POLITECNICO DI MILANO
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio
Scuola di Ingegneria Civile e Ambientale

EFFETTO DEGLI ERRORI DI MISURA DELLA PRECIPITAZIONE SULLA MODELLAZIONE DELLE PIENE DEL FIUME TANARO

Relatore: Prof. Giovanni Ravazzani

Tesi di laurea di:

Riccardo Parati

Matr. 897957

Anno accademico 2018/2019

Indice dei contenuti

1- Introduzione…… pag. 4

2- Inquadramento…… pag. 6

2.1- Inquadramento fisico e geografico…… pag. 6

2.2- Caratteristiche morfologiche…… pag. 8

2.3- Caratteristiche litologiche…… pag. 10

2.4- Copertura del suolo…… pag. 11

2.5- Caratteristiche climatiche…… pag. 12

2.6- Sfruttamento delle acque…… pag. 16

2.7- Regime idrologico…… pag. 17

3- Dati utilizzati…… pag. 18

3.1- Dati meteorologici…… pag. 18

3.2- Dati di portata…… pag. 19

4- Il modello idrologico…… pag. 21

4.1- Input del sistema…… pag. 22

4.2- Il bilancio della massa…… pag. 23

4.3- I processi fisici…… pag. 24

5- Correzione dei dati di precipitazione…… pag. 30

5.1- Funzione dell'errore…… pag. 30

5.2- Procedimento…… pag. 31

6- Risultati…… pag. 33

6.1- Precipitazione…… pag. 33

6.2- Portate…… pag. 45

6.3- Considerazioni sugli esiti ottenuti…… pag. 58

7- Scenari di evento…….. pag. 60

7.1- Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica…… pag. 60

7.2- Incremento della precipitazione e risultati…….. pag. 62

7.3- Considerazioni sugli esiti ottenuti…….. pag. 65

8- Conclusioni…… pag. 66

Bibliografia……. pag. 67

Ringraziamenti……. pag. 69

1- Introduzione

La precipitazione è una delle variabili più importanti del ciclo idrologico della Terra. Per tale motivo avere una buona comprensione della sua distribuzione spaziale e temporale è quindi fondamentale per qualunque applicazione idrologica e climatica, quali la gestione delle risorse idriche per scopi civili, sociali e agricoli, o la possibilità di studiare i fenomeni di dissesto idrogeologico per ridurre il rischio sul territorio con degli interventi strutturali o non strutturali.

La misurazione di questa grandezza tuttavia è tanto fondamentale quanto complessa, a causa dell'estrema variabilità spaziale e temporale del dato. Attualmente sono molte le tecniche di misurazione a suolo in grado di fornire dei risultati abbastanza precisi, in particolare reti di pluviometri e radar meteorologici.

Le reti di pluviometri raccolgono misure puntuali di altezza di precipitazione giornaliera. Questi dati sono interpolati con varie tecniche per ottenere un'informazione areale (a differenza delle misure da radar, le quali forniscono direttamente questo tipo di informazione senza bisogno di interpolazioni) che non sempre rappresenta la disomogeneità spaziale e temporale del dato; riuscire ad avere sul territorio una fitta rete di strumenti può ovviare in maniera significativa a questa mancanza, anche se ciò non sempre si può ottenere con facilità, dipendendo infatti dalle caratteristiche del territorio stesso in esame. Ciò che manca nell'informazione areale però, i pluviometri lo compensano con un'alta precisione della misura, caratteristica spesso non ottimale invece per le misure da radar.

Un'alta precisione non li rende comunque esenti da errori, in quanto è stato dimostrato che i pluviometri sono progettati per avere errore praticamente nullo per intensità "medie" di precipitazione, ma in genere possono sottostimarla per intensità più forti e sovrastimarla per quelle più deboli.

L'idea del presente elaborato nasce proprio da quest'ultima osservazione: ci si pone l'obiettivo di analizzare se, provando a correggere con un'apposita funzione questo errore, si possa arrivare ad una migliore simulazione delle portate tramite modello idrologico. In particolare si analizzerà una possibile proposta di soluzione, ovvero quella di correggere gli stessi dati grezzi di precipitazione provenienti dalla rete di pluviometri per mezzo di una funzione d'errore sviluppata dall'università di Genova, per provare a valutare se, dopo aver corretto i dati grezzi di precipitazione con la funzione in questione, si registra una significativa differenza nelle portate simulate dal modello FEST-WB.

Per lo svolgimento del lavoro è stato selezionato il bacino del Tanaro, in quanto sede di una fitta rete di stazioni pluviometriche ed idrometriche per la misura rispettivamente di precipitazione e portate. Gli eventi di precipitazione considerati, invece, si collocano nel periodo compreso tra il 01/01/2012 e il 02/01/2015.

Si è anche scelto questo bacino in quanto, oltre ad avere un elevato numero di strumenti di misura, per quest'ultimo il modello FEST-WB è già stato calibrato nella tesi di laurea dell'Ing. Elena Corso, dal titolo "Stime di precipitazione da satellite della costellazione GPM per la modellazione idrologica del bacino del Tanaro".

In breve, questo lavoro aveva l'obiettivo di indagare l'affidabilità e l'accuratezza di un'innovativa tecnica per il monitoraggio delle precipitazione, che si avvale dell'utilizzo dei satelliti meteorologici. Nello specifico, si è voluto valutare se le precipitazioni misurate dalla costellazione di satelliti GPM fossero sufficientemente accurate da poter essere utilizzate come input per il modello idrologico FEST-WB, osservando quanto i risultati della simulazione aventi tale ingresso si discostassero dall'andamento delle misurazioni di portata osservate dalle varie stazioni disposte lungo il bacino di interesse.

2- Inquadramento

In questo capitolo si introducono vari aspetti del bacino idrografico di studio, in particolare le caratteristiche che sono in grado di influenzarne la risposta a eventi meteorici significativi. Si effettua una descrizione generale del bacino del fiume Tanaro, analizzandone le caratteristiche geografiche, morfologiche, climatiche, idrogeologiche e la copertura del suolo.

2.1- Inquadramento fisico e geografico

Il fiume Tanaro è uno dei più importanti affluenti di sinistra del Po. Il suo bacino idrografico è distribuito tra la zona meridionale del Piemonte e la Liguria: include, in dettaglio, parte delle province di Cuneo, Asti, Alessandria, Savona, Genova e Imperia. Si riportano le sue caratteristiche idrologiche e morfologiche in *tabella 1*.
L'82% di questo bacino è montano e costituito da Alpi Liguri, Appennino Ligure e Alpi Marittime. La restante zona di pianura è localizzata nel settore nord – est alla chiusura del Po, distribuita tra il Monferrato e le Langhe, e nel settore sud – ovest in corrispondenza del tratto di pianura del fiume Stura di Demonte.
Le Langhe si trovano tra le province di Cuneo e Asti, e sono caratterizzate da un paesaggio collinare con crinali allungati e sottili.
Il Monferrato è compreso principalmente all'interno delle province di Alessandria e Asti, e si estende verso sud dalla destra idrografica del Po fino ai piedi dell'Appennino Ligure, sul confine con la provincia di Savona. Anche il suo territorio, come le Langhe, è prevalentemente collinare.
La geografia fisica del bacino del Tanaro è rappresentata in *figura 1*, mentre l'inquadramento geografico è in *figura 2*.

Caratteristiche del bacino	
Portata media (m^3/s)	116.1
Lunghezza asta principale (km)	238
Area del bacino (km^2)	8080
Pendenza media (%)	11.54
Altitudine minima (m s.l.m.)	76
Altitudine massima (m s.l.m.)	3197
Medio CN	66.2

Tabella 1– Caratteristiche idrologiche del bacino del Tanaro (Atlante Bacini Imbriferi).

Figura 1- Inquadramento fisico del bacino del Tanaro (Google Earth Pro).

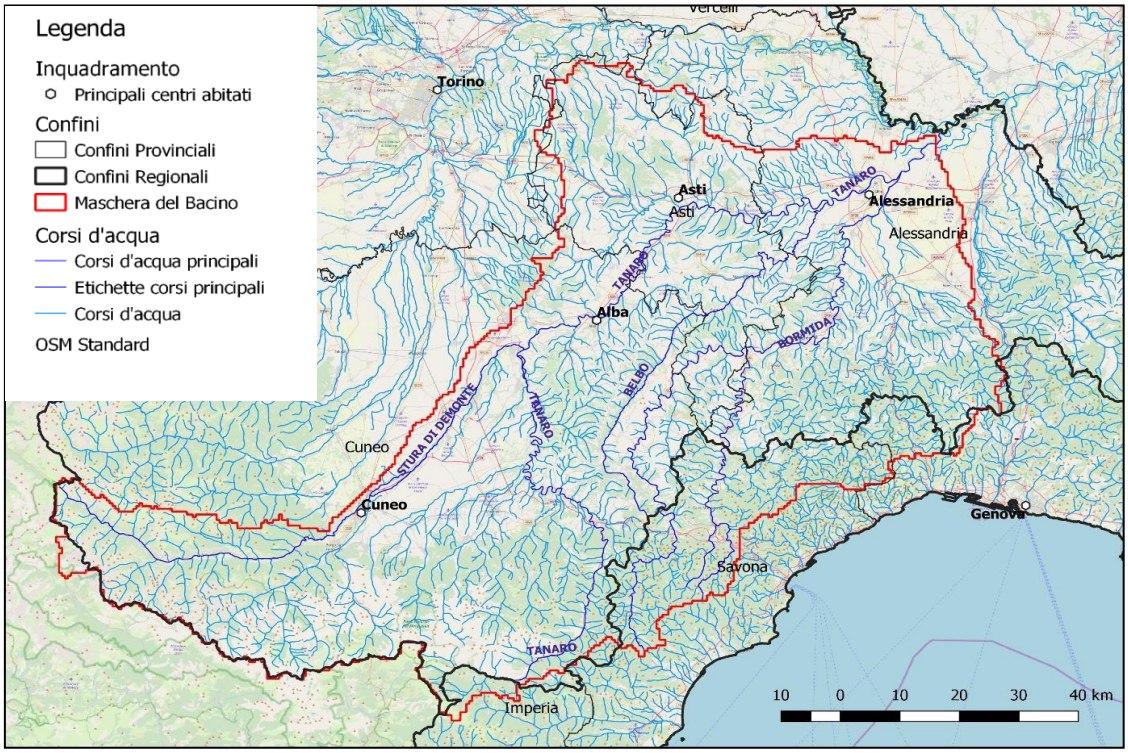


Figura 2- Inquadramento geografico del bacino del Tanaro (SAGAGIS, QGis).

Il comportamento idrologico del fiume del Tanaro è dovuto alle sue caratteristiche morfologiche, all'esposizione delle valli alle perturbazioni, al tipo di substrato e alla copertura del suolo. Inoltre, è importante menzionare che nei tratti di pianura il comportamento in piena del fiume risente in modo significativo anche dello sviluppo degli eventi di piena negli affluenti principali, cioè i fiumi Bormida e Stura di Demonte e il torrente Belbo.

2.2- Caratteristiche morfologiche

Il Tanaro nasce all'estremità sud-occidentale del Piemonte, al confine con la Liguria, dalla congiunzione di due torrenti: il Tanarello (Monte Saccarello, 2199 m s.l.m., Alpi Liguri) e il Negrone (Monte Marguareis, 2651 m s.l.m., Alpi Marittime).

Inizialmente assume la conformazione tipica dei fiumi alpini e scorre in direzione est, fungendo da confine tra Liguria Piemonte fino a Ponte di Nava, dove entra definitivamente in territorio piemontese e riceve in ingresso il Rio Nava. Piega quindi a nord-est e scorre in un fondovalle stretto e inciso, fortemente antropizzato, dove bagna il centro abitato di Garessio e riceve in ingresso da sinistra il torrente Armella e da destra il torrente Cevetta.

All'altezza del torrente Cevetta il Tanaro si muove in direzione nord-ovest ed entra nel complesso collinare delle Langhe. Il corso d'acqua perde le sue caratteristiche torrentizie e assume le connotazioni di un corso d'acqua di pianura: l'alveo è caratterizzato da un tracciato prevalentemente meandriforme che si addossa alternativamente in destra e in sinistra, delimitato da versanti piuttosto acclivi. In questo tratto riceve da sinistra il torrente Corsaglia.

A seguito dell'immissione del torrente Corsaglia il fiume devia verso nord e bagna il comune di Farigliano. Il corso d'acqua è prevalentemente meandriforme e si sviluppa in un fondovalle relativamente stretto. Il suo percorso è influenzato dalla presenza di rilevati stradali e ferroviari, che impongono al fiume frequenti variazioni della direzione e determinano dei percorsi preferenziali diversi da quello naturale. In questo tratto si immettono da sinistra gli importanti affluenti Ellero, Pesio e Stura di Demonte, mentre da destra si immette il torrente Rea.

A seguito dell'immissione dello Stura di Demonte il Tanaro si dirige verso nord – est fino alla città di Asti. In questo tratto il fiume riceve in ingresso i torrenti Rio della Gera, Mellea e Riddone, e dalle Langhe i torrenti Talloria, Cherasca e Seno d'Elvio. Nelle vicinanze di Asti, inoltre, si immettono da sinistra anche il Borbore, il Rio Valmanera e la Versa.

Superata Asti, il Tanaro scorre verso est e prosegue fino alla confluenza in Po. Lungo questo tratto il fiume attraversa la città di Alessandria e riceve in ingresso da destra il torrente Tiglione e il fiume Bormida, e da sinistra il Rio Nuovo di Loreto. Il tracciato del fiume è ancora meandriforme, condizionato a tratti dal bordo collinare che lo rende piuttosto irregolare, con meandri più larghi dove il fondovalle è ampio e tratti sinuosi o subrettilinei dove questo si restringe. Sono presenti, inoltre, dei processi di erosione spondale locali e limitati, anche se a volta influenti sulla stabilità dei versanti collinari. Verso la confluenza in Po la morfologia è sempre meno influenzata dal bordo collinare, con meandri più ampi e meno serrati.
Poco oltre Montecastello il fiume sfocia nel Po con una portata media annua di 116.1 m^3/s.

Nella *figura 3* si rappresenta il percorso compiuto dal Tanaro con i suoi principali affluenti. In *tabella 2*, inoltre, sono riportate le portate medie annue registrate in ingresso nel Tanaro da alcuni dei suoi affluenti principali.

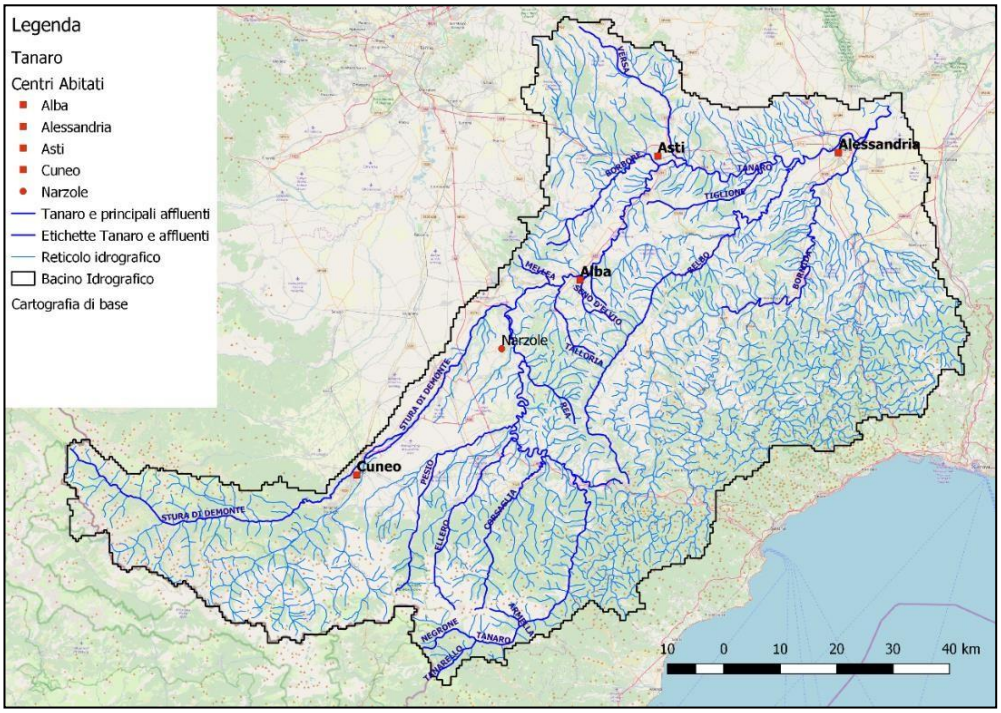


Figura 3 - Fiume Tanaro con i suoi principali affluenti (QGis).

Affluente	Portata media annua (m^3/s)
Corsaglia	1.3
Ellero	5.3
Pesio	7.8
Stura di Demonte	35.8
Borbore	3.5
Tiglione	1.2
Belbo	5.1

Tabella 2– Portate medie annue misurate alla confluenza in Tanaro di alcuni dei suoi tributari principali (fonti: Allegati tecnici del Piano di Tutela delle Acque).

In particolare, i tributari che maggiormente influenzano il deflusso della piena nell'area planiziale del Tanaro sono i fiumi Stura di Demonte e Bormida e il torrente Belbo.

2.3- Caratteristiche litologiche

La litologia del suolo ha un grande impatto sull'entità e sul meccanismo della permeabilità del suolo. Di conseguenza, una conoscenza generale delle caratteristiche litologiche del bacino del Tanaro permette di avere qualche informazione sul deflusso della piena. La sua descrizione, però, potrà essere solo qualitativa, poiché si tratta di un parametro fortemente variabile nello spazio a causa dell'orientazione e delle diverse caratteristiche delle discontinuità delle rocce o delle differenti proprietà del terreno.

In *figura 5* è riportata la mappa degli affioramenti litologici per il bacino di riferimento. Poiché si tratta di dati elaborati in maniera differente dalle due regioni Piemonte e Liguria, in figura sono state riportate le rispettive legende.

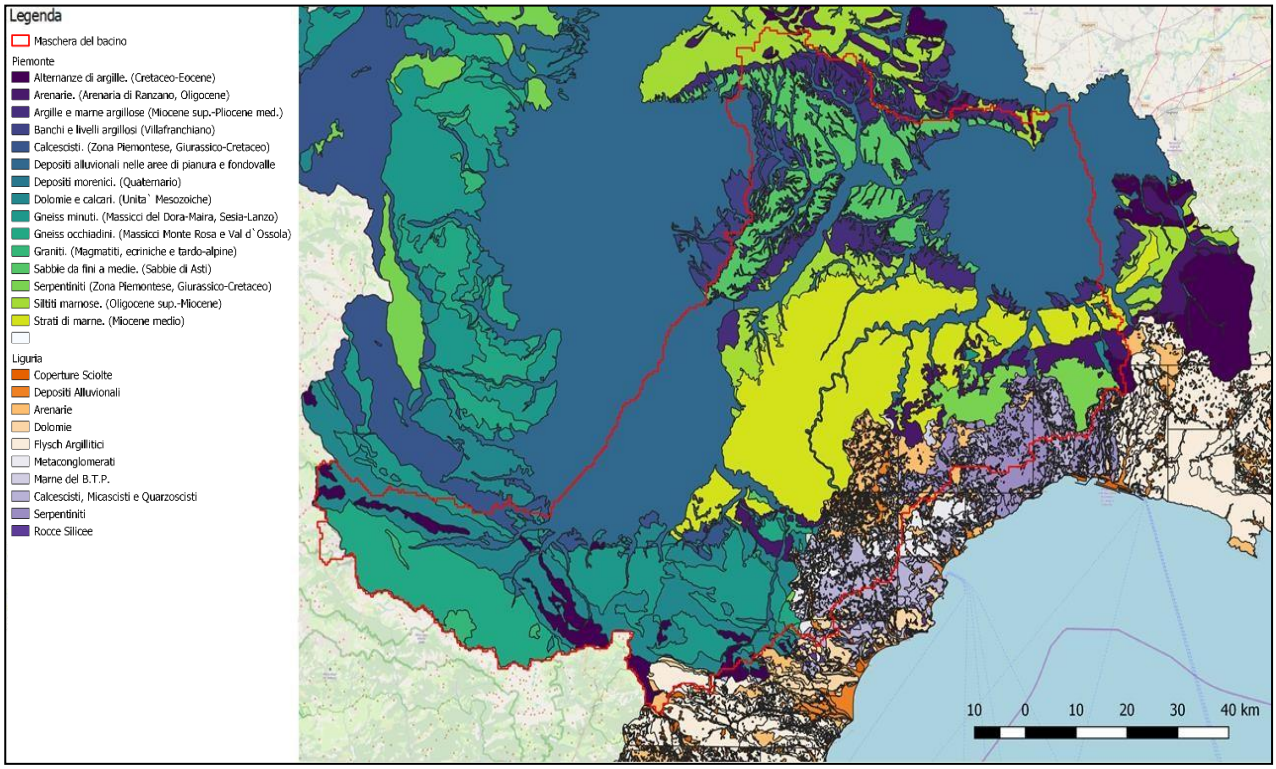


Figura 4– Mappa litologica del bacino del Tanaro.

Da questa mappa si osserva che l'area montuosa del bacino è costituita da massicci rocciosi, caratterizzati da una permeabilità per fratturazione in genere molto bassa. Le aree planiziali e collinari, invece, sono caratterizzate da depositi alluvionali, con permeabilità per porosità molto variabile con le caratteristiche granulometriche, oppure strati di sabbie, marne e siltiti con permeabilità mista e variabile a seconda del materiale.

2.4- Copertura del suolo

Il sistema suolo-vegetazione costituisce una capacità di invaso naturale che tende a ridurre la quantità di afflusso meteorico del bacino. Questa condizione può essere influenzata dal tipo di copertura del suolo: più questo è antropizzato, infatti, e meno è in grado di assorbire gli afflussi, aumentando la portata di ruscellamento intercettata dai corsi d'acqua.

Il Bacino del Tanaro è, in generale, poco urbanizzato, e i centri abitati sono concentrati prevalentemente lungo i corsi dei fiumi. Questa distribuzione è dovuta alla conformazione del paesaggio montano, caratterizzato da elevate pendenze e valli molto strette e incise, dalla grande estensione di aree coltivate nelle zone pianeggianti e collinari delle Langhe e del Monferrato e dalla mancanza di grandi insediamenti industriali e produttivi.
La scarsa urbanizzazione ha permesso la conservazione di rilevanti ambiti naturali, localizzati prevalentemente nelle zone montane, come ad esempio il Parco Naturale dell'Alta Valle Pesio e Tanaro e il Parco Naturale dell'Argentera.
Di seguito, in *figura 6*, si riporta un'elaborazione della mappa di copertura del suolo proveniente da un Rapporto Tecnico utilizzato per formulare il Piano di Tutela delle Acque del 2007 dell'Autorità di Bacino del Po.

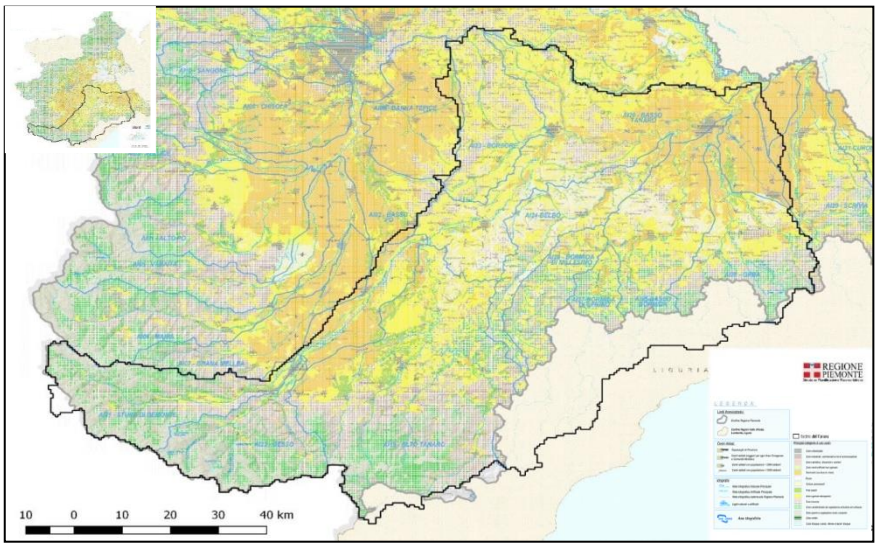


Figura 5– Mappa di Copertura del Suolo (fonte: Rapporto Tecnico "I.g/7 – Caratterizzazione dell'uso del suolo (Cartografia secondo legenda Corine con riferimento alle aree idrografiche)").

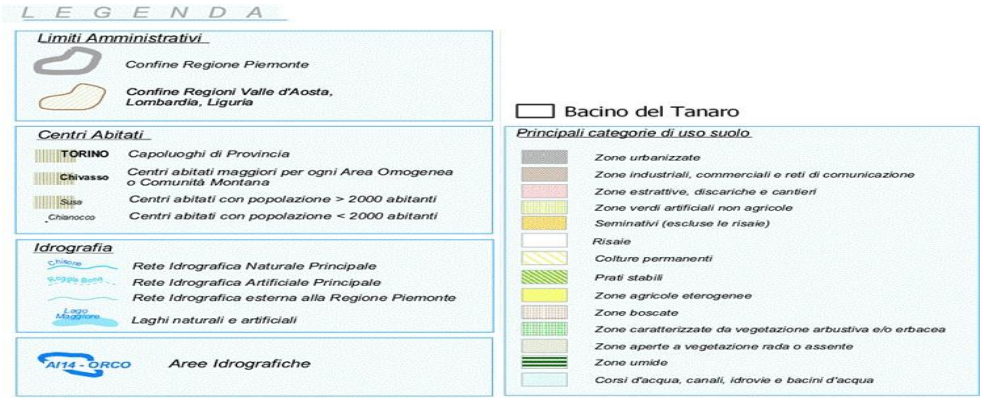


Figura 6– Copertura del suolo: ingrandimento della legenda.

2.5- Caratteristiche Climatiche

Gli aspetti climatici (in particolare precipitazioni e temperatura) del bacino del Tanaro sono fortemente dipendenti dall'orografia specifica e dal microclima a scala regionale.

Il Piemonte, in cui si trova la quasi totalità del bacino del Tanaro, è racchiuso su tre lati dalla catena montuosa alpina, all'interno della quale si trova la Pianura Padana. Questa particolare caratteristica geografica fa in modo che il territorio piemontese sia luogo di un continuo scontro tra le masse d'aria continentali provenienti dalla Pianura del Po, l'umidità proveniente dal Mediterraneo attraverso il Golfo di Genova e le correnti atlantiche nord – occidentali, che interagiscono con i rilievi determinando fenomeni di circolazione locali e presenza di microclimi.
La variazione di latitudine, invece, non ha nessuna influenza sul controllo climatico da parte del territorio perché l'estensione nord-sud della regione è molto modesta.

Precipitazioni
In questa regione le precipitazioni hanno un andamento bimodale, con due picchi massimi (in primavera e in autunno) e due minimi (in estate e in inverno). In base alla collocazione nell'arco dell'anno del massimo principale, del massimo secondario e del minimo principale di precipitazione, all'interno della regione si possono distinguere quattro diversi regimi pluviometrici: uno mediterraneo, con minimo principale in estate, e tre di tipo continentale, con minimo principale nella stagione invernale.
In particolare, questi sono:

- regime prealpino, caratterizzato dalla presenza del minimo principale nella stagione invernale, massimo principale nel periodo primaverile e massimo secondario in autunno. Si tratta del regime prevalente in Piemonte, registrato sul 58% della regione;
- regime subalpino, caratterizzato dalla presenza del minimo principale nella stagione invernale, massimo principale nel periodo autunnale e massimo secondario nella stagione primaverile. Viene registrato sul 13% del territorio piemontese, prevalentemente settentrionale;
- regime subcontinentale, caratterizzato dalla presenza del minimo principale nella stagione invernale, massimo principale in autunno e massimo secondario nel periodo estivo. Solo il 5% della regione piemontese, verso il settentrione, registra questo tipo di regime;
- regime sublitoraneo, caratterizzato dal minimo principale in estate, massimo principale in autunno e massimo secondario in primavera. Il 24% della regione registra questo tipo di comportamento.

Il Bacino del Tanaro, dunque, è caratterizzato da un regime pluviometrico prevalentemente prealpino e sublitoraneo: il comportamento prealpino è tipico della pianura cuneese e di buona parte del Monferrato, mentre quello sublitoraneo si trova nel Basso Monferrato, nelle Langhe, nella pianura alessandrina e in parte delle Alpi Marittime.

