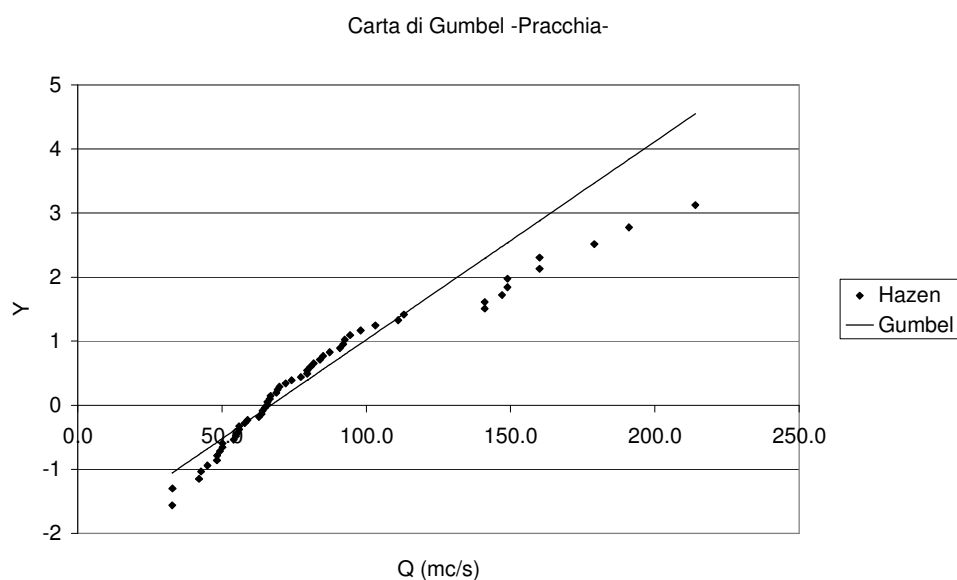


Fig. 2.5: Distribuzione probabilistica osservata e teorica, per le osservazioni della stazione idrometrica di Pracchia.

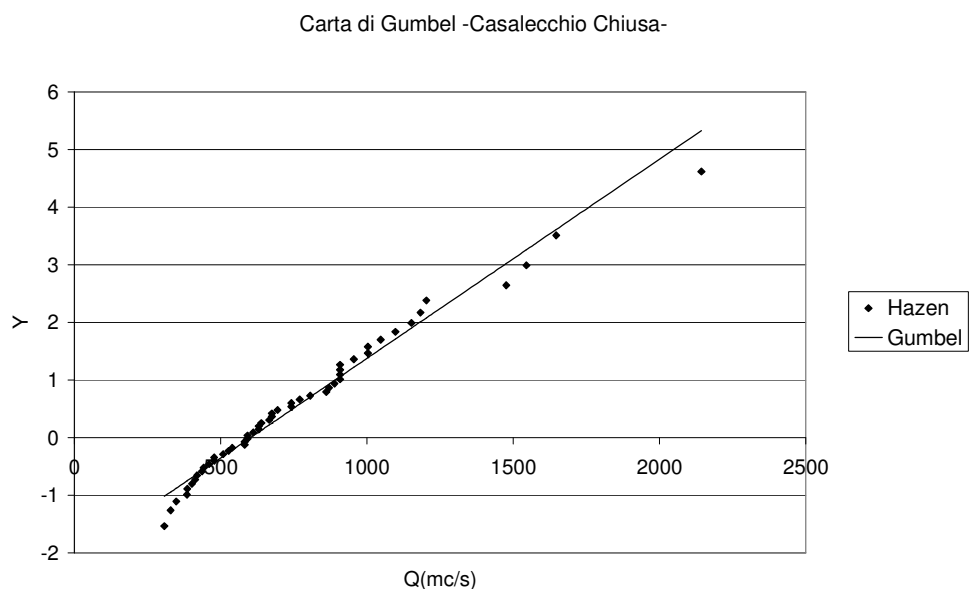


Fig. 2.6: Distribuzione probabilistica osservata e teorica, per le osservazioni della stazione idrometrica di Caslecchio Chiusa.

Per la sezione di Casalecchio Chiusa è possibile fare una ulteriore stima del tempo di ritorno per gli eventi di interesse. Infatti è possibile utilizzare il campione di osservazioni di piena massima annuale della sezione di Casalecchio Tiro Volo situata circa 1 Km a valle della sezione di Casalecchio Chiusa; in quanto tali osservazioni rispettano la stessa distribuzione che si osserva per la sezione di Casalecchio Chiusa. Per la sezione di Casalecchio Tiro Volo è disponibile un campione di 74 osservazioni, che come è possibile osservare in Figura 2.5 presentano una certa dispersione, in quanto la sezione di Casalecchio Tiro Volo è di tipo naturale e quindi non è detto che ci sia una corrispondenza biunivoca perfetta tra portata e altezza idrometrica.

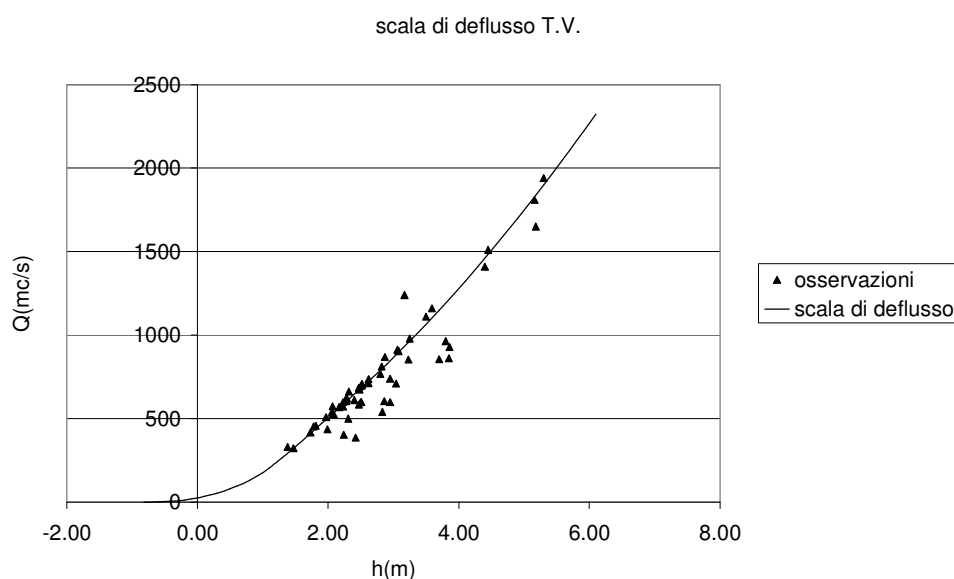


Fig. 2.5: Osservazioni dei massimi annuali di piena per la sezione di Casalecchio Tiro Volo.

Mediante la (18) è possibile calcolare una percentuale della dispersione delle osservazioni attorno ai valori ottenuti mediante il modello teorico della scala di deflusso:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N}} \quad (18)$$

Dove:

$$\varepsilon_i = \frac{Q_{iOSS} - Q_{iMOD}}{Q_{iMOD}} \quad (19)$$

Applicando la (18) è possibile effettuare una stima percentuale della dispersione dei punti attorno alla scala di deflusso, dovuta alla non univocità del legame tra altezza del pelo libero e portata: quindi si ottiene un valore di dispersione del 13 %.

Per ridurre la variabilità del campione è possibile, sotto l' ipotesi di una certa incertezza delle misure, eliminare dal campione i quattro valori estremi, cioè i due minori e i due maggiori, a questo punto è possibile applicare la Plotting Position di Hazen e andare a calcolare il tempo di ritorno per gli eventi di interesse.

Sebbene le portate tra le due sezioni varino di poco è necessario per attribuire il corretto tempo di ritorno all' evento andare a confrontare la portata verificata nella sezione di Casalecchio Tiro Volo, infatti la distribuzione è la stessa, ma le portate possono variare leggermente. In Figura 2.6 è riportata la curva della distribuzione di frequenza, in funzione del tempo di ritorno, ottenuta con il metodo della Plotting Position per la stazione idrometrica di Casalecchio Tiro Volo, mentre in Tabella 2.7 sono riportati i valori delle portate, per gli eventi di interesse, per la stessa sezione, utilizzati per il calcolo del tempo di ritorno.

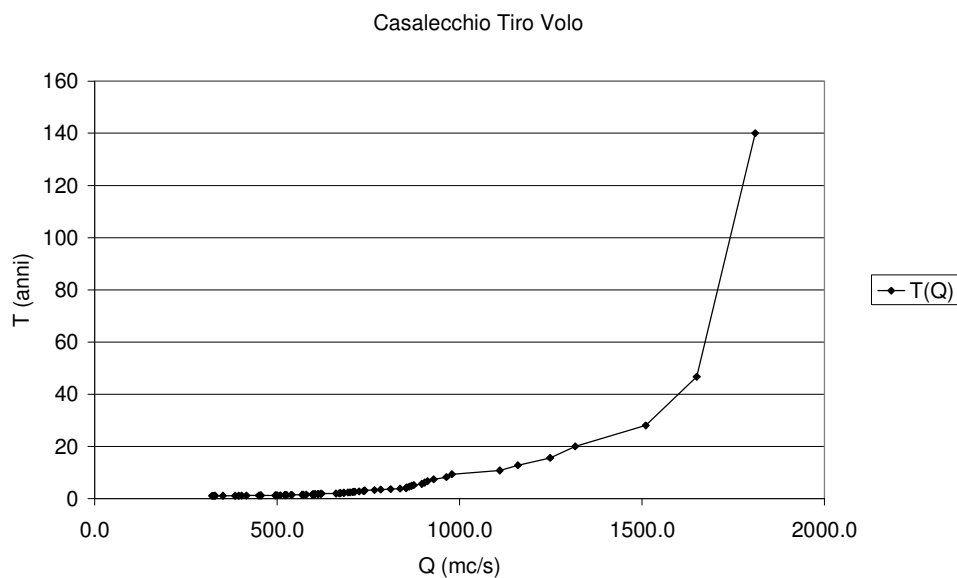


Fig.2.6: Curva della distribuzione di frequenza, in funzione del tempo di ritorno, per Casalecchio Tiro Volo.

Evento	Q (m ³ /s)
3\90	1311.122
5\94	1246.707
2\00	1001.658
5\92	800.576
4\94	739.9101
4\90	695.6168
3\92	659.5076
4\03	652.3741
5\03	624.1373
4\04	582.6819
4\91	535.7036

Tab.2.7: Portate, nella sezione di Casalecchio Tiro Volo, per gli eventi di interesse.

Nelle Tabelle 2.8.a e 2.8.b vengono riportati i risultati ottenuti con i metodi descritti, rispettivamente per la sezione di Casalecchio Chiusa e per Pracchia:

Evento	Casalecchio			
	TCEV	Hazen	Gumbel	Hazen (serie T.V.)
3_90	15.7	20.4	26.6	20.0
5_94	13.3	14.6	21.1	15.6
2_00	7.0	9.3	8.0	9.6
5_92	4.0	4.3	3.8	3.5
4_94	3.3	2.9	3.1	3.1
4_90	2.9	2.6	2.7	2.3
3_92	2.7	2.5	2.4	1.9
4_03	2.6	2.5	2.3	1.9
5_03	2.4	2.3	2.1	1.9
4_04	2.1	2.1	1.9	1.5
4_91	1.9	1.7	1.7	1.4
04-nov-66	20.0	34.0	37.0	X
05-feb-51	60.0	102.0	206.0	X

Tab. 2.8.a: Tempi di ritorno per gli eventi di interesse della sezione di Casalecchio Chiusa.

Evento	Pracchia		
	TCEV	Hazen	Gumbel
3_02	8.6	6.6	10.5
4_02	2.0	2.1	1.8
5_03	1.4	1.4	1.3
4_03	1.4	1.3	1.3
1_02	1.3	1.2	1.3
6_03	1.2	1.1	1.2
1_04	1.2	1.1	1.1
1_03	1.1	1.0	1.1

Tab. 2.8.b: Tempi di ritorno per gli eventi di interesse della sezione di Pracchia.

Le Tabelle 2.8.a e 2.8.b mostrano come i risultati prodotti con i vari metodi siano nella maggior parte dei casi in accordo; è possibile notare che la differenza è sostanzialmente rilevante solo per l' evento del 5 febbraio 1951; che costituisce l' evento maggiore in considerazione.

Cap. 3 COSTRUZIONE DELLE LSPP AREALI A SCALA DI BACINO

La relazione tra l' altezza di precipitazione e la durata si rappresenta comunemente con una curva che fornisce, per un assegnato valore del tempo di ritorno T , la relazione tra la durata della pioggia t e la relativa altezza di precipitazione h . In alternativa si può usare una curva che fornisca, per un assegnato valore del tempo di ritorno T la relazione, del tutto equivalente a quella precedente, tra la durata della pioggia t e la relativa intensità media di precipitazione:

$$i_m = \frac{h}{t} \quad (1)$$

In Italia è di applicazione comune la curva che lega la durata delle piogge t e la relativa altezza di precipitazione h , che viene chiamata *curva segnalatrice di possibilità climatica* (o linea segnalatrice di possibilità pluviometrica, LSPP). Nelle applicazioni non ci si limita mai ad una curva solamente, ma si traccia un fascio di curve, ognuna delle quali è associata ad un determinato tempo di ritorno.

Per individuare la curva di possibilità climatica con sufficiente approssimazione è necessario conoscere le altezze di pioggia corrispondenti al tempo di ritorno fissato per un certo numero di durate opportunamente scelte; nel caso dello studio in questione si sono utilizzate le durate pari a 1, 3, 6, 12, 24, ore ed inoltre sono stati calcolati i quantili anche per i valori di pioggia cumulati su 1 e 5 giorni consecutivi.

Il tempo di ritorno che si attribuisce a una curva è quello comune alle altezze delle varie durate, cioè i singoli punti che costituiscono la curva stessa. Quindi per costruire le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica è necessario conoscere per le varie durate t , l' altezza di pioggia h in funzione del tempo di ritorno T .

A questo scopo si eseguono delle elaborazioni statistiche su campioni di altezza di pioggia relativi a intervalli di tempo di varia natura, opportunamente selezionati dalle osservazioni disponibili. Comunemente si seleziona da ogni evento di pioggia la finestra temporale, di durata pari a quelle di interesse, che fornisce il massimo valore di precipitazione, trascurando completamente la parte d' evento che precede e quella che segue l' intervallo selezionato.

I metodi statistici per la determinazione della relazione tra l' altezza di pioggia h e il tempo di ritorno T possono essere diversi; i due che oggi sono i più usati comunemente sono: il metodo *dell' analisi dei massimi annuali* e il metodo *dell' analisi delle eccedenze*. [2]

Il primo metodo (analisi dei massimi annuali) è il più comunemente utilizzato, consiste nell' individuare, per ogni durata t la distribuzione di probabilità del massimo annuale h dell' altezza di pioggia, dalla quale si può ricavare il valore con il tempo di ritorno T prefissato¹. Il procedimento comporta l' uso, per ogni durata, di una sola osservazione per anno. Il massimo annuale dell' altezza di pioggia h di una certa durata t si assume distribuito secondo una certa legge probabilistica (in genere la legge di Gumbel o la legge lognormale), i cui parametri si stimano a partire dal campione disponibile. I massimi dell' altezza di precipitazione per le varie durate si ricavano dalle registrazioni della stazione pluviometrica alla quale si fa riferimento. Una volta effettuata l' elaborazione statistica dei massimi annuali di precipitazione, si riportano in un grafico, con le varie durate t in ascisse e le altezze di pioggia h in ordinate, i valori dell' altezza di pioggia forniti per il tempo di ritorno T assegnato dalle leggi di probabilità che corrispondono alle diverse durate; infine si interpolano i punti ottenuti con una curva.

Il metodo dell' analisi delle eccedenze consiste nell' adoperare anche le osservazioni che non coincidono con il massimo annuale¹ purchè superiori ad un certo valore di soglia prefissato (capita quindi che il numero delle osservazioni m sia maggiore del numero degli anni N) e relative ad eventi indipendenti.

Per lo studio in questione, come verrà illustrato più avanti, è stato scelto di utilizzare il metodo dei massimi annuali.

Ottenute le curve segnalatrici di possibilità climatica puntuali, per le varie stazioni, queste sono rappresentative della distribuzione di probabilità dell' altezza di

¹ Maione e Moisello, 1993.

precipitazione puntuale che differisce dalla distribuzione di probabilità dell' altezza di precipitazione media a scala di bacino .

E' infatti comune esperienza che le piogge di elevata intensità si concentrino in aree piccole e che a parità di durata e a parità di tempo di ritorno l' altezza di precipitazione decresca al crescere dell' area. Per ottenere le *curve segnalatrici di possibilità climatica* areali a scala di bacino quindi risulta necessario raggugliare la pioggia puntuale all'area, moltiplicando l' altezza di precipitazione puntuale h relativa alla stessa durata e allo stesso tempo di ritorno per un opportuno *coefficiente di riduzione* (o coefficiente di ragguglio all' area, ARF).

3.1 Costruzione delle LSPP puntuali

La scelta della distribuzione di probabilità che meglio si adatta alla popolazione delle altezze di precipitazione di determinata durata, di cui è noto un certo campione, consente di stimare l' altezza di precipitazione avente una frequenzialità o probabilità di verificarsi. La distribuzione che si è scelto di utilizzare per lo svolgimento di questo lavoro è la distribuzione di Gumbel la cui funzione di probabilità (o CDF) è data dalla legge (2), i cui parametri verranno calcolati a partire dal campione delle osservazioni per ognuna delle 21 stazioni e per ogni durata di interesse.

$$F_x(x) = \exp\{-\exp[-(x - \xi)/\alpha]\} \quad (2)$$

I parametri della CDF vengono stimati mediante il *metodo dei momenti*, che si basa sull' ipotesi che i momenti teorici della distribuzione della variabile casuale siano uguali alle stime campionarie, calcolate in base alle osservazioni disponibili, i passi in cui si articola la procedura sono:

- Si calcolano i momenti campionari della serie di osservazioni.
- Si considerano le relazioni teoriche che legano i momenti della distribuzione ai parametri della stessa.
- Sulla base di tali relazioni si stimano i parametri incogniti eguagliando i momenti teorici a quelli campionari.

I momenti teorici di primo e secondo ordine, rispettivamente la media e lo scarto quadratico medio sono rappresentati dalla (3) e dalla (4):

$$\bar{x} = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$s^2 = (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

La stima dei parametri della distribuzione è effettuata mediante le relazioni (5) e (6), che legano i momenti teorici ai parametri del modello di Gumbel:

$$\hat{\alpha} = \frac{s}{\sqrt{1.645}} \quad (5)$$

$$\hat{\xi} = \bar{x} - 0.5772\hat{\alpha} \quad (6)$$

Un volta calcolati i parametri è possibile trovare i quantili per gli assegnati tempi di ritorno che nel caso in questione saranno 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anni; mediante la relazione (7) che non è altro che l' inverso della (2) in cui si esprime la frequenza mediante la relazione che la lega al tempo di ritorno:

$$h(t, T) = \hat{\xi} - \hat{\alpha} \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T})) \quad (7)$$

Mediante i quantili si costruiscono le *curve segnalatrici di possibilità pluviometrica* (Figura 3.1) che possono essere rappresentate con un' equazione del tipo:

$$h(t, T) = at^n \quad \text{dove: } a=a(T) \quad (8)$$

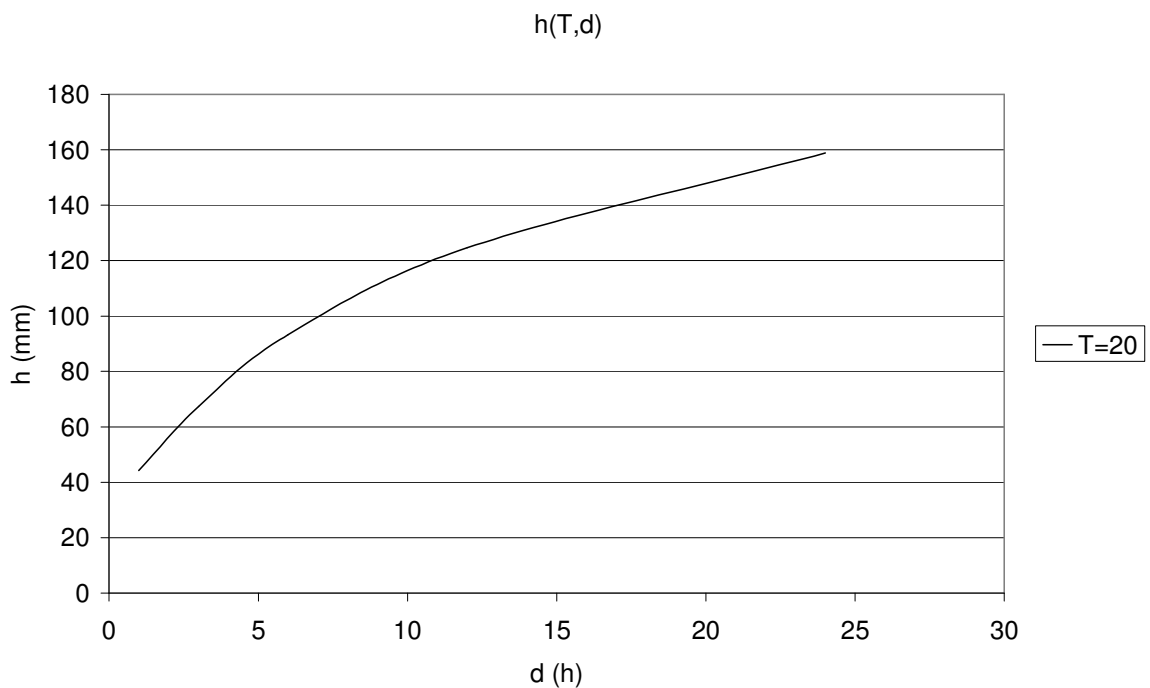


Fig. 3.1: LSPP puntuale per una generica stazione, con tempo di ritorno di 20 anni.

In Tabella 3.1 vengono riportati i valori ottenuti per i parametri della distribuzione di Gumbel per le 21 stazioni di interesse per questo lavoro; inoltre in *Allegato II* vengono riportati i campioni di dati e le LSPP puntuali per le varie stazioni.

Stazione	t	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
Acquerino	α	6.15	8.69	15.66	22.55	30.31	320.39	346.76
	ξ	25.36	47.55	66.17	88.81	114.82	919.39	1630.85
Bologna S.L.	α	7.12	7.66	9.12	12.68	17.25	175.11	225.26
	ξ	19.22	27.16	34.99	46.18	58.87	546.12	881.79
Bombiana	α	4.91	8.42	13.50	22.25	22.94	180.07	180.82
	ξ	21.70	34.45	41.96	50.52	62.93	571.76	1059.69
Cottede	α	7.52	10.57	15.40	19.67	24.43	205.46	387.63
	ξ	21.91	35.97	47.48	66.17	86.18	718.51	1022.25
Diga del Brasimone	α	7.22	9.44	12.62	18.13	23.87	220.99	336.04
	ξ	23.11	36.09	49.63	66.18	87.59	778.10	1508.86
Diga di Pavana	α	9.04	11.43	12.28	18.68	24.63	246.21	439.97
	ξ	22.55	37.86	51.98	68.64	88.07	720.25	1068.37
Diga di Suviana	α	9.31	9.75	10.29	15.18	21.86	208.08	256.00
	ξ	18.94	30.38	42.30	56.41	71.90	607.98	1139.32
Lizzano in Belvedere	α	8.44	11.95	16.64	23.35	28.63	242.04	436.62
	ξ	20.70	32.52	46.32	66.65	89.28	771.65	1314.05
Maresca	α	8.26	12.00	19.02	25.58	32.59	285.94	375.40
	ξ	25.61	43.75	61.11	84.92	113.94	1031.36	1865.58
Montacuto Vallese	α	5.50	7.46	11.32	14.74	16.25	190.80	162.18
	ξ	17.75	30.40	38.50	46.90	59.64	576.29	973.71
Montepastore	α	11.41	12.76	11.87	12.65	18.19	203.19	455.96
	ξ	18.50	28.80	37.42	49.15	64.79	541.33	859.43
Monzuno	α	8.71	10.44	12.31	13.98	17.33	149.41	411.27
	ξ	21.17	29.75	37.91	50.50	65.53	564.34	1001.73
Orsigna	α	6.68	12.99	20.55	28.66	36.14	320.95	415.48
	ξ	25.70	54.19	77.26	106.20	132.03	1122.76	1990.36
Piastre	α	7.20	16.98	24.50	31.16	27.50	285.70	510.58
	ξ	26.86	48.22	68.44	94.32	116.72	1038.54	2032.76
Porretta Terme	α	6.50	8.83	11.76	17.17	21.55	234.07	390.88
	ξ	21.36	30.76	40.77	53.92	71.02	627.33	1148.62
Pracchia	α	7.81	10.54	16.56	20.87	25.30	239.81	325.00
	ξ	26.07	44.33	62.60	87.44	118.64	1038.60	1743.40
Riola di Vergato	α	8.88	10.87	12.85	18.69	19.05	140.94	218.59
	ξ	22.88	35.73	42.51	49.58	60.86	532.64	966.42
Sasso Marconi	α	12.57	15.98	14.76	12.55	16.38	138.92	247.42
	ξ	23.04	33.11	40.23	50.59	61.86	529.35	880.93
Traversa	α	7.38	12.11	14.68	21.29	33.67	226.29	313.44
	ξ	23.72	38.31	52.49	69.86	89.60	789.81	1285.99
Treppio	α	8.21	11.76	18.85	26.81	33.27	315.88	453.74
	ξ	22.95	38.56	54.06	75.11	97.73	972.05	1774.65
Vergato	α	7.34	8.73	10.74	13.08	17.65	133.24	247.67
	ξ	19.32	26.65	34.33	44.92	56.01	485.36	842.84

Tab. 3.1: Parametri ottenuti per la distribuzione di Gumbel per le 21 stazioni di interesse.

3.1.1 L' invarianza di scala

Per le stazioni pluviometriche di Montepastore e di Sasso Marconi la disponibilità di osservazioni delle massime altezze di pioggia sulle varie durate era disponibile per un campione di anni non particolarmente elevato, rispettivamente 13 e 14 anni. Quindi le curve segnalatrici di possibilità pluviometrica ottenute come risulta da Figura 3.2 assumono andamenti impropri, soprattutto per tempi di ritorno elevati, queste sono state regolarizzate mediante l' applicazione del metodo dell' *invarianza di scala*, i cui fondamenti teorici vengono illustrati nelle pagine seguenti.

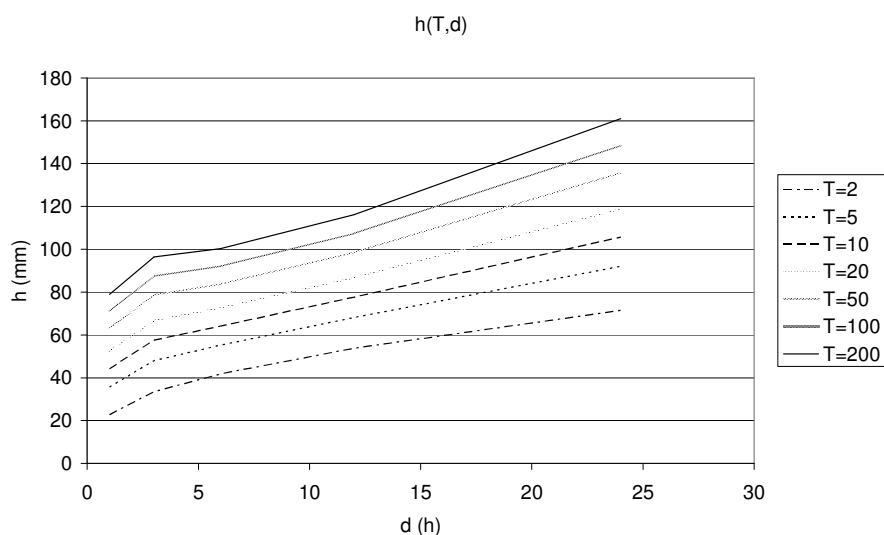


Fig. 3.2.a: LSP per la stazione di Montepastore da regolarizzare.

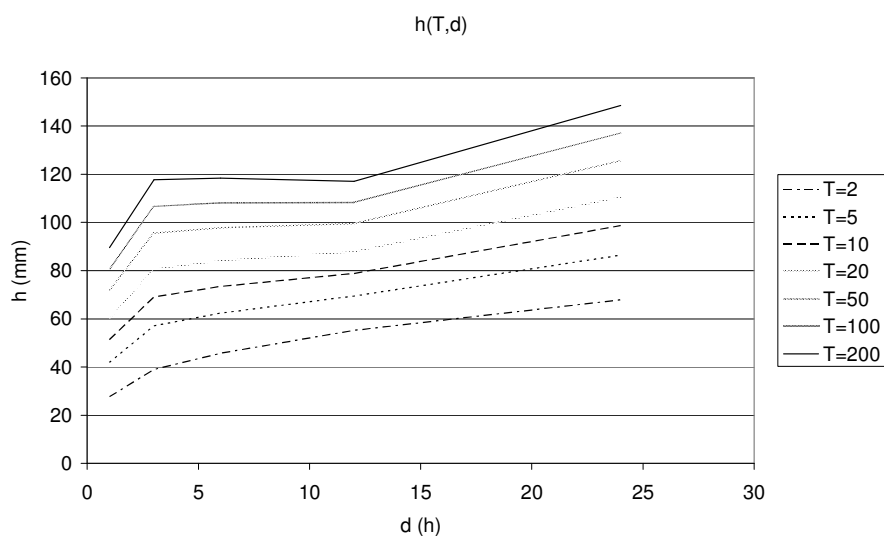


Fig. 3.2.b: LSP per la stazione di Sasso Marconi da regolarizzare.

La legge di potenza (8) era già stata introdotta dalle prime analisi quantitative dei fenomeni pluviometrici; inoltre si era potuto osservare come, in linea di massima, i nubifragi fossero caratterizzati dalla proprietà fisica:

$$\frac{Z(T, \lambda t)}{Z(T, t)} = \lambda^n \quad (9)$$

Nota come invarianza di scala, dove λ rappresenta un fattore di scala e n un esponente caratteristico del sito esaminato.[6] Tale proprietà risulta sostanzialmente ancora verificata quando si prendono in esame i casi critici, vale a dire i massimi relativi delle osservazioni sperimentali di pioggia ottenuti da eventi anche diversi. Quindi è valida la relazione:

$$Z(T, \lambda t) \approx \lambda^n Z(T, t) \quad (10)$$

Dove il simbolo \approx indica l'uguaglianza in distribuzione di probabilità, λ rappresenta un fattore di scala temporale e n un esponente caratteristico del processo $X(T)$ ¹. Il processo integrale ottenuto integrando $X(T)$ su una durata λt ha quindi la stessa distribuzione del processo che si ottiene integrando $X(T)$ su una durata t e riscalandolo il risultato di un fattore λ^n . Per i massimi di pioggia questa proprietà comporta la relazione:

$$F(h(\lambda t)) = F(\lambda^n h(t)) \quad (11)$$

L'invarianza di scala in distribuzione o *autosomiglianza di scala* implica sia l'invarianza di scala dei quantili (12), che quella dei momenti di ordine qualsiasi (13).

$$h_R(\lambda t) = \lambda^n h_R(t) \quad (12)$$

$$E[H^r(\lambda t)] = \lambda^{rn} E[H^r(t)], r = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

Dove il simbolo $E[.]$ rappresenta l'operatore valore atteso e r indica l'ordine del momento. La proprietà dell'invarianza di scala non può essere applicata al continuo illimitato, ma deve essere verificato un ragionevole intervallo di scale; questo campo

¹ Rosso e Burlando, 1990.

di validità è direttamente legato alla fenomenologia che si osserva e in secondo luogo la proprietà in esame va considerata in relazione al campo di interesse tecnico dei risultati. Indicato allora con $[t_{inf}, t_{sup}]$ l' intervallo di durate, entro il quale la precipitazione in un punto dello spazio si presenta come fenomeno scala-invariante nel tempo, assunto λ pari al rapporto tra la generica durata t e la durata di riferimento t^* e assunta pari a 1 la durata di riferimento, quindi si può scrivere:

$$F(h(t)) = F(h(1)t^n) \quad (14)$$

E la (13) come:

$$h_R(t) = h_R(1) \left(\frac{t}{1} \right)^n = h_R(1)t^n \quad (15)$$

Dove $h_R(1)$ indica il quantile R-ennale dell' altezza di pioggia per la durata di riferimento. La linea segnalatrice risulta espressa da una legge di potenza, il cui esponente risulta invariante con la durata.

E' possibile scrivere anche i momenti del primo e del secondo ordine in funzione di una durata di riferimento unitaria, il cui rapporto V espresso nella (16) definito come coefficiente di variazione non varia con la durata.

$$V^2 = Var[H(t)] / E^2[H(t)] = Var[H(1)] / E^2[H(1)] \quad (16)$$

I modelli probabilistici in grado di rappresentare le piogge estreme scala-invarianti sono vincolati all' autosomiglianza statistica.

In caso di autosomiglianza statistica, la variabile adimensionale W , che si ottiene rinormalizzando i valori estremi rispetto il valore atteso,

$$W = H(t)/E[H(t)] \quad (17)$$

non dipende dalla durata t poiché $H(t)/E[H(t)] = H(1)/E[H(1)]$. Di conseguenza il quantile di riferimento si può esprimere come:

$$h_R(1) = E[H(1)]_{W_R} \quad (18)$$

Dove w_R rappresenta il quantile R-ennale della variabile rinormalizzata W . Per una qualsiasi durata di interesse, si può quindi esprimere il quantile R-ennale dell' altezza di pioggia tramite la relazione:

$$h_R(t) = a_1 w_R t^n \quad (19)$$

Dove:

- $a_1 = E[H(1)]$ rappresenta il coefficiente di scala della linea segnalatrice, pari al valore atteso dell' altezza di pioggia massima annuale per la durata di riferimento;
- w_R rappresenta il fattore di crescita in frequenza, in quanto esso dipende dal tempo di ritorno R e dalla distribuzione di probabilità scelta per rappresentare la variabile rinormalizzata W a media unitaria;
- n rappresenta l' esponente di scala con cui la variabilità del fenomeno si trasmette dalla scala temporale di riferimento alle altre scale temporali.

Per lo studio in questione la procedura adottata per regolarizzare le linee segnalatrici per le stazioni di Montepastore e Sasso Marconi, differisce da quella classica appena descritta per il metodo dell' invarianza di scala, ma è basata sulle medesime supposizioni teoriche. Infatti data la relazione (8), si impone la forma della curva e si vanno a calcolare i parametri a e n che minimizzano lo scarto quadratico medio rispetto ai quantili non regolarizzati. L' esponente n rimane costante per tutte le curve e per tutte e durate, mentre il termine a che moltiplica la durata elevata alla n rimane costante al variare delle durate t , ma cambia al variare della curva cioè al variare del tempo di ritorno.

In Tabella 3.2 vengono riportati sia i quantili ottenuti che il valore di a utilizzato per la stazione di Sasso Marconi:

T	a	1h	3h	6h	12h	24h
2	35.92	35.92	42.85	47.89	53.53	59.82
5	47.92	47.92	57.16	63.88	71.40	79.80
10	55.86	55.86	66.63	74.47	83.24	93.03
20	63.48	63.48	75.72	84.63	94.59	105.72
50	73.34	73.34	87.48	97.78	109.28	122.14
100	80.73	80.73	96.30	107.63	120.29	134.45
200	88.09	88.09	105.08	117.44	131.26	146.71

Tab. 3.2: Quantili calcolati per la stazione di Sasso Marconi, inoltre sono riportati anche i valori di a , mentre il valore di n utilizzato è stato: 0.160.

In Tabella 3.3 vengono riportati sia i quantili ottenuti che il valore di a utilizzato per la stazione di Montepastore:

T	a	1	3	6	12	24
2	28.14	28.14	37.48	44.91	53.81	64.47
5	37.17	37.17	49.51	59.32	71.08	85.17
10	43.15	43.15	57.47	68.86	82.51	98.87
20	48.88	48.88	65.10	78.01	93.47	112.00
50	56.31	56.31	75.00	89.87	107.68	129.02
100	61.86	61.86	82.40	98.73	118.30	141.75
200	67.42	67.42	89.80	107.60	128.93	154.49

Tab. 3.3: Quantili calcolati per la stazione di Montepastore, inoltre sono riportati anche i valori di a , mentre il valore di n utilizzato è stato: 0.260.

3.2 Raggiungimento all' area dei valori puntuali

Ai fini dello studio degli estremi pluviometrici a scala di bacino, è necessario ottenere delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica valide su tutta l' area del bacino considerato; mentre quelle ottenute finora sono curve segnalatrici di possibilità pluviometrica di una particolare stazioni di misura.

Sotto l' ipotesi che ad ogni stazione pluviometrica è possibile attribuire un' area da essa rappresentata, mediante i poligoni di Thiessen come visto nel Capitolo 1, è possibile ottenere delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica sempre puntuali, ma mediate sull' intero bacino; in pratica è come se il centro di scroscio del nubifragio fosse assunto nel baricentro del bacino. Questo è possibile farlo mediante l' applicazione della media pesata sulle varie durate t (1, 3, 6, 12, 24 ore e 1 e 5 giorni) e per i vari tempi di ritorno T (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 anni) dove i pesi utilizzati, come meglio descritto nel Capitolo 1, sono proporzionali all' area attribuita ad ogni stazione ed espressi in percentuale. Per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia i pesi utilizzati sono quelli espressi in Tabella 1.2, mentre i quantili ottenuti sono espressi in Tabella 3.4; mentre per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa i pesi utilizzati sono quelli espressi in Tabella 1.1, mentre i quantili ottenuti sono espressi in Tabella 3.5.

h(t,T)	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
2	29.00	50.41	71.57	98.61	126.88	113.73	204.45
5	37.82	65.55	94.59	128.51	159.92	144.92	250.88
10	43.66	75.57	109.83	148.31	181.79	165.56	281.63
20	49.26	85.19	124.45	167.30	202.78	185.37	311.11
50	56.51	97.63	143.38	191.88	229.93	211.01	349.29
100	61.94	106.95	157.56	210.30	250.28	230.22	377.89
200	67.35	116.24	171.69	228.65	270.56	249.36	406.39

Tab. 3.4: Quantili medi puntuali per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia.

h(t,T)	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
2	25.67	39.10	51.18	66.82	84.72	75.54	129.47
5	33.90	50.78	66.67	87.68	111.01	98.64	165.05
10	40.25	58.51	77.15	101.79	127.42	113.93	188.60
20	45.55	66.37	87.03	114.54	144.17	128.60	211.20
50	52.93	76.25	99.93	131.57	165.18	147.59	240.44
100	58.46	83.66	109.60	144.32	180.92	161.82	262.36
200	63.83	89.90	119.15	158.31	196.44	176.00	284.20

Tab. 3.5 : Quantili medi puntuali per il bacino del Reno con chiusura Casalecchio Chiusa.

Dati i valori puntuali delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica per ottenere le curve areali a scala di bacino è necessario moltiplicare i valori per opportuni coefficienti di riduzione areale.

3.2.1 Fattore di ragguglio all' area 'ARF'

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.[7] 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:

- Si assume che, durante il verificarsi degli eventi di massima intensità registrati in una stazione, la stazione stessa coincida con il centro di scroscio.
- Ci si aspetta che il coefficiente di ragguglio $r = ARF = h_A/h$ decresca al crescere dell' area del bacino.
- Ci si aspetta che r cresca al crescere della durata della precipitazione.

Le prime due ipotesi si possono giustificare sulla base di 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 raggugliata 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 ragguglio.

La terza ipotesi deriva dall' esperienza comune che piogge di durata più lunga tendono ad avere una distribuzione spaziale più omogenea rispetto piogge di durata inferiore.

Le caratteristiche del fenomeno appena descritte possono essere rappresentate da una formula analitica empirica come la (20):

$$ARF(A,t) = 1 - f_1(A)f_2(t) \quad (20)$$

Le espressioni f_1 e f_2 possono essere calcolate mediante tecniche empiriche sulla base dei dati di precipitazione per il bacino in esame, quindi hanno validità limitata al bacino di studio; tutte comunque devono soddisfare le seguenti condizioni:

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

Per lo studio in questione viene utilizzata la formula dell' **U.S. Weather Bureau** (1957 – 1960) calcolata negli Stati Uniti sulla base di una raccolta di numerosi dati nell' area orientale, mediante uno studio empirico.

Per una fissata area A si definiscono:

- $I_p(t, T)$ = massimo valore puntuale di pioggia di durata t e tempo di ritorno T ; tale valore nello studio in questione è stato già calcolato mediante la media pesata dei quantili delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica.
- $I_A(t, T)$ = massimo valore dell' intensità media di pioggia areale di durata t e tempo di ritorno T .

Quindi si definisce il fattore di ragguaglio come:

$$ARF(A, d, T) = I_A(t, T) / I_p(t, T) \quad (21)$$

Che dipende, in generale, dall' area, dalla durata e dal tempo di ritorno.

Eagleson (1972) utilizzando l' elaborazione dei dati dell' U.S. Weather Bureau ha ottenuto le seguenti conclusioni:

- La dipendenza dell' ARF dal tempo di ritorno è molto debole e può essere, nella pratica trascurata.
- Considerando separatamente l' influenza dei parametri, la (21) si può esprimere nella forma generale già espressa nella (20), ove le funzioni f_1 e f_2 sono del tipo:

$$f_1(A) = 1 - \exp(-c_1 \cdot A) \quad (22)$$

$$f_2(t) = \exp(-c_2 \cdot t^{c_3}) \quad (23)$$

La stima dei parametri c_1, c_2, c_3 nel caso degli Stati Uniti ha condotto alle curve di Figura 3.3.

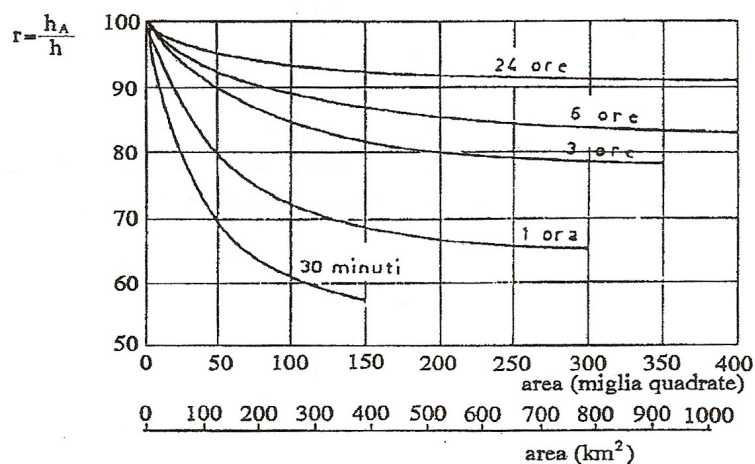


Fig. 3.3: Curve proposte dall' U.S.W.B. (Eagleson) per la determinazione dell' ARF.

Tali curve devono essere utilizzate con una certa cautela, in quanto ricavate sulla base di dati registrati in America, e quindi relative ad regione climatica con caratteristiche diverse da quelle riscontrabili nel nostro paese.

Per lo studio in questione sono stati utilizzati dei parametri c_1, c_2, c_3 ricalibrati¹ sul bacino del Reno:

$$c_1 = -0.01298$$

$$c_2 = -0.6786$$

$$c_3 = 0.3320$$

Sostituendo tali parametri nella (20) si ottiene l' espressione (24) utilizzata per il calcolo dei coefficienti di riduzione areale.

$$ARF(A, t) = 1 - (1 - \exp(-0.01299A)) \exp(-0.679 \cdot t^{0.332}) \quad (24)$$

Dove A è l' area del bacino in Km^2 e t è la durata della precipitazione espressa in ore.

¹ Chiara Benaglia (Tesi di laurea di), Il Fattore di Riduzione delle Piogge all' Area, Facoltà di Ingegneria, Bologna, 1997.

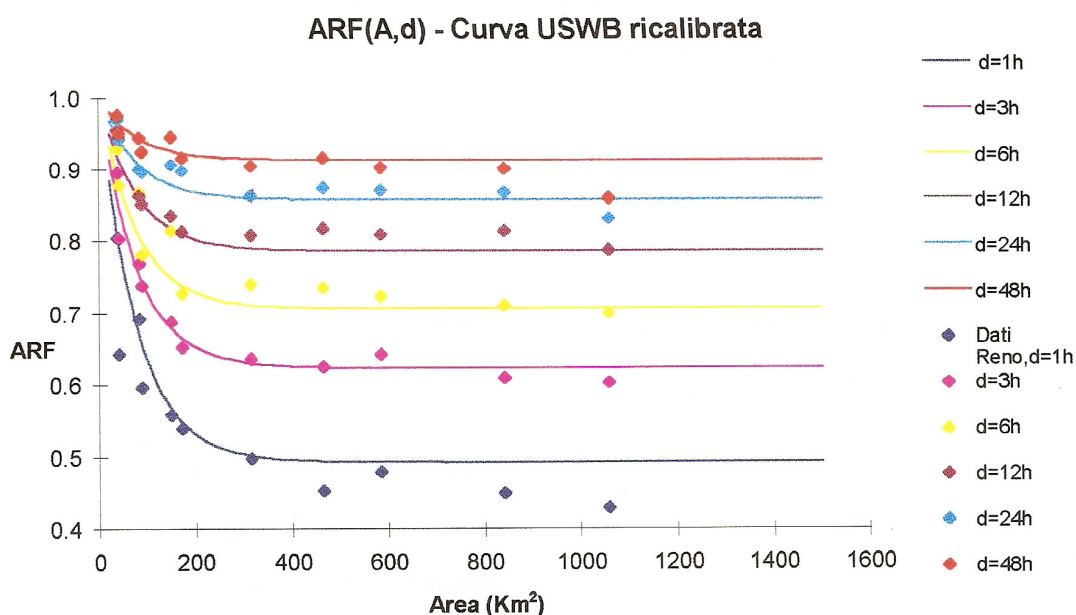


Fig. 3.4: Curve ARF(A,t) descritte dall' equazione dell' U.S. Weather Bureau ricalibrata sui valori sperimentali ricavati sul bacino del Reno.

I risultati ottenuti per il coefficiente di riduzione areale sono riportati in Tabella 3.6, come è possibile vedere i valori sono più alti per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia in quanto l' area di tale bacino è più piccola rispetto l' area del bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa, infatti è di 41.8 Km² contro i 1057.4 Km² del secondo bacino.

ARF	Pracchia	Casalecchio
1h	0.7876	0.4927
3h	0.8424	0.6237
6h	0.8776	0.7078
12h	0.9110	0.7874
24h	0.9404	0.8576
1d	0.9404	0.8576
5d	0.9849	0.9641

Tab. 3.6: Valori del coefficiente di riduzione areale ARF per le durate di interesse, per i bacini del Reno con chiusura a Pracchia e Casalecchio Chiusa.

Calcolati i coefficienti di riduzione areale risulta sufficiente moltiplicare i valori medi di pioggia puntuale per tali coefficienti e si ottengono i quantili delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali a scala di bacino; tali curve sono rappresentate in Figura 3.5 per il bacino con chiusura a Pracchia e in Figura 3.6 con chiusura a Casalecchio Chiusa.

