

POLITECNICO DI MILANO

FACOLTA' DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE

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



IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI PREVISIONE IN TEMPO REALE PER LA PROTEZIONE IDRAULICA DELLA CITTA' DI MILANO

Relatore:

Prof. Ing. Giovanni RAVAZZANI

Co-Relatore:

Prof. Ing. Alessandro CEPPI

Tesi di Laurea di:

Ilaria BOCUS

782196

Gianluca DI LUCCIO

782862

RINGRAZIAMENTI

Desideriamo innanzitutto ringraziare il Professor Giovanni Ravazzani per i preziosi insegnamenti e le per le numerose ore dedicate alla nostra tesi. Inoltre, ringraziamo sentitamente il Dott. Alessandro Ceppi che è stato sempre disponibili a dirimere i nostri dubbi durante la stesura di questo lavoro. Intendiamo poi ringraziare l'ARPA Lombardia, il Centro Epson Meteo e il Parco Regionale della Valle del Lambro, sottolineando la particolare disponibilità dell'Ing. Giuffré e l'Ing. Minà per averci fornito dati indispensabili per la realizzazione della tesi. Infine, abbiamo desiderio di ringraziare con affetto i nostri genitori e amici per il sostegno ed il grande aiuto che ci hanno dato.

RIASSUNTO

Il crescente numero di eventi alluvionali, associato all'intensa urbanizzazione nel territorio, richiede la messa in opera di interventi di protezione idraulica strutturali e non. La prima tipologia implica una azione diretta dell'uomo sul bacino attraverso delle opere che vanno a modificare l'intensità e la frequenza degli eventi di piena lungo il corso d'acqua; la seconda tipologia, invece, ha come scopo la riduzione delle perdite economiche e umane agendo sulla vulnerabilità dell'area potenzialmente interessata dall'evento di piena.

Il presente lavoro si pone come punto di partenza per la realizzazione di un sistema previsionale in tempo reale, che rientra nella seconda categoria delle opere di difesa, ottenuto mediante l'utilizzo accoppiato di un modello meteorologico, WRF e un modello idrologico, FEST-WB. In particolare il tema centrale risulta essere la taratura del modello idrologico compiuta sulla base dei dati osservati nel territorio in esame. Viene inoltre proposta una prima implementazione e verifica del sistema di allerta, pur con i limiti dovuti alle informazioni a disposizione carenti.

In particolare le analisi si focalizzeranno sui fiumi che hanno determinato storicamente e che tuttora creano le maggiori criticità per la città di Milano e l'hinterland: Lambro, Seveso e Olona.

L'evento che ci ha spinti alla stesura di questo lavoro è stata l'alluvione verificatasi il 18 settembre 2010 che ha determinato l'allagamento della città di Milano da parte del fiume Seveso causando una morte e danni per circa 70 milioni di euro (LegaAmbiente s.d.). In Figura sono mostrati alcuni dei danni causati dall'alluvione.



Figura A-1: strada allagata nella parte nord della città (a); allagamento linea tre della metropolitana (b).

Questa tipologia di lavoro va ad affiancarsi ai progetti internazionali che coinvolgono il territorio nazionale e che vedono il contributo anche di enti italiani.

INDICE

INDICE FIGURE	iii
INDICE TABELLE	vii
1 INTRODUZIONE	1
1.1 STATO DELL'ARTE	3
1.2 OBIETTIVI E CONTORNI	6
2 INQUADRAMENTO	7
2.1 INQUADRAMENTO GENERALE	7
2.2 ANALISI DEI BACINI DI INTERESSE	9
2.2.1 Lambro	9
2.2.2 Seveso	12
2.2.3 Olona	14
3 MODELLI MATEMATICI	17
3.1 MODELLO IDROLOGICO	17
3.1.1 Dati in ingresso	18
3.1.2 Dinamica della neve	19
3.1.3 L'infiltrazione	20
3.1.4 L'evapotraspirazione	21
3.1.5 Bilancio idrologico	23
3.1.6 Propagazione del deflusso superficiale	23
3.2 MODELLO METEOROLOGICO	25
3.2.1 Introduzione generale	25
3.2.2 WRF	27
4 DATI DI INGRESSO	29
4.1 DATI METEOROLOGICI	29
4.2 DATI IDROLOGICI	34
4.3 DATI CARATTERIZZANTI IL SUOLO	36
4.3.1 Tessitura del suolo	36
4.3.2 Uso del suolo	38
5 ANALISI DI SENSITIVITA'	41
5.1 RISOLUZIONE SPAZIALE	41
5.2 CONDUTTIVITA' IDRAULICA SATURA, K_{sat}	42
5.3 RUNOFF CURVE NUMBER, CN	44
6 TARATURA DEL MODELLO IDROLOGICO	47

6.1	CALIBRAZIONE	47
6.1.1	Olona	48
6.1.2	Seveso	56
6.1.3	Lambro	59
6.2	VALIDAZIONE	70
6.2.1	Olona	70
6.2.2	Seveso	72
6.2.3	Lambro	72
7	PRESTAZIONI DEL MODELLO METEO: Weather Research and Forecasting Model - WRF	76
7.1	PRESTAZIONE DEL MODELLO PER EVENTO	76
7.1.1	Evento del 17-18 maggio 2008	76
7.1.2	Evento del 12-13-14 luglio 2008	77
7.1.3	Evento del 12-13-14 settembre 2008	79
7.1.4	Evento del 04-05-06 novembre 2008	80
7.1.5	Evento del 30 novembre e 01-02 dicembre 2008	82
7.1.6	Evento del 06-07-08 febbraio 2009	83
7.1.7	Evento del 27-28-29 aprile 2009	85
7.1.8	Evento del 07 luglio 2009	86
8	REAL TIME	88
8.1	Verifica del sistema di previsione	89
8.1.1	Olona	89
8.1.2	Seveso	93
8.1.3	Lambro	95
9	CONCLUSIONI	102
	BIBLIOGRAFIA	104

INDICE FIGURE

Figura 1-1: il grafico mostra il numero di catastrofi naturali a livello mondiale divise per tipo di evento dal 1980 al 2013 (Munich_Re Gennaio 2014)	2
Figura 1-2: il grafico mostra le perdite finanziarie globali e quelle adeguatamente assicurate dal 1980 al 2013, (Munich_Re Gennaio 2014).	2
Figura 1-3: a livello globale è mostrato un confronto tra le temperature e le precipitazioni medie per il periodo 1986-2005 e 2081-2100, (IPCC 2013).	3
Figura 1-4: esempio della mappa di allerta delle inondazioni in corso (fonte: Joint Research Center – Institute for Environment and Sustainability http://floods.jrc.ec.europa.eu/ongoing-floods).	4
Figura 2-1: idrografia della provincia di Milano (LegaAmbiente s.d.)	7
Figura 2-2: DEM.	8
Figura 2-3: rappresentazione della media trentennale dell'intensità di precipitazione. (Centro Meteorologico Lombardo 2011)	8
Figura 2-4: regime pluviometrico della stazione del CML di Milano San Leonardo, (Centro Meteorologico Lombardo 2011).	9
Figura 2-5: frequenza temporali nei mesi estivi: giugno-agosto (media 2004-2009), (Centro Meteorologico Lombardo 2011).	9
Figura 2-6: il ramo minore del Lambro, che attraversa Monza, durante la piena del 1° novembre 2010 non riesce a passare sotto il ponte di via Luigi Villa (foto di Bruno Grillini, fonte: (Centro Meteorologico Lombardo 2011)).	10
Figura 2-7: individuazione del bacino del fiume Lambro analizzato nel lavoro di tesi.	10
Figura 2-8: il fiume Seveso in corrispondenza dell'inizio della "tombinatura" a Milano, in via Ornato (a); 1°ottobre 2010 sono in corso lavori di ulteriore arginatura delle sponde (Foto di Bruno Grillini, fonte: (Centro Meteorologico Lombardo 2011)) (b).	12
Figura 2-9: individuazione del bacino del torrente Seveso analizzato nel lavoro di tesi.	13
Figura 2-10: fiume Olona.	14
Figura 2-11: individuazione del bacino del fiume Olona analizzato nel lavoro di tesi.	15
Figura 3-1: illustrazione schematica del ciclo idrologico.	17
Figura 3-2: schema concettuale del modello FEST-WB.	18
Figura 3-3: spazializzazione dei dati di temperatura.	19
Figura 3-4: relazione tra la temperatura dell'aria e le precipitazioni atmosferiche.	20
Figura 3-5: schematizzazione di due celle di versante l'una adiacente all'altra e delle interazione tra le stesse.	24
Figura 3-6: discretizzazione spazio-temporale nel metodo Muskingum Cunge.	25
Figura 3-7: diffusione del WRF (Holland, et al. 15 Novembre 2007).	27
Figura 4-1: distribuzione geografica delle stazione di rilevamento delle precipitazioni.	30
Figura 4-2: distribuzione geografica delle stazione di rilevamento della radiazione solare globale.	31
Figura 4-3: distribuzione geografica delle stazione di rilevamento delle temperatura dell'aria.	32
Figura 4-4: distribuzione geografica delle stazione di rilevamento dell'umidità dell'aria.	33
Figura 4-5: stazioni di rilevamento del livello idrometrico lungo Olona, Seveso e Lambro.	34
Figura 4-6: della tessitura del suolo (a); frequenza relativa di ciascuna classe (b).	37
Figura 4-7: mappa della permeabilità.	37
Figura 4-8: mappa dell'uso del suolo (a); frequenza relativa di ciascuna classe (b).	38
Figura 4-9: descrizione delle classi d'uso del suolo in GLOBCORINE 2009.	38
Figura 4-10: mappa delle classi idrologiche (a); frequenza relativa di ciascuna classe (b).	39
Figura 4-11: mappa del Curve Number.	39
Figura 5-1: confronto tra le due diverse risoluzioni per l'evento 3 di Lozza.	42
Figura 5-2: Ksat - analisi di sensitività per l'evento 3 di Lozza.	43
Figura 5-3: CN - analisi di sensitività per l'evento 3 di Lozza.	45

Figura 6-1: andamento del volume cumulato per l'anno 2008 alla stazione di Caslino. _____	48
Figura 6-2: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Lozza, ponte Vedano. _____	50
Figura 6-3: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza, ponte Vedano. _____	52
Figura 6-4: mappe dell'umidità del suolo del 07-07-2009 (a) e del 29-04-2009(b). _____	52
Figura 6-5: confronto tra i risultati ottenuti con due diverse condizioni iniziali. _____	52
Figura 6-6: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Castellanza. _____	54
Figura 6-7: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza. _____	56
Figura 6-8: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Cantù. _____	57
Figura 6-9: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù. _____	58
Figura 6-10: andamento dello SWE nel bacino del Seveso chiuso a Cantù prima e durante l'evento 7. _____	59
Figura 6-11: paratoia di regolazione del cavo Diotti. _____	60
Figura 6-12: rete dei collettori ALSI s.p.a. _____	60
Figura 6-13: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Caslino d'Erba. _____	62
Figura 6-14: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino d'Erba. _____	64
Figura 6-15: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Peregallo. _____	65
Figura 6-16: simulazione dell'evento di piena maggio 2008 (a); andamento giornaliero del livello idrico nel Cavo Diotti (b), (Parco Regionale della Valle del Lambro s.d.) . _____	66
Figura 6-17: simulazione dell'evento di piena maggio 2010(a);andamento del livello idrico nel Cavo Diotti, dati ogni 15 minuti (b), (Parco Regionale della Valle del Lambro s.d.) . _____	66
Figura 6-18: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo. _____	67
Figura 6-19: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Milano, via Feltre. _____	69
Figura 6-20: risultati della calibrazione per la stazione di Milano, via Feltre. _____	70
Figura 6-21: risultati della validazione per la stazione di Lozza. _____	71
Figura 6-22: risultati della validazione per la stazione di Castellanza. _____	71
Figura 6-23: risultati della validazione per la stazione Cantù. _____	72
Figura 6-24: risultati della calibrazione per la stazione di Caslino d'Erba. _____	73
Figura 6-25: risultati della validazione per la stazione di Peregallo.. _____	74
Figura 6-26: risultati della validazione per la stazione di Milano, via Feltre. _____	75
Figura 7-1: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 17-18 maggio 2008. _____	77
Figura 7-2: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 12-13-14 luglio 2008. _____	79
Figura 7-3: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 12-13-14 settembre 2008. _____	80
Figura 7-4: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 04-05-06 novembre 2008. _____	82
Figura 7-5: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 30 novembre e 01-02 dicembre 2008. _____	83
Figura 7-6: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 06-07-08 febbraio 2009. _____	84
Figura 7-7: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 27-28-29 aprile 2009. _____	86
Figura 7-8: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 07 luglio 2009. _____	87
Figura 8-1: schema esemplificativo del funzionamento a cascata del sistema previsionale. _____	88
Figura 8-2: per la stazione di Lozza è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni. _____	90

Figura 8-3: per la stazione di Castellanza è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.	92
Figura 8-4: per la stazione di Cantù è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.	94
Figura 8-5: per la stazione di Caslino d'Erba è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.	96
Figura 8-6: per la stazione di Peregallo è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.	98
Figura 8-7: per la stazione di Milano, via Feltre è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.	100
Figura 9-1: sottopasso allagato a Milano in zona Tibaldi il 7 luglio 2009 dopo un intenso temporale notturno (foto di Bruno Grillini, fonte (Centro Meteorologico Lombardo 2011)).	102

INDICE TABELLE

Tabella 1-1: alcuni numeri riguardo il progetto MAP. _____	5
Tabella 2-1: caratteristiche morfologiche del bacino del fiume Lambro. _____	11
Tabella 2-2: caratteristiche morfologiche del bacino del torrente Seveso. _____	13
Tabella 2-3: caratteristiche morfologiche del bacino del fiume Olona. _____	15
Tabella 4-1: stazioni pluviometriche. _____	29
Tabella 4-2: stazioni che misurano la radiazione solare. _____	31
Tabella 4-3: stazioni termometriche. _____	31
Tabella 4-4: stazioni igrometriche. _____	33
Tabella 4-5: stazioni idrometriche. _____	34
Tabella 4-6: scale di deflusso delle stazioni presenti sul fiume Olona. _____	35
Tabella 4-7: scala di deflusso della stazione presente sul fiume Seveso. _____	35
Tabella 4-8: scale di deflusso delle stazioni presenti sul fiume Lambro. _____	35
Tabella 4-9: classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti, fonte (Maidment 2001). _____	36
Tabella 4-10: riclassificazione della mappa della tessitura del suolo.. _____	36
Tabella 4-11: riclassificazione della mappa di permeabilità. _____	37
Tabella 5-1: errore medio relativo sulla portata al colmo di piena al variare della risoluzione. _____	41
Tabella 5-2: errore medio assoluto temporale del picco di piena al variare della risoluzione. _____	41
Tabella 5-3: RMSE medio al variare della risoluzione. _____	41
Tabella 5-4: Nash medio al variare della risoluzione. _____	41
Tabella 5-5: errore medio relativo sulla portata al colmo di piena al variare di Ksat. _____	42
Tabella 5-6: errore medio assoluto temporale del picco di piena al variare di Ksat. _____	43
Tabella 5-7: RMSE medio al variare di Ksat. _____	43
Tabella 5-8: Nash medio al variare di Ksat. _____	43
Tabella 5-9: errore medio relativo sulla portata al colmo di piena al variare del CN. _____	44
Tabella 5-10: errore medio assoluto temporale del picco di piena al variare del CN. _____	44
Tabella 5-11: RMSE medio al variare del CN. _____	44
Tabella 5-12: Nash medio al variare del CN. _____	44
Tabella 6-1: eventi presi in esame per la stazione di Lozza. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato. _____	49
Tabella 6-2: stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza. _____	50
Tabella 6-3: eventi presi in esame per la stazione di Castellanza. *=dati mancanti. Per ovviare al problema si sono congiunte le misure presenti con un andamento lineare; ***=è entrata in funzione la diga di Ponte Gurone. _____	53
Tabella 6-4: stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza. _____	54
Tabella 6-5: eventi presi in esame per la stazione di Cantù. _____	56
Tabella 6-6: stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù. _____	57
Tabella 6-7: valore associati alle grandezza r_f e k_s al variare dell'area soglia. _____	61
Tabella 6-8: eventi presi in esame per la stazione di Caslino d'Erba. *=dati mancanti in quelli osservati. Per ovviare al problema si sono congiunte le misure presenti con un andamento lineare. **= il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato. _____	61
Tabella 6-9: stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino d'Erba. _____	62
Tabella 6-10: eventi presi in esame per la stazione di Peregallo. *=dati mancanti in quelli osservati. Per ovviare al problema si sono congiunte le misure presenti con un andamento lineare. **= il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato. _____	64
Tabella 6-11: stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo. _____	66
Tabella 6-12: eventi presi in esame per la stazione di Milano. _____	67
Tabella 6-13: stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano. _____	69

Tabella 6-14: coefficienti applicati alle mappe dei parametri k_{sat} e CN al termine della calibrazione.	70
Tabella 6-15: eventi presi in esame per la stazione di Lozza e stima degli indici. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato; ***=è entrata in funzione la diga di Ponte Gurone.	71
Tabella 6-16: eventi presi in esame per la stazione di Castellanza e stima degli indici; ***=è entrata in funzione la diga di Ponte Gurone.	71
Tabella 6-17: eventi presi in esame per la stazione di Cantù e stima degli indici. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.	72
Tabella 6-18: eventi presi in esame per la stazione di Caslino e stima degli indici. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.	73
Tabella 6-19: eventi presi in esame per la stazione di Peregallo e stima degli indici.	73
Tabella 6-20: eventi presi in esame per la stazione di Milano e stima degli indici.	74
Tabella 7-1: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 17-18 maggio 2008.	77
Tabella 7-2: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 12-13-14 luglio 2008.	79
Tabella 7-3: relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 12-13-14 settembre 2008.	80
Tabella 7-4: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 04-05-06 novembre 2008.	82
Tabella 7-5: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 30 novembre e 01-02 dicembre 2008.	83
Tabella 7-6: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 06-07-08 febbraio 2009.	85
Tabella 7-7: relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 27-28-29 aprile 2009.	86
Tabella 7-8: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 07 luglio 2009.	87
Tabella 8-1: soglie di portata per le sei stazioni.	88
Tabella 8-2: schema concettuale delle tabelle di contingenza per la verifica del sistema di previsione.	89
Tabella 8-3: tabella di contingenza per la sezione di Lozza.	91
Tabella 8-4: indici di prestazione per la sezione di Lozza.	91
Tabella 8-5: tabella di contingenza per la sezione di Castellanza.	93
Tabella 8-6: indici di prestazione per la sezione di Castellanza.	93
Tabella 8-7: tabella di contingenza per la sezione di Cantù.	95
Tabella 8-8: indici di prestazione per la sezione di Cantù.	95
Tabella 8-9: tabella di contingenza per la sezione di Caslino d'Erba.	96
Tabella 8-10: indici di prestazione per la sezione di Caslino d'Erba.	96
Tabella 8-11: tabella di contingenza per la sezione di Peregallo.	98
Tabella 8-12: indici di prestazione per la sezione di Peregallo.	98
Tabella 8-13: tabella di contingenza per la sezione di Milano, via Feltre.	100
Tabella 8-14: indici di prestazione per la sezione di Milano, via Feltre.	100
Tabella 8-15: tabella di contingenza per il bacino dell'Olonà.	100
Tabella 8-16: tabella di contingenza per la sezione di Cantù.	100
Tabella 8-17: tabella di contingenza per il bacino del Lambro.	100
Tabella 8-18: indici di prestazione per i tre bacini di interesse.	100
Tabella 8-19: tabella di contingenza per i tre bacini di interesse aggregati.	101
Tabella 8-20: indici di prestazione per i tre bacini di interesse aggregati.	101

1 INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi, per effettuare la previsione dei fenomeni idrologici estremi, risulta fondamentale l'uso accoppiato di modelli meteorologici ed idrologici al fine di rendere operativi gli interventi di mitigazione e i sistemi di allarme.

Il territorio italiano, storicamente, è stato oggetto di eventi di piena che hanno determinato ingenti danni sia in termini economici che di vite umane. Di seguito viene riportata una rassegna degli eventi alluvionali più significativi dal 1950 ad oggi: l'alluvione in Calabria con 100 morti del 22 ottobre 1951, quella del Polesine con 84 del 14 novembre 1951 e l'alluvione di Salerno con 318 del 25-26 ottobre 1954. Il 4 novembre 1966 ci fu la grande alluvione di Firenze che determinò la perdita di 34 persone e causò danni inestimabili al pregevole patrimonio artistico; nello stesso anno anche il Veneto e le zone limitrofe furono interessate da eventi di piena. Anche altre regioni d'Italia nel corso degli anni sono state colpite da eventi idrologici intensi come il Piemonte, nello specifico interi paesi dell'Astigiano e Biellese nel novembre 1968, in cui persero la vita 72 persone; la Liguria nel 1970 con 44 morti a Genova e la Lombardia, più in particolare la Valtellina con 53 vittime nel 1987. A seguire si ricordano l'alluvione in Piemonte del novembre 1994 con 70 vittime e 2226 senzatetto, quella in Lombardia del 12 settembre 1995 e in Versilia nel giugno del 1996 che causò 13 vittime e 1500 sfollati; l'alluvione di Crotona del 14 ottobre 1996 con 6 vittime e quella di Sarno (Sa) e Quindici (Av) con 159 vittime. Nell'ultimo decennio possiamo ricordare l'alluvione a Soverato (Cz) del 9 settembre del 2000 con 12 vittime e quella in Piemonte del 13-16 ottobre con 23 vittime e con migliaia di sfollati. Il 23 settembre 2003 un evento eccezionale interessò l'area di Carrara causando 2 morti. Il 29 maggio 2008 in Piemonte, le alluvioni di Cancia (BI) del 18 Luglio 2009, quella di Giampileiri (Me) del 1 Ottobre 2009 e ad Atrani (Sa) il 9 Settembre 2009. Negli ultimi anni possiamo individuare almeno un evento alluvionale importante per anno: l'alluvione in Versilia dell'ottobre 2011, quella in Liguria più in particolare a Genova tra fine ottobre e inizio novembre 2012 e in Sardegna il 18 novembre 2013 con 16 vittime. Per il 2014 possiamo citare l'evento del 19 gennaio a Modena in cui perse la vita una persona.