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale delle precipitazioni, in generale si registrano i massimi assoluti di pioggia in corrispondenza dell'interfaccia con la zona pianeggiante; via

via che ci si addentra nelle zone montane i valori diminuiscono. I valori più bassi sono collocati nelle aree di pianura sul fianco settentrionale dei rilievi appenninici.
Tutto ciò si può osservare in *figura 7*, che riporta la distribuzione spaziale delle precipitazioni totali annue sulla regione in mm.

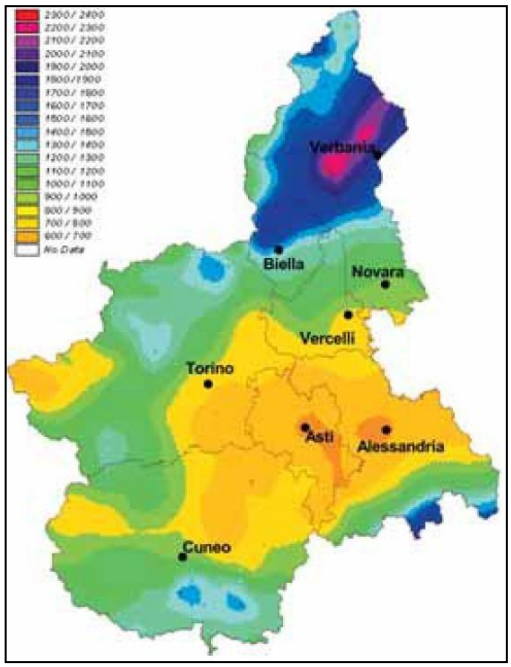


Figura 7– Distribuzione spaziale delle precipitazioni totali annue (mm), calcolate nel periodo 1961-1990 (fonte: "Il Piemonte e il Cambiamento Climatico", Arpa Piemonte, 2007).

Temperatura

Le temperature presentano, in generale, una forte escursione stagionale e un andamento decrescente con l'altitudine, a meno di casi particolari.

La temperatura media annua decresce regolarmente con la quota (a eccezione di alcune situazioni in cui si osservano scarti dovuti a condizioni locali). Dall'analisi delle temperature medie annue, riportata in *figura 8*, emerge infatti che l'intervallo entro il quale esse sono comprese va dai 13.2°C di Novara a valori negativi per quote superiori ai 2000 m s.l.m.

La temperatura media mensile invece mostra una forte escursione stagionale: a tutte le quote il mese più freddo è gennaio, quando il fenomeno di inversione termica è più evidente, mentre i valori massimi di temperatura sono raggiunti nel mese di luglio.

L'escursione termica regionale è causata principalmente della lontananza dal mare, che esercita un effetto di mitigazione delle variazioni di temperatura. Il regime del Piemonte, dunque, si avvicina a un regime più prettamente continentale.

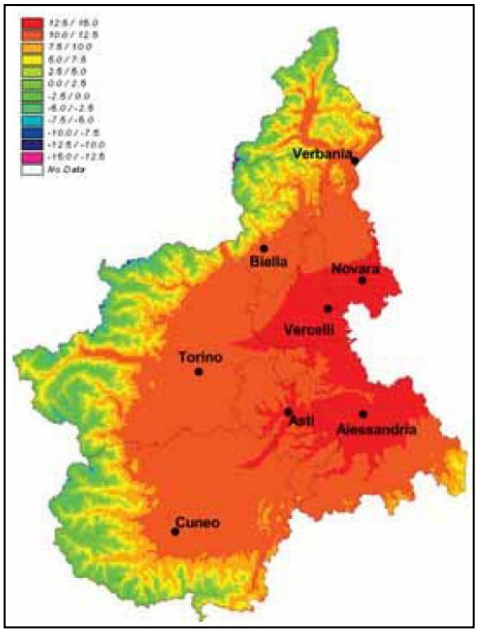


Figura 8 – Distribuzione spaziale delle temperature medie annue (°C), calcolate per il periodo 1961-1990 (fonte: "Il Piemonte e il Cambiamento Climatico", Arpa Piemonte, 2007).

Nello studio del clima a scala regionale è necessario considerare che il comportamento delle variabili rilevate a suolo, ovvero temperatura e precipitazioni, è correlato non solo all'orografia specifica del territorio e alla presenza di microclimi, ma anche a pattern di circolazione atmosferica a grande scala. In dettaglio, sono particolarmente rilevanti le correlazioni tra la distribuzione spaziale e stagionale di precipitazione e temperatura e i pattern noti come North Atlantic Oscillation, "blocking" scandinavo, Oscillazione Artica ed East Atlantic:

- la North Atlantic Oscillation è una fluttuazione ciclica del campo di pressione presente sul Nord Atlantico, in grado di portare inverni caldi e poco piovosi in corrispondenza delle sue fasi positive o inverni freddi e molto piovosi in corrispondenza delle sue fasi negative. La sua influenza è rilevante nei mesi invernali e cresce, in particolare per le precipitazioni, verso la parte finale dell'inverno e la parte iniziale della primavera;
- il "blocco" sulla penisola scandinava, fenomeno piuttosto frequente, è un'anomalia del campo anticiclonico tra il Circolo Polare Artico e il 50° parallelo N. La sua influenza si traduce in incrementi nella precipitazione e riduzione delle temperature massime in quasi tutte le stagioni;
- l'Oscillazione Artica è una variazione del campo di pressione nella zona dell'Artico. Nella sua fase positiva, quando la pressione sull'Artico è sotto la media, venti freddi e umidi investono la Scozia e la Scandinavia, con condizioni secche e forti venti alisei nel mediterraneo. Viceversa, un'anomalia negativa al Polo Nord spinge masse d'aria umida e fredda verso il sud Europa. Ne consegue che l'Oscillazione Artica ha un'influenza rilevante sulla temperatura e sulle precipitazioni simile al blocco scandinavo, seppur opposto in termini di fenomeni meteorologici, nelle stagioni invernali e autunnali;

- L'East Atlantic è una fluttuazione molto simile alla North Atlantic Oscillation e si manifesta in un dipolo nord-sud di anomalie che si dispiegano nel Nord Atlantico, da est a ovest. Esiste in tutte le stagioni una forte correlazione tra le temperature e la fase positiva di questo particolare pattern.

Infine, è interessante notare che negli ultimi settant'anni il cambiamento climatico ha influenzato anche i regimi di temperatura e di precipitazione della regione. In particolare, si evidenzia un aumento delle condizioni di aridità dell'area in esame, con maggior coinvolgimento della parte più meridionale del Piemonte.

2.6- Sfruttamento delle acque

Il deflusso naturale delle portate nel bacino del Tanaro è fortemente influenzato dal prelievo delle acque per scopi idropotabili, idroelettrici, produttivi o irrigui. In generale, l'acqua viene prelevata o immagazzinata sia da corpi idrici superficiali che da corpi idrici sotterranei (falde acquifere) in quantità e con meccanismi variabili a seconda della stagione e dello scopo dello sfruttamento. Per questo motivo, unito al fatto che i dati catastali relativi alle concessioni di sfruttamento non sono completi e spesso non rappresentano le reali condizioni di utilizzo delle opere di diversione, l'effettiva modellazione dell'impatto sul reticolo idrografico è molto complessa e in genere poco rappresentativa.

Per quanto riguarda lo sfruttamento delle acque superficiali, si parla di prelievi "per sottrazione", o "dissipativi", in quanto inducono sottrazione di acqua dall'alveo. Ipotizzando che i prelievi rispettino le reali condizioni delle concessioni, a seconda dello scopo dello sfruttamento si verificano le seguenti condizioni:

- i prelievi a scopo irriguo, che provengono per il 95% da corpi idrici superficiali (Ministero dell'Agricoltura - Consorzio per il canale Emiliano Romagnolo, "PoAcquAgricolturAmbiente", 1990), sono costanti e continui per 180 giorni lavorativi l'anno, tra aprile e settembre;
- i prelievi a scopo idroelettrico, idropotabile e termoelettrico sono continui e
- costanti tutto l'anno;
- i prelievi per produzione di beni e servizi sono continui tutto l'anno e concentrati per 10 ore al giorno su 260 giorni lavorativi l'anno (Indagini e Studi finalizzati alla predisposizione del PTA, Rapporto Tecnico I.e1);
- i prelievi aventi più finalità (molto frequenti, per esempio, quelli a scopo idroelettrico e irriguo) hanno vincoli specificati nelle singole concessioni.

I prelievi a scopo irriguo, effettuati attraverso canali di diversione, sono quelli che inducono un maggiore sbilancio idrico. Tuttavia, l'impatto è solo locale: le acque prelevate sono poi restituite a un corso d'acqua diverso, ma in genere facente parte dello stesso bacino idrografico. Essendo le derivazioni concentrate prevalentemente sui reticoli minori, l'impatto sul reticolo idrografico principale (e quindi sul bacino idrografico corrispondente) è trascurabile.

Per i prelievi a scopo idroelettrico il meccanismo è differente: l'impatto è diverso a seconda del tipo di impianto che caratterizza la centrale idroelettrica. Gli impianti possono essere di due tipi, ad acqua fluente o ad invaso.

Gli impianti ad acqua fluente, tipici dei bacini alpini, hanno un impatto locale: le portate prelevate sono restituite a valle senza perdite significative.

Gli impianti a invaso, invece, sono costituiti da serbatoi di regolazione con elevata capacità di immagazzinamento; sono quindi in grado di portare a un'evidente alterazione del regime idrologico naturale nelle sezioni a valle. La maggior parte degli invasi tende a immagazzinare la risorsa quando questa è abbondante, e a rilasciarla in funzione di specifiche idroesigenze, che non sono né univoche né fisse. Un aspetto critico connesso alla regolazione degli invasi è il cosiddetto "hydropeaking", ovvero la repentina variazione di portata provocata dalle esigenze di produzione idroelettrica. I tratti che sono interessati dal deflusso delle acque turbinate, quindi, sono caratterizzati da bruschi e consistenti aumenti di portata in corrispondenza della produzione di energia elettrica, seguiti da altrettanto repentine e notevoli diminuzioni di portata quando la domanda cessa e l'acqua viene stoccata nei bacini artificiali.

2.7- Regime idrologico

Il bacino del Tanaro è caratterizzato da un regime idrologico piuttosto complesso: essendo distribuito in parte sulle Alpi e in parte sugli Appennini presenta delle caratteristiche a metà strada tra i bacini alpini e appenninici.
È possibile studiare il regime del Tanaro analizzando le portate medie mensili a due diverse sezioni di chiusura:

- Narzole, rappresentativa del regime del tratto montano del Tanaro;
- Confluenza in Po, rappresentativa del tratto planiziale/collinare del fiume.

I grafici sono riportati in *figura 9*.

Il tratto montano del Tanaro presenta le caratteristiche tipiche dei bacini pedemontani: a causa delle precipitazioni intense (dovute all'esposizione alle correnti umide provenienti dal Mediterraneo attraverso il Golfo di Genova) e delle basse altitudini, le precipitazioni sono prive di apporti nevosi consistenti per gran parte dell'anno. Ciò comporta che le piene si verificano generalmente in autunno e in tarda primavera con deflussi molto elevati.
Il tratto di pianura ha le caratteristiche tipiche dei bacini appenninici: l'influenza delle precipitazioni nevose è trascurabile a causa della modesta altitudine. I periodi maggiormente critici per il manifestarsi delle piene sono ancora una volta compresi nelle stagioni autunnale e tardo-primaverile, mentre i periodi di magra sono distribuiti nei periodi estivo e invernale, con il primo più accentuato del secondo a causa delle minori precipitazioni e dello sfruttamento intenso delle acque operato sui reticoli minori.

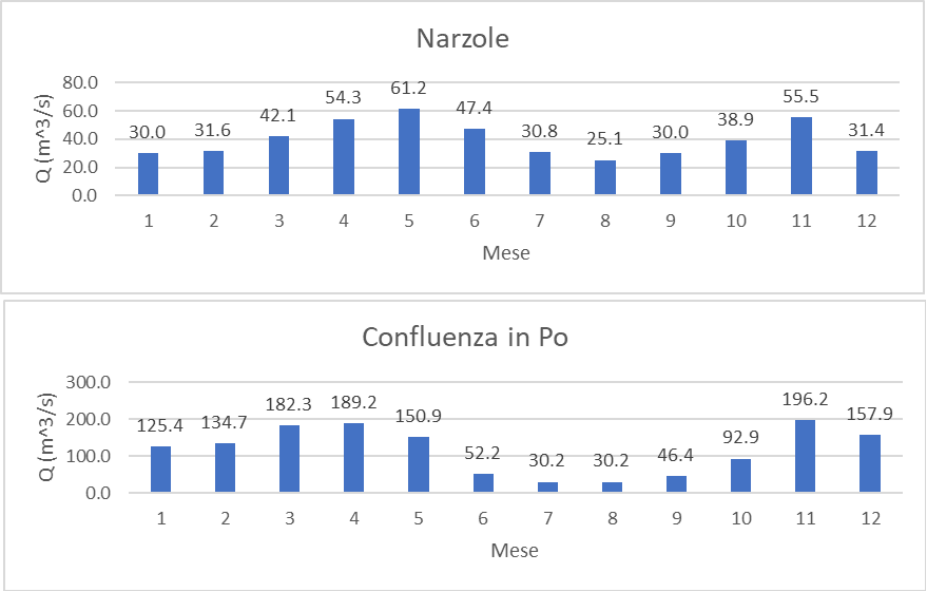


Figure 9- Portate medie mensili del fiume Tanaro misurate alle sezioni di chiusura di Narzole e della confluenza in P (fonti: allegati tecnici "Al19-Alto Tanaro", "Al20-Basso Tanaro" del Piano di Tutela delle Acque).

Si sottolinea ancora una volta come il regime idrologico identificato alla sezione di chiusura coincidente alla confluenza in Po è fortemente influenzato dai comportamenti dei suoi principali tributari.

3- Dati utilizzati

In questo capitolo si descrivono i dati necessari all'utilizzo del modello idrologico FEST – WB. Il modello infatti richiede in input le forzanti meteorologiche, i dati di portata e le informazioni sull'uso del suolo, le quote altimetriche e la vegetazione. Per questo elaborato, tuttavia, solo i dati sulle forzanti meteorologiche e quelli di portata sono di nostro interesse, in quanto i restanti erano già inseriti nel modello e non sono stati modificati, essendo il FEST-WB già stato calibrato per il bacino del Tanaro nella tesi dell'Ing. Corso. Per questo motivo verranno trattate velocemente solo queste due tipologie di dati.

3.1- Dati meteorologici

I dati riguardanti le forzanti meteorologiche, ovvero precipitazioni e temperatura dell'aria nelle vicinanze della superficie, sono di tipo puntuale, in quanto raccolti da stazioni strumentate ogni 30 minuti. Essi provengono dalla rete di monitoraggio di ARPA Piemonte, costituita da oltre 400 stazioni di rilevamento in teletrasmissione e in tempo reale, con una densità di uno strumento ogni 100 km^2.
In particolare, i dati di temperatura inseriti come input nel modello sono stati raccolti da 84 stazioni della rete localizzate nel bacino idrografico del Tanaro. Si considera la serie storica di misurazioni del periodo 1/01/2012 – 2/01/ 2015, con tre misure di temperatura ogni mezz'ora: attuale, media e massima. Questi dati, già inseriti nel modello dall'elaborazione precedente, non sono stati modificati.
Nello stesso periodo sono stati raccolti i dati di precipitazione liquida da 98 pluviometri e pluviografi dell'intera rete localizzati nel bacino del Tanaro, con una discretizzazione temporale di 10 minuti. Questi sono di fondamentale interesse per il nostro scopo, in quanto saranno oggetto della correzione che si vuole testare.

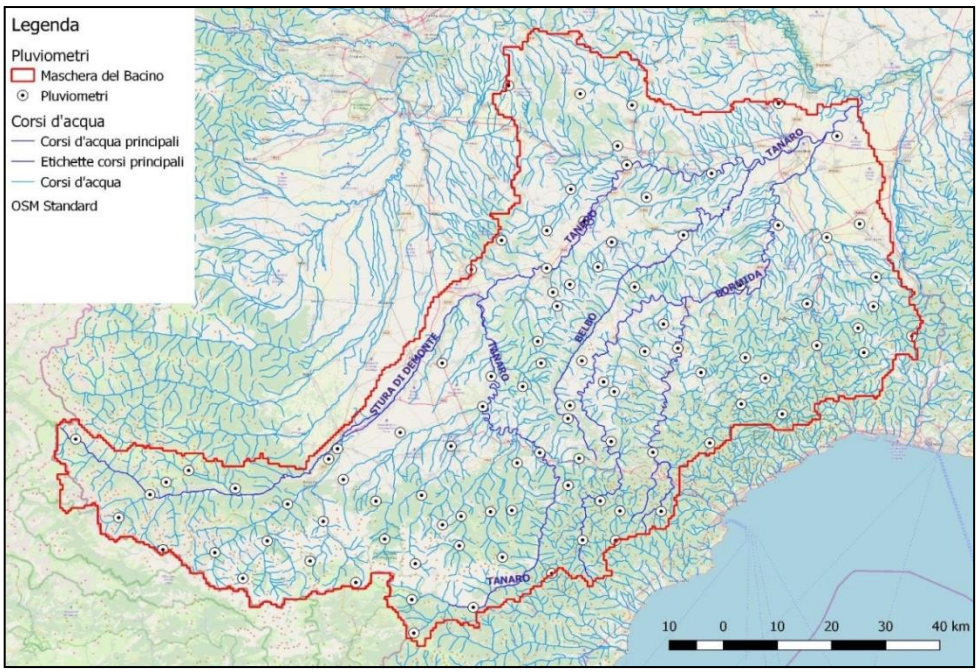


Figura 10– Stazioni pluviometriche nel bacino del Tanaro

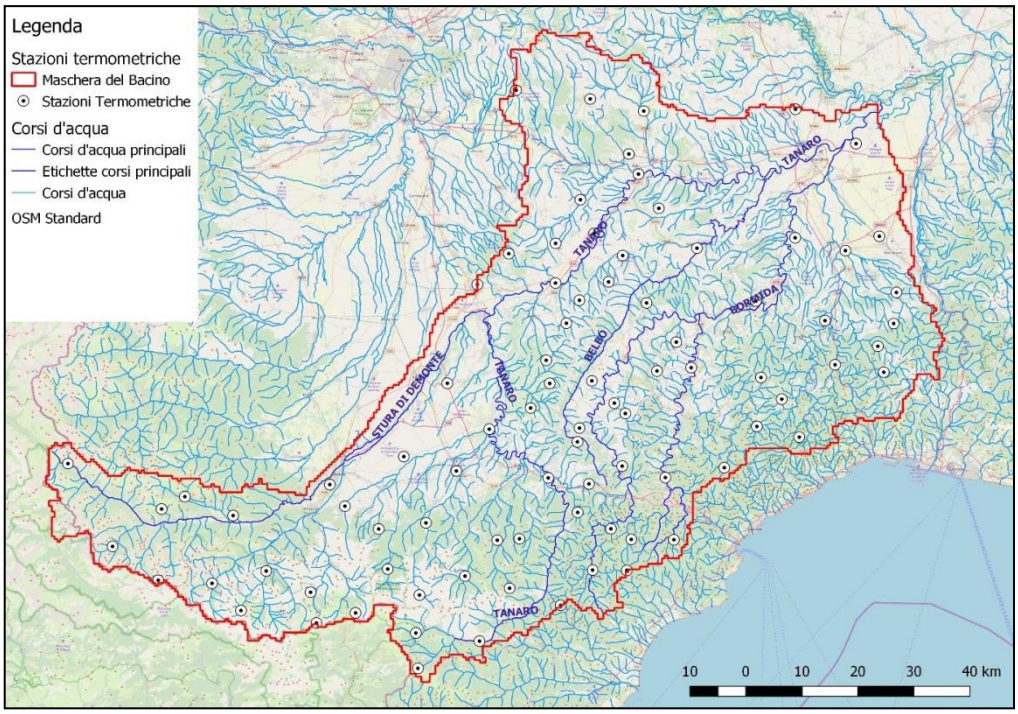


Figura 11– Stazioni termometriche nel bacino del Tanaro

3.2- Dati di portata

I dati di portata sono forniti da ARPA Piemonte e sono costituiti da una serie di misurazioni idrometriche registrate in 32 sezioni di chiusura distribuite all'interno del Bacino del Tanaro. Si tratta di registrazioni di livelli idrometrici effettuate ad ogni sezione a intervalli regolari di 30 minuti, che sono poi trasformate in valori di portata transitante utilizzando le scale di deflusso, specifiche per ogni sezione di chiusura. Molte stazioni, specialmente quelle localizzate su bacini alpini di modesta dimensione, sono nuove, pertanto le scale di deflusso associate non sono perfettamente collaudate.
Anche questi dati sono disponibili per il periodo 1/01/2012 - 2/02/2015 e si tratta delle misure osservate con cui verranno confrontati i risultati delle simulazioni del FEST.
Poiché molte delle 32 stazioni disponibili hanno delle lacune di dati sui tre anni di riferimento, mentre altre sono state scartate in seguito alla calibrazione del modello,
sono state considerate per l'analisi solo le 9 stazioni riportate in *tabella 3*.

Stazione	X (m)	Y (m)	Z (m s.l.m.)
Mondovi Ellero	406299.94	4916065.50	390.00
Garessio Tanaro	421353.03	4895475.50	582.00
Piantorre Tanaro	417873.53	4919039.00	345.00
Alba Tanaro	423806.25	4951072.50	172.00
Asti Tanaro	437892.81	4970563.00	117.00
Masio Tanaro	453525.00	4969048.00	105.00
Montecastello Tanaro	474912.75	4977048.00	216.00
Castelnuovo Belbo	454370.78	4960983.50	122.00
San Damiano Borbore	427500.00	4966004.00	154.00

Tabella 3– Coordinate geografiche delle stazioni nel sistema di riferimento WGS84.

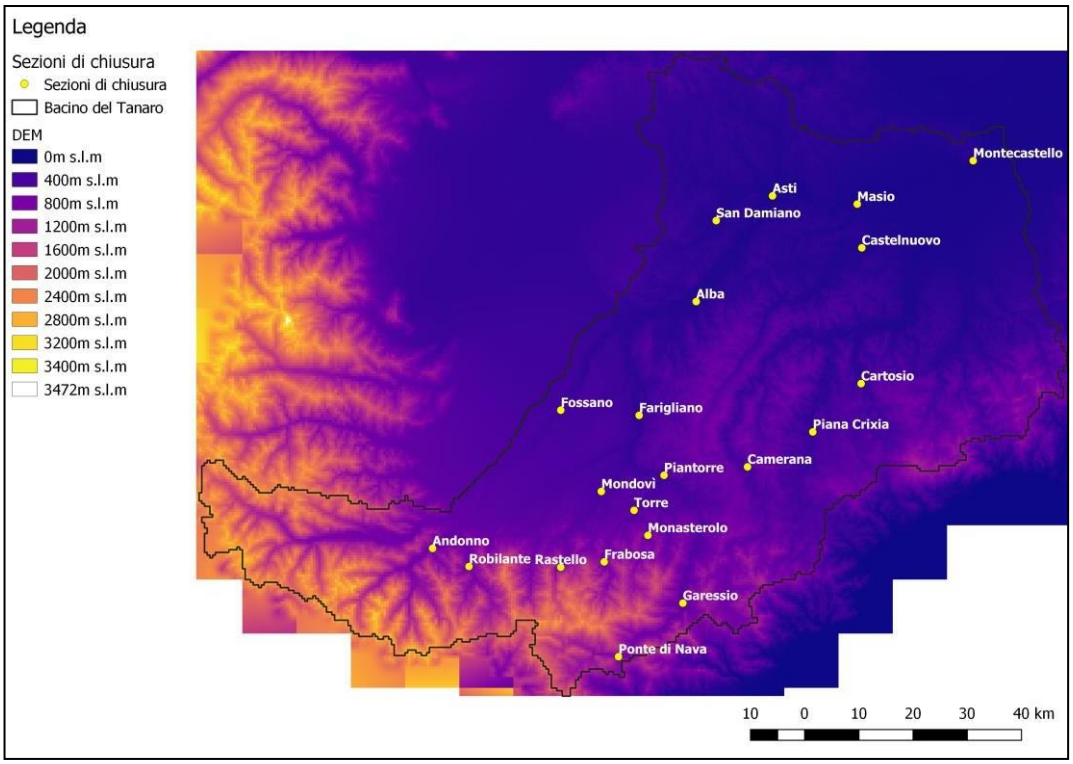


Figura 12– Sezioni di chiusura.

4- Il modello idrologico

Per la calibrazione si utilizza il modello idrologico dinamico FEST-WB (Flash – flood Event – based Spatially – distributed rainfall – runoff Transformation – including Water Balance), sviluppato presso il Politecnico di Milano. Esso si fonda sulla soluzione dell'equazione del bilancio della massa attraverso la modellazione dei meccanismi di evapotraspirazione, infiltrazione, deflusso superficiale, deflusso profondo e dinamica della neve (Corbari et al, 2007; Ravazzani et al., 2008).

Il modello FEST-WB rientra nella classificazione dei modelli fisicamente basati a parametri distribuiti. Si tratta di un modello fisicamente basato perché ricorre alla risoluzione dell'equazione del bilancio della massa. Di conseguenza, i parametri da calibrare sono delle grandezze fisiche. Inoltre, è a parametri distribuiti perché il funzionamento del bacino è riprodotto nelle varie componenti elementari in cui è discretizzato, ovvero le celle elementari che compongono la griglia raster.

Queste caratteristiche del permettono di calcolare le variabili idrologiche con un'elevata risoluzione spaziale. Per contro, il costo computazionale è molto elevato, in quanto il numero di parametri da stimare risulta pari al numero di parametri che descrivono la singola cella, moltiplicato per il numero di celle. Ciò rappresenta la sua principale limitazione.

Si riporta, in *figura 13*, uno schema sintetico del suo funzionamento.

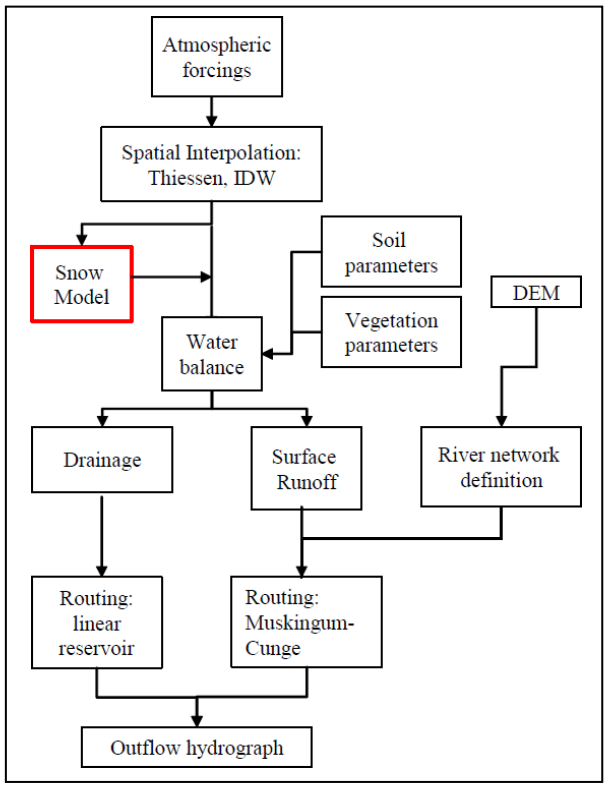


Figura 13– Schema del modello idrologico FEST-WB (Corbari et al., 2007)

4.1- Input del sistema

Il modello FEST-WB richiede in ingresso un grande quantitativo di dati, in particolare le forzanti meteorologiche e le mappe GIS contenenti informazioni sull'uso del suolo, le quote altimetriche, la copertura vegetale e le proprietà idrauliche del suolo (Corbari et al., 2007; Ravazzani et al., 2008).

I dati meteorologici richiesti in ingresso sono precipitazione, temperatura dell'aria, velocità del vento, umidità relativa dell'aria e radiazione solare a onde corte incidente sul suolo. Si tratta di dati puntuali raccolti dal sistema di monitoraggio della Regione Piemonte, che vengono interpolati con il metodo dei Topoieti di Thiessen o con il metodo della pesatura per distanza inversa (IDW) sulla griglia regolare del bacino. La temperatura dell'aria è interpolata alle diverse quote trascurando il fenomeno dell'inversione termica.