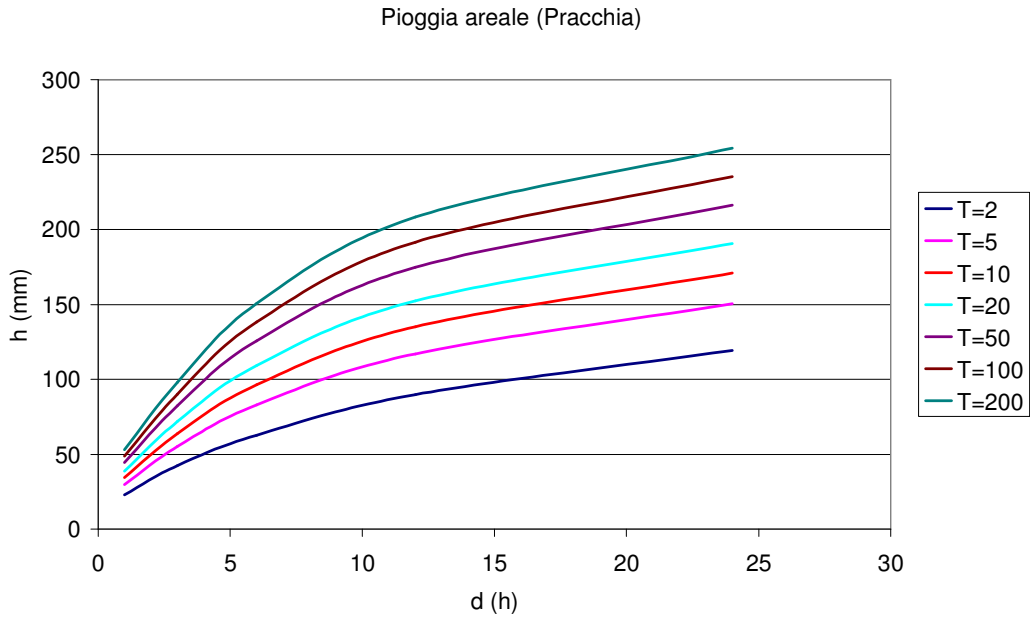


Fig. 3.4: Linea segnalatrice di possibilità pluviometrica areale a scala di bacino per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia

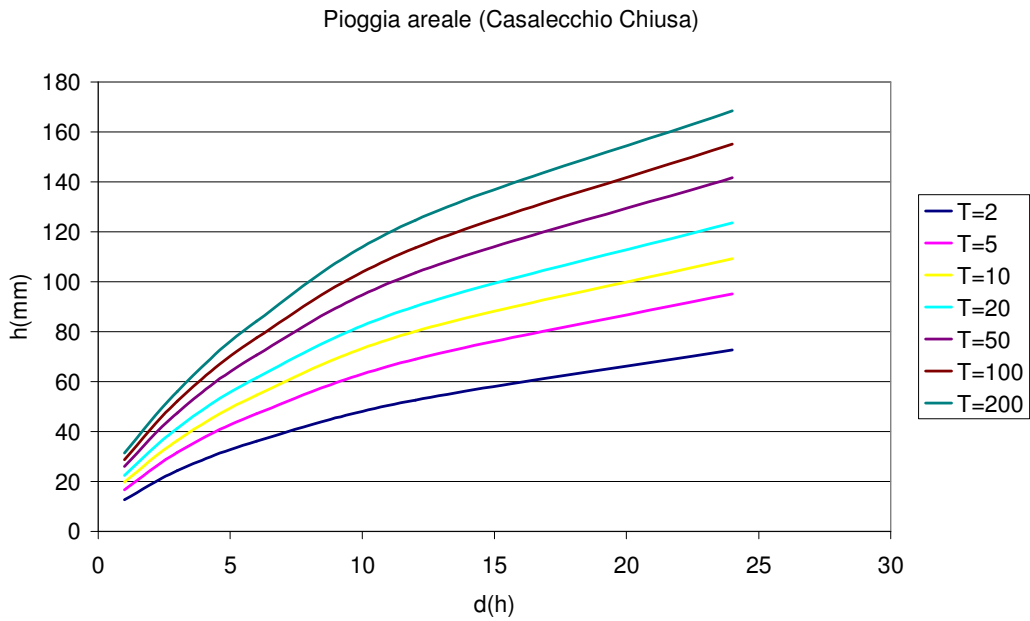


Fig. 3.5: Linea segnalatrice di possibilità pluviometrica areale a scala di bacino per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

Per motivi grafici non è stato possibile riportare anche i quantili per le durate di 1 e 5 giorni, questi sono riportati in Tabella 3.7 per Pracchia e in Tabella 3.8 per Casalecchio Chiusa.

h(t,T)	1d	5d
2	106.9	201.4
5	136.2	247.1
10	155.7	277.4
20	174.3	306.4
50	198.4	344.0
100	216.4	372.2
200	234.4	400.2

Fig. 3.7: Quantili areali a scala di bacino, con durate di 1 e 5 giorni, per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia.

h(t,T)	1d	5d
2	64.8	124.8
5	84.6	159.1
10	97.7	181.8
20	110.3	203.6
50	126.6	231.8
100	138.8	252.9
200	150.9	273.9

Fig. 3.8: Quantili areali a scala di bacino, con durate di 1 e 5 giorni, per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

I quantili riferiti a 1 giorno, sebbene sono sempre su un orizzonte temporale di 24 h, sono diversi, più precisamente sempre inferiori, rispetto a quelli delle 24 h rappresentati in Figura 3.4 e 3.5.

Questo perché le 24 h sono 24 h consecutive che possono iniziare in qualsiasi istante, mentre quando si parla di durata pari a 1 giorno ci si riferisce ad un giorno di registrazione che va dalle 9:00 alle 9:00 del giorno a cui viene attribuita la registrazione, quindi essendo una finestra di tempo bloccata non può andare a ricercare il massimo come possono fare le 24 h.

Cap. 4 COEFFICIENTE DI AFFLUSSO

4.1 Nozioni generali

Il coefficiente di afflusso viene definito come il rapporto tra la pioggia netta P_n e la pioggia P (1); dove per pioggia netta si intende il deflusso generato dall' evento di pioggia.

$$\Psi = \frac{P_n}{P} \quad (1)$$

Il deflusso generato dalla pioggia e quindi il coefficiente di afflusso dipendono, da tutte le cause che determinano l' entità delle perdite che possono essere per infiltrazione, oppure per ritenzione superficiale.[8] Inoltre come è possibile vedere dalla (1) il coefficiente di afflusso dipende anche dalla pioggia P . Particolare importanza tra tutti i fattori da cui dipende il coefficiente di afflusso rivestono l' entità della precipitazione e le condizioni del bacino antecedenti la precipitazione. La dipendenza dall' entità della precipitazione è dovuta al fatto che le perdite non possono superare un certo limite, quindi al crescere della precipitazione si ha una generale tendenza a crescere del coefficiente di afflusso. La dipendenza dalle condizioni iniziali del terreno è spiegata dal fatto che durante un evento di pioggia, soprattutto se di entità importante, la maggior parte delle perdite è dovuta all' infiltrazione, che è condizionata in modo determinante dal tipo di terreno e dalle sue condizioni di umidità. L' assunzione che il coefficiente di afflusso abbia un valore costante è del tutto grossolana e semplificativa. Nella realtà delle cose il valore di Ψ ,

come già citato, è influenzato in maniera fondamentale da una serie di fattori esterni, che variano da evento a evento, di cui i principali sono l' entità della precipitazione e le condizioni di umidità del bacino. Per avere una indicazione sulle condizioni di umidità del bacino è possibile utilizzare vari indici come per esempio una media pesata delle precipitazioni nei giorni antecedenti l' evento, (Antecedent Precipitation Index , API) oppure il deficit di umidità del suolo all' inizio dell' evento.

Una grandezza analoga al coefficiente di afflusso, di un certo interesse, è il valore del *coefficiente di deflusso* che si definisce fissando l' attenzione anziché su un evento in particolare, su un intervallo di tempo Δt prefissato. Tale coefficiente è definito come il rapporto, relativo ad un certo Δt , tra il deflusso Q alla sezione di chiusura del bacino in considerazione e l' afflusso meteorico lordo P osservati nell' intervallo considerato. Mentre il coefficiente di afflusso può assumere valori compresi solo tra zero e uno, il coefficiente di deflusso può assumere qualsiasi valore positivo, basti pensare che il deflusso da sorgenti può essere diverso da zero anche in periodi in cui non si verificano precipitazioni, questo sempre nel rispetto dell' equazione del bilancio di massa, cioè implica che diminuisca la quantità d' acqua immagazzinata. Una situazione per cui si verifica, spesso, che il coefficiente di deflusso sia maggiore di uno è tipica dei bacini alpini in corrispondenza dei mesi estivi quando cioè oltre dalle precipitazioni, il deflusso è alimentato anche dallo scioglimento delle nevi.

Se invece si analizza un intervallo di tempo di un anno, allora il coefficiente di deflusso assume un significato molto analogo al coefficiente di afflusso, in quanto su un periodo di un anno si può ritenere trascurabile la differenza tra i volumi d' acqua immagazzinati nel bacino all' inizio e alla fine dell' anno.

Lo studio del coefficiente di afflusso viene fatto in merito al singolo evento, quindi si prende in considerazione il deflusso superficiale, che si ottiene applicando un qualunque metodo di separazione che diventa parte integrante della relazione tra precipitazioni e deflusso, per isolarlo dal deflusso totale alla sezione di chiusura.

Il calcolo del coefficiente di afflusso, nel seguente studio, sarà applicato ai tre principali eventi di piena analizzati, rispettivamente le piene¹: 3_90, 5_94 e 2_00.

¹ La nomenclatura delle piene è quella proposta dall' Autorità di bacino. Cfr. Tab. 1.4.

4.2 Calcolo della pioggia lorda

E' possibile ottenere il valore della pioggia lorda da associare ad ogni evento in considerazione mediante i valori di pioggia oraria ragguagliati sul bacino, più ampiamente descritti nel Capitolo 5, applicando la media pesata tra le varie stazioni. Tali informazioni sono le medesime che sono state utilizzate per la caratterizzazione della frequenza probabilistica degli eventi.

Mediante la (2) è possibile ottenere il volume di pioggia lordo per un' ora di precipitazione, risulta infatti necessario moltiplicare per l' area totale del bacino (1057 Km^2) e per un fattore moltiplicativo di 1000 che tiene conto delle unità di misura della pioggia (mm) e dell' area (Km^2) e restituisce il volume in m^3 .

$$P_i = h_i \cdot A \cdot 1000 \quad (2)$$

Per ottenere il volume di pioggia lorda riferito al particolare evento risulta sufficiente sommare i volumi prodotti da un numero di ore pari al tempo di corrivazione del bacino, precedenti all' istante in cui si verifica il picco di portata.

4.3 Stima del deflusso di pioggia

Quando si parla di ‘evento di piena’ ci si riferisce alle conseguenze di un evento di precipitazione, o dello scioglimento del manto nevoso, che provocano un rapido aumento della portata di un corso d’acqua seguito da un ritorno alle condizioni iniziali, anche se in maniera più lenta. L’ aumento della portata provoca sempre un aumento dei livelli idrici, mentre non è detto il contrario in quando per esempio un innalzamento del pelo libero per un corso d’acqua secondario, in prossimità della sezione di sbocco nell’ asta principale può essere dovuto al passaggio dell’ onda di piena nel fiume maggiore. In Figura 4.1 viene illustrata la forma caratteristica per l’ idrogramma di piena, nella maggior parte dei bacini idrografici e corrispondente ad un evento di pioggia semplice e caratterizzato da un andamento all’ incirca costante nel tempo.

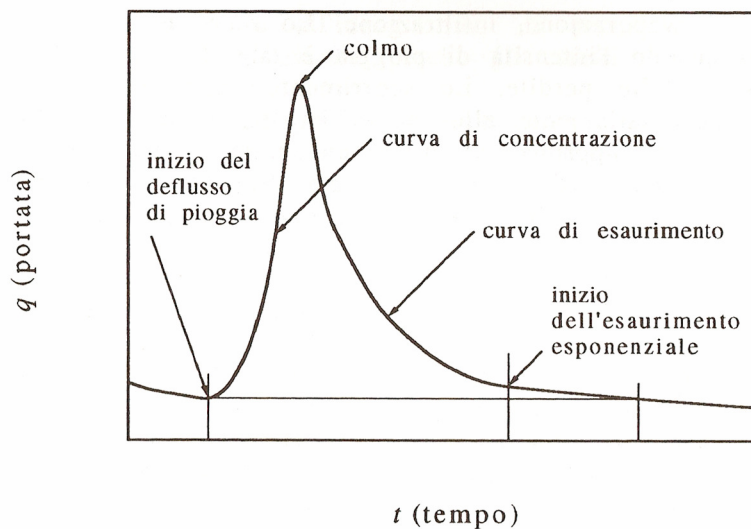


Fig. 4.1: Idrogramma di piena, vengono inoltre indicate le varie fasi successive durante un evento di piena.

La prima fase che si può individuare nell’ idrogramma di piena è quella che viene definita come *curva di concentrazione* (o ramo ascendente), qui si ha anche la variazione di portata con la maggiore velocità; questa fase è seguita da quello che viene chiamato *colmo di piena*, cioè la portata massima verificata, caratterizzata da un andamento crescente nella fase precedente e decrescente nella fase successiva.

Dopo il colmo di piena viene il tratto della *curva di esaurimento* nella quale la portata diminuisce in modo continuo ma sempre più lento, questa è anche la fase che si

protrae per un tempo maggiore. L' andamento di un idrogramma di piena può essere compreso analizzando quelli che sono i fenomeni che si susseguono durante il verificarsi di una piena. Quando comincia a piovere la portata del corso d' acqua è dovuta al solo contributo dovuto allo svuotamento delle falde acquifere, la portata inoltre non comincia immediatamente a salire; l' unico contributo immediato è dovuto all' *afflusso diretto* , cioè a quella parte di precipitazione che cade negli specchi d' acqua, ma questo contributo, essendo gli specchi d' acqua circa il 5% del bacino, lo si può ritenere trascurabile. Il contributo principale alla portata di piena è dovuto allo *scorrimento superficiale*, determinando la forma dell' idrogramma; tale contributo ha inizio quando l' intensità di pioggia è tale da superare l' effetto complessivo delle varie perdite; queste sono costituite da intercezione, accumulo nelle depressioni superficiali, evaporazione, infiltrazione. L' infiltrazione va ad alimentare il *deflusso ipodermico* che avviene orizzontalmente a poca distanza dalla superficie, dovuto alla presenza di strati impermeabili, i tempi caratteristici di tale fenomeno sono circa gli stessi del deflusso superficiale; mentre sono estremamente più lunghi i tempi caratteristici del *deflusso profondo*, dovuti ai percorsi lunghissimi che l' acqua deve fare per giungere alla rete idrografica.

Dopo poco tempo dal termine dell' evento di pioggia, cessa anche il deflusso superficiale ed inizia la curva di esaurimento, questa è possibile suddividerla in tre fasi, nella prima, il contributo è dato dallo svuotamento della rete idrometrica, dal deflusso ipodermico e dal deflusso profondo, nella seconda fase si ha il contributo del deflusso ipodermico e di quello profondo, mentre nella terza fase solamente del deflusso profondo. Quando il contributo è dovuto al solo deflusso profondo, è possibile osservare come l' idrogramma assuma un andamento ben rappresentabile da una legge esponenziale. In conclusione è possibile assumere che il deflusso sia costituito da quattro componenti: afflusso diretto, deflusso superficiale, deflusso ipodermico e deflusso profondo; andare ad individuare queste componenti del deflusso sull' idrogramma di piena risulta essere impossibile ed anche non di particolare interesse. Da un punto di vista pratico risulta essere molto più utile la suddivisione dell' idrogramma di piena in due parti, una che comprende quello che viene chiamato *deflusso di base* e l'altra il *deflusso di pioggia*; questo è possibile realizzarlo mediante alcuni metodi empirici.

Si può pensare il deflusso di pioggia costituito dalla somma dell' afflusso diretto, dello deflusso superficiale e del deflusso ipodermico, mentre il deflusso di base

costituito dal solo deflusso profondo. Ai fini pratici non è importante cercare di attribuire un senso fisico a questa suddivisione, ma piuttosto è necessario dividere l' idrogramma in due parti tali da rendere conto, con ragionevole precisione, del deflusso di pioggia attraverso un modello matematico semplice.

Quando il corso d' acqua non si trova in situazione di piena, l' idrogramma del deflusso totale coincide con quello di base, mentre questo non accade quando si è in situazione di piena dove viene aggiunto il contributo del deflusso di pioggia.

Quindi per operare la suddivisione è necessario in prima istanza individuare quelli che sono gli istanti di inizio e di fine del deflusso di pioggia; l' istante di inizio è facilmente individuabile, in quanto la curva di concentrazione inizia a salire bruscamente (Figura 4.1); mentre più arbitraria è l' individuazione dell' istante di fine del deflusso di pioggia.

Un primo metodo può essere quello di fare coincidere tale istante con il momento in cui la portata torna ad essere quella iniziale (Figura 4.1); mentre un secondo criterio, ed è anche quello adottato nel presente studio, fa coincidere l' istante di fine del deflusso di pioggia con il momento in cui la curva di esaurimento assume un andamento esponenziale. Individuati gli istanti di inizio e fine del deflusso di pioggia è necessario calcolare quello che è il deflusso di base e sottrarlo al deflusso totale; per fare questo ci possono essere diversi modi, qui vengono presentati i due metodi utilizzati nel presente studio.

● **Metodo A**

Il metodo consiste nel prolungare la curva esponenziale fino all' istante di picco dell' idrogramma e congiungere tale punto con il punto di inizio del deflusso superficiale mediante un segmento, quindi l' idrogramma di base durante la piena è costituito da due tratti (Figura 4.2, linea continua). Tale metodo è applicabile solo se si è scelto di individuare l' istante di fine del deflusso superficiale con il momento in cui la curva di esaurimento assume un andamento esponenziale.

● **Metodo B**

Il secondo metodo (applicabile sempre) consiste nell' attribuire tra gli istanti di inizio e di fine del deflusso superficiale all' idrogramma del deflusso di base un andamento lineare (Figura 4.2, linea a tratteggio).

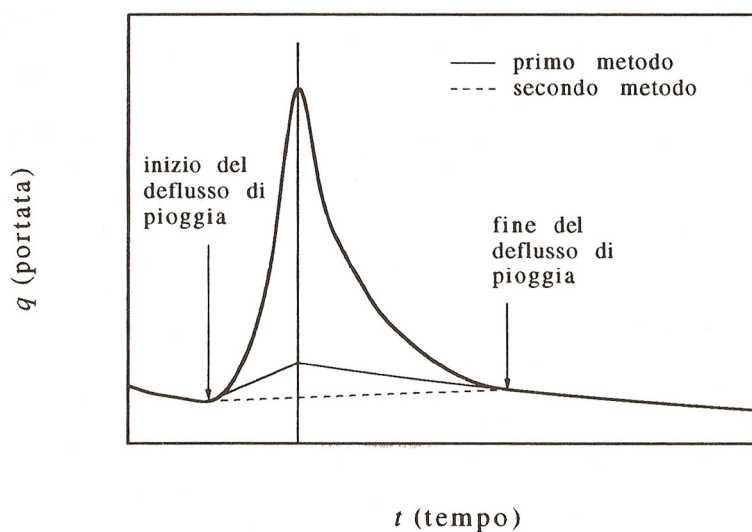


Fig. 4.2: Idrogramma di piena, vengono inoltre rappresentati i due metodi per la separazione del deflusso di pioggia dal deflusso di base.

In Tabella 4.1 vengono riportati i risultati di deflusso di pioggia, che poi serviranno per il calcolo del coefficiente di afflusso, ottenuti con entrambi i metodi per gli eventi analizzati; mentre in Figura 4.3, 4.4 e 4.5 gli idrogrammi di piena con le separazioni operate.

$Pn (m^3)$	A	B
3_90	59598258	66895733
5_94	42017995	49988282
2_00	35940725	43265586

Tab. 4.1: Volumi del deflusso di pioggia, per gli eventi in considerazioni, calcolati con entrambi i metodi.

Le portate rappresentate sulle Figure 4.3, 4.4 e 4.5 hanno passo semiorario e per motivi pratici di calcolo le unità sull' asse delle ascisse coincidono con tale passo.

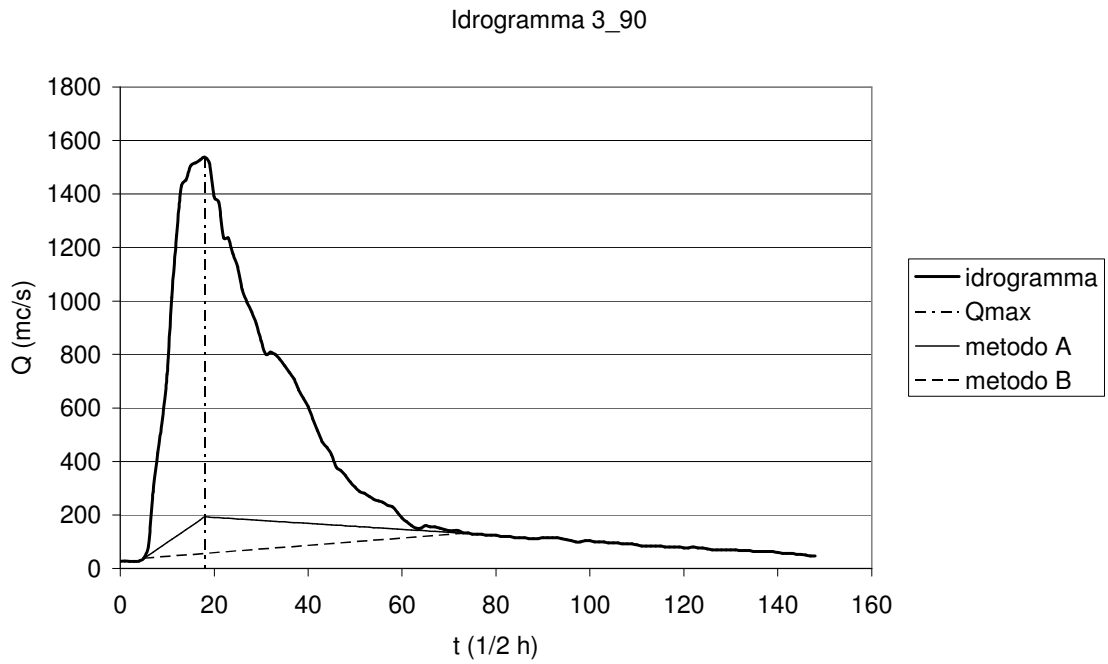


Fig. 4.3: Evento di piena 3_90, suddivisione dell' idrogramma in deflusso di pioggia e di base.

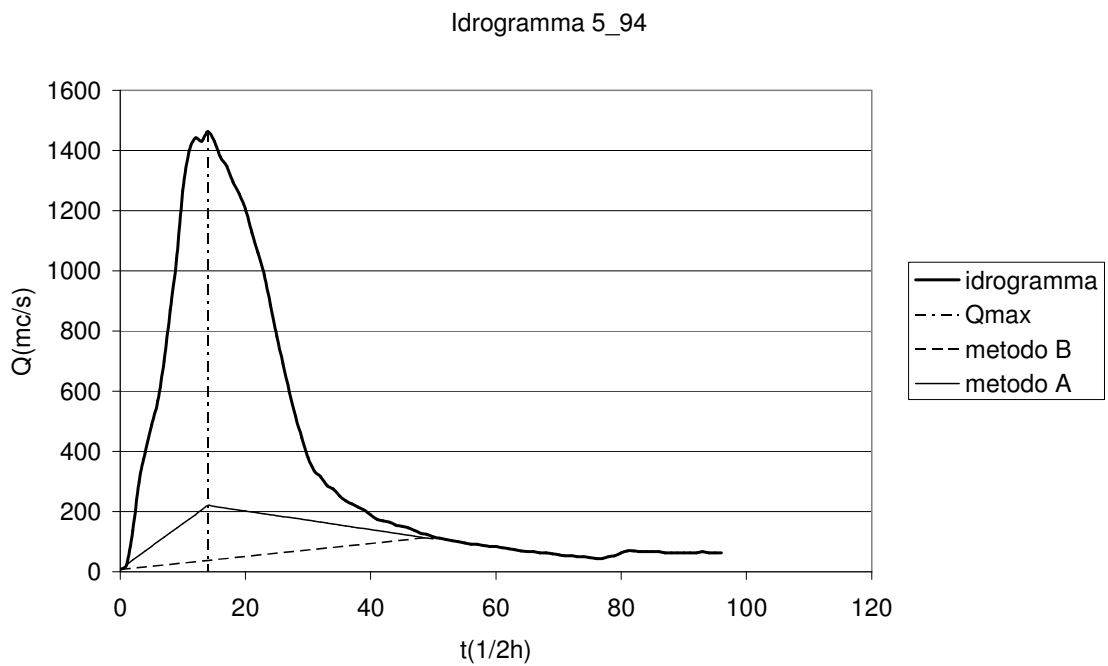


Fig. 4.4: Evento di piena 5_94, suddivisione dell' idrogramma in deflusso di pioggia e di base.

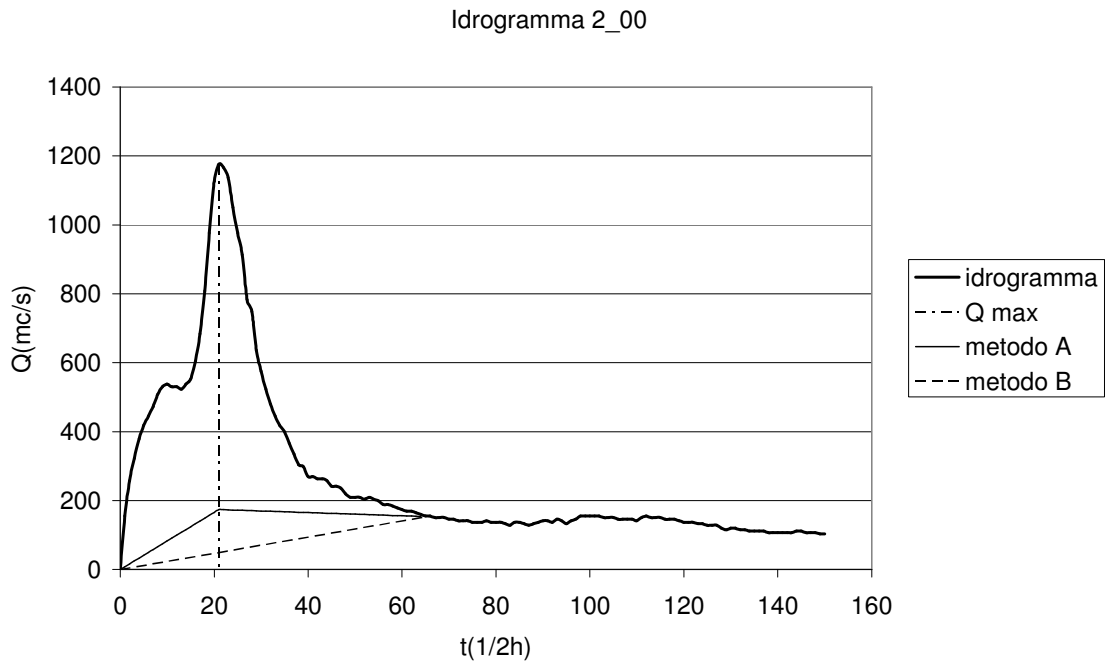


Fig. 4.5: Evento di piena 2_00, suddivisione dell' idrogramma in deflusso di pioggia e di base.

4.4 Valutazione del tempo di corrivazione del bacino

Il tempo di corrivazione viene assunto come il tempo che una goccia di pioggia caduta in un punto qualsiasi del bacino impiega per giungere alla sezione di chiusura del bacino stesso. L' ipotesi fondamentale su cui si basa il concetto di tempo di corrivazione è che per un punto del bacino, il tempo che la goccia di pioggia caduta in tale punto impiega per giungere alla sezione di chiusura sia una costante. Sebbene ci si possa facilmente rendere conto dei limiti di questa ipotesi, questa risulta molto utile e mediamente vera; quindi ad ogni punto del bacino corrisponde un tempo di corrivazione. Il *tempo di corrivazione del bacino* viene definito come il tempo di corrivazione del punto idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, cioè il punto dello spartiacque da cui ha origine l' asta principale della rete idrografica e che risulta il maggiore tra quelli dei diversi punti del bacino.

Il tempo di corrivazione del bacino si stima in genere utilizzando formule, basate sull' analisi di una gran quantità di dati, che esprimono il legame mediamente esistente tra il tempo di corrivazione ed alcune grandezze caratteristiche del bacino di facile determinazione.

In Italia è molto usata la formula di Giandotti (3):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\bar{z}}} \quad (3)$$

In cui t_c è il tempo di corrivazione misurato in ore, A è l' area del bacino misurata in chilometri quadrati, L la lunghezza dell' asta principale, misurata in chilometri, e \bar{z} l' altezza media del bacino, rispetto la sezione di chiusura, misurata in metri.

Per lo studio in considerazione tale formula ha dato luogo ad un tempo di corrivazione pari a 12h per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio, e pari a 3h per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia.

Data la disponibilità delle portate semiorarie per alcuni eventi nella stazione idrometrica di Casalecchio Chiusa è stato possibile effettuare una ulteriore verifica sul tempo di corrivazione del bacino del Reno con chiusura in tale sezione; infatti è stato calcolato il *tempo di Lag* per gli eventi di piena 3_90, 5_94 e 2_00.

Il tempo di Lag viene definito come 'il tempo di ritardo' tra l' input, la precipitazione, e l' output, il deflusso; è stato calcolato andando a verificare quale sia la distanza

temporale tra il baricentro dello ietogramma delle precipitazioni ed il baricentro dell' idrogramma delle portate.

In Figura 4.6, 4.7, 4.8 sono riportati i grafici in cui sono indicati i baricentri di precipitazione e di portata, tali grafici sono stati costruiti normalizzando i valori di pioggia e di portata rispetto la loro media in modo tale da rendere confrontabili le due grandezze da un punto di vista visivo sul medesimo grafico; quindi in ordinata avranno i valori di altezze di pioggia e di portata adimensionalizzati, mentre in ascissa c'è un numero progressivo la cui unità coincide con 1/2h.

I risultati ottenuti per il calcolo dei tempi di Lag sono riportati in Tabella 4.2:

Evento	Lag (h)
3_90	13
5_94	10
2_00	11

Tab. 4.2: Risultati ottenuti per il tempo di Lag per gli eventi in considerazione.

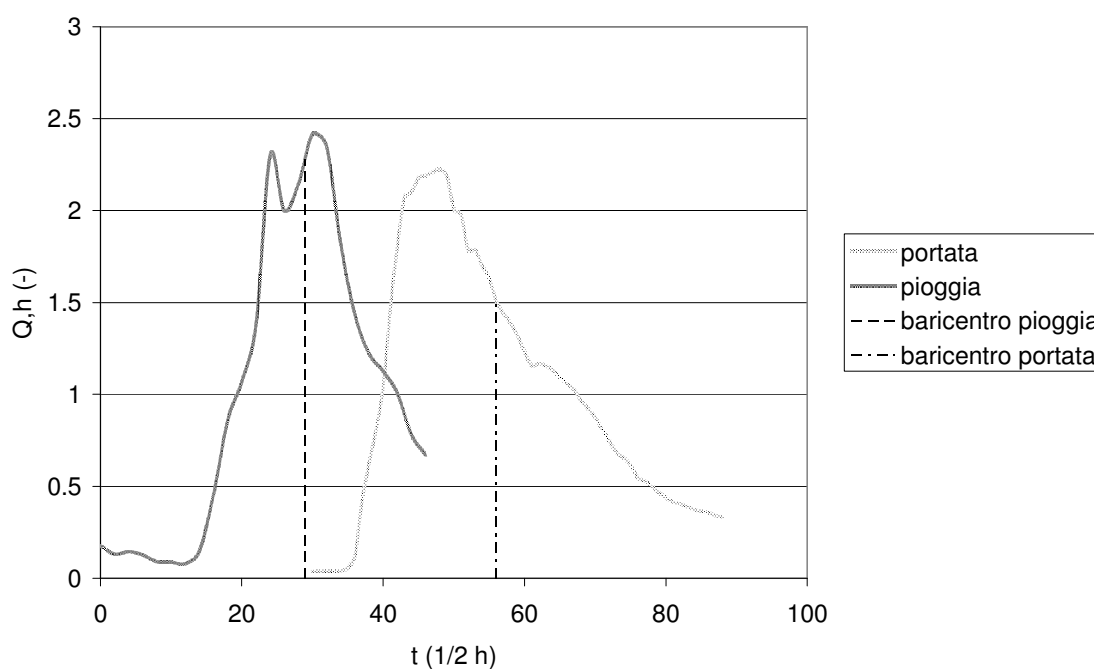


Fig. 4.6: Grafico adimensionale di pioggia e deflusso per l'evento 3_90.

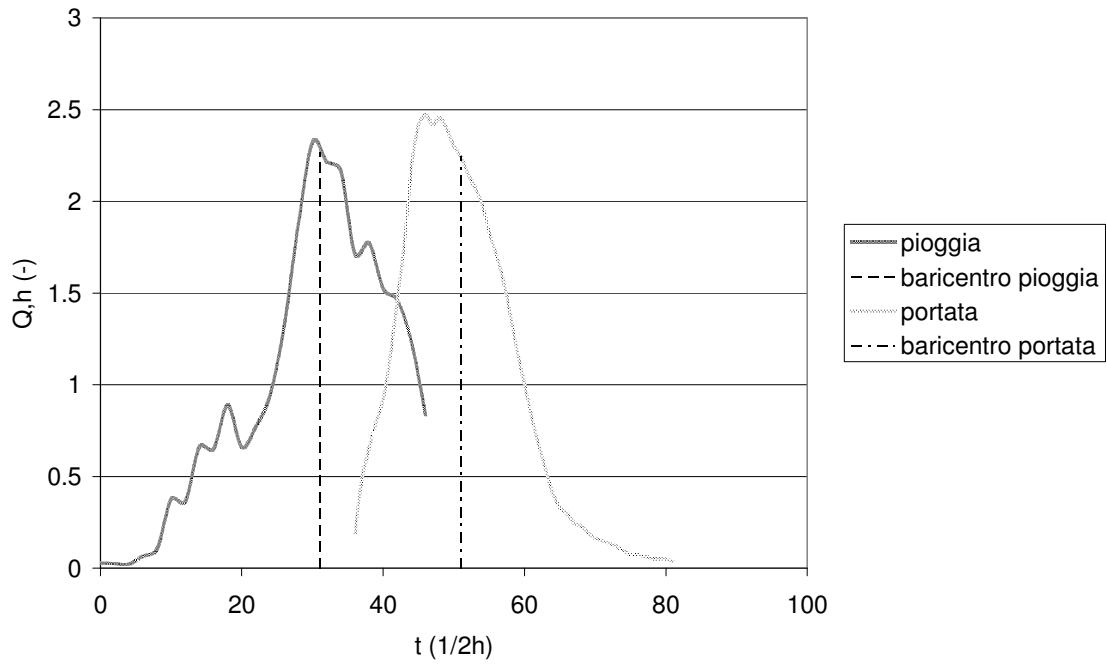


Fig. 4.7: Grafico adimensionale di pioggia e deflusso per l' evento 5_94.

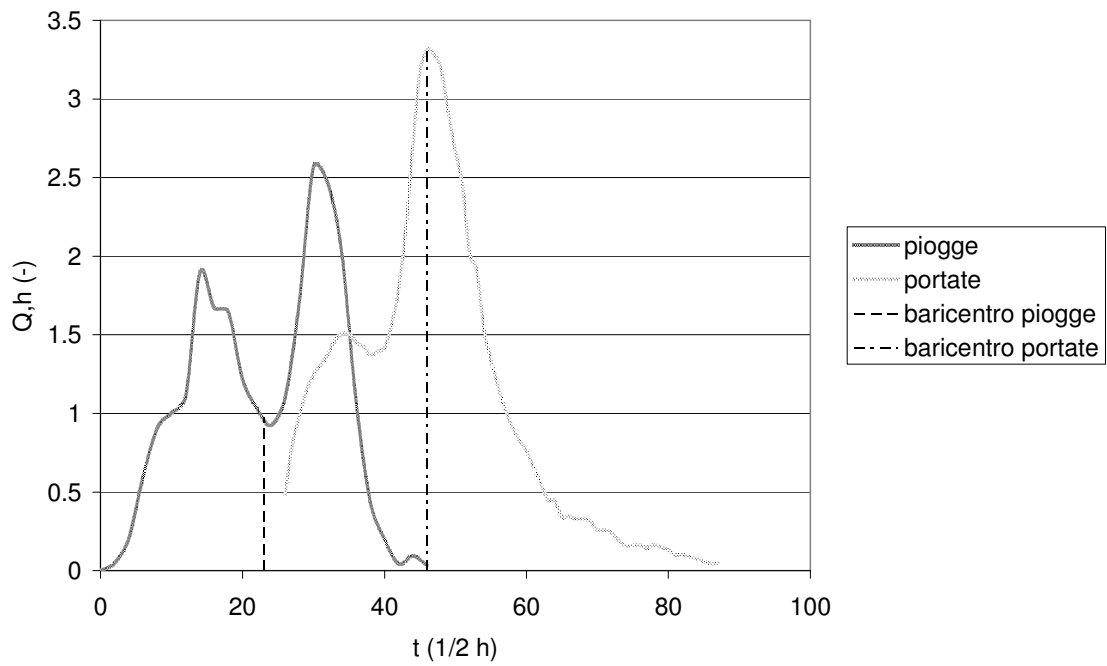


Fig. 4.8: Grafico adimensionale di pioggia e deflusso per l' evento 2_00.

I risultati ottenuti per il tempo di Lag, che è all' incirca uguale al tempo di corrivazione, consentono di affermare ragionevolmente che si può mediamente assumere il tempo di corrivazione per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa pari a 12h.

L' assunzione del tempo di corrivazione pari a 12h ha prodotto i risultati di Tabella 4.3 per quanto riguarda i valori di pioggia lorda per gli eventi analizzati.

Evento	P
3_90	103894578
5_94	87381290
2_00	50658903

Tab. 4.2: Valori di pioggia lorda ottenuti per gli eventi di interesse

4.5 Coefficienti di afflusso: applicazione al bacino del Reno

Calcolato il deflusso di pioggia e la pioggia lorda, per ottenere il valore del coefficiente di afflusso, è sufficiente fare il rapporto tra le due grandezze come descritto nella (1). I risultati ottenuti per il coefficiente di afflusso sono riportati in Tabella 4.3.

Ψ	A	B
3_90	0.57	0.64
5_94	0.48	0.57
2_00	0.71	0.85

Tab. 4.3: Valori del coefficiente di afflusso, per gli eventi analizzati, il risultato varia a seconda che si scelga il metodo A o il metodo B per il calcolo del deflusso di pioggia.

Il bacino del Reno è possibile ritenerlo praticamente quasi impermeabile, questo induce a pensare che il deflusso di base si comporti in maniera più analoga al metodo B, infatti essendo il terreno impermeabile il picco del deflusso di base sarà ritardato, come accade per il metodo B, e non in perfetta coincidenza con il picco dell'idrogramma di piena come avviene per il metodo A.

Cap. 5 CARATTERIZZAZIONE DELLA FREQUENZA PROBABILISTICA DEGLI EVENTI PLUVIOMETRICI STORICI A SCALA DI BACINO

In questo capitolo, vengono illustrate le tecniche ed i metodi utilizzati per calcolare il tempo di ritorno relativo agli eventi di pioggia che hanno generato le piene già analizzate nel Capitolo 2; lo studio riguarderà l'analisi delle precipitazioni nelle ore e nei giorni immediatamente precedenti il picco di piena. In Tabella 5.1 e 5.2 vengono riportate rispettivamente gli eventi analizzati per la sezione di Casalecchio Chiusa e per quella di Pracchia, oltre alla piena e alla data, che erano già stati illustrati nei capitoli precedenti, è riportato anche l'orario in cui si è registrato il picco di piena, tale dato è indicativo del momento fino al quale si sono analizzate le precipitazioni.

Piena	Data	Ora
3_90	25-nov-90	22:00
5_94	22-set-94	7:00
2_00	07-nov-00	1:30
5_92	05-dic-92	15:30
4_94	13-giu-94	21:15
4_90	10-dic-90	2:00
3_92	31-ott-92	5:00
4_03	08-nov-03	21:15
5_03	28-nov-03	3:00
4_04	31-ott-04	13:30
4_91	12-ott-91	12:30

Tab. 5.1: Eventi di piena per i quali è stata analizzata la precipitazione di pioggia generatrice, e orario in cui si è registrato il picco di piena, per la sezione di Casalecchio Chiusa.

Piena	Data	Ora
3_02	23-ott-02	7:00
4_02	17-nov-02	13:00
5_03	27-nov-03	19:45
4_03	8-nov-03	14:30
1_02	4-mag-02	6:00
6_03	29-dic-03	10:30
1_04	17-gen-04	13:00
1_03	21-gen-03	21:30

Tab. 5.2: Eventi di piena per i quali è stata analizzata la precipitazione di pioggia generatrice, e orario in cui si è registrato il picco di piena, per la sezione di Pracchia.

Lo studio della frequenza probabilistica per gli eventi di interesse è stato condotto utilizzando due metodi, il primo si basa sul confronto delle massime altezze di precipitazione osservate durante l'evento analizzato con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali a scala di bacino, il secondo metodo implica l'utilizzo dell'equazione RDDFE¹ (Regional Depth-Duration-Frequency Equations).

¹ Brath et al., Assessing the reliability of regional depth-duration-frequency equations for gaged and ungaged sites, Bologna, 2003.

5.2 Confronto delle massime altezze di precipitazione con le LSPP areali a scala di bacino

5.2.1 Ricerca delle massime altezze di precipitazione

La ricerca delle massime altezze di precipitazione deve essere fatta per le varie durate di interesse che come è stato già detto sono di 1, 3, 6, 12, 24 ore e 1 e 5 giorni; ovviamente le altezze di precipitazione che verranno indagate non saranno quelle cadute in un punto, ma i valori di pioggia oraria e giornaliera, per le durate di 1 e 5 giorni, mediate sul bacino.

I valori puntuali delle varie stazioni verranno mediati utilizzando i pesi di Tabella 1.1 per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa e di Tabella 1.2 per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia; in occasione di alcuni eventi è stato necessario ricalcolare tali pesi in quanto può capitare che alcune stazioni abbiano dei “fuori servizio”. Calcolata la media pesata i valori che si ottengono si possono già ritenere areali a scala di bacino e non è necessario applicare alcun coefficiente di riduzione all’ area in quanto tali valori sono stati osservati contemporaneamente.

Ottenuti i valori di pioggia orari mediati è stato necessario andare a ricercare i massimi di pioggia per le durate di interesse, ma tali massimi sono da ricercare all’ interno di un intervallo di tempo antecedente la portata di picco, dell’ ordine di grandezza del *tempo di corrivazione* del bacino considerato; si è scelto di assumere tale intervallo pari a 9h per il bacino con chiusura a Pracchia e pari a 20h per il bacino con chiusura a Casalecchio Chiusa.

La ricerca dei massimi all’ interno di tali intervalli produce che per il caso di Casalecchio è possibile ricercare il massimo di pioggia per le durate di 1, 3, 6, 12 ore mediante una finestra scorrevole che indaga le 20 ore precedenti il picco di portata, mentre per gli altri valori delle durate di interesse si debbano scegliere quelli accaduti immediatamente prima dell’ evento, senza la possibilità di ricercare il massimo in alcun margine di tempo. Allo stesso modo per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia essendo stato scelto come intervallo di tempo di ricerca 9h è possibile utilizzare la finestra mobile per le durate di 3 e 6 ore, oltre ovviamente a quella di 1 ora; mentre per tutte le altre durate saranno considerati i valori accaduti immediatamente prima del picco di piena.

Tutti i risultati saranno esposti nelle pagine seguenti, ora a titolo di esempio in Figura 5.1 viene mostrata la ricerca dei massimi di pioggia per l' evento 4_02 con riferimento al bacino con chiusura a Pracchia, mentre in Tabella 5.3 si mostrano i risultati per lo stesso evento.

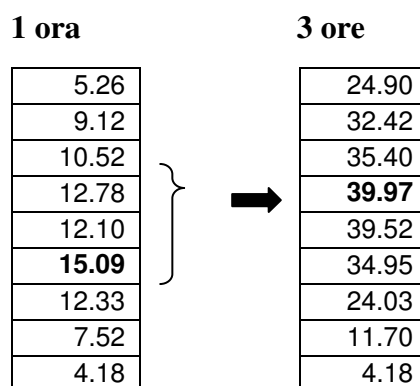


Fig. 5.1: Ricerca dei massimi di pioggia.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
h (mm)	15.09	39.97	71.95	91.65	103.99	59.58	151.09

Tab. 5.3: Risultati dei massimi di pioggia per l' evento 4_02.

I risultati che si ottengono vanno confrontati con le curve segnalatrici di possibilità pluviometrica areale a scala di bacino ottenute nel Capitolo 3; come atteso, il valore del tempo di ritorno associabile all' altezza massima di pioggia varia al variare della durata della finestra mobile presa a riferimento, ma di nostro interesse è individuare un valore della durata cui ci si possa fare riferimento per valutare l' evento nel suo complesso; a questo proposito risulta essere pratica corrente ritenere che i dati di maggior interesse ai fini della valutazione del tempo di ritorno dell' evento siano quelli relativi ad una durata di pioggia pari al tempo di corrivazione del bacino. Ciò in quanto, la grandezza che è solitamente di maggiore rilevanza ai fini della difesa idraulica del territorio, cioè la massima portata di piena transitante durante l' evento o portata al colmo, viene usualmente messa in relazione alla pioggia di durata pari al tempo di corrivazione.

Tale assunzione è utilizzata anche da alcuni modelli afflussi-deflussi, come per esempio il *modello della corrivazione*; infatti, come verrà illustrato nelle pagine seguenti, la durata di pioggia che massimizza la portata al colmo alla sezione di chiusura, quindi la durata dell' *evento critico* è pari al tempo di corrivazione del bacino.

In Figura 5.2 viene rappresentata la curva di variazione di intensità della precipitazione, a tempo di ritorno costante, con l'ipotesi che l'intensità diminuisce all'aumentare della durata con la legge (1).

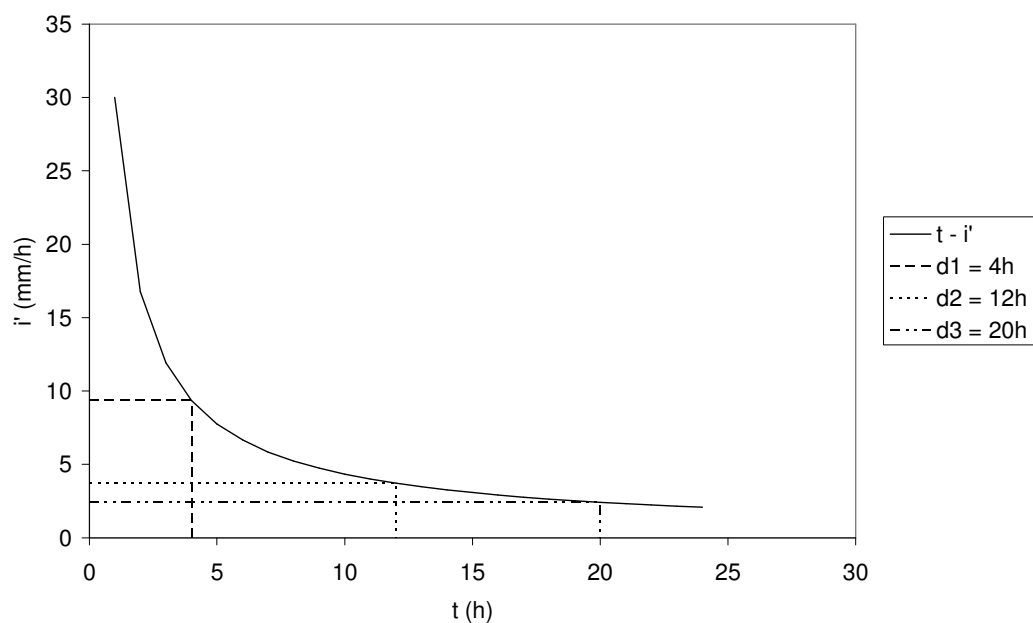


Fig. 5.2: Variazione dell'intensità di pioggia al variare della durata.

$$i = ad^{n-1} \quad (1)$$

Assumendo che il bacino abbia tempo di corrivazione pari a 12h, si ottengono in uscita, per le durate rappresentate in Figura 5.2, le portate rappresentate in Figura 5.3.