Il problema delle inondazioni non riguarda solo il territorio nazionale, bensì anche l'Europa che nell'ultimo decennio è stata interessata da diversi eventi catastrofici: nel 2002 sono state colpite le città di Praga e Dresda, nel 2005 le nazioni coinvolte sono state la Romania, la Moldavia, l'Austria e la Svizzera; le ultime due sono state interessate da eventi alluvionali anche nel 2005 e 2007. La Germania nel 2006; il Regno Unito nel 2007 e 2009 più in particolare lo Yorkshire e la Cumbria e nel febbraio 2014; nel 2010 sono state coinvolte la Polonia, la Germania e la Repubblica Ceca. Nel 2012 la Spagna e la Germania nel 2013.

Come possiamo vedere dall'immagine in Figura 1-1 il numero delle "grandi catastrofi naturali" è in continuo aumento; nel 2013 la Munich Re ne ha individuati 880, ed è interessante notare che questi disastri sono principalmente causati da eventi meteorologici ed idrologici. Fenomeni di questa entità hanno un rilevante impatto sulla vita delle popolazioni colpite e sull'economia delle nazioni.

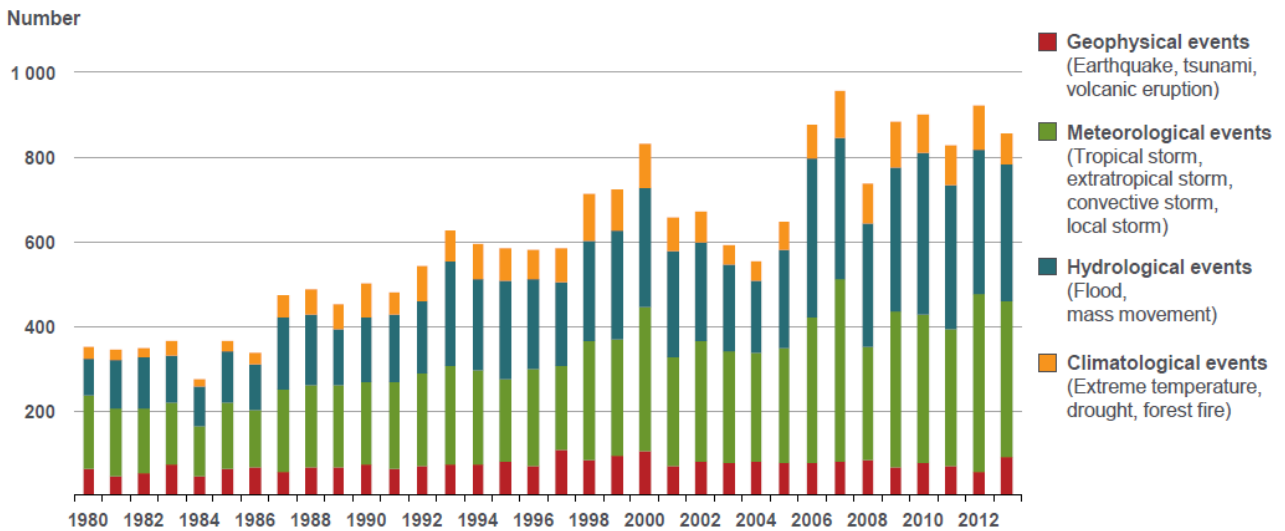


Figura 1-1: il grafico mostra il numero di catastrofi naturali a livello mondiale divise per tipo di evento dal 1980 al 2013 (Munich_Re Gennaio 2014)

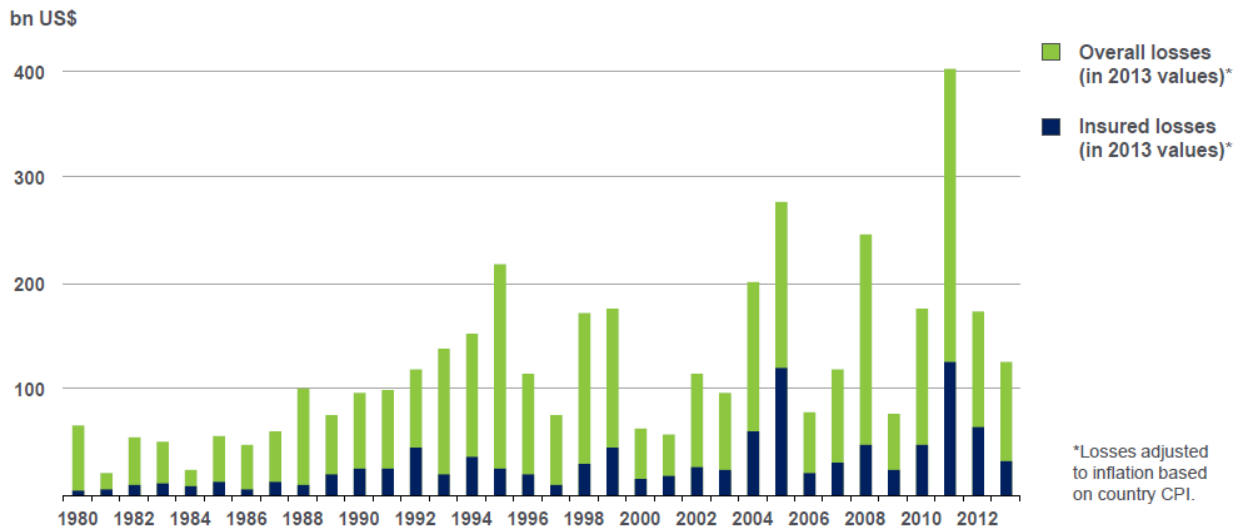
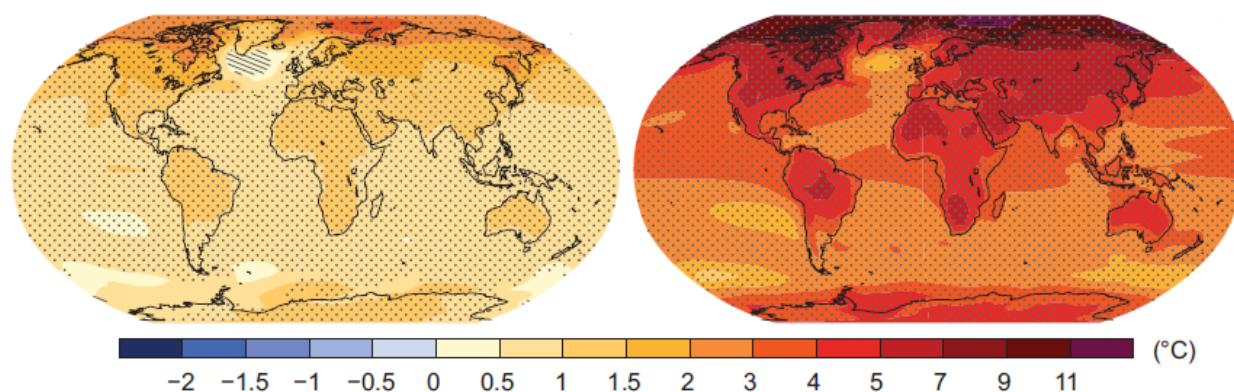


Figura 1-2: il grafico mostra le perdite finanziarie globali e quelle adeguatamente assicurate dal 1980 al 2013, (Munich_Re Gennaio 2014).

Gli scenari futuri, riportati nel V rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2013) mostrano un chiaro aumento dell'intensità delle precipitazioni e delle temperature, che potrebbero determinare un cambiamento globale delle condizioni climatiche entro la fine del secolo e determinare un aumento degli eventi estremi.

Change in average surface temperature (1986–2005 to 2081–2100)



Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100)

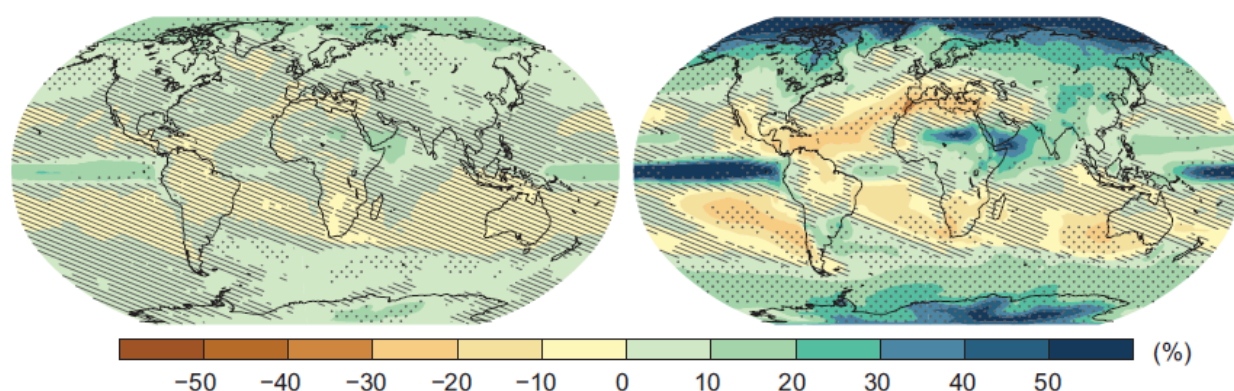


Figura 1-3: a livello globale è mostrato un confronto tra le temperature e le precipitazioni medie per il periodo 1986-2005 e 2081-2100, (IPCC 2013).

1.1 STATO DELL'ARTE

La crescente consapevolezza che le inondazioni rappresentano una delle calamità più diffuse in Europa e che costituiscono una non trascurabile minaccia per il benessere della popolazione, causando indubbe ripercussioni sull'economia dei territori interessati, ha fatto sì che nel 2003 la Commissione Europea avviasse lo sviluppo di un sistema europeo di allarme inondazione (EFAS - European Flood Awareness System s.d.) (con lo scopo di realizzare un servizio idrologico nazionale di medio raggio e fornire previsioni sulle possibili alluvioni che si possono verificare entro i prossimi tre o più giorni a scala di bacino idrografico su tutta Europa (United Nations Framework Convention on Climate Change s.d.). Sempre a livello europeo è in vigore il sistema Ongoing floods che permette la consultazione di una mappa che mostra i luoghi dove i livelli dei fiumi superano le soglie critiche, un esempio è riportato in Figura 1-4. La mappa si basa su misurazioni idrometriche quasi in tempo reale (European Commission - Joint Research Center - Institute for Environment and Sustainability s.d.).

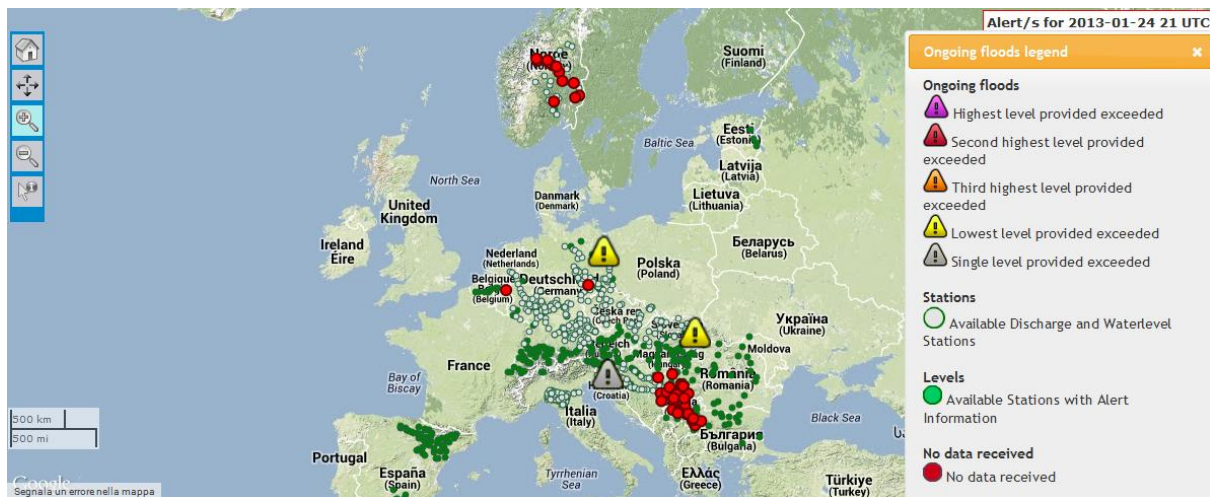


Figura 1-4: esempio della mappa di allerta delle inondazioni in corso (fonte: Joint Research Center – Institute for Environment and Sustainability <http://floods.jrc.ec.europa.eu/ongoing-floods>).

Dal 2000 sono stati avviati anche altri progetti internazionali che si occupano di questi temi; di seguito elenchiamo i programmi che hanno come oggetto parte del territorio italiano, in particolare in questi studi sono stati analizzati i bacini alpini transfrontalieri.

- AGENDA, Agenda Spazio fluviale Spazio alpino - River Basin Agenda: si pone come obiettivo quello di fornire suggerimenti per la gestione dell'ambiente fluviale allo scopo di risolvere problemi come la protezione contro le piene, l'ecologia degli idrosistemi fluviali e lo sviluppo territoriale (durata 2003-2006) (RiskNet s.d.);
- FRAMEA, Flood forecasting using radar in Alpine and Mediterranean areas: l'obiettivo del progetto è l'uso della strumentazione radar anche in territori, come i bacini transfrontalieri, a orografia complessa. Viene sperimentato un radar meteorologico Doppler polarimetrico mobile in banda X (durata 2002-2007) (RiskNet s.d.);
- CRISTAL, gestione delle piene attraverso l'integrazione dei sistemi transfrontalieri di previsione e prevenzione sui bacini alpini: è la continuazione del progetto FRAMEA (durata 2008-2011) (RiskNet s.d.);
- MeteoRisk, riduzione dei rischi naturali grazie al miglioramento delle previsioni degli eventi meteorologici estremi: lo scopo del progetto è la miglioria della rete di stazioni meteorologiche, l'unificazione dell'informazione radar e l'unificazione e l'interscambio delle informazioni (durata 2003-2004) (RiskNet s.d.);
- HYDROPTIMET, ottimizzazione degli strumenti di previsione idro-meteorologica: il progetto ha come obiettivo lo studio dei fenomeni idro-meteorologici che sono all'origine delle situazioni di rischio, la loro interdipendenza e le caratteristiche specifiche del territorio in esame, nonché la miglioria degli strumenti di prevenzione meteorologica e idrologica e la loro sperimentazione nel contesto di interesse (durata 2002-2004) (RiskNet s.d.);
- AMPHORE, applicazioni di metodologie per la previsione dei rischi idro-meteorologici: è la continuazione del progetto HYDROPTIMET (durata 2003-2006) (RiskNet s.d.).

A livello europeo possiamo citare anche i seguenti progetti:

- DRIMSH, Distributed Research Infrastructure for Hydro-Meteorology Study;
- IMPRINTS : IMproving Preparedness and Risk maNagementT for flash floods and debris flow events (durata 2009-2012)
- TELFLOOD: Forecasting floods in urban areas downstream of steep catchments (durata 1997–1999);

- RAPHAEL :Runoff and atmospheric processes for flood hazard forecasting and control (durata 1998-2000);
- EFFS: European Flood Forecasting System (durata 2000-2003);
- MUSIC: Multi-sensor precipitation measurements integration, calibration and flood forecasting (durata 2001-2004);
- MANTISSA: Microwave attenuation as a new total improving stormwater supervision administration (durata 2001-2004);
- CARPE DIEM: Critical Assessment of Available Radar Precipitation Estimation Techniques and Development of Innovative Approaches for Environmental Management (durata 2002-2004);
- VOLTAIRE : Validation of multisensors precipitation fields and numerical modelling in Mediterranean test sites (durata 2002-2006)
- FLOODMAN: Near real time flood forecasting, warning and management system based on satellite radar images, hydrological and hydraulic models and in-situ data (durata 2003 – 2006);
- FLOOD RELIEF: A real-time decision support system integrating hydrological, meteorological and radar technologies (durata 2003-2006);
- PREVIEW: Prevention, information and early warning pre-operational services to support the management (durata 2005-2008);
- HYDRATE: Hydrometeorological data resources and technologies for effective flash flood forecasting (durata 2007-2009);
- FLOODSITE: Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies (durata 2006-2009);
- COST Action 731: iniziativa europea che si occupa della quantificazione delle previsioni di incertezza nelle previsioni idro-meteorologico (Andrea Rossa 2011).

Infine va segnalato il primo progetto di ricerca e sviluppo del “WMO World Weather Research Program” (WWRP) e il “Mesoscale Alpine Programme” (MAP): a cui partecipano diversi partner scientifici, tra cui le ARPA italiane dell’Emilia-Romagna, del Veneto, della Liguria, l’Università degli studi di Brescia, coordinati dall’Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera”. Sono mostrati in tabella NN.1 alcuni numeri riguardo il progetto MAP.

Tabella 1-1: alcuni numeri riguardo il progetto MAP.

Affiliated countries	17
Affiliated institutions	120
Known users of www.d-phase.info	357
Modelers and forecasters	175
End-users among them	166
Number of deterministic NWP	23
Number of high-resolution deterministic NWP (grid size <math><5 \times 5 \text{ km}^2</math>)	11
Number of ensemble NWP	7
Number of hydrological models	7
Number of nowcasting platforms	4
Number of meteorological target areas	74
Number of hydrological impact areas	60
Data stored in the data archive by 30 November 2007	~13 TB
Questionnaires sampled for end-user feedback analysis	50

Dopo una prima fase di sviluppo tra il 1993 e il 1999, una seconda di campo nel corso dell’autunno del 1999, detta SOP “Special Observing Period”, e una terza di studi scientifici sulla meteorologia alpina e idrologia montana, i ricercatori del MAP hanno lanciato tra Giugno e Novembre 2007 una quarta di carattere operativo, in cui si vogliono applicare i risultati raggiunti dalla ricerca nella previsione di intense precipitazioni e conseguenti eventi di piena. Essa prende il nome di MAP D-Phase, acronimo di “Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the alpine region”; per oltre 60 bacini con aree tra i 100 e i 36000 km² i modelli idrologici sono stati associati agli output provenienti da modelli atmosferici di diverso tipo:

- Ensemble Predictions Systems, EPSs, con un orizzonte temporale tra i 3 e i 5 giorni. Si tratta di una tipologia di previsione probabilistica, volta a quantificare le incertezze insite nel modello meteorologico, utilizzando un set di 16 output meteo per il modello idrologico;
- modello deterministico con orizzonte temporale di 48 h e con una risoluzione più accurata;
- modello di previsione real-time con osservazioni ad alta risoluzione (Massimiliano Zappa 2008).

1.2 OBIETTIVI E CONTORNI

L'obiettivo generale del lavoro di tesi è la taratura del modello idrologico FEST-WB necessario per la realizzazione di un sistema di previsione delle piene in tempo reale per la città di Milano; in particolare si prenderanno in esame i fiumi che storicamente hanno determinato le maggiori criticità: Lambro, Seveso e Olona.

Per realizzare lo strumento di previsione è stato istituito un sistema idro-meteorologico a cascata che prevede l'uso del modello meteorologico WRF per la definizione delle forzanti e il modello idrologico FEST-WB per stimare il comportamento idrologico dell'area in esame (portate e volumi).

La tesi è strutturata come segue: nel capitolo 2 vi è una caratterizzazione geografica dei bacini dei fiumi Olona, Seveso e Lambro; in particolare in termini geo-morfologici, fisici, climatici, idrologici ed idraulici.

Nel capitolo 3 sono descritte le caratteristiche dei modelli idro-meteorologici utilizzati.

Nel capitolo 4 vengono presentati i dati di ingresso necessari per l'utilizzo del modello idrologico.

Nel capitolo 5 sono descritte le analisi di sensitività riguardanti la risoluzione e i due parametri fondamentali per la calibrazione del modello: Ksat e CN.

Nel capitolo 6 è esposta l'operazione di taratura del modello idrologico FEST-WB.

Nel capitolo 7 sono descritte le prestazioni del modello meteorologico WRF.

Nel capitolo 8 è descritto un sistema di allarme per gli eventi di piena riguardanti i tre fiumi in oggetto.

Nel capitolo 9 sono riportate le conclusioni riguardanti il lavoro di tesi, nel quale sono riportati più nel dettaglio le problematiche riscontrate durante l'esecuzione e gli eventuali sviluppi futuri.

2 INQUADRAMENTO

In questo capitolo verrà presentata e descritta in termini geo-fisici e climatici l'area in cui si sono concentrate le analisi svolte nel lavoro di tesi.

2.1 INQUADRAMENTO GENERALE

I numerosi corsi d'acqua naturali che gravitano a nord di Milano scorrono con direzione nord-sud e risultano interconnessi tramite una fitta rete di canali artificiali, realizzati sia a fini irrigui sia per la protezione dalle piene dei centri abitati. Il principale corso d'acqua è il Lambro settentrionale, che scorre a est di Milano. Procedendo verso ovest si incontrano nell'ordine il Seveso, il Lura, il Bozzente e per ultimo l'Oloni. I principali canali artificiali sono rappresentati dal canale irriguo Villoresi e dai navigli della Martesana, Grande e di Pavia, tutt'oggi utilizzati come vie di trasporto.