Dalle mappe GIS delle quote del terreno si ricavano informazioni geomorfologiche necessarie per la valutazione del deflusso superficiale, quali la direzione dei deflussi (puntatori), la pendenza, la direzionalità del versante (cioè l'orientamento della linea di massima pendenza) e l'albedo.

Infine, si richiedono in ingresso le mappe che descrivono le caratteristiche idrogeologiche e di copertura del suolo del bacino:

- la permeabilità a saturazione (k_{sat}) e profonda (k_{prof});
- la "bubbling pressure" (b_{press});
- le mappe del Curve Number (CN) e della frazione vegetale (f_v);
- la capacità di campo (f_c);
- l'indice di Brooks e Corey (bc);
- il wilting point (w_p);
- indici del contenuto volumetrico residuo e di saturazione (θ_{res} e θ_{sat});
- la profondità del suolo (Z): il bacino è schematizzato come uno strato di terreno di spessore Z (m), le cui caratteristiche sono descritte da mappe GIS, poggiante su una base impermeabile.

Non tutte queste informazioni sono determinabili con elevata precisione. La mancanza o l'incertezza legata ai parametri di ciascuna cella è un altro limite del modello FEST-WB.

4.2- Il bilancio della massa

Il modello FEST – WB è basato sulla risoluzione dell'equazione del bilancio della massa per un singolo layer fissato (Corbari et al., 2007).
Per ogni cella alla posizione (i, j) non coperta dalla neve, ad ogni istante temporale t si aggiorna il dato di umidità del terreno θ:

$$\theta_{t+1,i,j} = \theta_{t,i,j} + \frac{I_{t,i,j} - D_{t,i,j} - ET_{t,i,j}}{Z_{i,j}}$$

dove:

- $I_{t,i,j}$ $(\frac{m}{s})$ rappresenta l'infiltrazione;
- $D_{t,i,j}$ $(\frac{m}{s})$ è l'acqua persa per percolazione o drenaggio;
- $ET_{t,i,j}$ $(\frac{m}{s})$ è l'evapotraspirazione;
- $Z_{i,j}$ (m) è lo spessore layer di terreno della cella i, j.

L'umidità del suolo nelle celle ricoperte dalla neve, invece, è assunta costante nel tempo (Corbari et al., 2009).

Il termine di infiltrazione $I_{t,i,j}$ è valutato con la seguente formulazione:

$$I_{t,i,j} = P_{t,i,j} - R_{t,i,j} + D_{unn\ t,i,j}$$

dove $P_{t,i,j}$ $(\frac{m}{s})$ è il tasso di precipitazione lorda, comprensivo di accumulo/scioglimento della neve e scioglimento del ghiaccio; $R_{t,i,j}$ $(\frac{m}{s})$ è la pioggia netta, cioè l'acqua persa per ruscellamento; $D_{unn\ t,i,j}$ è il ruscellamento Dunniano.

Il termine di percolazione $D_{t,i,j}$ è ricavato in funzione della permeabilità verticale a saturazione del terreno k_{sat} $(\frac{m}{s})$, dell'umidità del suolo $\theta_{t,i,j}$ $(-)$, dell'umidità residua θ_{res} $(-)$, dell'umidità a saturazione $\theta_{sat}(-)$ e della curva di ritenzione idrica descritta dall'indice di distribuzione dei pori di Brooks & Corey (Brooks, 1964) B $(-)$:

$$D_{t,i,j} = k_{sat} \left(\frac{\theta_{t,i,j} - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{\frac{2+3B}{B}}$$

La formulazione è utilizzata sia per la parte montana che la parte pianeggiante del bacino, nonostante i meccanismi siano differenti:

- nella zona montana, lungo i versanti delle valli, la profondità del terreno è piuttosto limitata. L'acqua che percola, quindi, raggiunge subito lo strato impermeabile, forma uno strato saturo e dà luogo a un deflusso profondo;
- nella zona pianeggiante l'acqua percolata è molto spesso un termine di ricarica dell'acquifero profondo.

In entrambi i casi, comunque, la percolazione è dipendente dagli stessi fattori.

4.3 I processi fisici

Nel bilancio della massa compaiono i principali processi fisici che regolano la risposta del bacino idrografico agli eventi meteorologici, cioè dinamica della neve, infiltrazione, evapotraspirazione, deflusso superficiale e deflusso profondo. Se ne riporta una rappresentazione in *figura 14*.

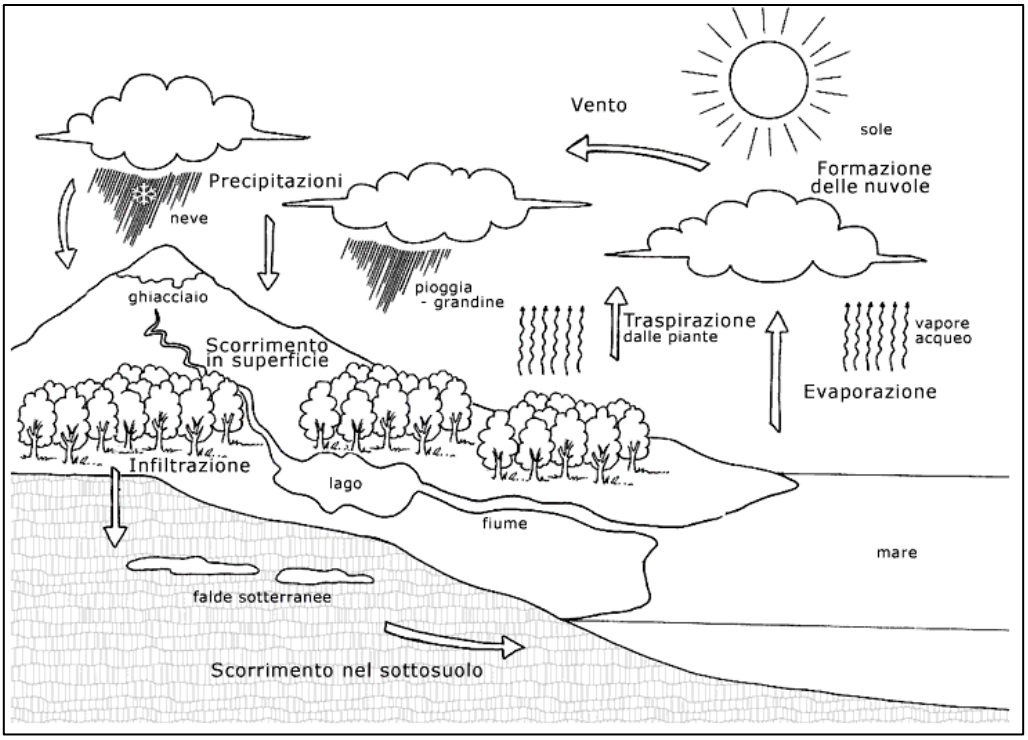


Figura 14 – Illustrazione schematica del ciclo idrologico.

Dinamica della neve

Nei bacini alpini il regime di portata è caratterizzato, oltre che dalle condizioni atmosferiche e dalle caratteristiche del suolo, anche da accumulo e fusione di neve e ghiacciai. In inverno, infatti, la maggior parte della precipitazione è accumulata sotto forma di neve, mentre nella stagione di fusione la neve diventa un rilevante contributo della portata dei fiumi (Corbari et al., 2007).
Poiché l'80% circa del bacino del Tanaro si trova in ambito montano è necessario rappresentare la dinamica della neve per stimare correttamente le portate nei corsi d'acqua.

Il blocco del modello FEST-WB che se ne occupa, simula la dinamica della neve modellandone i meccanismi di accumulo e fusione. A tal fine riceve in input le mappe di precipitazione e temperatura e fornisce in output l'altezza della neve, la mappa di precipitazione lorda comprensiva dell'accumulo e dello scioglimento della neve, l'equivalente idrico della neve SWE (Snow Water Equivalent) e la percentuale di copertura nevosa. Si ipotizza che il terreno ricoperto dalla neve sia ghiacciato, in modo da escludere dalla modellazione il meccanismo di infiltrazione nel terreno (Corbari et al., 2009).

1-Accumulo della neve

Le informazioni di precipitazione sull'intero bacino provengono da pluviometri riscaldati. Ciò impedisce la distinzione tra precipitazione liquida e precipitazione solida. La prima operazione, quindi, è la ricostruzione del campo di precipitazione, che terrà conto della contemporanea presenza delle due fasi in un unico evento meteorico.
La partizione della precipitazione lorda $\mathrm{P}\,(\mathrm{mm})$ in precipitazione liquida $\mathrm{P}_l\,(\mathrm{mm})$ e solida

P_s (mm) segue la seguente legge (Tarboton et al., 1994):

$$P_l = \alpha_p P$$
$$P_s = (1 - \alpha_p)P$$

dove α_p, il fattore di separazione dello stato solido-liquido, dipende dalla temperatura dell'aria.

2- Fusione nivale

Il modello di fusione nivale è basato sul concetto dei gradi-giorno (Martinec et al., 1960), ovvero il prodotto cumulato tra il tempo e la differenza tra la temperatura media e una temperatura di soglia prefissata. Un grado-giorno è rappresentabile come un giorno con una temperatura di 1°C superiore alla temperatura di soglia.

Il tasso di fusione nivale M_{snow} $\left(\frac{m}{s}\right)$ prodotto nell'unità di tempo, quindi, è proporzionale alla differenza tra la temperatura media giornaliera T_{atm} (°C) e un limite di temperatura $T_{m,snow}$ $(°C)$ predefinito, superato il quale si verifica la fusione della neve (solitamente pari a 0°C):

$$M_{snow} = C_{m,snow}(T_{atm} - T_{m,snow}) \qquad T_{atm} > T_{m,snow}$$
$$M_{snow} = 0 \qquad T_{atm} \leq T_{m,snow}$$

$C_{m,snow}$ $\left(\frac{m}{°Cs}\right)$ è un coefficiente empirico di proporzionalità che tiene conto delle condizioni geografiche, meteorologiche e delle proprietà del manto nevoso (Corbari et al., 2008).

Si riporta in *figura 15* una rappresentazione schematica di queste prime due fasi del blocco riguardante la dinamica della neve:

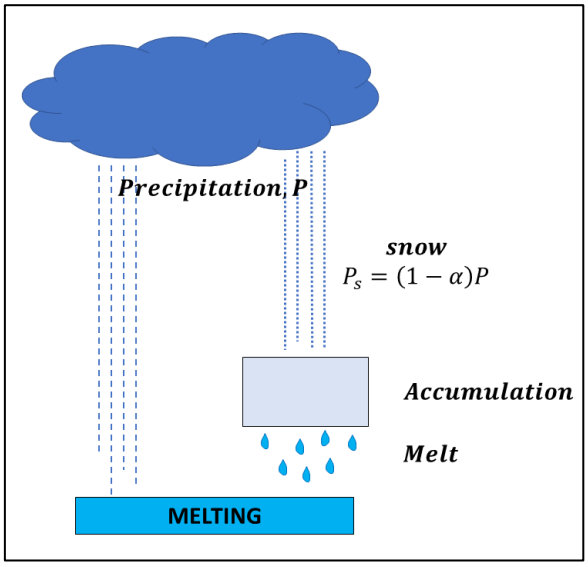


Figura 15 – Rappresentazione schematica delle dinamiche di accumulo e fusione nivale.

Dinamica dell'infiltrazione

La dinamica dell'infiltrazione è simulata con il metodo SCS-Curve Number (U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1985) adattato alle simulazioni continue (Ravazzani et al, 2007). Esso permette il calcolo, ad ogni istante dt della simulazione, del massimo potenziale di ritenzione S.

La relazione classica è formulata per mezzo di un modello a parametri concentrati, che rappresenta l'intero bacino come un elemento unico. Si richiede in input, quindi, solo un valore di precipitazione e degli altri parametri idrologici. Il fattore S è espresso in funzione del parametro adimensionale di assorbimento CN (Curve Number):

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right)$$

Il Curve Number è dipendente dal tipo e dall'uso del suolo e può assumere valori compresi tra 0 e 100. Il valore minimo corrisponde a un terreno completamente permeabile e simula l'assenza di deflusso superficiale, mentre il valore massimo è associato a un suolo impermeabile, con afflussi uguali ai deflussi.
Oltre alla copertura del suolo, anche la sua umidità a inizio evento gioca un ruolo importante nella dinamica dell'infiltrazione. Per considerare questo aspetto si fa riferimento a tre diversi AMC (Antecedent Moisture Condition I, II e III), secondo la *tabella 4*:

	Precipitazione nei 5 giorni precedenti (mm)	
Classe AMC	**Stagione di riposo**	**Stagione di crescita**
I	<13	<36
II	13-28	36-54
II	>28	>54

Tabella 4 – Classi di Antecedent Moisture Condition.

La classe I corrisponde a un terreno secco, la classe II a un terreno mediamente umido e la classe III a un terreno umido e saturo.
I valori del parametro CN si riferiscono a una condizione iniziale dell'evento standard, indicata dalla classe AMC_{II}. Per condizioni iniziali differenti esistono le seguenti formule (Moisello, 1998):

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}}$$

dove CN_I si riferisce alla classe AMC_I e CN_{III} si riferisce alla classe AMC_{III}. Con la formulazione classica quindi si calcoleranno S_I, S_{II} e S_{III}, con $S_I > S_{II} > S_{III}$ poiché $CN_I < CN_{II} < CN_{III}$.

Quando il processo di evapotraspirazione assume un ruolo importante nelle dinamiche di umidità del suolo, una definizione di tre sole classi di umidità dipendenti unicamente dalle precipitazioni dei cinque giorni precedenti non è sufficientemente accurata (Ravazzani et al., 2007).
Il metodo SCS-CN modificato a parametri distribuiti calcola l'umidità iniziale per ogni cella del dominio di analisi facendo riferimento alla condizione di umidità del terreno nell'istante in cui l'evento ha inizio. Per valutarla si procede aggiornando il valore del parametro Θ (umidità del suolo) ad ogni intervallo di tempo. Partendo dal valore del CN_{II}, si calcola il valore di CN_I tramite la formula:

$$CN_I = \frac{4.2 \cdot CN_{II}}{10 - 0.058 \cdot CN_{II}}$$

e successivamente si ottiene il valore di S_I con la relazione:

$$S_I = 254 \cdot \left[\left(\frac{100}{CN_I}\right) - 1\right]$$

A partire dal valore di umidità, si ricava il grado di saturazione del suolo (ε_t), tramite la formula:

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}$$

dove θ_{sat} rappresenta l'umidità a saturazione e θ_{res} corrisponde all'umidità residua.
Si ottengono quindi i valori di S_I ed ε_t ad ogni step di calcolo, con i quali si calcola il parametro S_t:

$$S_t = S_I(1 - \varepsilon_t)$$

In questo modo la capacità di ritenzione S_t varia linearmente con il grado di saturazione. Invece di tre soli valori di S_t, corrispondenti alle tre classi di umidità, si ricavano valori che variano con continuità nell'intervallo [*0 - S_I*]. Grazie all'applicazione di questo metodo di calcolo ad ogni cella del dominio, inoltre, è possibile apprezzare anche la variabilità spaziale del parametro.

Con il metodo SCS-CN modificato a parametri distribuiti è possibile, dunque, ricavare la frazione di pioggia lorda che non si infiltra causando il deflusso superficiale (Bras, 1990).
Si definiscono le perdite inziali di precipitazione dovute all'intercettazione della vegetazione e all'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno:

$$I_a = 0.2S$$

Sono direttamente proporzionali al massimo potenziale di ritenzione, a meno di un coefficiente determinato sulla base di alcune analisi sperimentali condotte dal Soil Conservation Service.
Il calcolo del ruscellamento superficiale segue la seguente legge:

$$R = 0 \qquad se\ P \leq I_a$$

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \qquad se\ P > I_a$$

dove P rappresenta il valore cumulato nel tempo di precipitazione piovosa.

Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione è la somma di due processi difficilmente distinguibili: l'evaporazione e la traspirazione.

- L'evaporazione è il processo attraverso il quale l'acqua allo stato liquido è convertita in vapore acqueo e rimossa da una qualunque superficie evaporante, come corpi d'acqua, suoli saturi o superfici insature. L'energia richiesta per il passaggio di stato è fornita dalla radiazione solare e dalla temperatura dell'ambiente circostante.
  I parametri climatici da considerare nella stima dell'evaporazione sono radiazione solare, velocità del vento, temperatura a suolo e umidità dell'aria.
- La traspirazione consiste nella vaporizzazione dell'acqua contenuta nei tessuti vegetali (Bras, 1990). Come l'evaporazione dipende dalla fornitura di energia, dal gradiente di vapore saturo, dalla velocità del vento, dalla temperatura, dall'umidità dell'aria, dalla capacità del suolo di condurre acqua alle radici (wilting point) e dalla fisiologia delle piante.

Esistono numerose formule per la simulazione del fenomeno. Nel modello FEST- WB, in particolare, si usa una relazione empirica che lega l'evapotraspirazione effettiva all'evapotraspirazione potenziale (Corbari et al., 2007).
L'evapotraspirazione potenziale (Priestley e Taylor, 1972; Bras, 1990) rappresenta la quantità d'acqua evaporata dal suolo in condizioni di disponibilità d'acqua illimitata. Si tratta di un valore teorico: in condizioni reali l'evapotraspirazione effettiva ET assumerà valori compresi tra 0 e l'evapotraspirazione potenziale ET_P. La relazione è la seguente:

$$ET_P = 0.0023\, R_a (T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

dove T_{mean} è la temperatura media giornaliera dell'aria, T_{min} e T_{max} sono le temperature minima e massima giornaliera dell'aria e R_a $(\frac{mm}{giorno})$ è la radiazione solare extraterrestre per il sito e per il giorno di interesse, valutabile attraverso una formulazione empirica dipendente dalla latitudine, dalla stagione e dall'ora.
Ad ogni step temporale è possibile valutare l'evapotraspirazione effettiva come una frazione di quella potenziale secondo la seguente relazione empirica (Montaldo et al., 2003):

$$ET = E_s + T_s$$
$$E_S = \alpha(\theta)\, ET_P\, (1 - f_v)$$
$$T_s = \beta(\theta)\, ET_p\, f_v$$

dove:

- E_S rappresenta l'evaporazione effettiva;
- T_s rappresenta la traspirazione effettiva;

- f_v è la frazione vegetale;
- $(1 - f_v)$ è la percentuale di suolo nudo;
- α e β sono due coefficienti che dipendono dall'umidità del terreno (variabile nel tempo).

Propagazione dei deflussi

Il deflusso profondo, costituito dalle acque provenienti dall'infiltrazione, viene propagato sul bacino di studio con il metodo dell'invaso lineare.
Il deflusso superficiale, costituito dalle acque coinvolte nel ruscellamento superficiale e nella dinamica di scioglimento della neve, può essere ricavato dalla risoluzione di un sistema di equazioni del tipo:

$$\begin{cases} I(t) - O(t) = \dfrac{dW(t)}{dt} \\ W(t) = W\left[I(t), O(t), \dfrac{dI(t)}{dt}, \dfrac{dO(t)}{dt}, \dfrac{d^2I(t)}{dt^2}, \dfrac{d^2O(t)}{dt^2}, \dots\right] \end{cases}$$

La prima relazione rappresenta il bilancio della massa: la variazione di volume in un tronco d'alveo è necessariamente pari alla differenza tra le portate entranti e uscenti dalle due sezioni di chiusura. Considerando un incremento temporale Δt viene discretizzata come segue:

$$\frac{I_{t+\Delta t} + I_t}{2} - \frac{O_{t+\Delta t} + O_t}{2} = \frac{\Delta \mathrm{W}}{\Delta \mathrm{t}}$$

La seconda equazione lega i volumi invasati nel tronco fluviale in funzione dei deflussi entranti e uscenti e delle loro derivate. A seconda del modo con cui questa relazione è formulata si hanno diversi metodi. Nel modello FEST-WB, in particolare, è implementato il metodo Muskingum-Cunge-Todini (Todini, 2007), una correzione del metodo Muskingum-Cunge.

- Metodo Muskingum (McCarthy, 1938)

La formulazione originale del metodo Muskingum calcola i volumi immagazzinati nel tronco fluviale di analisi a partire dai deflussi in ingresso e in uscita:

$$W(t) = kO + k\varepsilon(I - O) = k[\varepsilon I + (1 - \varepsilon)O]$$

dove I $(\frac{m^3}{s})$ e O $(\frac{m^3}{s})$ sono le portate in input e in output, rispettivamente; k (ore) è il coefficiente di immagazzinamento ed ε $(-)$ è un termine che rappresenta il "peso" tra portata entrante e uscente.
Noti i coefficienti k ed ε, la relazione di Muskingum discretizzata con l'incremento temporale Δt è la seguente:

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t$$

dove:

$$C_1 = \frac{-2k\varepsilon + \Delta t}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta t}$$
$$C_2 = \frac{2k\varepsilon + \Delta t}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta t}$$
$$C_3 = \frac{2k(1 - \varepsilon) - \Delta t}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta t}$$

Il metodo assume i coefficienti k ed ε costanti nel tempo, ricavati attraverso una procedura di taratura iterativa e pertanto indipendenti dalle caratteristiche del corso d'acqua.

- Metodo Muskingum-Cunge (Cunge, 1969)

Cunge estese il metodo Muskingum introducendo dei parametri variabili nel tempo, i cui valori

possono essere determinati in funzione di una portata di riferimento.
I due parametri, k ed ε, sono ricavati come segue:

$$k = \frac{\Delta x}{c} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q_{ref}}{icB\Delta x}\right)$$

dove Δx (m) è la distanza tra due sezioni adiacenti, c $(\frac{m}{s})$ è la celerità cinematica, Q_{ref} $(\frac{m^3}{s})$ è una portata di riferimento, B (m) è la larghezza della sezione all'altezza del pelo libero e i è la pendenza del fondo del canale.
Il metodo Muskingum-Cunge è ampiamente utilizzato perché caratterizzato da una formulazione semplice e dalla necessità di pochi dati. Nonostante ciò, molti autori hanno notato la presenza di incongruenze. In primo luogo, l'utilizzo di parametri variabili nel tempo comporta una perdita della massa che cresce al diminuire della pendenza del fiume (Ponce e Yevjevich, 1978). Secondariamente, sostituendo i parametri del metodo Muskingum-Cunge all'interno delle equazioni di Muskingum, si ottengono due diversi volumi di acqua immagazzinati nello stesso tronco fluviale e inconsistenti con le condizioni di stato stazionario (Todini, 2007).

- Muskingum-Cunge-Todini (Todini, 2007)

Todini, analizzando le formulazioni dei due metodi sopracitati, introdusse delle correzioni per ovviare alle incongruenze dell'approccio di Cunge.
Il problema dell'inconsistenza della massa è dovuto al fatto che i parametri k ed ε introdotti da Cunge sono variabili tra il tronco fluviale di interesse e il successivo, ma non tra le due sezioni di chiusura dello stesso tratto fluviale. Per risolvere questa criticità, quindi, introdusse due nuovi parametri $[k]$ ed $[\varepsilon]$ variabili istante per istante.
La relazione di Muskingum-Cunge-Todini è la seguente:

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t$$

con:

$$C_1 = \frac{-2[k\varepsilon]_{t+\Delta t} + \Delta t}{2[k(1-\varepsilon)]_{t+\Delta t} + \Delta t}$$
$$C_2 = \frac{2[k\varepsilon]_t + \Delta t}{2[k(1-\varepsilon)]_t + \Delta t}$$
$$C_3 = \frac{2[k(1-\varepsilon)]_t - \Delta t}{2[k(1-\varepsilon)]_{t+\Delta t} + \Delta t}$$

Il problema dell'inconsistenza dello stato stazionario è riconducibile a una stima errata del parametro k. Considerando lo stato stazionario e ricordando la definizione di portata $Q = Av$, è possibile calcolare i volumi immagazzinati nel tronco fluviale come segue:

$$S = A\Delta x = \frac{Q}{v}\Delta x = k^* \mathrm{Q}$$

k^*rappresenta il parametro dello stato stazionario, e può essere interpretato come il tempo impiegato da una particella d'acqua per attraversare il tratto di canale. È diverso dalla celerità cinematica: $k = \frac{\Delta x}{c} \neq \frac{\Delta x}{v} = k^*$. Per risolvere l'inconsistenza, quindi, basta considerare il parametro k^* al posto di k. Per diretta conseguenza, il dominio di ε è ampliato ai numeri negativi, senza che ciò comporti l'insorgere di instabilità numeriche o inaccuratezze nei risultati (Szél e Gaspar, 2000).
In conclusione, lo schema di risoluzione con il metodo Muskingum-Cunge resta valido, con il vantaggio di poter estendere il campo di applicazione anche ad alvei di pianura.

5- Correzione dei dati di precipitazione

5.1- Funzione dell'errore

Come già accennato nell'introduzione, la misura ottenuta dai pluviometri, per quanto molto precisa, non è immune da errori. In particolare infatti, i pluviometri sono progettati per restituire un errore praticamente pari a zero per intensità medie di precipitazione, mentre tendono a sottostimare la pioggia quando l'intensità è elevata e a sovrastimarla quando quest'ultima è molto bassa. Quello descritto è ovviamente un comportamento generale, che varia a seconda della famiglia di costruzione dello strumento.

Uno studio effettuato dall'Università di Genova ha realizzato empiricamente delle curve di calibrazione per una serie di pluviometri della famiglia CAE, alla quale appartengono anche la totalità di strumenti situati nel territorio del bacino del Tanaro, così da valutarne l'errore relativo all'aumentare dell'intensità di precipitazione misurata.

I pluviometri selezionati per essere sottoposti a validazione di campo sono i seguenti sette, situati in diverse province italiane:

- Cantù-Asnago (MI)
- Como-VillaGeno (CO)
- Cinisello-ParcoNord (MI)
- Fitterizzi (CS)
- Rogliano (CS)
- Cosenza-118 (CS)
- Parenti (CS)

Nel grafico sottostante si riportano i risultati della validazione di campo.

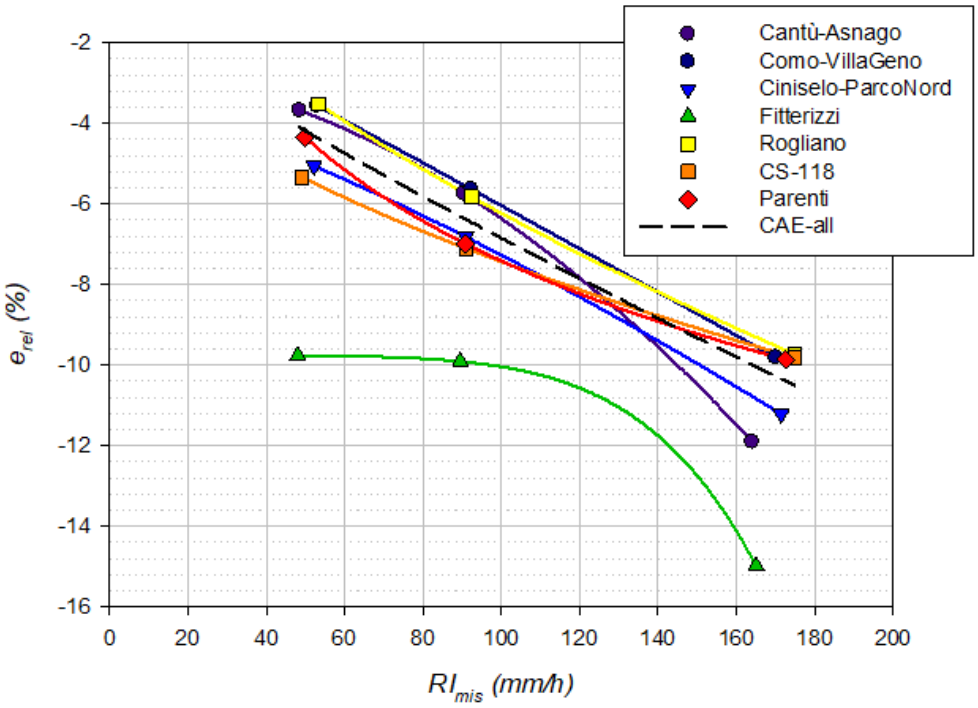


Figura 16: risultati della validazione di campo per i 7 pluviometri

Si può osservare come i sette strumenti sottoposti alla verifica da campo mostrano un comportamento analogo all'aumentare dell'intensità di precipitazione, ad eccezione del pluviometro di Fitterizzi (in verde sul grafico), il quale si discosta parecchio dagli altri. Per quest'ultimo si ipotizza un problema specifico dello strumento stesso, forse dovuto ad attriti causati da sporcizia o degrado per usura, e per tale motivo si è deciso di escluderlo dalla determinazione della curva media di errore per i pluviometri della famiglia CAE.