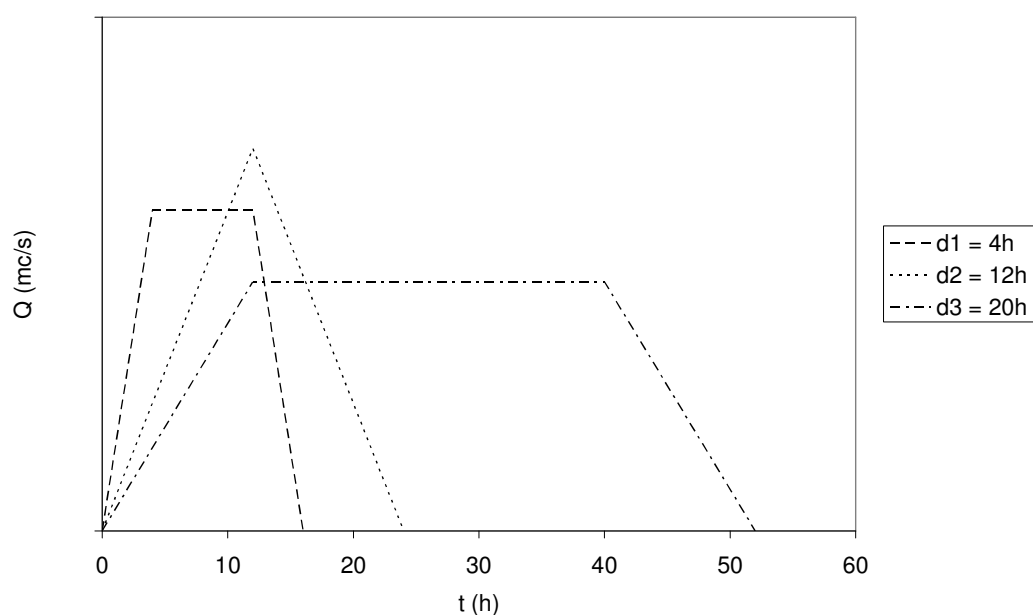


Fig. 5.3: Rappresentazione delle portate prodotte dalle piogge di durata d1, d2 e d3.

Come è possibile vedere dal grafico di Figura 5.3 la durata di pioggia pari al tempo di corrivazione produce il picco di portata massima, infatti la $Q_1 = i_1Ad_1$, ma $Ad_1 < A$ in quanto per un durata d_1 inferiore al tempo di corrivazione non tutta l' area del bacino riesce a contribuire contemporaneamente al deflusso; mentre la $Q_3 = i_3A$, ma $i_3 < i_2$ essendo $d_3 > d_2$; quindi il valore di deflusso massimo risulta essere pari a $Q_2 = i_2A$. Per questo motivo il metodo della corrivazione assume come evento critico l' evento con durata pari al tempo di corrivazione del bacino, la (2) rappresenta la relazione che si utilizza per il calcolo della portata di progetto.

$$Q_T = Ci'(t_c, T)A \quad (2)$$

Dove C è il coefficiente di afflusso, i' l' intensità di precipitazione media areale con durata pari al tempo di corrivazione e tempo di ritorno T di interesse ed A rappresenta l' area del bacino.

Quindi il fatto che la portata al colmo di piena, venga messa in relazione con la pioggia di durata pari la tempo di corrivazione, motiva l' assunzione del tempo di ritorno dell' intero evento di pioggia pari al tempo di ritorno della precipitazione di tale evento con durata pari al tempo di corrivazione.

Per quanto riguarda il tempo di corrivazione sulla base delle considerazioni effettuate nel Capitolo 4 è possibile, ragionevolmente, assumere i valori di 3h per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia e 12h per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

5.2.2 Eventi per il Reno a Pracchia

Come sarà mostrato dai risultati seguenti, gli eventi di interesse nella sezione di Pracchia non presentano tempi di ritorno particolarmente elevati, questo è dovuto alla ridotta disponibilità di dati, già accennata nel Capitolo 1, per le portate di tale sezione che quindi ha limitato lo studio a casi non particolarmente intensi. Le stazioni pluviometriche utilizzate per la caratterizzazione del bacino del Reno con chiusura a Pracchia sono quelle di Piastre, Maresca, Pracchia e Orsigna i cui pesi sono quelli già illustrati in Tabella 1.2; tra gli eventi analizzati per questo bacino non ci sono situazioni di "fuori servizio" per alcuna stazione quindi tali pesi rimangono validi per tutti gli eventi. In Tabella 5.4 vengono riportati i quantili per le varie durate utilizzati per la costruzione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali a scala di

bacino e i risultati delle altezze di precipitazione massime per gli eventi pluviometrici.

Quantili	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
T=2	22.8	42.5	62.8	89.8	119.3	106.9	201.4
T=5	29.8	55.2	83.0	117.1	150.4	136.3	247.1
T=10	34.4	63.7	96.4	135.1	171.0	155.7	277.4
T=20	38.8	71.8	109.2	152.4	190.7	174.3	306.4
T=50	44.5	82.2	125.8	174.8	216.2	198.4	344.0
T=100	48.8	90.1	138.3	191.6	235.4	216.5	372.2
T=200	53.0	97.9	150.7	208.3	254.4	182.4	318.4
Eventi	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
3_02	16.6	40.7	56.8	65.8	70.8	87.8	142.9
4_02	15.1	40.0	72.0	91.7	104.0	59.6	151.1
5_03	16.6	40.8	67.5	78.3	82.0	106.0	211.0
4_03	16.4	43.0	51.9	69.3	88.4	99.7	145.4
1_02	13.0	32.4	49.3	86.8	109.9	117.3	137.4
6_03	6.9	16.8	30.7	60.0	96.7	84.6	88.4
1_04	8.7	26.0	48.3	73.0	108.1	45.0	139.9
1_03	7.9	22.5	41.2	59.1	72.6	64.1	77.1

Tab. 5.4: Risultati delle massime altezze di precipitazione per i vari eventi a confronto con i quantili utilizzati per la costruzione delle LSPP areali a scala di bacino.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i grafici, prodotti a partire dalla Tabella 5.4, che consentono un confronto visivo delle massime altezze di pioggia delle varie precipitazioni con le LSPP areali a scala di bacino.

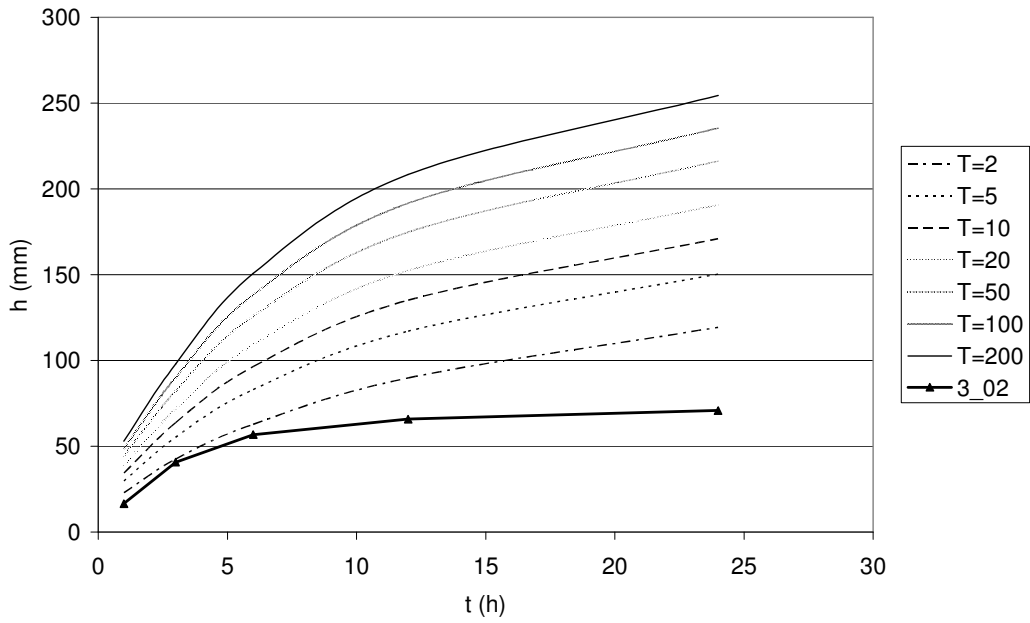


Fig. 5.4.a: Evento 3_02, terzo evento di piena nell' anno 2002, verificato il 23 ottobre.

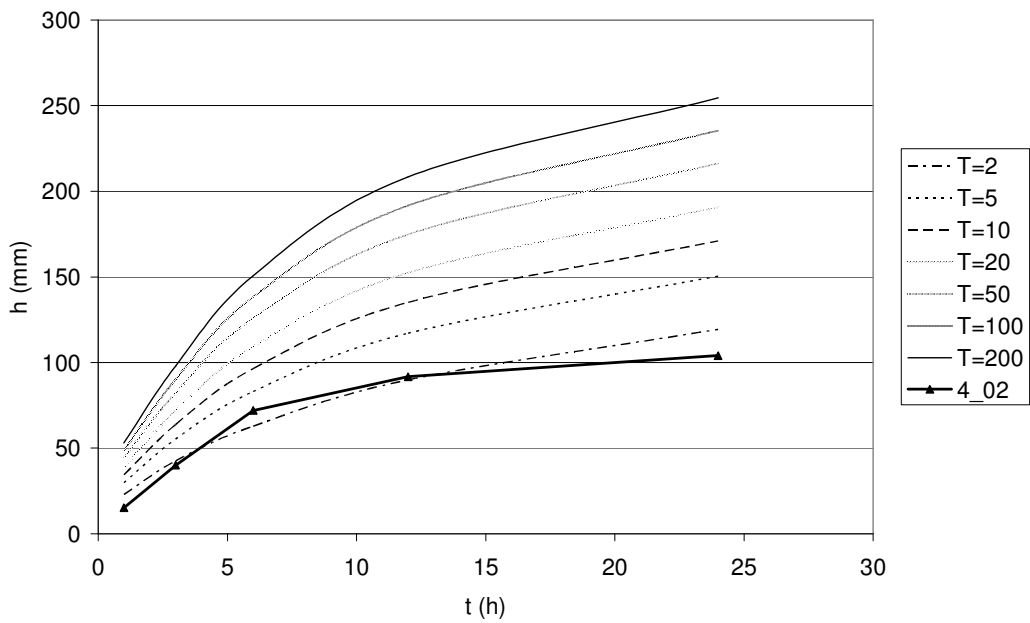


Fig. 5.4.b: Evento 4_02, quarto evento di piena nell' anno 2002, verificato il 17 novembre.

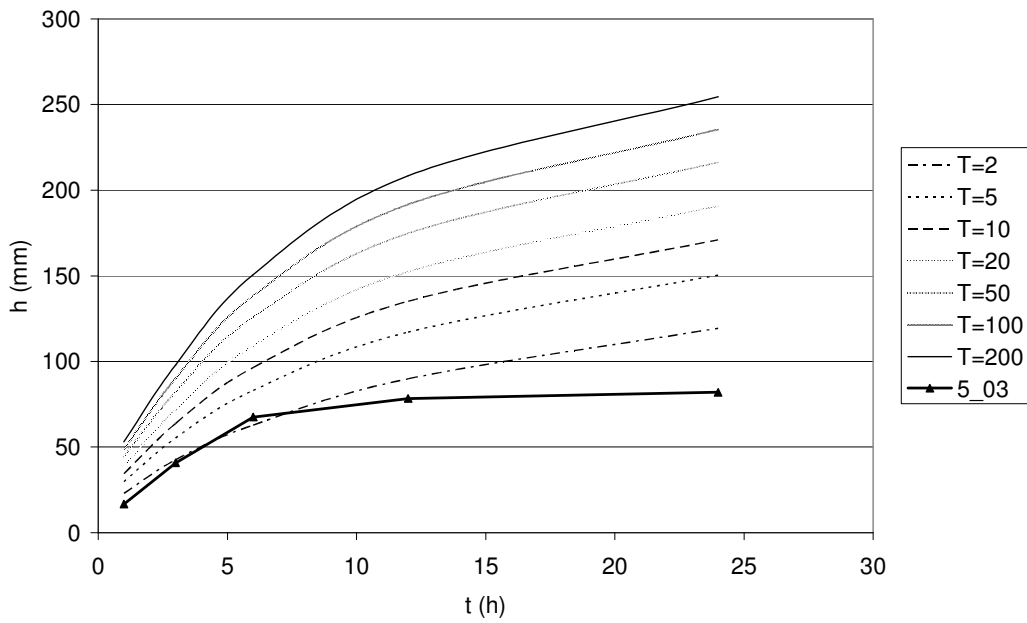


Fig. 5.4.c: Evento 5_03, quinto evento di piena nell' anno 2003, verificato il 27 novembre.

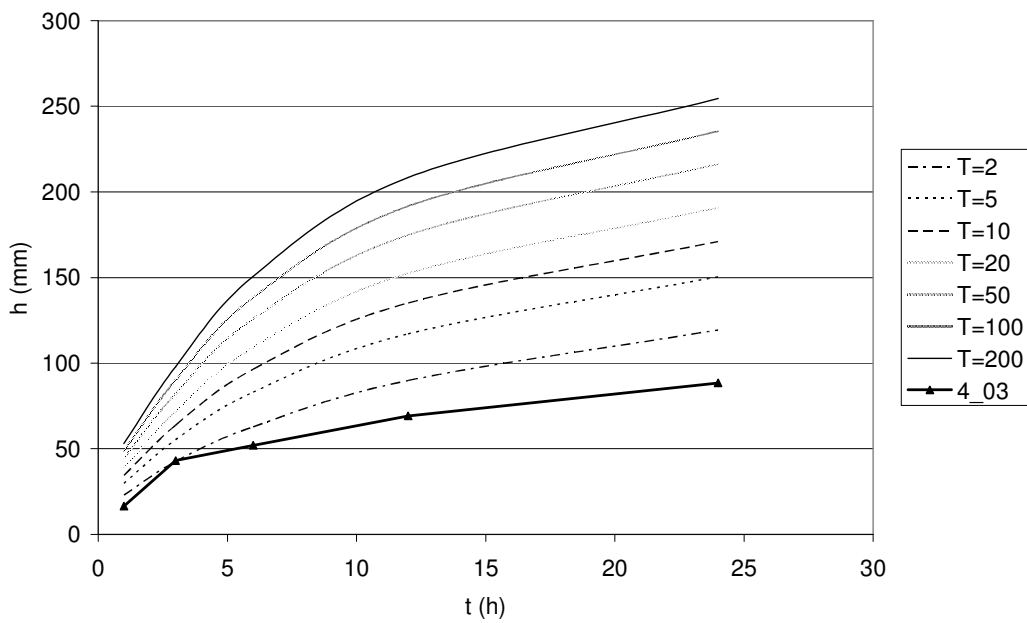


Fig. 5.4.d: Evento 4_03, quarto evento di piena nell' anno 2003, verificato il 8 novembre.

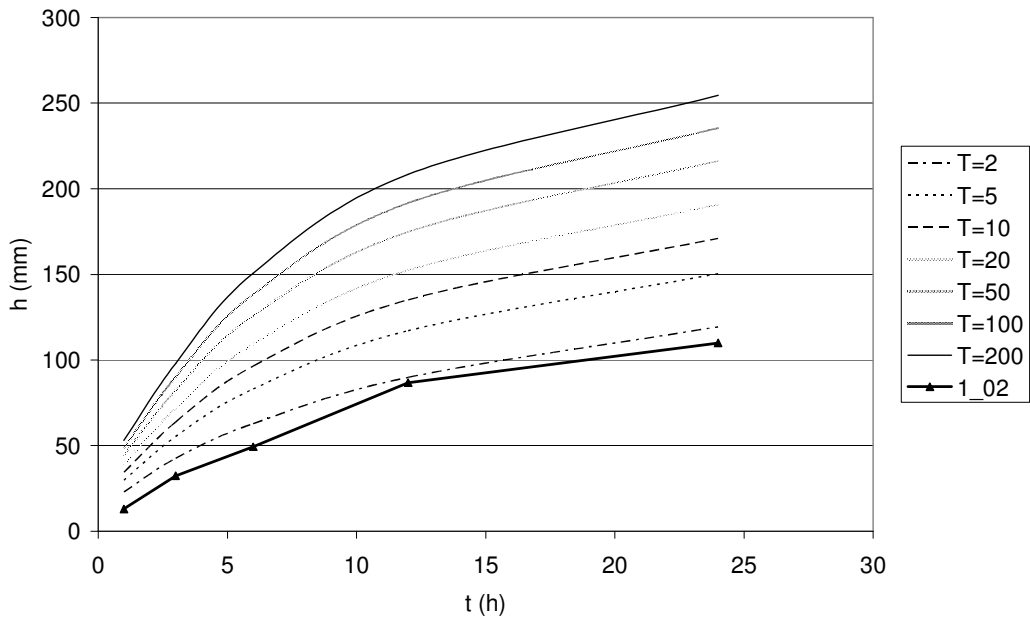


Fig. 5.4.e: Evento 1_01, primo evento di piena nell' anno 2001, verificato il 4 maggio.

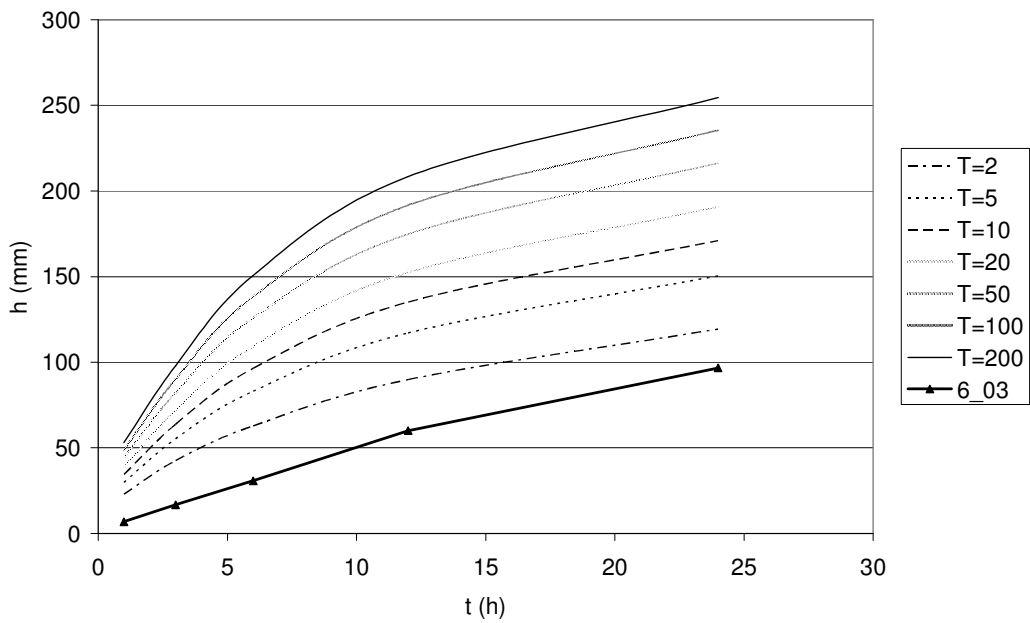


Fig. 5.4.f: Evento 6_03, sesto evento di piena nell' anno 2003, verificato il 29 dicembre.

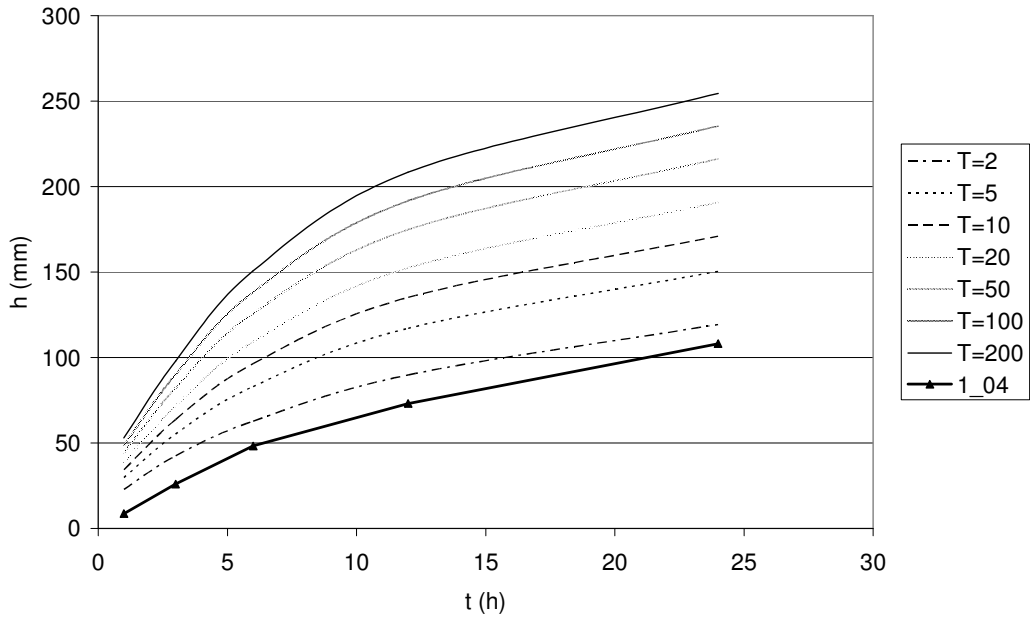


Fig. 5.4.g: Evento 1_04, primo evento di piena nell' anno 2004, verificato il 17 gennaio.

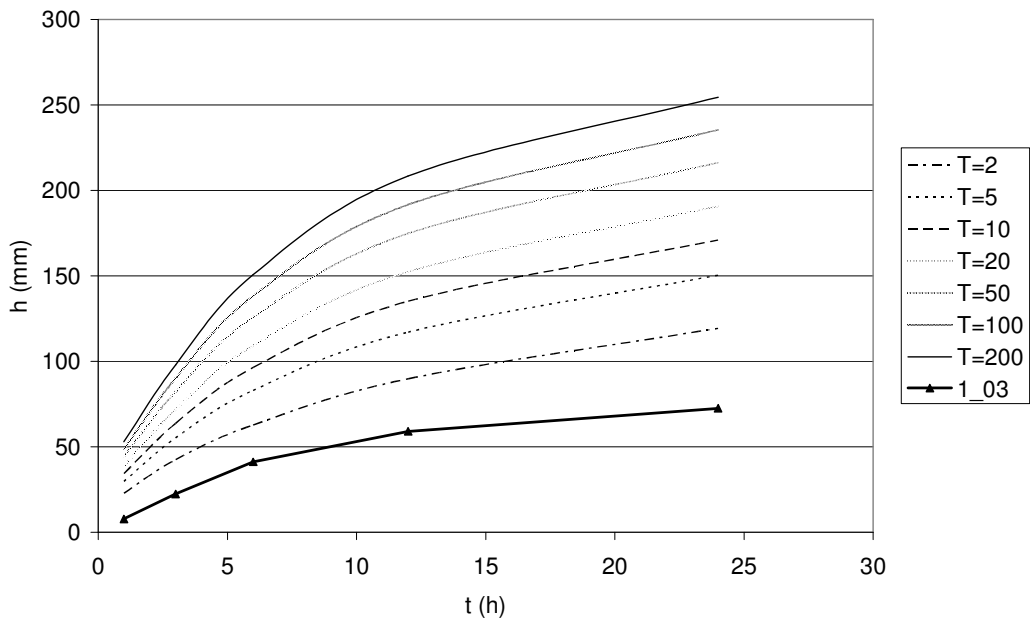


Fig. 5.4.h: Evento 1_03, primo evento di piena nell' anno 2003, verificato il 21 gennaio.

In Tabella 5.5 vengono riportati i risultati dei tempi di ritorno associati ai vari eventi sulla base del confronto della pioggia con durata pari al tempo di corrivazione con i quantili della stessa durata. Il valore è stato determinato mediante interpolazione lineare.

Evento	T(anni)
3_02	1.7
4_02	1.6
5_03	1.8
4_03	2.1
1_02	1.0
6_03	1.0
1_04	1.0
1_03	1.0

Tab. 5.5: Risultati del tempo di ritorno per i vari eventi di pioggia, ottenuti mediante confronto con le LSPP areali a scala di bacino.

5.2.3 Eventi per il Reno a Casalecchio Chiusa

Gli eventi in considerazione per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa verranno trattati separatamente. Le stazioni utilizzate per caratterizzare il bacino e gli eventi sono: Piastre, Maresca, Pracchia, Orsigna, Acquerino, Treppio, Lizzano in Belvedere, Porretta Terme, Diga di Suviana, Diga di Pavana, Diga del Brasimone, Cottede, Traversa, Riola di Vergato, Bombiana, Vergato, Monteacuto Vallese, Mozuno, Sasso Marconi, Montepastore e Bologna (San Luca); i pesi attribuiti ad ogni stazione sono quelli di Tabella 1.1.

Per alcuni eventi è stato necessario ricalcolare i pesi delle stazioni, applicando i poligoni di Thiessen ad un numero minore di stazioni, a causa di alcuni periodi di “fuori servizio” di alcune di esse. Il tempo di ritorno associato al particolare evento è quello della pioggia con durata di 12 ore, inoltre per gli eventi di Casalecchio Chiusa si è calcolato il tempo di ritorno per la pioggia di 12 ore immediatamente precedenti l’ evento, tale risultato è riportato nella rappresentazione grafica mediante un punto. I quantili utilizzati per la costruzione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala di bacino, utilizzati per il calcolo del tempo di ritorno mediante interpolazione lineare sono riportati in Tabella 5.6; inoltre vengono riportati anche i quantili per le durate di 1 e 5 giorni.

Quantili	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d
T=2	12.6	24.4	36.2	52.6	72.7	64.8	124.8
T=5	16.7	31.7	47.2	69.0	95.2	84.6	159.1
T=10	19.8	36.5	54.6	80.2	109.3	97.7	181.8
T=20	22.4	41.4	61.6	90.2	123.6	110.3	203.6
T=50	26.1	47.6	70.7	103.6	141.7	126.6	231.8
T=100	28.8	52.2	77.6	113.6	155.2	138.8	252.9
T=200	31.4	56.1	84.3	124.7	168.5	150.9	274.0

Tab. 5.6: Quantili orari e giornalieri per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

Nelle pagine seguenti vengono riportati gli eventi analizzati in ordine decrescente, le altezze di pioggia massime ottenute, la loro rappresentazione grafica rispetto la curva segnalatrice di possibilità pluviometrica a scala di bacino ed i pesi utilizzati se differenti da quelli di Tabella 1.1. I valori dei tempi di ritorno ottenuti sono riportati in Tabella 5.24 in fondo al paragrafo.

● **Evento 3_90**

Per l' evento 3_90 le stazioni disponibili sono 17, in Tabella 5.7 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.5.

Stazione	w_i
MARESCA	3%
ORSIGNA	6%
DIGA DI PAVANA	3%
PORRETTA TERME	4%
LIZZANO IN BELVEDERE	5%
BOMBIANA	5%
ACQUERINO	4%
TREPPIO	5%
DIGA DI SUVIANA	4%
RIOLA DI VERGATO	9%
VERGATO	11%
COTTEDE	6%
DIGA DEL BRASIMONE	7%
MONZUNO	11%
MONTEPASTORE	7%
BOLOGNA (San Luca)	6%
TRAVERSA	3%

Tab. 5.7: Pesi relativi alle stazioni utilizzate per caratterizzare l' evento 3_90.

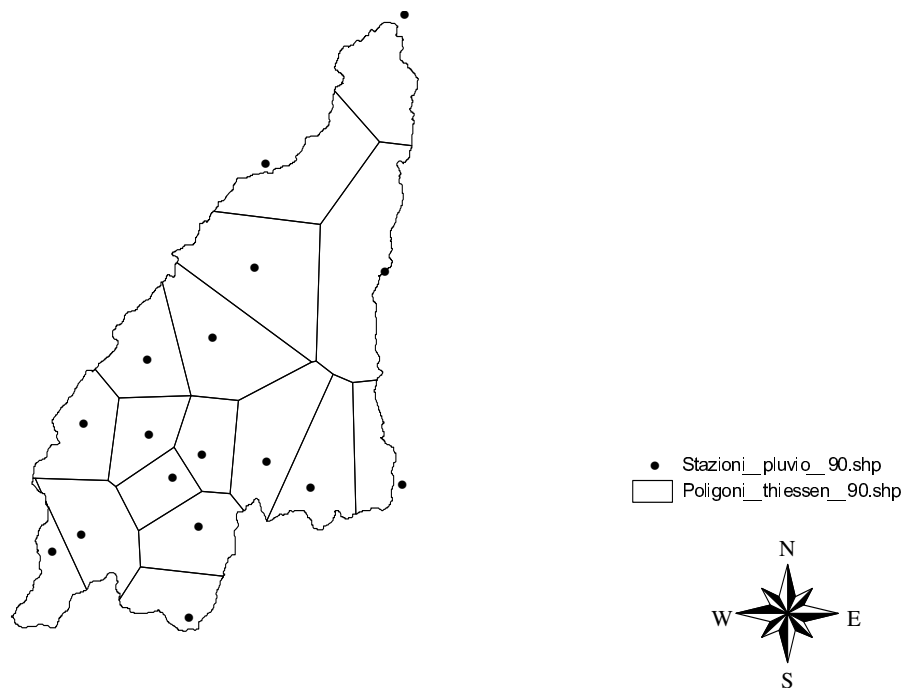


Fig. 5.5: Poligoni di Thiessen per le stazioni dell' evento 3_90.

Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.8 dove nell' ultima colonna con il simbolo del dollaro si rappresenta il valore di pioggia accaduto nelle 12 ore immediatamente precedenti il picco di piena, mentre in Figura 5.6 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	12.32	35.24	66.45	103.31	134.40	116.24	159.66	98.25

Tab. 5.8: Altezze di pioggia massime per l' evento 3_90.

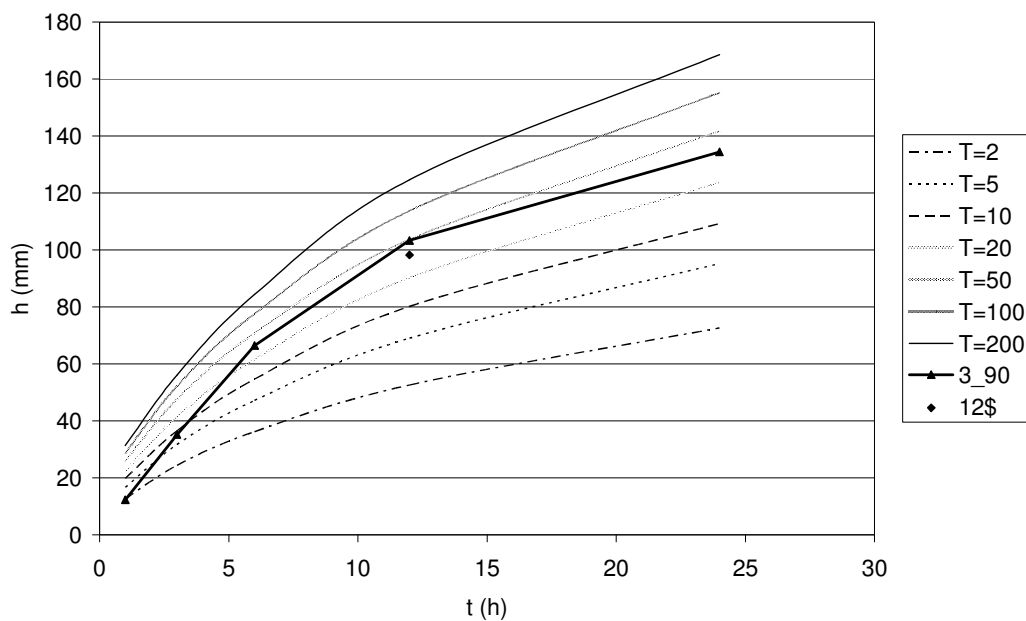


Fig. 5.6: Evento 3_90, terzo evento nell' anno 1990, verificato il 25 novembre.

● **Evento 5_94**

Per l' evento 5_94 i pesi validi sono quelli di Tabella 1.1 essendo tutte le stazioni attive, i valori ottenuti per le massime altezze di pioggia sono riportati in Tabella 5.9, mentre in Figura 5.7 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24	1d	5d	12\$
h(mm)	9.90	28.58	51.42	82.63	102.30	103.88	125.16	82.63

Tab. 5.9: Altezze di pioggia massime per l' evento 5_94.

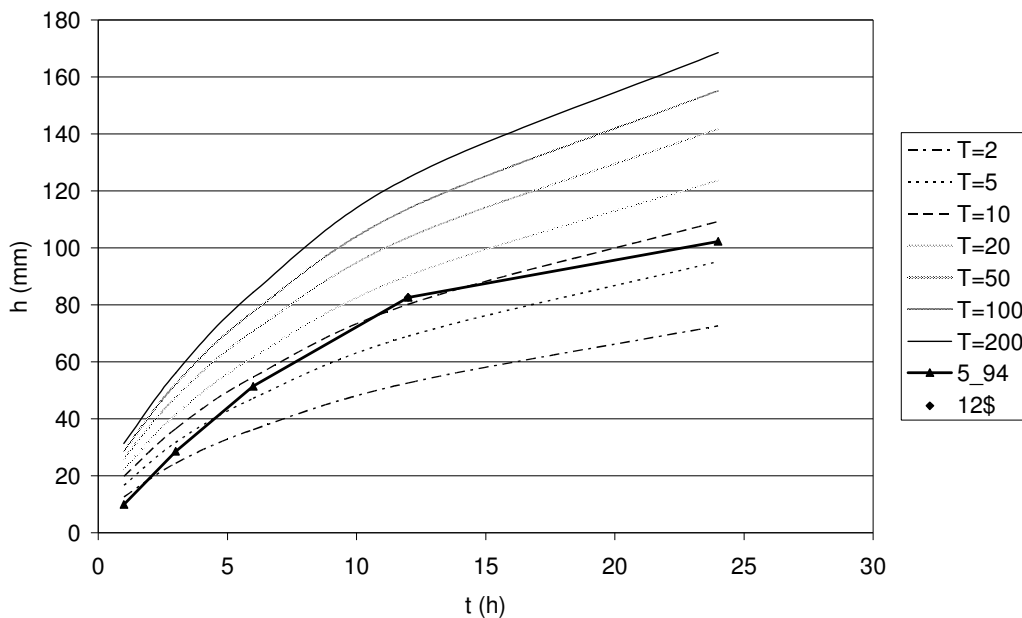


Fig. 5.7: Evento 5_94, quinto evento nell' anno 1994, verificato il 22 settembre.

● **Evento 2_00**

Per l' evento 3_90 le stazioni disponibili sono 17, in Tabella 5.10 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.8.

Stazione	w_i
PIASTRE	2%
PRACCHIA	4%
ORSIGNA	5%
DIGA DI PAVANA	3%
PORRETTA TERME	4%
LIZZANO IN BELVEDERE	5%
BOMBIANA	5%
ACQUERINO	3%
TREPPIO	5%
DIGA DI SUVIANA	4%
RIOLA DI VERGATO	15%
COTTEDE	6%
DIGA DEL BRASIMONE	6%
MONTEACUTO VALLESE	13%
MONZUNO	12%
BOLOGNA (San Luca)	7%
TRAVERSA	3%

Tab. 5.10: Pesì relativi alle stazioni utilizzate per caratterizzare l' evento 2_90.

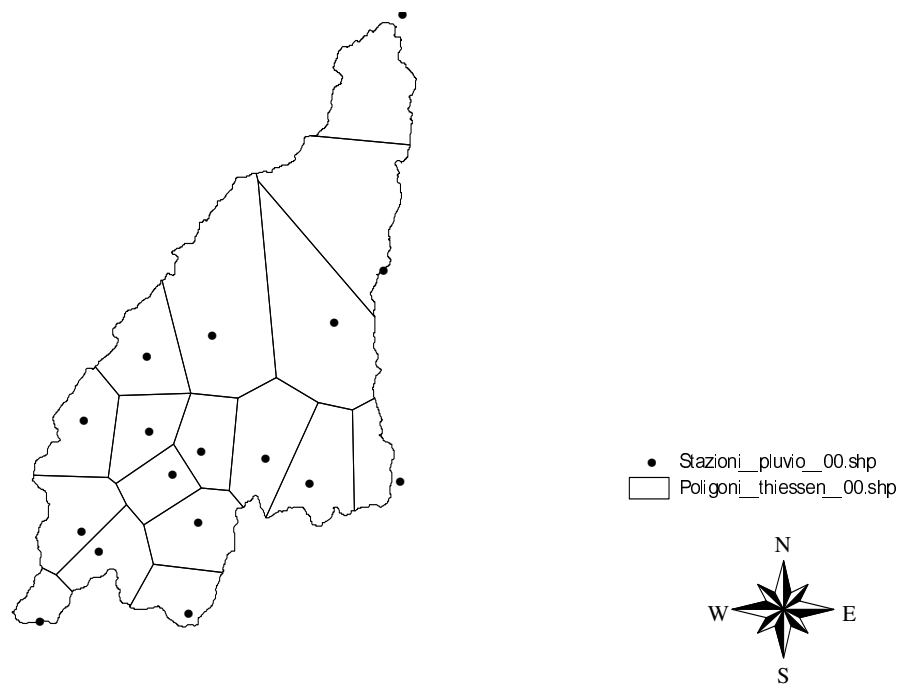


Fig. 5.8: Poligoni di Thiessen per le stazioni dell' evento 2_00.

Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.11 mentre in Figura 5.9 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l'evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	9.72	26.65	41.35	73.21	90.80	80.46	175.67	47.91

Tab. 5.11: Altezze di pioggia massime per l'evento 2_00.

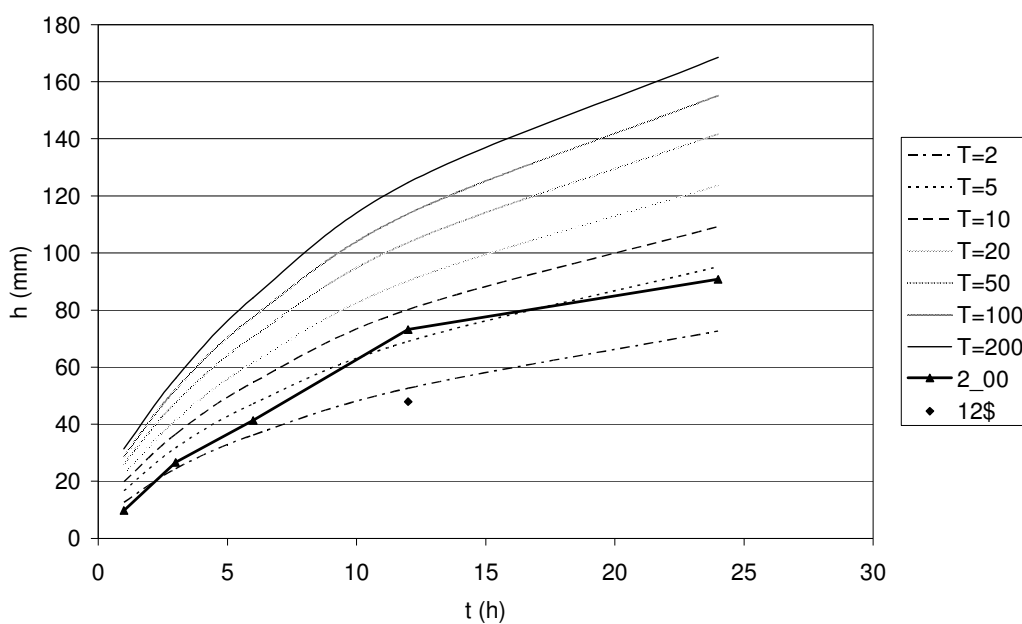


Fig. 5.9: Evento 2_00, secondo evento nell' anno 2000, verificato il 7 novembre.

● **Evento 5_92.**

Per l' evento 5_92 i pesi validi sono quelli di Tabella 1.1 essendo tutte le stazioni attive, i valori ottenuti per le massime altezze di pioggia sono riportati in Tabella 5.12, mentre in Figura 5.10 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	5.17	14.58	26.25	43.63	51.67	42.06	89.64	42.76

Tab. 5.12: Altezze di pioggia massime per l' evento 5_92.

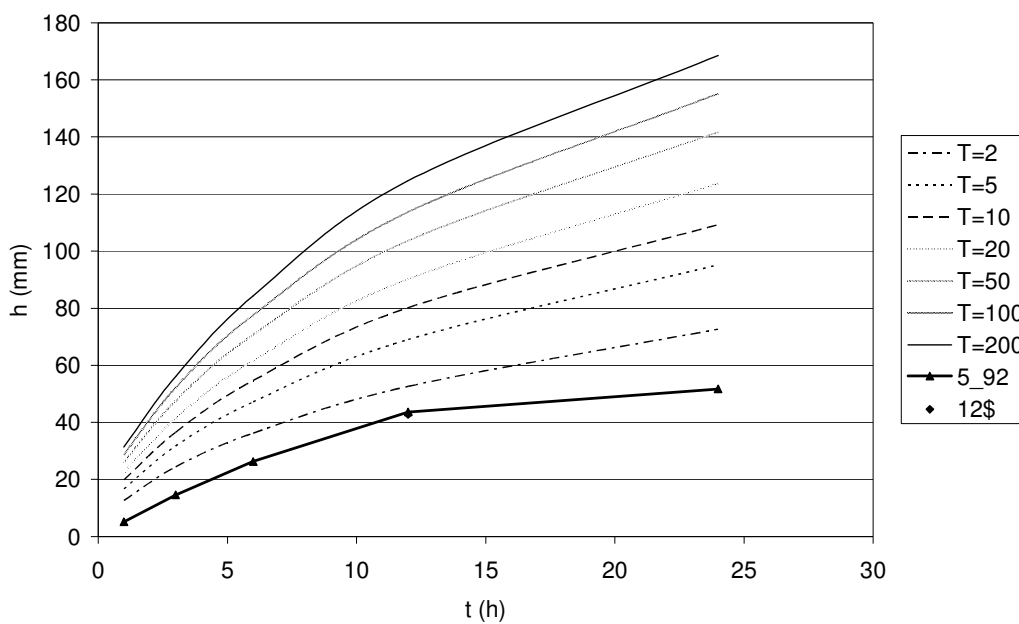


Fig. 5.10: Evento 5_92, quinto evento nell' anno 1992, verificato il 5 dicembre.

● **Evento 4_94**

Per l' evento 4_94 i pesi validi sono quelli di Tabella 1.1 essendo tutte le stazioni attive, i valori ottenuti per le massime altezze di pioggia sono riportati in Tabella 5.13, mentre in Figura 5.11 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	4.70	13.34	22.99	43.96	60.14	41.01	203.85	34.46

Tab. 5.13: Altezze di pioggia massime per l' evento 4_94.

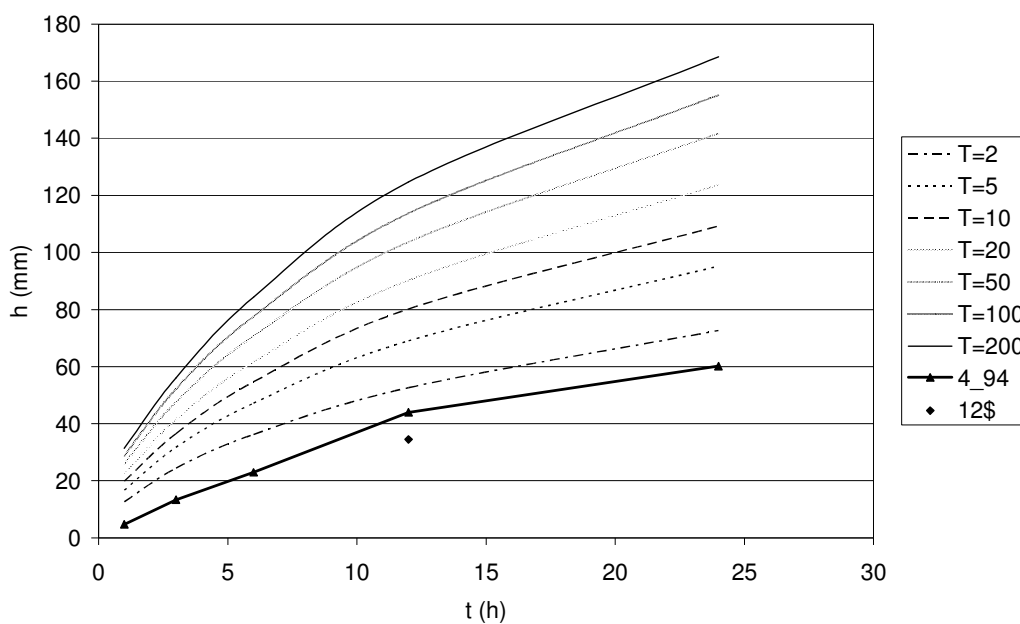


Fig. 5.11: Evento 4_94, quarto evento nell' anno 1994, verificato il 13 giugno.

● **Evento 4_90**

Per l' evento 4_90 le stazioni disponibili sono 17, in Tabella 5.7 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.5.

Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.14 mentre in Figura 5.12 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	6.05	17.35	32.84	54.11	67.95	67.65	79.13	46.79

Tab. 5.14: Altezze di pioggia massime per l' evento 4_90.

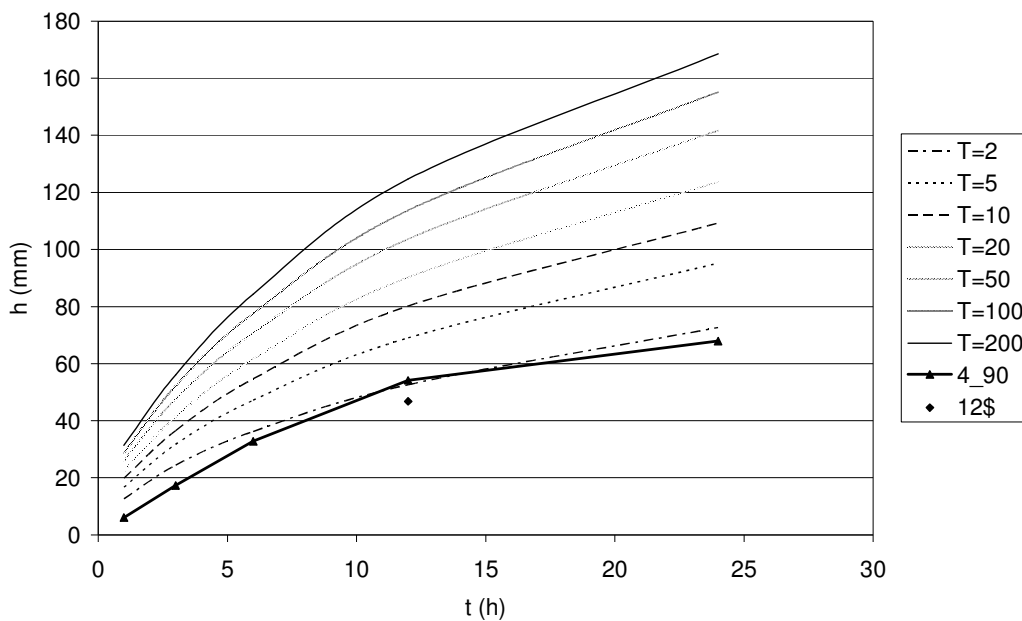


Fig. 5.12: Evento 4_90, quarto evento nell' anno 1990, verificato il 10 dicembre.

● **Evento 3_92**

Per l' evento 3_92 i pesi validi sono quelli di Tabella 1.1 essendo tutte le stazioni attive, i valori ottenuti per le massime altezze di pioggia sono riportati in Tabella 5.15, mentre in Figura 5.13 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	6.78	17.02	26.57	43.02	56.44	47.65	85.86	28.05

Tab. 5.15: Altezze di pioggia massime per l' evento 3_92.

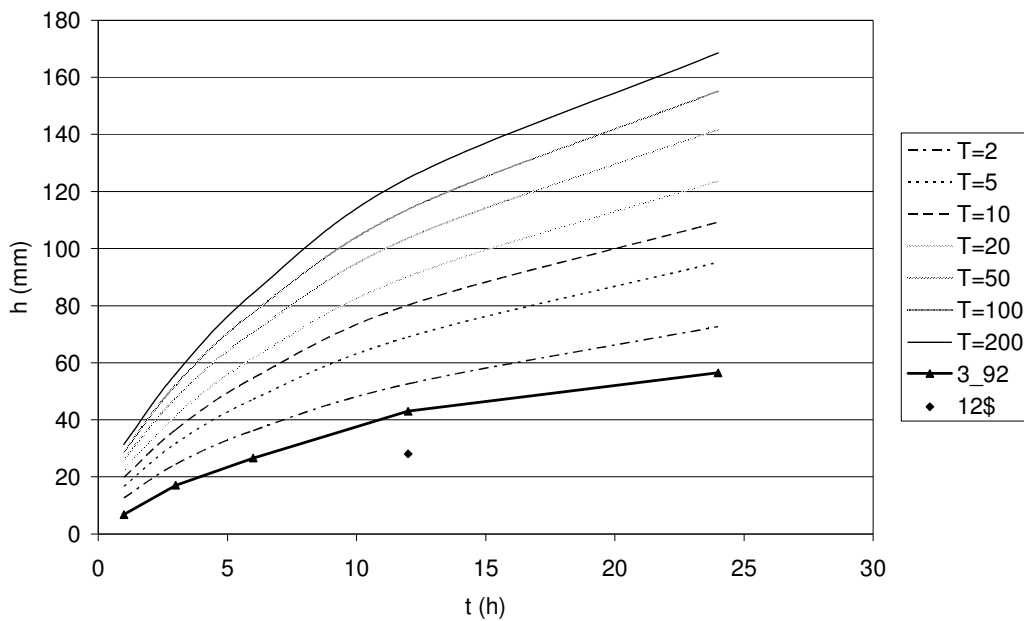


Fig. 5.13: Evento 3_92, terzo evento nell' anno 1992, verificato il 31 ottobre.