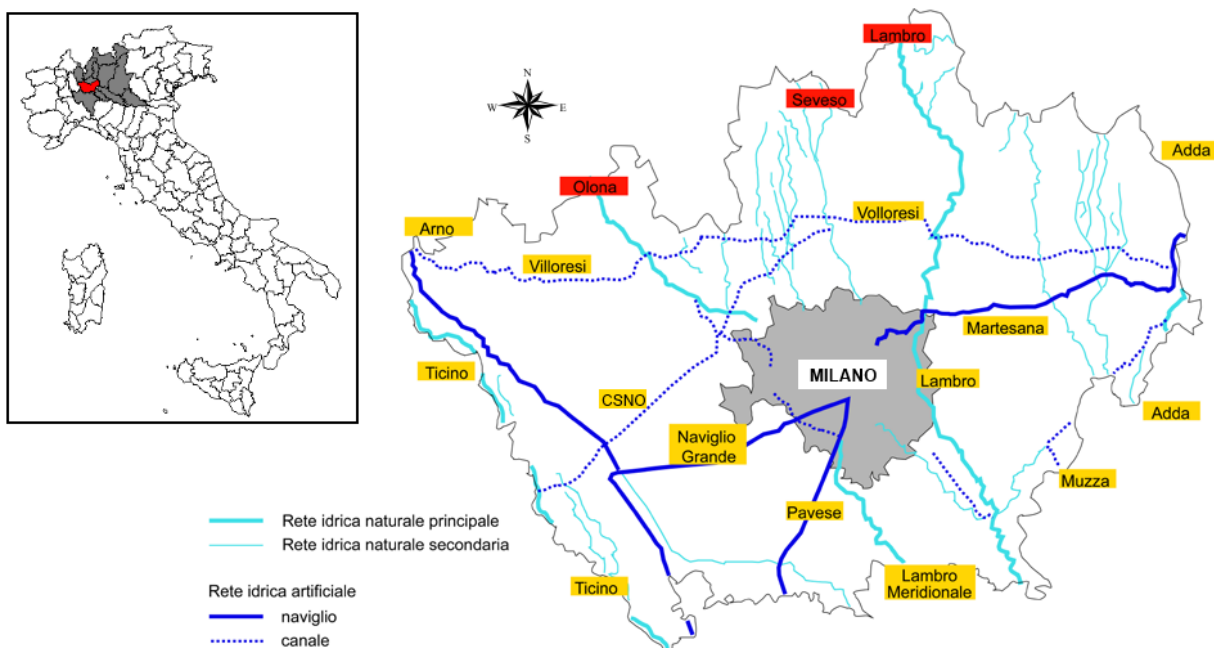


Figura 2-1: idrografia della provincia di Milano (LegaAmbiente s.d.)

Per alleggerire i carichi idraulici dei corsi d'acqua diretti a Milano, all'inizio degli anni '80 fu realizzato il canale scolmatore di nord-ovest (CSNO) che deriva le acque del Seveso per confluirle nel Ticino all'altezza di Abbiategrasso; lungo il suo percorso intercetta le portate eccedenti dell'Oloni derivate alle prese denominate "Olona 1" e "Olona 2". Le portate provenienti da quest'ultima confluiscono nel canale scolmatore al nodo ubicato presso Cornaredo, da dove si diparte un ennesimo canale, denominato "Deviatore Olona". Questo è stato recentemente realizzato per alleggerire le portate dell'Oloni in ingresso a Milano, che non possono essere deviate dal CSNO: compiendo l'aggiramento della città a ovest, si ricongiunge con il percorso originario in un nodo ubicato presso Gratosoglio, proseguendo quindi con il nome di Lambro meridionale.

L'area in esame comprende tutto il territorio rappresentato in Figura 2-2.

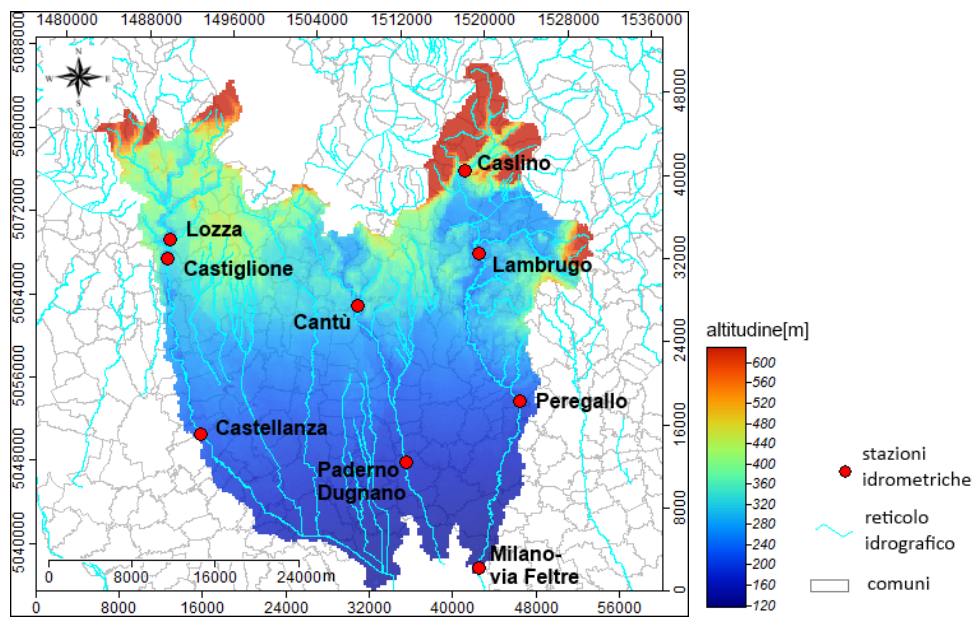


Figura 2-2: DEM.

Le temperature nel territorio in esame variano in base all'esposizione e alla quota del territorio. Le estati sono calde con valori che superano facilmente i 30°C. Gli inverni sono complessivamente rigidi; le zone di montagna più elevate scendono considerevolmente sotto allo 0°C. Le piogge variano in base alla quota ed all'orientamento dei rilievi, risultando abbondanti sul comparto alpino e prealpino, dove le precipitazioni oltrepassano i 2000mm annui e localmente durante le annate più piovose i 2400 mm. Scendendo verso le aree pianeggianti la piovosità si riduce attestandosi sui 700 mm annui, (Centro Meteo Italiano s.d.).

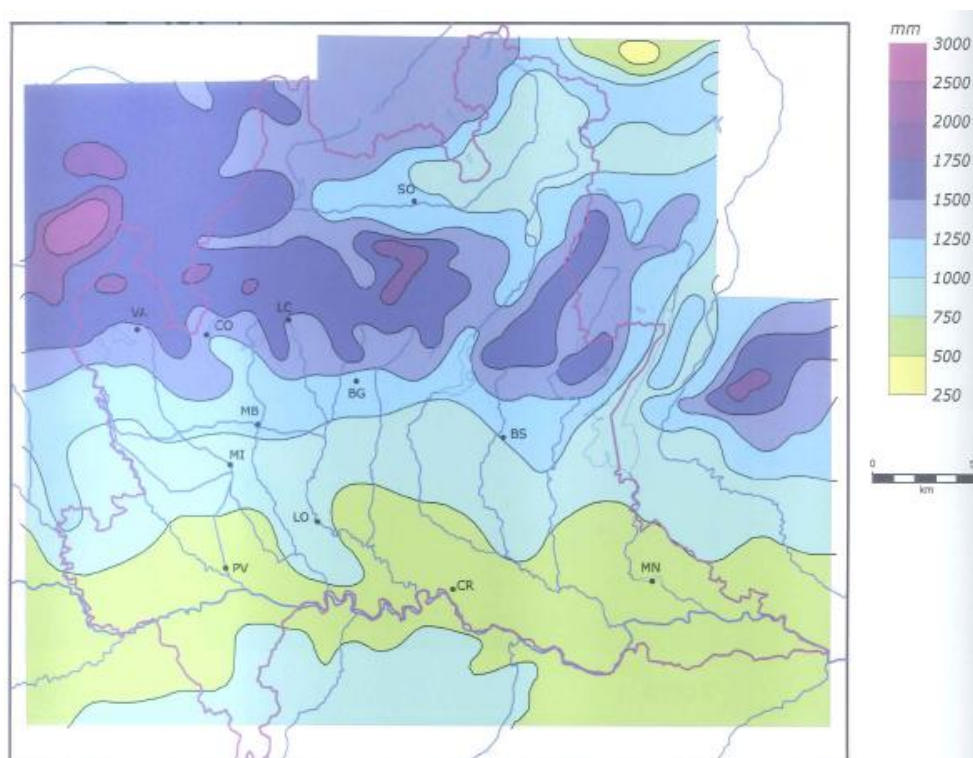


Figura 2-3: rappresentazione della media trentennale dell'intensità di precipitazione, (Centro Meteorologico Lombardo 2011).

L'entità delle precipitazioni varia sensibilmente da un anno con l'altro, ma si presenta con maggiore regolarità la distribuzione di queste nelle diverse stagioni; in particolare si verificano due massimi, quello primaverile e quello autunnale (Centro Meteorologico Lombardo 2011).



Figura 2-4: regime pluviometrico della stazione del CML di Milano San Leonardo, (Centro Meteorologico Lombardo 2011).

L'inverno è sempre la stagione più asciutta: l'estate risulta altrettanto povera di precipitazioni soprattutto nella bassa, mentre avvicinandosi all'alta pianura aumenta la frequenza delle manifestazioni convettive che, dall'area prealpina, influenzano le zone pedemontane nei mesi caldi (Centro Meteorologico Lombardo 2011).

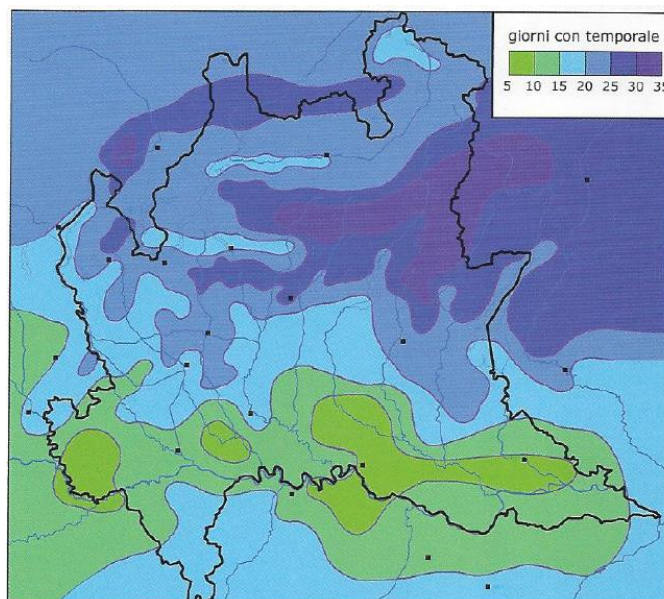


Figura 2-5: frequenza temporali nei mesi estivi: giugno-agosto (media 2004-2009), (Centro Meteorologico Lombardo 2011).

2.2 ANALISI DEI BACINI DI INTERESSE

Nell'ambito del reticolo idrografico che insiste sull'urbanizzato milanese vengono presentati più nei dettagli i bacini relativi ai fiumi che maggiormente determinano criticità.

2.2.1 Lambro

2.2.1.1 Inquadramento fisico e idrografico

Il bacino del Lambro ha una superficie complessiva di circa 1.980 km² di cui solo il 5% in ambito montano. Il bacino è caratterizzato da un reticolo idrografico complesso e articolato. Le portate provenienti dal bacino di monte sono laminate del lago di Pusiano che, a causa della sua non trascurabile superficie (circa 5.20 km²) rispetto a quella del bacino sotteso, esercita una forte azione moderatrice sui fenomeni di piena. Le

piene del Lambro a Lambrugo sono originate dai deflussi provenienti dal bacino della Bevera, situato a est del corso d'acqua e di area pari a 43.2 km². Proseguendo verso valle, si riconoscono tre tratti caratterizzati dalla prevalenza di rilevanti apporti idrici rispetto al fenomeno di trasporto. Nel primo tratto, sito nella zona di studio, compreso tra Peregallo e Sesto S. Giovanni, gli apporti provengono essenzialmente dai centri abitati di Monza e Sesto S. Giovanni. Nel secondo tratto, compreso tra S. Donato Milanese e Melegnano, confluiscono in Lambro gli apporti del settore orientale di Milano e i contributi di due corsi d'acqua minori che provengono dall'interno di Milano, il cavo Redefossi e la roggia Vettabbia. A Melegnano confluisce in sinistra anche il canale Muzza. Il terzo tratto, a valle di S. Angelo Lodigiano, in cui il Lambro meridionale (nome preso dall'Olona dopo l'attraversamento di Milano) confluisce nel Lambro settentrionale, (Autorità di Bacino del fiume Po s.d.).



Figura 2-6: il ramo minore del Lambro, che attraversa Monza, durante la piena del 1° novembre 2010 non riesce a passare sotto il ponte di via Luigi Villa (foto di Bruno Grillini, fonte: (Centro Meteorologico Lombardo 2011)).

In questo studio viene considerato il bacino chiuso alla stazione idrometrica di Milano - via Feltre ed è possibile apprezzarne la configurazione geografica in Figura 2-7, dove sono anche mostrati alcuni sottobacini di interesse. In seguito, vengono presentati alcuni parametri morfologici di interesse nella Tabella 2-1.

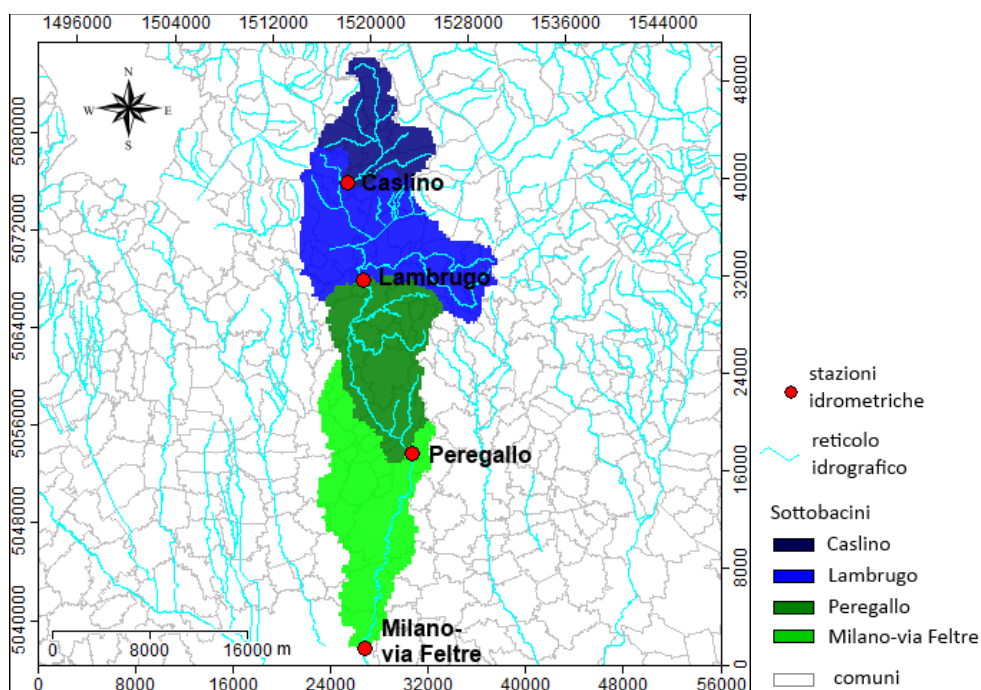


Figura 2-7: individuazione del bacino del fiume Lambro analizzato nel lavoro di tesi.

Tabella 2-1: caratteristiche morfologiche del bacino del fiume Lambro.

Sottobacini	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano-via Feltre
Area bacino(kmq)	52.84	176.84	270.08	382.84
Lunghezza asta principale(km)	14.2	27.7	51	86.7
Pendenza media (%)	17.8	10.8	7.9	5.8
Altitudine media (m)	776.7	514.7	435.9	360.4

2.2.1.2 Caratteri generali del paesaggio naturale e antropizzato

La valle del Lambro presenta quattro realtà geografico-paesaggistiche differenti.

La prima è l'area montana del triangolo Lariano, che va da Magreglio, dove nasce il Lambro, ai laghi di Pusiano e di Alserio è contraddistinta da due diverse situazioni urbanistico-territoriali: la Vallassina, con i monti che la fiancheggiano, che ha registrato un decremento della popolazione, e la pianura di Erba, nella quale si è verificata una concentrazione di iniziative industriali e artigianali sviluppatesi linearmente lungo il corso del Lambro, ribadendo il modello delle prime localizzazioni produttive del secolo scorso.

La seconda va dai laghi di Alserio e Pusiano e termina a Monza. Nella zona il processo di urbanizzazione si è attuato massicciamente sulla riva destra del Lambro lungo i due assi prevalenti: la Vallassina e la Monza-Carate, formando, tra il centro abitato di Biassono fino a quelli di Inverigo e Lurago, una unica conurbazione. Sul lato sinistro del fiume il processo di urbanizzazione è avvenuto in modo meno vistoso, pur non mancando situazioni di conurbazione.

La terza è l'area metropolitana milanese, che interessa il tratto Monza-Melegnano, cioè la porzione di valle del Lambro compresa nell'area metropolitana milanese; in questa regione l'intensa urbanizzazione nasconde spesso le morfologie relitte del corso d'acqua. Abbandonata la città, il Lambro ritorna ad avere un carattere più naturale, scorrendo con ampi meandri incisi e leggibili nella pianura, sottolineati dall'alberatura di sponda.

L'ultima l'area interessa la pianura agricola del Lodigiano che va da Melegnano al Po, dove il Lambro conclude il suo corso, è formata da un unico ripiano fondamentale inciso da alvei fluviali. Il Lambro scorre ben delimitato nel suo alveo e nella serie dei suoi terrazzamenti alluvionali, il principale dei quali corre quasi parallelo al corso d'acqua, (Autorità di Bacino del fiume Po s.d.).

2.2.1.3 Aspetti idrologici, morfologici e idraulici

Tutto il corso del Lambro, dall'incile dei laghi Alserio e Pusiano alla confluenza in Po, presenta un andamento generalmente unicursale meandriforme. La minore urbanizzazione che caratterizza il tratto di valle del Lambro fino alla confluenza in Po permette di osservare una discreta presenza di paleoalvei che testimoniano un andamento pregresso del corso d'acqua più sinuoso di quello attuale. A meno del tratto compreso tra il ponte stradale di Cologno Monzese e il ponte stradale di S. Donato Milanese, il corso d'acqua è fiancheggiato da scarpate di erosione fluviale che, localmente, separano diversi ordini di superfici terrazzate. Dal ponte stradale di S. Colombano al Lambro fino alla confluenza in Po il fiume scorre vincolato dalla presenza di strette arginature, (Autorità di Bacino del fiume Po s.d.).

L'unica stazione di misura presente sul Lambro per la quale è disponibile una serie storica di portate di piena sufficientemente significativa è la stazione di Lambrugo; la massima portata storica registrata è pari a circa 83 m³/s, evento del 14 giugno 1963, (Autorità di Bacino del fiume Po s.d.).

Storicamente nel tratto di Lambro compreso fra Monza e la confluenza nel Po, nell'intervallo compreso tra il 1872 e il 1980, le piene hanno prodotto inondazioni discontinue, ma talvolta abbastanza estese, manifestandosi mediamente ogni 6 anni. Gli eventi maggiormente critici si sono avuti nel 1917, 1937 e 1951, accompagnati da frane nel bacino montano e inondazioni diffuse in pianura, in particolare a Monza e alla periferia di Milano, e nel 1879, 1947, 1976 e 2002 accompagnati da fenomeni erosivi spondali e

allagamenti abbastanza estesi e continui. A Monza si sono avuti allagamenti nell'area del parco presso Villasanta e nel centro storico.

2.2.2 Seveso

2.2.2.1 Inquadramento fisico e idrografico

Il Seveso nasce alle falde del Monte Pallanza nel Comune di San Fermo della Battaglia (CO) e converge con il Naviglio della Martesana. Attraversa un territorio molto differenziato, con notevoli variazioni geologiche, litologiche, geomorfologiche e altimetriche: il bacino presenta la sua quota maggiore a 614m s.l.m. e la quota di chiusura a 120m s.l.m. quando raggiunge Milano.

Verso Milano il bacino del Seveso perde ogni caratteristica di naturalità; le acque del Seveso attraversano Milano, scorrendo sotto la città, per poi tornare in superficie in direzione Sud/Ovest in corrispondenza con la direttrice insediativa della via Emilia raccogliendo le acque della Vettabbia e del depuratore di Milano/Nosedo fino a confluire nel Lambro nei pressi di Melegnano.



Figura 2-8: il fiume Seveso in corrispondenza dell'inizio della "tombinatura" a Milano, in via Ornato (a); 1°ottobre 2010 sono in corso lavori di ulteriore arginatura delle sponde (Foto di Bruno Grillini, fonte: (Centro Meteorologico Lombardo 2011)) (b).

Per quanto riguarda il reticolo idrografico, gli affluenti del fiume Seveso sono:

- in sponda sinistra: rio Rossola, rio Acquanegro, torrente S. Antonio, torrente Serenza, torrente Certesa (MI);
- in sponda destra: torrente Comasinella (MI).

In termini di quantità di acqua apportata e di contributo per la formazione delle piene, il più importante è certamente il torrente Certesa, che sottende un bacino di area pari a 62 km² circa con una lunghezza dell'asta pari a 20 km. Esso confluisce nel Seveso a Cesano Maderno, ai piedi degli altopiani morenici. In esso a sua volta confluisce la roggia Vecchia, che ha origine dal lago di Montorfano.

In questo studio viene considerato il bacino chiuso alla stazione idrometrica di Paderno Dugnano ed è possibile apprezzarne la configurazione geografica in Figura 2-9, dove sono anche mostrati alcuni sottobacini di interesse. In seguito, vengono presentati alcuni parametri morfologici di interesse nella Tabella 2-2.

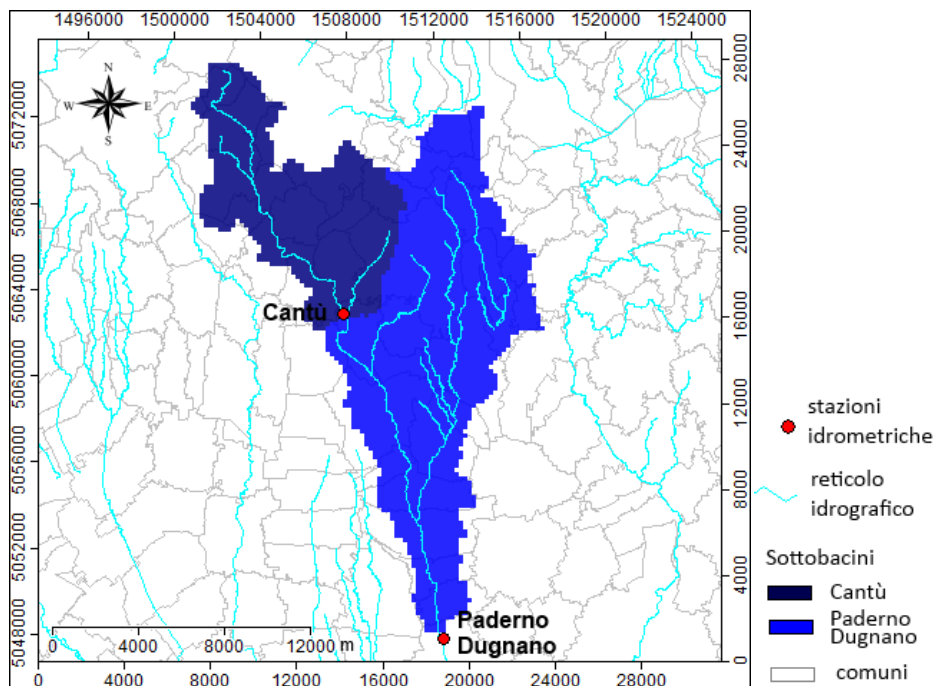


Figura 2-9: individuazione del bacino del torrente Seveso analizzato nel lavoro di tesi.