Dalle sei stazioni restanti è stata quindi ricavata un'unica curva, ritenuta valida per tutti gli strumenti appartenenti alla famiglia CAE, descritta dalla funzione sottostante:

$$e_{rel}\ (\%) = \ -0.9441 - 0.1116\ RI_{mis}^{0.8619}$$

Sarà proprio l'efficacia di questa funzione, applicata a tutti i dati raccolti dai 98 pluviometri sparsi sul bacino del Tanaro, ad essere valutata come scopo del presente elaborato.

5.2- Procedimento

La correzione delle misure di precipitazione è avvenuta interamente tramite foglio di calcolo Excel nel quale sono stati aperti i dati, forniti inizialmente in formato di file di testo (txt).

Durante il processo, si è dovuto fare particolare attenzione ad alcuni aspetti, per evitare di causare errori nella seguente fase di simulazione delle portate tramite modello FEST-WB:

- I dati di pioggia sono forniti in millimetri ogni 10 minuti, mentre la funzione d'errore, per come è stata definita, richiede misure di intensità in millimetri orari; per questo motivo è stata effettuata la conversione prima di procedere con la correzione, per poi riportarli nell'unità di misura originale al termine delle operazioni.

- All’interno del file della pioggia è possibile notare dei valori anomali, rappresentati dal numero “-999.9”; questo si tratta di un codice che serve per segnalare al modello FEST il malfunzionamento dello strumento (e quindi l’impossibilità di ottenere una misura) in quel preciso istante temporale. Per questo motivo è stata fatta particolare cautela nel non modificare in alcun modo questo valore dove presente, così da non compromettere la simulazione delle portate.
- La funzione d’errore restituisce un errore percentuale, non il valore d’errore vero e proprio; quindi inseriti i dati all’interno della funzione d’errore, si è poi proceduto a calcolare la percentuale ottenuta del valore originale di intensità di precipitazione, per poi sommarla al valore iniziale stesso (questo perché, come si può osservare dal grafico della curva d’errore, essa comporta sempre una sottostima del valore reale di intensità per i pluviometri della famiglia CAE).

6- Risultati

In questo capitolo verranno esposti i risultati dell'operazione di correzione dei dati. Per ognuno dei bacini indicati nel capitolo 3, sono stati selezionati sette eventi di precipitazione nell'arco del periodo di tempo considerato, ritenuti significativi per durata o per intensità di precipitazione.

Per questi eventi verranno analizzati i risultati sia sul dato di precipitazione grezzo, osservando le differenze tra quelli originali e quelli corretti, che sulle portate simulate dal modello FEST-WB, avendo come input prima i dati di precipitazione originali e poi i dati ottenuti in seguito alla correzione.

Si segnala che, a differenza di quanto riportato nel capitolo 3, si è deciso di escludere dall'analisi il bacino di San Damiano Borbore; questo perché in fase di simulazione solo per quest'ultimo la differenza tra simulate e misurate risultava eccessiva, il che poteva condurre a considerazioni errate.

6.1- Precipitazione

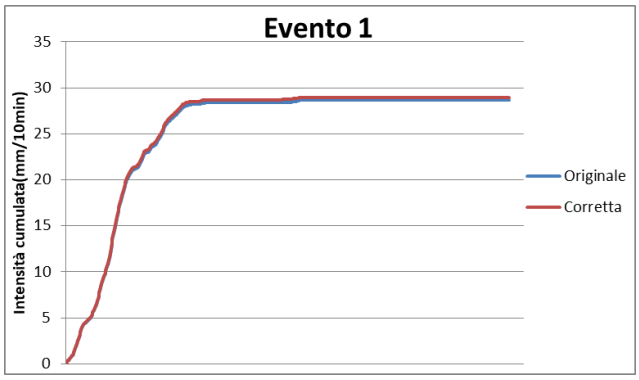
In questo paragrafo si riporteranno, per ognuno degli eventi considerati, i risultati della correzione sui dati grezzi di precipitazione. Per poter osservarne meglio le diversità ne è stata calcolata l'intensità cumulata e, su di questa, è stato valutato un indice di differenza percentuale tra precipitazione originale e corretta così definito:

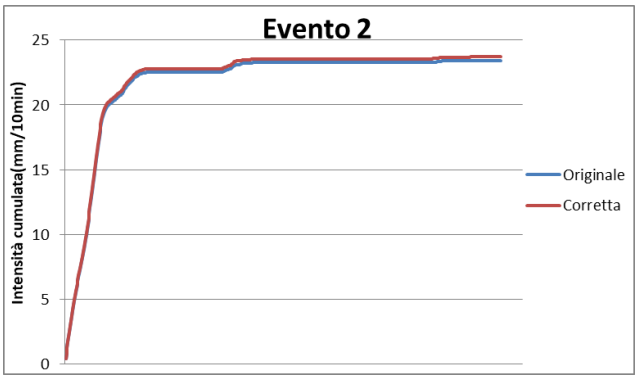
$$Diff_{\%} = \frac{(Corrette - Originali)}{Corrette} * 100$$

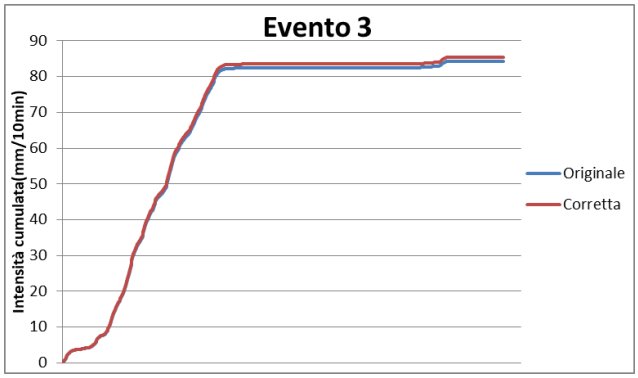
Castelnuovo Belbo

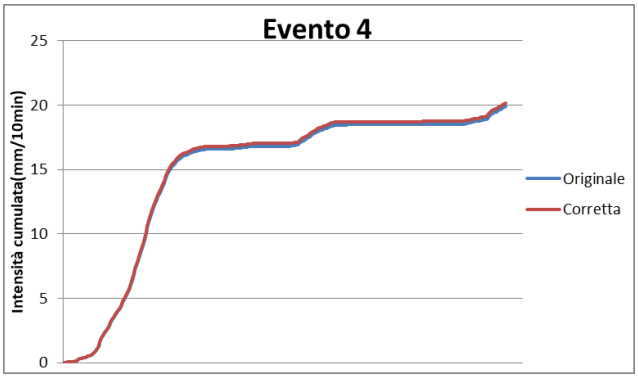
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	24/03/2013	00:00	28/03/2013	05:30
EVENTO 2	04/04/2013	18:00	08/04/2013	17:00
EVENTO 3	25/12/2013	08:00	29/12/2013	08:00
EVENTO 4	05/02/2014	11:30	07/02/2014	07:30
EVENTO 5	10/02/2014	06:00	12/02/2014	13:30
EVENTO 6	30/04/2014	08:00	01/05/2014	23:30
EVENTO 7	15/12/2014	13:30	18/12/2014	23:30

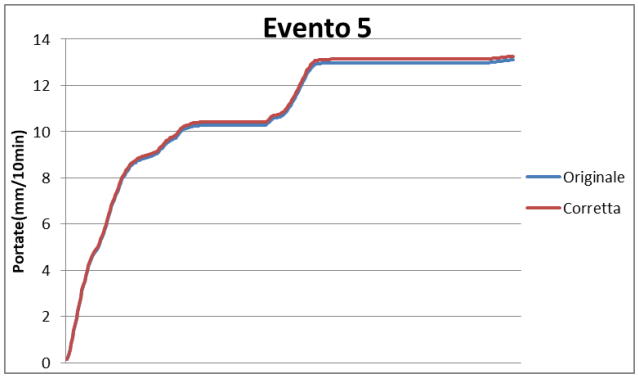
Tabella 5: eventi di precipitazione significativi per Castelnuovo Belbo

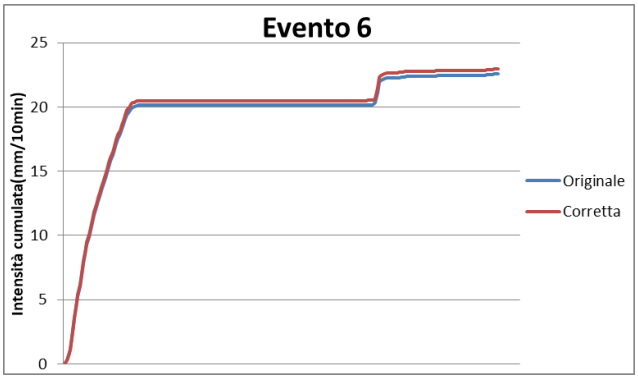

Evento 1
Intensità cumulata(mm/10min)
35
30
25
20
15
10
5
0
Originale
Corretta

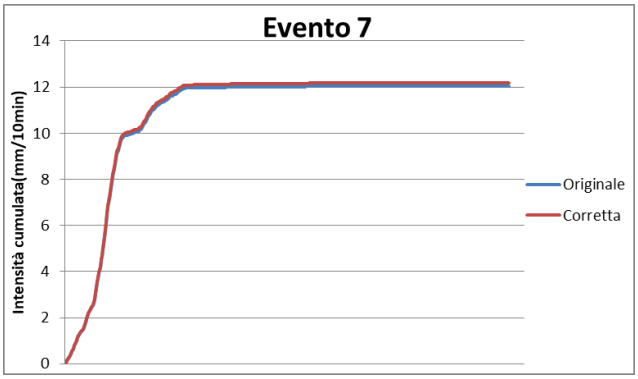

Evento 2
Intensità cumulata(mm/10min)
25
20
15
10
5
0
Originale
Corretta


Evento 3
Intensità cumulata(mm/10min)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Originale
Corretta


Evento 4
Intensità cumulata(mm/10min)
25
20
15
10
5
0
Originale
Corretta


Evento 5
Portate(mm/10min)
14
12
10
8
6
4
2
0
Originale
Corretta


Evento 6
Intensità cumulata(mm/10min)
25
20
15
10
5
0
Originale
Corretta


Evento 7
Intensità cumulata(mm/10min)
14
12
10
8
6
4
2
0
Originale
Corretta

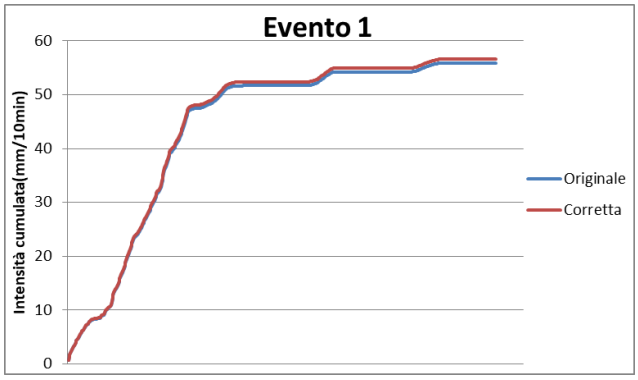
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.1
EVENTO 2	1.2
EVENTO 3	1.3
EVENTO 4	1.2
EVENTO 5	1.2
EVENTO 6	1.7
EVENTO 7	1.1
MEDIA	**1.3**

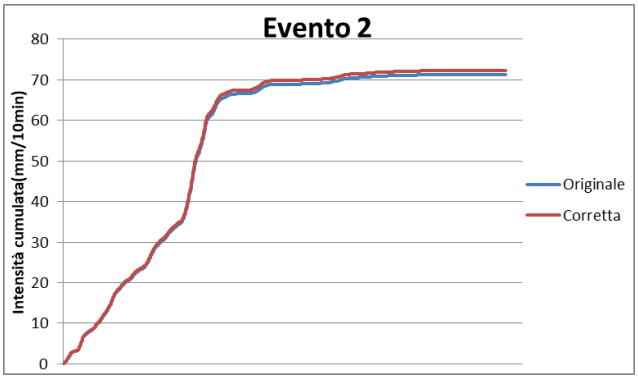
Tabella 6: indici di differenza percentuale per gli eventi a Castelnuovo Belbo

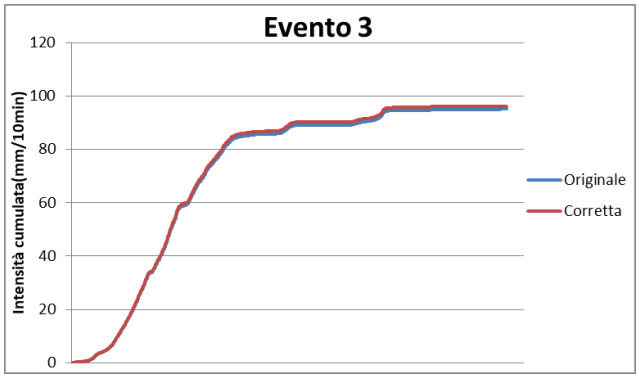
Mondovì Ellero

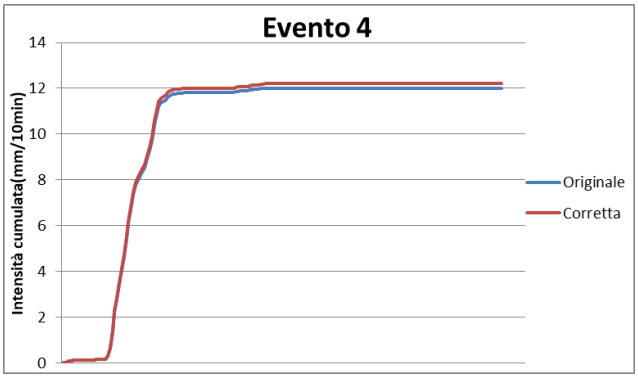
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	10/11/2012	00:00	14/11/2012	02:30
EVENTO 2	27/11/2012	00:00	02/12/2012	11:30
EVENTO 3	24/12/2013	10:00	30/12/2013	03:30
EVENTO 4	25/07/2014	15:00	26/07/2014	22:30
EVENTO 5	29/07/2014	05:00	30/07/2014	13:30
EVENTO 6	10/11/2014	00:00	14/11/2014	23:30
EVENTO 7	28/11/2014	10:00	02/12/2014	23:30

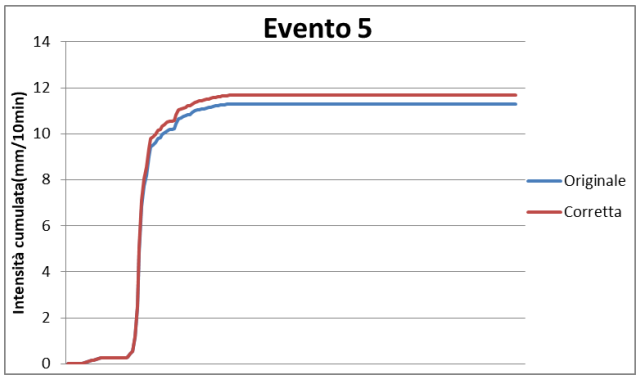
Tabella 7: eventi di precipitazione significativi per Mondovì Ellero

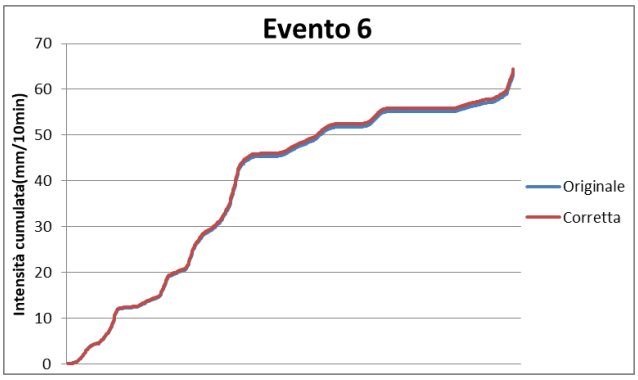


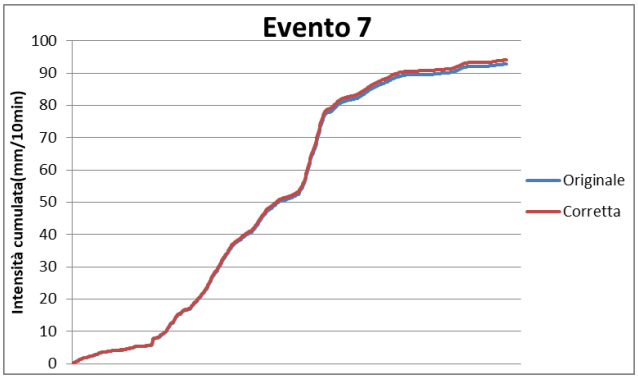












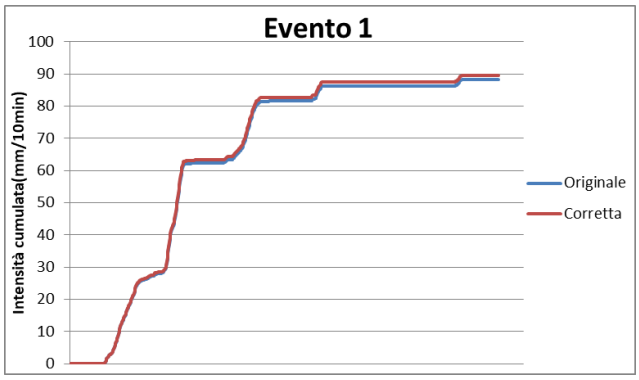
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.3
EVENTO 2	1.3
EVENTO 3	1.2
EVENTO 4	1.6
EVENTO 5	3.0
EVENTO 6	1.3
EVENTO 7	1.3
MEDIA	**1.6**

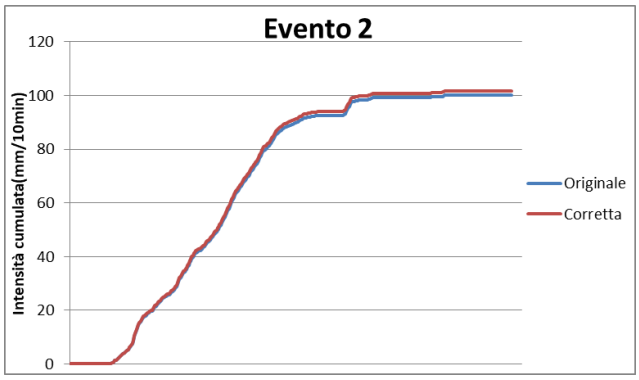
Tabella 8: indici di differenza percentuale per gli eventi a Mondovì Ellero

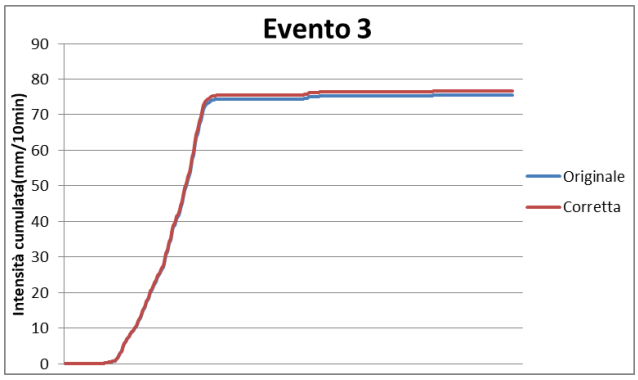
Garessio Tanaro

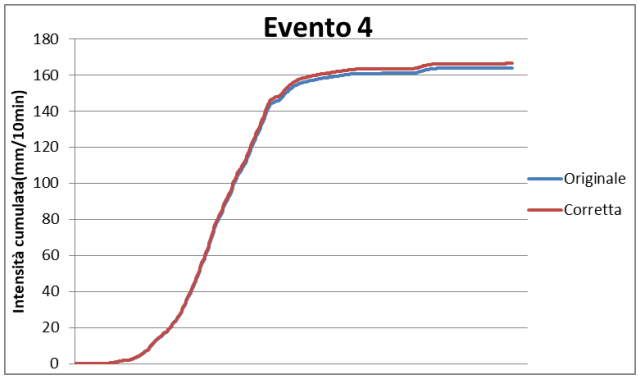
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	28/04/2013	00:00	02/05/2013	23:30
EVENTO 2	15/05/2013	00:00	17/05/2013	23:30
EVENTO 3	18/05/2013	00:00	20/05/2013	23:30
EVENTO 4	24/12/2013	00:00	28/12/2013	08:30
EVENTO 5	15/06/2014	00:00	17/06/2014	23:30
EVENTO 6	13/10/2014	00:00	14/10/2014	23:30
EVENTO 7	28/11/2014	00:00	02/12/2014	23:30

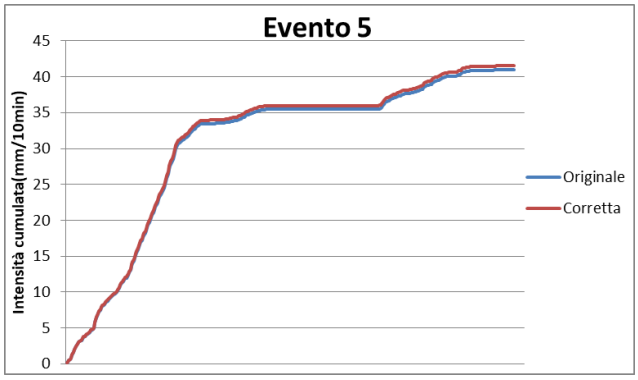
Tabella 9: eventi di precipitazione significativi per Garessio Tanaro

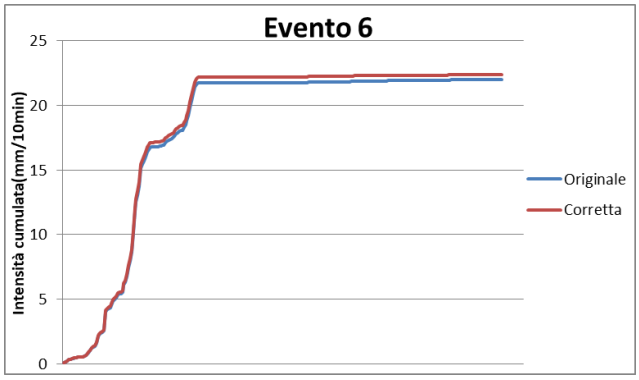

Evento 1
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Originale
Corretta

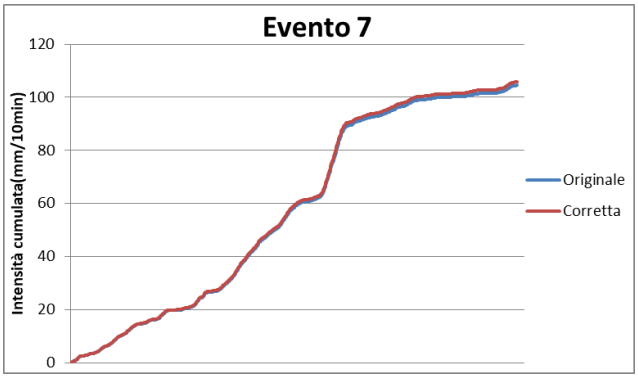

Evento 2
Intensità cumulata(mm/10min)
0
20
40
60
80
100
120
Originale
Corretta


Evento 3
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Originale
Corretta


Evento 4
Intensità cumulata(mm/10min)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
Originale
Corretta


Evento 5
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
Originale
Corretta


Evento 6
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
Originale
Corretta


Evento 7
Intensità cumulata(mm/10min)
0
20
40
60
80
100
120
Originale
Corretta

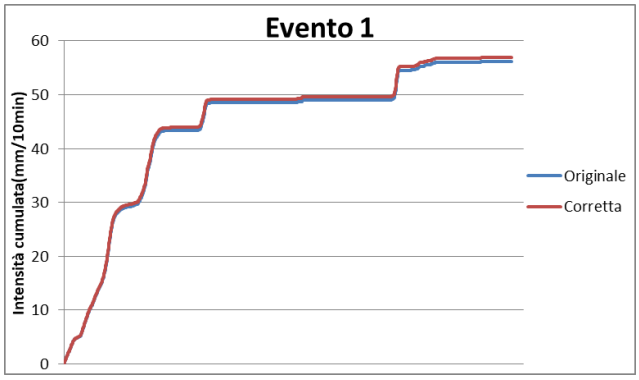
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.4
EVENTO 2	1.7
EVENTO 3	1.5
EVENTO 4	1.4
EVENTO 5	1.4
EVENTO 6	1.9
EVENTO 7	1.2
MEDIA	**1.5**

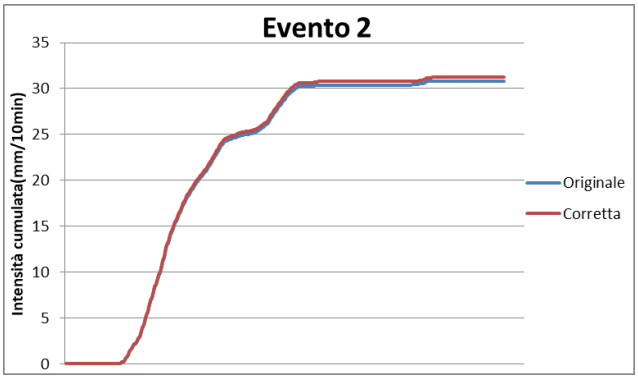
Tabella 10: indici di differenza percentuale per gli eventi a Garessio Tanaro

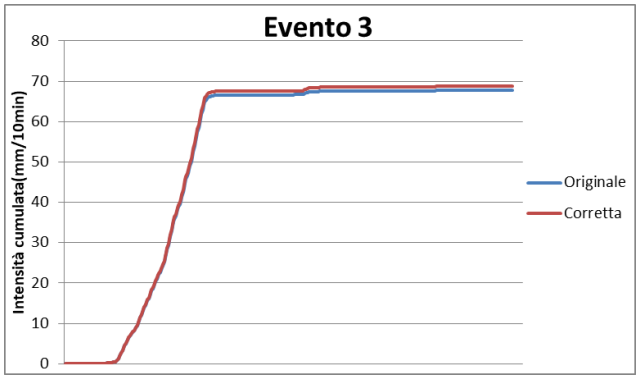
Piantorre Tanaro

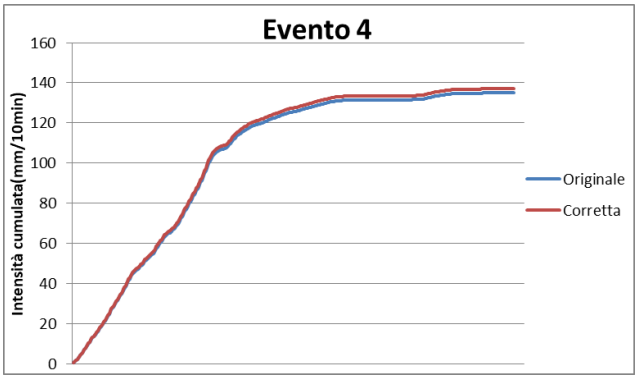
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	06/03/2013	13:00	16/03/2013	00:00
EVENTO 2	04/04/2013	00:00	06/04/2013	23:30
EVENTO 3	18/05/2013	00:00	20/05/2013	23:30
EVENTO 4	25/12/2013	00:00	27/12/2013	23:30
EVENTO 5	04/01/2014	00:00	06/01/2014	23:30
EVENTO 6	15/06/2014	00:00	17/06/2014	23:30
EVENTO 7	13/10/2014	00:00	15/10/2014	23:30

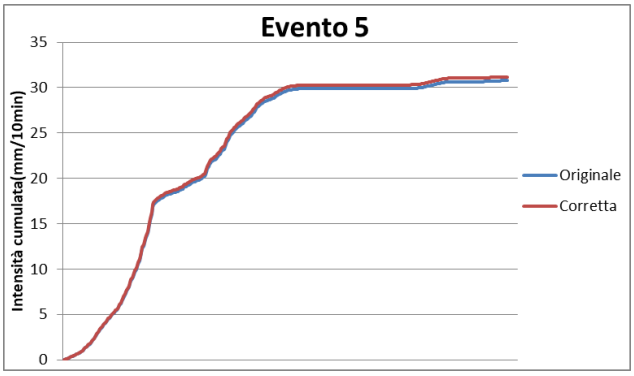
Tabella 11: eventi di precipitazione significativi per Piantorre Tanaro