● **Evento 4_03**

Per l' evento 4_03 le stazioni disponibili sono 18, in Tabella 5.16 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.14.

Stazione	w_i
PIASTRE	1%
MARESCA	2%
PRACCHIA	4%
ORSIGNA	4%
PORRETTA TERME	7%
LIZZANO IN BELVEDERE	5%
BOMBIANA	5%
ACQUERINO	3%
TREPPIO	7%
RIOLA DI VERGATO	8%
VERGATO	12%
COTTEDE	6%
DIGA DEL BRASIMONE	8%
MONTEACUTO VALLESE	9%
MONZUNO	5%
SASSO MARCONI	10%
BOLOGNA (San Luca)	2%
TRAVERSA	3%

Tab. 5.16: Pesì relativi alle stazioni utilizzate per caratterizzare l' evento 4_03.

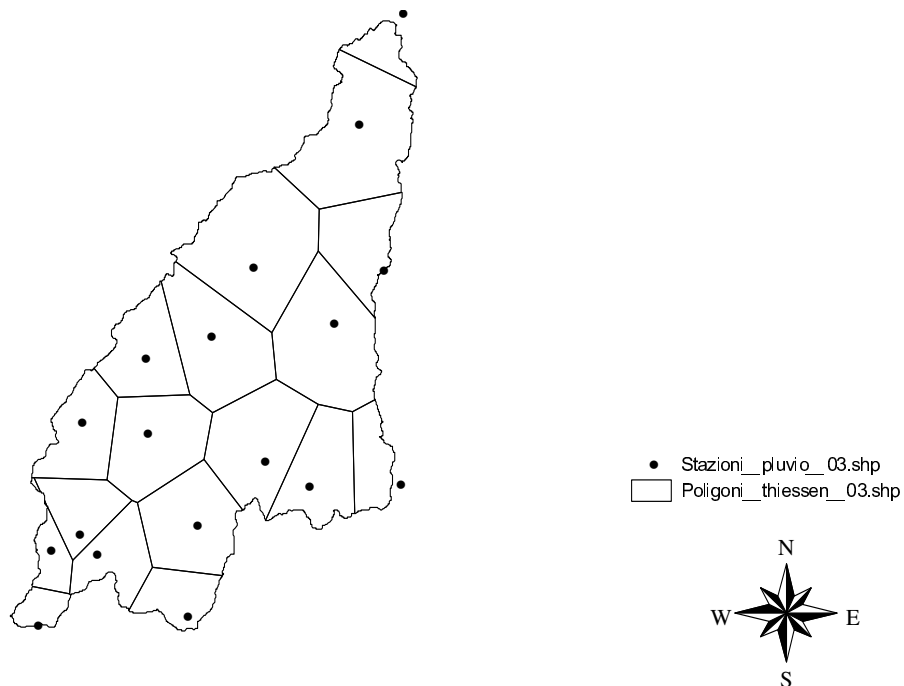


Fig. 5.14: Poligoni di Thiessen per le stazioni dell' evento 4_03.

Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.17 mentre in Figura 5.15 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l'evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	10.31	26.69	43.16	63.57	95.99	70.52	125.99	61.66

Tab. 5.17: Altezze di pioggia massime per l'evento 4_03.

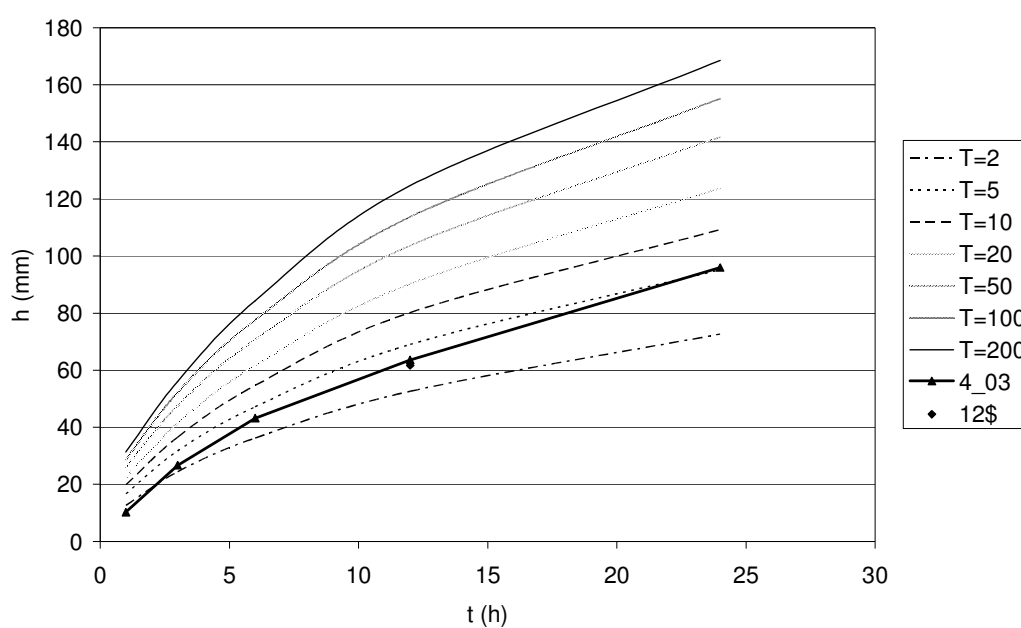


Fig. 5.15: Evento 4_03, quarto evento nell'anno 2003, verificato il giorno 8 novembre.

● **Evento 5_03**

Per l' evento 5_03 le stazioni disponibili sono 18, in Tabella 5.16 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.14. Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.18 mentre in Figura 5.16 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l' evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	5.90	16.99	30.52	42.44	47.35	48.44	127.35	37.64

Tab. 5.18: Altezze di pioggia massime per l' evento 4_03.

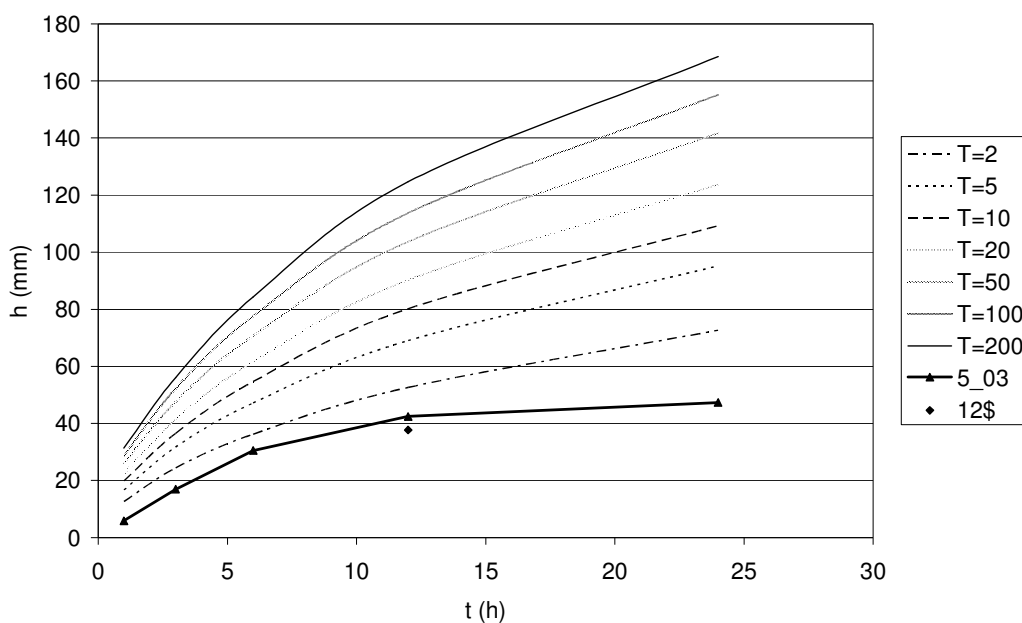


Fig. 5.16: Evento 5_03, quinto evento nell' anno 2003, verificato il 27 novembre.

● **Evento 4_04**

Per l' evento 4_03 le stazioni disponibili sono 19, in Tabella 5.19 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.17.

Stazione	w_i
PIASTRE	1%
MARESCA	2%
PRACCHIA	4%
ORSIGNA	3%
DIGA DI PAVANA	3%
PORRETTA TERME	4%
LIZZANO IN BELVEDERE	5%
BOMBIANA	5%
ACQUERINO	3%
TREPPIO	5%
DIGA DI SUVIANA	4%
RIOLA DI VERGATO	8%
VERGATO	13%
COTTEDE	6%
DIGA DEL BRASIMONE	6%
MONTEACUTO VALLESE	9%
MONZUNO	9%
BOLOGNA (San Luca)	7%
TRAVERSA	3%

Tab. 5.19: Pesi relativi alle stazioni utilizzate per caratterizzare l' evento 4_04.

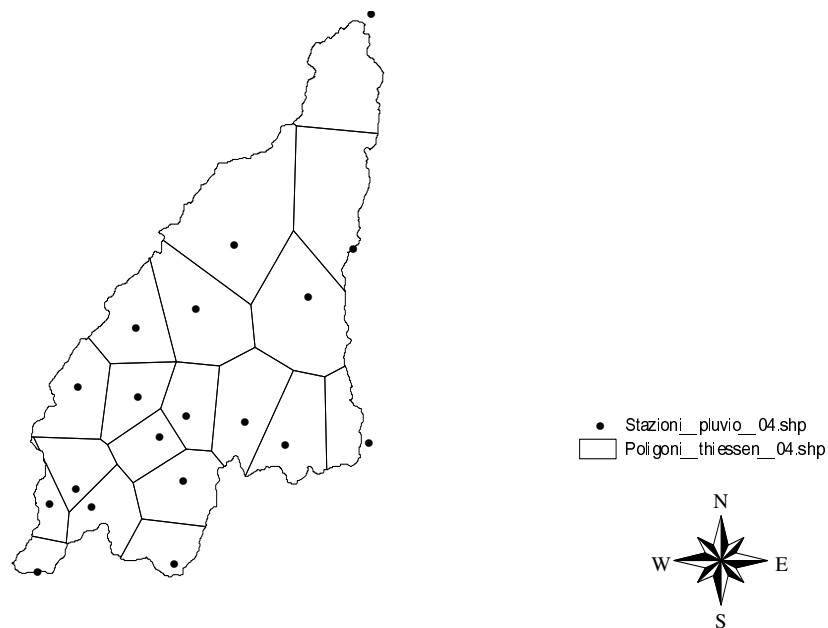


Fig. 5.17: Poligoni di Thiessen per le stazioni dell' evento 4_04.

Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.20 mentre in Figura 5.18 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l'evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	13.69	34.65	54.89	70.95	74.81	68.47	132.47	65.02

Tab. 5.20: Altezze di pioggia massime per l'evento 4_04.

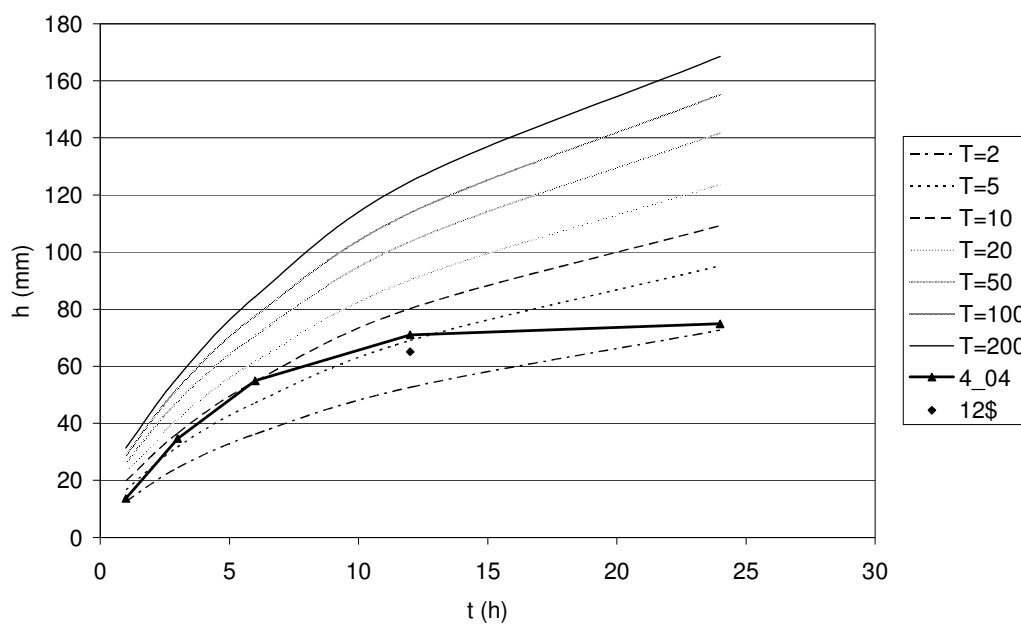


Fig. 5.18: Evento 4_04, quarto evento nell'anno 2004, verificato il 31 ottobre.

● **Evento 4_91**

Per l' evento 4_91 le stazioni disponibili sono 20, in Tabella 5.21 sono riportate le stazioni ed i rispettivi pesi calcolati con i poligoni di Thiessen riportati in Figura 5.19.

Stazione	w_i
PIASTRE	1%
MARESCA	2%
PRACCHIA	4%
ORSIGNA	3%
DIGA DI PAVANA	5%
PORRETTA TERME	4%
LIZZANO IN BELVEDERE	5%
BOMBIANA	5%
ACQUERINO	5%
DIGA DI SUVIANA	4%
RIOLA DI VERGATO	8%
VERGATO	9%
COTTEDE	6%
DIGA DEL BRASIMONE	6%
MONTEACUTO VALLESE	9%
MONZUNO	5%
SASSO MARCONI	9%
MONTEPASTORE	4%
BOLOGNA (San Luca)	2%
TRAVERSA	3%

Tab. 5.21: Pesi relativi alle stazioni utilizzate per caratterizzare l' evento 4_91.

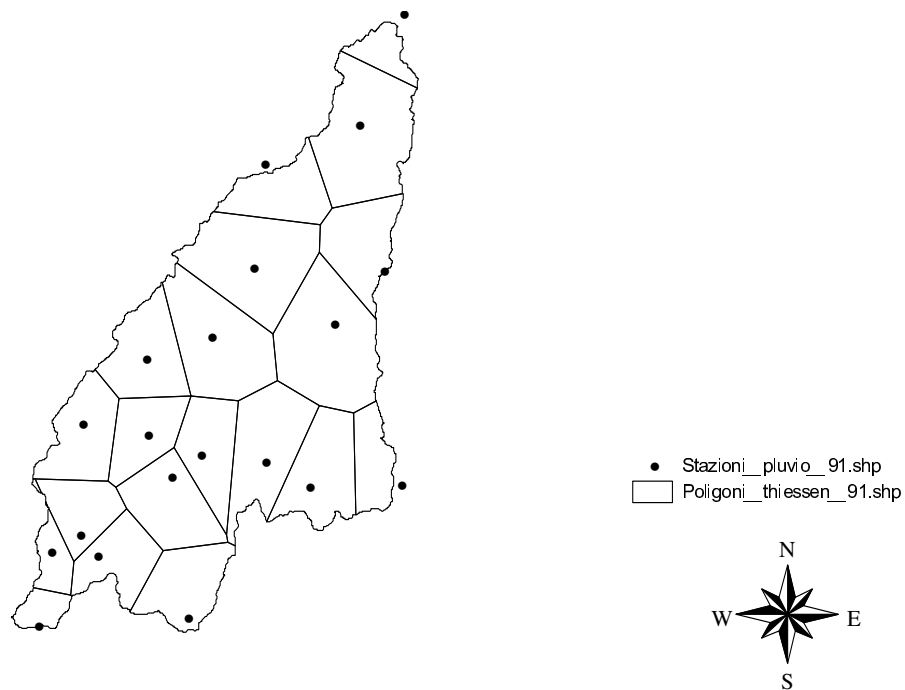


Fig. 5.19: Poligoni di Thiessen per le stazioni dell' evento 4_91.

Le altezze di pioggia massime ottenute sono riportate in Tabella 5.22 mentre in Figura 5.20 è riportato il confronto delle altezze di pioggia massime per l'evento con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a scala areale.

d	1h	3h	6h	12h	24h	1d	5d	12\$
h (mm)	10.91	30.27	52.64	91.19	97.96	97.00	118.84	36.99

Tab. 5.22: Altezze di pioggia massime per l'evento 4_91.

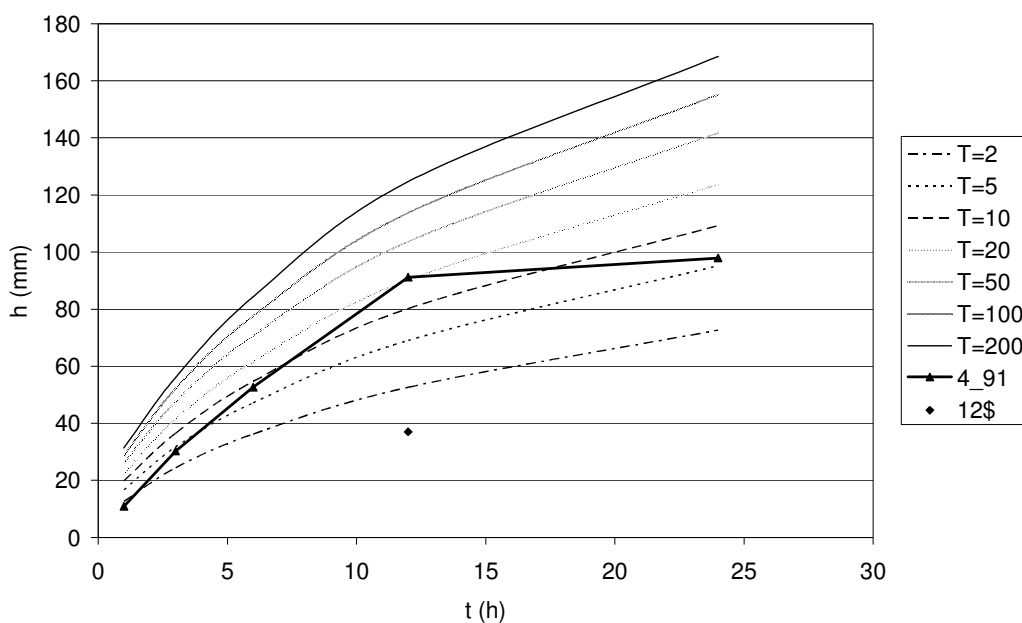


Fig. 5.20: Evento 4_91, quarto evento nell'anno 1991, verificato il 12 ottobre.

● Eventi Storici

Per gli eventi storici del 4 novembre 1966 e del 5 febbraio 1951 per i quali non erano disponibili i dati di precipitazione oraria, è stato possibile calcolare i valori di pioggia con riferimento alle durate di 1 e 5 giorni, i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 5.23.

Evento	1d	5d
04-nov-66	158.33	174.85
05-feb-51	79.88	148.09

Tab. 5.23: Altezze di pioggia con durata 1 e 5 giorni per gli eventi storici.

In Tabella 5.24 vengono riportati i risultati dei tempi di ritorno associati ai vari eventi sulla base del confronto della pioggia con durata pari al tempo di corrvazione con i quantili della stessa durata. Il valore è stato determinato mediante interpolazione lineare.

Evento	T (anni)
3_90	50.0
5_94	12.5
2_00	6.9
5_92	1.0
4_94	1.0
4_90	2.3
3_92	1.0
4_03	4.0
5_03	1.0
4_04	5.0
4_91	22.2

Tab. 5.24: Risultati del tempo di ritorno per i vari eventi di pioggia, ottenuti mediante confronto con le LSPP areali a scala di bacino.

5.3 Equazione RDDFE

L' equazione RDDFE (Regional Depth-Duration-Frequency Equations) (3) si basa su analisi di tipo regionale, i parametri utilizzati sono basati su osservazioni che appartengono alla zona omogenea del compartimento di Bologna¹; quindi il bacino del Reno risulta essere adeguatamente compreso in tale area.

$$h(T, t) = 0.138t^{0.624}h(10_{yr}, 24_{hr}) \left[f \ln\left(\frac{T}{10}\right) + 1 \right] + (24 - t)^{0.770} [0.474 \ln(T) + 0.951]$$

(3)

$$f = 0.602 - 0.055 \ln(MAP) \quad (4)$$

Dove:

- T = tempo di ritorno dell' evento, rappresenta l' incognita che intendo cercare;
- t = durata dell' evento per il quale si vuole calcolare il tempo di ritorno;
- $h(T, t)$ = rappresenta l' altezza di pioggia puntuale di assegnata durata e tempo di ritorno;
- $h(10_{yr}, 24_{hr})$ = l' altezza di pioggia puntuale di durata pari a 24 ore e tempo di ritorno pari a 10 anni;
- MAP = media delle precipitazioni annuali , nel caso in considerazione si è cercata prima la media per ogni stazione e poi si è fatta la media pesata, utilizzando i pesi di Tab. 1.1 per il bacino con chiusura a Casalecchio Chiusa e Tab. 1.2 per il bacino con chiusura a Pracchia, tra tutte in modo da ottenere un valore valido su tutto il bacino.[5]

Il procedimento adottato è quello di andare a ricercare il valore del tempo di ritorno T che verifica l' equazione, partendo però da una serie di valori di pioggia areali che sono stati opportunamente trasformati in puntuali (5), (6) dividendoli, anziché moltiplicarli, per il rispettivo fattore di ragguaglio.

$$h(T, t) = \frac{h_a(T, t)}{ARF(t)} \quad (5)$$

¹ Cfr. Il metodo della portata indice, par. 2.2.1.

$$h(10_{yr}, 24_{hr}) = \frac{h_a(10_{yr}, 24_{hr})}{ARF(t)} \quad (6)$$

Quindi verranno scelte delle altezze di pioggia pari al tempo di corrivazione del bacino che saranno rappresentative dell' evento, il tempo di ritorno sarà l' incognita ricercata e il *MAP* e $h(10_{yr}, 24_{hr})$ caratterizzeranno il bacino.

5.3.1 Eventi per il Reno a Pracchia

I valori dei parametri utilizzati per il calcolo dei tempi di ritorno di interesse per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia sono riportati in Tabella 5.25.

t (h)	3
MAP (mm)	2010.06
ARF(3h)	0.842412
ARF(12h)	0.940373
$h_a(10_{yr}, 24_{hr})$ (mm)	170.95
$h(10_{yr}, 24_{hr})$ (mm)	181.79

Tab. 5.25: Parametri del bacino del Reno con chiusura a Pracchia.

In Tabella 5.26 sono riportati i valori di altezza di pioggia areali e puntuali dei vari eventi ed i risultati dei tempi di ritorno ottenuti, imponendo il rispetto dell' equazione (1).

Evento	$h_a(T, t)$	$h(T, t)$	T (anni)
3_02	40.69	48.30	1.9
4_02	39.97	47.45	1.8
5_03	40.75	48.37	1.9
4_03	43.03	51.08	2.4
1_02	32.36	38.41	1
6_03	16.75	19.88	1
1_04	26.03	30.89	1
1_03	22.45	26.69	1

Tab. 5.26: Valori del tempo di ritorno per gli eventi di interesse per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia, ottenuti per i vari eventi mediante l' equazione RDDFE.

5.3.2 Eventi per il Reno a Casalecchio Chiusa

I valori dei parametri utilizzati per il calcolo dei tempi di ritorno di interesse per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia sono riportati in Tabella 5.27.

t (h)	12
MAP (mm)	1300.88
ARF(12h)	0.7874
ARF(12h)	0.8576
$h_a(10_{yr}, 24_{hr})$ (mm)	109.27
$h(10_{yr}, 24_{hr})$ (mm)	127.41

Tab. 5.27: Parametri del bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa.

In Tabella 5.28 sono riportati i valori di altezza di pioggia areali e puntuali dei vari eventi ed i risultati dei tempi di ritorno ottenuti, imponendo il rispetto dell' equazione (1).

Evento	$h_a(T, t)$	$h(T, t)$	T (anni)
3_90	103.31	131.20	54.1
5_94	82.64	104.94	14.9
2_00	73.21	92.97	8.3
5_92	43.64	55.42	1.3
4_94	43.97	55.84	1.3
4_90	54.11	68.72	2.5
3_92	43.02	54.64	1.3
4_03	63.57	80.73	4.6
5_03	42.44	53.90	1.2
4_04	70.95	90.11	7.2
4_91	91.19	115.80	25.4

Tab. 5.28: Valori del tempo di ritorno per gli eventi di interesse per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa, ottenuti per i vari eventi mediante l' equazione RDDFE.

Confrontando la Tabella 5.26 con la 5.5 per gli eventi del bacino del Reno a Pracchia e la Tabella 5.28 con la 5.24 per gli eventi del bacino del Reno a Casalecchio Chiusa, è possibile osservare la buona congruenza tra i due set di T stimati con i due metodi proposti.

Cap. 6 ANALISI DI FREQUENZA DEGLI ESTREMI PLUVIOMETRICI E IDROMETRICI

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti, attraverso le indagini descritte nei capitoli precedenti, per il bacino del Reno a Casalecchio Chiusa e per il Reno a Pracchia. L'insieme delle informazioni prodotte vengono raccolte e anziché essere esposte singolarmente come è stato fatto di volta in volta, sono messe a confronto, studiando il legame tra la frequenza probabilistica degli estremi pluviometrici e idrometrici. L'analisi sarà volta alla ricerca di eventuali trend di dati che confermano o smentiscono la possibilità di legare in maniera univoca la precipitazione alla portata generata

6.1 Applicazione: Reno a Pracchia

In questo paragrafo, allo stesso modo del caso del Reno a Casalecchio, vengono raccolte e confrontate le informazioni prodotte per il bacino del Reno con chiusura a Pracchia. Come sarà illustrato nelle prossime pagine, gli elementi a disposizione saranno inferiori, infatti come già detto data la ridotta disponibilità di dati gli eventi analizzati non sono particolarmente importanti per le quantità in gioco, ciò nonostante sarà possibile notare qualche tendenza. Anche in questo caso sono state utilizzate diverse tecniche per il calcolo della frequenza degli estremi pluviometrici e idrometrici, in Figura 6.1 è riportato uno schema riassuntivo, i risultati ottenuti sono sempre molto simili, come è possibile vedere nel grafico di Figura 6.2.

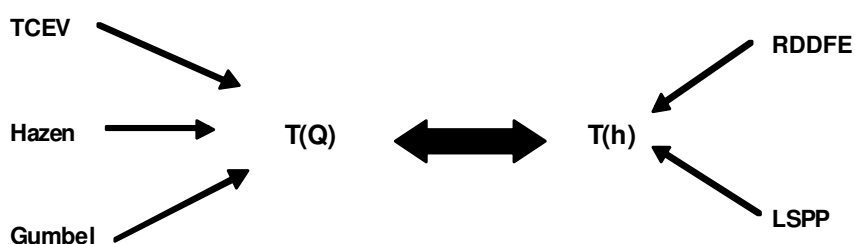


Fig. 6.1: Metodi utilizzati per lo studio degli estremi pluviometrici e idrometrici.

In Tabella 6.1 sono riportati i risultati dei tempi di ritorno ottenuti per le precipitazioni e per le portate applicando i vari metodi.

Evento		T(Q)			T(h)	
		TCEV	Hazen	Gumbel	LSPP	RDDFE
23-ott	3_02	8.6	6.6	10.5	1.7	2.0
17-nov	4_02	2.0	2.1	1.8	1.6	1.9
27-nov	5_03	1.4	1.4	1.3	1.8	2.0
8-nov	4_03	1.4	1.3	1.3	2.1	2.4
4-mag	1_02	1.3	1.2	1.3	1.0	1.0
29-dic	6_03	1.2	1.1	1.2	1.0	1.0
17-gen	1_04	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0
21-gen	1_03	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0

Tab. 6.1: Risultati del tempo di ritorno per gli eventi di interesse nel caso del bacino del Reno a Pracchia.

La Figura 6.2 può dare un' idea della similitudine dei risultati prodotti, tramite il confronto incrociato tra i risultati ottenuti con la distribuzione TCEV e Hazen per le portate e con il metodo del confronto con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica e il metodo dell' equazione RDDFE per le piogge.

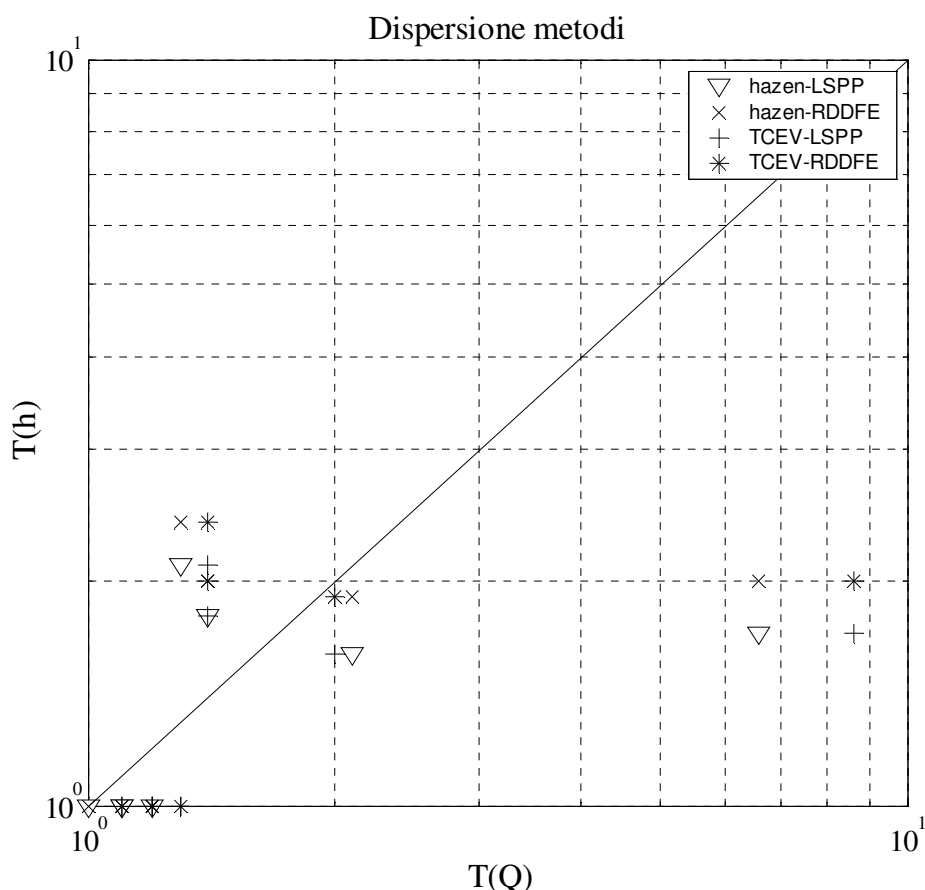


Fig. 6.2: Dispersione dei punti prodotta dai vari metodi utilizzati.

Nel caso del Reno a Pracchia si è scelto di utilizzare, per il confronto, i risultati prodotti con la distribuzione TCEV per la portata e con il metodo del confronto con le LSPP areali a scala di bacino per la precipitazione. Nei grafici che verranno illustrati nelle prossime pagine, come per il caso di Casalecchio Chiusa, i valori del tempo di ritorno di portata e di pioggia verranno messi a confronto con il valore del tempo di ritorno della pioggia nel giorno e nei cinque giorni precedenti l' evento di piena.

In Tabella 6.2 sono riportati i risultati che generano i grafici di Figura 6.3 e 6.4, infatti la penultima colonna contiene i valori del tempo di ritorno per la durata di un giorno antecedente all' evento di piena e l' ultima colonna contiene i valori del tempo di ritorno per la pioggia dei cinque giorni antecedenti l' evento di piena.

Evento	T(Q)	T(h)	T(h(1d))	T(h(5d))
3_02	8.6	1.7	1.0	1.0
4_02	2.0	1.6	1.0	1.0
5_03	1.4	1.8	1.7	2.6
4_03	1.4	2.1	1.4	1.0
1_02	1.3	1.0	3.4	1.0
6_03	1.2	1.0	1.0	1.0
1_04	1.2	1.0	1.0	1.0
1_03	1.1	1.0	1.0	1.0

Tab. 6.2: Valori del tempo di ritorno degli eventi di piena, delle piogge che le hanno generate e della pioggia nel giorno e nei cinque giorni precedenti gli eventi di piena, per il Reno a Pracchia.

Anche per il caso del Reno a Pracchia i grafici confermano come tutti gli eventi cadano sotto la bisettrice o in prossimità di essa, questo conferma che le piogge con determinato tempo di ritorno generano eventi di piena con un tempo di ritorno circa della stessa grandezza o superiore. I due eventi che cadono al di sopra della bisettrice, come è possibile vedere anche dalla Tabella 6.2, hanno tempi di ritorno di portata e di precipitazione praticamente uguali, il grafico può trarre in inganno evidenziando una certa lontananza dalla bisettrice, ma la distanza è accentuata dalla scala logaritmica degli assi dei grafici. Dai grafici di Figura 6.3 e 6.4 è possibile vedere come per Pracchia, il legame con la pioggia del giorno e dei cinque giorni precedenti l'evento di piena è meno forte che per Casalecchio; questo può essere causato dalle caratteristiche differenti dei bacini, soprattutto la dimensione, ma può anche essere dovuto al fatto che per Pracchia non sono stati analizzati eventi particolarmente importanti e che quindi non hanno consentito di individuare in maniera netta un legame fra le varie grandezze in gioco.

In Figura 6.5 viene confrontato il tempo di ritorno della pioggia di un giorno antecedente l'evento di piena con il tempo di ritorno della piena, mentre in Figura 6.6 viene confrontato il tempo di ritorno della pioggia nei cinque giorni antecedenti la piena con il tempo di ritorno della portata.

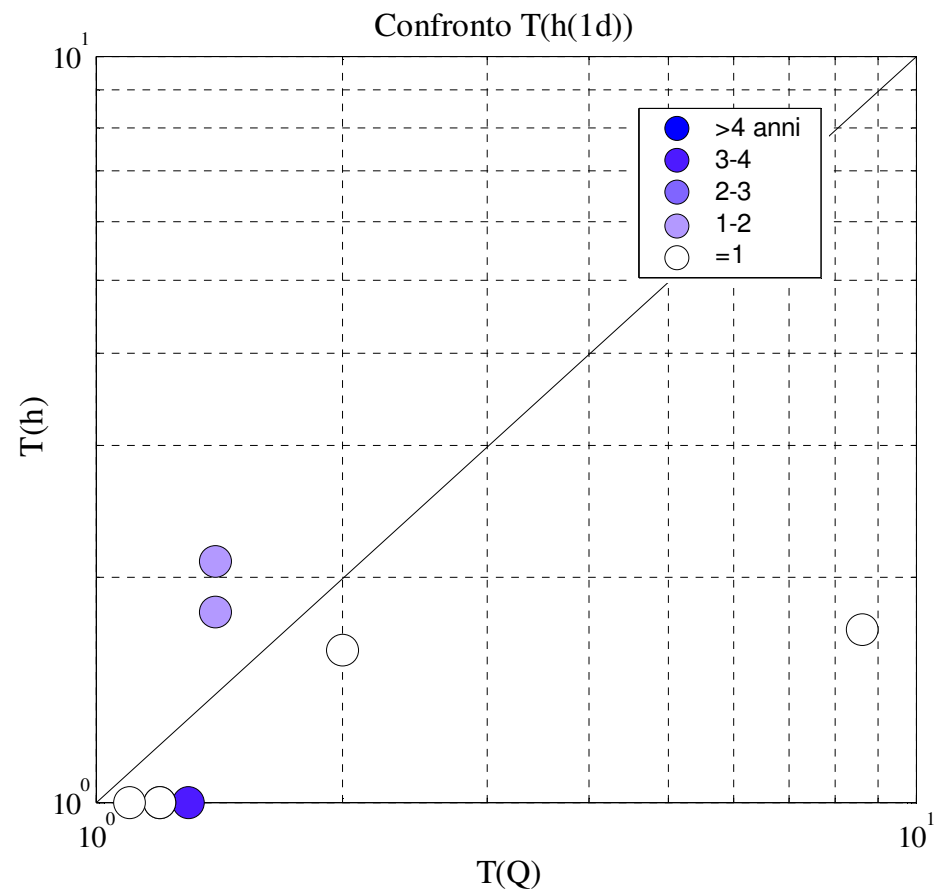
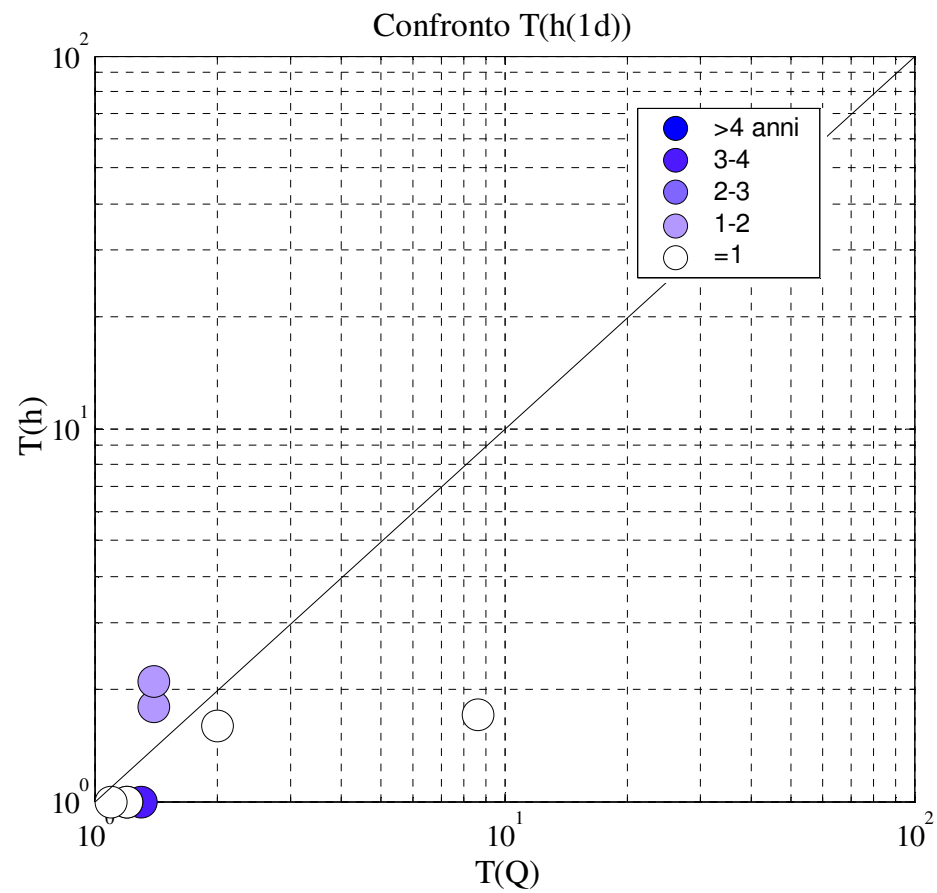


Fig. 6.3: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate, delle precipitazioni che le hanno generate e della pioggia nel giorno precedente l'evento di piena nel grafico di sinistra gli assi arrivano fino 100 anni di tempo di ritorno, nel grafico di destra per poter meglio vedere gli eventi minori si sono ridotti gli assi ad un tempo di ritorno di 10 anni.

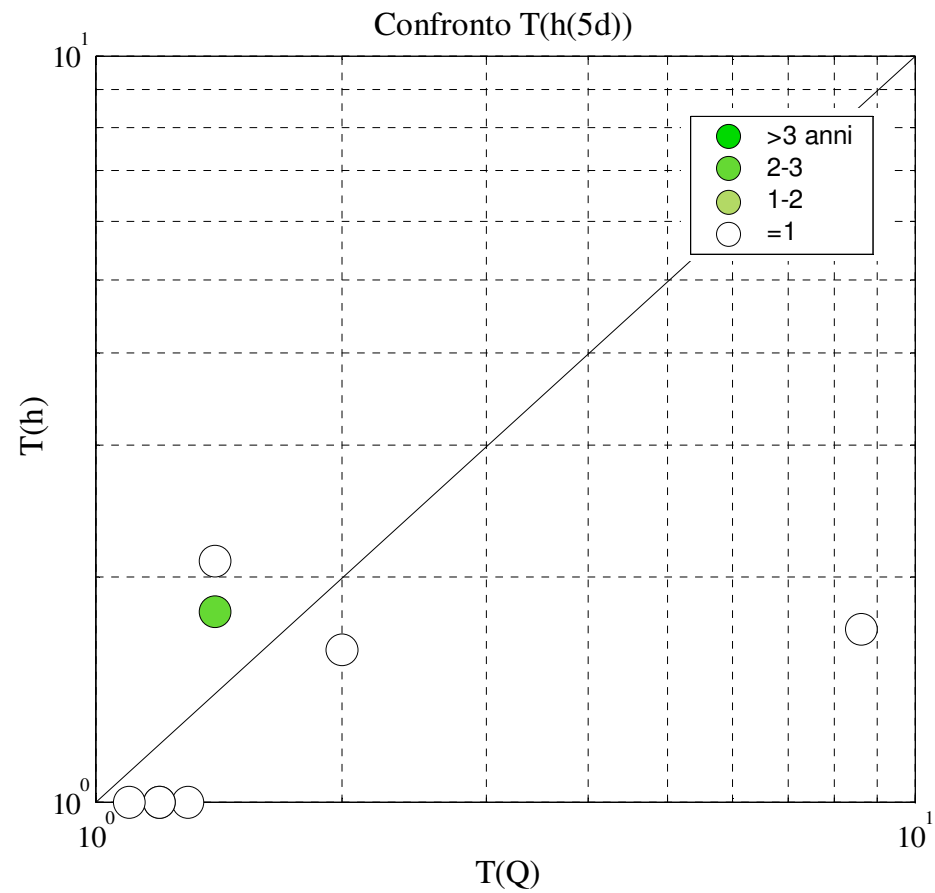
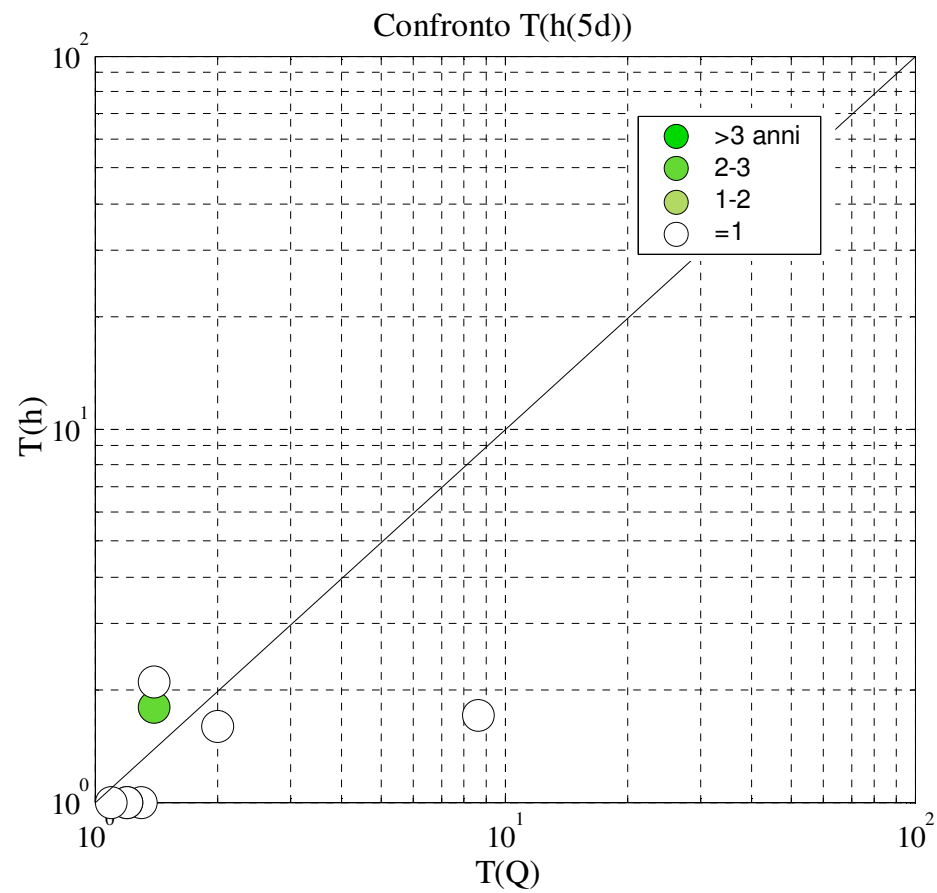


Fig. 6.4: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate, delle precipitazioni che le hanno generate e della pioggia nei cinque giorni precedente l' evento di piena nel grafico di sinistra gli assi arrivano fino 100 anni di tempo di ritorno, nel grafico di destra per poter meglio vedere gli eventi minori si sono ridotti gli assi ad un tempo di ritorno di 10 anni.

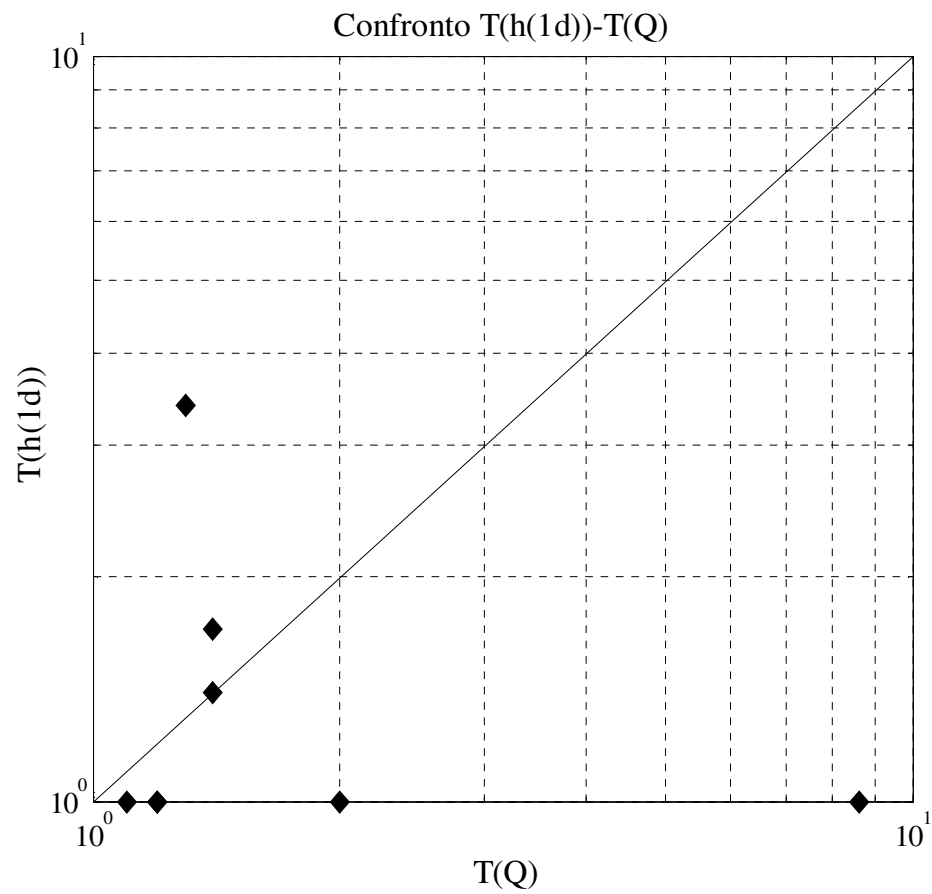


Fig. 6.5: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate e del tempo di ritorno della pioggia nel giorno precedente l'evento di piena.