Tabella 2-2: caratteristiche morfologiche del bacino del torrente Seveso.

Sottobacini	Cantù	Paderno Dugnano
Area bacino(kmq)	61.12	175.36
Lunghezza asta principale(km)	16.3	34.4
Pendenza media (%)	3.59	2.49
altitudine media (m)	335	305.4

2.2.2.2 Caratteri generali del paesaggio naturale e antropizzato

La continuità dell'ambiente fluviale è rotta da una serie di attraversamenti infrastrutturali, mentre le criticità rappresentate dalle cave e da alcune grandi aree industriali dismesse (con necessità di bonifica dei suoli) possono offrire notevoli spunti per un progetto di riqualificazione.

Il corridoio fluviale del torrente è suddiviso in quattro aree dal profilo omogeneo; la prima (denominata area sorgente) è riconducibile ai comuni della provincia di Como che si collocano nella fascia della cosiddetta valle fluviale, caratterizzata da ampie aree boscate e diffuse colture prative.

La seconda (denominata area nord) è rappresentata dall'ampia fascia di terreni dell'alta pianura asciutta collocati a sud della zona precedente. A causa della concomitanza di molti fattori (natura dei terreni, presenza storica di vie di comunicazione verso grossi comuni del Nord e verso le aree transalpine, crescente diffusione nel XX secolo degli insediamenti industriali), è presente un carattere diffuso di estrema frammentazione dell'attività agricola.

Nella terza area (nord Milano), in concomitanza con la fascia di cintura metropolitana a contatto con il comune di Milano, comprendente aree dell'alta pianura irrigua (a sud del Canale Villoresi), i caratteri riconosciuti per la seconda area si accentuano ulteriormente, con un aumento di urbanizzato e di aree industriali o di servizio lungo le sponde del fiume.

La quarta area (sud Milano), sita al di fuori dell'area di studio, è una fascia di territorio con caratteri completamente diversi rispetto a quanto osservato per quelle precedenti. Corrisponde al sud Milano dove gli insediamenti civili e industriali risultano esercitare una diversa pressione, e il territorio torna ad avere un carattere prevalentemente agricolo.

2.2.2.3 Aspetti idrologici, morfologici e idraulici

Il torrente Seveso, nel tratto a nord di Milano, per ciò che concerne gli aspetti idrologici, può essere suddiviso in tre parti. La prima, quella più settentrionale, compresa dalla sorgente alla confluenza con il fosso Lusèrt, è caratterizzata da forti pendenze e dalla presenza di piccoli affluenti; la seconda, quella centrale, dal Lusèrt alla confluenza con il torrente Certesa, ha andamento tortuoso e pendenze modeste; la terza parte, a ridosso della fascia settentrionale di Milano compresa tra la confluenza con il torrente Certesa e lo sbocco nel Naviglio Martesana, ha pendenze minime.

L'analisi dei dati idropluviometrici evidenzia un ruolo determinante nell'“antropizzazione” del regime idrologico da parte degli scarichi che versano nel corpo idrico un carico tale da aumentare le portate naturali in alveo e incrementare il rischio di insufficienza idraulica del sistema. Infatti, considerando la conformazione del Seveso per cui la capacità di deflusso decresce gradatamente da monte a valle, si nota come il regime fluviale presenta un carattere quasi torrentizio con precipitazioni abbondanti concentrate, con onde di piena che provocano esondazioni frequenti in prossimità delle grandi città, mentre per il resto dell'anno idrologico i deflussi sono modesti se non scarsi. Questi fenomeni di esondazione sono determinati da un'intensa antropizzazione sul bacino, che ha ridotto ulteriormente gli alvei dimensionati naturalmente per smaltire solo i deflussi provenienti dalle parti alte dei bacini e che ha determinato apporti spesso di gran lunga superiori a quelli dei maggiori affluenti naturali, (Provincia di Milano s.d.) .

2.2.3 Olona

2.2.3.1 Inquadramento fisico e idrografico

Il bacino dell'alto Olona, compreso dalla sorgente fino al limite urbano di Milano, ha una superficie complessiva di circa 911 km², ubicato per il 99% circa (902 km²) in territorio italiano e per il rimanente in territorio svizzero. Complessivamente il bacino si trova per l'11% in ambito montano (10% la parte italiana), (Autorità di bacino del fiume Po s.d.).



Figura 2-10: fiume Olona.

Il fiume Olona ha origine alle pendici dei monti a nord di Varese ad una quota di circa 1100 m s.m. e, dopo un tragitto di circa 60 km, entra nell'abitato di Milano da cui esce con il nome di Lambro Meridionale.

Il bacino imbrifero dell'Olona è suddivisibile in due distinte zone: una prima montana, dal limite superiore del bacino fino a Ponte Gurone e una seconda più pianeggiante, da Ponte Gurone alla città di Milano.

La parte montana ha forma a Y, con il ramo occidentale costituito dal bacino dell'Olona vero e proprio e il ramo orientale di bacini del torrente Bevera, del torrente Clivio e del rio Ranza. Al ramo occidentale, molto urbanizzato, appartengono gli abitati di Varese e di Induno Olona; quello orientale, salvo alcuni centri abitati di modeste dimensioni, è per la maggior parte costituito da terreno boschivo e agricolo.

A valle di Ponte Gurone il bacino diventa di forma molto stretta e allungata in direzione nord-sud, alternando zone densamente urbanizzate ad altre che mantengono una considerevole porzione di superficie non occupata da insediamenti. Fino all'altezza dell'autostrada Milano-Laghi, dove ha termine la valle dell'Olona, i centri abitati sono situati in posizione sopraelevata rispetto al corso del fiume; in prossimità dell'alveo sono invece presenti numerose industrie.

Terminata la valle dell'Olona, il bacino diventa pianeggiante e il fiume entra nella zona maggiormente urbanizzata, attraversando i comuni di Castellanza e Legnano. A valle di questi centri abitati, si ha ancora un'alternanza di aree agricole e di aree urbane fino al confine del territorio del comune di Rho, dove è posta l'opera di derivazione "Olona 1", attraverso la quale le piene sono scolmate nello Scolmatore di Nord Ovest.

In questo studio viene considerato il bacino chiuso alla stazione idrometrica di Castellanza ed è possibile apprezzarne la configurazione geografica in Figura 2-11, dove sono anche mostrati alcuni sottobacini di interesse. In seguito, vengono presentati alcuni parametri morfologici di interesse nella Tabella 2-3.

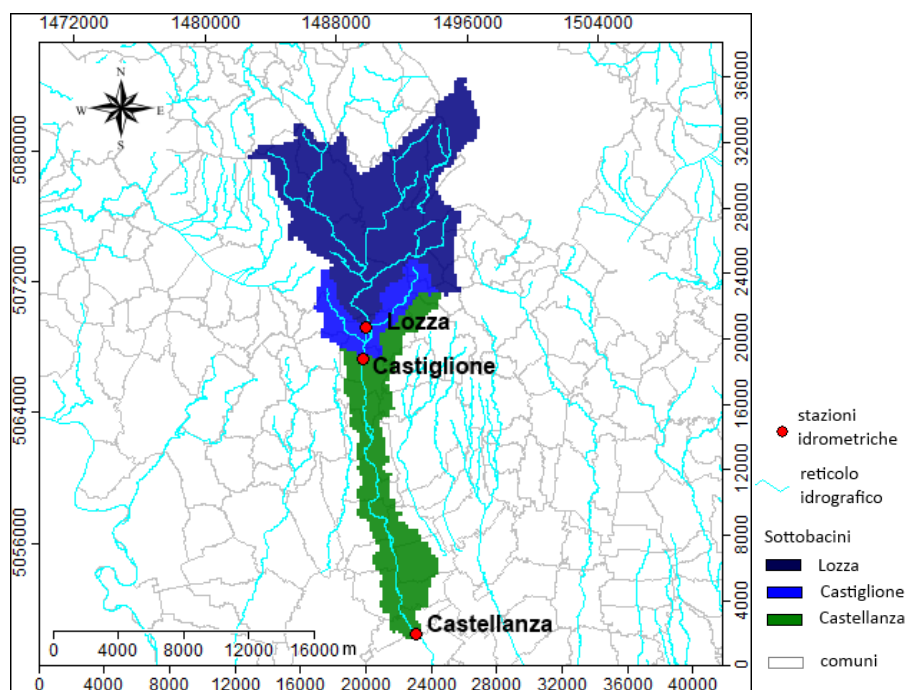


Figura 2-11: individuazione del bacino del fiume Olona analizzato nel lavoro di tesi.

Tabella 2-3: caratteristiche morfologiche del bacino del fiume Olona.

Sottobacini	Lozza	Castiglione	Castellanza
Area bacino(kmq)	96.88	114.56	162.6
Lunghezza asta principale(km)	16.7	18.6	39.6
Pendenza media (%)	6.95	6.4	5.17
altitudine media (m)	464.5	449.2	399.6

2.2.3.2 Caratteri generali del paesaggio naturale e antropizzato

La valle del fiume Olona, tipico fenomeno di escavazione fluvio-glaciale, presenta una configurazione stretta e profonda e un fondovalle con aree di pianura alte rispetto alle quote del fiume.

L'Olona ebbe anche rilevanza, sotto il profilo economico, in quanto polarizzatore del sistema paleoindustriale dell'alto Milanese; favorendone l'urbanizzazione. Nel bacino sono presenti due parchi di grande interesse storico e paesaggistico, "Campo dei Fiori" e "delle Groane". Il Parco naturale Campo dei

Fiori è una collina che domina gran parte del Varesotto e ne costituisce l'elemento di caratterizzazione più riconoscibile.

2.2.3.3 Aspetti idrologici, morfologici e idraulici

La stazione di misura dell'Olona a Ponte Gurone (bacino di 97 km², altitudine media 472 m s.m.) ha funzionato nel periodo dal 1939 al 1956; la portata media risulta essere di 2,3 m³/s mentre la massima registrata è stata di 59 m³/s il 12 novembre 1951. A Legnano la portata media aumenta a 4 m³/s, mentre a Rho, dopo che il fiume riceve gli apporti di Bozzente e Lura, si toccano i 6,9 m³/s, (Provincia di Milano Dicembre 2008).

I principali eventi alluvionali che hanno interessato l'Olona negli ultimi 200 anni sono i seguenti:

- ottobre 1801, piena dell'Olona con esondazioni in vari centri compresa Milano;
- 9-13 dicembre 1910, esondazioni diffuse dell'Olona nel tratto compreso tra Varese e Milano, di cui è allagata la periferia;
- 4-5 giugno 1936, alluvione dell'Olona con allagamento di vari centri abitati fra cui Legnano;
- 1 giugno 1992, alluvione sull'Olona con danni soprattutto a Castiglione;
- 1993, alluvione sull'Olona con allagamenti alla periferia di Milano (Autorità di bacino del fiume Po s.d.);
- luglio 2009, alluvione sull'Olona con danni soprattutto a Varese.

Per quanto riguarda l'aspetto morfologico del corso d'acqua è possibile evidenziare nella parte montana un alveo tipo unicursale, inciso e sinuoso; successivamente nella zona valliva con l'aumento dell'antropizzazione si riscontra un alveo artificiale e in certi tratti addirittura tombato. Di questa configurazione ne risente anche il regime idraulico. Nella parte montana del bacino le portate defluenti nell'Olona hanno origine naturale, dalle sorgenti o dai contributi che si generano per effetto degli afflussi meteorici sul bacino. Nella parte valliva il regime delle portate è fortemente artificializzato a causa degli apporti dalle reti di scolo fognario, dagli scarichi e dai drenaggi urbani. Complessivamente il regime dell'Olona è tipicamente prealpino con periodi di portata elevata in autunno e primavera e periodi di magra in inverno. Il fiume presenta un regime perenne, (Provincia di Milano Dicembre 2008).

3 MODELLI MATEMATICI

In questo capitolo verranno presentati e descritti i modelli matematici utilizzati nel lavoro di tesi: il modello FEST-WB e il modello meteorologico WRF.

3.1 MODELLO IDROLOGICO

In questo studio le simulazioni idrologiche sono state effettuate utilizzando il modello FEST-WB, acronimo di “Flash flood Event-based Spatially-distributed rainfall-runoff Transformation-Water Balance”, modello distribuito del bilancio idrico, (fonti: (Montaldo, Ravazzani e Mancini 2007), (Ravazzani, Mancini, et al. 2007), (Ravazzani, Rabuffetti, et al. 2010) e (Rabuffetti, et al. 2008)), sviluppato presso il Politecnico di Milano, (Mancini 1990).

A partire da parametri fisici in ingresso riguardanti le forzanti meteorologiche e le caratteristiche del suolo, il modello FEST-WB è in grado di stimare la portata di un corso d’acqua attraverso bilanci di massa e di energia che coinvolgono i principali processi del ciclo idrologico: evapotraspirazione, infiltrazione, deflusso superficiale, deflusso sotterraneo e la dinamica della neve.

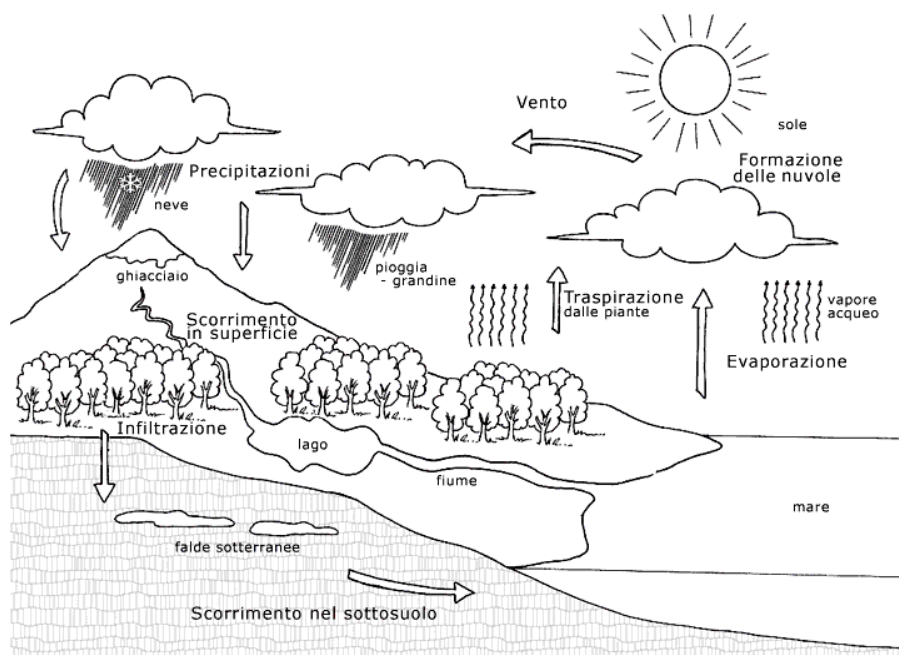


Figura 3-1: *illustrazione schematica del ciclo idrologico.*

E’ possibile quindi definire questo modello “fisicamente basato” e si differenzia da modelli di tipo “Black Box”, che compiono una semplice trasformazione afflussi-deflussi senza considerare le reali dinamiche idrologiche.

Va inoltre sottolineato che si tratta di un modello che tiene conto della variabilità temporale e anche di quella spaziale delle proprietà del bacino, considerando distribuiti su tutta la sua area sia le grandezze fisiche che i parametri del modello, usando una scomposizione del bacino di tipo “raster” (griglia), suddividendolo in celle elementari (pixel) di forma quadrata. Rispetto a un modello concentrato, dove il sistema bacino viene considerato un tutt’uno, l’applicazione di quello distribuito richiede una fase

preliminare di acquisizione e pre-elaborazione dell'informazione di carattere puntuale che in questo modo viene riportata nel formato raster.

L'uso di questo tipo di modello richiede l'acquisizione di una grande quantità di dati: il numero totale dei parametri in gioco sarà dato dal numero delle grandezze usate per descrivere la singola cella elementare, moltiplicato per il totale delle celle presenti. Questa notevole mole di lavoro favorisce però una più accurata descrizione dei fenomeni, soprattutto dal momento che è stato evidenziato come la variabilità spaziale dei processi in gioco (assorbimento, propagazione, ecc.) abbia una grande influenza sulla risposta del bacino, (Ceppi 2011).

Lo schema di funzionamento del modello FEST-WB viene mostrato nel Figura 3-2:

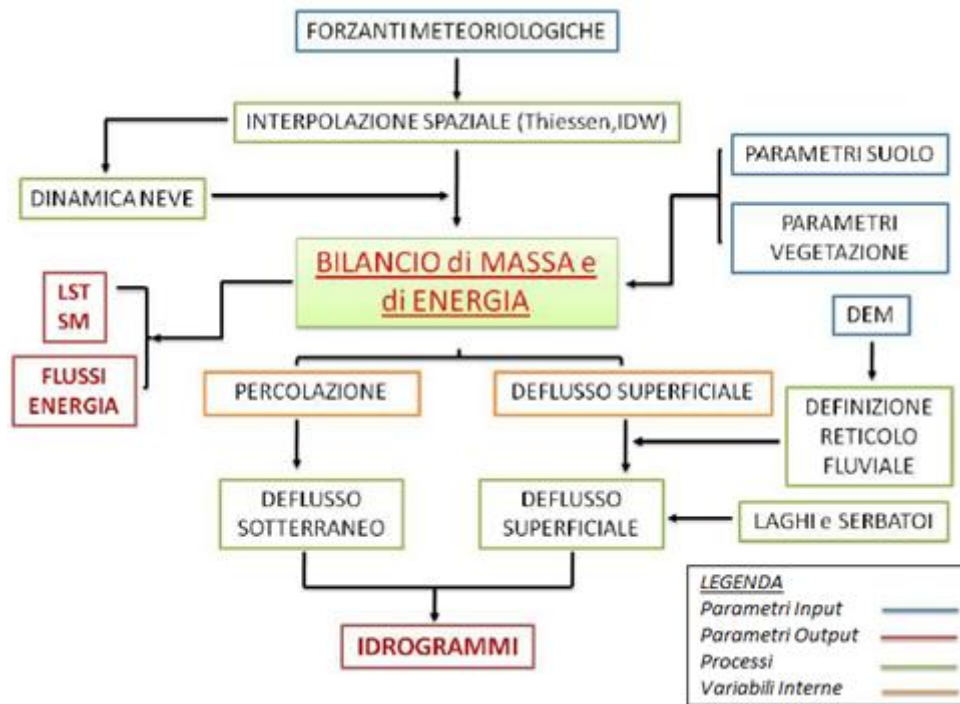


Figura 3-2: schema concettuale del modello FEST-WB.

3.1.1 Dati in ingresso

Il modello richiede come input le forzanti meteorologiche e le mappe GIS contenenti informazioni sull'uso del suolo, le quote altimetriche e sulla vegetazione. I dati meteorologici sono di tipo orario e puntuali, in quanto raccolti da stazioni strumentate; per far sì che venga considerata la loro variabilità spaziale su tutto il bacino, risulta necessario interpolare i valori per ciascuna cella attraverso il metodo IDW (Inverse Distance Weighted Method) o della distanza inversa.

Essi sono:

- precipitazione (mm);
- temperatura (°C). Siccome essa varia anche con la quota, in primis vengono riportati tutti i valori noti a una predefinita di riferimento, successivamente viene applicata il metodo IDW per la spazializzazione del dato e come ultimo passaggio, la nuova informazione viene riportata alla quota di interesse.

Per eseguire la stima al variare dell'altezza di riferimento risulta indispensabile applicare un gradiente termico che permetta di stimare come varia la temperatura con l'altitudine; nello specifico viene imposto un gradiente fisso pari a $-0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Un limite di questa assunzione sono i fenomeni di inversione termica, frequenti nei bacini montani, in quanto vengono trascurati.

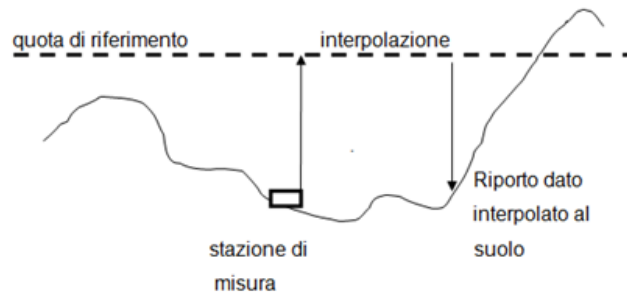


Figura 3-3: spazializzazione dei dati di temperatura.

- umidità dell'aria (%);
- radiazione solare a onde corte incidente (W/m^2).

Queste quattro forzanti sono state utilizzate nel calcolo della evapotraspirazione potenziale mediante l'equazione proposta da Presley-Taylor, per maggiori dettagli vedere paragrafo 3.1.4.

Per quanto riguarda le mappe GIS, un supporto fondamentale è costituito dal Modello Digitale delle Quote del terreno (Digital Elevation Model – DEM), che fornisce il valore della quota media per ogni cella elementare in cui è suddiviso il bacino di interesse. Partendo dalla matrice delle quote si è in grado di ricavare, tramite algoritmi comuni in ambiente GIS, i parametri geomorfologici necessari al modello per il calcolo del deflusso superficiale quali la direzione dei deflussi (puntatori), la pendenza, la direzionalità del versante (ovvero orientamento della linea di massima pendenza) e l'albedo.