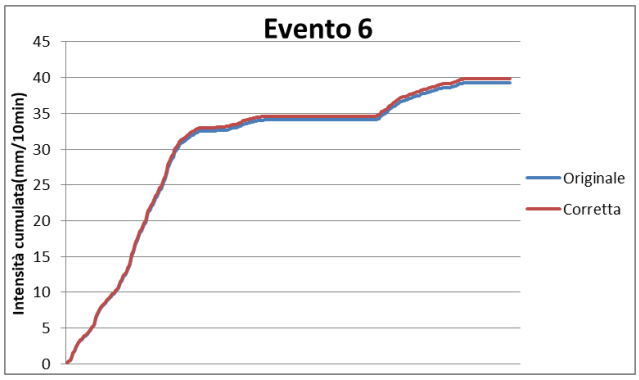


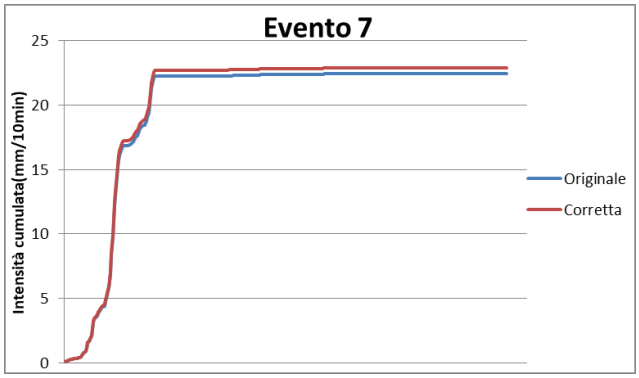












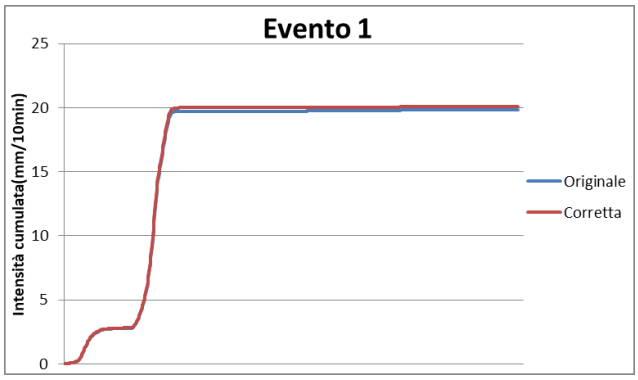
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.3
EVENTO 2	1.3
EVENTO 3	1.4
EVENTO 4	1.5
EVENTO 5	1.3
EVENTO 6	1.4
EVENTO 7	2.0
MEDIA	**1.5**

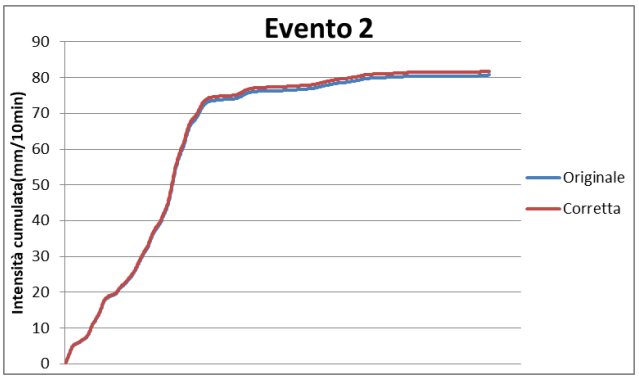
Tabella 12: indici di differenza percentuale per gli eventi a Piantorre Tanaro

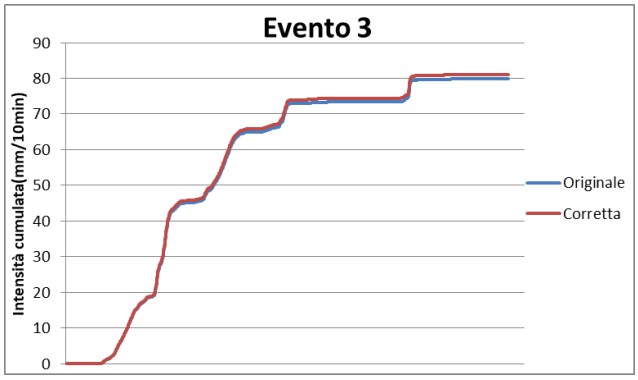
Alba Tanaro

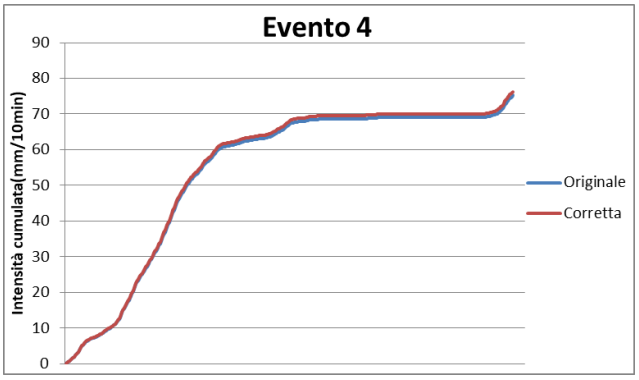
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	03/11/2012	18:30	08/11/2012	17:00
EVENTO 2	27/11/2012	04:30	02/12/2012	13:00
EVENTO 3	27/04/2013	22:00	03/05/2013	22:30
EVENTO 4	15/05/2013	08:30	18/05/2013	11:00
EVENTO 5	14/06/2014	23:30	18/06/2014	01:30
EVENTO 6	11/11/2014	02:30	18/06/2014	01:30
EVENTO 7	28/11/2014	20:30	05/12/2014	09:00

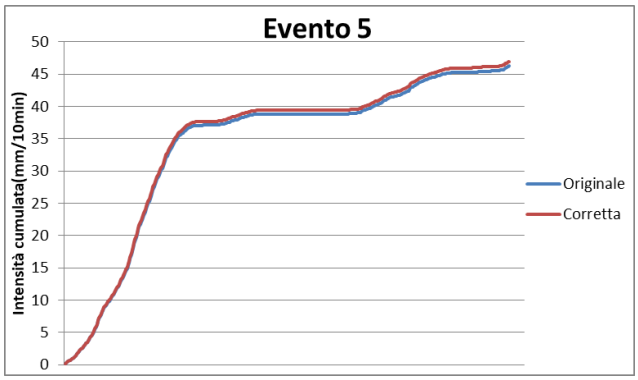
Tabella 13: eventi di precipitazione significativi per Alba Tanaro

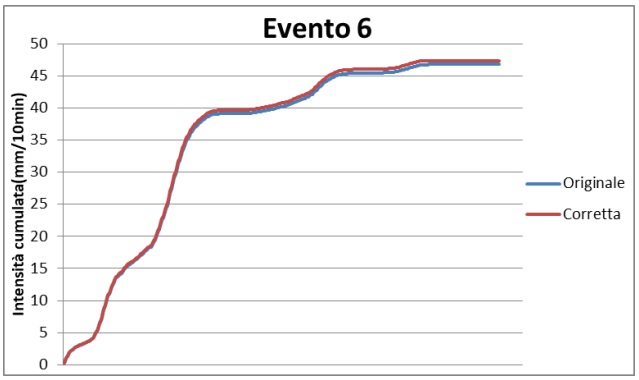

Evento 1
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
Originale
Corretta

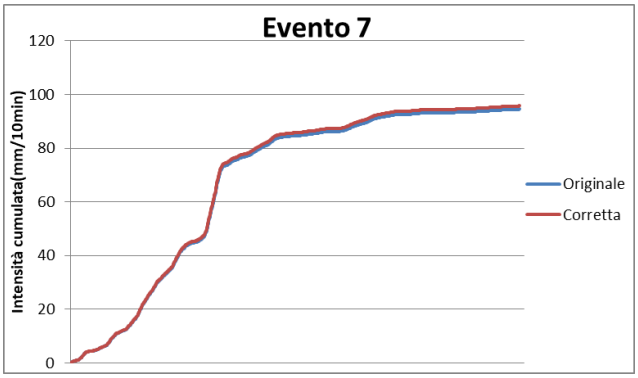

Evento 2
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Originale
Corretta


Evento 3
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Originale
Corretta


Evento 4
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Originale
Corretta


Evento 5
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Originale
Corretta


Evento 6
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Originale
Corretta


Evento 7
Intensità cumulata(mm/10min)
0
20
40
60
80
100
120
Originale
Corretta

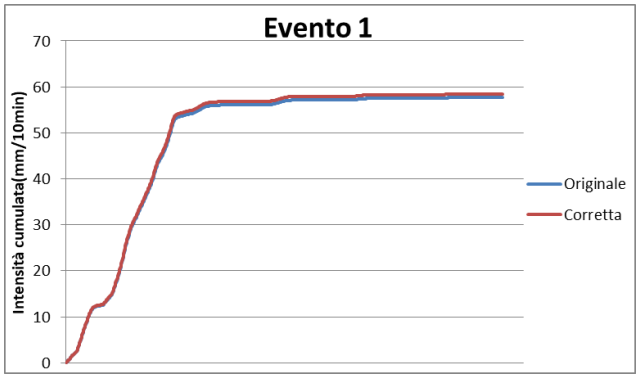
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.3
EVENTO 2	1.3
EVENTO 3	1.3
EVENTO 4	1.4
EVENTO 5	1.5
EVENTO 6	1.3
EVENTO 7	1.3
MEDIA	**1.4**

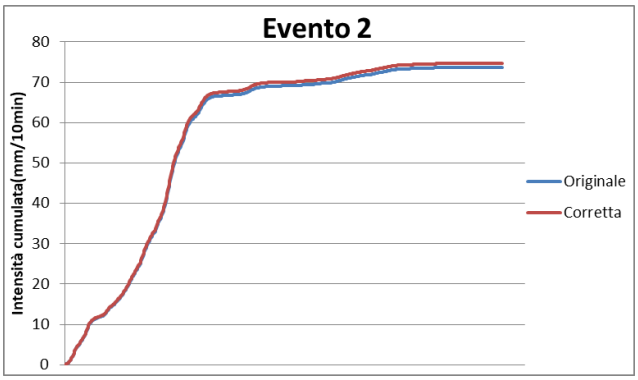
Tabella 14: indici di differenza percentuale per gli eventi a Alba Tanaro

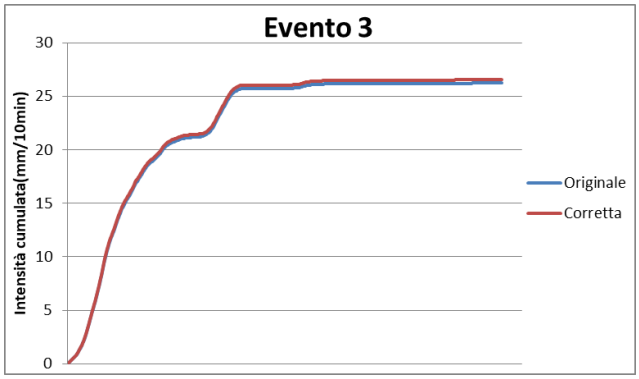
Asti Tanaro

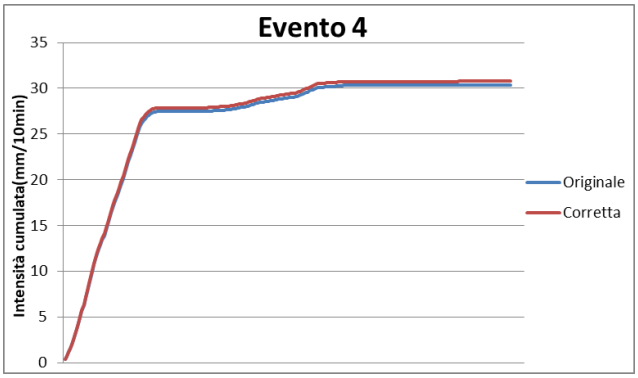
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	09/11/2012	20:30	15/11/2012	03:30
EVENTO 2	27/11/2012	10:00	02/12/2012	04:00
EVENTO 3	24/03/2013	03:30	27/03/2013	19:00
EVENTO 4	18/05/2013	15:00	20/05/2013	10:30
EVENTO 5	14/06/2014	18:30	19/06/2014	00:30
EVENTO 6	11/11/2014	09:30	14/11/2014	06:00
EVENTO 7	28/11/2014	11:00	06/12/2014	20:00

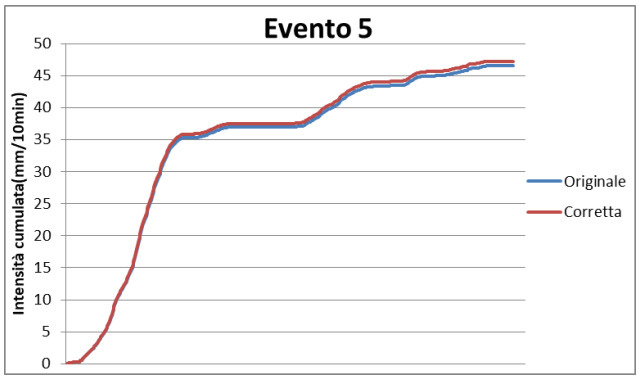
Tabella 15: eventi di precipitazione significativi per Asti Tanaro

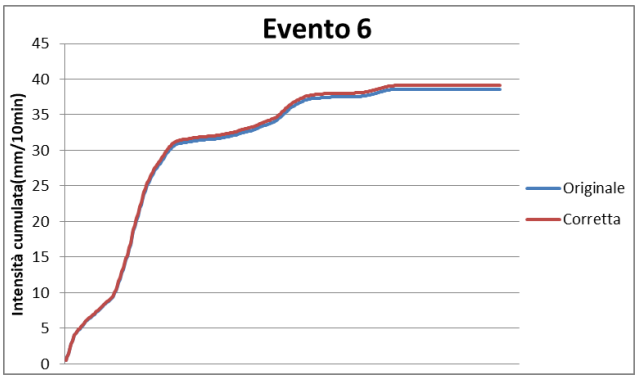


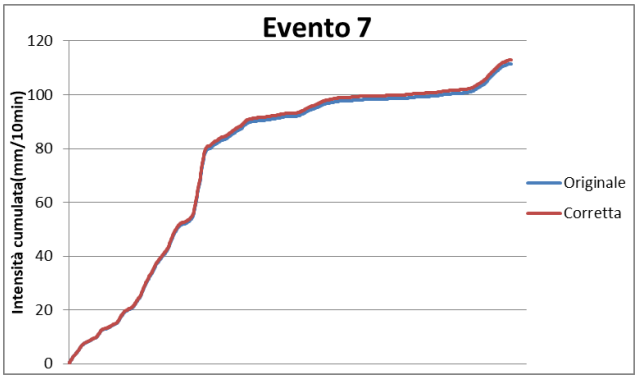












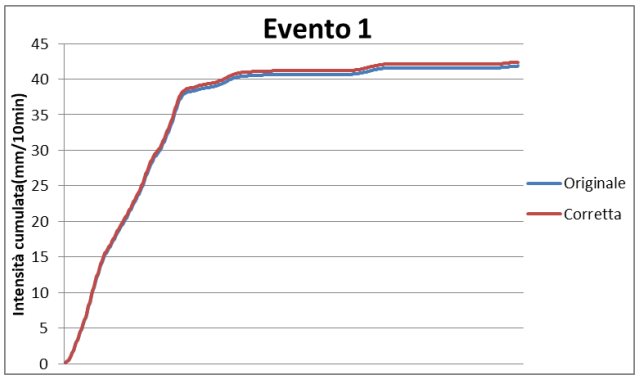
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.3
EVENTO 2	1.3
EVENTO 3	1.2
EVENTO 4	1.4
EVENTO 5	1.5
EVENTO 6	1.4
EVENTO 7	1.3
MEDIA	**1.3**

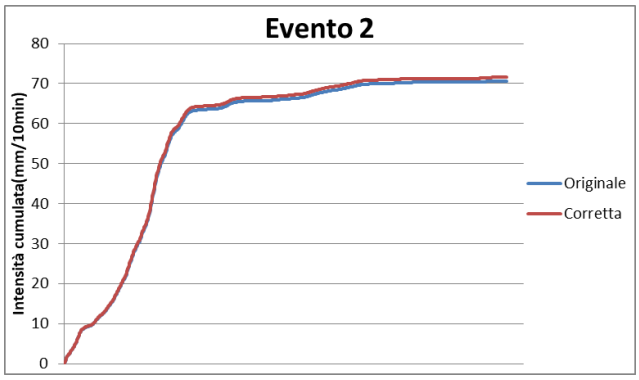
Tabella 16: indici di differenza percentuale per gli eventi a Asti Tanaro

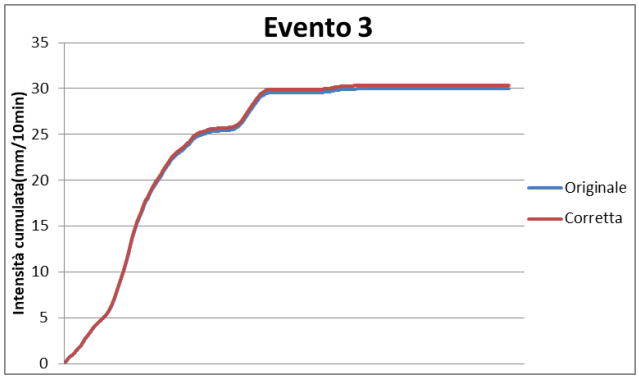
Masio Tanaro

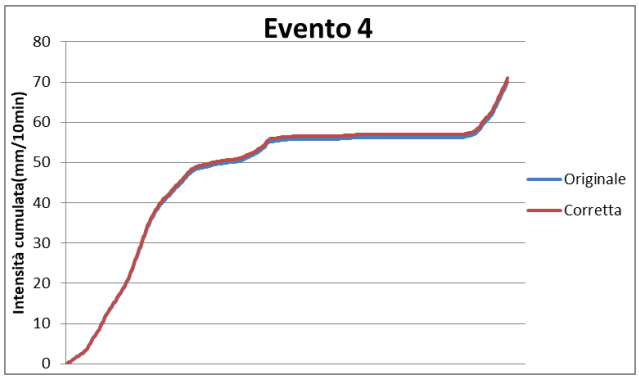
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	10/11/2012	09:00	13/11/2012	11:00
EVENTO 2	27/11/2012	12:00	02/12/2012	17:00
EVENTO 3	23/03/2013	21:30	27/03/2013	14:00
EVENTO 4	15/05/2013	14:00	18/05/2013	14:00
EVENTO 5	04/01/2014	08:30	07/01/2014	12:30
EVENTO 6	15/06/2014	09:30	17/06/2014	18:00
EVENTO 7	11/11/2014	07:30	14/11/2014	00:00

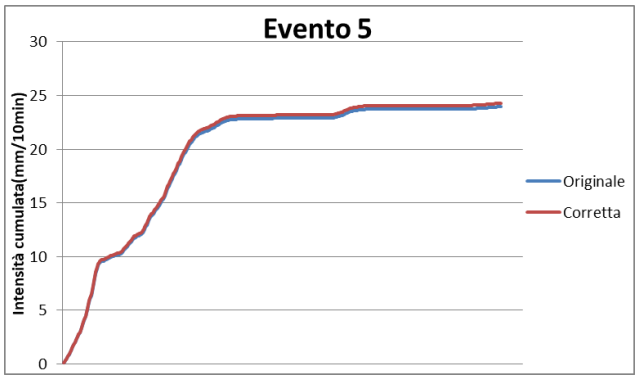
Tabella 17: eventi di precipitazione significativi per Masio Tanaro

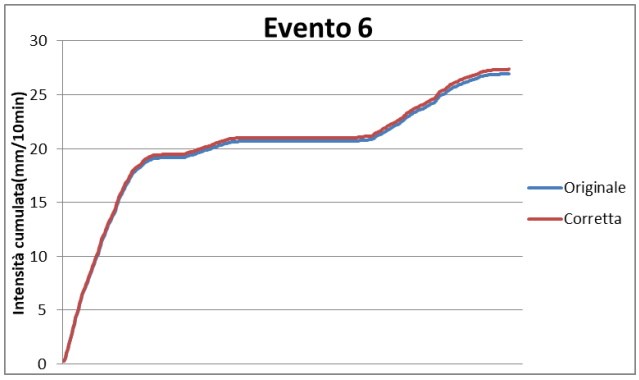

Evento 1
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
Originale
Corretta

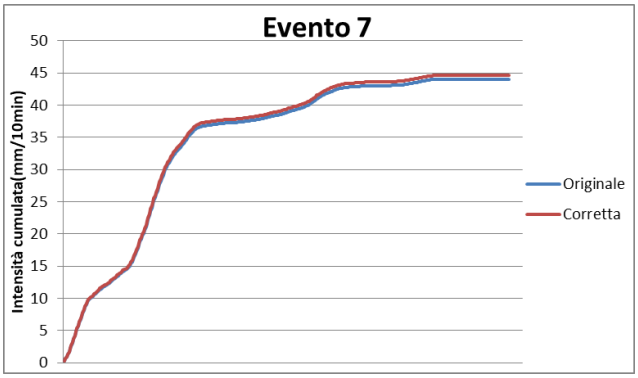

Evento 2
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Originale
Corretta


Evento 3
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
35
Originale
Corretta


Evento 4
Intensità cumulata(mm/10min)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Originale
Corretta


Evento 5
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
Originale
Corretta


Evento 6
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
Originale
Corretta


Evento 7
Intensità cumulata(mm/10min)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Originale
Corretta

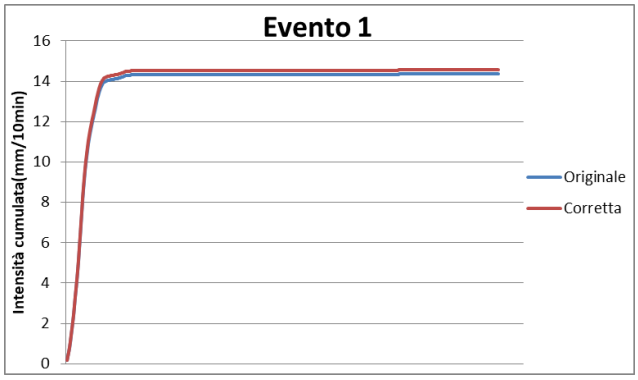
EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.3
EVENTO 2	1.3
EVENTO 3	1.2
EVENTO 4	1.3
EVENTO 5	1.3
EVENTO 6	1.5
EVENTO 7	1.4
MEDIA	**1.3**

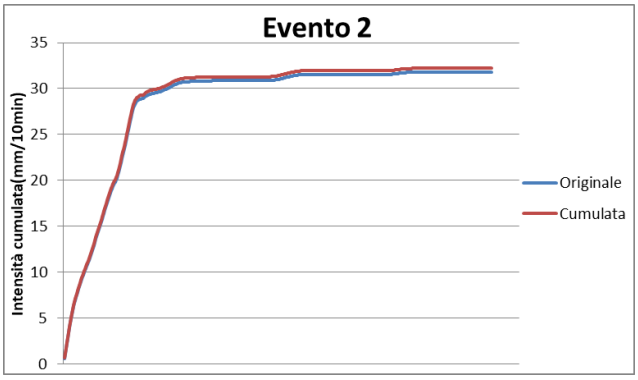
Tabella 18: indici di differenza percentuale per gli eventi a Masio Tanaro

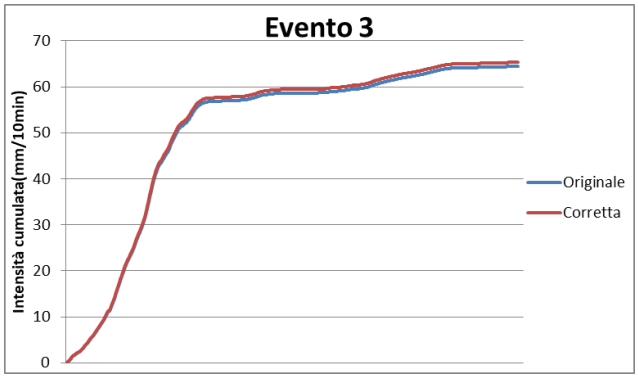
Montecastello Tanaro

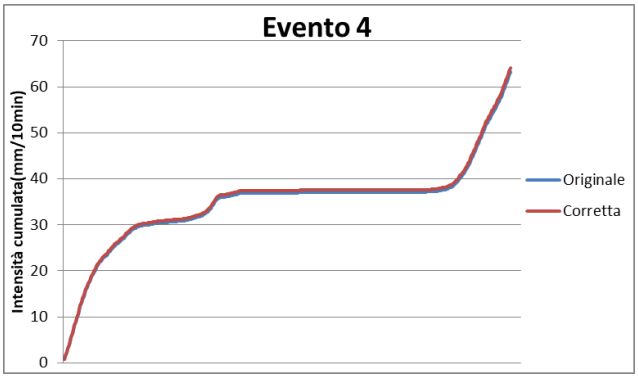
EVENTO	INIZIO		FINE	
	giorno	ora	giorno	ora
EVENTO 1	04/11/2012	15:30	08/11/2012	06:00
EVENTO 2	10/11/2012	14:00	14/11/2012	04:00
EVENTO 3	27/11/2012	20:00	01/12/2012	14:30
EVENTO 4	16/05/2013	00:30	18/05/2013	17:30
EVENTO 5	04/01/2014	16:00	07/01/2014	22:30
EVENTO 6	15/06/2014	05:30	18/06/2014	17:30
EVENTO 7	04/11/2014	06:30	06/11/2014	22:30

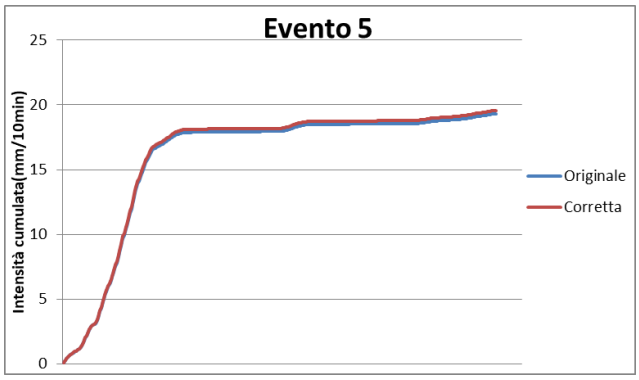
Tabella 19: eventi di precipitazione significativi per Montecastello Tanaro

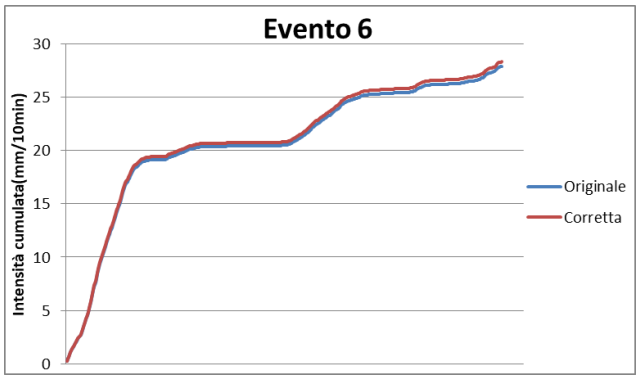


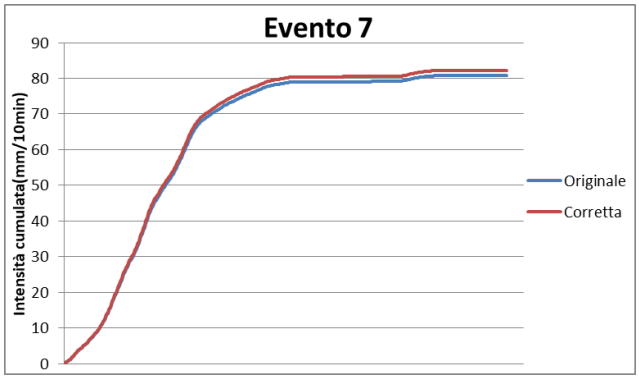












EVENTO	Differenza %
EVENTO 1	1.4
EVENTO 2	1.3
EVENTO 3	1.3
EVENTO 4	1.4
EVENTO 5	1.3
EVENTO 6	1.5
EVENTO 7	1.7
MEDIA	**1.4**

Tabella 20: indici di differenza percentuale per gli eventi a Montecastello Tanaro

6.2- Portate

In questo secondo paragrafo si riportano i risultati inerenti le portate simulate dal modello FEST-WB usando come input, rispettivamente, sia i dati di precipitazione originali sia quelli ottenuti in seguito alla correzione. Gli eventi che hanno portato alle portate analizzate negli otto bacini di interesse sono i medesimi mostrati nella sezione precedente.