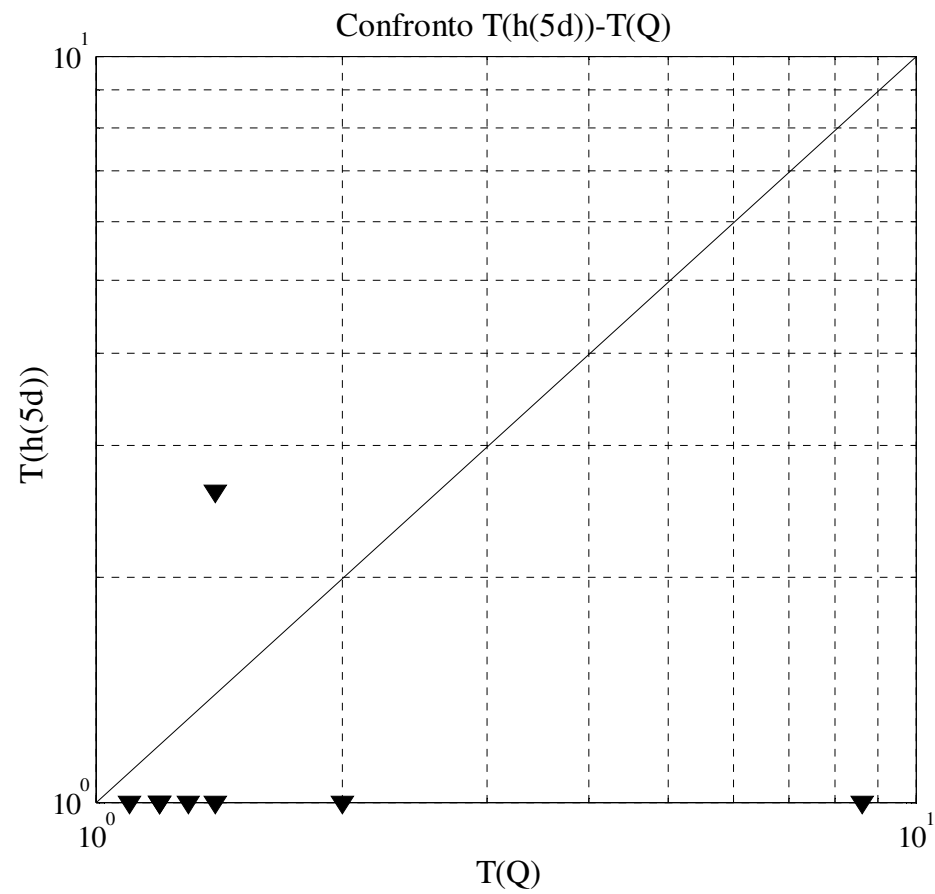


Fig. 6.6: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate e del tempo di ritorno della pioggia nei cinque giorni precedenti l'evento di piena.

6.1 Applicazione: Reno a Casalecchio Chiusa

I metodi utilizzati per il calcolo del tempo di ritorno, sia per le piogge che per le portate, di ogni evento sono stati diversi, in Figura 6.7 è riportato uno schema riassuntivo delle tecniche utilizzate queste hanno prodotto dei risultati sempre confrontabili e nella maggior parte dei casi molto vicini tra loro.

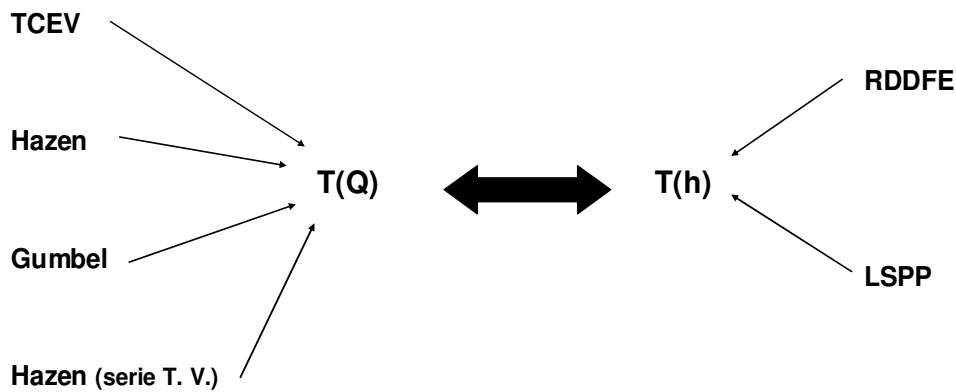


Fig. 6.7: Metodi utilizzati per lo studio degli estremi pluviometrici e idrometrici.

Per il caso del bacino del Reno a Casalecchio inoltre sarà possibile fare alcune considerazioni sulla base dei risultati ottenuti per il coefficiente di afflusso nei tre casi in cui è stato calcolato. In Tabella 6.4 vengono riportati i risultati ottenuti, per i tempi di ritorno di pioggia e portata, con tutti i metodi e per tutti gli eventi analizzati.

Evento		T(Q)				T(h)	
		TCEV	Hazen	Gumbel	Hazen(T. V.)	LSPP	RDDFE
25-nov	3_90	15.7	20.4	26.6	20.0	50.0	54.0
22-set	5_94	13.3	14.6	21.1	15.6	12.5	14.0
7-nov	2_00	7.0	9.3	8.0	9.6	6.9	8.3
5-dic	5_92	4.0	4.3	3.8	3.5	1.0	1.3
13-giu	4_94	3.3	2.9	3.1	3.1	1.0	1.3
10-dic	4_90	2.9	2.6	2.7	2.3	2.3	2.5
31-ott	3_92	2.7	2.5	2.4	1.9	1.0	1.3
8-nov	4_03	2.6	2.5	2.3	1.9	4.0	4.6
28-nov	5_03	2.4	2.3	2.1	1.9	1.0	1.2
31-ott	4_04	2.1	2.1	1.9	1.5	5.0	7.2
12-ott	4_91	1.9	1.7	1.7	1.4	22.2	25.4

Tab. 6.4: Risultati del tempo di ritorno per gli eventi di interesse per il bacino del Reno a Casalecchio.

La Figura 6.8 può dare un' idea della similitudine dei risultati prodotti, tramite il confronto incrociato tra i risultati ottenuti con Gumbel e Hazen per le portate e con il metodo del confronto con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica e il metodo dell' equazione RDDFE per le piogge. I vari metodi utilizzati hanno prodotto stime del tempo di ritorno T , in buon accordo fra loro: come risulta chiaramente in Figura 6.8.

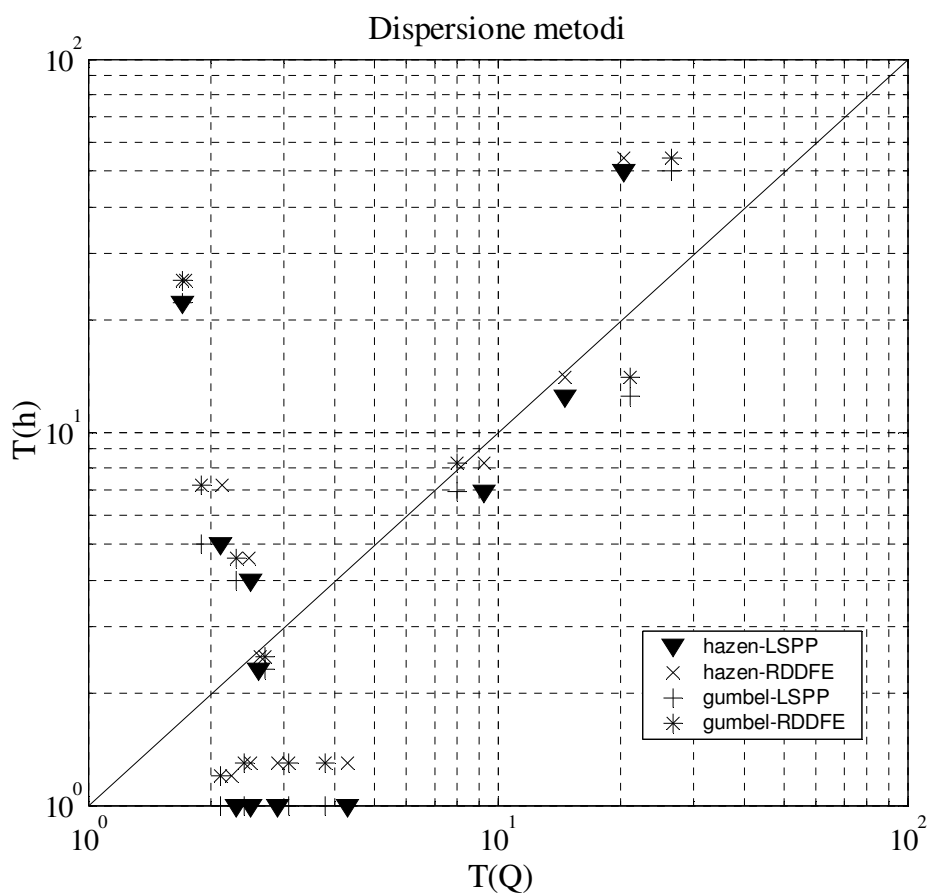


Fig. 6.8: Dispersione dei punti prodotta dai vari metodi utilizzati.

I grafici che verranno illustrati e commentati nelle prossime pagine saranno basati solamente su una coppia di risultati. Nel presente studio la scelta è ricaduta sui risultati prodotti dal metodo di Gumbel per la portata, che viene preferito alla Plotting Position di Hazen in quanto essendo un metodo parametrico ha alla base un modello statistico teorico affidabile per le analisi degli estremi idrometrici; mentre per le precipitazioni è stato scelto il metodo del confronto con le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali o i suoi quantili, che risulta essere anche il più utilizzato in letteratura per determinare il tempo di ritorno per un evento di pioggia.

In Figura 6.9 vengono riportati tutti gli eventi analizzati con in ascissa il tempo di ritorno per la portata defluita attraverso la sezione di Casalecchio Chiusa, mentre in ordinata viene riportato il tempo di ritorno ottenuto per l' altezze di pioggia h ; inoltre il colore dei cerchi è rappresentativo del valore del tempo di ritorno ottenuto per la pioggia del giorno precedente all' evento di piena. La stessa rappresentazione viene fatta in Figura 6.10, ma questa volta anziché rappresentare con il colore dei cerchi, il tempo di ritorno della pioggia nel giorno precedente, viene rappresentato quello nei cinque giorni precedenti l' evento di piena. In Tabella 6.5 sono riportati i risultati che generano i grafici di Figura 6.9 e 6.10, infatti la penultima colonna contiene i valori del tempo di ritorno per la durata di un giorno antecedente all' evento di piena e l' ultima colonna contiene i valori del tempo di ritorno per la pioggia dei cinque giorni antecedenti l' evento di piena.

Evento	T(Q)	T(h)	T(h(1d))	T(h(5d))
3_90	26.6	50.0	30.0	5.0
5_94	21.1	12.5	14.9	2.0
2_00	8.0	6.9	4.4	8.6
5_92	3.8	1.0	1.0	1.0
4_94	3.1	1.0	1.0	20.0
4_90	2.7	2.3	2.4	1.0
3_92	2.4	1.0	1.0	1.0
4_03	2.3	4.0	2.9	2.0
5_03	2.1	1.0	1.0	2.2
4_04	1.9	5.0	2.3	2.7
4_91	1.7	22.2	10.0	1.7
04-nov-66	37.0	X	277.0	8.4
05-feb-51	206.0	X	4.3	4.0

Tab. 6.5: Valori del tempo di ritorno degli eventi di piena, delle piogge che le hanno generate e della pioggia nel giorno e nei cinque giorni precedenti gli eventi di piena, per il Reno a Casalecchio.

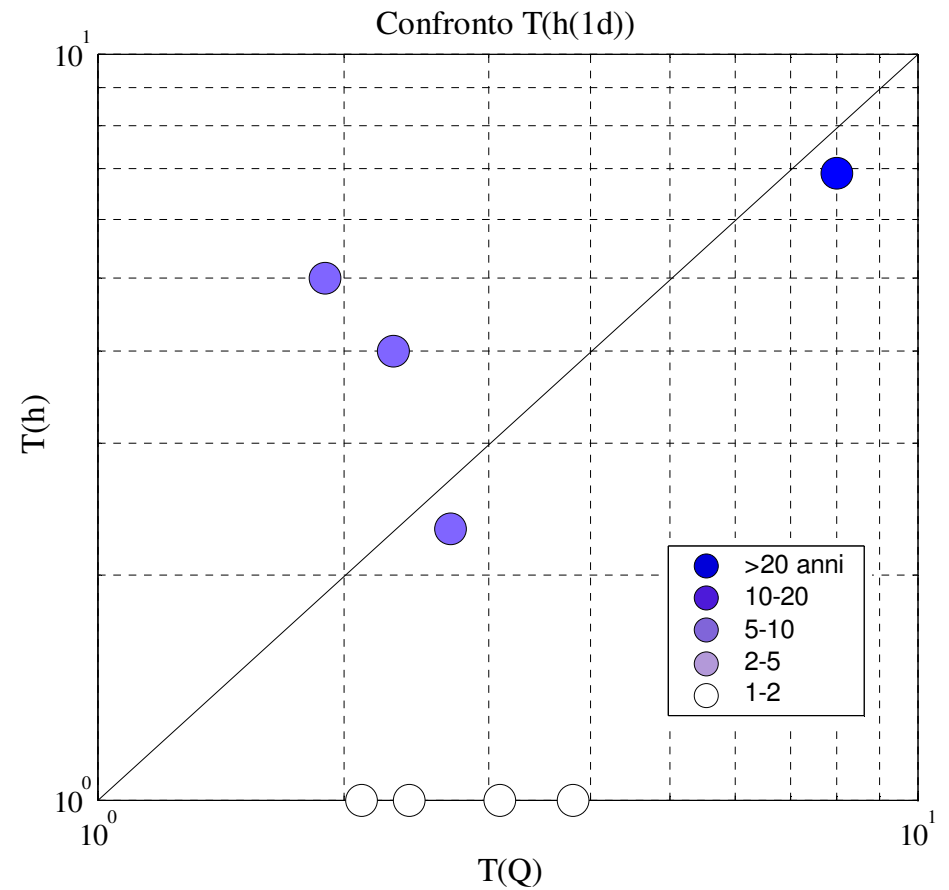
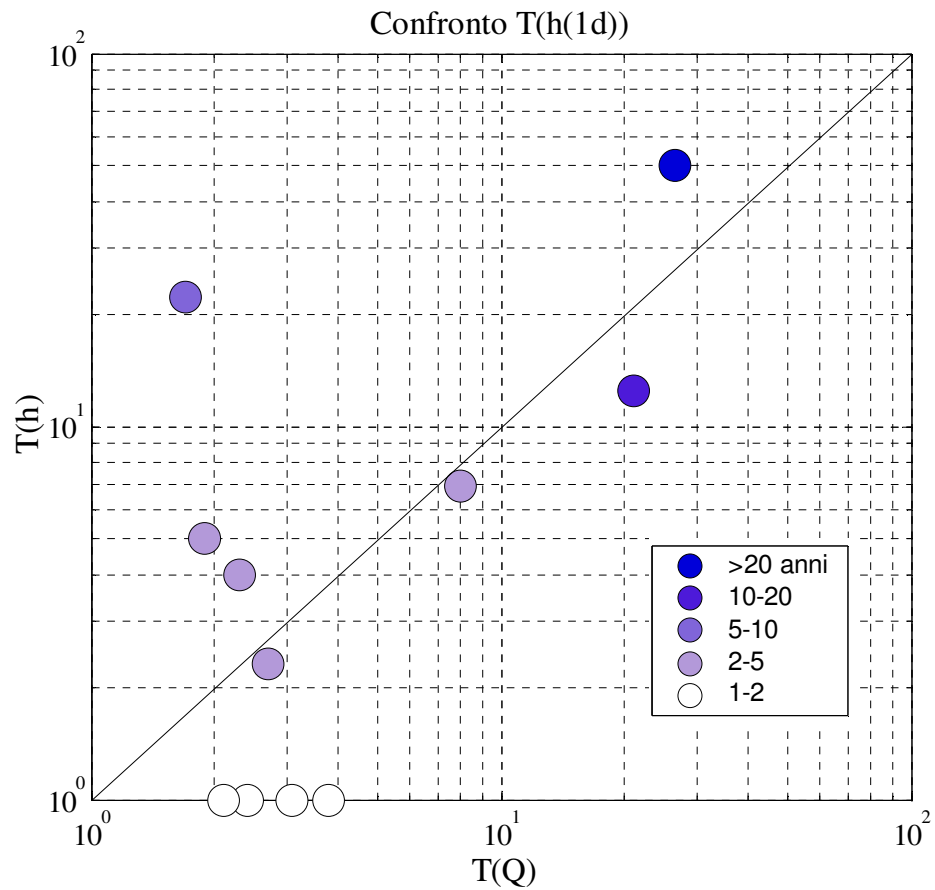


Fig. 6.9: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate, delle precipitazioni che le hanno generate e della pioggia nel giorno precedente l' evento di piena nel grafico di sinistra gli assi arrivano fino 100 anni di tempo di ritorno, nel grafico di destra per poter meglio vedere gli eventi minori si sono ridotti gli assi ad un tempo di ritorno di 10 anni.

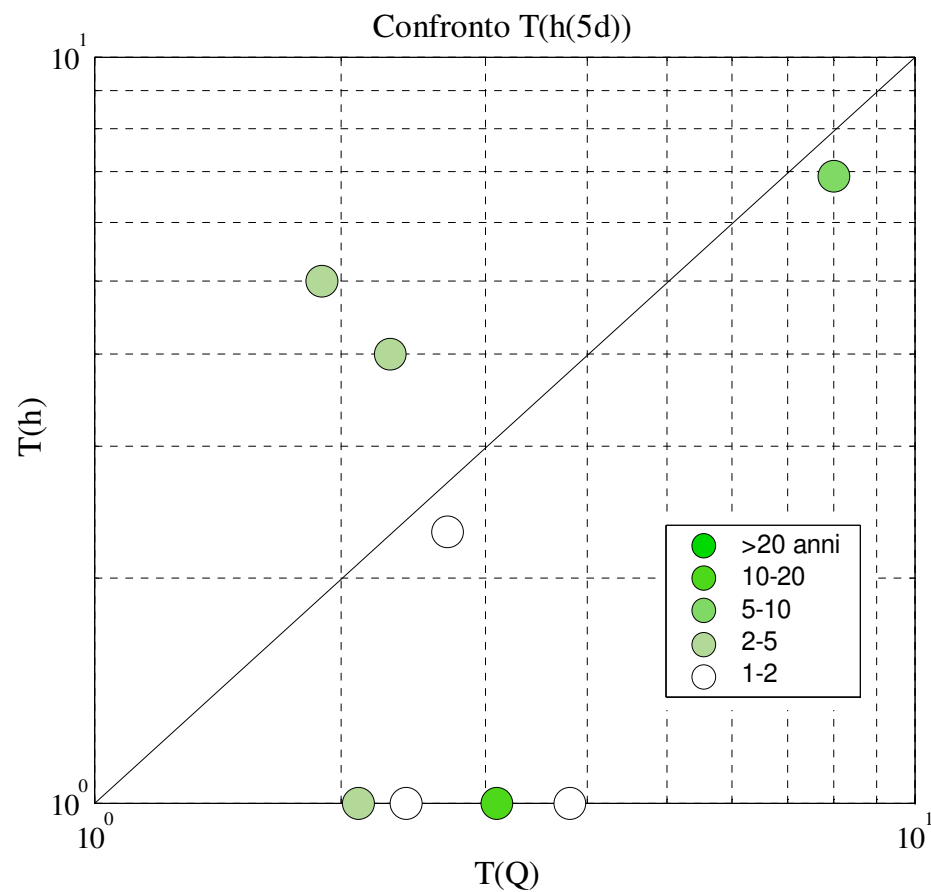
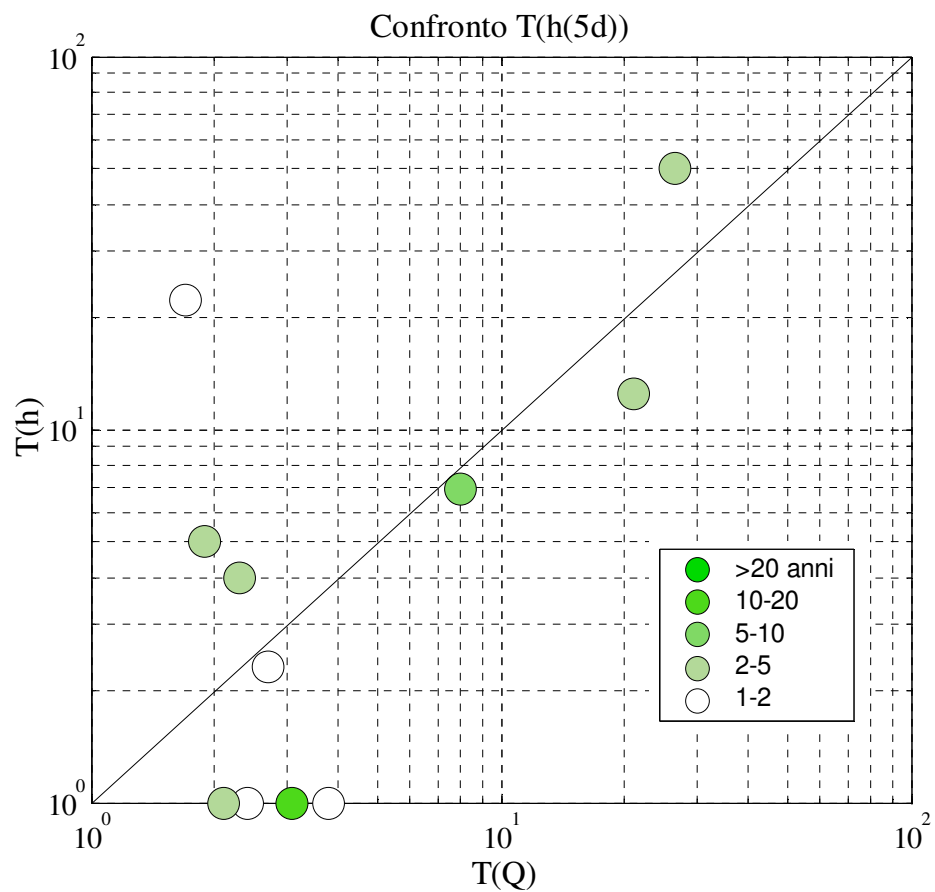


Fig. 6.10: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate, delle precipitazioni che le hanno generate e della pioggia nei cinque giorni precedente l'evento di piena nel grafico di sinistra gli assi arrivano fino a 100 anni di tempo di ritorno, nel grafico di destra per poter meglio vedere gli eventi minori si sono ridotti gli assi ad un tempo di ritorno di 10 anni.

I grafici di Figura 6.9 e 6.10 consentono di vedere la distribuzione completa che assumono i punti rappresentativi dei vari eventi, i punti nella maggior parte dei casi cadono attorno alla bisettrice del grafico, questo significa che piogge con un determinato tempo di ritorno generano piene con un tempo di ritorno se non uguale, almeno confrontabile. Il punto che più si discosta dalla bisettrice è l' evento 4_91 (12 ottobre 1991) con un $T(h) = 22$ anni, e con un $T(Q) = 1.7$ anni, mentre per tutti gli altri vengono rispettati almeno gli ordini di grandezza.

Inoltre è possibile osservare come i punti si distribuiscano attorno alla bisettrice o nella maggior parte dei casi al di sotto di essa, questo significa che piogge con un determinato tempo di ritorno generano portate che hanno un tempo di ritorno simile o superiore; per le portate con tempo di ritorno superiore, che quindi si trovano sotto la bisettrice, è interessante vedere in Figura 6.10 come siano caratterizzate dai colori più scuri e quindi da tempi di ritorno sui cinque giorni più elevati.

Il grafico di Figura 6.9 consente di osservare, come ci si aspetterebbe, che l' importanza dell' evento sia molto legata alla pioggia nella giornata precedente, infatti tutti gli eventi più scuri e quindi caratterizzati da tempi di ritorno più elevati per la pioggia nella giornata precedente la piena, sono quelli nella parte alta del grafico cioè caratterizzati da tempi di ritorno maggiori per l' evento di pioggia e portata.

Il legame osservato per il grafico di Figura 6.9, diventa meno forte nel grafico di Figura 6.10 dove il colore del cerchio è in funzione del tempo di ritorno della pioggia nei cinque giorni precedenti l' evento di piena.

Altre considerazioni interessanti è possibile farle osservando il confronto tra i risultati ottenuti per il tempo di ritorno delle portate e il tempo di ritorno calcolato per la pioggia nel giorno e nei cinque giorni precedenti l' evento di piena; i grafici prodotti da tali risultati sono riportati rispettivamente in Figura 6.11 e 6.12.

In questo caso è stato possibile aggiungere anche i risultati ottenuti per gli eventi del 4 novembre 1966 e del 5 febbraio 1951, infatti mentre non era possibile fare delle analisi di carattere orario, perché non erano disponibili i dati di precipitazione oraria per tali eventi, è stato possibile fare delle analisi di carattere giornaliero avendo a disposizione tutti i dati di pioggia giornalieri.

I dati utilizzati per la costruzione di questi grafici sono quelli illustrati in Tabella 6.5.

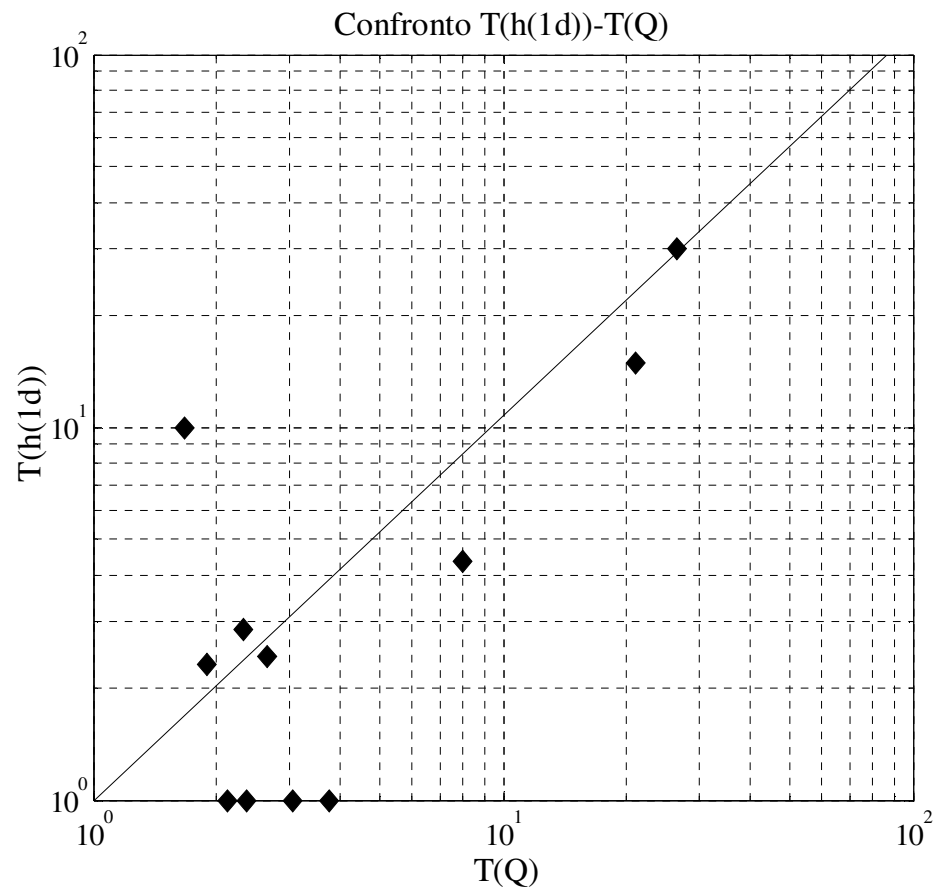
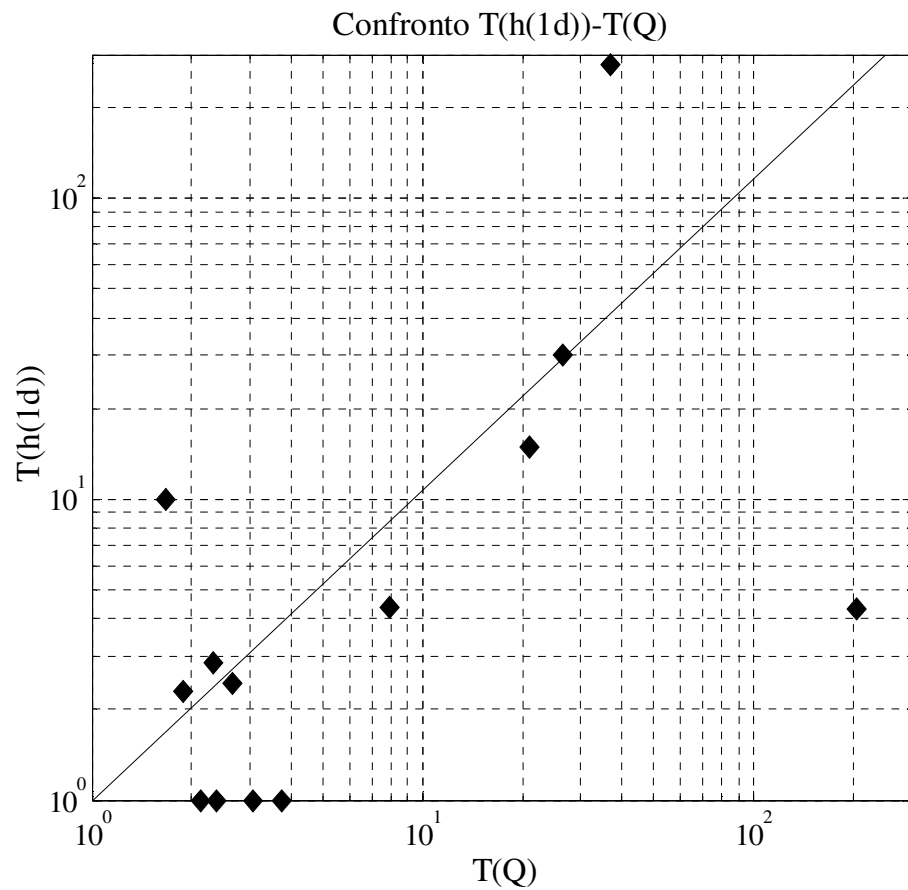


Fig. 6.11: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate e del tempo di ritorno della pioggia nel giorno precedente l' evento di piena nel grafico di sinistra gli assi arrivano fino a 300 anni di tempo di ritorno, nel grafico di destra per poter meglio vedere gli eventi minori si sono ridotti gli assi ad un tempo di ritorno di 100 anni.

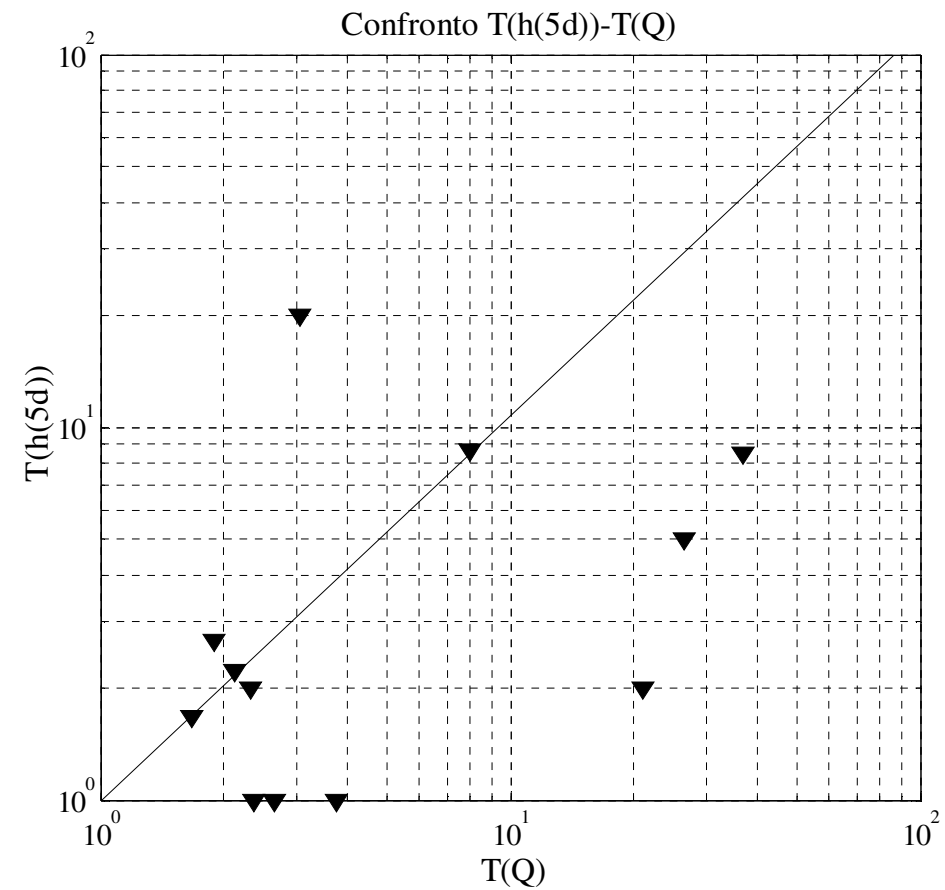
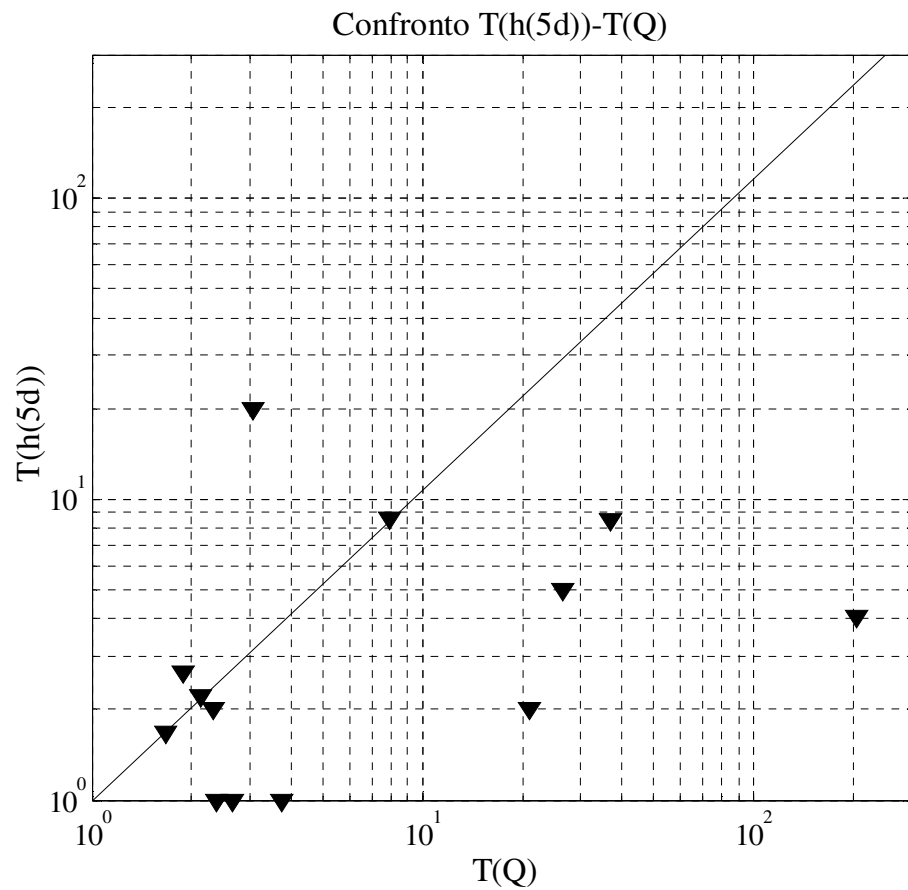


Fig. 6.12: Rappresentazione grafica dei tempi di ritorno delle portate e del tempo di ritorno della pioggia nei cinque giorni precedenti l'evento di piena nel grafico di sinistra gli assi arrivano fino 300 anni di tempo di ritorno, nel grafico di destra per poter meglio vedere gli eventi minori si sono ridotti gli assi ad un tempo di ritorno di 100 anni.

Il legame osservato nel grafico di Figura 6.9, dove però il tempo di ritorno della pioggia di un giorno precedente era rappresentato dal colore del cerchio, è confermato nel grafico di Figura 6.11, dove si mettono in relazione diretta il tempo di ritorno della pioggia del giorno precedente con il tempo di ritorno della portata. Infatti la maggior parte dei punti cade proprio intorno alla diagonale, questo implica che ci possa essere un legame tra le grandezze di cui sono stati confrontati i tempi di ritorno; in Figura 6.13 sono riportati i valori di portata ed i valori di pioggia verificati nel giorno precedente l'evento di piena, per i soli eventi che nel grafico di Figura 6.5 sono rappresentati da un punto che cade vicino alla diagonale. I dati utilizzati per la costruzione del grafico di Figura 6.7 sono riportati in Tabella 6.6.

Evento	Q (mc/s)	h(1d) (mm)
3\90	1537.5	116.2
5\94	1462.4	103.9
2\00	1176.0	80.5
4\90	817.1	67.7
4\03	766.2	70.5
4\04	684.1	68.5

Tab. 6.6: Valori di portata al colmo e di pioggia nel giorno precedente l'evento di piena per i sei eventi che in Fig. 6.5 vengono rappresentati da punti vicini alla diagonale.

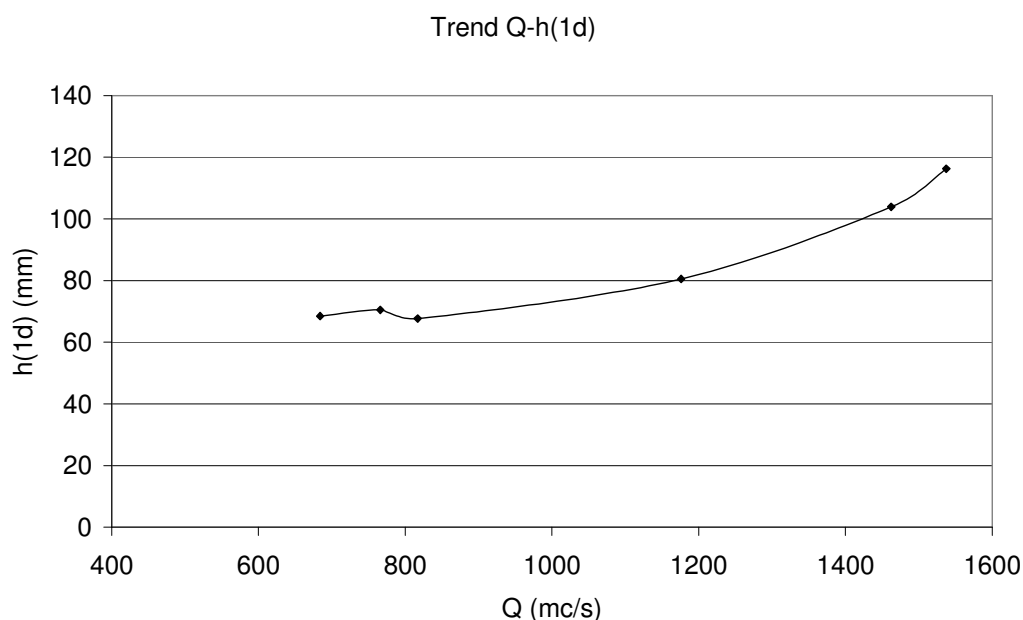


Fig. 6.13: Rappresentazione grafica dei valori di portata al colmo e di pioggia nel giorno precedente l'evento di piena per i sei eventi che in Fig. 6.5 vengono rappresentati da punti vicini alla diagonale.

In Figura 6.13 è possibile vedere come il legame sia abbastanza forte tra la pioggia nel giorno precedente e l' evento di piena, infatti al crescere di una grandezza, cresce anche l' altra seguendo un particolare andamento. La Figura 6.12 mette a confronto i risultati ottenuti per il tempo di ritorno della durata di pioggia nei cinque giorni precedenti l' evento di piena con il tempo di ritorno della portata, in questo caso come già accadeva per il grafico di Figura 6.10, il legame è meno forte e non è possibile individuare un trend tra le due grandezze, ma è possibile osservare come quasi tutti i punti cadano nella parte del diagramma collocata al di sotto della bisettrice. Questo significa che piogge con un certo tempo di ritorno sui cinque giorni generano portate che hanno un tempo di ritorno maggiore, proprio perché come è stato già accennato nel Cap. 4 e come vedremo meglio nel prossimo capitolo, la pioggia dei cinque giorni può essere un buon indicatore dello stato di umidità del terreno, che influisce in maniera determinante sul deflusso del bacino.

L' unico evento che cade molto al di sopra della diagonale in Figura 6.6 è l' evento 4_94 che però accade in una situazione particolare in quanto si è verificato il 13 giugno a seguito di una pioggia particolarmente prolungata per il periodo estivo, ma non particolarmente intensa; inoltre la situazione del bacino al 13 giugno può avere inciso in modo fondamentale sul deflusso, smorzandone gli effetti e producendo un tempo di ritorno della portata minore di quello della pioggia verificata nei cinque giorni precedenti la piena.

Cap. 7 ANALISI DEL COEFFICIENTE DI AFFLUSSO

Per alcuni eventi con riferimento al bacino del Reno a Casalecchio Chiusa è stato calcolato il coefficiente di afflusso, tali eventi sono il 3_90, 5_94, 2_00 che costituiscono le tre piene principali di cui si avevano a disposizione le piogge orarie; inoltre per il calcolo del coefficiente di afflusso sono state necessarie anche le portate orarie dei vari idrogrammi di piena.

Come già illustrato nel Cap. 4, dove si è parlato diffusamente del calcolo del coefficiente di afflusso, il metodo più adatto per il calcolo della pioggia netta sul bacino del Reno date le sue caratteristiche geomorfologiche è il metodo B, anche se i risultati prodotti dai due metodi non si discostano in maniera sostanziale, come è possibile vedere in Tabella 4.3. Le analisi che verranno condotte nelle prossime pagine saranno basate esclusivamente sui risultati ottenuti con il metodo B che sono riportati in Tabella 7.1.

Evento	Ψ
3_90	0.64
5_94	0.57
2_00	0.85

Tab. 7.1: Valori del coefficiente di afflusso, ottenuti con il metodo B per gli eventi analizzati.

Il coefficiente di afflusso, essendo definito come il rapporto tra il deflusso di pioggia (pioggia netta) e la pioggia caduta sul bacino (pioggia lorda), è indicativo del deflusso che una pioggia lorda caduta su un bacino può generare; per questo motivo ha un certo interesse per quanto riguarda la protezione idraulica del territorio.

Lo scopo delle analisi che verranno condotte è quello di individuare un grandezza dalla quale il coefficiente di afflusso dipende, in modo di riuscire a costruire un andamento che il coefficiente può assumere un funzione di una variabile nota o comunque prevedibile. Data l' influenza determinante delle condizioni di umidità del terreno sul coefficiente di afflusso, ed essendo l' umidità dipendente dalle piogge cadute precedentemente sul terreno, si è pensato di ricercare un legame del coefficiente con le piogge antecedenti l' evento di piena.

Una prima verifica è possibile effettuarla confrontando il valore del tempo di ritorno della pioggia nelle 12 (confrontabile con il tempo di corrivazione del bacino) ore precedenti la piena con il coefficiente di deflusso, i dati utilizzati sono riportati in Tabella 7.2, ed hanno prodotto il grafico di Figura 7.1.

Evento	T(h(12h))	fi
3_90	50.0	0.57
5_94	12.5	0.64
2_00	6.9	0.85

Tab. 7.2: Valori del tempo di ritorno della pioggia nelle 12 ore precedenti la piena e del coefficiente di afflusso per i tre eventi analizzati.

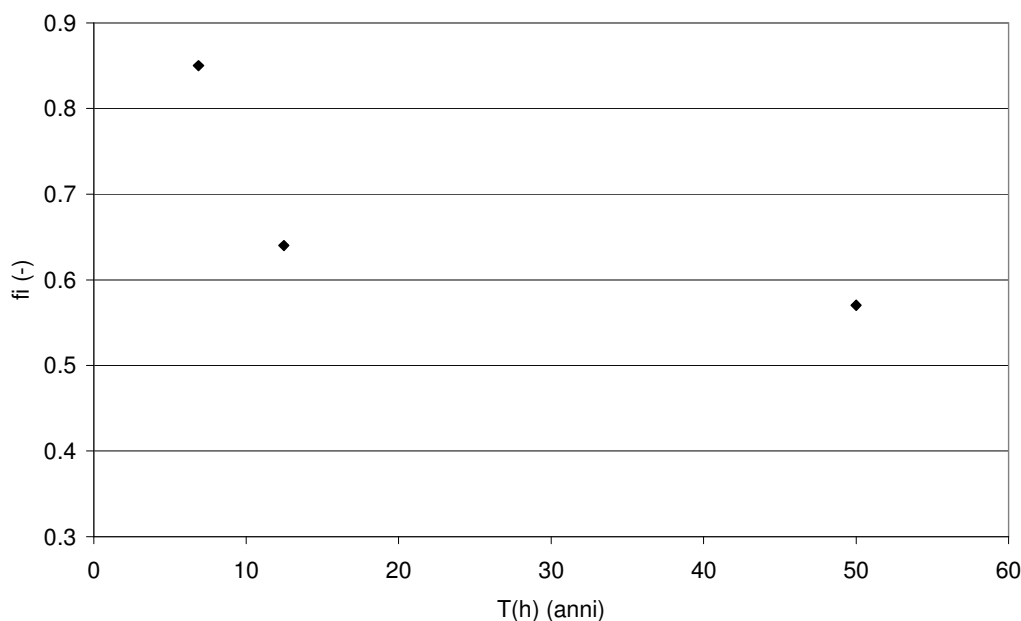


Fig. 7.1: Rappresentazione grafica dei valori di tempo di ritorno per la pioggia nelle 12 ore precedenti la piena e del coefficiente di afflusso per i tre eventi analizzati.

Come è possibile osservare i punti non seguono un andamento preciso e addirittura il punto che ha il minor tempo di ritorno per le piogge ha il maggior valore del coefficiente di afflusso; quindi si può concludere che il coefficiente di afflusso non ha un legame diretto con la pioggia nelle dodici ore antecedenti la piena.

Una ulteriore verifica è possibile condurla confrontando i valori del tempo di ritorno per la pioggia caduta nel giorno precedente l' evento di piena con il coefficiente di afflusso, i dati utilizzati sono riportati in Tabella 7.3, ed hanno prodotto il grafico di Figura 7.2.

Evento	T(h(1d))	fi
3_90	30.00	0.57
5_94	14.90	0.64
2_00	4.37	0.85

Tab. 7.3: Valori del tempo di ritorno della pioggia nel giorno precedente la piena e del coefficiente di afflusso per i tre eventi analizzati.

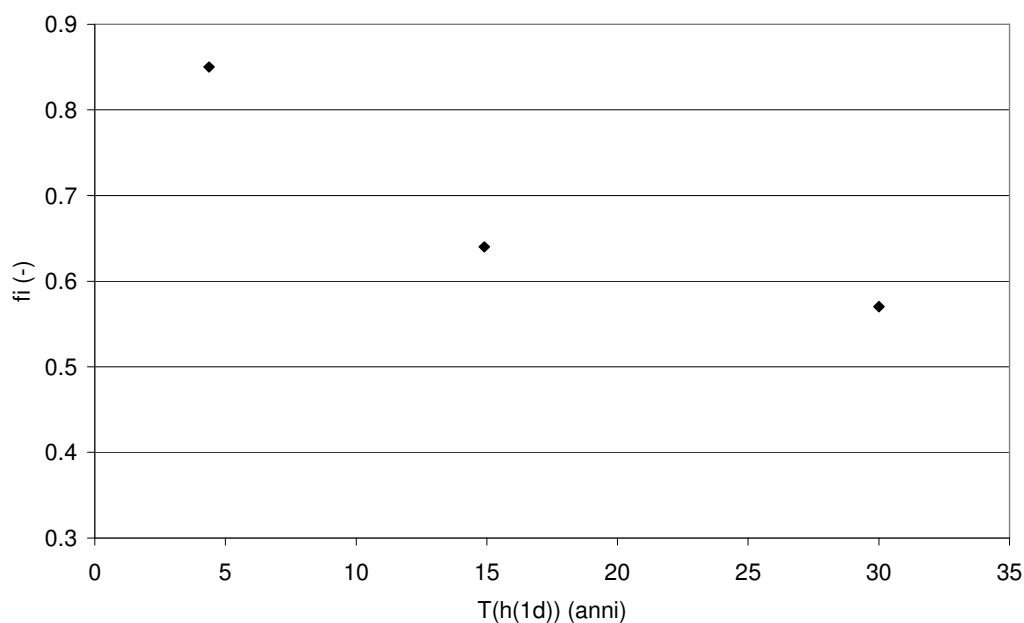


Fig. 7.2: Rappresentazione grafica dei valori di tempo di ritorno per la pioggia nel giorno precedente la piena e del coefficiente di afflusso per i tre eventi analizzati.