Sono inoltre necessarie ulteriori mappe, fondamentali nella fase di calcolo del bilancio di massa e di energia. Per ogni pixel devono essere note l'uso del suolo, da cui ricavare il CN (Curve Number), e la tessitura, da cui ricavare la profondità e la caratterizzazione idraulica, necessaria anche per la definizione della dinamica della vegetazione:

- la conduttività idraulica in condizioni sature (K_{sat});
- la "bubbling pressure" (o livello della frangia capillare), che indica il livello del sottosuolo posto nella zona di aerazione, subito al di sopra della superficie piezometrica di una falda acquifera libera, caratterizzato dalla presenza di acqua capillare continua e sospesa.
- l'umidità del suolo residua e satura;
- l'indice di Brooks & Corey o indice di distribuzione della dimensione dei pori;
- il punto d'avvizzimento, cioè quel contenuto d'acqua del suolo in corrispondenza del quale la pianta inizia ad appassire;
- la capacità di campo, cioè quel contenuto d'acqua che eguaglia la capacità di ritenzione del terreno.

3.1.2 Dinamica della neve

Il modello FEST-WB tiene conto anche della dinamica del manto nevoso, comprendendo sia la fusione nivale che le dinamiche di accumulo. Le mappe di precipitazione e temperatura consentono di elaborare in uscita l'altezza di neve (h_s), la mappa di precipitazione comprensiva dell'accumulo e della fusione della neve e l'equivalente idrico della neve SWE (Snow Water Equivalent). In particolare quest'ultimo parametro, che rappresenta l'altezza d'acqua che deriverebbe dalla totale fusione del manto nevoso, è legato allo spessore effettivo del manto dalla relazione seguente:

$$SWE = h_s \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3.1)$$

dove ρ_w è la densità dell'acqua e ρ_s quella della neve fresca.

E' possibile misurarlo attraverso particolari pluviometri che presentano al loro interno un sistema di riscaldamento in grado di fondere la neve contenuta e misurarne l'equivalente. Purtroppo non tutte le stazioni presenti sul territorio studiato dispongono di tale sistema di riscaldamento, comportando numerose sottostime in termini di volume di precipitazione nei mesi invernali. Ne segue che il modello divide la precipitazione totale P in una parte liquida, Pl e una solida, Ps , in funzione della temperatura dell'aria, T_a , (Tarboton, Chowdhury e Jackson 1994):

$$Pl = \alpha_p P \quad (3.2)$$

$$Ps = (1 - \alpha_p)P \quad (3.3)$$

dove α_p è calcolato come segue:

$$\alpha_p = \begin{cases} 0 & \text{se } T_a \leq T_{inf} \\ \frac{T_a - T_{inf}}{T_{sup} - T_{inf}} & \text{se } T_{inf} < T_a < T_{sup} \\ 1 & \text{se } T_a \geq T_{sup} \end{cases} \quad (3.4)$$

in cui T_{inf} e T_{sup} sono rispettivamente la temperatura al di sotto della quale si ha solo neve e la temperatura al di sopra della quale si ha solo pioggia.

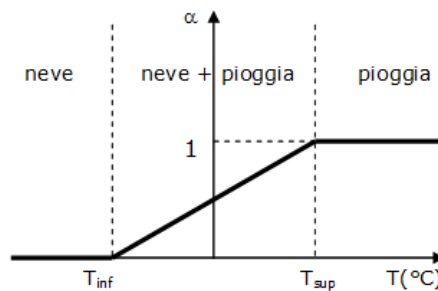


Figura 3-4: relazione tra la temperatura dell'aria e le precipitazioni atmosferiche.

Nella versione del FEST-WB utilizzata, si è scelto di ridurre al minimo il range di temperatura per il quale si ha sia pioggia che neve impostando $T_{inf}=0$ °C e $T_{sup}=0.00000005$ °C : siccome non sono disponibili misure di temperatura così precise, risulta che $T=0$ °C è il valore discriminante tra pioggia e neve.

La simulazione del processo di fusione nivale si basa sul concetto di "gradi giorno", (Martinec e Rango 1986). La velocità di fusione, M_s , in m/s è proporzionale alla differenza tra la temperatura dell'aria e una temperatura di soglia predefinita, T_b , posta pari a 0°C:

$$M_s = \begin{cases} C_m (T_a - T_b) & \text{se } T_a > T_b \\ 0 & \text{se } T_a \leq T_b \end{cases} \quad (3.5)$$

dove C_m [$m \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}$] è un coefficiente empirico che dipende sia dalle condizioni meteorologiche che geografiche. Generalmente, C_m è compreso tra $4.8 \cdot 10^{-8}$ e $6.9 \cdot 10^{-8} \text{ m } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Il terreno coperto dalla neve viene considerato congelato, quindi viene impedita l'infiltrazione nel suolo da parte della neve fusa in acqua. Al contrario, la frazione liquida di SWE, la somma della neve fusa e della precipitazione liquida, fluisce sul manto nevoso cella per cella seguendo uno schema lineare a serbatoio (Ponce 1989) con una celerità pari a $1.67 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ (Salandin, et al. 2004). Il ruscellamento diventa parte dell'acqua infiltrabile solo quando raggiunge una cella non coperta dalla neve.

3.1.3 L'infiltrazione

Per poter calcolare nelle equazioni del bilancio di massa il ruscellamento e la percolazione in ogni istante dt della simulazione, è necessario prima di tutto stimare l'infiltrazione S nel momento in cui si verifica un evento piovoso.

A tale scopo viene utilizzato il metodo SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number) adattato alle simulazioni continue (Ravazzani, Mancini, et al. 2007). La sua versione classica è formulata per mezzo di un modello a parametri concentrati: il bacino è considerato come un unico elemento e quindi richiede in ingresso un unico valore di precipitazione e dei parametri idrologici. All'interno del FEST-WB esso viene applicato in ciascuna delle celle in cui è stata suddivisa l'area di interesse in modo da considerare la variabilità spaziale di tutte le grandezze in gioco: sono necessarie mappe in formato raster dell'umidità dell'aria, del CN e dei parametri idrologici del suolo.

Il modello distribuito SCS-CN con bilancio idrologico, calcola lo stato iniziale dell'umidità del terreno in modo differente dal metodo classico. Infatti, l'umidità iniziale non viene calcolata considerando il valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento meteorico (le classi d'umidità AMC I, AMC II, AMCIII), ma si considera la condizione di umidità del terreno nell'istante in cui ha inizio l'evento.

Per avere il valore dell'umidità nell'istante in cui comincia a piovere, si procede aggiornando il valore del parametro θ (umidità del suolo) ad ogni intervallo di tempo. Partendo dal valore di CN_{II} , si calcolano i valori di CN_I , tramite la formula

$$CN_I = \frac{4.2 \cdot CN_{II}}{10 - 0.058 \cdot CN_{II}} \quad (3.6)$$

e successivamente si ottiene il valore di S_I con la formula

$$S_I = 254 \cdot \left[\left(\frac{100}{CN_I} \right) - 1 \right] \quad (3.7)$$

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

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (3.8)$$

dove θ_{sat} rappresenta l'umidità a saturazione, mentre θ_{res} corrisponde all'umidità residua.

Si ottiene quindi un valore di S_I ad ogni step di calcolo, con cui si calcola il parametro S_t :

$$S_t = S_I(1 - \varepsilon_t) \quad (3.9)$$

La procedura fa sì che il parametro S_t vari linearmente. In questo modo non si hanno più solo tre possibili valori di S_t (S_I , S_{II} , S_{III} corrispondenti alle tre classi d'umidità), ma si hanno valori di S_t che variano nell'intervallo $[0 - S_I]$. Il valore della capacità del massimo invaso non viene limitata inferiormente, in modo da considerare anche le situazioni di terreno completamente saturo, mentre il limite superiore corrisponde al valore massimo (S_I), che corrisponde al valore CN_I quando $\theta = \theta_{res}$ ($\varepsilon_t = 0$).

3.1.4 L'evapotraspirazione

Fondamentale nella simulazione del ciclo idrologico è la stima dell'evapotraspirazione, cioè la somma di due fenomeni distinti come l'evaporazione e la traspirazione dell'acqua.

L'evaporazione è il processo tramite il quale l'acqua allo stato liquido è convertita in vapore acqueo e rimossa dalla superficie evaporante: laghi, fiumi, suolo e vegetazione bagnata. L'energia richiesta per il passaggio di stato è fornita dalla radiazione solare e in minore quantità dalla temperatura dell'ambiente circostante. Col passare del tempo, l'aria immediatamente circostante alla superficie evaporante diventa satura e, se non fosse sostituita da aria più secca, l'intensità del processo diminuirebbe fino ad arrestarsi; la velocità del vento è il fattore maggiormente responsabile di questa sostituzione. Radiazione solare,

temperatura e umidità dell'aria e velocità del vento sono quindi i parametri climatici da considerare per la stima dell'evaporazione.

La traspirazione consiste invece nella vaporizzazione dell'acqua contenuta nei tessuti vegetali. L'acqua, insieme ad altri elementi nutritivi, è assorbita dal suolo attraverso le radici e trasportata in tutta la pianta. La traspirazione avviene nelle foglie ed è regolata dall'apertura degli stomi; pressoché tutta l'acqua prelevata è perduta con la traspirazione e solo una piccola parte è usata all'interno della pianta. La traspirazione, come l'evaporazione, dipende dalla fornitura di energia, dal gradiente di vapore saturo, dalla velocità del vento, dalla temperatura, dall'umidità dell'aria e dalla capacità del suolo di condurre acqua alle radici.

L'evapotraspirazione potenziale (*ETP*) si definisce come la quantità d'acqua evaporata in condizioni di disponibilità d'acqua illimitata. Essa rappresenta quindi un valore teorico che si manifesterebbe qualora il terreno non fosse soggetto a limitazioni di rifornimento idrico, ossia se le sue condizioni di umidità fossero sempre mantenute tali da garantirvi un contenuto idrico sufficiente a mantenere l'equilibrio dinamico con l'atmosfera. In realtà, le limitazioni di rifornimento idrico del terreno fanno sì che non sempre esso disponga della quantità d'acqua teoricamente evapotraspirabile, così che il tasso di evapotraspirazione effettiva (*ET_{eff}*) non sempre raggiunge il suo valore potenziale di *ETP*.

In questo studio è stato scelto di calcolare l'evapotraspirazione potenziale attraverso la formula di Priestley-Taylor (Priestley e Taylor 1972):

$$ETP = \frac{\alpha_e}{\lambda \rho_w} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (3.10)$$

dove:

- α_e = costante pari a 1.26;
- λ = calore latente di vaporizzazione (MJ/kg) , dipendente dalla temperatura;
- Δ = pendenza della curva di pressione di vapor d'acqua a saturazione (Pa/°C), dipendente dalla temperatura;
- γ = costante psicrometrica (Pa/°C);
- R_n = radiazione solare netta (W/m²);
- G = flusso di calore nel suolo (W/m²).

Questi ultimi termini sono noti a partire dai dati in ingresso sulla radiazione solare globale e sfruttando un bilancio energetico.

Calcolata l'evapotraspirazione potenziale, è ora possibile calcolare quella effettiva per la quale contribuiscono l'evaporazione effettiva dal suolo, E_s , e la traspirazione effettiva dalla vegetazione, T_s ; entrambe queste grandezze sono funzioni della *ETP* in base a due coefficienti, α e β , che dipendono dallo stato di umidità del terreno θ , e dalla quantità di vegetazione, f_v , e di suolo nudo, $(1 - f_v)$, presenti sulla superficie del bacino:

$$E_s = \alpha(\theta) \cdot ETP \cdot (1 - f_v) \quad (3.11)$$

$$T_s = \beta(\theta) \cdot ETP \cdot f_v \quad (3.12)$$

dove:

$$\alpha(\theta) = 0.082\theta + 9.173\theta^2 - 9.815\theta^3 \quad (3.13)$$

$$\beta(\theta) = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_l - \theta_w} \quad (3.14)$$

- θ = umidità del suolo;
- θ_w = umidità del suolo in corrispondenza del punto d'appassimento;
- θ_l = umidità del suolo in corrispondenza della capacità di campo;

Infine l'evapotraspirazione effettiva totale si calcola come:

$$ET_{eff} = E_s + T_s \quad (3.15)$$

3.1.5 Bilancio idrologico

Il bilancio idrologico riceve in ingresso le mappe di precipitazione e temperatura e quella evapotraspirazione potenziale (ET_p), da cui si calcola la matrice di evapotraspirazione effettiva (ET_{eff}) secondo il metodo spiegato nel paragrafo 3.1.4; in ingresso riceve inoltre il termine di infiltrazione ottenuto per ogni cella in cui è diviso il bacino.

Il modello, in questa fase, aggiornando in ogni istante t il valore dell'umidità del suolo (θ), calcola il ruscellamento e la percolazione sia che si verifichi l'evento di pioggia o meno. In particolare, il modello considera come istante effettivo d'inizio della perturbazione quello in cui riceve in ingresso un dato di precipitazione diverso da zero. Da questo istante inizia il computo della pioggia cumulata e la misurazione della durata dell'evento.

Successivamente il modello ricalcola la riserva idrica nel suolo (θ), misurando le voci in entrata (precipitazioni depurate dalle perdite ed evapotraspirazione) e quelle in uscita (ruscellamento e percolazione) nell'istante $t+1$.

L'equazione del bilancio idrico (esplicitata rispetto al termine di umidità del suolo θ) assume la seguente forma:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \frac{(S - D - ET_{eff})}{Z} \quad (3.16)$$

$$S = P - R + Dunn \quad (3.17)$$

$$P = A + N + G \quad (3.18)$$

dove:

- S [m/s] = infiltrazione;
- D [m/s] = contenuto d'acqua perso per percolazione o drenaggio, calcolato mediante l'equazione:

$$D = K_{sat} \cdot \left(\frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{\left(\frac{2+3B}{B} \right)} \quad (3.19)$$

dove B è il coefficiente di Brooks & Coorey e K_{sat} (m/s) la permeabilità verticale a saturazione;

- ET_{eff} [m/s] = evapotraspirazione effettiva;
- Z [m] = spessore dello strato di terreno considerato;
- P [m/s] = precipitazione lorda comprensiva di accumulo/fusione neve e fusione ghiaccio;
- A [m/s] = afflusso meteo;
- N [m/s] = accumulo/fusione neve;
- G [m/s] = fusione ghiaccio;
- $Dunn$ [m/s] = ruscellamento Dunniano;
- D [m/s] = acqua persa per percolazione o drenaggio;
- R [m/s] = acqua persa per ruscellamento (pioggia netta), dipendente secondo il metodo SCS-CN da P e da S secondo la seguente formula:

$$R = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad (3.20)$$

3.1.6 Propagazione del deflusso superficiale

Questo è l'ultima componente del modello che serve a ricostruire le portate fluenti in una prescelta posizione del corso d'acqua.

In ingresso riceve la mappa della pioggia netta, calcolata come in precedenza, e la pioggia dunniana e per determinarne la dinamica all'interno del bacino richiede delle mappe ricavate dal DEM per mezzo di particolari algoritmi GIS:

- la mappa dei puntatori, indica la direzione del flusso da una cella all'altra;
- la mappa delle aree contribuenti, indica per ciascuna cella il numero di celle per cui viene drenata l'acqua;
- la mappa dei tratti, distingue le celle in tipo "versante" e in una di tipo "canale", sfruttando come discriminante un valore di area contribuyente predefinito.

La formazione di deflusso superficiale in una cella parte dal calcolo dell'umidità del suolo che si confronta con la massima capacità di ritenzione del terreno indicata con θ_{sat} : se l'umidità del terreno è superiore alla massima capacità di ritenzione del terreno, la parte in eccesso va a costituire il deflusso superficiale a cui va aggiunta la parte di pioggia rifiutata dal terreno. Quindi se:

$$\begin{cases} \theta > \theta_{sat} \\ P_{netta} = (\theta - \theta_{sat}) \frac{dz}{dt} \end{cases} \quad (3.21)$$

dove dz è lo spessore del suolo in metri e dt è l'intervallo di tempo in secondi. Il termine di deflusso superficiale, che si ottiene a seguito del bilancio idrologico su una cella versante, indicato come R_{on} (Run On), va a sommarsi alla pioggia lorda caduta sulla cella adiacente a valle, e sul volume totale $R_{on} + P$ viene effettuato il bilancio idrologico per la cella di valle. Questo perché è possibile che una cella a valle di quella in cui si genera il deflusso superficiale, a causa delle sue differenti proprietà, sia in grado di accogliere parte del deflusso superficiale proveniente da monte. Si parla di cella versante indicando quelle celle non appartenenti al reticolo idrografico che fanno parte del bacino montano, per le quali la profondità del suolo è ridotta e lo strato impermeabile è dunque molto superficiale.

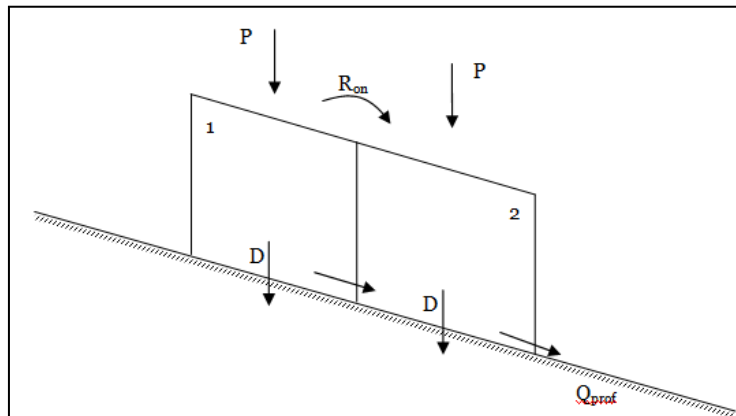


Figura 3-5: schematizzazione di due celle di versante l'una adiacente all'altra e delle interazione tra le stesse.

In riferimento alla Figura 3-5 dal bilancio idrologico sulla cella numero 2 si possono avere tre scenari differenti:

- se la cella numero 2 è satura già all'istante precedente, tutto il volume $R_{on} + P$ si propaga a valle, andando a costituire il termine R_{on} per la cella successiva;
- se la cella numero 2 non è satura, ma non riesce ad accogliere tutto il volume $R_{on} + P$, una frazione di esso si infiltra, mentre la restante parte costituisce il termine R_{on} per la cella successiva;
- se la cella numero 2 è tanto insatura da contenere tutto il volume $R_{on} + P$, esso si infiltra e la cella numero 2 non contribuisce al deflusso superficiale.

Una volta terminato il bilancio idrologico sulla cella 2, il programma si posiziona alla cella successiva, e ripete lo stesso procedimento. Ad ogni ciclo dunque, una volta individuata una cella di sorgente di deflusso superficiale, il programma esegue il bilancio per tutte le celle di valle, fino a individuare una cella in cui

tutto il deflusso residuo riesce ad infiltrarsi, oppure fino al raggiungimento di una cella appartenente al reticolo idrografico (celle canale). A questo punto tutto il volume defluito, si propaga all'interno del reticolo e va a formare gli idrogrammi di piena.

Il trasferimento del deflusso superficiale sui versanti e nel reticolo idrografico si ottiene con un metodo di propagazione idrologica basato sul metodo Muskingum – Cunge nella sua forma non lineare (Montaldo, Ravazzani e Mancini 2007), che si basa sul calcolo della celerità di propagazione in rete variabile nel tempo. Tale metodo opera una discretizzazione sia spaziale, in quanto opera su tratti lunghi (Δs) che collegano due celle secondo la linea di massima pendenza, sia temporale e sfrutta il modello cinematico.

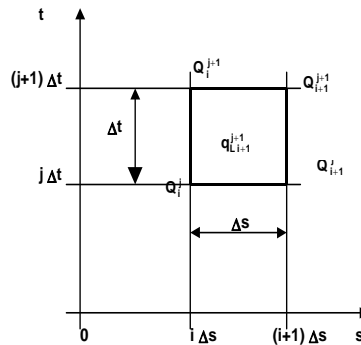


Figura 3-6: discretizzazione spazio-temporale nel metodo Muskingum Cunge.

La celerità $\omega_{i,j}$ con cui si propaga risulta quindi essere pari a

$$\omega_{i,j}(t) = \frac{5}{3} V_{i,j}(t) \quad (3.22)$$

in cui $V_{i,j}$ è la velocità media della corrente in ciascuna cella (sul versante o nel reticolo idrografico) calcolata con la formula di Chezy il cui fattore di resistenza viene valutato con l'espressione di Gauckler Strickler. Nel caso di alveo rettangolare, l'espressione della velocità media per la generica cella (i, j), sarà

$$V = \left(k_s \left(\frac{r_f}{r_f + 2} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot i^{0.5} \right)^{0.75} \cdot \left(\frac{Q}{r_f} \right)^{0.25} \quad (3.23)$$

dove k_s è il coefficiente di scabrezza, r_f il rapporto tra la larghezza della sezione e il tirante idrico. Il valore della portata Q_{i+1}^{j+1} è stimata tramite l'espressione suggerita da Ponce e Yevjevich (1978).

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{(Q_i^{j+1} + Q_i^j + Q_{i+1}^j)}{3} \quad (3.24)$$

Assumendo una portata variabile nel tempo, è quindi possibile modificare le celerità nei singoli tratti del reticolo idrografico in modo dinamico rispetto al processo di formazione della piena. Questa impostazione consente di rappresentare meglio proprio i rami di risalita e di esaurimento dell'idrogramma rispetto al classico schema a celerità uniforme. Per ciascuna cella del bacino, il calcolo di $V_m(t)$ si basa quindi su una geometria idraulica, che in assenza di un rilievo di dettaglio degli alvei, può ricavarsi ipotizzando che la sezione idraulica del canale o del versante sia rettangolare e omotetica, ossia che il rapporto ($r_f = B/y$) tra la larghezza in sommità B e il tirante idrico y sia costante in diversi tronchi del reticolo idrografico.

3.2 MODELLO METEOROLOGICO

3.2.1 Introduzione generale

L'atmosfera a causa della sua natura caotica presenta una notevole sensibilità alle condizioni iniziali. Non sarebbero sufficienti neanche la conoscenza dei processi fisici caratteristici, delle condizioni iniziali e una

capacità di calcolo illimitata per avere una previsione perfetta: infatti gli errori commessi, per esempio sullo stato iniziale, si ripercuotono nella simulazione in modo esponenziale.