Entrambi i risultati delle simulazioni sono stati poi messi a confronto con le portate osservate nelle stazioni di misura, per valutare quanto il loro andamento fosse riconducibile a queste ultime. Per poter svolgere quest'analisi sono stati calcolati, per ogni evento, quattro indici di errore:

- **Errore di portata al colmo percentuale**:

$$Q_{colmo\%} = \frac{Q_{colmo_{SIM}} - Q_{colmo_{OSS}}}{Q_{colmo_{OSS}}} * 100$$

Questo indice rappresenta la percentuale di errore tra i due massimi di piena, osservato e simulato, degli eventi selezionati. L'errore è dotato di segno, ed è in genere considerato accettabile se ricade intorno al range [-20% ; 20%]; tuttavia, è possibile che sovrastime e sottostime per uno stesso evento si compensino, per cui è il meno affidabile tra gli indici calcolati.

- **Errore di portata al colmo assoluto**:

$$|Q_{colmo}| = |\frac{Q_{colmo_{SIM}} - Q_{colmo_{OSS}}}{Q_{colmo_{OSS}}}| * 100$$

  Rappresenta la percentuale assoluta di errore tra i due massimi di piena, osservato e simulato, degli eventi selezionati, così da eliminare i limiti dell'errore di portata al colmo percentuale; è considerato accettabile un errore non di troppo superiore al 20%.

- **Root Mean Square Error**:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{oss}^{i} - Q_{sim}^{i})\text{^}2}$$

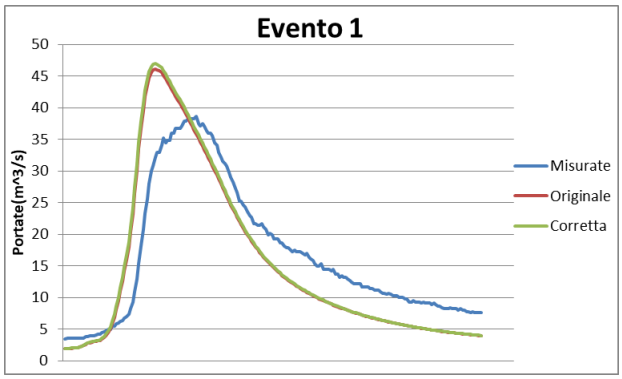
  Assume valori tra 0 e infinito; più il valore tende a 0, più l'idrogramma simulato sarà una riproduzione fedele di quello osservato. Essendo illimitato superiormente, i suoi valori crescono molto rapidamente anche in presenza di piccoli errori.

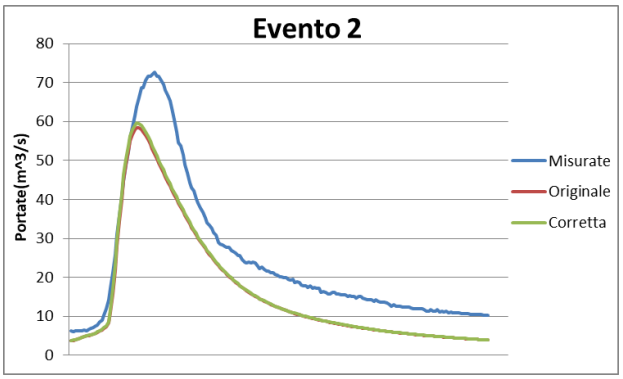
- **Indice di Nash-Sutcliffe**:

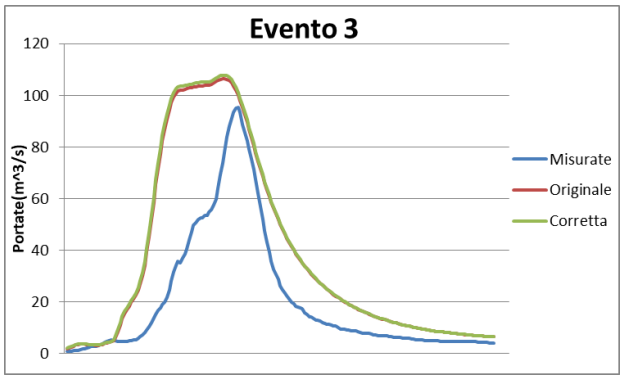
$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{oss}^{i} - Q_{sim}^{i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{oss}^{i} - \overline{Q_{oss}}\right)^2}$$

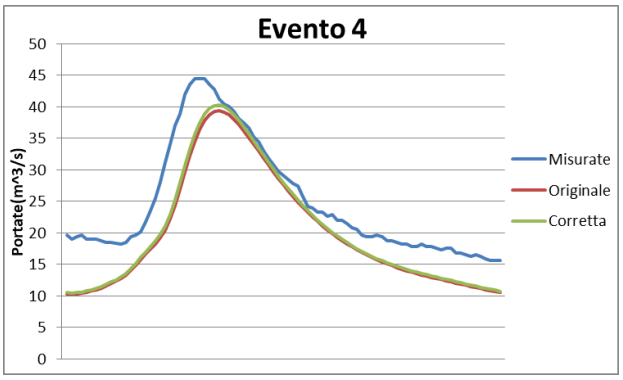
  È un indice di performance del modello: se il valore tende a 1 l'idrogramma simulato riproduce fedelmente i valori osservati, se il valore tende a 0 la serie simulata è accurata quanto la media della serie osservata; mentre se il valore è negativo la media della serie osservata è migliore dei valori simulati dal modello. Come per il RMSE, trattandosi di un indice illimitato inferiormente il suo valore si discosta molto rapidamente dall'ottimo anche per piccoli errori.

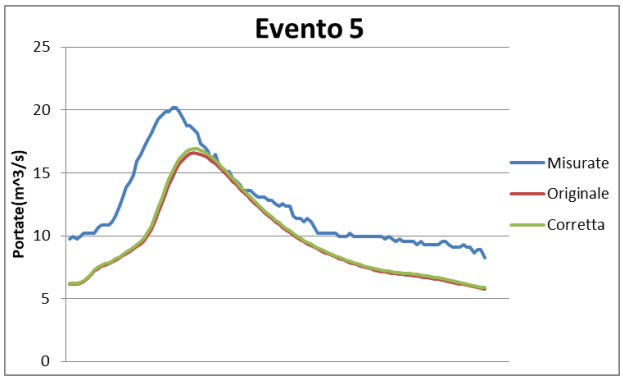
Castelnuovo Belbo

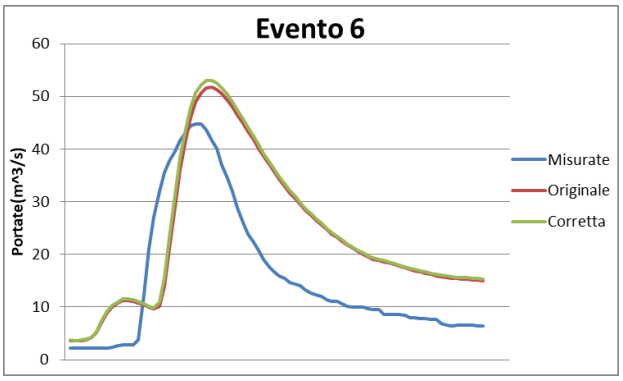


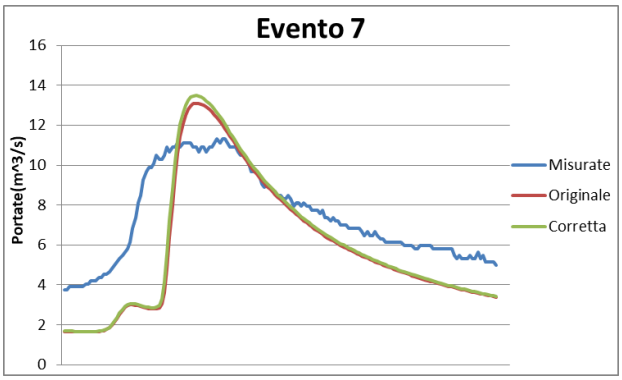












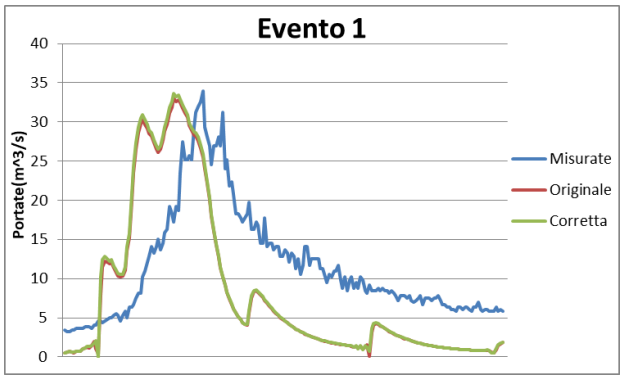
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	19.25	19.25	5.65	0.72
EVENTO 2	-19.58	19.58	8.71	0.77
EVENTO 3	11.54	11.54	25.08	-0.03
EVENTO 4	-11.33	11.33	6.11	0.56
EVENTO 5	-17.93	17.93	3.38	0.01
EVENTO 6	15.44	15.44	12.95	0.00
EVENTO 7	15.88	15.88	2.52	-0.22
MEDIA	**1.90**	**15.85**	**9.20**	**0.26**

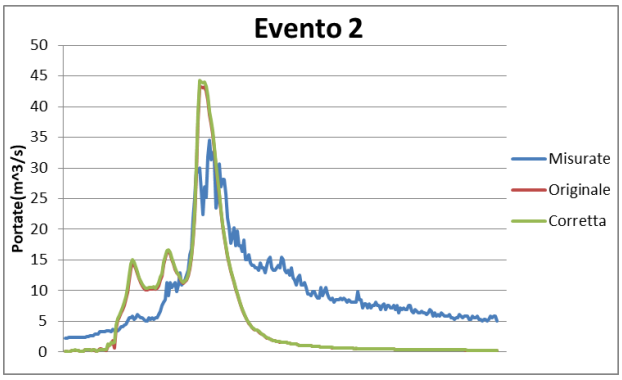
Tabella 21:Indici di errore per gli eventi a Castelnuovo Belbo, simulazione con pioggia originale

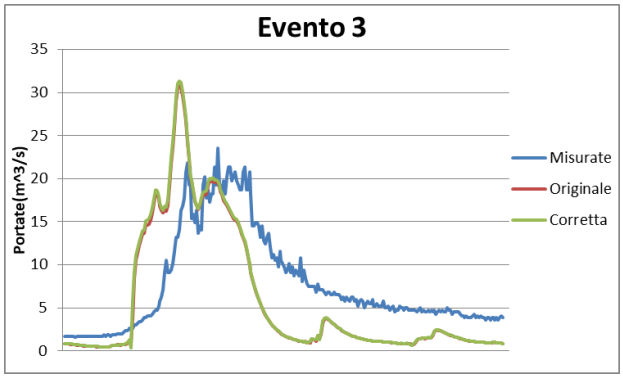
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	21.45	21.45	5.85	0.70
EVENTO 2	-17.99	17.99	8.44	0.79
EVENTO 3	12.91	12.91	25.80	-0.09
EVENTO 4	-9.33	9.33	5.79	0.61
EVENTO 5	-16.19	16.19	3.24	0.09
EVENTO 6	18.37	18.37	13.19	-0.03
EVENTO 7	19.27	19.27	2.48	-0.18
MEDIA	**4.07**	**16.50**	**9.26**	**0.27**

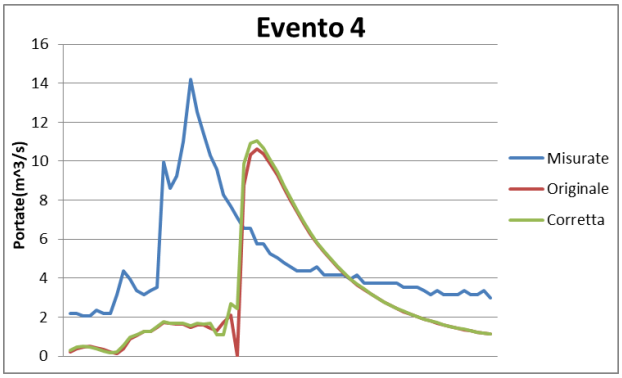
Tabella 22:Indici di errore per gli eventi a Castelnuovo Belbo, simulazione con pioggia corretta

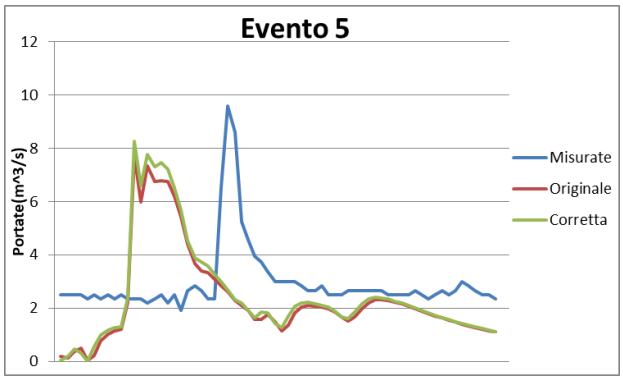
Mondovì Ellero

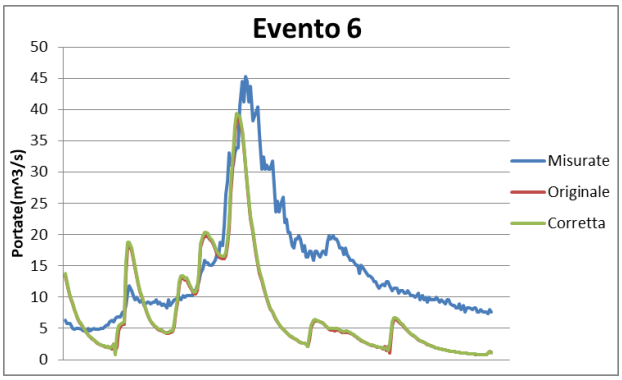


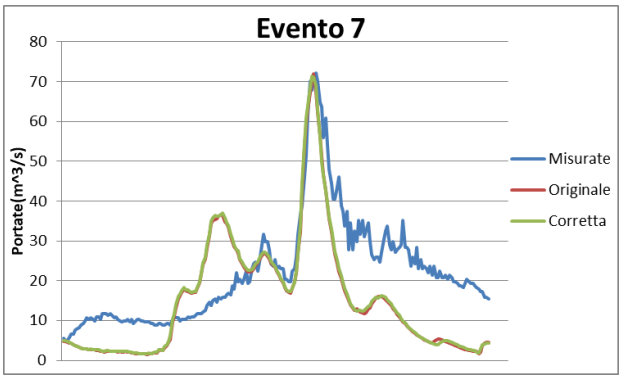












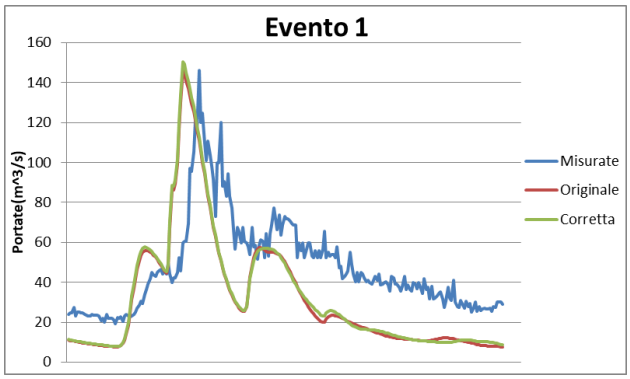
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-2.60	2.60	8.95	-0.57
EVENTO 2	25.12	25.12	7.30	-0.18
EVENTO 3	30.84	30.84	5.54	0.07
EVENTO 4	-25.13	25.13	4.38	-1.58
EVENTO 5	-19.38	19.38	2.30	-2.16
EVENTO 6	-13.84	13.84	9.67	-0.14
EVENTO 7	-0.37	0.37	12.14	0.20
MEDIA	**-0.77**	**16.75**	**7.18**	**-0.62**

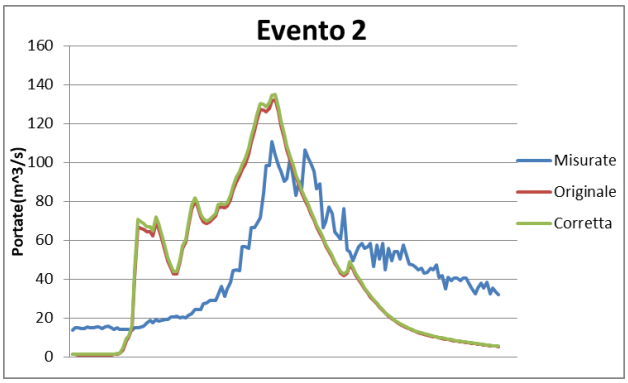
Tabella 23:Indici di errore per gli eventi a Mondovì Ellero, simulazione con pioggia originale

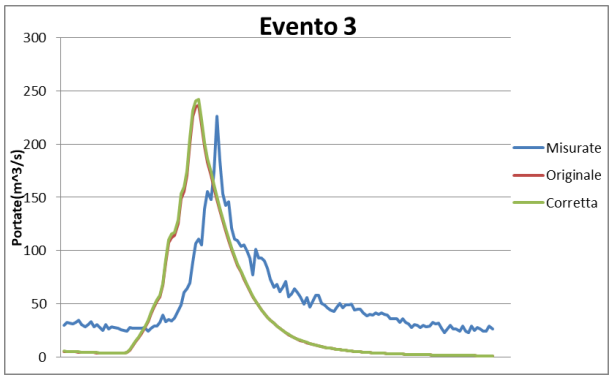
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-0.75	0.75	9.07	-0.61
EVENTO 2	27.85	27.85	7.37	-0.20
EVENTO 3	33.28	33.28	5.64	0.04
EVENTO 4	-22.17	22.17	4.36	-1.57
EVENTO 5	-13.86	13.86	2.38	-2.40
EVENTO 6	-13.09	13.09	9.58	-0.12
EVENTO 7	-1.15	1.15	12.07	0.21
MEDIA	**4.07**	**16.02**	**7.21**	**-0.66**

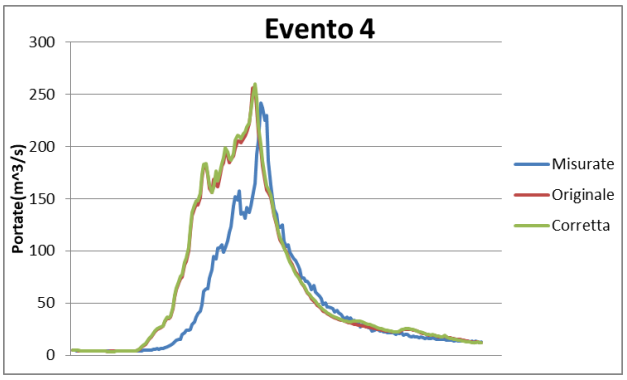
Tabella 24:Indici di errore per gli eventi a Mondovì Ellero, simulazione con pioggia corretta

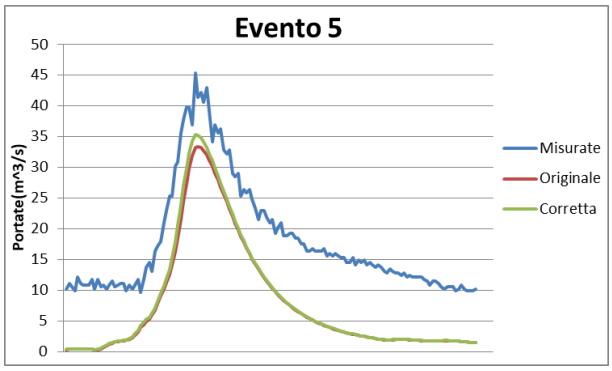
Garessio Tanaro

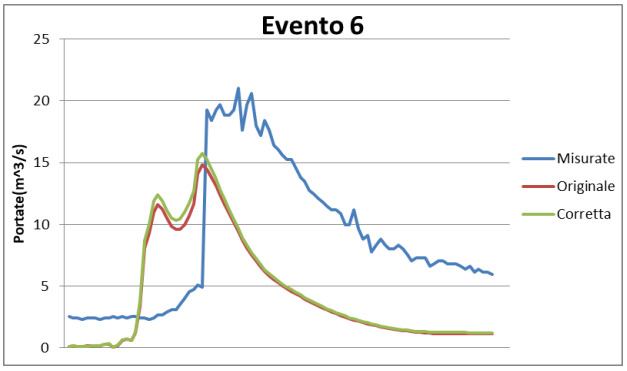


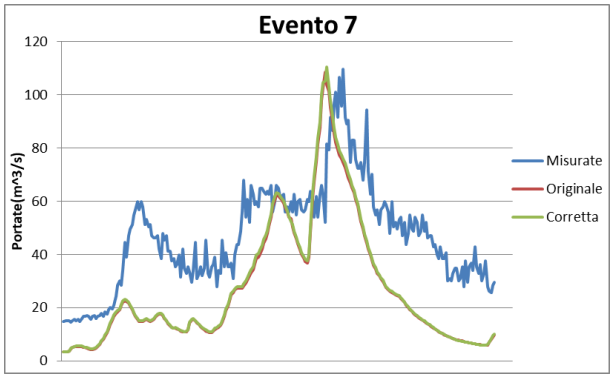












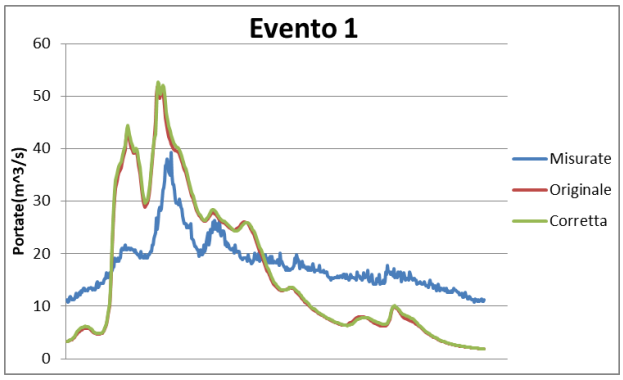
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-0.09	0.09	25.99	-0.22
EVENTO 2	19.33	19.33	30.60	-0.38
EVENTO 3	4.75	4.75	41.09	-0.21
EVENTO 4	6.27	6.27	35.85	0.55
EVENTO 5	-26.38	26.38	10.34	-0.30
EVENTO 6	-29.46	29.46	6.96	-0.49
EVENTO 7	-1.00	1.00	23.69	-0.49
MEDIA	**-3.60**	**12.47**	**24.93**	**-0.22**

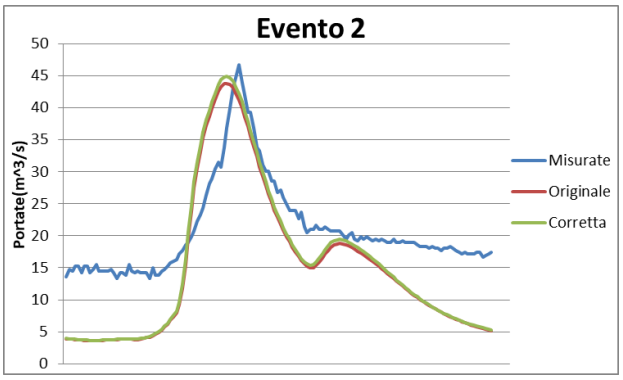
Tabella 25:Indici di errore per gli eventi a Garessio Tanaro, simulazione con pioggia originale

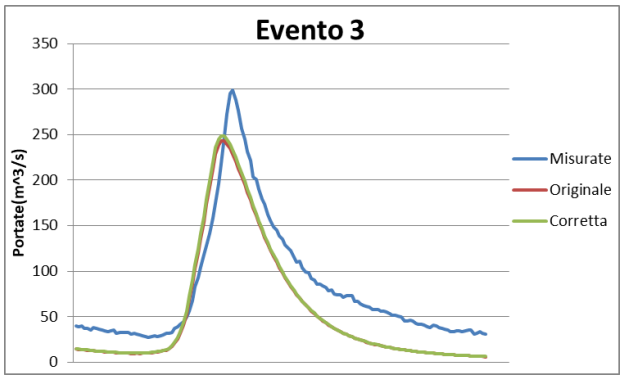
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	3.00	3.00	26.04	-0.23
EVENTO 2	21.74	21.74	31.47	-0.46
EVENTO 3	7.09	7.09	41.96	-0.25
EVENTO 4	7.61	7.61	37.00	0.52
EVENTO 5	-22.25	22.25	10.05	-0.23
EVENTO 6	-25.07	25.07	6.97	-0.49
EVENTO 7	0.79	0.79	23.42	-0.46
MEDIA	**-1.01**	**12.51**	**25.27**	**-0.23**

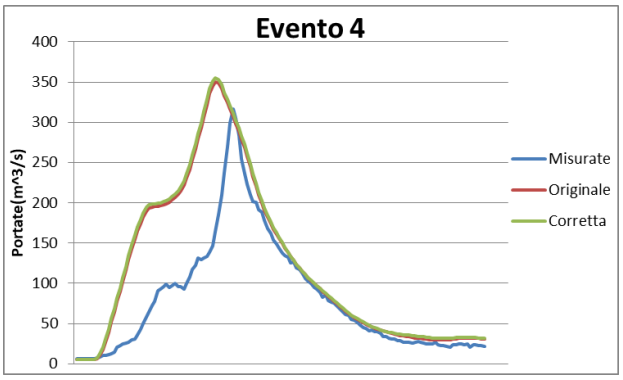
Tabella 26:Indici di errore per gli eventi a Garessio Tanaro, simulazione con pioggia corretta

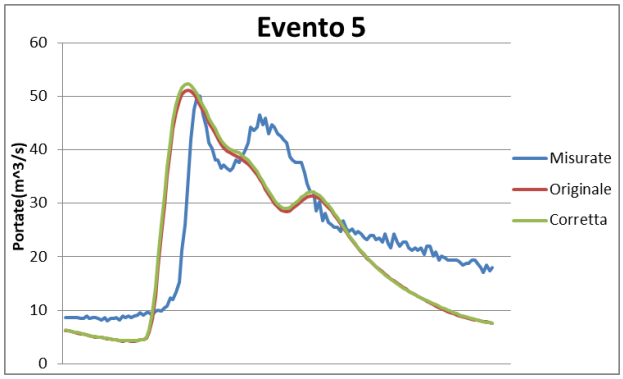
Piantorre Tanaro

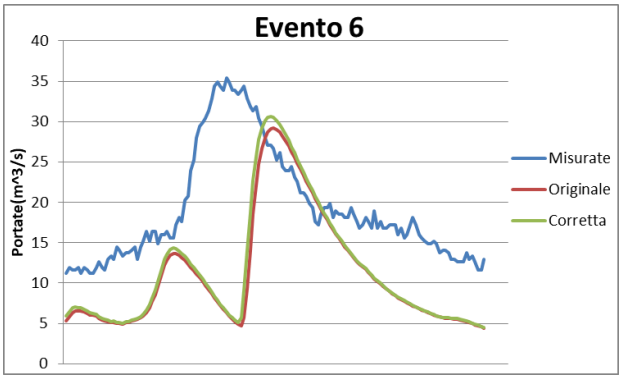


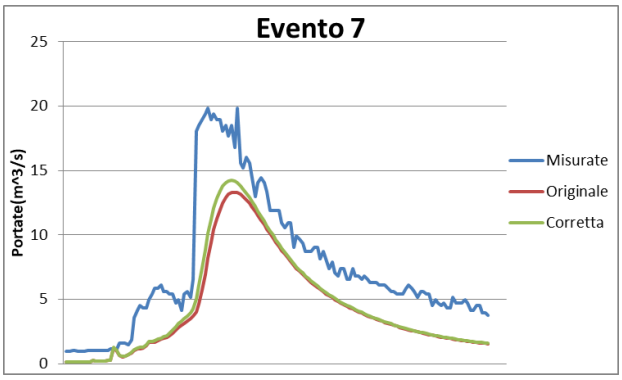












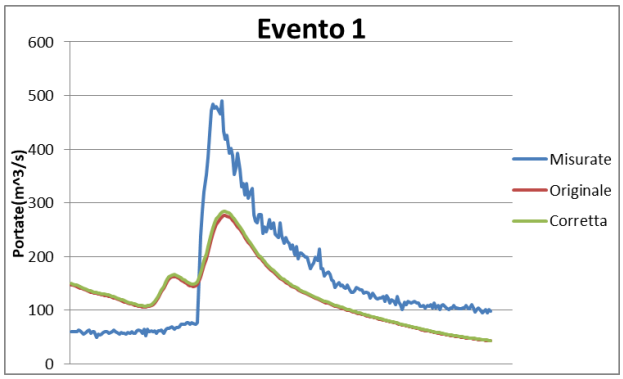
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	31.63	31.63	9.34	-2.34
EVENTO 2	-6.16	6.16	7.94	-0.19
EVENTO 3	-18.88	18.88	30.40	0.80
EVENTO 4	10.53	10.53	65.43	0.17
EVENTO 5	2.15	2.15	9.02	0.46
EVENTO 6	-17.64	17.64	11.31	-1.66
EVENTO 7	-32.82	32.82	3.99	0.40
MEDIA	**-4.46**	**17.12**	**19.63**	**-0.34**