Anche in questo caso non è possibile individuare un legame tra le due grandezze, inoltre anche qui accade proprio che l' evento con minor tempo di ritorno per la pioggia nel giorno precedente la piena sia quello con il maggior coefficiente di afflusso; quindi anche in questo caso non è possibile ipotizzare alcun legame diretto tra il coefficiente di afflusso e la pioggia del giorno precedente la piena.

L' ultima verifica è possibile condurla confrontando il valore del tempo di ritorno per la pioggia nei cinque giorni precedenti la piena con il coefficiente di afflusso, i dati utilizzati sono riportati in Tabella 7.4, ed hanno prodotto il grafico di Figura 7.3.

Evento	T(h(5d))	fi
3_90	2.0	0.57
5_94	5.0	0.64
2_00	8.6	0.85

Tab. 7.4: Valori del tempo di ritorno della pioggia nei cinque giorni precedenti la piena e del coefficiente di afflusso per i tre eventi analizzati.

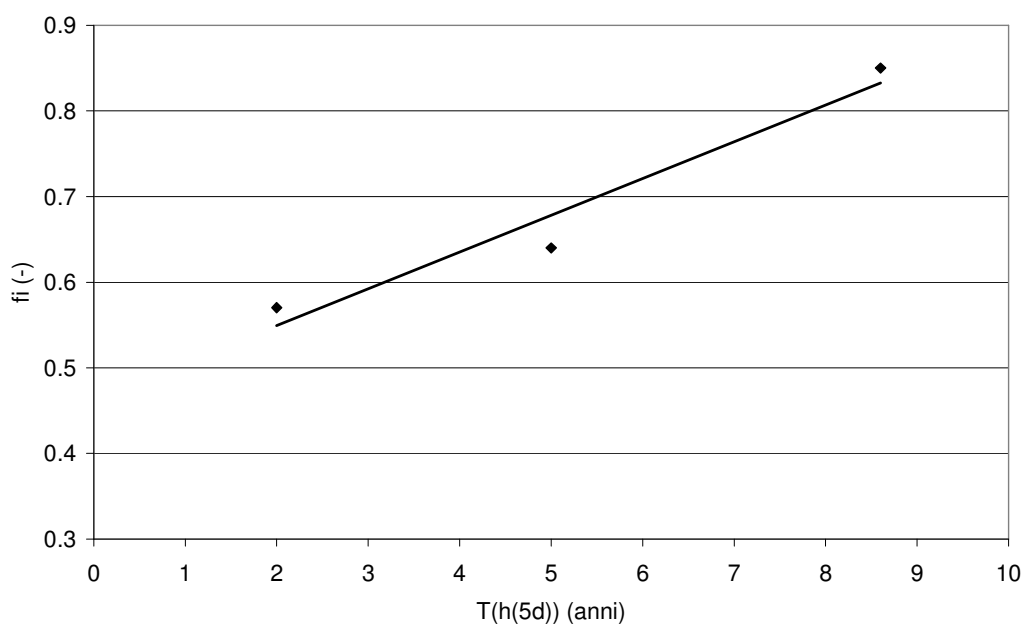


Fig. 7.3: Rappresentazione grafica dei valori di tempo di ritorno per la pioggia nei cinque giorni precedenti la piena e del coefficiente di afflusso per i tre eventi analizzati.

In questo caso è possibile vedere come i punti presentino una certa tendenza, infatti al crescere del tempo di ritorno della pioggia per i cinque giorni antecedenti la piena aumenta anche il coefficiente di afflusso, i punti possono essere interpolati mediante una retta di equazione: $y = 0.0429 x + 0.4633$.

Questo significa che il coefficiente di afflusso può essere legato alla pioggia caduta nei cinque giorni precedenti alla piena, un intervallo sufficientemente ampio, che influisce in modo determinante sulla umidità del terreno.

Ulteriore conferma del legame tra la pioggia nei cinque giorni antecedenti la piena e il coefficiente di afflusso viene dal metodo CN proposto dal *Soil Conservation Service*

(SCS) degli Stati Uniti che determina il deflusso corrispondente allo scorrimento superficiale. Il metodo calcola il deflusso Q mediante la (1):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (1)$$

Dove P rappresenta l' afflusso meteorico, il parametro I_a dipende dalle condizioni del suolo, ma lo si può assumere proporzionale al parametro S attraverso la relazione (2).

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Il parametro S è possibile valutarlo con la (3):

$$S = 254 (100/CN - 1) \quad (3)$$

Dove CN viene tabulato in funzione del tipo di copertura del suolo, del trattamento della superficie, del drenaggio, della permeabilità del terreno e soprattutto delle condizioni di umidità del terreno all' inizio dell' evento.

Le condizioni di umidità sono espresse dividendo il terreno in tre possibili condizioni (*Antecedent Moisture Condition*) dipendenti dalla pioggia nei cinque giorni antecedenti l' evento di piena. In Tabella 7.5 vengono riportati le classi di suddivisione del terreno in base alla pioggia nei cinque giorni precedenti l' evento di piena.

Condizioni	Classe AMC	Altezza di pioggia antecedente (5 d)	
		Stagione di riposo	Stagione vegetativa
Secche	I	< 12.7 mm	< 35.6 mm
Normali	II	12.7 – 27.9 mm	35.6 – 53.3 mm
Umide	III	> 27.9 mm	> 53.3 mm

Tab. 7.5: Classi di umidità del terreno sulla base della pioggia nei cinque giorni antecedenti l'evento di piena.

Cap. 8 CONCLUSIONI

Lo scopo principale del lavoro svolto è stato quello di condurre una analisi di frequenza congiunta degli estremi pluviometrici e idrometrici, per il bacino del Reno con chiusura a Casalecchio Chiusa e per il sottobacino con chiusura a Pracchia.

Mediante tale analisi si è indagato sull' ipotesi fondamentale su cui si basano i *metodi indiretti* per la determinazione della portata di progetto in sezioni fluviali non strumentate; tale ipotesi presuppone che la portata di progetto con determinato tempo di ritorno, fissato in base alle caratteristiche del manufatto in esame, possa essere ottenuta mediante un modello *afflussi-deflussi* avendo come dato di partenza, opportunamente stimato, l' altezza di pioggia dell' evento critico con medesimo tempo di ritorno. Tale assunzione può essere riassunta nell' espressione:

$$Q(T) = Q(h(t_c, T)) \quad (1)$$

Dove $h(t_c, T)$ rappresenta l' altezza di pioggia critica, quindi con durata pari al tempo di corrivazione t_c , e tempo di ritorno T di interesse.

Questa ipotesi presuppone che per i metodi di tipo indiretto l' intera arbitrarietà del fenomeno venga racchiusa nella precipitazione, che costituisce l' input del sistema preso in considerazione; quindi ne risulta che il deflusso fluviale è considerato come la risposta di un sistema deterministico (il bacino idrografico) ad input stocastico (la precipitazione). [1]

Le analisi condotte 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 per le portate è stato calcolato mediante alcuni metodi diretti, i metodi utilizzati sono stati più di uno al fine di ottenere dei risultati confermati da più tecniche. Il primo metodo utilizzato è il *metodo della portata indice* con distribuzione probabilistica TCEV, il quale è comunemente utilizzato per le analisi di frequenza regionali. Nel caso in considerazione avendo a disposizione un campione sufficiente di osservazioni la grandezza indice coincideva con la media delle portate stesse. Un altro metodo utilizzato è stato quello della *distribuzione di Gumbel* applicando il metodo dei momenti sono stati calcolati i parametri di tale distribuzione in modo tale

da avere un modello teorico in grado di rappresentare in modo adeguato gli estremi idrometrici. Le due procedure sopra citate rientrano nella categoria dei metodi definiti come *parametrici*; oltre ai quali ne è stato applicato anche uno *non parametrico* costituito dalla *Plotting Position* di *Hazen*. Queste tecniche sono state applicate sia al caso del Reno a Casalecchio, che per il Reno a Pracchia: in entrambi i casi hanno sempre prodotto risultati simili.

Anche per il calcolo del tempo di ritorno delle precipitazioni, che hanno generato gli eventi di piena, sono stati applicati diversi metodi. Il primo che è stato proposto è basato sul confronto delle altezze di pioggia dell' evento, ragguagliate all' area mediante media pesata tra le varie stazioni, con le *linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali a scala di bacino*; in questo caso viene associato all' evento di pioggia il tempo di ritorno osservato per la durata pari al tempo di corrivazione del bacino. L' altro metodo utilizzato applica l' equazione RDDFE (Regional Depth-Duration-Frequency Equations), che basandosi su analisi di tipo regionale lega l' altezza di pioggia di assegnata durata e tempo di ritorno, all' altezza di pioggia con durata 24 ore e tempo di ritorno 10 anni, alla durata stessa, al tempo di ritorno e alla precipitazione media annuale. Applicando tale equazione, imponendo come incognita il tempo di ritorno, è stato possibile caratterizzare i vari eventi di pioggia. Anche nel caso delle precipitazioni applicando i diversi metodi, i valori ottenuti sono simili, a conferma della validità dei risultati.

Calcolati i tempi di ritorno di eventi di piena e relative precipitazioni, il passo successivo è stato quello di confrontare tra loro i valori ottenuti; se per i vari eventi il tempo di ritorno di pioggia e portata fosse stato lo stesso allora sarebbe stata confermata la relazione (1).

Tale relazione sarebbe stata sicuramente soddisfatta se il sistema in considerazione, fosse stato tale che dato un *input* esso restituisse un *output* univoco, un sistema che può essere ritenuto di questo tipo, seppure con qualche semplificazione, può essere una rete di drenaggio urbano.

I risultati prodotti hanno consentito di osservare che, mediamente il tempo di ritorno ottenuto per la precipitazione è simile o almeno confrontabile con quello della portata che ha generato:

$$T(h) \approx T(Q) \quad (2)$$

Questo implica che mediante opportuni modelli è possibile che sia verificata la relazione (1), ma ci sono anche degli eventi anomali per cui la relazione (2) non è rispettata; infatti il sistema analizzato non è un sistema artificiale, ma un *sistema naturale* (il bacino idrografico) in cui le risposte agli input possono non essere univoche. Quindi l'ipotesi fatta per i metodi indiretti per cui tutta l'aleatorietà del fenomeno sia racchiusa nella precipitazione è una semplificazione forse eccessiva, soprattutto per sistemi naturali; infatti nella realtà esistono variabili fondamentali del bacino che influiscono in modo determinante sulla risposta del sistema.

Queste considerazioni, implicano che, nella determinazione di una portata di progetto, soprattutto per opere di protezione idraulica del territorio, è necessario prestare particolare attenzione, ed è consigliabile applicare sempre, dove possibile, un metodo di tipo diretto e se non è possibile, condurre una serie di verifiche adeguate, magari applicando diversi metodi di tipo indiretto, al fine di non sottostimare la portata di progetto. Infatti una sottostima della portata di progetto, implica un dimensionamento non adeguato del manufatto, che potrebbe mandare in crisi il manufatto stesso, o ancora peggio avere conseguenze per la sicurezza della popolazione.

Inoltre dal confronto tra i tempi di ritorno delle portate e delle precipitazioni che le hanno generate, è possibile osservare come non accadano eventi che hanno per la portata un tempo di ritorno che può essere significativo, per esempio oltre i 10 anni e per la precipitazione un tempo di ritorno basso, inferiore ai 10 anni. Questo è abbastanza cautelativo quando si utilizzano metodi indiretti, in quanto evita che si generi una portata molto più alta rispetto quella che ci si attenderebbe con tempo di ritorno assegnato dall'altezza di precipitazione in pratica evita che venga sottostimata in maniera pericolosa la portata di progetto.

Altre considerazioni è possibile condurle sulla base dei risultati ottenuti per il coefficiente di afflusso calcolato per alcuni eventi; il coefficiente di afflusso è definito come il rapporto tra la pioggia netta e la pioggia lorda caduta sul bacino.

La pioggia netta, cioè il deflusso superficiale alla sezione di chiusura del bacino, è stata stimata mediante tecniche empiriche di separazione delle componenti dell'idrogramma di piena; mentre la pioggia lorda è stata calcolata sulla base delle precipitazioni orarie disponibili per i vari pluviometri, attraverso, anche in questo caso, il ragguaglio all'area mediante l'operazione di media pesata.

Data la relazione tra il deflusso provocato da una pioggia e le condizioni di umidità del terreno antecedenti la pioggia, si è cercato un legame tra il coefficiente di afflusso e la pioggia precedente all' evento di piena.

I risultati ottenuti hanno evidenziato un legame forte tra il coefficiente di afflusso e la pioggia nei cinque giorni antecedenti la piena, quindi l' intervallo di tempo che caratterizza la condizione di umidità del terreno deve essere sufficientemente ampio.

Ulteriore conferma del legame tra umidità del terreno e pioggia nei cinque giorni antecedenti l' evento di piena, proviene dal metodo CN che assume proprio tale finestra temporale di precipitazione per la classificazione delle condizioni di umidità del terreno.

ALLEGATO I

Piena del Febbraio 1951

Le piogge, anche se con debole intensità e protratte per l'intero mese di gennaio, crearono uno stato d'imbibizione dei terreni tale da rendere praticamente nulla ogni ulteriore recettività al sopraggiungere della perturbazione di febbraio. L'evento meteorico dei primi giorni di febbraio si protrasse per 4 giorni consecutivi con una registrazione nella zona compresa fra i torrenti Orsigna e Randaragna (affluenti di sinistra dell'alto Reno) di oltre 470 mm e una particolare concentrazione con piogge comprese fra 250 e 300 mm fra i torrenti Brasimone e Gambellato dell'alto corso del Setta. Dal punto di massimo rovescio di 470 mm la pioggia per i 4 giorni (96 ore) si distribuiva in 315 mm su di una superficie di 500 kmq, mentre su una superficie di 1000 kmq i mm di pioggia furono 247 e, mm 205 per la maggior estensione di 1500 kmq.

stazione pluviometrica	bacino imbrifero	Quota stazione	giorno 5 (mm)	giorno 6 (mm)	giorno 7 (mm)	giorno 8 (mm)	Totale di 4 giorni
Piastre	Reno	741	117	207	59	2	385
Maresca	Reno – Maresca	1043	93	195	20	28	336
Pracchia	Reno – Maresca	627	136	180	49	8	373
Orsigna	Reno - Orsigna	806	192	213	44	21	470
Spedaletto Pistoiese	Reno-Limentra Samb.	775	154	205	40	12	411
Diga di Pavana	Reno-Limentra Samb.	480	89	139	52	15	295
Porretta Terme	Reno	349	77	90	36	13	216
Monteacuto delle Alpi	Reno – Silla	915	75	157	36	20	288
Lizzano in Belvedere	Reno – Silla	640	76	143	29	18	266
Acquerino	Reno – Limentra Riola	890	101	170	48	12	331
Treppio	Reno – Limentra Riola	710	117	100	40	24	281
Diga di Suviana	Reno – Limentra Riola	500	73	41	22	20	156
Riola di Vergato	Reno – Limentra Riola	240	25	25	51	15	116
Cottede	Reno – Setta	850	105	82	31	21	239
Pian di Balestra	Reno – Setta	1040	53	74	33	12	172
Diga del Brasimone	Reno – Setta	830	101	117	39	23	280
Burzanella	Reno – Setta	546	56	75	38	16	185
Monteombraro	Reno – Samoggia	727	12	14	16	17	59
Montepastore	Reno – Samoggia	596	25	23	21	15	84
Bologna – Uff. Idr.	Reno – Savena - Idice	51	13	23	14	12	62
Monghidoro	Reno – Idice	841	73	38	20	19	150
Pianoro	Reno – Savena	187	11	14	22	13	60
Firenzuola	Reno – Santerno	422	78	107	40	9	234
Barco	Reno – Santerno	741	32	86	44	7	169
Pietramala	Reno – Santerno	845	62	111	45	5	223
Castel del Rio	Reno – Santerno	221	25	33	28	7	93
Casola Val Senio	Reno - Senio	195	16	24	13	7	60

Tab. 1.6: Le precipitazioni giornaliere, dalle ore 9 del 4 febbraio alle ore 9 dell' 8 febbraio 1951.

Le precipitazioni giornaliere, registrate dal Servizio Idrografico, dalle ore 9 del 4 febbraio alle ore 9 dell' 8 febbraio 1951 sono riportate nella tabella 1.6. Tali valori, sia di un giorno, sia di 4 giorni consecutivi, furono inferiori ai corrispondenti verificatisi in precedenza se si eccettua per i 207 mm di un giorno alle Piastre (precedente 173 mm del 21 dicembre 1922) e dei 411 mm di 4 giorni di Spedaletto Pistoiese (precedente 367 mm del 16/19 nov. 1940) e dei 470 mm di 4 giorni di Orsigna (precedente 359 mm del 16/19 nov. 1940).

L'evento meteorico fu quindi caratterizzato non da accentuate intensità orarie ma da valori piuttosto elevati delle precipitazioni giornaliere (anche se inferiori a precedenti nubifragi) e da un grado di saturazione del terreno conseguente alle piogge dei precedenti mesi di dicembre e gennaio che hanno consentito un favorevole e subitaneo deflusso delle acque pluviali originando un fenomeno di piena veramente eccezionale con valori al colmo in genere superiori a quelli registrati nel precedente periodo di osservazione.

La piena identificata con un solo colmo che si propagò da Pracchia a S. Alberto dal giorno 5 al 7 febbraio e le cui portate registrate dall'Ufficio Idrografico di Bologna sono riportate in Tabella 1.7.

Corso d'acqua	Stazione idrometrica	Bacino tributario	Portata al colmo
Reno	Pracchia	kmq 41	214 mc/sec
“	Molino del Pallone	kmq 89	574 mc/sec
Limentra di Sambuca	Taviano	kmq 34	436 mc/sec
Limentra di Riola	Stagno	kmq 66	392 mc/sec
Reno	Calvenzano	kmq 581	1520 mc/sec
“	Casalecchio	kmq 1051	1940 mc/sec
“	Cento	kmq 1562	1129 mc/sec
Santerno	Borgo Tossignano	kmq 319	353 mc/sec
Senio	Castel Bolognese	kmq 269	120 mc/sec

Tab. 1.7: Portate al colmo della piena nelle varie stazioni idrometriche.

Le altezze idrometriche relative furono anch'esse imponenti, infatti a **Casalecchio Chiusa** il valore idrometrico fu di m **3,12** superato (*nel secolo*) solo dalla piena del 1910 con m 3,30.

I tempi di propagazione dell'onda di piena è stato ricostruito dai diagrammi del Servizio Idrografico pubblicati sull'annale del 1951 – II parte, come di seguito:

- da Pracchia a Molino del Pallone sul Reno.....h **0,30'**

- da Molino del Pallone a Casalecchio sul Reno.....h 6,00'
- il Samoggia a Calcara h 2,00' prima del colmo a Casalecchio
- da Casalecchio all'idrometro Assa¹h 10,15'
- il Santerno a La Pianta h 15,30' prima del colmo alla Bastia
- il Senio ad Alfonsine h 5,00' prima del colmo alla Bastia
- dall'idrometro Assa alla Bastia.....h 11,15'

La celerità di piena da Casalecchio fino all'idrometro Assa fu di circa 5 km/h, eccezionale se si considera che la precedente piena del novembre 1949 sviluppò una velocità di circa 4 km/h, di per sé notevolmente superiore alle velocità che si sono riscontrate, sullo stesso tratto, negli ultimi recenti 20 anni che mediamente sono di poco superiori a 3 km/h.

Anche per questa piena non è da trascurare la gestione del bacino idroelettrico di Suviana che nei giorni 5 e 6 febbraio ha operato per ottenere un ragguardevole effetto di laminazione dell'onda di piena del Limentra di Riola in quanto nelle fasi precedenti l'evento la quota dell'invaso era di 465,75 con la possibilità di accumulare 7.000.000 di mc fino alla massima capienza del bacino stesso. Il Servizio Idrografico valutò che il bacino idroelettrico esercitò una azione giornaliera di contenimento traducibile in 8,7% del deflusso osservato a Casalecchio.

In sintesi:

- *stato del terreno*: imbevuto e saturo;
- *piogge*: non particolarmente intense ma continue per 4 giorni consecutivi;
- *colmi a Casalecchio*: uno di eccezionale valore, inferiore solo a quella del 1893;
- *portate al colmo*: a Casalecchio 1940 mc/sec;
- *singolarità*: evento particolarmente imponente e rapido con alti livelli nel bacino montano mediante valori mai prima raggiunti nell'alta valle del Reno e lungo l'asta arginata fino alla Panfilia da dove i livelli hanno iniziato a sentire l'effetto di chiamata della rotta; il bacino di Suviana ha avuto funzione di contenimento e di laminazione tanto che il S. I ha valutato nell' 8,7% il volume trattenuto dal bacino rispetto a quello defluito a Casalecchio.
- *effetti*: **fuoriuscita al Gallo, dalla precedente falla del gennaio, con allagamento di circa 12.000 ettari della pianura ferrarese e degli abitati di Gallo, Poggio**

¹ L' idrometro Assa era posto km 4,250 a valle della Panfilia e km 11,750 a monte del Gallo

Renatico, Coronella, Madonna dei Boschi, Mirabello, Montalbano, S. Bartolomeo in Bosco.

Piena del Novembre 1966

Le precipitazioni dell'ottobre e del novembre 1966 furono particolarmente intense e persistenti tanto da superare le medie del precedente periodo di osservazione (di 1 volta e ½ per il mese di ottobre e di 2 volte per quello di novembre). Questa situazione meteorica, diffusa in tutto il centro-nord d'Italia, provocò nel bacino del Reno la saturazione dei terreni ed il conseguente sviluppo di una notevole piena.

Le precipitazioni giornaliere, registrate dal Servizio Idrografico, dalle ore 9 del 3 novembre alle ore 9 del 5 novembre 1966 sono riportate in Tabella 1.8.

stazione pluviometrica	bacino imbrifero	Quota stazione	giorno 4 (mm)	giorno 5 (mm)	Totale di 2 giorni
Piastre	Reno	741	192	58	250
Maresca	Reno – Maresca	1043	228	50	278
Pracchia	Reno – Maresca	627	149	46	195
Spedaletto Pistoiese	Reno-Limentra Sambuca	775	179	59	238
Diga di Pavana	Reno-Limentra Sambuca	480	213	48	261
Porretta Terme	Reno	349	150	45	195
Monteacuto delle Alpi	Reno – Silla	915	240	40	280
Lizzano in Belvedere	Reno – Silla	640	177	45	222
Acquerino	Reno – Limentra di Riola	890	222	42	264
Treppio	Reno – Limentra di Riola	710	202	60	262
Diga di Suviana	Reno – Limentra di Riola	500	195	35	230
Riola di Vergato	Reno – Limentra di Riola	240	141	43	184
Cottede	Reno – Setta	850	201	32	233
Pian di Balestra	Reno – Setta	1040	197	35	232
Diga del Brasimone	Reno – Setta	830	208	48	256
Burzanella	Reno – Setta	546	175	35	210
Sasso Marconi	Reno – Setta	130	95	18	113
Monteombraro	Reno – Samoggia	727	111	28	139
Montepastore	Reno – Samoggia	596	106	28	134
Bologna – Uff. Idr.	Reno – Savena – Idice	51	81	14	95
Monghidoro	Reno – Idice	841	149	21	170
Pianoro	Reno – Savena	187	101	20	121
Firenzuola	Reno – Santerno	422	129	11	140
Barco	Reno – Santerno	741	188	16	204
Pietramala	Reno – Santerno	845	179	31	210
Castel del Rio	Reno – Santerno	221	130	22	152
Bibbiana	Reno - Senio	658	178	34	212
Casola Val Senio	Reno - Senio	195	100	22	122

Tab. 1.8: precipitazioni giornaliere, dalle ore 9 del 3 novembre alle ore 9 del 5 novembre 1966.

La piena conseguente l'evento meteorologico, pur non potendosi considerare di carattere eccezionale per i valori di portata raggiunti al colmo, va catalogata fra gli eventi più ragguardevoli, sia per la vastità del territorio interessato, sia per le gravi esondazioni del Reno e dei suoi affluenti dovute soprattutto ai grossi volumi d'acqua transitati negli alvei nelle ridotte sezioni fluviali particolarmente interrite.

I livelli e le portate registrate dal Servizio Idrografico sono riportati in Tabella 1.9.

Corso d'acqua	Stazione idrometrica	Bacino tributario	Altezza idrometrica	Portata al colmo
Reno	<i>Pracchia</i>	kmq 41	1,87	140 mc/sec
“	<i>Molino del Pallone</i>	kmq 89	2,82	360 mc/sec
Limentra di Riola	<i>Stagno</i>	kmq 66	2,68	209 mc/sec
Reno	Casalecchio Tiro a Volo	kmq 1051	4,45	1510 mc/sec
Samoggia	Calcara	kmq 170	4,40	421 mc/sec
Savena	Castel dell'Alpi	Kmq 12		62 mc/sec
Senio	Castel Bolognese	kmq 269	6,84	110 mc/sec

Tab. 1.9: Portate al colmo e livelli della piena nelle varie stazioni idrometriche.

Facendo riferimento a precedenti piene degli anni '50, per quanto riguarda livelli idrometrici e portate, per l'asta principale di Reno, la piena del novembre '66 è stata inferiore a quella del febbraio 1951, infatti allora:

- a Pracchia si registrò una altezza idrometrica di 2,33 per una portata di 214 mc/sec;
- al Molino del Pallone un'altezza idrometrica di 2,86 per una portata di 574 mc/sec;
- a Stagno un'altezza idrometrica di 3,75 per una portata di 392 mc/sec;
- a Casalecchio Tiro a Volo un'altezza idrometrica di 5,30 per una portata di 1940 mc/sec;

anche per il Samoggia la piena è stata leggermente inferiore a quella dell'aprile 1956, infatti allora a Calcara si registrò un'altezza idrometrica di 4,50 per una portata di 440 mc/sec; mentre per il Senio a Castel Bolognese la piena è stata superiore di livello all'altezza idrometrica del dicembre 1959 che fu di m 6,20, ma con una portata di poco inferiore rispetto al '59 quando si registrarono 113 mc/sec.

Il giorno e l'ora in cui si sono verificate le rotte, le manovre in Cavo Napoleonico, i i max livelli nei vari corsi d'acqua nonché il max valore di questi ultimi, sono stati desunti dalle registrazioni dell'Ufficio speciale del G.C. per il Reno, come di seguito

4 novembre 1966

il SAMOGGIA a Bazzano raggiunge il max livello alle 7,30 ed alle 8,00 con (2,10)

- a Calcara il max livello di (4,40) fu raggiunto alle ore 8,30;
- ai Forcelli in sinistra ed a Lorenzatico in destra il Samoggia sormontò e ruppe alle ore 9 circa;

il RENO a Casalecchio Chiusa rimase sopra il livello di 2,50 per quasi 5 ore raggiungendo il max livello alle ore 11,30 e 12,00 con (2,65) – valore corretto dal S.I. nelle tabelle dei valori estremi rispetto a quello pubblicato nell'annale del 1966 indicato in (2,58);

- al Boschetto (in destra) ed a Castel Campeggi (in sinistra) ci furono sormonti e rotte intorno le ore 10 alle ore 16,00 inizia la tracimazione allo sfioratore del Gallo con lettura dell'idrometro in destra Reno = (5,00) alle ore 16,30 inizia lo scolmo in Cavo Napoleonico con lettura idrometrica alla Panfilia (Opera Reno) = (22,40) alle ore 17,00 max livello a Cento con (7,47) alle ore 17,30 max livello alla Panfilia con (22,47); alle ore 23,00 termina lo scolmo in Cavo con lettura idrometrica alla Panfilia (Opera Reno) = (22,26);

il SAVENA a Pianoro raggiunge il max livello alle ore 8,30 ed alle 9,00 con (2,00);

l'IDICE a Pizzocalvo raggiunge il max livello alle ore 9,00 con (1,13);

- a San Martino max livello alle ore 13,00 con (7,74);

il SILLARO a Castel S. Pietro (idrometro sotto il ponte della via Emilia) raggiunge il max livello alle ore 7,00 ed alle 7,30 con (2,30);

- a Sesto Imolese max livello alle ore 8,30 con (4,45);

il SANTERNO a Borgo Tossignano raggiunge il max livello alle ore 7,00 ed alle 8,00 con (3,70), questa lettura idrometrica è stata stimata a seguito del crollo della traversa;

il SENIO a Castel Bolognese raggiunge il max livello alle ore 17,00 con (6,94);

- alle ore 16,00 rotta a Passo Donegallia dell'argine destro.

5 novembre 1966

il RENO alle ore 3,00 raggiunge il max livello al Gallo con (5,82);

- alle ore 7,00 max livello alla Bastia con (9,82);
- alle ore 9,00 inizio della manovra di parziale sbarramento all' Opera Reno per diminuire il deflusso allo sfioratore del Gallo;
- alle ore 23,00 fine della tracimazione allo sfioratore del Gallo con lettura all'idrometro in destra di Reno =(5,00).

6 novembre 1966

sul RENO alle ore 18,00 termina la manovra di sbarramento all' Opera Reno.

I tempi relativi delle varie fasi di piena si possono riassumere come segue:

- sul Samoggia, il colmo da Bazzano a Calcara si trasferisce in h. 0,45'
- da Calcara alla rotta dei Forcelliin h 0,30'
- sul Reno la rotta anticipa il colmo a Casalecchiodi circa h 2,00'
- la tracimazione al Gallo inizia dopo solo h 4,00' dal colmo di Casalecchio
- la manovra di scolmo in Cavo inizia h 0,30' dopo la tracimazione al Gallo
- da Casalecchio a Cento (percorrenza anticipata per effetto della rotta)h 5,00'
- da Cento all' Opera Renoh 0,30'
- la durata dello scolmo in Cavo fu di h 6,30' con un invaso di circa 5.000.000 di m³
- da Cento al Gallo (condizionata dallo scolmo) h 10,00'
- da Gallo alla Bastia h 4,00'.

In sintesi:

- stato del terreno: imbevuto e saturo;
- piogge: di grande intensità per due giorni consecutivi con valori vicini al 1° caso critico per la pioggia del 1° giorno;
- colmi a Casalecchio: uno di grande valore e di lunga durata;
- portate al colmo: **a Casalecchio 1510 mc/sec;**
- singolarità: il Reno alla Chiusa di Casalecchio ha persistito sopra il livello 2,50 per quasi 5 ore (circa 29.000.000 di mc) ha riversato verso valle con un volume d'acqua notevolissimo che ha sormontato le arginature provocando conseguentemente le rotte; in tutti i corsi d'acqua del bacino si sono registrate situazioni di pericolo; primo utilizzo dello Scolmatore di Reno in fase di piena consistente;

- effetti: sul Reno esondazione a seguito di sormonto e successiva rotta in argine sinistro a Castel Campeggi con allagamento di circa 380 ettari ed in argine destro al Boschetto con allagamento di ulteriori 1600 ettari; nel Samoggia si sono verificate due rotte arginali una in sinistra in località Forcelli ed una in destra in località Lorenzatico con conseguenti allagamenti di circa 3000 ettari; nell'alto Savena a Castel dell'Alpi la violenza della piena asportò 9 delle 13 briglie costruite a valle dello sbarramento in terra formatosi a seguito della frana del 1951; nel Senio esondazioni a Castel Bolognese ed una falla per cedimento dell'argine destro a Passo Donegallia con allagamento di circa 2200 ettari.

Piena del Novembre 1990 (3_90)

Nei primi giorni del mese si verificarono piogge continue ma non particolarmente intense che cessarono il giorno 5, successivamente ripresero il 21 fino al 24, sempre con modesta consistenza, intensificandosi successivamente il 25 e raggiungendo l'acme il giorno 26.

Le precipitazioni giornaliere, registrate dal Servizio Idrografico, dalle ore 9 del 24 novembre alle ore 9 del 26 novembre 1990 sono riportate nella Tabella 1.10.

stazione pluviometrica	bacino imbrifero	Quota stazione	giorno 25 (mm)	giorno 26 (mm)	Totale di 2 giorni
Piastre	Reno	741	32	237	269
Maresca	Reno – Maresca	1043	65	220	285
Pracchia	Reno – Maresca	627	26	137	163
Orsigna	Reno - Orsigna	806	56	226	282
Spedaletto Pistoiese	Reno-Limentra Sambuca	775	53	160	213
Diga di Pavana	Reno-Limentra Sambuca	480	16	175	191
Porretta Terme	Reno	349	11	131	142
Monteacuto delle Alpi	Reno – Silla	915	66	235	301
Lizzano in Belvedere	Reno – Silla	640	42	196	238
Acquerino	Reno – Limentra di Riola	890	47	147	194
Treppio	Reno – Limentra di Riola	710	45	213	258
Diga di Suviana	Reno – Limentra di Riola	500	21	123	144
Riola di Vergato	Reno – Limentra di Riola	240	9	73	82
Cottede	Reno – Setta	850	48	107	155
Diga del Brasimone	Reno – Setta	830	35	185	220
Burzanella	Reno – Setta	546	5	85	90
Monteombraro	Reno – Samoggia	727	1	60	61
Montepastore	Reno – Samoggia	596	2	60	62
Bologna – Uff. Idr.	Reno – Savena – Idice	51	1	22	23
Monghidoro	Reno – Idice	841	13	76	89
Pianoro	Reno – Savena	187	2	34	36
Firenzuola	Reno – Santerno	422	37	131	168
Barco	Reno – Santerno	741	27	109	136
Pietramala	Reno – Santerno	845	38	138	176
Castel del Rio	Reno – Santerno	221	30	50	80
Palazzuolo sul Senio	Reno - Senio	436	58	20	78
Casola Val Senio	Reno - Senio	195	7	23	30

Tab. 1.10: precipitazioni giornaliere, dalle ore 9 del 24 novembre alle ore 9 del 26 novembre 1990.

Il fenomeno meteorico mostra che, nella parte alta del bacino del Reno, le piogge dei due giorni consecutivi furono mediamente superiori (+ 6%) rispetto all'evento del novembre '66, mentre nella parte mediana tale raffronto si riduce a (- 28%) e addirittura a (- 47%) nei sottobacini .

La piena conseguente fu di proporzioni superiori al novembre '66 nella parte alta dell'asta principale di Reno e di un certo rilievo nella zona arginata; va ricordata soprattutto per la rotta dell'argine destro di Reno in località Bosco nei pressi di Malabergo a seguito di fontanazzo in corrispondenza del metanodotto SNAM sottopassante il fiume e per la notevole manovra di sbarramento all'Opera Reno.

I livelli e le portate registrate dal Servizio Idrografico sono riportati nella Tabella 1.11.

Corso d'acqua	Stazione idrometrica	Bacino tributario	Altezza idrometrica	Portata al colmo
Reno	Pracchia	kmq 41	2,46	240 mc/sec
Reno	Casalecchio Tiro a Volo	kmq 1051	4,40	1410 mc/sec
Samoggia	Calcara	kmq 170	2,07	72 mc/sec

Tab 1.11: Livelli e portate per alcune stazioni idrometriche.

Prendendo in esame le maggiori piene degli ultimi 40 anni precedenti si ha che: a Pracchia sia l'altezza idrometrica sia la portata della piena in parola sono state superiori a quelle registrate nel febbraio 1951 ove i valori furono: (m 2,33 e 214 mc/sec) e ancor più al novembre 1966 quando si registrò: (m 1,87 e 140 mc/sec). Mentre a Casalecchio Tiro a volo la piena di Reno è stata leggermente inferiore a quella del novembre '66 che registrò: (m 4,45 e 1510 mc/sec) e decisamente inferiore a quella del febbraio '51 quando si ebbe: (metri 5,30 e 1940 mc/sec).

Le informazioni di seguito riportate sono state desunte dalle registrazioni dell'impianto di telemisura dell'Ufficio Idrografico di Bologna:

25 novembre 1990

il SAMOGGIA a Bazzano max livello alle 19,15 con (0,29) al disotto del segno di guardia;

- a Calcara il max livello alle 20,30 con (2,07) al disotto del segno di guardia;
- il RENO a Vergato raggiunge il max .livello alle 17,00 con (5,47);

- a Casalecchio Chiusa raggiunge il max livello alle 22,00 con (2,55);
il SETTA a Sasso Marconi raggiunge il max livello alle 18,00 con (2,61);
il LAVINO a Lavino di sopra raggiunge il max livello alle 18,30 con (9,40);
- a Lavino di sotto raggiunge il max livello alle 21,30 con (9,48);
il SAVENA vivo a Ponte Caselle raggiunge il max livello alle 20,00 con (10,88);
l' IDICE a Pizzocalvo raggiunge il max livello alle 16,45 con (0,55);
- a Castenaso raggiunge il max livello alle 21,30 con (9,44);
il SANTERNO a Codrignano raggiunge il max livello alle 18,00 con (1,31).

26 novembre 1990

- il RENO alle ore 4,15 raggiunge il max livello al Sostegno con (28,48);
- alle ore 5,45 inizia lo scolmo in Cavo Napoleonico con lettura idrometrica all'Opera Reno = (21,25);
 - alle ore 7,30 raggiunge il max livello a Bagnetto con (27,35);
 - alle ore 8,15 raggiunge il max livello a Cento con (8,72);
 - alle ore 12,00 raggiunge il max livello all' Opera Reno con (21,61);
 - alle ore 17,00 si verifica un fontanazzo in sponda destra nei pressi del pil. 91 in corrispondenza del metanodotto SNAM, attraversante il fiume completamente interrato sia sotto l'alveo che sotto le golene e gli argini;
 - alle ore 17,30 si manovra sullo sbarramento a Reno per far defluire in Cavo una maggiore portata ed alleggerire di conseguenza il carico nel tronco di valle ove si era sviluppato il fontanazzo;
 - alle ore 17,45 raggiunge il max livello al Gallo con (12,60);
 - alle ore 19,00 raggiunge il max livello a Gandazzolo con (15,42);
 - alle ore 22,45 raggiunge il max livello alla Beccara con (10,55);
il SAMOGGIA alle ore 4,15 raggiunge il max livello ai Forcelli con (10,76);
- il LAVINO alle ore 3,15 raggiunge il max livello all' Impianto di Forcelli con (30,26);
- l' IDICE alle ore 7,30 raggiunge il max livello di monte sulla Chiavica Accursi con (13,69);
- alle ore 11,30 raggiunge il max livello di monte sulla Chiav. Cardinala con (10,01);
 - alle ore 23,30 raggiunge il max livello di monte al Chiavicone con (10,36);

il SILLARO alle ore 2,00 raggiunge il max livello a Sesto Imolese con (12,57);

- alle ore 24,00 raggiunge il max livello alla Chiavica Bastia con (9,74);
il SANTERNO alle ore 11,15 raggiunge il max livello a S.Bernardino con (9,77);
il SENIO alle ore 5,45 raggiunge il max livello a Castel Bolognese con (2,54);
- alle ore 22,00 raggiunge il max livello ad Alfonsine con (7,72) al disotto del segno di guardia.

Sul RENO il 27 novembre 1990 alle ore 0,30 si determina la definitiva rottura dell'argine destro con una breccia di circa 28 metri di larghezza ed una ulteriore fuoriuscita delle acque che allagavano circa 400 ha del territorio in destra del fiume prospiciente la rotta con un volume stimato sui 3 – 4 milioni di m³.

La derivazione del CAVO NAPOLEONICO, aperta il giorno 26 novembre, dopo 202 ore di funzionamento, veniva chiusa il 4 dicembre 1990 avendo consentito uno scolmo di 72.900.000 mc con una portata media di 100 m³/sec.

I tempi relativi delle varie fasi di piena si possono riassumere come segue:

- sul **Reno** da Vergato a Casalecchio **h 5,00'**
- il **Setta** da Sasso Marconi a Casalecchio..... **h 4,00'**
- la manovra di scolmo in Cavo inizia **h 7,45'** dopo il colmo a Casalecchio
- da Casalecchio a Cento**h 10,15'**
- da Cento all' Opera Reno..... **h 3,45'**
- il **fontanazzo**, nei pressi del Gallo, si verifica dopo **h 5,00'** dal colmo dell'Opera Reno e **h 0,45'** prima del colmo al Gallo
- dopo **h 0,30'** dall'avvenuto fontanazzo **manovra di sbarramento** sul Reno per alleggerire il carico a valle
- dall' Opera Reno al Gallo (condizionata dallo scolmo)..... **h 5,45'**
- da Gallo a Gandazzolo..... **h 1,15'**
- Da Gandazzolo alla Bastia..... circa **h 5,00'**

In sintesi:

- stato del terreno: imbevuto da precedenti piogge nel mese;

- piogge: concentrate in un giorno e di grande intensità nella parte alta del bacino con valori vicini ed anche superiori all'evento del novembre 1966, mentre scarsa nella parte mediana e nei sottobacini;
- colmi a Casalecchio: uno di grande valore ma di breve durata;
- portate al colmo: **a Casalecchio 1410 mc/sec;**
- singolarità: per il Reno deflussi regolari fino al verificarsi del fontanazzo e della conseguente rotta dell'argine destro nei pressi del (pil. 91); manovra di eccezionale impegno sullo sbarramento di Reno e sul Cavo con scolmo in Po di circa 73 milioni di metri cubi, effettuato in circa nove giorni, al fine di ridurre il deflusso altrimenti incontenibile sulla rotta;
- effetti: **sul Reno, nella parte montana modesti allagamenti a Porretta Terme, a Marzabotto e Pontecchio Marconi; nella parte arginata fontanazzo in sponda destra nei pressi del pil. 91 in corrispondenza del metanodotto SNAM e successiva rottura dell'argine destro con breccia di 28 metri di larghezza ed allagamento di circa 400 ha del territorio in destra Reno contenuto dallo scolo Riolo.**

Piena del Settembre 1994 (5_94)

Nel settembre del '94 si verificarono precipitazioni continue, intervallate da pochi giorni non piovosi, con punte d'intensità nei giorni 2 - 3 - 9 - 15 - 17 - 19 fino ad arrivare ad una forte concentrazione di pioggia (20 ore circa fra i giorni 21 e 22) che provocò lo stato di piena soprattutto nell'asta principale del fiume Reno.

Le precipitazioni giornaliere, registrate dal Servizio Idrografico, dalle ore 9 del 20 settembre alle ore 9 del 22 settembre 1994 sono riportati in tabella 1.12.

stazione pluviometrica	bacino imbrifero	Quota stazione	giorno 21 (mm)	giorno 22 (mm)	Totale di 2 giorni
Piastre	Reno	741	2	156	158
Maresca	Reno – Maresca	1043	2	197	199
Pracchia	Reno – Maresca	627	2	150	152
Orsigna	Reno - Orsigna	806	3	208	211
Diga di Pavana	Reno-Limentra Sambuca	480	-	102	102
Porretta Terme	Reno	349	-	179	179
Monteacuto delle Alpi	Reno – Silla	915	-	232	232
Lizzano in Belvedere	Reno – Silla	640	-	224	224
Acquerino	Reno – Limentra di Riola	890	5	56	61
Treppio	Reno – Limentra di Riola	710	-	94	94
Diga di Suviana	Reno – Limentra di Riola	500	-	93	93
Riola di Vergato	Reno – Limentra di Riola	240	-	133	133
Cottede	Reno – Setta	850	1	74	75
Diga del Brasimone	Reno – Setta	830	-	87	87
Burzanella	Reno – Setta	546	-	129	129
Sasso Marconi	Reno - Setta	130	-	63	63
Monteombraro	Reno – Samoggia	727	-	66	66
Bologna – Uff. Idr.	Reno – Savena – Idice	51	-	59	59
Monghidoro	Reno – Idice	841	-	70	70
Pianoro	Reno – Savena	187	-	52	52
Firenzuola	Reno – Santerno	422	-	51	51
Barco	Reno – Santerno	741	1	51	52
Pietramala	Reno – Santerno	845	-	66	66
Palazzuolo sul Senio	Reno - Senio	436	-	58	58
Casola Val Senio	Reno - Senio	195	1	36	37

Tab. 1.12: precipitazioni giornaliere, dalle ore 9 del 20 settembre alle ore 9 del 22 settembre 1994.

I valori della tabella, indicati nelle 24 ore che vanno dalle 9 del giorno 21 alle 9 del giorno 22, sono di fatto concentrati tutti in 19 - 20 ore con una intensità che ha fatto registrare:

- a Maresca 182 mm in 15 ore,
- ad Orsigna 200 mm in 16 ore,
- a Porretta Terme 152 mm in 11 ore,
- a Montacuto delle Alpi 197 mm in 12 ore,

a Lizzano in Belvedere 195 mm in 12 ore.

Raffrontando la pioggia di un giorno, nella parte alta del bacino del Reno, con precedenti eventi di piena (26 novembre '90 - 4 novembre '66 - 6 febbraio '51) si ha che:

- alle Piastre max il 26 nov 90 con 237 mm - contro i 156 mm del 22 set 94,
- ad Orsigna max il 26 nov 90 con 226 mm - contro i 208 mm del 22 set 94,
- a Porretta Terme max 179 mm del 22 set 94 - contro il precedente max del 4 nov 66 pari a 150 mm,
- a Montacuto Alpi max il 4 nov 66 con 240 mm - contro i 232 mm del 22 set 94,
- a Lizzano in Belvedere max 224 mm del 22 set 94 - contro il precedente max del 26 nov. 90 pari a 196 mm,
- ad Acquerino max il 4 nov 66 con 222 mm - contro i 56 mm del 22 set 94,
- a Cottede max il 4 nov 66 con 201 mm - contro i 74 mm del 22 set 94.

Le precipitazioni così concentrate ed intense sull'alta valle del Reno, in un terreno già imbevuto dalle piogge dei giorni precedenti, provocarono uno stato di piena molto vicino all'evento del novembre 1990.

Le informazioni di seguito riportate sono state desunte dalle registrazioni dell'impianto di telemisura dell'Ufficio Idrografico di Bologna:

22 settembre 1994

il RENO a Vergato max .livello alle 2,00 con (5,39);

- a Casalecchio Chiusa max livello alle 7,00 con (2,48);
- alle ore 15,00 inizia lo scolmo in Cavo Napoleonico con lettura idrometrica all'Opera Reno = (20,86);
- al Sostegno max livello alle 16,15 con (28,75);
- a Bagnetto max livello alle 17,30 con (27,05);
- a Cento max livello alle 18,15 con (8,68);
- all' Opera Reno max livello alle 22,30 con (21,46);
- alle ore 23,00 a Gandazzolo si sono chiusi i portoni di Savena con (13,56);

il SETTA a Sasso Marconi max .livello alle 8,30 con (1,86);

il SAMOGGIA a Bazzano max livello alle 3,30 con (0,78);

- a Calcara max livello alle 6,00 con (2,38) al disotto del segno di guardia;
- al Paltrone max livello alle 7,30 con (37,28);
- ai Forcelli max livello alle 13,00 con (11,71);
- il LAVINO a Lavino di sopra max livello alle 3,30 con (9,57);
- a Lavino di sotto max livello alle 6,30 con (10,78);
- all' Impianto dei Forcelli max livello alle 13,00 con (31,02);
- il SAVENA abbandonato alla Dozza max livello alle 2,30 con (11,73);
- ai Casoni max livello alle 11,15 con (13,76);
- il SAVENA vivo a Pianoro max livello alle 6,00 con (0,78) al disotto del segno di guardia;
- al Ponte delle Caselle max livello alle 8,00 con (10,83);
- l' IDICE a Castenaso max livello alle 9,00 con (9,98);
- alla Chiavica Brocchetti max livello alle 21,15 con (12,19);
- alla Chiavica Cardinala max livello alle 23,30 con (10,17);
- il SILLARO a Castel S. Pietro max livello alle 6,45 con (1,12) ;
- al Correcchio max livello alle 12,45 con (20,12);
- a Sesto Imolese max livello alle 12,45 con (11,88);
- il SANTERNO a Codrignano max livello alle 10,00 con (0,85);
- a Mordano max livello alle 14,30 con (10,70);
- a S. Agata max livello alle 17,00 con (11,03);
- a S. Bernardino max livello alle 21,00 con (8,71);
- il SENIO a Castel Bolognese max livello alle 13,00 con (2,92);
- a Cotignola max livello alle 18,30 con (11,61);
- a Fusignano max livello alle 23,30 con (8,41) al disotto del segno di guardia.