La previsione meteorologica attraverso un modello numerico può essere considerata come un problema di condizioni iniziali, dove gli errori dipendono essenzialmente da:

- le equazioni usate nel modello non descrivono completamente tutti i processi interni all'atmosfera;
- la risoluzione del modello non è adeguata per la descrizione dei movimenti nell'atmosfera;
- le condizioni iniziali non sono disponibili in ogni punto del modello;
- non sono disponibili dati osservati con precisione assoluta.

In particolare l'accuratezza insufficiente dei dati è il fattore principale che porta ad ottenere delle previsioni non realistiche. Per ovviare a questo problema, vengono condotte più simulazioni utilizzando valori iniziali leggermente diversi l'uno con l'altro: sebbene ciascuna simulazione diverga nel tempo, è possibile ottenere l'evoluzione più probabile, a patto che questo set sia abbastanza ricco. Questo metodo si chiama "ensemble forecasting", proposto da Epstein(1969) e Leith(1974) e utilizzato dal 1992 dall'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) in Inghilterra e dall' NCEP (National Centers for Environmental Prediction) negli Stati Uniti.

Per iniziare la simulazione, il modello di previsione richiede i seguenti dati osservati dalle stazioni di misura: pressione al livello del mare, temperatura e umidità dell'aria e velocità del vento. Queste variabili sono derivate nel tempo ($\delta/\delta t$) e successivamente utilizzate per calcolare le altre variabili dipendenti. Le principali equazioni in un modello meteorologico sono:

- equazione di Navier-Stokes (NS), che definisce la componente del vento;
- equazione della termodinamica, che si riferisce alla prima delle termodinamica, conosciuta come legge di conservazione dell'energia;
- equazione di bilancio del vapore acqueo, che considera tutti i processi del ciclo dell'acqua e i suoi cambiamenti di stato;
- equazione di continuità, che descrive il trasporto di grandezze come la massa;
- equazione delle leggi dei gas, che lega pressione, temperatura, densità e volume della massa d'aria;
- equazione idrostatica, che descrive la relazione tra la variazione di pressione con l'altitudine e la densità dell'aria.

In particolare quest'ultima equazione è molto importante nel modello poiché l'approssimazione idrostatica può sostituire l'equazione di Navier-Stokes, differenziando un modello in idrostatico o non-idrostatico. Questo fa sì che l'accelerazione verticale sia trascurabile rispetto al gradiente verticale di pressione e le forze verticali di galleggiamento, pertanto l'equazione NS si riduce a un bilancio tra queste ultime grandezze. I modelli idrostatici ben si adattano a risoluzioni orizzontali nell'ordine dei 10 km e quindi vengono utilizzati nelle previsioni a scala globale e regionale. Nonostante il tempo di calcolo sia ridotto, questa approssimazione non si addice alla riproduzione di fenomeni atmosferici come tempeste o eventi convettivi su piccola scala: in questi casi, un'alta risoluzione consente al modello di risolvere esplicitamente l'equazione di Navier-Stokes, senza approssimarla con l'equazione idrostatica.

I modelli meteorologici vengono suddivisi in due categorie: modelli globali (Global Models, GMs) e modelli su area limitata (Limited Area Models, LAMs). Il primo considera l'intera atmosfera terrestre, mentre il secondo opera su un'area più piccola e ben si adatta alle applicazioni in campo idrologico, in cui l'orografia ha una certa rilevanza. Questo fattore, unito all'esigenza di avere un onere computazionale non troppo elevato, fa sì che i due tipi di modelli abbiano una risoluzione spaziale orizzontale completamente diversa. Per simulare il comportamento dell'atmosfera in tutto il globo è necessario avere una griglia di nodi, in cui

calcolare le grandezze in gioco, più grossolana e pertanto la risoluzione dei GMs varia tra i 25 e 100 km; al contrario, si avrà una risoluzione tra i 2 e i 12 km per i LAMs, che lavorano su un dominio più ristretto e richiedono una precisione maggiore. Questo influisce anche sull'orizzonte temporale delle previsioni: i GMs arrivano a simulare fino a 10-15 giorni, mentre i LAMs fino a 48-72 ore.

D'altro canto, la risoluzione spaziale verticale è la stessa per le due categorie: l'atmosfera è suddivisa in 40-60 livelli in modo non uniforme, sono più ravvicinati in prossimità del suolo, dove è necessaria una maggiore precisione.

Infine è importante segnalare il sistema detto "nesting", in cui il LAM viene lanciato con condizioni iniziali e al contorno provenienti da un GM (Ceppi 2011).

3.2.2 WRF

In questo studio le previsioni meteorologiche sono state effettuate utilizzando il WRF, acronimo di "Weather Research and Forecasting Model". Il suo sviluppo è iniziato nella seconda parte degli anni '90 e nasce dalla collaborazione tra diversi enti scientifici statunitensi: il National Center for Atmospheric Research (NCAR), il National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (rappresentato dal National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e il Forecast Systems Laboratory (FSL)), l' Air Force Weather Agency (AFWA), il Naval Research Laboratory, la University of Oklahoma, e il Federal Aviation Administration (FAA), (WRF s.d.).

Si tratta di un modello open-source: chiunque può mettere mano al codice e modificarlo in base alle proprie esigenze. Questo ne ha favorito una notevole diffusione nel mondo, come testimoniato dalla seguente immagine presentata al workshop dell'ECMWF il 15 Novembre 2007:



Figura 3-7: diffusione del WRF (Holland, et al. 15 Novembre 2007).

Il WRF rientra nella categoria dei modelli ad area limitata di tipo non-idrostatico e viene tipicamente inizializzato con il modello globale GFS (NCEP Global Forecast System). Ne esistono di due tipi:

- ARW (Advanced Research WRF), che ha caratteristiche più avanzate. Poiché richiede maggiori risorse di calcolo, è dedicato soprattutto alla ricerca;
- NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), utilizzato per le previsioni meteorologiche.

Si adatta particolarmente bene alle previsioni in Italia poiché è in grado di utilizzare un'approssimazione realistica dell'orografia, e dei differenti tipi di suoli, ed elabora i propri output in funzione del tipo di vegetazione presente, delle caratteristiche pedologiche del terreno, della copertura nevosa e di

innumerevoli altri data set iniziali. Lavorando a 0.1°C di risoluzione è capace di prevedere i fenomeni atmosferici anche su scale inferiori ai 5 km di diametro: può quindi parametrizzare con grande affidabilità, effetti micro-meteorologici locali quali isole di calore cittadine, foschie, nebbie, brezze marine e montane e persino dare una sofisticata previsione della grandine.

Una sua funzione particolare è l'assimilazione dati con schema variazionale 3DVar, assimila cioè dati dai satelliti, dai radar e dalle stazioni meteorologiche sul mare e a terra in modo da reagire quasi in tempo reale alle variazioni atmosferiche.

Il modello gira a diverse risoluzioni e con più corse giornaliere che permettono di produrre previsioni operative ad altissima risoluzione sino a 1 km di dettaglio con step orario sino a 36 ore, per poi passare ad un dettaglio di 3 km con step triorario sino a 72 ore, 10 km sino a 180 ore. Diminuendo la risoluzione avremo le previsioni sino a 384 ore con una griglia di circa 45 Km.

In particolare il modello utilizzato dal centro Epson Meteo utilizzato è il WRF (Weather Research and Forecasting) – ARW (Advanced Research WRF) versione 3.5 sviluppato dall'NCAR (National Center of Atmospheric Research). Tutte le simulazioni sono inizializzate alle ore 12 UTC con previsione fino a +36 ore, le prime 12 ore sono considerate di "lead time", la previsione effettiva è per la giornata successiva.

La risoluzione orizzontale della simulazione è di 1km con un'estensione su un'area della Lombardia che contiene i bacini dei fiumi Olona, Seveso e Lambro. Si arriva a questa risoluzione molto elevata tramite un triplo nesting "a cannocchiale". I dati di inizializzazione e contorno del GFS vengono forniti a un modello con risoluzione di 12 km che si estende sull'area italiana e mediterranea, all'interno di questo è presente un dominio con risoluzione di 4km che occupa il Nord Italia, infine contenuto in questo è presente il dominio d'interesse a 1km. La simulazione procede in contemporanea su tutti e tre i domini. Tutti e tre i domini hanno 37 livelli verticali, quello utilizzato nel lavoro di tesi corrisponde a una altitudine di 2m rispetto al piano campagna.

4 DATI DI INGRESSO

In questo capitolo ci occupiamo dei dati in ingresso, intendendo sia quelli osservati, cioè i valori risultanti dalle misurazioni eseguite nelle stazioni idro-meteorologiche ARPA Lombardia, site nel territorio in esame, sia quelli caratterizzanti il suolo dal punto di vista idrologico da cui sono stati ricavati i dati di input per il modello FEST-WB, presi dalle banche dati della regione Lombardia.

4.1 DATI METEOROLOGICI

I dati meteorologici a cadenza oraria sono stati raccolti dal database on-line dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente: ARPA (fonte: (ARPA [1] s.d.) e (ARPA [2] s.d.)) e fanno parte della Rete Aria e della Rete Idronivometeo. In particolare si sono presi in esame gli anni dal 2003 al 2012.

Le grandezze meteorologiche fornite dalle stazioni sono:

- precipitazione [mm]: è la forzante meteorologica principale, prende in considerazione sia la neve che la quantità di pioggia;
- temperatura dell'aria [°C]: è una variabile fondamentale per il calcolo dei flussi di energia scambiati tra l'atmosfera e il terreno e per la stima della fusione nivale;
- radiazione solare incidente ad onda corta [$W m^{-2}$]: è una grandezza fondamentale dei processi idrologici come lo scioglimento nivale e l'evapotraspirazione;
- umidità relativa dell'aria [%].

Nella Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3 e Figura 4-4 è mostrata la distribuzione geografica delle stazioni site nel territorio in esame. Nello specifico sono presenti 41 stazioni pluviometriche, 10 stazioni che misurano la radiazione solare, 36 stazioni termometriche e 22 stazioni igrometriche; gli elenchi di tali stazioni sono riportati rispettivamente nella Tabella 4-1, Tabella 4-2, Tabella 4-3 e Tabella 4-4.

Tabella 4-1: stazioni pluviometriche.

Stazione	Codice	X	Y	Z	DATA MINIMA [aaaa/mm/gg]	DATA MASSIMA [aaaa/mm/gg]
Milano_Lambrate	2006	1520147	5038191	120	2001/06/29	ad_oggi
Segrate_Milano_2	2065	1520740	5038780	120	1994/09/23	2004/06/16
Casatenovo_suolo	2377	1524093	5061000	360	2002/04/26	ad_oggi
Casatenovo_quota	2385	1524093	5061000	360	2003/11/10	ad_oggi
Vertemate_con_Minoprio	2477	1506685	5062777	322	1990/10/20	2010/07/22
Canzo_M._Prasanto	2614	1524728	5077245	1233	2008/11/26	ad_oggi
Vertemate_con_Minoprio	4016	1506680	5062852	310	2002/05/25	ad_oggi
Cinisello_Balsamo_Parco_Nord	4065	1516078	5043277	142	2002/05/30	ad_oggi
Arconate	4112	1488109	5043918	182	2009/03/05	ad_oggi
Erba_via_Battisti	5870	1517253	5072818	279	2009/02/21	ad_oggi
Mariano_Comense	5872	1514093	5059492	251	1991/01/01	ad_oggi
Nibionno	5882	1520640	5066450	310	2002/12/02	ad_oggi
Agrate_Brianza	5894	1527655	5046997	162	1992/03/24	ad_oggi
Carate_Brianza	5900	1518299	5057656	250	1996/03/31	ad_oggi
Rodano	5916	1527660	5035575	114	1999/01/01	ad_oggi

Busto_Arsizio_Accam	5933	1487115	5047738	206	1998/12/05	ad_oggi
Busto_Arsizio_via_Magenta	5934	1488340	5050830	222	1991/05/25	ad_oggi
Varese_Vidoletti	5946	1484800	5075965	425	1991/12/22	ad_oggi
Valmadrera	6986	1527334	5076597	247	2006/01/21	ad_oggi
Lozza_Ponte_Vedano	8115	1489818	5069183	276	1998/07/24	ad_oggi
Caslino_d`Erba	8122	1518073	5075805	427	1998/07/24	ad_oggi
Milano_via_Confalonieri	8149	1515127	5037098	122	2006/06/28	2012/04/02
Arcisate	8152	1491528	5076975	383	2000/07/05	ad_oggi
Como_Villa_Geno	8165	1506234	5074100	200	2000/07/05	ad_oggi
Lambrugo	8197	1519036	5067648	273	2003/03/06	ad_oggi
Cantu'_Asnago	8199	1507838	5062800	244	2003/04/29	ad_oggi
Misinto	8211	1505199	5056448	247	2003/03/12	ad_oggi
Barni	8213	1520667	5083578	625	2003/03/13	ad_oggi
Busto_Arsizio_via_Rossini	8219	1486298	5052573	242	2003/03/26	ad_oggi
Varese_via_Appiani	8228	1486327	5075472	416	2003/08/27	ad_oggi
Paderno_Dugnano	8692	1512429	5047728	168	2006/02/07	ad_oggi
Milano_P.le_Morandi	8702	1515481	5035413	122	2000/07/05	2003/02/18
Milano_via_Fara	8703	1515579	5036845	122	2003/02/18	2006/06/28
Castronno	9091	1486085	5066166	379	2004/01/01	ad_oggi
Molteno	9106	1523899	5070006	278	2004/01/01	ad_oggi
Osnago	9110	1530288	5058333	234	2004/01/01	ad_oggi
Lurago_Marinone	9115	1497877	5061887	296	2004/01/01	ad_oggi
Cavaria	9116	1485053	5059587	274	2004/01/01	ad_oggi
Olgiate_Comasco	9122	1498446	5071552	382	2004/01/01	2012/04/17
Como_Villa_Gallia	9308	1505230	5073520	201	1999/01/01	ad_oggi
Milano_P.zzaZavattari	9341	1511109	5035867	122	2004/11/22	ad_oggi

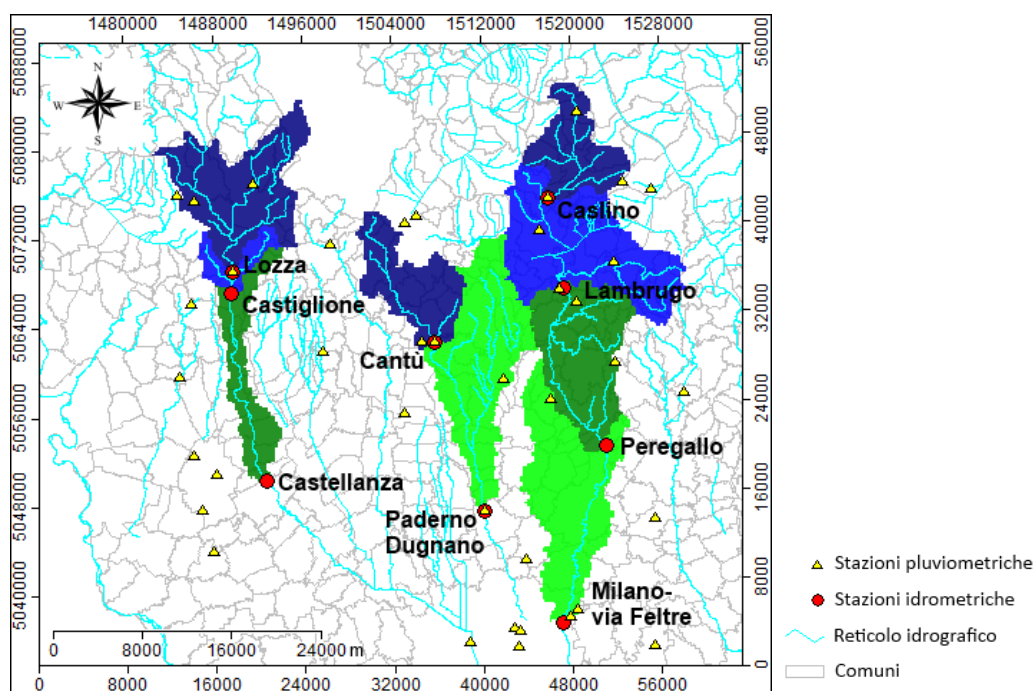


Figura 4-1: distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento delle precipitazioni.

Tabella 4-2: stazioni che misurano la radiazione solare.

Stazione	Codice	X	Y	Z	DATA MINIMA [aaaa/mm/gg]	DATA MASSIMA [aaaa/mm/gg]
Milano_Lambrate	2008	1520147	5038191	120	2003/09/12	ad_oggi
Casatenovo_quota	2384	1524093	5061000	360	2003/11/10	ad_oggi
Vertemate con Minoprio	2476	5062777	1506685	322	1992/02/21	2010/07/22
Vertemate con Minoprio	4012	5062852	1506680	310	2002/05/25	ad_oggi
Cinisello_Balsamo_Parco_Nord	4060	1516078	5043277	142	2002/05/30	ad_oggi
Arconate	4069	1488109	5043918	182	2002/07/02	ad_oggi
Carate_Brianza	6453	1518299	5057656	250	1999/01/02	ad_oggi
Rodano	6464	1527660	5035575	114	1999/02/11	ad_oggi
Valmadrera	6990	1527334	5076597	247	2006/02/02	ad_oggi
Como_Villa_Gallia	9315	1505230	5073520	201	1999/01/01	ad_oggi

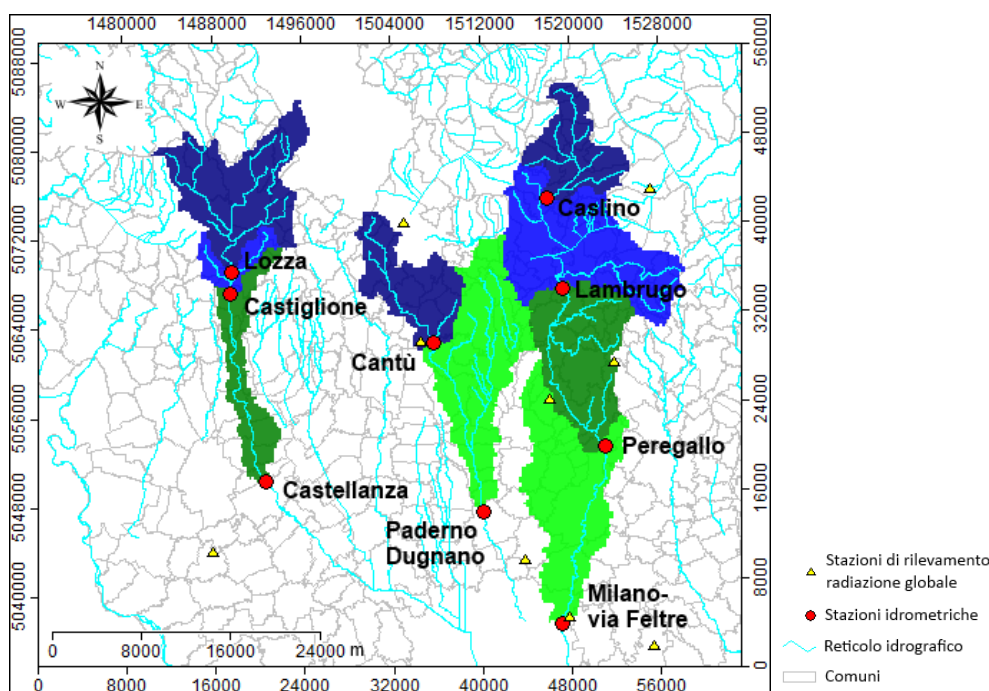


Figura 4-2: distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento della radiazione solare globale.

Tabella 4-3: stazioni termometriche.