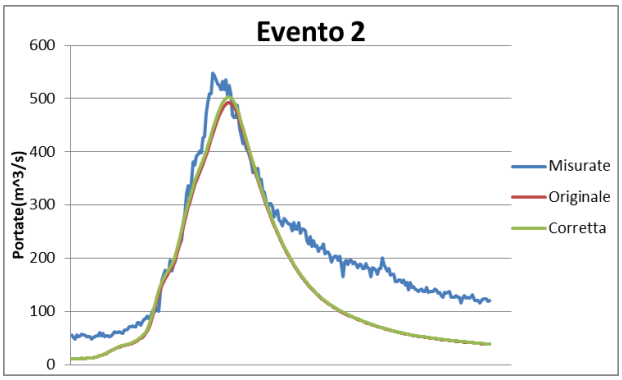
Tabella 27:Indici di errore per gli eventi a Piantorre Tanaro, simulazione con pioggia originale

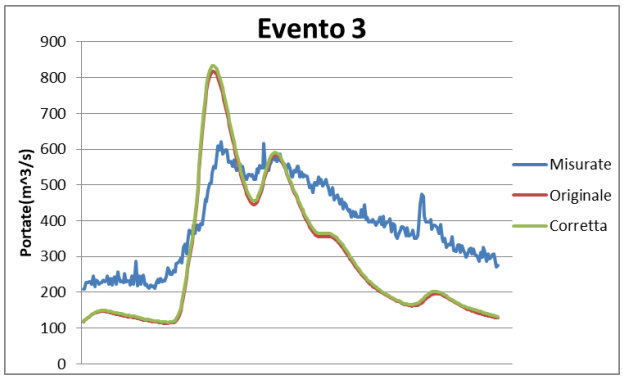
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	34.14	34.14	9.51	-2.47
EVENTO 2	-3.85	3.85	7.91	-0.18
EVENTO 3	-16.82	16.82	30.07	0.80
EVENTO 4	12.10	12.10	68.21	0.10
EVENTO 5	4.48	4.48	9.23	0.43
EVENTO 6	-13.51	13.51	10.98	-1.51
EVENTO 7	-28.17	28.17	3.60	0.51
MEDIA	**-1.66**	**16.15**	**19.93**	**-0.33**

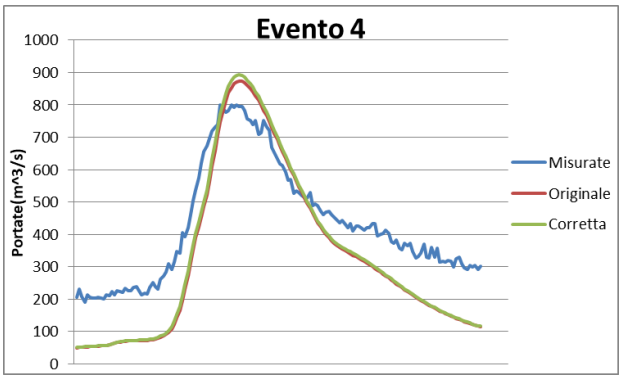
Tabella 28:Indici di errore per gli eventi a Piantorre Tanaro, simulazione con pioggia corretta

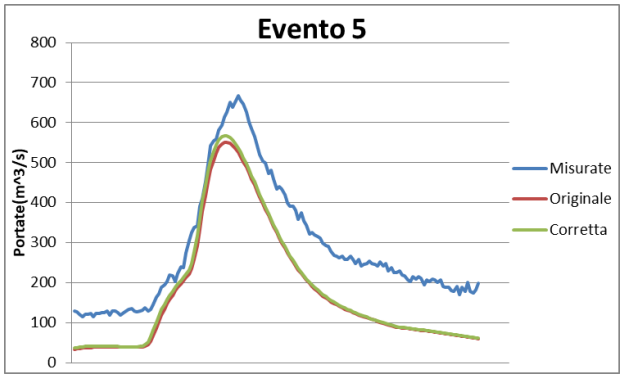
Alba Tanaro

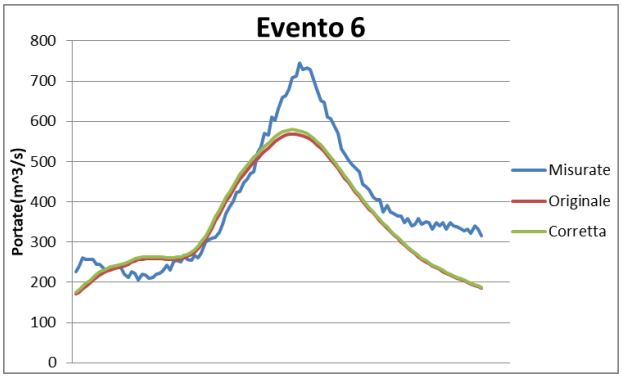


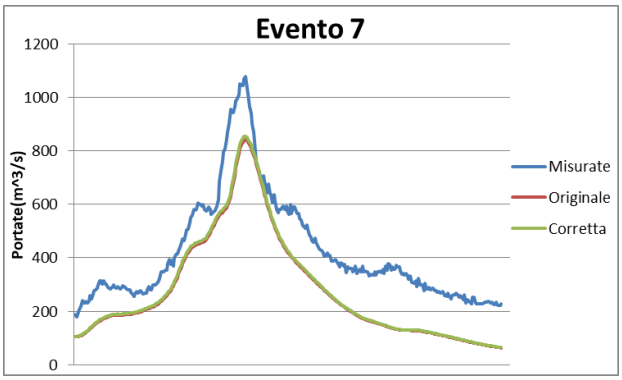












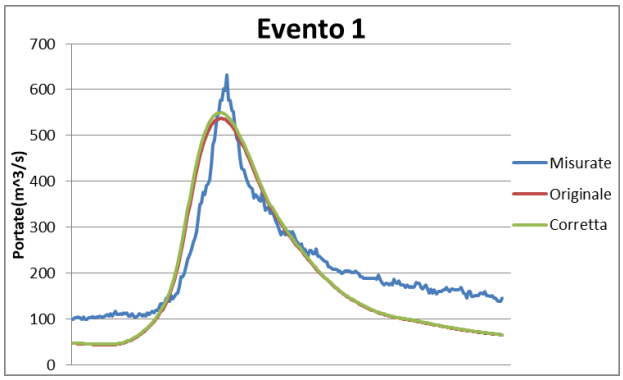
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-43.71	43.71	79.03	0.46
EVENTO 2	-10.03	10.03	69.19	0.72
EVENTO 3	31.75	31.75	144.95	-0.49
EVENTO 4	9.19	9.19	135.82	0.43
EVENTO 5	-17.48	17.48	109.55	0.49
EVENTO 6	-23.68	23.68	75.50	0.75
EVENTO 7	-21.91	21.91	152.79	0.43
MEDIA	**-10.84**	**22.54**	**109.55**	**0.40**

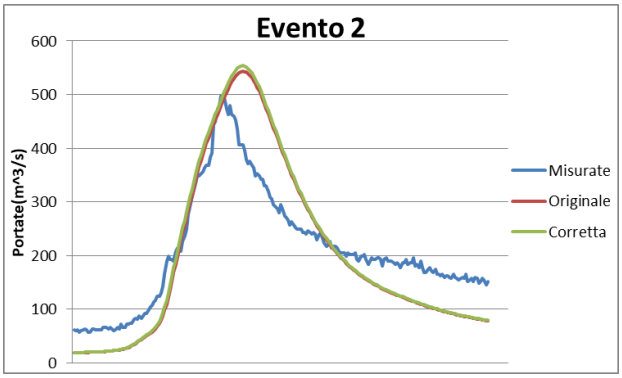
Tabella 29:Indici di errore per gli eventi a Alba Tanaro, simulazione con pioggia originale

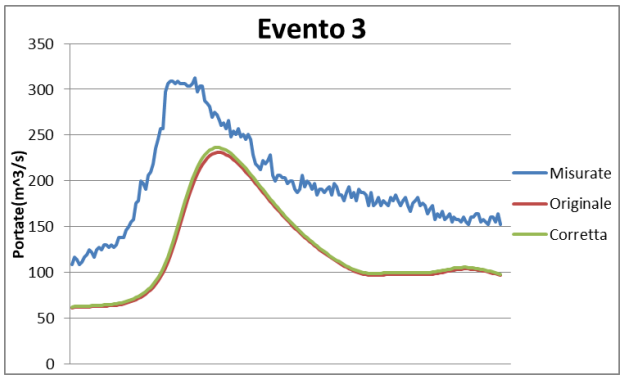
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-42.12	42.12	77.46	0.48
EVENTO 2	-8.17	8.17	68.08	0.72
EVENTO 3	34.22	34.22	143.04	-0.45
EVENTO 4	11.51	11.51	133.31	0.46
EVENTO 5	-15.09	15.09	105.16	0.53
EVENTO 6	-22.18	22.18	72.14	0.77
EVENTO 7	-20.80	20.80	148.72	0.46
MEDIA	**-8.95**	**22.01**	**106.84**	**0.42**

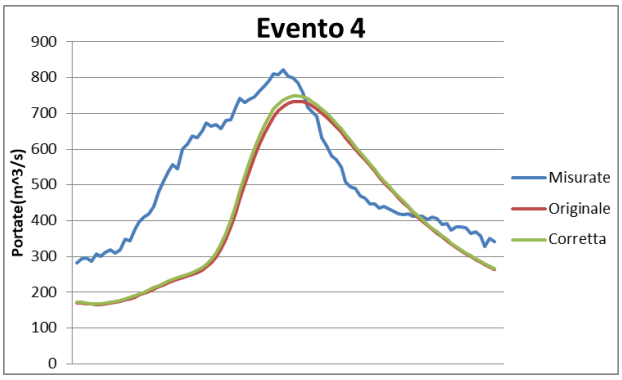
Tabella 30:Indici di errore per gli eventi a Alba Tanaro, simulazione con pioggia corretta

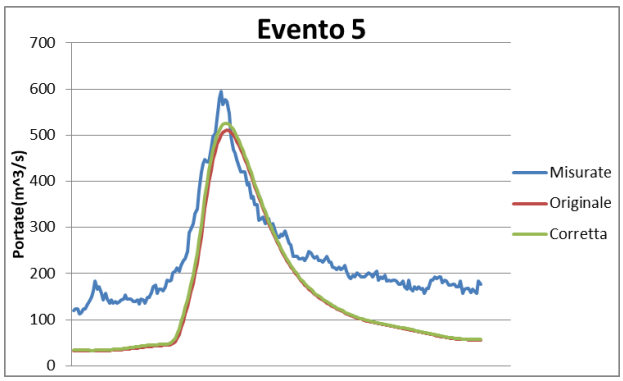
Asti Tanaro

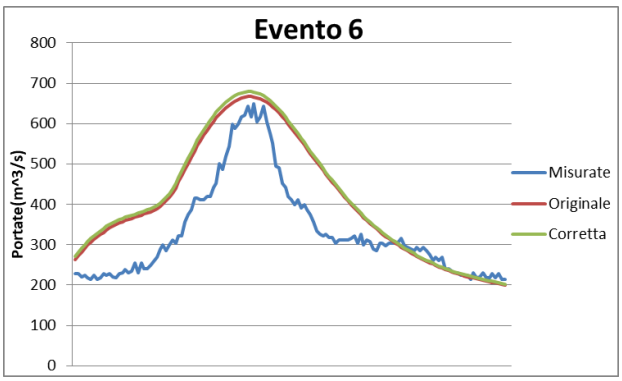


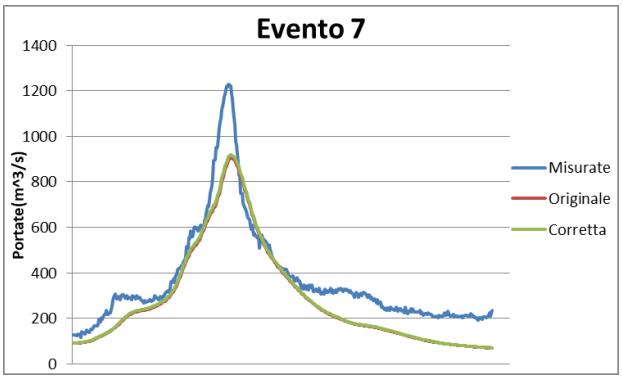












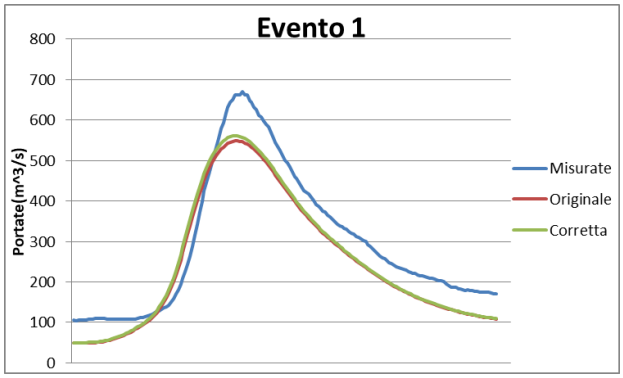
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-14.93	14.93	61.72	0.98
EVENTO 2	9.16	9.16	69.19	0.60
EVENTO 3	-26.07	26.07	81.69	-1.49
EVENTO 4	-10.81	10.81	182.79	-0.41
EVENTO 5	-14.12	14.12	99.29	0.93
EVENTO 6	2.63	2.63	100.20	0.30
EVENTO 7	-26.40	26.40	261.41	0.13
MEDIA	**-11.51**	**14.88**	**122.33**	**0.15**

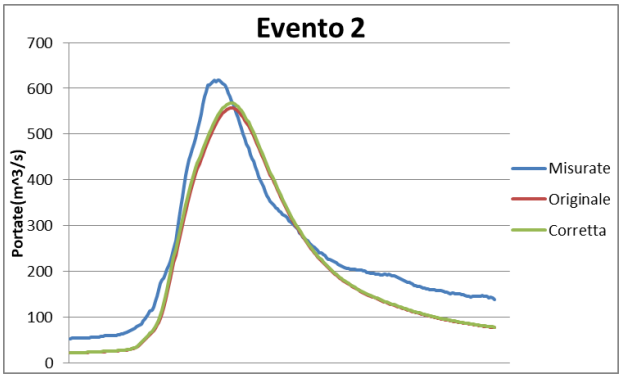
Tabella 31:Indici di errore per gli eventi a Asti Tanaro, simulazione con pioggia originale

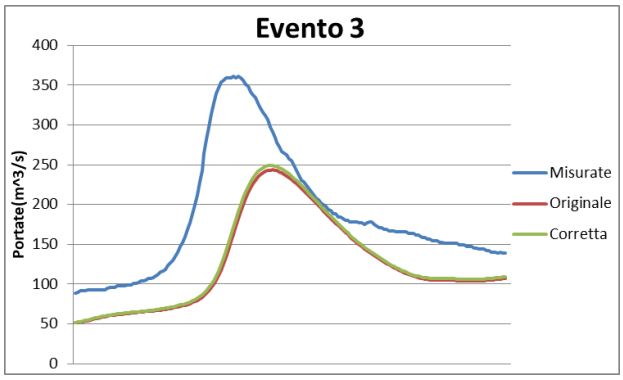
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-13.00	13.00	63.26	0.98
EVENTO 2	11.32	11.32	71.35	0.57
EVENTO 3	-24.32	24.32	79.09	-1.33
EVENTO 4	-8.91	8.91	178.14	-0.34
EVENTO 5	-11.61	11.61	95.81	0.94
EVENTO 6	4.59	4.59	106.97	0.20
EVENTO 7	-25.29	25.29	262.26	0.13
MEDIA	**-9.60**	**14.15**	**122.41**	**0.16**

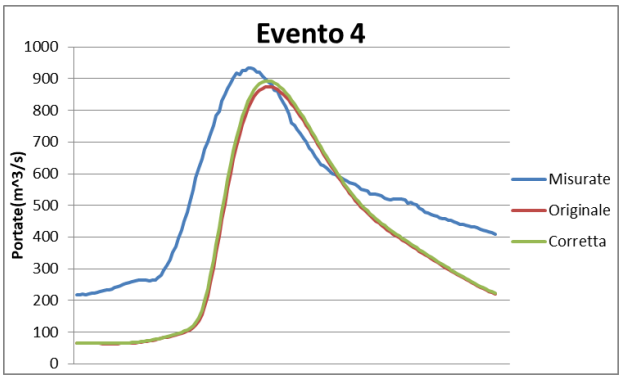
Tabella 32:Indici di errore per gli eventi a Asti Tanaro, simulazione con pioggia corretta

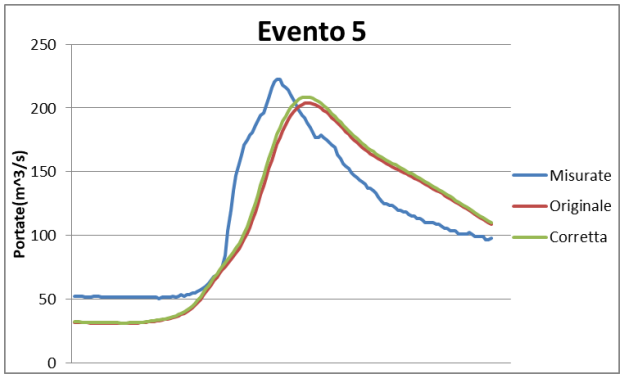
Masio Tanaro

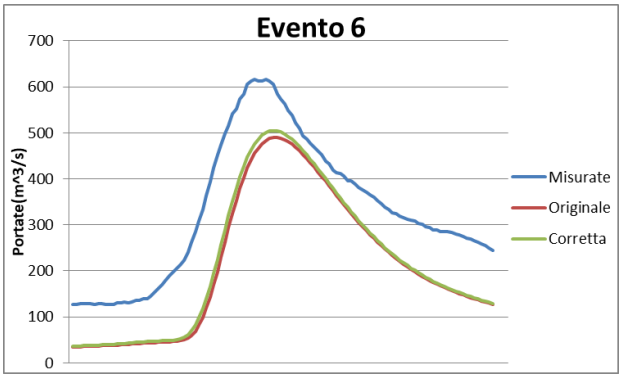


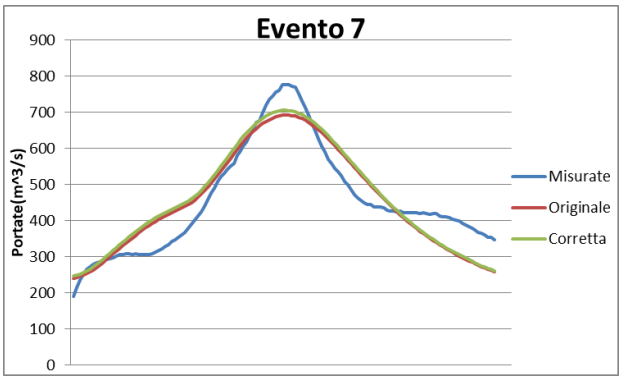












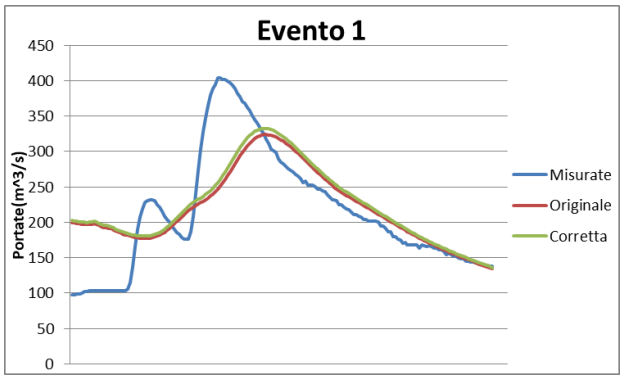
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-18.12	18.12	62.76	0.86
EVENTO 2	-9.88	9.88	53.55	0.88
EVENTO 3	-32.55	32.55	83.07	-0.14
EVENTO 4	-6.35	6.35	206.47	0.06
EVENTO 5	-8.28	8.28	32.05	0.65
EVENTO 6	-20.53	20.53	133.47	0.22
EVENTO 7	-10.92	10.92	57.86	0.84
MEDIA	**-15.23**	**15.23**	**89.89**	**0.48**

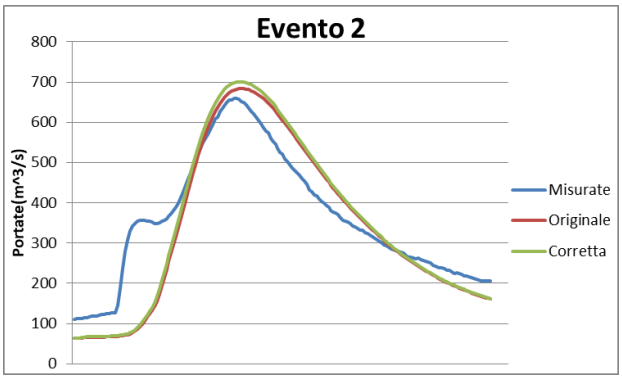
Tabella 33:Indici di errore per gli eventi a Masio Tanaro, simulazione con pioggia originale

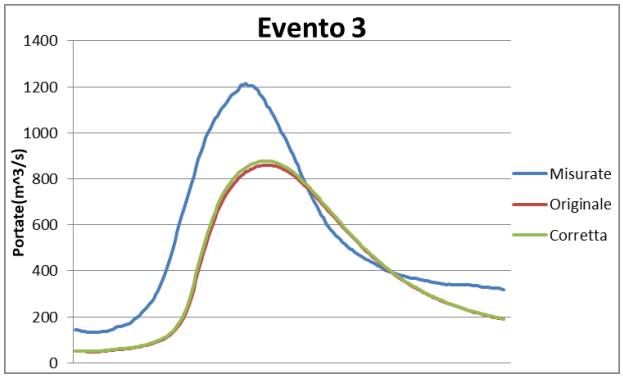
EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-16.23	16.23	60.40	0.87
EVENTO 2	-8.14	8.14	51.13	0.89
EVENTO 3	-30.97	30.97	80.32	-0.06
EVENTO 4	-4.46	4.46	200.31	0.11
EVENTO 5	-6.14	6.14	31.32	0.67
EVENTO 6	-18.13	18.13	124.68	0.32
EVENTO 7	-9.25	9.25	59.26	0.83
MEDIA	**-13.33**	**13.33**	**86.77**	**0.52**

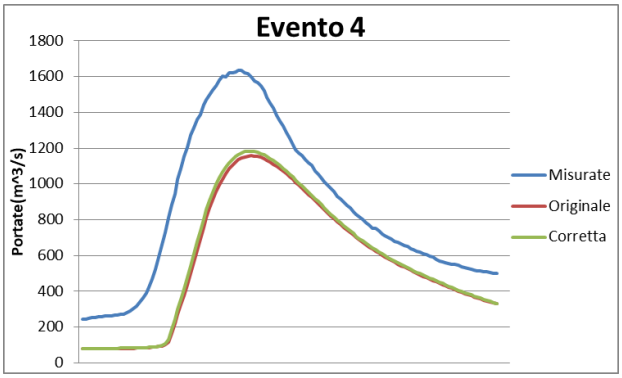
Tabella 34:Indici di errore per gli eventi a Masio Tanaro, simulazione con pioggia corretta

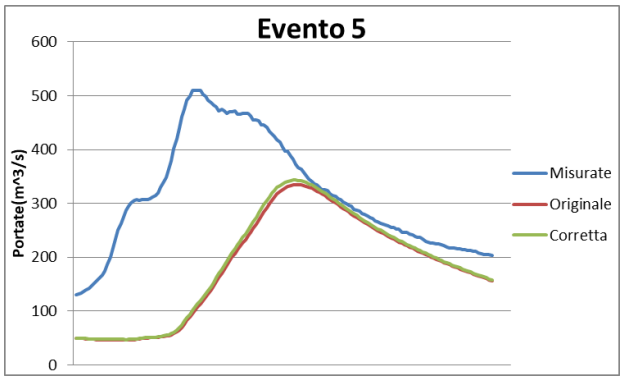
Montecastello Tanaro

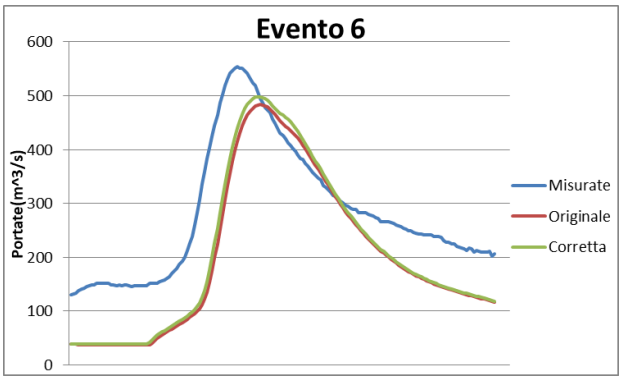


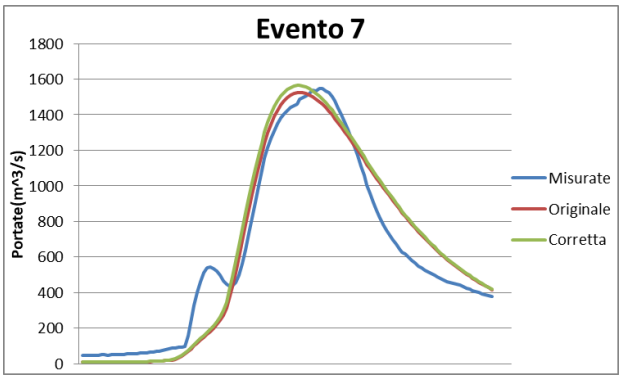












EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-19.91	19.91	56.63	0.55
EVENTO 2	3.66	3.66	87.64	0.68
EVENTO 3	-29.26	29.26	219.01	0.57
EVENTO 4	-29.24	29.24	365.15	0.28
EVENTO 5	-34.27	34.27	186.76	-2.18
EVENTO 6	-12.72	12.72	107.36	0.22
EVENTO 7	-1.63	1.63	140.89	0.92
MEDIA	**-17.62**	**18.67**	**166.20**	**0.15**

Tabella 35:Indici di errore per gli eventi a Montecastello Tanaro, simulazione con pioggia originale

EVENTO	Portata al colmo %	Portata al colmo % assoluta	RMSE	Nash-Sutcliffe
EVENTO 1	-17.73	17.73	55.71	0.56
EVENTO 2	6.23	6.23	87.95	0.68
EVENTO 3	-27.84	27.84	209.18	0.61
EVENTO 4	-27.68	27.68	348.60	0.34
EVENTO 5	-32.64	32.64	183.46	-2.06
EVENTO 6	-10.07	10.07	101.09	0.31
EVENTO 7	0.95	0.95	145.59	0.91
MEDIA	**-15.54**	**17.59**	**161.66**	**0.19**

Tabella 36:Indici di errore per gli eventi a Montecastello Tanaro, simulazione con pioggia corretta

6.3- Considerazioni sugli esiti ottenuti

Osservando i risultati mostrati nei paragrafi precedenti, si può notare come la differenza dovuta alla correzione sia piuttosto piccola, sia per le precipitazioni che per le portate.

Riguardo i dati dell'intensità di precipitazione cumulata risulta che la pioggia corretta sia sempre leggermente maggiore di quella originale, trattandosi appunto la prima di un incremento effettuato per ovviare alla sottostima dei pluviometri. Gli indici mostrano che questa differenza sia

davvero molto bassa (tanto che gli andamenti dei grafici sono quasi sovrapposti), non arrivando mai a superare in media il 2% di variazione.