23 settembre 1994

- il RENO alle ore 6,00 fine dello scolmo in Cavo Napoleonico con (21,04) all'Opera Reno;
- alle ore 8,30 raggiunge il max livello al Gallo con (11,70);
 - alle ore 13,00 raggiunge il max livello a Gandazzolo con (15,17);
 - alle ore 18,30 raggiunge il max livello alla Beccara con (9,90);
 - alle ore 18,30 raggiunge il max livello alla Bastia con (9,03);

il SAVENA abbandonato alle ore 6,30 raggiunge il max livello a Gandazzolo con (14,00);

- alle ore 9,00 a Gandazzolo si sono aperti i portoni con Reno a (13,75)

l' IDICE alle ore 18,00 raggiunge il max livello al Chiavicone monte con (8,22) al di sotto del segno di guardia;

il SENIO ad Alfonsine max livello alle 3,30 con (7,38) al di sotto del segno di guardia.

La derivazione del CAVO NAPOLEONICO, aperta il giorno 22 settembre alle ore 15,00, dopo 15 ore di funzionamento, veniva chiusa il 23 settembre 1994 avendo consentito uno scolmo di circa 15.000.000 mc con una portata media di 280 m³/sec. La chiusura delle porte vinciane sul Savena a Gandazzolo sono state di 34 ore.

I tempi relativi delle varie fasi di piena si possono riassumere come segue:

- sul **Reno** da Vergato a Casalecchio **h 5,00'**
- il **Setta** a Sasso Marconi ha espresso il suo colmo dopo **h 1,30'** del colmo verificato a Casalecchio
- la manovra di scolmo in Cavo inizia **h 8,00'** dopo il colmo a Casalecchio
- da Casalecchio a Cento **h 11,15'**
- da Cento all' Opera Reno **h 2,45'**
- dall' Opera Reno al Gallo (condizionata dallo scolmo)..... **h 10,00'**
- da Gallo a Gandazzolo..... **h 4,30'**.
- Da Gandazzolo alla Bastia..... **h 5,30'**

In sintesi:

- stato del terreno: imbevuto dalle piogge dei giorni precedenti;
- piogge: concentrate in un giorno e di grande intensità nella parte alta del bacino con valori vicini ed anche superiori all'evento del novembre 1966 e del novembre 1990, mentre scarsa nella parte mediana e nei sottobacini;
- colmi a Casalecchio: uno di grande valore ma di breve durata;
- portate al colmo: **a Casalecchio 1350 mc/sec;**
- singolarità: per il Reno deflussi regolari fino quasi alla confluenza del Samoggia, ma a Cento il livello è risultato di soli 4 cm inferiore a quello raggiunto nella precedente

piena del novembre 1990 senz'altro per l'effetto del maggior contributo di Samoggia; la manovra sul Cavo con scolmo in Po di circa 15 milioni di metri cubi, effettuato in 15 ore ha prodotto una eccessiva riduzione del franco allo sfioratore del Gallo 2,00 metri circa; alla Bastia, per effetto della scarsa portata d'Idice e di Sillaro nonché di quella di Reno decisamente scolmata in Cavo ha fatto registrare un livello di tutta tranquillità;

- effetti: non risultano segnalazioni di danni.

Piena del novembre 2000 (2_00)

La piena di cui si tratta ha interessato soltanto i due corsi d'acqua più lunghi del bacino le cui propaggini si inoltrano sull'Appennino toscano (Reno e Santerno); è scaturita dalle piogge dei primi di novembre su un bacino imbrifero discretamente imbibito dalle precipitazioni del mese di ottobre, ove i giorni piovosi sono stati 15 e l'entità della pioggia mensile si è aggirata mediamente intorno ai 200 mm. Le precipitazioni giornaliere, registrate dal Servizio Idrografico, dalle ore 9 del 2 novembre alle ore 9 del 7 novembre 2000 sono riportate nella Tabella 1.13.

stazione pluviometrica	bacino imbrifero	Quota stazione	giorno 3 (mm)	giorno 4 (mm)	giorno 5 (mm)	giorno 6 (mm)	giorno 7 (mm)	Totale di 5 giorni
Piastre	Reno	741	55	96	4	22	165	342
Case Bezzi	Reno-Limentra Sambuca	860	68	94	4	29	131	326
Pracchia	Reno – Maresca	627	69	113	5	38	173	398
Orsigna	Reno – Orsigna	806	77	93	6	36	152	364
Stabiazioni	Reno-Limentra Sambuca	755	51	103	7	18	112	291
Diga di Pavana	Reno-Limentra Sambuca	480	34	80	2	20	131	267
Porretta Terme	Reno	349	28	56	1	14	92	191
Monteacuto delle Alpi	Reno – Silla	915	70	89	7	34	145	345
Bombiana	Reno – Silla	804	15	29	2	11	60	117
Lizzano in Belvedere	Reno – Silla	640	49	60	7	37	111	264
Acquerino	Reno – Limentra di Riola	890	62	88	11	24	123	308
Treppio	Reno – Limentra di Riola	710	54	111	7	37	182	391
Diga di Suviana	Reno – Limentra di Riola	500	15	51	1	11	82	160
Riola di Vergato	Reno – Limentra di Riola	240	5	25	1	20	34	85
Monte Coroncina	Reno – Setta	1060	52	52	8	14	120	246
Cottede	Reno – Setta	850	43	54	9	24	123	253
Diga del Brasimone	Reno – Setta	830	30	59	3	34	116	242
Monzuno	Reno – Setta	620	3	38	-	-	51	92
Monteombraro	Reno – Samoggia	727	-	14	1	-	16	31
Bologna – Uff. Idr.	Reno – Savena – Idice	51	5	10	-	-	9	24
Monghidoro	Reno – Idice	841	8	41	4	13	53	119
Pianoro	Reno – Savena	187	3	22	-	-	19	44
San Clemente	Reno – Sillaro	177	1	11	-	-	16	28
Traversa	Reno – Santerno	871	40	72	8	3	116	239
Pietramala	Reno – Santerno	845	40	70	7	40	113	270
Barco	Reno – Santerno	741	46	40	16	11	95	208
Firenzuola	Reno – Santerno	422	36	47	12	10	93	198
Castel del Rio	Reno – Santerno	221	6	20	6	8	34	74
Palazzuolo sul Senio	Reno – Senio	436	27	34	14	8	65	148
Casola Val Senio	Reno – Senio	195	1	9	3	-	23	36

Tab. 1.13: Precipitazioni giornaliere, dalle ore 9 del 2 novembre alle ore 9 del 7 novembre 2000.

La pioggia dei giorni 3 e 4 nell'alta vallata del Reno è risultata mediamente di circa 150 mm, mentre quella dei giorni 6 e 7 è risultata mediamente di 170 mm circa. Nell'alta valle del Santerno il fenomeno meteorico ha dato invece risultati molto più modesti (giorni 3 e 4 = circa 100 mm) e (giorni 6 e 7 = circa 130 mm).

La piena conseguente ha provocato due onde, distanziate fra loro di 70 ore circa, i cui valori di livello e di portata sono stati conseguenti alle piogge sopra descritte, infatti la seconda intumescenza è risultata superiore nella prima.

Nell'arco dei 5 giorni di precipitazioni considerando il più piovoso, ossia quello del giorno 7 e raffrontandolo con precedenti eventi di piena solo per la parte alta del bacino del Reno, si ha:

Stazione pluviometrica	Quota stazione	Pioggia del 6 febbraio 1951	Poggia del 4 novembre 1966	Pioggia del 26 novembre 1990	Pioggia del 22 settembre 1994	Pioggia del 7 novembre 2000
Piastre	741	207	192	237	156	165
Pracchia	627	180	149	137	150	173
Montacuto delleAlpi	915	157	240	235	232	145
Lizzano in Belvedere	640	143	177	196	224	111
Acquerino	890	170	222	147	56	123
Treppio	710	100	202	213	94	182
Cottede	850	82	201	107	74	123

Tab. 1.14: Raffronto delle piogge nella parte alta del bacino, per i 5 eventi descritti.

Le precipitazioni del 7 novembre 2000 non hanno superato in nessuna stazione quelle dei precedenti eventi risultando peraltro più uniformemente distribuite.

I livelli e le portate registrate dal Servizio Idrografico sono riportati in Tabella 1.15:

Corso d'acqua	Stazione idrometrica	Bacino tributario	Altezza idrometrica	Portata al colmo
Reno	<i>Casalecchio Tiro a Volo</i>	kmq 1051	3,17	1240 mc/sec
Idice	Castenaso	kmq 397	9,20	150 mc/sec
Santerno	Mordano	kmq 460	11,97	160 mc/sec

Tab. 1.15: Livelli idrometrici e portate per alcune stazioni di misura.

Le informazioni di seguito riportate sono state desunte dalle registrazioni dell'impianto di telemisura dell'Ufficio Idrografico di Bologna:

3 novembre 2000

il RENO a Vergato max .livello alle 21,00 con (3,26);

il SETTA a Sasso Marconi max .livello alle 23,00 con (1,01);

4 novembre 2000

il RENO a Casalecchio Chiusa max livello alle 1,00 con (1,39);

- al Sostegno max livello alle 9,45 con (25,09);

- a Bagnetto max livello alle 10,30 con (24,19);
- a Cento max livello alle 12,30 con (6,07);
- all' Opera Reno max livello alle 16,15 con (19,71) al disotto del segno di guardia;

5 novembre 2000

il RENO al Gallo max livello alle 1,00 con (9,38);

- a Gandazzolo max livello alle 6,30 con (13,03);
- alla Bastia max livello alle 14,15 con (6,86) al disotto del segno di guardia;

6 novembre 2000

il RENO a Vergato max livello alle 21,00 con (5,04)

il SETTA a Sasso Marconi max livello alle 23,30 con (2,27)

il SAVENA a Pianoro max livello alle 22,30 con (1,13)

7 novembre 2000

il RENO a Casalecchio Chiusa max livello alle 1,30 con (2,20);

- a Bonconvento max livello alle 7,15 con (10,90);
- al Sostegno max livello alle 10,30 con (27,84);
- a Bagnetto max livello alle 11,00 con (26,68);
- a Cento max livello alle 13,00 con (8,22);
- alle ore 14,00 inizia la manovra sullo sbarramento dell'Opera Reno per condizionare il livello di valle non potendo scolare in Cavo;
- all' Opera Reno max livello alle 19,15 con (21,97);
- alle ore 22,00 termina la manovra sullo sbarramento dell'Opera Reno che ha condizionato il livello di valle;

il SAVENA al Ponte Caselle max livello alle 0,30 con (11,01);

l' IDICE a Castenaso max livello alle 1,30 con (9,20);

- a S.Martino max livello alle 5,00 con (9,29);
- a S.Antonio max livello alle 7,00 con (10,48);

il SANTERNO a Codrignano max livello alle 1,30 con (1,44);

- a Imola max livello alle 2,30 con (2,80);
- a Mordano max livello alle 6,45 con (11,97);
- a Sant'Agata max livello alle 9,45 con (11,90);
- a S.Bernardino max livello alle 13,00 con (10,51);

8 novembre 2000

il RENO al Gallo max livello alle 3,30 con (12,50)

- a Gandazzolo max livello alle 7,30 con (16,02)
- alla Bastia max livello alle 17,30 con (8,77)

Lo scolmo della piena di Reno in CAVO NAPOLEONICO, non è stato effettuato per la contestuale impossibilità di scaricare in Po, che sin dalla sera del giorno 4 aveva superato il livello di attenzione = 10,00 e le previsioni, poi avveratesi, facevano ipotizzare un ulteriore aumento di quel livello.

L'operazione invece effettuata è stata quella di condizionare il deflusso all'Opera Reno (dalle ore 14,00 alle ore 22,00 del giorno 7) in maniera tale da evitare lo sfioro al Gallo. La chiusura delle porte vinciane sul Savena a Gandazzolo sono state di 63 ore(dalle ore 17,00 del 7 alle 8,00 del 10).

I tempi relativi delle varie fasi di piena, considerando soltanto la seconda intumescienza, si possono riassumere come segue:

- sul **Reno** da Vergato a Casalecchio **h 4,30'**
- il **Setta** a Sasso Marconi ha espresso il suo colmo dopo **h 2,30'** del colmo verificato a Vergato
- da Casalecchio a Cento**h 11,30'**
- la manovra all'Opera Reno inizia **h 1,00'** dopo il colmo a Cento
- da Cento all' Opera Reno (*tempo condizionato dalla manovra*) **h 6,15'**
- dall' Opera Reno al Gallo (*tempo condizionato dalla manovra*) **h 8,15'**
- da Gallo a Gandazzolo..... **h 4,00'**
- a Gandazzolo alla Bastia **h 10,00'**

In sintesi:

- stato del terreno: imbevuto dalle piogge del mese precedente
- piogge: distribuite in maniera uniforme nella parte alta del bacino con valori non superiori a precedenti importanti piene
- colmi a Casalecchio:due intervallati di 70 ore, il primo di scarso valore ed il secondo di grande valore ma di breve durata
- portate al colmo: **a Casalecchio 1240 mc/sec** (2° colmo)

- singolarità: per il Reno deflussi regolari su tutta l'asta; la manovra di sbarramento all'Opera Reno è stata effettuata per evitare lo sfioro al Gallo non potendo scolare in Cavo Napoleonico per gli alti livelli di Po; la manovra ha prodotto un franco allo sfioratore del Gallo di metri 1,25; alla Bastia, per la scarsa portata d'Idice e di Sillaro ha fatto registrare un livello di tutta tranquillità
- effetti: non risultano segnalazioni di danni.

ALLEGATO II

Campioni di osservazioni

Vengono riportati i campioni di osservazioni, dei massimi annuali di precipitazione espressi in mm, per le durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore per tutte le stazioni prese in considerazione, utilizzati per la costruzione delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica.

Acquerino

anno	1	3	6	12	24
1990	23.2	53.6	90.6	126.6	156.6
1991	30.2	62.8	107.6	161.6	185.0
1992	26.6	49.4	59.8	79.2	112.0
1993	45.2	51.4	72.0	91.6	95.4
1994	31.2	63.2	69.2	91.8	112.6
1995	18.6	34.2	50.4	67.6	95.6
1996	20.2	35.8	68.8	106.6	157.4
1997	23.0	40.6	47.4	63.4	118.4
1998	33.6	74.2	114.0	147.0	215.0
1999	23.0	49.4	58.6	85.0	90.8
2000	42.2	66.6	84.8	122.0	181.2
2001	20.8	45.0	58.6	74.2	90.2
2002	35.4	55.8	93.8	119.6	136.0
2003	30.2	54.6	85.0	106.8	133.8
2004	30.4	52.0	67.6	84.4	105.4

Bombiana

anno	1	3	6	12	24
1990	19.8	39.4	61.2	85.6	97.2
1991	15.2	32.8	53.0	83.0	89.2
1992	20.4	35.0	35.0	35.8	49.4
1993	28.4	30.4	31.4	41.8	54.2
1994	26.6	67.4	99.0	143.8	158.0
1995	26.2	44.4	54.2	66.0	101.2
1996	28.8	47.6	59.8	78.2	80.8
1997	20.2	24.8	34.0	42.4	47.8
1998	23.4	32.6	43.0	49.2	51.2
1999	34.0	40.0	40.0	43.8	70.8
2000	35.8	49.6	50.0	56.6	69.6
2001	19.2	25.6	30.2	30.6	41.2
2002	20.6	34.6	46.2	53.4	64.8
2003	32.2	45.6	46.8	58.6	84.2
2004	17.4	40.0	62.6	81.8	83.0

Sasso Marconi

anno	1	3	6	12	24
1973	34.80	42.40	42.4	55.2	81.0
1991	64.0	71.4	71.6	71.6	83.0
1992	21.4	24.8	39.2	54.0	79.0
1993	40.4	65.6	72.4	72.6	72.6
1994	29.0	52.8	65.2	69.0	96.8
1995	13.4	32.2	43.2	65.2	68.6
1996	20.0	25.6	35.4	61.0	91.6
1997	11.4	17.0	22.6	28.2	34.0
1998	23.8	24.2	27.2	31.6	36.4
1999	44.8	67.4	68.4	70.0	70.2
2002	19.0	30.2	34.6	41.4	48.4
2003	21.2	21.2	33.4	43.2	65.2
2004	17.4	27.0	41.0	52.2	53.4

Montacuto Vallese

anno	1	3	6	12	24
1991	18.4	31.4	58.2	79.2	83.4
1992	24.8	39.4	39.4	43.0	59.8
1993	11.0	14.0	22.4	26.0	37.0
1994	33.4	52.8	66.8	92.2	104.2
1995	16.2	31.4	45.8	63.2	110.6
1996	15.4	26.4	29.8	44.6	61.6
1997	28.0	36.8	37.8	37.8	46.8
1998	15.8	34.0	49.6	60.4	67.4
1999	34.4	40.6	40.6	68.6	75.6
2000	14.8	38.0	42.6	43.0	49.6
2001	18.0	29.4	34.0	35.2	52.4
2002	19.4	37.4	50.4	53.4	65.6
2003	19.2	26.6	36.6	52.6	75.8
2004	24.2	47.8	76.6	76.6	76.6

Bologna San Luca

anno	1	3	6	12	24
1935	30.4	30.4	33	49	56.2
1936	25.8	28	34.4	40.6	75
1937	22	40.6	44.6	45.2	71.6
1938	16	17.6	19.2	38.2	47.6
1939	13	19.6	36.8	55.8	75.8
1940	32.6	36.8	46.4	83.6	120.8
1941	36.6	41.2	41.2	41.2	57.2
1942	26.6	27.2	27.4	29.8	36.2
1943	22.2	29.4	31.4	49.2	66
1944	22.2	26.4	28.2	31.2	41
1946	20.6	26.8	40.8	51.6	53.8
1947	24	24	36.4	57.4	69
1948	15	32	57.2	78	115.8
1949	13.2	21.4	31.6	53	77.4
1950	10.6	15.4	22.4	28	40.4
1951	25.2	25.8	31	43.6	84
1952	40	46.4	48.4	60.8	60.8
1953	31.6	31.6	31.6	38.8	55.8
1955	53.8	57.8	57.8	57.8	57.8
1956	11	22.6	44	63.2	81
1957	17	19.6	30	45.4	65.4
1958	24.2	29	49.4	74	116.8
1959	23.2	31.8	39.2	62.6	86.6
1960	37.2	44	63	67.4	67.4
1961	32.4	58.4	65.4	65.6	69.4

anno	1	3	6	12	24
1962	15.4	25.8	36.2	50.4	71.4
1963	20.4	36.0	60.0	87.6	97.0
1964	22.0	28.2	31.2	46.2	64.6
1965	32.4	32.6	39.4	39.6	43.2
1967	15.0	30.0	41.0	52.0	52.0
1968	20.0	25.0	29.6	47.6	61.2
1969	16.4	28.6	40.0	44.4	44.8
1970	16.6	16.6	17.0	26.8	36.4
1971	12.0	16.4	30.8	40.0	42.4
1972	19.0	40.0	59.4	87.4	108.2
1990	39.8	41.4	51.0	73.4	90.8
1991	23.6	25.6	30.2	54.4	72.0
1992	27.8	36.4	39.2	56.4	78.4
1993	34.8	42.6	42.6	42.6	51.6
1994	16.0	35.4	49.4	51.8	79.4
1995	21.8	39.2	59.2	81.4	116.6
1996	12.4	24.2	31.4	52.2	85.6
1997	11.8	21.2	26.0	31.4	49.6
1998	12.8	22.8	32.8	43.0	43.2
1999	16.2	33.8	47.0	57.2	63.0
2000	24.2	32.4	60.4	98.2	102.4
2001	30.2	39.4	41.2	42.4	53.4
2002	30.0	33.0	35.8	55.8	69.6
2003	20.2	43.6	45.0	46.4	59.2
2004	29.6	45.4	46.2	56.0	56.6

Diga di Pavana

anno	1	3	6	12	24
1947	17.6	30.6	47.8	95.2	126.2
1948	26.8	40.0	52.0	75.0	88.6
1949	18.6	35.2	45.6	69.0	92.2
1950	23.0	43.0	57.8	76.2	107.6
1951	20.0	52.0	82.4	101.4	148.8
1952	24.8	57.0	88.6	124.8	150.6
1953	20.0	46.6	48.0	48.0	71.2
1954	20.0	36.8	50.8	52.2	77.0
1955	51.0	73.2	78.6	90.4	97.6
1956	20.0	23.0	40.0	60.6	79.0
1957	24.8	43.4	66.2	87.4	101.6
1958	19.0	42.0	61.8	78.0	79.4
1959	16.4	28.8	38.8	60.2	95.8
1960	23.4	30.0	45.0	70.2	78.6
1961	19.0	34.0	55.4	74.0	107.6
1962	25.8	31.2	38.4	58.6	68.2
1963	30.8	42.6	60.8	80.0	98.4
1964	20.0	40.0	49.2	64.6	73.2
1965	58.6	64.2	64.4	64.4	111.0
1966	58.0	88.0	95.0	148.0	229.0
1967	23.8	35.0	60.4	86.2	86.4

anno	1	3	6	12	24
1968	57.6	60.2	67.0	97.0	114.0
1969	27.8	35.0	66.2	96.0	129.2
1970	23.8	29.8	45.4	55.2	77.8
1971	22.4	22.6	39.4	51.2	81.4
1972	28.6	43.8	64.0	81.4	108.0
1973	22.8	35.8	54.8	65.0	95.8
1990	41.4	68.4	92.4	143.8	177.4
1991	22.2	43.2	70.4	99.6	111.2
1992	38.0	56.4	56.8	82.6	95.8
1993	34.6	59.0	59.6	67.0	91.0
1994	47.0	73.8	83.8	92.4	112.0
1995	15.6	33.6	44.6	62.6	105.0
1996	19.6	30.0	38.0	58.2	69.6
1997	17.4	37.8	47.2	71.6	96.8
1998	24.4	37.6	58.4	67.6	71.6
1999	37.2	52.4	59.0	66.8	94.2
2000	21.4	48.0	70.4	122.6	137.8
2001	25.6	36.2	39.0	45.6	64.6
2002	18.8	36.0	43.8	55.8	74.0
2003	30.4	51.8	68.2	89.8	118.0
2004	28.4	59.6	85.8	99.8	103.0

Cottede

anno	1	3	6	12	24
1938	20.0	39.4	45.8	80.0	118.0
1939	10.6	21.6	38.4	56.0	59.4
1940	20.2	34.4	58.2	95.8	107.0
1941	20.0	27.4	37.4	46.0	55.2
1942	33.8	43.8	47.8	50.0	52.2
1946	16.6	34.2	56.6	82.8	93.2
1947	22.8	33.0	47.2	84.2	123.8
1948	39.0	62.8	80.6	93.6	101.4
1949	22.0	32.0	54.0	88.4	97.0
1950	26.2	36.6	40.0	52.0	87.4
1951	26.8	41.8	54.4	89.4	133.8
1952	40.0	74.8	130.8	142.2	149.4
1953	16.0	28.6	40.2	51.8	64.0
1954	18.8	28.4	33.6	44.2	61.4
1955	23.6	42.0	46.4	64.8	117.6
1956	22.2	23.0	38.4	63.0	68.2
1957	17.0	35.0	48.0	58.2	75.2
1958	52.0	70.0	78.8	80.2	90.8
1959	43.4	46.8	46.8	58.0	97.2
1960	30.6	38.6	40.8	55.8	86.4
1961	23.0	32.8	46.6	66.6	102.6
1962	31.0	32.4	33.4	48.2	67.8
1963	25.2	51.6	63.6	92.8	115.4

anno	1	3	6	12	24
1964	31.2	58.6	60.4	64.4	74.2
1965	42.8	47.0	59.0	67.0	101.6
1966	20.8	49.8	94.8	132.0	212.2
1967	26.0	40.0	48.8	55.6	72.4
1968	23.0	44.6	46.6	62.8	100.4
1969	21.8	30.0	41.6	62.0	78.4
1970	16.0	29.2	38.0	75.8	100.2
1971	20.0	42.8	54.2	64.8	84.0
1972	17.4	23.0	39.0	58.8	97.0
1990	50.6	52.8	62.2	92.6	129.0
1991	25.6	49.8	92.0	136.0	151.0
1992	23.4	48.6	51.8	71.2	104.8
1993	14.2	29.4	51.0	64.8	71.6
1994	32.4	66.2	66.2	66.2	94.0
1995	26.6	38.4	42.6	55.6	92.8
1996	25.6	30.4	59.4	99.4	110.2
1997	13.6	31.4	40.8	56.6	60.6
1998	28.2	42.6	68.2	106.2	151.2
1999	33.4	54.0	56.8	72.8	87.4
2000	21.4	46.2	62.2	118.0	142.2
2001	16.8	38.4	73.0	130.2	144.4
2002	22.0	38.6	51.6	80.0	93.2
2003	38.0	53.4	74.2	99.8	129.0
2004	42.4	81.2	107.4	107.4	107.4

Orsigna

anno	1	3	6	12	24
1990	32.8	83.8	151.2	225.0	271.6
1991	22.2	40.8	59.2	116.8	131.8
1992	31.2	62.2	111.0	119.6	137.2
1993	30.8	79.2	111.4	128.4	166.8
1994	50.4	99.2	117.0	163.8	208.4
1995	30.0	71.4	80.2	89.4	151.4
1996	41.6	48.2	53.6	82.4	108.2
1997	30.6	67.2	86.2	120.2	203.6
1998	29.4	55.2	77.8	93.2	100.2
1999	20.0	49.4	74.4	129.0	154.0
2000	24.4	54.6	92.2	153.2	174.2
2001	19.6	44.8	54.8	85.2	108.2
2002	22.0	51.8	87.8	116.0	131.2
2003	22.0	46.6	77.0	97.0	123.4
2004	36.4	71.0	103.2	122.0	123.2

Piastre

anno	1	3	6	12	24
1991	29.6	58.2	70.4	124.8	143.6
1992	28.6	59.8	101.8	139.8	159.0
1993	29.6	56.4	71.0	90.0	112.0
1994	41.4	56.8	77.0	112.2	140.4
1995	29.8	41.4	75.6	101.6	110.4
1996	17.6	33.2	53.0	78.4	103.4
1997	31.2	51.0	60.8	74.6	125.4
1998	27.8	55.4	79.8	90.0	95.6
1999	22.6	36.4	49.0	77.2	111.4
2000	36.8	65.4	115.0	172.0	184.2
2001	27.4	55.0	71.0	89.2	108.2
2002	53.0	122.2	171.2	213.8	221.6
2003	19.6	44.0	63.4	89.8	110.8
2004	39.4	77.2	97.2	119.0	130.4

Diga del Brasimone

anno	1	3	6	12	24
1928	18.8	35.0	51.0	70.0	93.2
1929	23.0	37.0	47.6	66.6	82.8
1930	35.6	41.6	50.4	51.2	63.8
1931	30.0	41.8	54.0	84.4	98.6
1933	27.8	35.0	50.0	69.4	86.0
1934	38.2	38.4	62.6	91.2	142.8
1935	20.6	42.4	65.4	75.0	85.6
1936	15.2	37.0	47.8	61.0	78.6
1937	36.4	47.6	55.2	65.0	99.2
1938	25.0	38.6	43.0	64.4	121.6
1939	27.2	38.0	48.0	57.8	75.4
1940	19.0	46.0	82.4	114.8	138.8
1941	17.6	27.6	35.0	41.0	62.4
1943	20.6	25.4	40.0	54.2	75.4
1944	37.0	40.0	44.0	66.2	77.0
1945	22.0	31.0	52.0	67.8	96.8
1946	34.8	54.6	74.4	90.2	93.6
1947	18.6	25.0	45.0	81.8	114.4
1948	28.0	50.6	63.2	68.8	81.0
1949	30.0	32.0	37.4	55.0	84.6
1950	24.6	33.0	46.0	69.2	100.8
1951	20.4	40.8	58.0	84.8	141.4
1952	33.0	60.0	107.8	135.6	145.0
1953	23.4	36.2	43.2	48.2	86.8
1954	30.6	40.2	40.8	41.6	57.6
1955	39.0	61.0	66.2	70.6	121.0
1956	16.0	33.6	58.0	80.8	86.8
1957	21.4	31.0	54.0	76.0	107.0
1958	41.0	60.4	62.0	62.0	86.0
1959	26.0	49.0	73.8	90.0	146.0
1960	20.2	30.6	48.0	72.8	90.2
1961	25.8	36.0	60.0	86.4	90.2
1962	24.4	36.0	38.6	62.4	72.0
1963	31.0	53.0	72.6	95.0	112.2
1964	35.0	57.4	59.4	73.4	73.4

anno	1	3	6	12	24
1964	63.2	57.4	59.4	73.4	73.4
1965	61.0	71.4	79.0	110.8	131.6
1966	25.0	69.2	71.0	143.2	227.0
1967	30.4	42.8	56.6	75.8	77.6
1968	19.4	40.4	71.4	94.2	121.6
1969	27.8	38.0	67.0	97.6	113.8
1970	17.0	36.6	40.4	57.2	82.4
1971	32.0	30.6	44.2	63.8	86.8
1972	36.2	38.4	57.0	80.0	106.2
1973	22.0	38.6	62.6	81.2	120.6
1974	20.0	33.0	54.4	79.4	94.2
1975	29.6	34.0	37.4	62.0	105.4
1976	25.2	40.0	56.8	56.8	82.8
1977	15.8	40.6	67.4	73.8	103.2
1978	27.6	38.0	70.0	82.6	103.0
1981	28.0	40.0	56.0	89.4	144.0
1982	19.0	31.6	40.0	71.0	124.0
1983	28.0	26.8	42.0	74.0	123.0
1984	20.6	50.6	60.2	61.8	62.0
1985	21.4	24.4	31.6	57.0	74.2
1986	34.6	25.8	47.4	66.2	73.8
1987	25.0	58.6	64.4	93.6	158.4
1988	29.6	33.4	42.6	67.8	97.2
1989	24.6	50.8	56.0	73.0	86.4
1990	27.4	68.0	118.6	166.4	195.4
1991	29.6	60.8	91.0	126.0	138.2
1992	17.2	50.4	50.8	65.6	79.4
1993	32.8	28.0	42.2	51.8	73.6
1994	28.4	61.6	65.4	67.6	101.8
1995	15.8	47.2	52.6	62.0	105.2
1996	18.6	26.4	50.8	63.0	83.6
1997	25.8	35.8	51.6	84.6	120.6
1998	20.4	41.4	56.2	61.4	73.2
1999	28.0	27.6	52.2	69.6	81.0
2000	13.6	55.4	72.2	137.2	146.8
2001	42.0	19.8	32.4	43.2	52.2
2002	19.4	47.6	48.2	61.8	80.0
2003	49.0	38.4	61.2	82.2	113.0

Diga di Suviana

anno	1	3	6	12	24
1947	27.6	29.2	33.8	54.0	71.2
1948	19.6	35.4	40.4	55.0	68.0
1949	16.0	36.4	59.4	83.0	109.0
1950	41.0	44.2	51.8	53.2	81.4
1951	24.6	35.2	39.0	51.2	81.4
1952	24.0	36.2	60.0	91.0	104.6
1953	16.2	24.0	32.4	49.0	67.8
1954	12.8	21.4	32.2	33.6	54.2
1955	56.0	77.4	80.0	88.4	89.6
1956	22.0	25.4	38.4	51.4	67.4
1958	19.8	30.4	31.8	42.0	78.4
1959	17.0	26.4	32.4	59.6	63.2
1960	26.6	32.6	53.6	74.4	85.0
1961	21.6	26.4	48.6	83.6	117.6
1962	29.0	29.8	46.8	57.6	70.4
1963	20.0	41.0	63.4	89.4	113.8
1964	26.2	44.4	48.4	51.0	63.2
1965	67.0	72.8	73.4	81.0	99.0
1966	43.0	49.0	69.0	120.0	207.2
1967	24.8	36.2	55.6	75.6	75.6

anno	1	3	6	12	24
1968	44.0	49.6	53.6	78.0	102.2
1969	14.8	23.0	36.4	48.4	72.0
1970	14.4	23.4	38.0	62.2	84.6
1971	17.0	20.4	26.2	39.8	52.2
1972	17.0	36.0	55.0	78.0	110.2
1973	25.6	35.0	57.8	67.2	96.2
1990	23.8	45.4	71.0	109.0	131.2
1991	13.6	32.0	51.8	77.4	82.6
1992	44.2	55.4	55.4	55.4	55.4
1993	16.6	30.2	31.0	46.0	59.8
1994	25.8	51.6	56.6	75.2	104.8
1995	14.2	28.0	38.0	52.8	95.8
1996	13.6	26.6	39.8	55.0	59.2
1997	12.4	21.4	40.2	42.8	59.2
1998	14.0	26.4	52.0	63.6	64.4
1999	24.6	36.2	42.0	51.4	75.6
2000	16.4	30.0	43.4	76.8	89.4
2001	24.2	36.4	37.4	38.2	50.6
2002	22.6	36.0	39.8	50.6	65.4
2003	18.6	35.6	52.4	75.2	99.6
2004	25.0	44.2	69.8	85.2	87.0

Montepastore

anno	1	3	6	12	24
1983	4.8	11.4	17.6	22.0	37.2
1984	30.0	31.8	42.2	52.6	67.4
1985	26.0	27.4	27.4	28.8	43.4
1986	23.6	41.0	54.8	69.4	95.2
1987	40.0	69.0	69.0	69.0	69.0
1988	17.6	38.8	49.4	50.0	52.4
1989	11.8	22.0	38.2	59.2	91.0
1990	20.4	31.8	40.8	65.6	87.2
1991	19.0	31.0	43.4	69.8	72.4
1992	16.8	19.8	25.8	46.6	74.6
1993	64.4	65.2	65.2	65.2	68.0
1994	24.8	39.0	43.2	60.0	103.0
1995	27.0	42.0	58.6	75.8	118.0

Traversa

anno	1	3	6	12	24
1990	27.6	34.4	63.0	122.2	141.8
1991	22.0	61.2	98.0	125.4	147.4
1992	31.4	42.8	46.0	66.6	102.0
1993	21.6	32.8	38.6	61.6	70.2
1994	38.0	71.0	75.8	76.2	81.2
1995	28.0	30.6	46.0	62.6	98.6
1996	14.4	27.2	43.4	67.4	110.6
1997	29.4	33.4	33.4	46.4	61.6
1998	30.4	52.2	74.8	132.0	233.4
1999	53.0	78.6	79.8	81.0	87.2
2000	22.4	58.0	86.6	108.6	130.0
2001	16.4	38.2	63.4	91.2	124.8
2002	21.0	41.6	49.6	56.6	79.2
2003	32.0	34.8	57.8	71.4	90.0
2004	32.2	42.8	58.4	63.2	77.6

Lizzano in Belvedere

anno	1	3	6	12	24
1928	21.6	24.0	39.5	75.0	115.4
1929	24.0	31.2	52.2	85.2	102.6
1930	22.0	33.4	42.0	55.0	67.0
1931	20.2	43.0	56.6	79.6	109.0
1932	27.0	38.5	43.0	64.8	69.6
1933	15.8	31.4	47.0	55.2	57.6
1934	73.6	85.0	87.2	87.4	115.0
1935	26.6	31.2	49.0	66.2	91.6
1936	10.4	21.4	37.6	54.0	87.4
1937	31.6	31.6	46.4	62.6	89.0
1938	23.0	30.0	48.4	88.6	140.0
1939	44.2	44.4	45.8	80.0	102.4
1940	18.2	42.0	75.6	105.8	126.8
1941	14.0	16.4	28.2	47.0	72.4
1946	24.8	27.0	43.6	57.2	90.0
1947	12.2	22.0	40.0	56.6	72.6
1948	13.2	16.0	27.6	44.2	55.2
1949	22.0	34.8	50.0	70.0	92.4
1950	22.2	40.0	52.6	55.6	63.0
1951	32.6	50.4	76.4	94.8	143.0
1952	19.0	40.0	74.0	124.0	177.0
1953	20.0	31.4	54.0	59.4	88.0
1954	15.8	25.0	35.6	48.2	60.4
1955	18.4	23.8	35.0	58.0	90.0
1956	14.0	26.0	32.0	45.0	68.0
1957	25.6	50.2	69.2	91.4	114.8
1958	18.4	28.8	40.8	55.8	84.2

anno	1	3	6	12	24
1959	39.6	67.8	78.8	93.0	150.0
1960	30.4	43.6	74.0	111.4	127.0
1961	25.8	35.8	47.8	78.4	113.2
1962	28.4	33.8	41.0	59.2	64.8
1963	26.4	29.8	38.2	53.4	97.0
1965	46.8	68.4	70.2	89.2	94.4
1966	20.0	43.0	73.6	119.8	189.4
1967	34.0	58.2	78.4	91.2	91.2
1968	30.0	50.0	60.0	81.0	104.2
1969	17.8	40.0	65.0	99.2	131.2
1970	15.4	26.0	38.6	52.2	81.0
1971	21.0	30.0	38.0	56.2	65.2
1972	22.0	31.0	42.2	69.0	96.8
1973	18.8	47.0	70.4	90.0	118.2
1990	39.0	70.4	126.2	189.2	225.6
1991	31.8	39.4	57.4	107.6	128.0
1992	35.0	38.8	57.0	82.0	107.4
1993	35.0	52.2	62.6	106.2	128.2
1994	45.6	94.2	143.0	192.0	224.4
1995	23.4	44.0	65.6	87.0	130.8
1996	14.2	31.2	43.4	63.0	83.8
1997	21.4	31.6	43.8	64.2	93.6
1998	17.2	31.6	41.4	55.8	70.0
1999	19.6	40.8	50.4	72.8	106.0
2000	23.8	38.8	58.6	110.2	137.2
2001	21.0	38.4	44.4	68.0	96.0
2002	31.8	36.4	45.6	75.0	102.2
2003	40.0	54.2	79.0	117.4	128.0
2004	27.0	42.4	68.2	87.4	96.4

Riola di Vergato

anno	1	3	6	12	24
1990	18.2	42.4	57.2	85.0	87.6
1991	16.6	30.6	48.2	77.0	83.4
1992	34.6	38.2	38.2	38.2	55.2
1993	25.4	33.4	34.0	36.0	44.0
1994	35.6	56.6	84.6	119.2	133.0
1995	21.2	30.2	41.2	55.6	100.4
1996	29.0	56.0	60.8	66.6	66.6
1997	21.2	30.0	31.8	31.8	42.0
1998	16.0	35.4	49.4	56.0	60.6
1999	24.8	31.2	31.2	34.0	53.0
2000	18.4	34.0	34.8	39.8	52.2
2001	39.4	50.8	53.2	55.2	55.8
2002	44.4	70.0	77.0	77.0	77.4
2003	21.0	27.0	41.8	56.8	87.4
2004	54.4	64.4	65.6	77.4	79.4

Porretta Terme

anno	1	3	6	12	24
1935	33.2	38.8	45.2	70.8	81.4
1936	14.0	15.2	29.0	54.0	85.8
1937	27.0	43.2	47.2	55.2	74.0
1938	22.6	43.6	43.6	56.6	100.4
1939	23.8	24.8	24.8	36.6	47.8
1940	30.8	32.8	57.0	88.6	107.4
1941	14.0	17.2	29.6	42.6	58.0
1942	36.4	39.0	47.0	62.2	108.0
1943	20.6	24.8	29.0	39.8	68.6
1944	19.0	20.0	31.0	43.2	51.4
1945	14.2	30.0	54.0	70.6	121.0
1946	27.0	45.0	66.2	78.2	83.2
1947	34.0	43.0	43.0	67.6	85.2
1948	23.0	24.0	30.0	44.2	59.0
1949	24.8	28.6	43.0	59.0	92.2
1950	29.0	32.4	40.6	45.4	70.6
1951	33.0	42.8	57.0	71.4	117.2
1952	22.0	28.0	37.8	62.0	81.4
1953	15.0	21.4	35.6	49.4	70.6
1954	13.8	25.0	35.0	40.8	48.2
1955	22.0	32.0	49.8	58.6	82.0
1956	12.2	26.4	34.8	44.0	56.0
1957	27.6	34.8	51.0	72.6	78.0
1958	21.6	33.8	40.2	42.2	61.2
1959	30.0	48.2	63.6	67.4	93.2
1960	31.6	34.4	46.0	65.4	95.4
1961	20.0	36.0	48.6	62.6	79.0
1962	32.4	32.6	39.6	56.6	63.2
1963	21.4	25.4	44.6	66.8	83.8
1964	30.6	34.6	43.0	57.4	71.8
1965	60.0	63.6	64.2	75.4	89.4
1966	37.0	41.6	59.8	117.2	179.2
1967	17.0	34.8	52.4	72.2	72.4
1968	36.6	39.2	43.8	84.0	97.8

anno	1	3	6	12	24
1969	12.2	28.8	40.4	59.6	86.8
1970	17.6	20.0	32.6	42.6	80.0
1971	43.8	48.6	48.6	48.8	58.4
1972	38.4	47.6	59.8	70.8	94.8
1973	21.0	41.0	59.4	82.4	117.2
1974	19.8	20.8	34.8	56.4	64.4
1975	21.0	30.0	33.0	51.0	85.0
1976	30.0	52.8	56.0	56.2	56.4
1977	22.6	31.0	50.6	56.4	63.4
1978	15.0	29.4	51.4	56.8	73.0
1979	28.0	44.4	45.6	66.0	89.4
1980	30.4	54.6	54.6	54.6	69.6
1981	24.0	29.0	38.4	56.0	70.0
1982	28.0	34.0	54.0	82.0	146.0
1983	26.4	29.4	43.0	71.0	86.0
1984	26.8	31.4	38.0	43.0	43.8
1985	17.0	25.0	39.2	42.8	73.6
1986	26.0	29.4	33.2	36.4	48.0
1987	32.2	35.4	46.0	78.4	104.6
1988	39.0	51.8	62.6	73.0	73.8
1989	27.0	49.4	49.4	50.0	70.2
1990	17.0	38.8	74.8	112.0	133.6
1991	19.4	30.4	51.2	78.6	86.6
1992	25.2	35.2	43.8	54.8	65.2
1993	27.8	44.4	44.4	52.8	59.0
1994	29.0	72.8	119.2	180.6	198.8
1995	30.0	53.4	62.2	67.0	103.2
1996	15.6	24.2	42.4	59.0	62.8
1997	16.2	31.8	38.8	53.6	72.8
1998	28.0	48.8	61.6	73.2	76.6
1999	24.6	32.4	40.6	52.8	71.2
2000	21.0	31.6	42.8	83.6	95.2
2001	20.8	34.8	35.4	43.8	56.2
2002	14.2	26.0	36.8	52.4	75.6
2003	22.8	41.2	57.6	82.0	109.2
2004	23.4	64.2	100.2	107.8	108.2

Vergato

anno	1	3	6	12	24
1930	13.8	18.4	27.8	36.6	50.0
1931	12.6	16.4	18.6	25.0	32.6
1932	13.6	22.0	36.0	42.0	48.8
1934	19.2	34.8	46.0	47.2	47.2
1935	23.4	28.8	35.0	59.2	63.8
1936	15.4	16.6	22.0	37.0	56.4
1937	22.6	28.6	52.0	81.0	94.0
1938	12.4	18.8	18.8	18.8	34.5
1939	22.0	25.6	26.8	49.6	66.0
1940	45.2	55.6	56.0	60.0	83.4
1941	16.0	21.6	34.6	42.2	43.2
1942	34.2	40.6	51.4	54.4	84.8
1946	13.8	26.4	43.6	55.4	56.0
1948	14.0	25.0	35.0	43.6	53.0
1949	20.2	22.6	30.2	50.2	77.4
1950	20.0	33.0	33.4	38.2	43.0
1951	20.0	26.4	38.0	46.8	72.0
1952	19.2	28.2	30.4	44.2	58.6
1953	24.2	26.8	28.2	49.8	53.6
1954	15.2	23.6	23.8	25.4	38.6
1955	32.2	32.4	38.2	39.0	52.4
1956	9.0	21.4	31.6	53.0	69.8
1957	11.2	17.2	20.4	26.6	31.8
1958	19.0	24.8	26.2	36.8	52.8
1959	24.6	38.0	48.4	61.8	78.2
1960	30.0	53.2	57.8	58.4	59.8
1961	13.4	23.2	30.6	55.2	84.2
1962	13.6	20.4	22.0	33.6	44.0
1963	29.0	37.8	37.8	61.8	83.2
1964	35.4	63.6	78.2	83.8	83.8
1965	51.0	54.8	55.2	55.2	58.4
1966	21.4	32.0	57.4	80.8	133.2
1967	19.4	28.8	40.6	54.2	56.0

anno	1	3	6	12	24
1968	39.8	40.0	40.0	58.6	76.2
1969	17.6	24.2	25.4	28.6	48.6
1970	45.4	45.4	45.4	45.4	45.6
1971	10.2	14.0	23.8	33.6	58.0
1972	43.0	46.2	46.6	64.0	83.2
1973	16.8	33.8	60.6	71.2	102.4
1974	39.0	39.2	47.0	53.2	71.2
1975	32.6	40.0	42.0	52.6	76.0
1976	17.6	26.4	39.6	55.0	62.0
1977	32.0	48.2	57.2	62.4	62.6
1978	23.6	28.0	49.0	85.4	117.8
1979	33.8	50.6	80.2	104.2	108.0
1980	20.2	24.4	26.6	45.4	52.0
1981	23.0	25.2	37.8	66.0	92.6
1982	23.0	25.6	32.0	49.0	73.2
1983	41.6	50.8	51.8	51.8	51.8
1984	22.4	25.4	28.8	53.8	71.4
1985	19.4	20.2	29.4	32.0	38.6
1986	15.0	25.0	37.6	41.6	42.6
1987	16.0	27.6	51.0	73.6	93.6
1988	24.2	29.4	47.6	61.2	61.4
1989	22.2	25.6	39.2	56.6	70.2
1990	18.6	27.2	37.8	53.8	64.6
1991	21.2	36.4	58.8	87.4	89.8
1992	25.2	34.2	35.0	35.0	44.6
1993	25.0	32.8	35.4	35.8	41.0
1994	23.6	58.4	81.6	90.2	121.2
1995	27.0	31.6	46.8	64.2	119.4
1996	24.6	37.4	40.4	45.2	58.8
1997	16.4	21.0	31.2	40.4	48.4
1998	24.6	33.8	40.8	45.2	46.0
1999	38.6	47.8	48.4	50.4	55.0
2003	26.4	26.6	40.0	53.2	79.2
2004	23.0	33.8	49.0	63.2	64.2