Stazione	Codice	X	Y	Z	DATA MINIMA [aaaa/mm/gg]	DATA MASSIMA [aaaa/mm/gg]
Milano_Due	2063	1520740	5038780	120	1995/06/21	2004/06/16
Casatenovo_prato	2373	1524093	5061000	360	2002/04/26	ad_oggi
Minoprio	2471	1506685	5062777	322	1992/01/02	2010/07/22
Canzo_M._Prasanto	2613	1524728	5077245	1233	2008/11/26	ad_oggi
Vertemate	4009	1506680	5062852	310	2002/06/19	ad_oggi
Milano_Parco_Nord	4058	1516078	5043277	142	2002/05/30	ad_oggi
Arconate_(shake_Up)	4066	1488109	5043918	182	2002/07/02	ad_oggi
Erba_via_Battisti	5871	1517253	5072818	279	2009/02/21	ad_oggi
Mariano_Comense	5873	1514093	5059492	251	1991/01/05	ad_oggi
Nibionno	5883	1520640	5066450	310	2002/12/03	ad_oggi
Agrate	5895	1527655	5046997	162	1992/03/25	ad_oggi
Milano_Brera	5897	1514809	5035385	122	1990/03/19	ad_oggi

Carate_Brianza	5901	1518299	5057656	250	1996/04/01	ad_oggi
Milano_viale_Marche	5911	1514945	5038125	129	1989/01/01	ad_oggi
Rodano	5917	1527660	5035575	114	1999/01/01	ad_oggi
Milano_P.zzaZavattari	5920	1511109	5035867	122	1989/01/01	ad_oggi
Busto_Arsizio_via_Magenta	5935	1488340	5050830	222	1991/05/25	ad_oggi
Varese_Vidoletti	5947	1484800	5075965	425	1991/12/30	ad_oggi
Valmadrera	6992	1527334	5076597	247	2006/02/02	ad_oggi
Caslino_d`_Erba	8123	1518073	5075805	427	1998/07/24	ad_oggi
Milano_via_Feltre	8162	1519463	5037617	127	2000/07/05	ad_oggi
Como_Villa_Geno	8166	1506234	5074100	200	2000/07/05	ad_oggi
Arcisate	8168	1491528	5076975	383	2000/07/05	ad_oggi
Lambrugo	8198	1519036	5067648	273	2003/03/06	ad_oggi
Cantu'_Asnago	8200	1507838	5062800	244	2003/04/29	ad_oggi
Misinto	8212	1505199	5056448	247	2003/03/12	ad_oggi
Barni	8214	1520667	5083578	625	2003/03/13	ad_oggi
Busto_Arsizio_via_Rossini	8220	1486298	5052573	242	2003/03/26	ad_oggi
Varese_via_Appiani_	8229	1486327	5075472	416	2003/08/27	ad_oggi
Castronno	9002	1486085	5066166	379	2004/01/01	ad_oggi
Molteno	9017	1523899	5070006	278	2004/01/01	ad_oggi
Osnago	9021	1530288	5058333	234	2004/01/01	ad_oggi
Lurago_Marinone	9026	1497877	5061887	296	2004/01/01	ad_oggi
Cavria	9027	1485053	5059587	274	2004/01/01	ad_oggi
Olgiate_Comasco	9033	1498446	5071552	382	2004/01/01	2012/04/17
Como_Villa_Gallia	9310	1505230	5073520	201	1999/01/01	ad_oggi

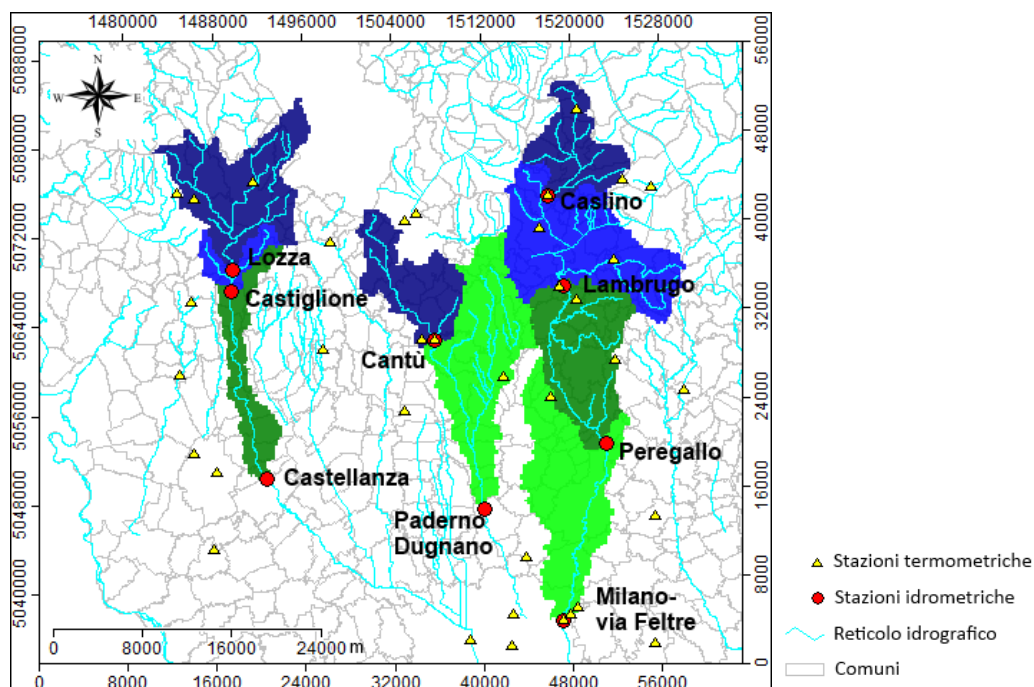


Figura 4-3: distribuzione geografica delle stazione di rilevamento delle temperatura dell'aria.

Tabella 4-4: stazioni igrometriche.

Stazione	Codice	X	Y	Z	DATA MINIMA [aaaa/mm/gg]	DATA MASSIMA [aaaa/mm/gg]
Milano_Lambrate	2002	1520147	5038191	120	2001/06/29	ad_oggi
Segrate_Milano_2	2064	1520740	5038780	120	1995/06/21	2005/08/30
Casatenovo_suolo	2374	1524093	5061000	360	2002/04/26	ad_oggi
Vertemate	2472	5062777	1506685	322	1993/01/02	2010/07/22
Canzo_M._Prasanto	2612	5077245	1524728	1233	2008/06/18	ad_oggi
Vertemate	4010	5062852	1506680	310	2002/05/25	ad_oggi
Cinisello_Balsamo_Parco_Nord	4059	1516078	5043277	142	2002/05/30	ad_oggi
Arconate	4067	1488109	5043918	182	2002/07/02	ad_oggi
Erba	6163	5073135	1517445	323	2009/02/21	ad_oggi
Nibionno	6167	1520640	5066450	310	2002/12/03	ad_oggi
Agrate_Brianza	6172	1527655	5046997	162	1999/01/01	ad_oggi
Milano_Brera	6174	1514809	5035385	122	2002/12/05	ad_oggi
Carate_Brianza	6175	1518299	5057656	250	1999/01/01	ad_oggi
Rodano	6183	1527660	5035575	114	1999/01/01	ad_oggi
Milano_P.zzaZavattari	6185	1511109	5035867	122	2002/04/22	ad_oggi
Varese_Vidoletti	6197	1484800	5075965	425	1991/12/23	ad_oggi
Milano_viale_Marche	6597	1514945	5038125	129	2002/03/21	ad_oggi
Busto_Arsizio_via_Magenta	6603	1488340	5050830	222	1991/11/07	ad_oggi
Valmadrera	6994	1527334	5076597	247	2006/02/02	ad_oggi
Como_Villa_Gallia	9311	1505230	5073520	201	1999/01/01	ad_oggi
Molteno	11020	1523899	5070006	278	2010/12/16	ad_oggi
Olgiate_Comasco	14145	1498446	5071552	382	2012/05/08	ad_oggi

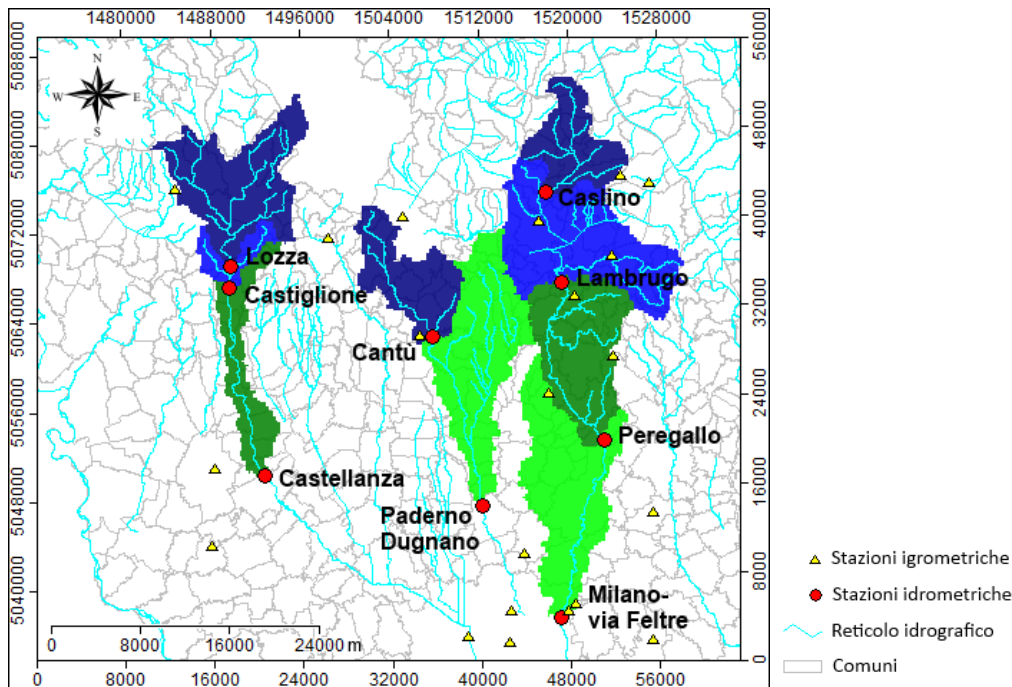


Figura 4-4: distribuzione geografica delle stazione di rilevamento dell'umidità dell'aria.

4.2 DATI IDROLOGICI

I dati idrologici a cadenza oraria sono stati raccolti dal database on-line dell'ARPA Lombardia (ARPA [1] s.d.) e fanno parte della Rete Idronivometeo. In particolare si sono presi in esame gli anni dal 2003 al 2012.

Le grandezze fornite sono:

- livello idrometrico [cm]: grandezza fondamentale per la stima delle portate;
- scala di deflusso: legge che lega le altezze idrometriche alle portate fluenti.

In Figura 4-5 è mostrata la distribuzione geografica delle 9 stazioni site nel territorio in esame, in Tabella 4-5 sono elencate.

Tabella 4-5: stazioni idrometriche.

Stazione	Codice	X	Y	Z	DATA MINIMA [aaaa/mm/gg]	DATA MASSIMA [aaaa/mm/gg]	SCALA DI DEFLUSSO
Lozza –Ponte Vedano	8117	5068954	14898998	276	1998/06/29	ad_oggi	SI
Castellanza	8118	5050428	1492810	216	1998/07/24	ad_oggi	SI
Cantù Asnago	8119	5062800	1507838	244	1998/07/24	ad_oggi	SI
Peregallo	8120	5053579	1523339	240	1998/07/24	ad_oggi	SI
Paderno Dugnano	8121	1512429	5047728	176	1998/07/24	ad_oggi	NO
Casino d'Erba	8124	5075805	1518073	427	1998/07/24	ad_oggi	SI
Milano-viaFeltre	8125	5037620	1519463	127	1998/07/24	ad_oggi	SI
Lambrugo	8148	5067778	1519408	273	2001/10/17	ad_oggi	SI
Castiglione Olona	14624	1489614	5067267		2013/03/29	ad_oggi	NO

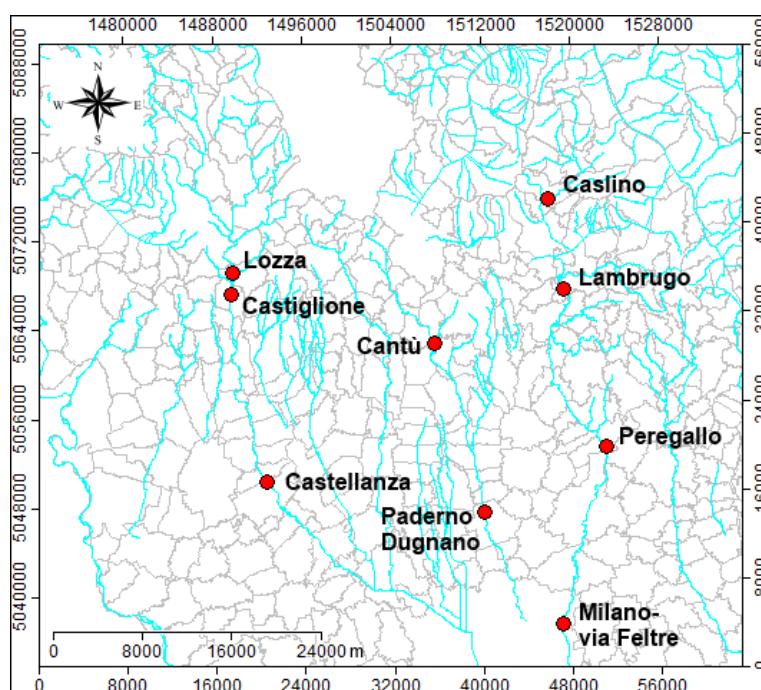


Figura 4-5: stazioni di rilevamento del livello idrometrico lungo Olona, Seveso e Lambro.

Sono state anche elencate le scale di deflusso storiche e attuali disponibili per le stazioni in esame: come possiamo notare la stazione di Paderno Dugnano ne è sprovvista in quanto l'idrometro è posto vicino all'ingresso del canale scolmatore Nord Ovest, di conseguenza il livello dell'acqua risente della struttura; anche la stazione di Castiglione sull'Olona risulta esserne sprovvista, in quanto è attiva dal 29 marzo 2013 e non è stato ancora fatto uno studio per definirla.

Tutte le scale di deflusso sono state riportate nella Tabella 4-6, Tabella 4-7 e Tabella 4-8, indicando per ogni stazione l'equazione, il range e il periodo di validità, in quanto la scala di deflusso è stata oggetto di aggiornamenti nel corso del tempo.

Tabella 4-6: scale di deflusso delle stazioni presenti sul fiume Olona.

Sezione	Equazione	Range di validita' [metri]	Periodo di validita' [gg/mm/aaaa]	Stato
Lozza	$Q=40.94*(h-0.67)^{1.73}$	$0.67 < h(m) < 2.0$	dal 01/01/2004	storica
Lozza	$Q=40.606*(h-0.7)^{1.59}$	$0.7 < h(m) < 3.2$	dal 01/01/2006	storica
Lozza	$Q=40.606*(H-0.7)^{1.59}$	$0.7 < h(m) \leq 0.85$	dal 30/05/2008	attiva
Lozza	$Q=4.59*(h+0.064)^{5.145}$	$0.85 < h(m) \leq 1.05$	dal 30/05/2008	attiva
Lozza	$Q=66.14*(h-0.83)^{1.397}$	$1.05 < h(m) < 1.5$	dal 30/05/2008	attiva
Castellanza	$Q = 19.69*(h-0.25)^{1.76}$	$0.25 < h(m) < 2.50$	dal 01/01/2002	attiva

Tabella 4-7: scala di deflusso della stazione presente sul fiume Seveso.

Sezione	Equazione	Range di validita' [metri]	Periodo di validita' [gg/mm/aaaa]	Stato
Cantu' Asnago	$Q=10.12*(h-0.15)^{2.29}$	$0.15 < h(m) < 2.5$	dal 01/01/2004	storica
Cantu' Asnago	$Q = 9.209*(h-0.13)^{2.225}$	$0.1 < h(m) < 1.5$	dal 01/08/2006	storica
Cantu' Asnago	$Q = 8.24*(h-0.02)^{2.548}$	$0.1 < h(m) < 1.5$	dal 1/4/2008	storica
Cantu' Asnago	$Q = 6.0064*(h+0.137)^{2.8646}$	$0.4 < h(m) < 1.2$	dal 03/05/2010 al 11/1/2011	storica

Tabella 4-8: scale di deflusso delle stazioni presenti sul fiume Lambro.

Sezione	Equazione	Range di validita' [metri]	Periodo di validita' [gg/mm/aaaa]	Stato
Caslino d'Erba	$Q = 16.285*(h-0.1)^{1.682}$	$0.1 < h(m) < 1.7$	dal 17/10/2004	storica
Caslino d'Erba	$Q=21.89*(h-0.108)^{1.66}$	$0.11 < h(m) < 1.5$	dal 01/01/2007	attiva
Lambrugo	$Q=1.388888*h$	$0 < h(m) < 0.36$	dal 01/01/2001	storica
Lambrugo	$Q=22.0*h^{1.1681-6.2617}$	$0.36 < h(m) < 2.78$	dal 01/01/2001	storica
Lambrugo	$Q=24.8368*(h-0.293)^{1.1485}$	$0.30 < h(m) < 2.45$	dal 03/05/2010	attiva
Peregallo	$Q=14.1235*(H+0.1192)^{2.4924}$	$0 < h(m) < 3$	dal 1/1/1988 al 31/12/2004	storica
Peregallo	$Q=3.4647*(h+0.725)^{5.6313}$	$0 < h(m) \leq 0.25$	dal 1/1/2007 al 3/5/2010	storica
Peregallo	$Q=28.12*(h+0.0368)^{1.7874}$	$0.25 < h(m) \leq 2$	dal 1/1/2007 al 3/5/2010	storica
Peregallo	$Q=26.367*(h+0.181)^{1.68223}$	$-0.15 < h(m) < 3$	dal 3/5/2010	attiva
Milano- via Feltre	$Q = 15.2184*(h)^{1.90687}$	$0 < h(m) < 3.5$	dal 01/01/1998	storica
Milano- via Feltre	$Q=16.392*h^{1.954}$	$0 < h(m) < 3.5$	dal 3/5/2010	attiva

Durante la definizione della portata, con estrema diligenza si sono rispettati i periodi di validità, non è stato possibile fare lo stesso con i range, in quanto per alcuni eventi di piena il livello idrometrico misurato supera tale limite; in questi casi si è applicata ugualmente l'equazione a disposizione.

4.3 DATI CARATTERIZZANTI IL SUOLO

Il modello FEST-WB, essendo un modello distribuito richiede la descrizione delle proprietà idrologiche delle celle elementari in cui è stato suddiviso il territorio: in particolare è di grande importanza la creazione delle mappe della permeabilità e del CN, poiché su di esse verrà svolta la calibrazione. I dati d'ingresso necessari sono la tessitura e l'uso del suolo.

4.3.1 Tessitura del suolo

La tessitura del suolo è stata classificata secondo 7 categorie, a cui sono stati attribuiti i parametri idrologici richiesti dal FEST –WB secondo la Tabella 4-9.

Tabella 4-9: classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti, fonte (Maidment 2001).

classe	Tipo	Ksat [m/s]	θ residuo [-]	θ saturo [-]	Brooks& Corey [cm]	wilting point [-]	field capacity [-]	bubbling pressure [m]
1	Gravel	1.00E-04	0.006	0.417	1.09	0.007	0.018	0.0136
2	Sand	6.94E-05	0.02	0.437	0.694	0.033	0.091	0.0726
3	Loamy Sand	1.39E-05	0.035	0.437	0.553	0.055	0.125	0.0869
4	Sandy Loam	6.94E-06	0.041	0.453	0.378	0.095	0.207	0.1466
5	Loam	4.17E-06	0.027	0.463	0.252	0.117	0.27	0.1115
6	Clay	1.11E-07	0.09	0.475	0.165	0.272	0.396	0.373
7	Stone		0.195	0.523	0.293	0.336	0.466	1.872

Tutte le informazioni digitali necessarie per la descrizione sono state elaborate a partire dalle mappe elencate di seguito. Per ognuna di esse è stata indicata la legenda e la riclassificazione eseguita per associare alle differenti tipologie di terreno i parametri idraulici presenti in letteratura.

- mappa della tessitura del suolo, fornita dalla Regione Lombardia nell'ambito del progetto Dusaf, la quale comprende solamente i territori della pianura padana e pedemontana (Regione Lombardia s.d.):

Tabella 4-10: riclassificazione della mappa della tessitura del suolo.

classe	CODICE	DESCRIZIONE
6	A4	argille con sabbia
1	G1	ghiaie poco/ben gradate con argilla e/o sabbia
1	G2	ghiaie poco/ben gradate con argilla e sabbia o con limo e sabbia
1	G3	ghiaie limose con sabbia
5	L4	limi (con sabbia)
4	L5	limi sabbiosi
7	R1	Torbiditi, argille e marne con livelli e/o lenti arenacee e/o calcaree
7	R2	Rocce sedimentarie carbonatiche; Torbiditi, argille e marne con livelli e/o lenti arenacee e/o calcaree
2	S1	sabbie poco gradate (con ghiaia)
2	S2	sabbie poco/ben gradate con limo e/o ghiaia
3	S3	sabbie argillose con ghiaia / sabbie limose con ghiaia
3	NO	no suolo

- mappa della permeabilità delle comunità montane lombarde (Regione Lombardia s.d.).

Tabella 4-11: riclassificazione della mappa di permeabilità.

classe	TIPO DI ROCCIA	GRADO PERMEABILITA'
7	rocce coerenti (substrato lapideo)	da ridotta a molto ridotta
6		da media a ridotta
5		da elevata a media
6	rocce incoerenti (depositi superficiali)	da ridotta a molto ridotta
5		da media a ridotta
4		da elevata a media
6	coltre e substrato	da ridotta a molto ridotta

Una volta riclassificate, esse sono state unite in modo da coprire tutto il territorio dei bacini oggetti dello studio; il risultato è la seguente mappa:

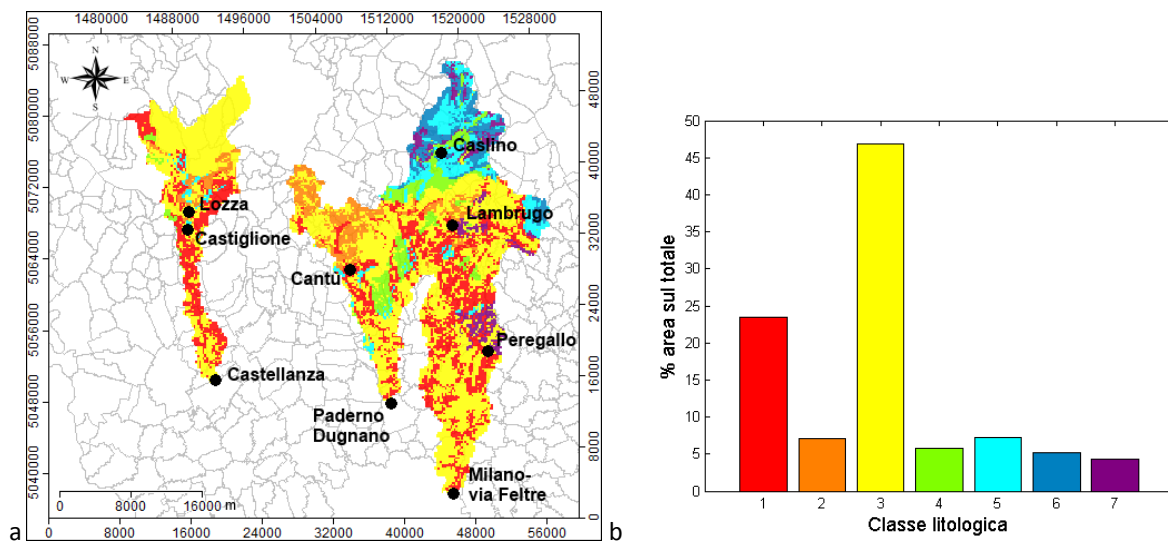


Figura 4-6: della tessitura del suolo (a); frequenza relativa di ciascuna classe (b).