Un discorso simile si può fare per le portate: come ci si aspettava, avendo incrementato la pioggia, le portate simulate risultano maggiori, anche se di poco. Come nel caso precedente, i grafici risultano quasi sovrapposti e solo nei picchi si può notare una differenza maggiore. Infatti, tra i vari indici calcolati, quello di portata al colmo assoluta presenta una variazione un po' più evidente tra le due simulazioni rispetto agli altri. In generale le portate simulate utilizzando in ingresso la pioggia corretta sembrano adattarsi leggermente meglio alle misure osservate (per quanto la differenze tra gli indici rimangano minime), ma questo dipende solo dal fatto che per la maggior parte degli eventi considerati entrambe le simulazioni tendono a sottostimare le portate osservate.

7- Scenari di evento

Analizzando i risultati mostrati nel capitolo 6 si è potuto notare come, sia per le precipitazioni che per le portate, l'effetto della correzione sulle misure ottenute dai pluviometri sembra avere un impatto decisamente trascurabile sulla simulazione tramite modello FEST-WB.

Tuttavia, per come è stata costruita la curva della funzione d'errore per i pluviometri della famiglia CAE presenti su tutto il bacino del Tanaro (studiata nel capitolo 5), si può notare come la correzione dovrebbe assumere un valore sempre più rilevante all'aumentare dell'intensità di precipitazione, in quanto la misura ottenuta dal pluviometro risulterà sempre più sottostimata. Proprio per tale motivo in questo capitolo si propone di studiare degli scenari di evento con periodo di ritorno molto più elevato di quelli considerati nell'elaborazione precedente, al fine di valutare se l'effetto della correzione sulla simulazione possa diventare più influente.

Questo lavoro non verrà fatto per tutti gli eventi riportati nel capitolo precedente, ma solo per alcuni di essi a titolo di esempio; sono stati selezionati quindi 5 eventi significativi per durata o intensità riscontrabili in tutti e 8 i bacini analizzati (l'orario di inizio e fine evento varia ovviamente da bacino a bacino): l'evento del 28/11/12, del 19/05/13, del 26/12/13, del 12/11/14 e del 01/12/14.

7.1- Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica

Per poter aumentare il periodo di ritorno di un evento serve come primo passo ricavare quest'informazione per l'evento stesso. Questa operazione si può fare grazie alle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (lspp), ovvero delle curve che esprimono la relazione esistente tra altezze massime di precipitazione e le durate di pioggia che si possono verificare in una determinata zona, per un dato valore del periodo di ritorno.

Grazie al sito web di ArpaPiemonte è possibile ricavare i dati utili a costruire le lspp in ogni punto della regione Piemonte, nella quale ricade la quasi totalità del bacino del Tanaro. Sul portale sono disponibili infatti i dati di altezza massima di precipitazione per le durate di 10 minuti, 20 minuti, 30 minuti, 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore e 24 ore e per un periodo di ritorno di 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anni.

Serve quindi sapere, però, la zona in cui prendere i dati delle linee segnalatrici: questa informazione si è cercata nell'ubicazione di alcune delle 98 stazioni di pluviometri che hanno raccolto i dati per il bacino del Tanaro; per semplicità non sono state costruite le lspp per tutte queste stazioni, ma solo per quelle che, per i cinque eventi prima riportati, hanno rilevato il massimo singolo valore di intensità di precipitazione o il massimo valore di intensità cumulata (infatti le due stazioni possono non coincidere).

Al termine di questa prima analisi tuttavia sono state eliminate alcune stazioni, le quali ricadevano nella parte ligure del bacino del Tanaro e per questo motivo non è stato possibile reperire dati dettagliati per poter costruire le lspp. Ci si è concentrati quindi solo sull'ultimo evento (del

01/12/14), l'unico ad avere entrambe le stazioni con il massimo di intensità nella regione Piemonte; queste ultime, in particolare, sono ubicate nei pressi di Monte Malanotte ed Argentera.

Avendo quindi disponibili le lspp per le due zone per il confronto, è stata ricostruita tramite aggregazione dei dati di precipitazione anche la curva dell'evento considerato, per tutte le stesse durate prima citate. I risultati ottenuti vengono mostrati nelle due figure seguenti.

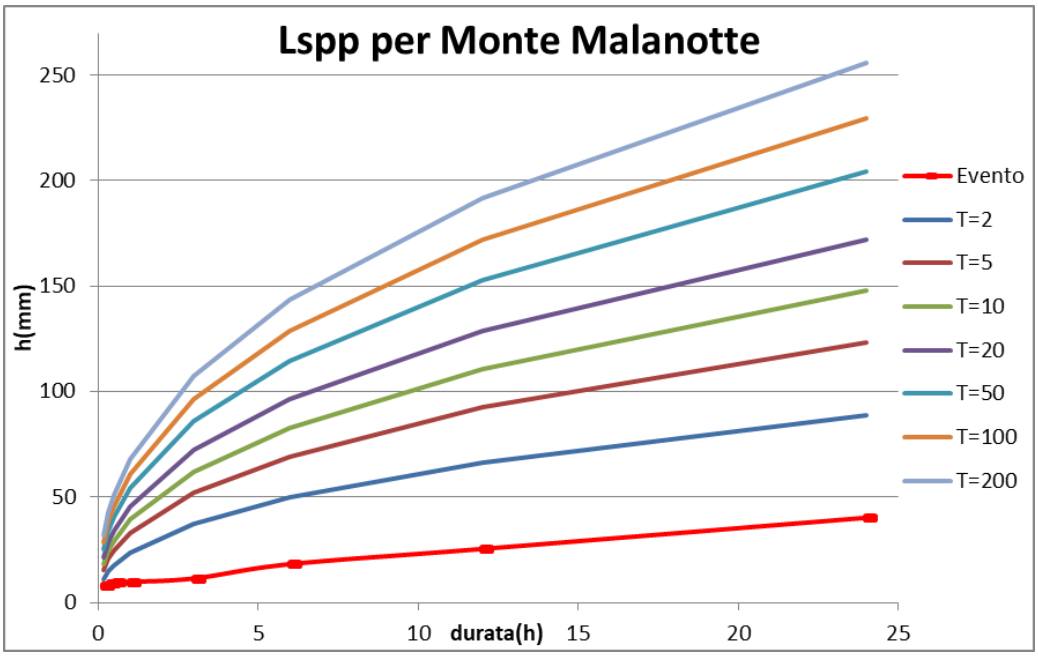


Figura 17: lspp per Monte Malanotte

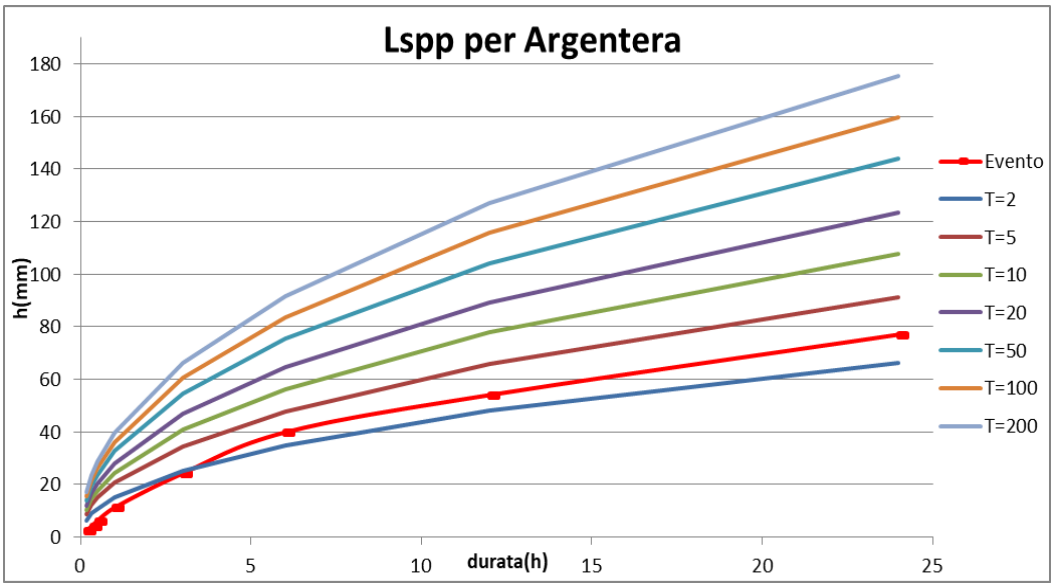


Figura 18: lspp per Argentera

Come si può notare, per entrambe le zone la curva dell'evento analizzato è inferiore addirittura al periodo di ritorno più basso di due anni, con l'eccezione delle durate più elevate per l'area di Argentera, dove comunque non si superano i 5 anni.

Si può ora procedere con il secondo passo, ovvero quello di incrementare i dati di precipitazione: verrà cercato un fattore moltiplicativo tale da portare anche le piogge del nostro evento almeno ad un periodo di ritorno di 200 anni; dopo averlo trovato, si moltiplicherà tutta la pioggia di tale evento (quindi per tutte e 98 le stazioni di pluviometri) per tale valore, così da poter poi far partire una nuova simulazione.

Tuttavia, poiché il fattore moltiplicativo è stato ricavato a partire dalle lspp di una singola stazione di misura, verranno mostrati i risultati solo per il bacino in cui si trova tale strumento: sarebbe infatti una semplificazione troppo eccessiva ritenere tale valore valido per tutti gli altri bacini. Per questo motivo, si proseguirà nell'analisi solo per la stazione di Monte Malanotte, situata nel bacino Mondovì Ellero; la stazione di Argentera infatti si trova al limite estremo occidentale del bacino del Tanaro e non può essere collocata con precisione in nessuno degli otto considerati nell'elaborato.

7.2- Incremento della precipitazione e risultati

7.2.1- Primo tentativo

Come primo tentativo per trovare il fattore moltiplicativo, si è calcolato il rapporto tra l'altezza di precipitazione al periodo di ritorno di 200 anni e quella dell'evento considerato per tutte le durate analizzate; in media si è trovato un incremento delle prime di un valore di circa 5.3: questo sarà il primo fattore moltiplicativo applicato ai dati di precipitazione.

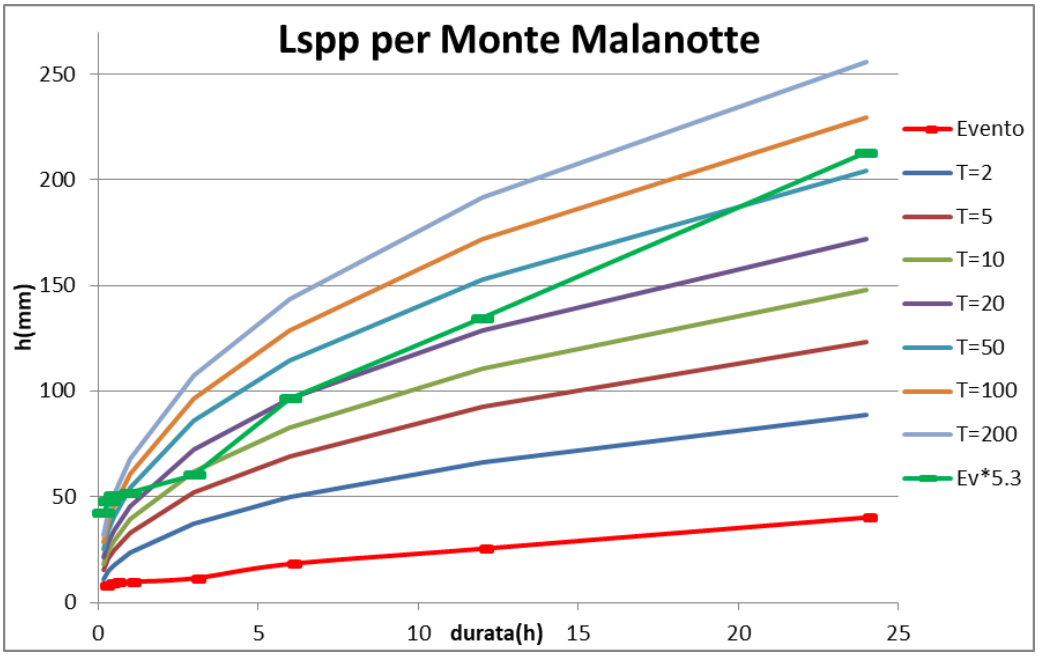


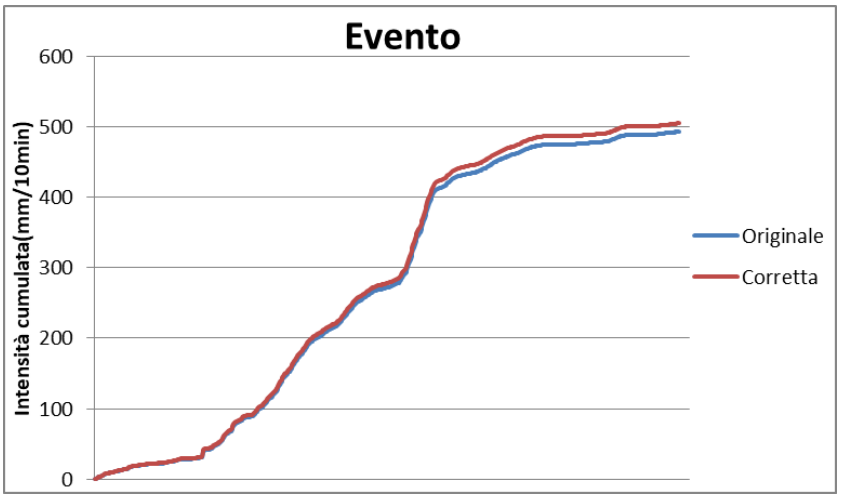
Figura 19: incremento di 5.3 alle altezze della lspp

Come si nota dal grafico, con questo incremento le durate più basse si riportano ad un periodo di ritorno di 500 anni, mentre quelle più elevate sono ancora ad un periodo inferiore; nonostante ciò si è provato comunque a fare una simulazione con il modello FEST-WB, per osservarne i risultati.

Prima di procedere con la simulazione, la pioggia dell'evento analizzato è stata moltiplicata per il fattore desiderato e poi ne è stata effettuata nuovamente la correzione seguendo gli stessi passaggi mostrati nel capitolo 5; questo perché la funzione dell'errore non è lineare, per cui semplicemente moltiplicare la pioggia già corretta avrebbe portato a risultati errati.

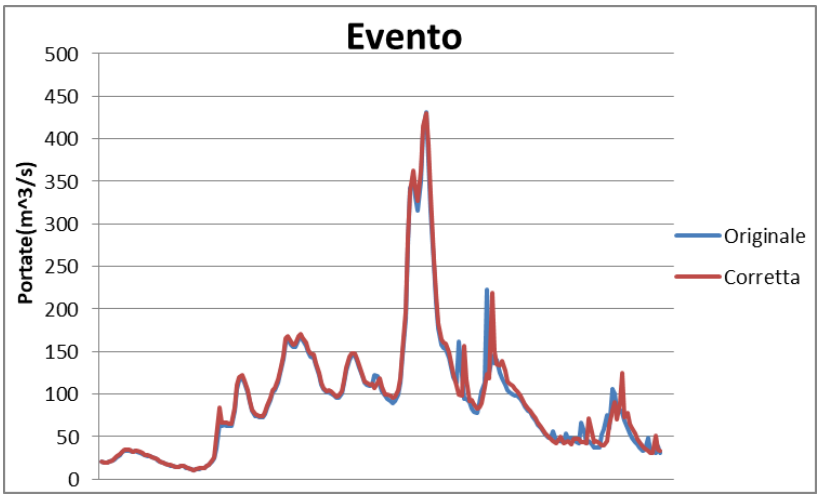
Come nel capitolo precedente, si analizzano i risultati sia sul dato di precipitazione grezzo (mostrato come intensità di precipitazione cumulata) che sulle portate simulate dal FEST-WB.

Precipitazione



Per la precipitazione è stato calcolato nuovamente l'indice di differenza percentuale, che è risultato essere del 2.4%.

Portate



Per le portate non sono sati calcolati indici poiché, essendo un evento fittizio a puro scopo di indagine, non si dispone di misure osservate con cui fare il confronto.

7.2.2- Secondo tentativo

Con il fattore moltiplicativo precedente non si osservano differenze significative, né dal punto di vista delle precipitazioni, per cui si nota solo un lieve incremento nella differenza tra le due cumulate, né tantomeno per le portate, dove gli andamenti delle due simulazioni risultano praticamente coincidenti, come succedeva già per tutti i risultati nel capitolo precedente.

Si è quindi provato ad utilizzare un fattore moltiplicativo più alto, tale per cui il periodo di ritorno dell'evento si porti a 200 anni per tutte le durate considerate. Dopo alcuni tentativi, si è trovato che il minimo valore per cui ciò accade è quello di 9.5.

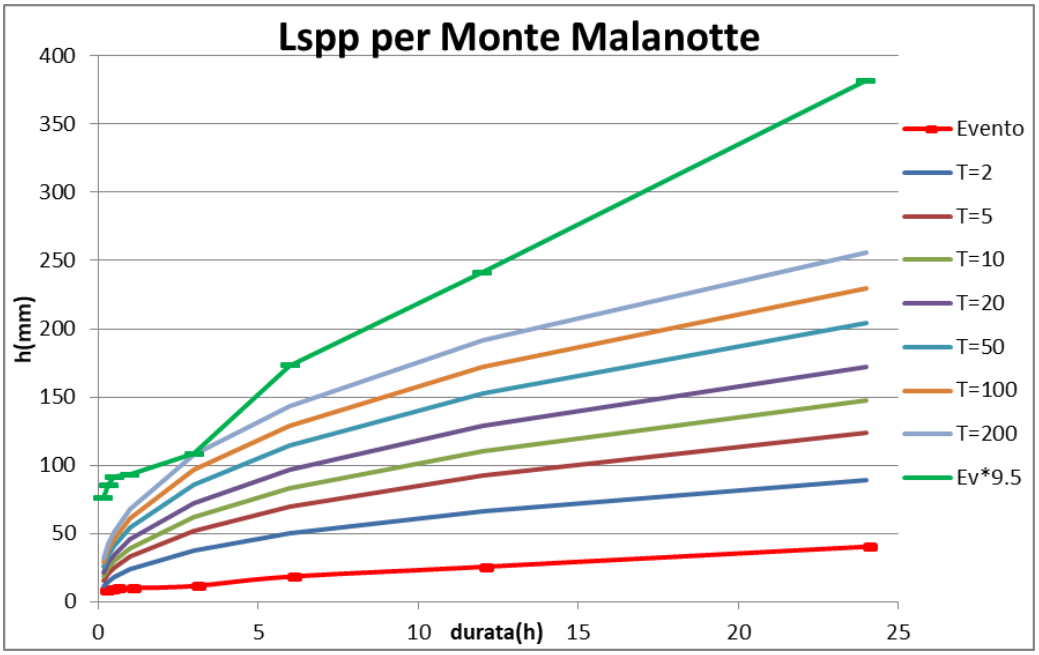
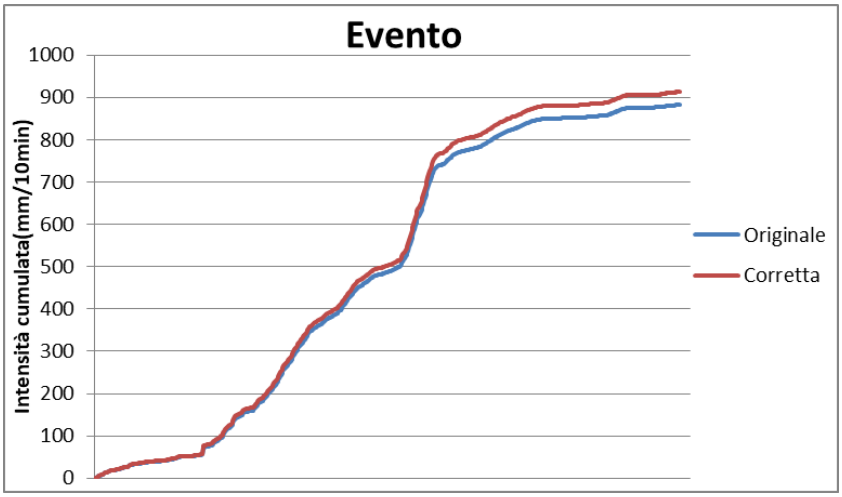


Figura 20: incremento di 9.5 alle altezze della lspp

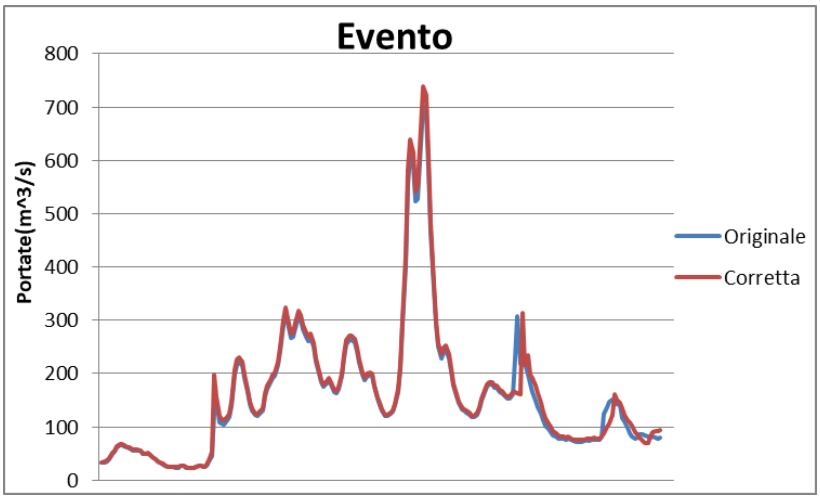
Ripetuta la correzione dei dati, è stata svolta nuovamente la simulazione con il modello FEST-WB.

Precipitazione



Anche in questo caso si è calcolato l'indice di differenza percentuale, che risulta essere pari al 3.3%.

Portate



7.3- Considerazioni sugli esiti ottenuti

Anche provando a considerare uno scenario di evento con periodo di ritorno molto maggiore, l'effetto della correzione dei dati di precipitazione risulta essere poco incisivo; una differenza maggiore (pur rimanendo piuttosto bassa) si nota sull'intensità cumulata di precipitazione, mentre le portate simulate, l'informazione più importante per una futura valutazione del rischio di esondazioni, risultano nuovamente molto simili, con differenze poco significative solo sui picchi.

8- Conclusioni

Lo scopo di questo elaborato era quello di valutare l'impatto della correzione delle misure di precipitazione provenienti dai pluviometri sulla simulazione delle portate tramite modello FEST-WB: alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che l'utilità della funzione di errore utilizzata per correggere le misure provenienti dai pluviometri della famiglia CAE non abbia un peso così rilevante da essere ritenuta indispensabile.

La differenza tra il dato di precipitazione grezzo pre e post correzione è molto piccolo per tutti gli eventi considerati e ciò si traduce in una differenza altrettanto trascurabile nelle portate simulate, nonostante per queste ultime gli indici di errore fossero leggermente migliori per via di una tendenza del modello FEST-WB di sottostimare la maggior parte degli portate osservate.

Anche ipotizzando lo scenario di un evento con periodo di ritorno molto maggiore di quelli precedentemente analizzati i risultati della simulazione rimangono comunque poco incisivi, risaltando in maniera leggermente maggiore solo sul dato di precipitazione grezzo.

Premesso questo, l'idea della correzione delle misure ottenute dai pluviometri allo scopo di migliorare le simulazioni di portate non è da scartare a priori, in quanto per altre famiglie di pluviometri la funzione d'errore può avere un peso molto più determinante sulla correzione della pioggia. Allo stesso modo, la medesima curva analizzata in questo elaborato può avere un effetto decisamente più visibile in bacini dove l'intensità di pioggia registrata, a parità di tempi di ritorno, sia molto più ingente.

Bibliografia

Arpa Piemonte, "*Il Piemonte e il cambiamento climatico: osservazioni passate, impatti presenti e strategie future*", Ages Arti Grafiche s.p.a., Torino, 2007

Arpa Piemonte, "*Il legame con pattern di circolazione a grande scala*", Dipartimento Sistemi Previsionali, Torino, 2010

Arpa Piemonte, "*Tendenze della precipitazione*", Dipartimento Sistemi Previsionali, Torino, 2010

Arpa Piemonte, "*Tendenze della temperatura*", Dipartimento Sistemi Previsionali, Torino, 2010

Arpa, "*Clima e Indicatori Climatici Del Piemonte*", Dipartimento Sistemi Previsionali, Torino, 2010

Atlante dei Bacini Imbriferi Piemontesi

Autorità di Bacino del Fiume Po, "*Linee Generali di Assetto Idrogeologico e Quadro degli Interventi – Bacino del Tanaro*", Progetto di Piano di Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, Parma, 2007

Bras, R. L., "Hydrology – An Introduction to Hydrologic Science", A.Wesley, 1989

Cunge, J., "Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method – Discussion", J. Hydraul. Eng., ASCE, 127(3), 239–239, 2001

Martinec J., "The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting", IAHS, Publ. 51, 1960,

McCarthy, G. T., "The Unit Hydrograph and Flood Routing", Unpublished manuscript presented at a conference of the North Atlantic Division, U.S. Army, Corps of Engineers, June 24, 1938

Montaldo, N., Ravazzani, G., and Mancini, M., "On the prediction of the Toce alpine basin floods with distributed hydrological models", Hydrol. Process., 21, 608-621, 2007

Ponce, V. M., Yevjevich, V., "Muskingum-Cunge method with variable parameters", J. Hydraulic Division, ASCE, 104(12), 1663–1667, 1978

Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J., "On the assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters", Mont. Weather Rev., 100, 81-92, 1972

Ravazzani, G., Mancini, M., Giudici, I., Amadio, P., "Effects of soil moisture parametrization on a real-time flood forecasting system based on rainfall tresholds", IAHS Publ. 313, 2007

Ravazzani, G., Rabuffetti, D., Corbari, C., Mancini, M., "Validation of FEST-WB, a continuous water balance distributed model for flood simulation", 31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Perugia, 9-12 settembre 2008

Rudolf, B., Schneider, U., "Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global

Land- Surface unifing in-situ Gauge Observations", 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group, January 2005

Sonvico, D., "Verifica di modelli di infiltrazione nella modellistica idrologica a scala di bacino in bacini prealpini e semi-aridi", tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2017

Szel, S., Gaspar, C., "On the negative weighting factors in Muskingum-Cunge scheme", J. Hydraulic Res., 38(4), 299–306, 2000

Tang, X., Samuels, P. G., "Variable Parameter Muskingum-Cunge Method for flood routing in a compound channel", J. Hydraulic Res., 37, 591–614, 1999

Tarboton, D. G., Chowdury, T. G., Jackson, T. H., "A spatially distributed energy balance snowmelt model", IAHS Publ., 228, 141-155, 1995

Todini, E., "A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach", Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1645-1659, 2007

Arpa Piemonte: www.arpa.piemonte.it

Autorità Distrettuale di Bacino del Fiume Po: https://adbpo.gov.it

Geoportale Piemonte: http://www.geoportale.piemonte.it

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima ISAC-CNR: http://www.isac.cnr.it

Protezione Civile http://www.protezionecivile.gov.it

Sistema Piemonte: http://www.sistemapiemonte.it

Sportello Cartografico Regione Liguria: https://geoportal.regione.liguria.it

Webgis Arpa Piemonte: http://webgis.arpa.piemonte.it

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo ultimo spazio per un ringraziamento a tutte quelle persone che mi hanno accompagnato e mi sono state vicine in questo lungo percorso universitario.
In primo luogo ringrazio il professor Ravazzani, il quale è sempre stato estremamente disponibile e paziente con me durante tutta la preparazione dell'elaborato, sempre pronto ad aiutarmi ogni volta che si presentava un problema.
Ringrazio poi la mia famiglia, che mi ha sempre supportato (e sopportato) in ogni cosa durante il lungo percorso di studi, aiutandomi a superare anche i temporanei momenti di sconforto.
Ringrazio mia zia Rita che mi è sempre stata vicina, sempre pronta ad ascoltare i miei problemi.
Ringrazio i miei amici, vicini e lontani, che non mi hanno abbandonato e mi hanno aiutato a "staccare" un po' dallo studio.
Ringrazio i miei compagni di corso, con i quali ho condiviso gioie e dolori della vita universitaria.
Infine un ringraziamento davvero speciale a mia zia Gabriella e famiglia, che mi hanno ospitato generosissimamente per anni a Milano, evitandomi più e più volte la vita da pendolare.