Treppio

anno	1	3	6	12	24
1931	17.0	22.4	44.8	77.0	102.2
1932	27.0	42.0	64.0	85.0	88.0
1933	39.0	43.6	65.4	77.8	86.4
1934	24.0	43.4	79.4	117.4	159.4
1935	35.0	68.0	73.0	112.0	139.2
1936	25.4	36.0	54.0	85.6	101.4
1937	32.4	46.2	84.0	118.6	126.2
1938	28.6	33.6	40.6	70.6	135.2
1939	31.8	35.8	39.8	54.0	66.4
1940	28.6	62.8	123.0	191.8	236.2
1942	24.4	30.4	33.0	55.8	62.8
1943	15.0	22.2	31.0	46.2	67.0
1944	20.0	32.2	46.0	65.4	81.0
1945	17.0	43.6	62.8	83.8	121.8
1946	29.0	48.2	67.0	91.0	98.0
1947	20.0	31.0	43.2	64.8	72.0
1948	21.4	32.6	43.6	70.0	82.4
1949	21.0	44.8	58.2	60.8	97.4
1950	19.6	47.4	62.0	79.8	107.4
1951	30.8	47.4	65.6	81.4	149.0
1952	39.8	86.2	145.0	168.0	184.0
1953	27.0	37.2	42.4	51.0	56.2
1954	23.4	43.4	62.0	62.4	72.4
1955	25.6	45.8	66.0	73.4	116.0
1956	11.0	19.0	33.0	63.6	97.0
1957	13.2	29.0	40.0	79.0	102.0
1958	18.6	35.0	52.4	73.4	92.4
1959	31.4	45.6	58.0	82.6	137.6

anno	1	3	6	12	24
1960	21.8	36.6	49.4	90.6	114.8
1961	20.0	45.0	85.0	125.0	175.2
1962	20.0	28.0	40.0	71.0	82.4
1963	22.4	51.4	72.4	96.8	126.8
1964	40.6	43.6	54.0	80.2	100.8
1965	75.0	78.0	80.2	86.0	95.2
1966	33.0	56.0	88.0	141.6	231.6
1967	35.0	58.0	77.4	98.8	99.0
1969	19.0	45.4	90.0	121.4	151.2
1970	34.4	43.2	53.0	61.8	88.6
1971	24.2	33.6	44.0	64.2	110.2
1973	24.6	42.6	54.2	64.2	89.2
1990	31.4	73.6	130.4	196.0	239.0
1991	24.0	51.2	86.8	128.2	146.8
1992	38.4	79.8	80.2	116.0	134.0
1993	19.0	34.0	46.0	75.2	102.8
1994	48.4	75.2	89.6	89.6	107.4
1995	18.4	31.2	53.0	79.4	129.2
1996	27.2	37.0	46.2	65.2	92.2
1997	15.6	36.2	61.2	92.8	158.6
1998	31.0	51.4	69.6	79.6	102.0
1999	30.2	42.2	54.0	85.4	87.4
2000	33.0	74.8	105.0	192.6	212.4
2001	27.4	38.8	53.2	62.4	84.8
2002	23.4	41.6	50.2	77.6	106.4
2003	45.0	54.8	91.4	108.6	136.6
2004	43.8	56.6	88.8	90.0	90.2

Pracchia

anno	1	3	6	12	24
1928	27.0	46.0	71.0	112.0	154.6
1929	36.8	64.0	71.0	108.0	126.0
1930	35.0	86.0	102.8	127.6	160.6
1931	41.0	73.0	114.0	167.0	232.0
1932	38.4	66.0	108.0	137.4	140.0
1933	21.4	56.8	73.0	82.0	91.2
1934	31.2	40.0	62.2	96.2	126.2
1935	54.2	84.0	96.0	128.0	175.4
1936	24.2	43.6	65.2	75.4	126.8
1938	14.6	34.4	61.6	114.0	171.4
1939	34.0	34.6	43.6	64.8	90.8
1940	26.0	51.0	78.0	128.8	164.0
1941	20.0	38.6	56.0	89.0	123.6
1942	29.8	50.6	52.2	57.0	98.4
1943	26.8	39.8	48.0	52.4	90.4
1944	17.0	28.0	46.0	68.0	91.0
1945	20.0	52.0	79.6	104.4	159.6
1946	39.6	66.0	80.8	95.8	114.4
1947	19.8	43.0	64.0	102.4	137.8
1948	34.6	49.0	65.0	91.8	109.0
1949	23.0	42.4	59.0	73.2	128.6
1950	28.0	71.6	120.0	135.0	142.4
1951	25.2	65.0	115.0	155.8	221.0
1952	35.0	60.0	82.0	107.8	137.0
1953	29.0	45.2	49.8	62.0	97.0
1954	24.0	57.0	102.6	109.4	120.6
1955	21.2	39.6	54.0	82.4	132.2
1956	16.4	36.6	48.6	57.4	75.6
1957	18.2	33.6	46.2	62.0	84.6
1958	17.2	42.0	63.0	83.0	113.2
1959	32.0	48.6	64.2	92.0	155.6
1960	25.0	38.2	64.8	96.0	120.4
1961	35.0	61.0	80.0	96.4	148.2
1962	40.6	45.0	49.0	72.6	86.4
1963	24.0	49.2	62.4	90.8	153.2

anno	1	3	6	12	24
1964	57.2	64.2	81.0	95.4	117.4
1965	58.2	65.6	76.2	116.2	182.0
1966	18.0	43.4	54.8	106.0	172.6
1967	33.2	53.2	94.8	116.4	132.2
1968	36.2	48.2	63.0	111.4	135.6
1969	38.0	46.2	77.8	112.6	162.6
1970	42.8	45.6	61.0	70.0	124.2
1971	33.6	33.8	41.4	78.0	124.6
1972	42.0	82.0	152.2	158.6	168.2
1974	23.0	37.2	39.6	53.2	78.6
1975	28.0	35.0	57.0	78.0	136.0
1976	24.0	40.0	60.0	91.0	128.0
1977	30.0	36.2	60.0	109.0	128.0
1979	28.0	72.0	85.4	87.8	142.0
1980	33.0	39.4	64.4	78.6	90.8
1981	45.6	45.8	58.0	98.0	152.0
1982	36.8	42.4	61.0	102.0	160.0
1983	36.0	43.4	70.4	113.4	157.0
1984	30.0	50.4	89.0	96.0	131.4
1985	21.0	30.6	50.6	71.0	95.6
1986	24.8	32.0	49.0	82.0	91.4
1987	28.6	54.8	74.2	99.2	140.6
1988	63.0	81.4	96.4	114.6	115.8
1989	40.0	53.6	55.0	65.2	103.6
1991	31.6	47.0	70.4	130.4	146.6
1992	23.6	47.8	77.2	113.8	131.2
1993	22.0	45.6	66.8	93.8	132.4
1994	24.2	48.0	73.6	119.2	150.0
1995	26.8	47.0	78.0	111.0	116.6
1996	36.0	43.6	66.8	83.2	116.4
1997	27.6	54.6	79.2	121.2	209.8
1998	29.6	59.2	78.6	104.2	113.6
1999	25.8	64.4	109.8	150.0	156.4
2000	27.0	68.6	93.8	171.6	195.2
2001	18.2	30.6	48.6	62.0	90.0
2002	24.6	51.4	76.4	90.2	114.2
2003	32.8	60.6	76.2	114.4	145.4
2004	46.6	54.4	101.8	116.8	140.0

Monzuno

anno	1	3	6	12	24
1947	36.8	36.8	37.0	47.6	62.4
1949	51.6	54.2	54.2	55.2	74.2
1950	26.8	29.6	29.6	29.6	41.2
1951	15.8	19.6	30.0	42.2	51.4
1952	22.4	28.2	29.2	47.8	53.0
1953	18.2	25.2	31.0	38.2	53.6
1954	14.0	28.2	34.2	50.8	75.0
1955	32.0	39.4	40.8	50.2	54.0
1956	11.4	27.0	37.6	59.2	82.2
1957	22.4	22.4	32.8	45.4	56.2
1958	14.4	20.6	31.0	46.2	60.4
1959	24.8	35.0	46.4	54.8	81.4
1960	35.6	45.8	52.4	56.4	61.4
1961	20.0	33.4	45.4	74.2	108.6
1962	14.8	18.8	24.0	39.8	51.2
1963	27.4	37.2	60.0	90.6	115.8
1964	39.2	40.6	56.6	61.8	63.0
1965	19.8	34.4	46.4	58.0	72.6
1967	20.2	32.0	50.0	79.8	96.2
1968	25.0	32.2	32.8	42.4	57.0
1969	59.8	61.8	63.0	64.4	64.6
1970	13.4	23.2	29.2	29.2	44.0
1971	16.6	20.4	26.4	40.2	45.6
1972	36.8	38.0	39.0	66.0	84.2
1973	17.8	26.2	43.4	52.4	89.6
1974	22.6	36.2	56.4	87.4	108.8
1975	29.0	30.6	34.6	51.2	76.0

anno	1	3	6	12	24
1976	31.6	37.2	61.0	77.4	91.4
1977	20.0	20.8	23.2	37.8	59.0
1978	14.2	16.8	29.8	48.6	70.0
1979	36.5	68.6	95.6	100.0	104.6
1980	25.6	45.0	47.2	47.8	47.8
1981	20.0	29.0	54.0	80.2	115.0
1982	26.4	31.2	49.8	58.0	65.6
1983	50.4	57.4	57.4	57.4	57.4
1984	18.0	28.0	40.0	58.0	92.8
1985	22.8	26.0	27.0	29.0	46.6
1986	20.0	39.0	49.6	65.6	81.6
1987	44.0	57.6	58.2	63.0	88.4
1988	30.2	35.6	44.2	50.0	50.0
1989	37.0	37.8	39.0	65.2	91.8
1990	33.0	49.4	49.6	64.4	77.4
1991	16.0	29.8	53.6	66.0	80.4
1992	18.4	25.2	27.8	50.0	74.4
1993	14.8	18.0	20.6	31.0	46.4
1994	23.6	31.2	55.6	81.0	134.8
1995	11.8	25.6	42.8	60.6	112.8
1996	20.4	32.4	39.4	56.2	92.4
1997	56.2	58.2	59.8	59.8	67.2
1998	27.0	43.8	47.8	60.2	64.0
1999	30.6	49.8	62.8	109.2	116.6
2000	36.4	69.4	70.4	76.6	83.8
2001	21.6	33.8	36.4	38.2	67.2
2002	15.2	24.8	40.2	69.6	87.0
2003	28.6	36.4	44.2	57.6	79.6
2004	28.6	69.4	100.8	100.8	100.8

Maresca

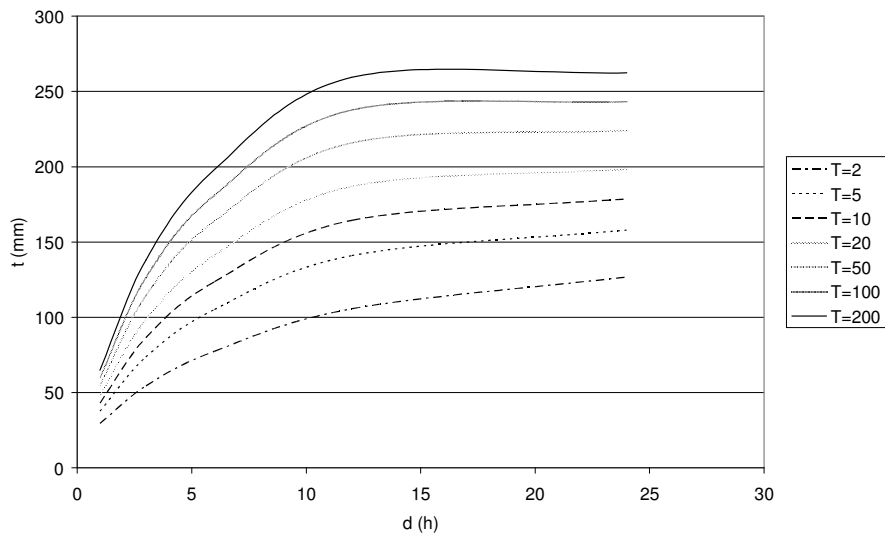
anno	1	3	6	12	24
1938	21.0	28.0	47.0	78.2	126.2
1939	47.8	48.2	55.4	93.8	129.8
1940	38.2	71.2	89.8	138.2	165.8
1941	15.0	27.0	44.4	69.6	97.8
1942	24.0	70.4	82.8	87.8	120.0
1943	33.2	48.6	61.8	67.2	80.6
1946	40.0	56.0	76.8	100.2	115.2
1947	17.4	37.0	64.8	95.6	138.6
1948	35.0	45.2	77.4	103.0	136.6
1949	22.0	43.0	57.6	72.4	108.4
1950	49.2	52.0	93.8	108.0	123.6
1951	36.2	71.4	124.0	148.8	214.6
1952	24.6	53.8	74.0	101.6	153.8
1953	27.6	39.0	56.4	72.0	92.8
1954	20.0	43.8	66.4	71.4	78.0
1955	33.0	42.4	52.4	71.0	110.8
1956	16.0	20.4	37.0	58.4	87.4
1957	17.0	37.8	55.8	103.8	131.0
1958	15.2	36.0	49.0	66.0	99.2
1959	34.2	37.0	60.0	89.6	154.6
1960	26.0	50.0	80.0	122.0	146.2
1961	20.0	50.0	76.0	100.0	108.8
1962	23.0	39.0	63.2	89.0	111.4
1963	32.4	62.0	100.0	114.2	130.0
1964	44.0	76.8	76.8	84.0	107.6
1965	56.4	59.2	74.0	133.4	151.4
1966	26.0	56.0	107.0	168.4	244.2
1967	22.4	56.6	92.0	117.2	117.4
1968	33.4	53.6	61.0	98.2	123.6
1969	21.0	52.0	103.8	150.4	197.0
1970	55.2	70.8	70.8	71.0	132.0

anno	1	3	6	12	24
1971	23.0	33.0	44.8	62.8	88.4
1972	38.6	89.0	168.0	171.8	187.6
1973	44.8	62.2	70.2	88.8	140.6
1974	22.4	38.4	41.8	65.0	88.2
1975	30.0	51.4	59.4	73.6	128.4
1976	25.0	38.0	49.6	63.8	89.0
1977	23.0	43.4	48.8	67.0	78.6
1978	26.2	41.0	62.0	73.8	78.4
1979	26.6	71.0	80.8	126.0	159.0
1981	43.0	46.0	70.0	135.0	214.0
1982	42.0	63.0	79.0	126.0	218.0
1983	28.2	33.0	62.0	117.0	173.6
1984	25.8	50.2	77.4	89.2	113.4
1985	20.0	28.2	42.8	72.8	102.8
1986	29.0	34.6	39.4	66.0	80.8
1987	32.4	57.6	82.2	106.6	163.8
1988	40.0	75.8	93.6	110.2	117.8
1989	30.0	41.4	57.2	76.4	134.2
1990	37.4	88.8	152.0	234.0	266.2
1991	32.6	51.8	67.6	127.4	148.8
1992	43.4	49.6	57.2	74.6	105.8
1993	34.0	67.0	93.6	126.8	172.8
1994	60.4	86.8	99.4	150.8	196.8
1995	25.2	49.6	57.8	83.2	126.6
1996	14.2	31.4	49.6	57.4	82.4
1997	30.4	42.6	61.8	88.4	153.8
1998	32.0	54.8	75.0	96.8	112.4
1999	19.6	38.4	65.2	111.8	133.2
2002	21.2	41.2	67.2	94.4	122.8
2003	22.4	51.0	78.2	98.0	111.2
2004	34.4	57.8	85.0	100.8	107.4

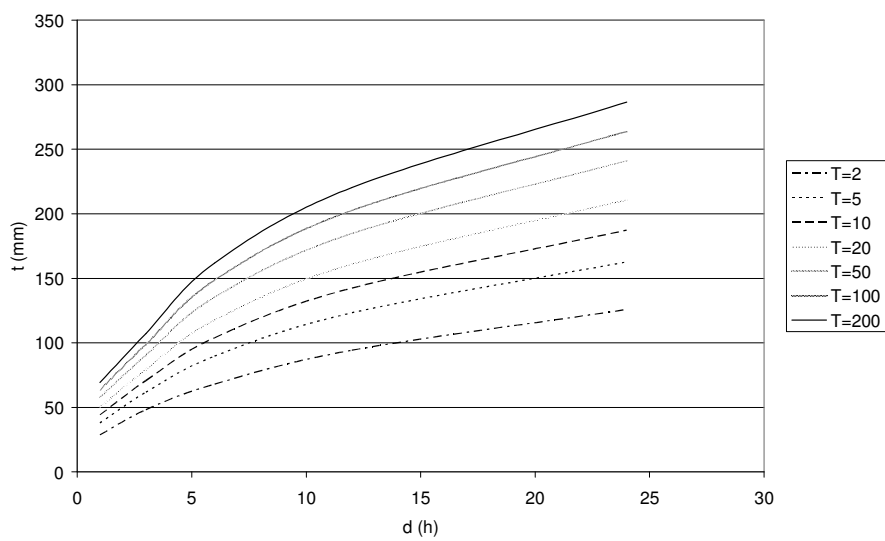
LSPP puntuali

Nelle pagine seguenti vengono riportate le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica ottenute per le varie stazioni.

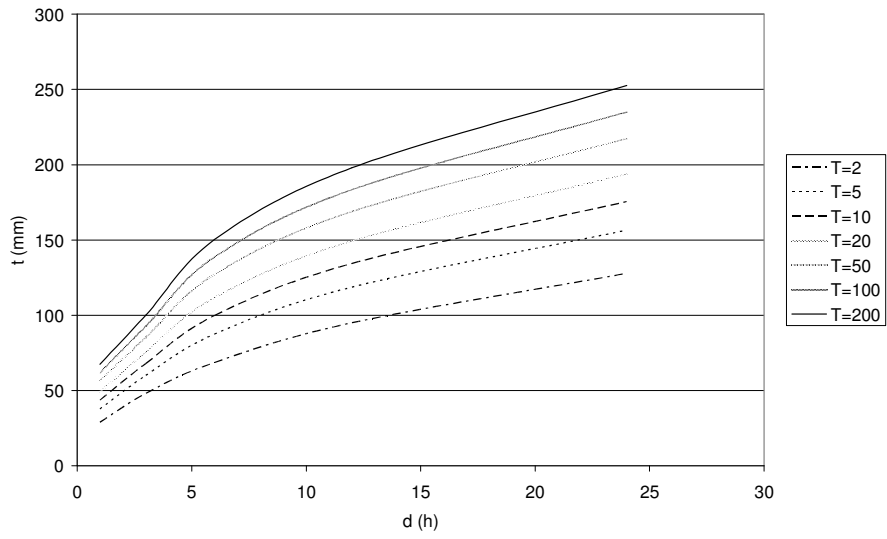
Piastre



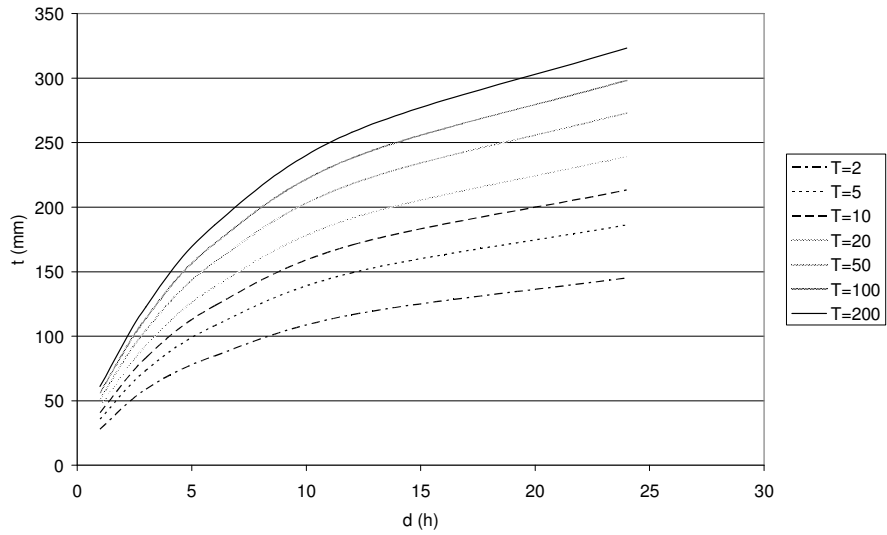
Maresca



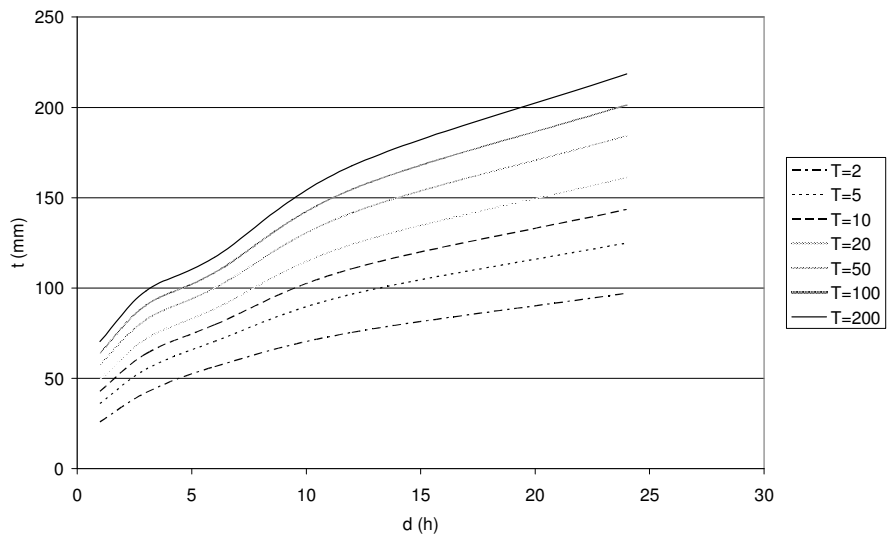
Pracchia



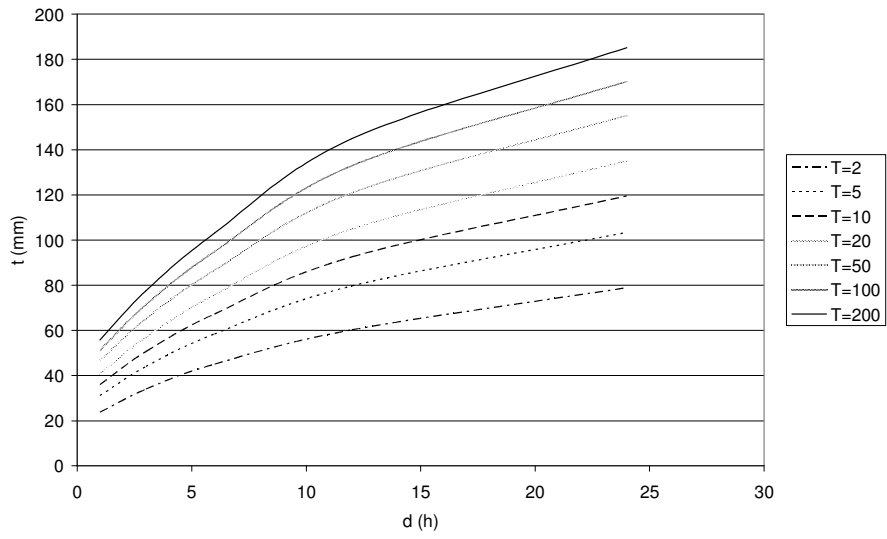
Orsigna



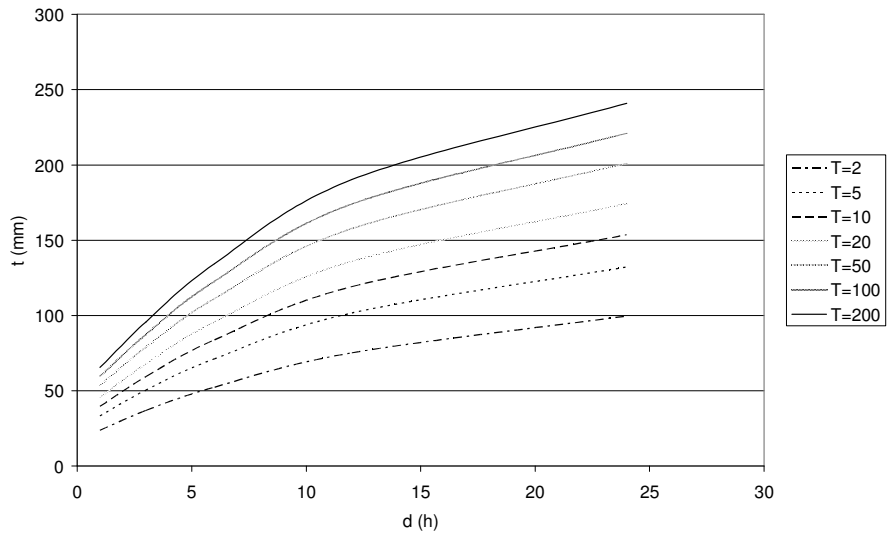
Diga di Pavana



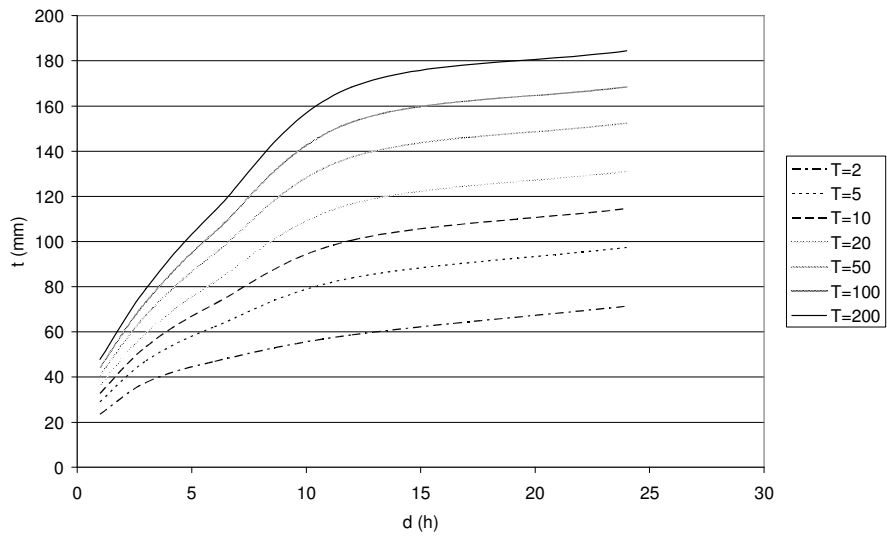
Porretta Terme



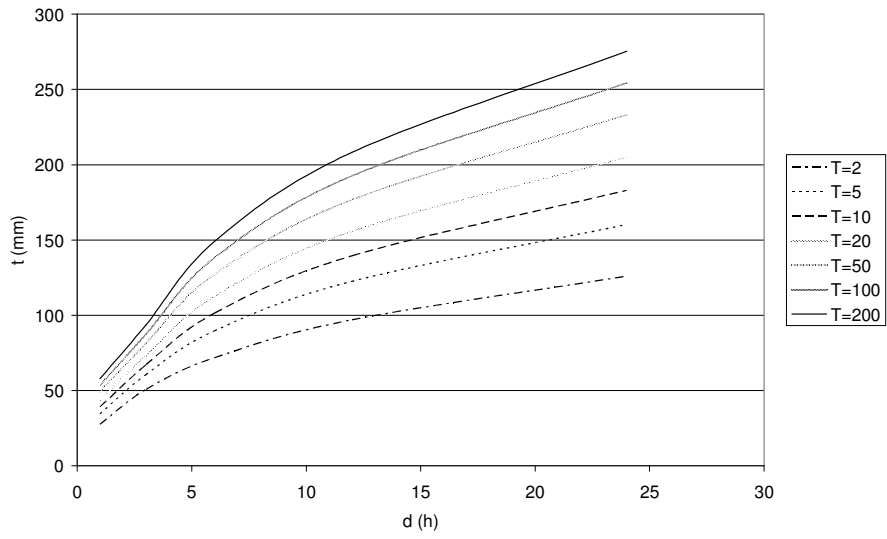
Lizzano il Belvedere



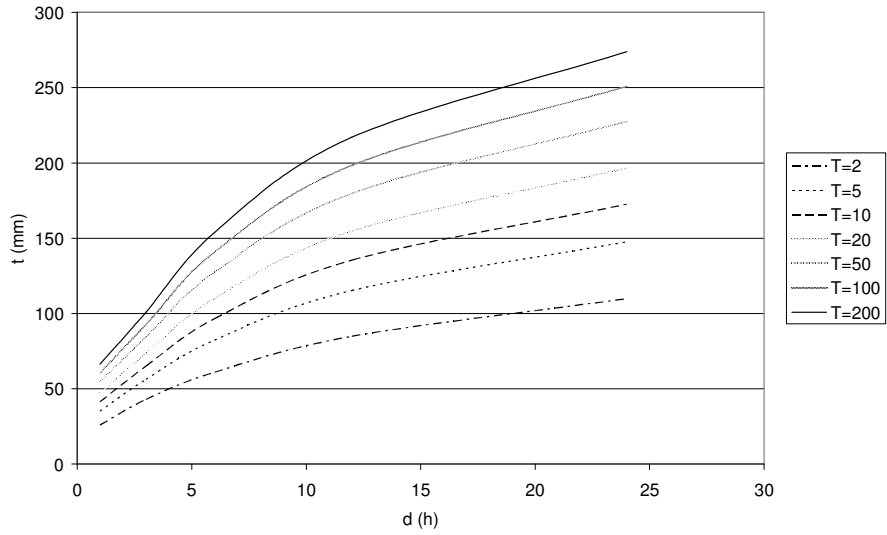
Bombiana



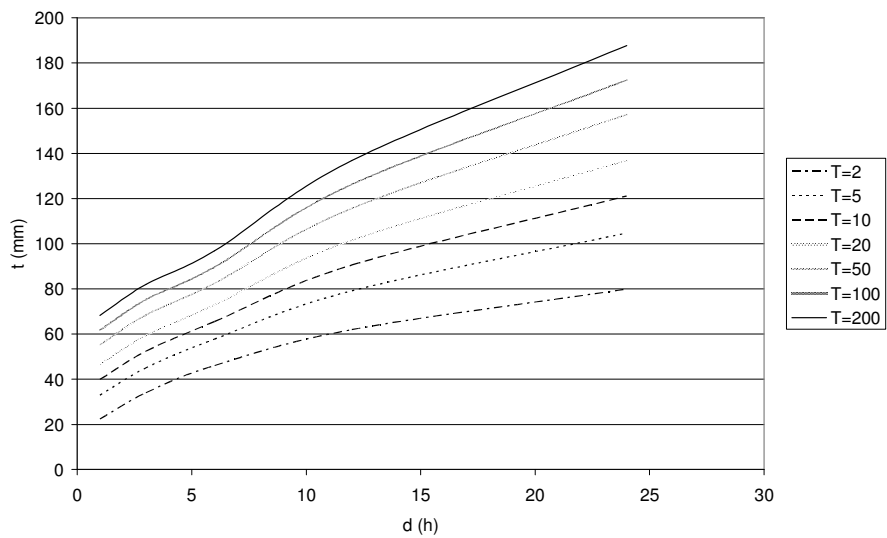
Acquerino



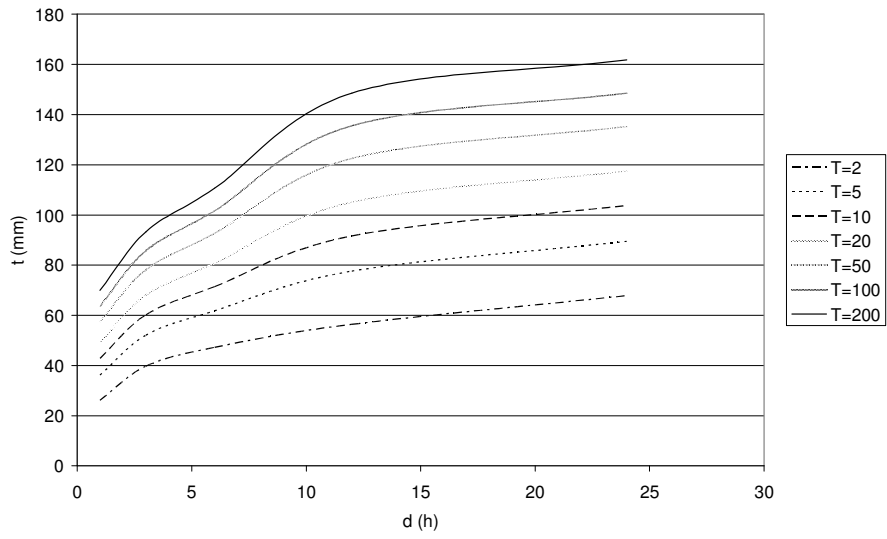
Treppio



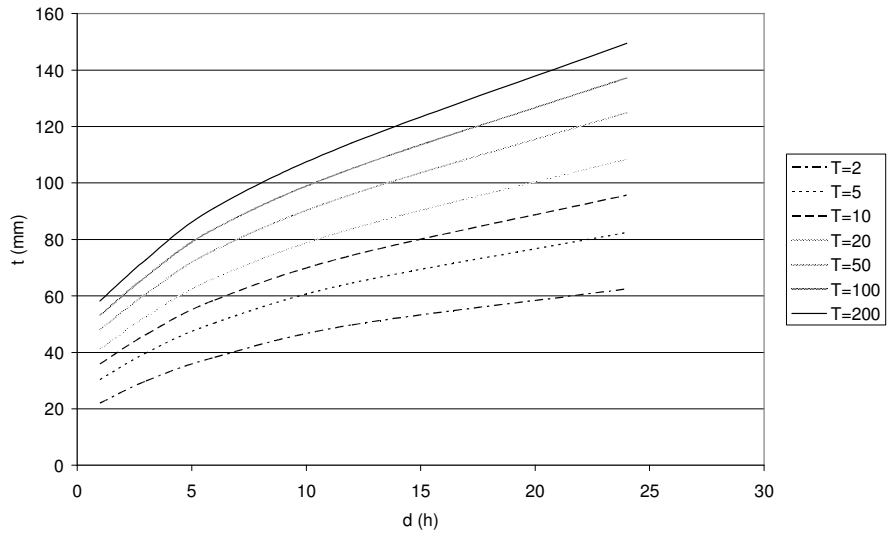
Diga di Suviana



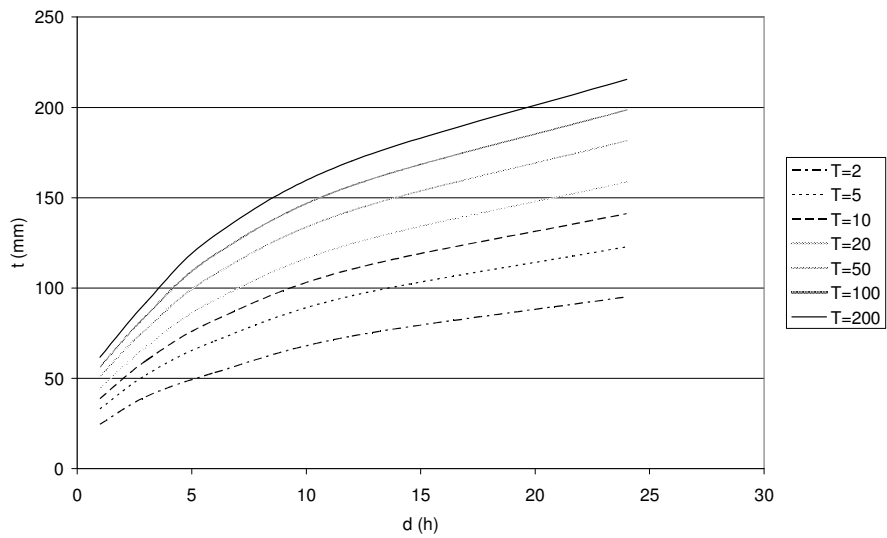
Riola di Vergato



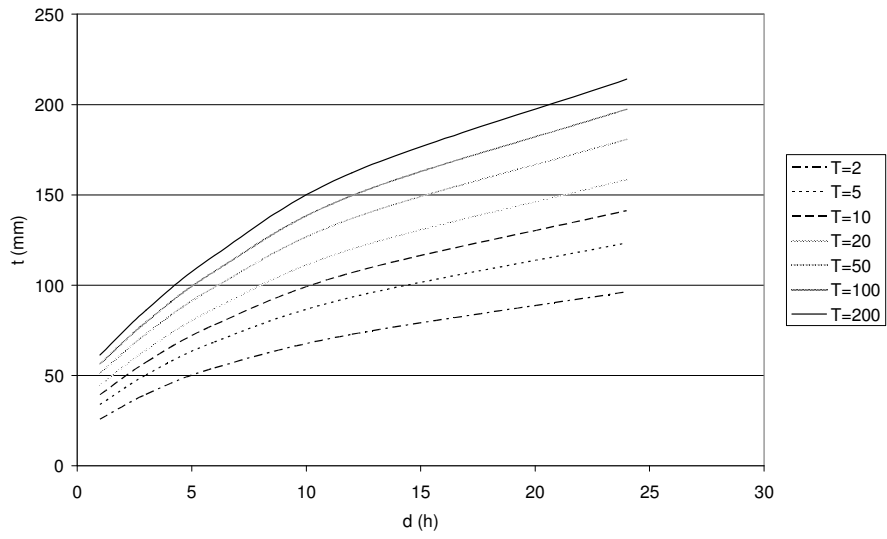
Vergato



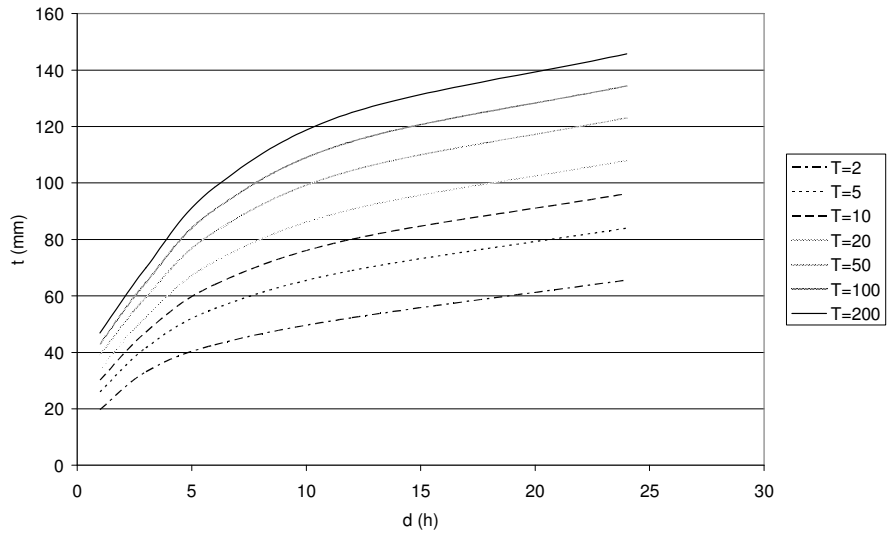
Cottede



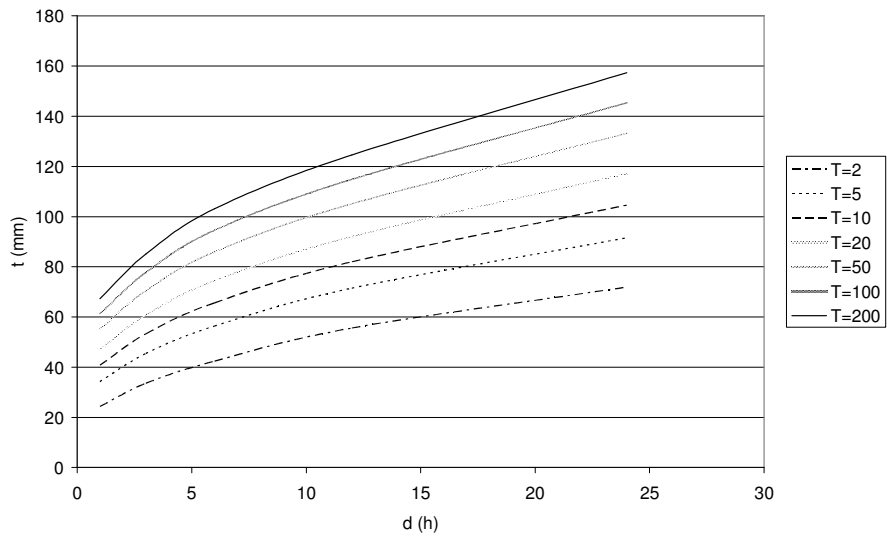
Diga del Brasiamone



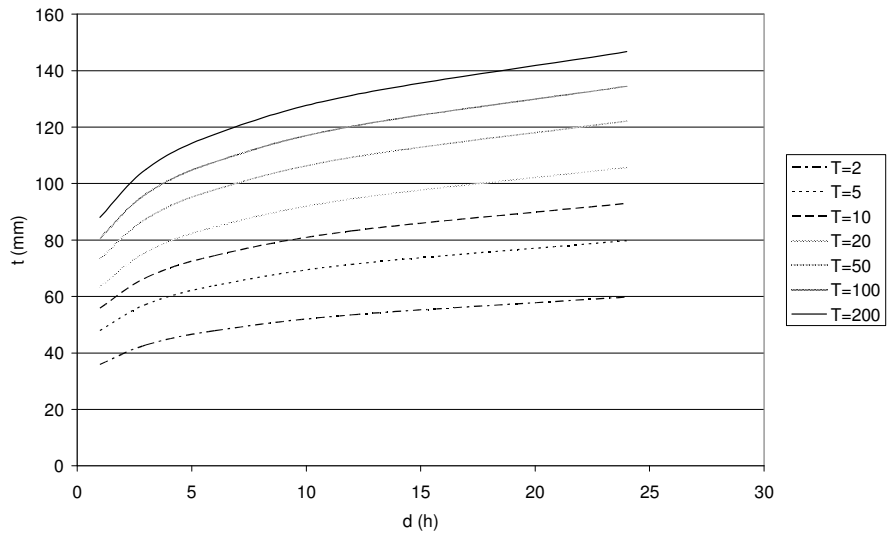
Monteacuto Vallese



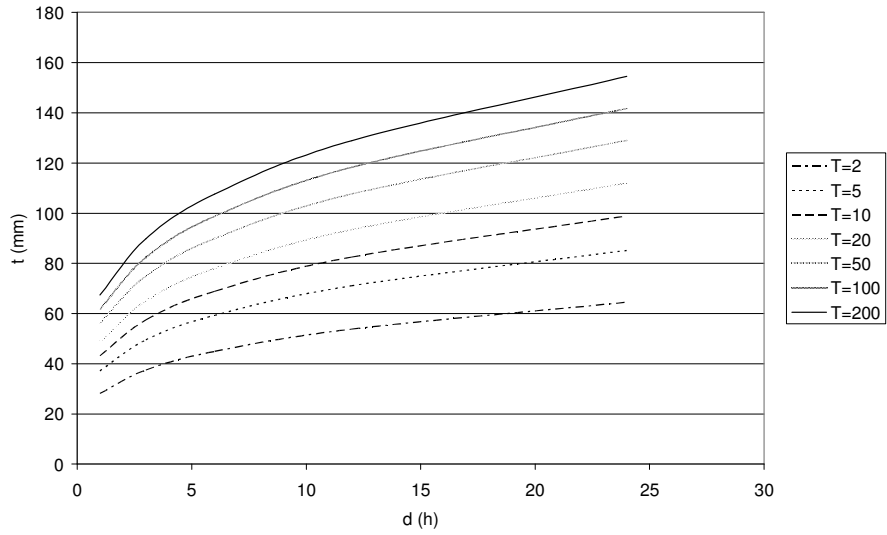
Monzuno



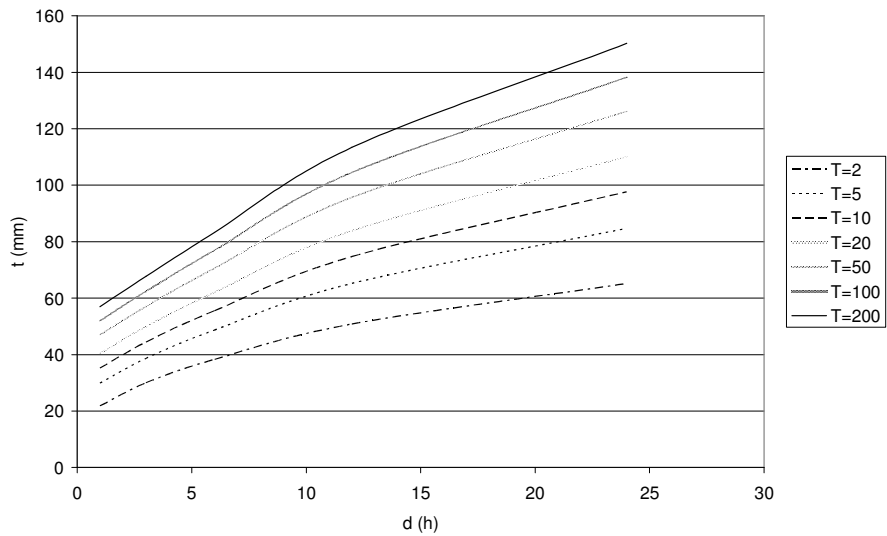
Sasso Marconi



Montepastore



Bologna San Luca



Traversa

BIBLIOGRAFIA

[1] BRATH A. – FRANCHINI M., *La valutazione delle piogge intense su base regionale*, in “L’ingegneria naturalistica nella sistemazione dei corsi d’acqua” a cura di Maione U. – Brath A., Editoriale Bios, Milano, Atti del corso di aggiornamento 5-9 Ottobre 1998, 1999.

[2] BRATH A., *Metodologie di valutazione della portata di piena*, in “Moderni criteri di sistemazione degli alvei fluviali”, a cura di Maione U. – Brath A., Editoriale Bios, Atti del corso di aggiornamento 10-14 Ottobre 1994, 1995.

[3] 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, Editoriale Bios, Atti del corso di aggiornamento 9-13 Ottobre 1995, 1996.

[4] BRATH A. – FRANCHINI M., *La valutazione regionale del rischio di piena con il metodo della portata indice*, in “La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati”, a cura di Maione U. – Brath A., Editoriale Bios, Atti del corso di aggiornamento 6-10 Ottobre 1997, 1998.

[5] BRATH ET AL., *Assessing the riability of regional depth-duration-frequency equations for gaged and ungaged sites*, Bologna, 2003.

[6] BURLANDO P. – ROSSO R., *Le precipitazioni intense*, in “La sistemazione dei corsi d’acqua naturali”, a cura di Maione U. – Brath A., Editoriale Bios, Milano, Atti del corso di aggiornamento 9-13 Ottobre 1995, 1996.

[7] CHIARA BENAGLIA (Tesi di Laurea di), *Il fattore di riduzione delle piogge all’area*, Università degli studi di Bologna, 1997.

[8] MOISELLO U., *Idrologia tecnica*, La Goliardica Pavese, Pavia 1998.

[9] www.regione.emilia-romagna.it/bacinoreno.

Ringraziamenti.....

Potrei scrivere un bel discorso per ringraziare tutti voi, ma probabilmente lo sapete non sono bravo a scrivere discorsi soprattutto se devo esprimere qualcosa che sento; vabbè con il rischio di fare una figuraccia due righe vorrei comunque provare a buttarle giù. Il primo pensiero, non me ne vorranno tutti gli altri, va ai miei genitori; i sacrifici in questi anni io credo di averne fatti, ma anche per loro è stata una avventura tosta...eh si perché questa è stata una avventura io mi sono iscritto a ingegneria e veramente non avevo idea a cosa andavo incontro, un bel salto nel buio e voi babbo e mamma siete stati il mio paracadute, quindi grazie Emidio ed Elvina.

Accanto a loro a casa ho avuto una famiglia straordinaria a partire dalla nonna Giuseppina, gli zii: Anna e Pio e la cuginotta Claudia.

Vorrei ringraziare Sara per tutto, dall' ospitalità di questi ultimi mesi al supporto morale e pazienza; ringrazio inoltre Luciano che anche lui ogni tanto si è dovuto sorbire le mie storie.

Ora tocca a tutti gli amici che in questi anni ho incontrato, quindi ringrazio tutti gli ex-coinquilini di via Matteotti (...la barca sarà quasi affondata ormai!!...qualcuno sa cosa intendo): grazie ai camperisti Ross, Sbro, Albi(detto parafango) e al socio di sconfitte a beach tennis Dott. Ing. Maurino.

Grazie a tutti gli amici di facoltà, per l' importante supporto tecnico offerto in questi anni, ma soprattutto per l' allegria di una bella compagnia, grazie alla Vale, la regina degli aperitivi superalcolici, Monica che si è sempre fidata delle mie scelte a tavola, Rodolfo, studente giramondo, ma a Londra ti vengo a trovare sempre che non torni in anticipo, Lord Antony macchina da studio, Simone un civile con l'animo da ambientale, Marco C., che da quando lavora la biblioteca avrà sempre un posto vuoto,.....poi grazie al quaderno di statistica di Marco....ancora volevo ringraziare tutti i compagni di facoltà: Stefano, Alberto, Simone Botti, Matteo, Lorenza.....

Ancora vorrei ringraziare il Prof. Ing. A. Brath relatore dello studio condotto ed in particolar modo il Dott. Ing. Castellarin che mi ha seguito da vicino in questo periodo sempre gentile, paziente e disponibile.

.....ah ancora una persona vorrei ringraziare, concedetemi ancora qualche riga, un certo Andrea, non so ora mentre scrivo come è andata a finire questa avventura, ma so solo che questi ultimi cinque anni (...e mezzo...non barare!!) sono stati un successo clamoroso.

Ma le avventure non finiscono mai.....