La mappa di permeabilità, ricavata a partire da quella di Figura 4-7, è mostrata in seguito:

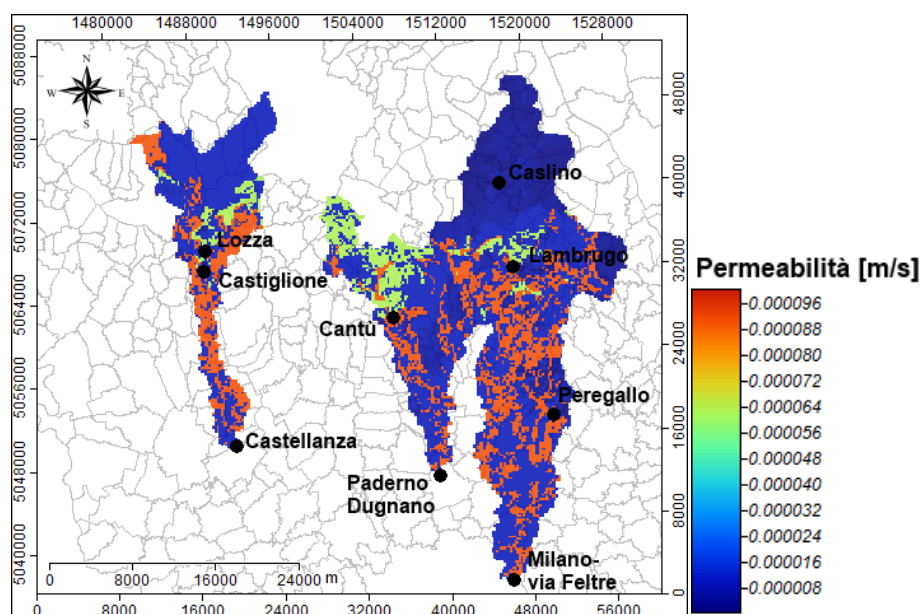


Figura 4-7: mappa della permeabilità.

4.3.2 Uso del suolo

I dati di uso del suolo sono stati raccolti nell'ambito del programma GLOBCORINE 2009 (GLOBal Coordination of Information on the Environment), portato avanti dall'ESA (European Space Agency) secondo le linee guida dell'EEA (European Environment Agency), (European Space Agency s.d.). In questo studio è stato necessario ricorrere alle mappe fornite da questo progetto poiché comprendono anche la porzione svizzera del bacino dell'Olona; esse infatti non sono incluse nelle mappe fornite dalla Regione Lombardia attraverso il suo portale cartografico. In Figura 4-8 viene mostrata, mentre nella figura successiva vengono descritte le 14 classi:

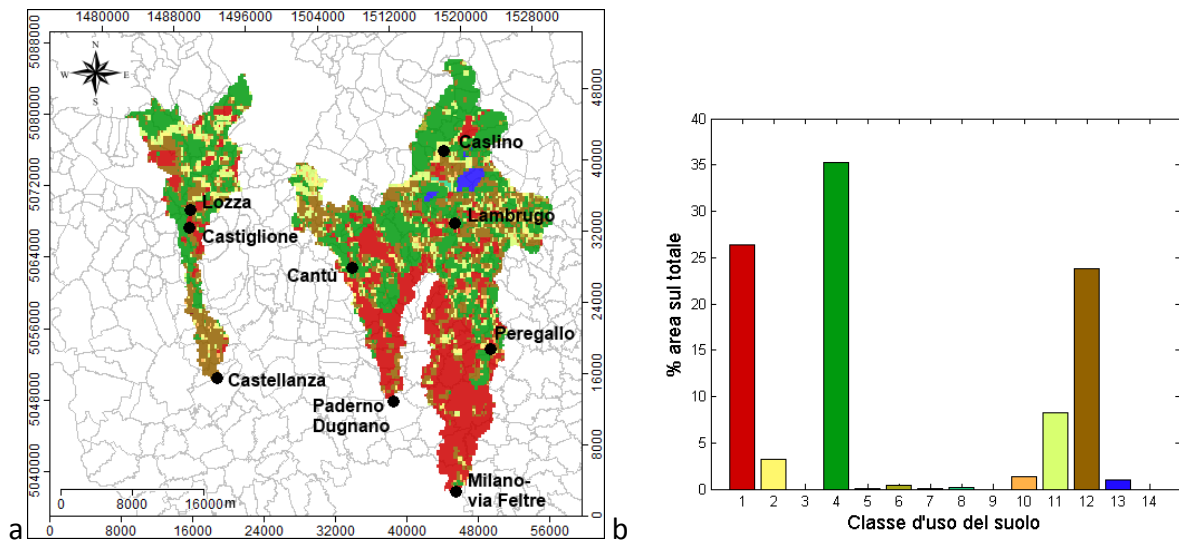


Figura 4-8: mappa dell'uso del suolo (a); frequenza relativa di ciascuna classe (b).

Class	Description	Color
1	Urban and associated areas	Red
2	Rainfed cropland	Yellow
3	Irrigated cropland	Cyan
4	Forest	Green
5	Heathland and sclerophyllous vegetation	Dark Red
6	Grassland	Olive Green
7	Sparsely vegetated area	Light Yellow
8	Vegetated low-lying areas on regularly flooded soil	Bright Green
9	Bare areas	Light Orange
10	Complex cropland	Orange
11	Mosaic cropland / natural vegetation	Light Green
12	Mosaic of natural (herbaceous, shrub, tree) vegetation	Brown
13	Water bodies	Blue
14	Permanent snow and ice	White

Figura 4-9: descrizione delle classi d'uso del suolo in GLOBCORINE 2009.

La determinazione del Curve Number di ciascuna cella, parametro necessario per il metodo SCS-CN implementato nel FEST-WB, è l'operazione immediatamente successiva. Essendo un parametro che tiene conto sia dell'uso del suolo che delle caratteristiche idrologiche suolo, si è compiuta una suddivisione delle celle in 4 classi in base alla permeabilità: la classe 1 corrisponde ai valori più elevati, la 4 invece a quelli più bassi. Il risultato è la seguente mappa, che viene accompagnata dalla frequenza relativa di ciascuna classe idrologica.

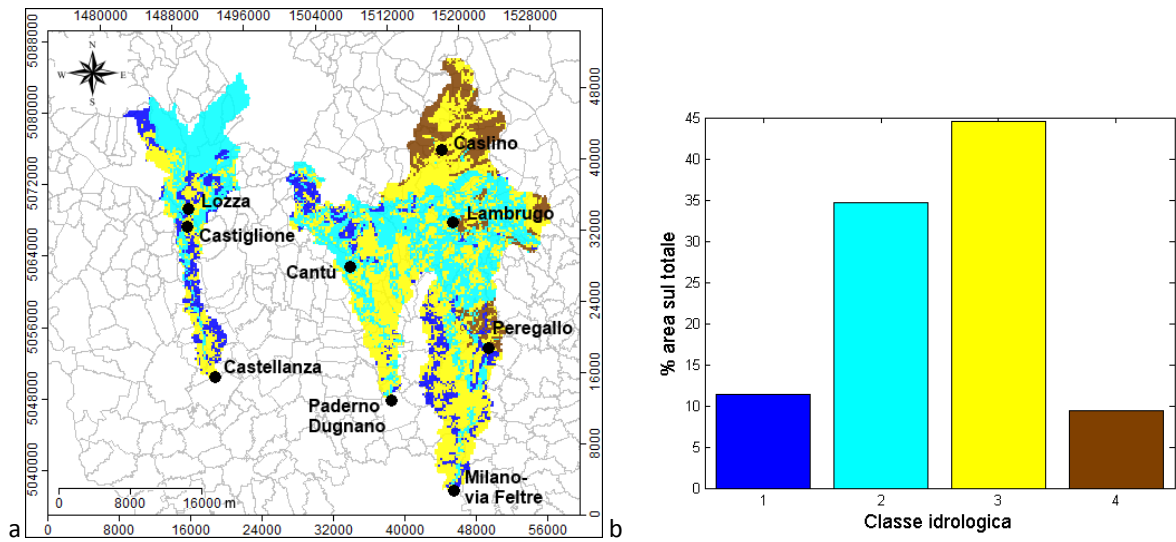


Figura 4-10: mappa delle classi idrologiche (a); frequenza relativa di ciascuna classe (b).

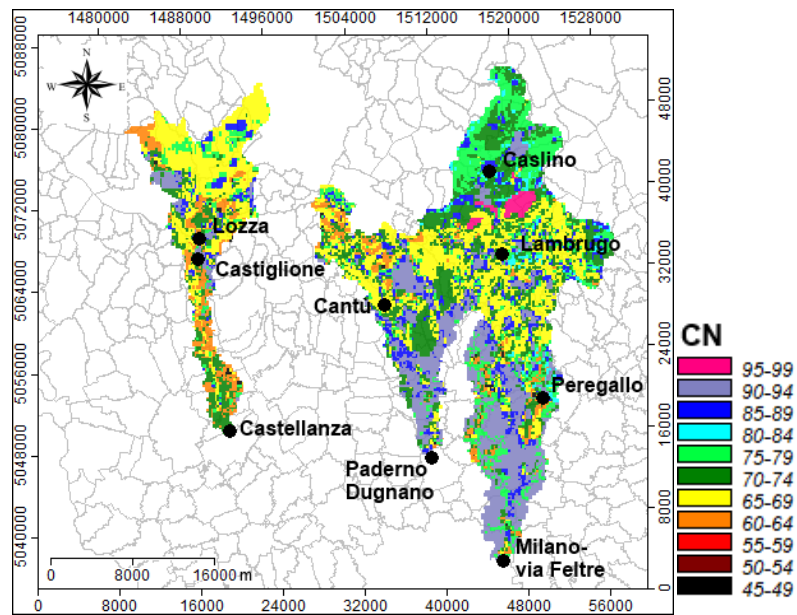


Figura 4-11: mappa del Curve Number.

5 ANALISI DI SENSITIVITA'

In questo capitolo descriviamo le analisi di sensitività svolte, prima della calibrazione del modello, per individuarne il comportamento al variare della risoluzione spaziale e di due parametri fondamentali, quali K_{sat} che definisce la conduttività idraulica satura verticale che regola i volumi d'acqua nel suolo e il valore del parametro CN .

Per confrontare i risultati delle analisi si sono presi in esame tutti gli eventi di piena individuati per ciascuna stazione sui quali verrà svolta la calibrazione del modello descritta nel capitolo 6.1, a prescindere dalle considerazioni che verranno fatte.

5.1 RISOLUZIONE SPAZIALE

L'analisi di sensitività è stata svolta con l'obiettivo di individuare la risoluzione spaziale che garantisce la migliore qualità del dato simulato in relazione ai tempi di calcolo. In particolare si sono impostate due differenti griglie regolari con passo di 100 e 200 m.

Nella Tabella 5-1, Tabella 5-2, Tabella 5-3 e Tabella 5-4 sono riportati i valori mediati sugli eventi per le singole stazioni prese in esame, rispettivamente dell'errore relativo sulla portata al colmo di piena, dell'errore assoluto temporale sui massimi, l'RMSE acronimo di "Root Mean Square Error" e l'indice di Nash.

Tabella 5-1: errore medio relativo sulla portata al colmo di piena al variare della risoluzione.

	100 m	200 m
Lozza	-68%	-55%
Castellanza	-65%	-52%
Cantù	-83%	-65%
Caslino	43%	78%
Lambrugo	-70%	-61%
Peregallo	-79%	-75%
Milano	-81%	-76%

Tabella 5-2: errore medio assoluto temporale del picco di piena al variare della risoluzione.

	100 m	200 m
Lozza	1.10	-0.30
Castellanza	0.90	-2.30
Cantù	12.57	7.57
Caslino	-1.80	-2.00
Lambrugo	1.30	-4.00
Peregallo	7.40	6.40
Milano	6.20	3.70

Tabella 5-3: RMSE medio al variare della risoluzione.

	100 m	200 m
Lozza	14.760	13.834
Castellanza	17.765	15.928
Cantù	7.023	6.852
Caslino	9.286	11.620
Lambrugo	16.111	15.699
Peregallo	19.088	18.809
Milano	31.250	30.138

Tabella 5-4: Nash medio al variare della risoluzione.

	100 m	200 m
Lozza	-0.966	-0.810
Castellanza	-0.495	-0.288
Cantù	-0.703	-0.560
Caslino	0.408	0.271
Lambrugo	-0.119	-0.089
Peregallo	-0.866	-0.800
Milano	-0.994	-0.935

Come possiamo vedere dai dati in Tabella 5-1, Tabella 5-2, Tabella 5-3 e Tabella 5-4 la simulazione con la risoluzione a 200 m determina una sovrastima sistematica dell'evento di piena. Tale errore va però messo in relazione con i tempi di calcolo, perché la simulazione copre un arco temporale piuttosto esteso dal 1 gennaio 2003 al 31 dicembre 2012. Il modello impiega circa 10 gg per la simulazione a 100 m e circa 32 ore per quella a 200 m; questo ha fatto sì che tutto il lavoro di tesi si svolgesse con tale risoluzione, comprese le analisi di sensitività seguenti. A titolo di esempio in Figura 5-1 è riportato l'evento 3 di Lozza.

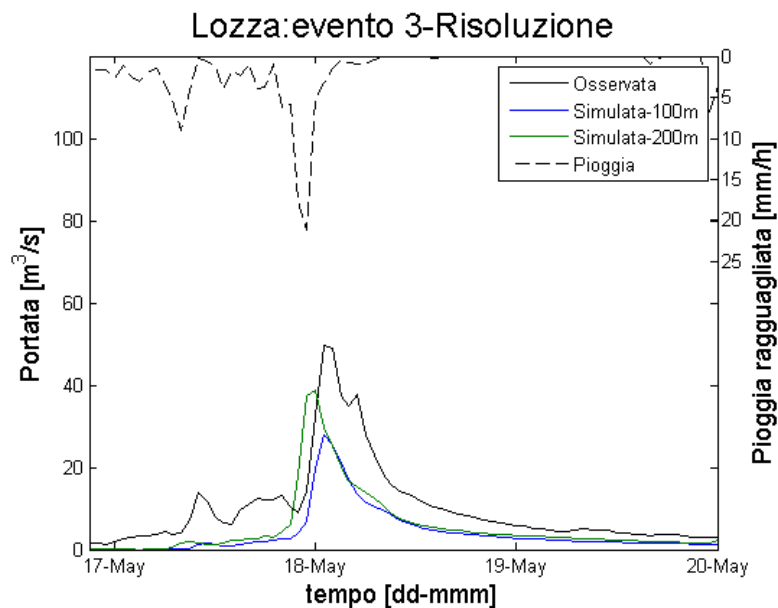


Figura 5-1: confronto tra le due diverse risoluzioni per l'evento 3 di Lozza.

5.2 CONDUTTIVITA' IDRAULICA SATURA, K_{sat}

Partendo da una situazione iniziale si è deciso di variare la conduttività idraulica al massimo di quattro ordini di grandezza, in particolare si è moltiplicata per i seguenti valori: 0.01; 0.1; 10; 100. In Figura 5-2 è riportato un esempio, come possiamo notare al diminuire della permeabilità abbiamo un aumento dell'evento di piena.

Tabella 5-5: errore medio relativo sulla portata al colmo di piena al variare di K_{sat} .

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	36%	-35%	-55%	-63%	-68%
Castellanza	46%	-30%	-52%	-63%	-67%
Cantù	-36%	-63%	-71%	-75%	-77%
Caslino	165%	118%	78%	18%	-8%
Lambrugo	-3%	-44%	-61%	-76%	-81%
Peregallo	-40%	-64%	-75%	-83%	-86%
Milano	-47%	-67%	-76%	-84%	-86%

Tabella 5-6: errore medio assoluto temporale del picco di piena al variare di Ksat.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	-1,20	-0,80	-0,30	-0,20	-0,10
Castellanza	-4,00	-3,20	-2,30	-0,40	3,30
Cantù	5,00	5,50	4,60	5,80	4,90
Caslino	-2,10	-2,00	-2,00	-2,80	-2,80
Lambrugo	-4,00	-2,20	-4,00	-3,60	-1,10
Peregallo	5,30	5,90	6,40	7,50	7,90
Milano	2,60	3,00	3,70	3,60	4,40

Tabella 5-7: RMSE medio al variare di Ksat.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	12,465	12,320	13,834	14,534	14,896
Castellanza	10,673	13,299	15,928	17,454	18,142
Cantù	6,185	7,971	8,441	8,666	8,776
Caslino	17,457	13,840	11,620	10,087	10,286
Lambrugo	7,420	12,242	15,699	18,686	19,614
Peregallo	9,975	15,646	18,809	21,222	22,017
Milano	18,712	26,079	30,138	33,079	34,163

Tabella 5-8: Nash medio al variare di Ksat.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	0,370	-0,523	-0,810	-0,936	-0,934
Castellanza	0,635	0,004	-0,288	-0,442	-0,524
Cantù	-0,342	-0,454	-0,476	-0,488	-0,491
Caslino	0,284	0,302	0,271	0,063	-0,125
Lambrugo	0,374	0,006	-0,089	-0,128	-0,141
Peregallo	-0,466	-0,812	-0,800	-0,782	-0,782
Milano	-1,136	-1,074	-0,935	-0,837	-0,815

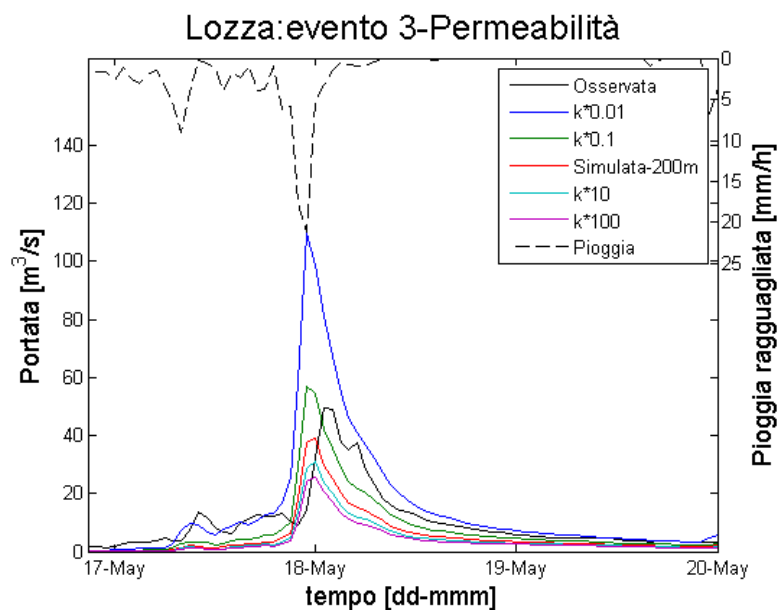


Figura 5-2: Ksat - analisi di sensitività per l'evento 3 di Lozza.

5.3 RUNOFF CURVE NUMBER, CN

Partendo da una situazione indisturbata si è deciso di variare il curve number aumentandolo e diminuendolo al massimo per dieci unità, in particolare: -10; -5; +5; +10.

In Figura 5-3 sono riportati alcuni esempi, come possiamo notare al diminuire del curve number si ha un aumento della permeabilità del terreno e quindi una riduzione dell'idrogramma di piena.

Tabella 5-9: errore medio relativo sulla portata al colmo di piena al variare del CN.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	-79%	-68%	-55%	-36%	-7%
Castellanza	-79%	-68%	-52%	-30%	1%
Cantù	-82%	-78%	-71%	-61%	-46%
Caslino	55%	68%	78%	92%	111%
Lambrugo	-71%	-67%	-61%	-53%	-40%
Peregallo	-83%	-80%	-75%	-67%	-53%
Milano	-87%	-83%	-76%	-67%	-50%

Tabella 5-10: errore medio assoluto temporale del picco di piena al variare del CN.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	6,50	1,00	-0,30	0,20	-1,00
Castellanza	5,90	3,40	-2,30	-2,10	-3,60
Cantù	6,30	6,10	4,60	6,10	3,00
Caslino	-1,10	-1,80	-2,00	-1,80	-2,80
Lambrugo	-2,60	-2,70	-4,00	-3,20	-4,40
Peregallo	11,90	7,80	6,40	7,00	5,80
Milano	5,80	5,10	3,70	2,70	1,10

Tabella 5-11: RMSE medio al variare del CN.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	16,191	14,877	13,834	12,494	12,206
Castellanza	20,067	18,386	15,928	13,650	11,509
Cantù	9,069	8,861	8,441	7,852	6,882
Caslino	9,817	10,010	11,620	10,814	13,041
Lambrugo	17,499	16,767	15,699	14,111	12,004
Peregallo	20,985	20,148	18,809	16,888	13,682
Milano	34,250	32,737	30,138	26,329	19,326

Tabella 5-12: Nash medio al variare del CN.

	-10	-5	originale	5	10
Lozza	-1,125	-0,980	-0,810	-0,520	-0,023
Castellanza	-0,792	-0,564	-0,288	-0,027	0,356
Cantù	-0,502	-0,493	-0,476	-0,425	-0,356
Caslino	0,356	0,391	0,271	0,445	0,316
Lambrugo	-0,126	-0,108	-0,089	0,005	0,076
Peregallo	-0,842	-0,836	-0,800	-0,780	-0,630
Milano	-0,868	-0,890	-0,935	-1,077	-1,879

Lozza: evento 3-Curve Number

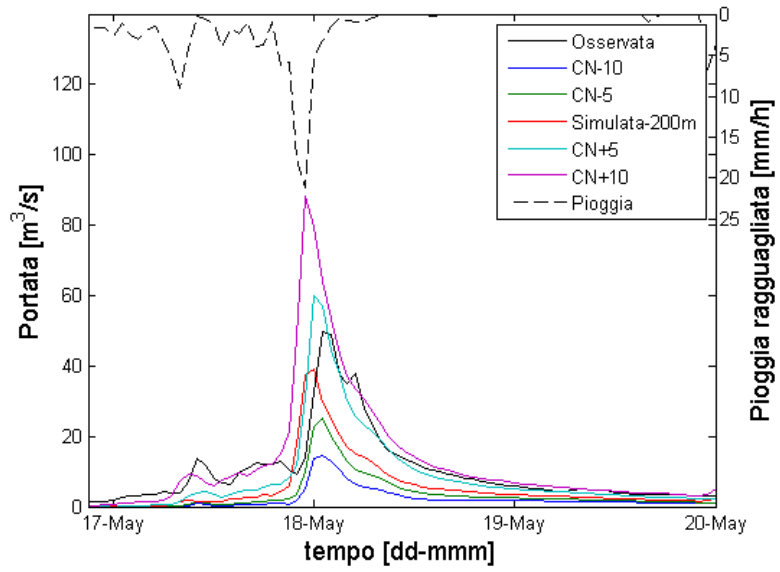


Figura 5-3: CN - analisi di sensitività per l'evento 3 di Lozza.

6 TARATURA DEL MODELLO IDROLOGICO

Il sistema di allerta per gli eventi di piena prevede l'utilizzo accoppiato di un modello idrologico e di un modello meteorologico. Per quanto riguarda quest'ultimo si hanno a disposizione unicamente i risultati e quindi viene semplicemente compiuta una analisi sulle sue prestazioni, capitolo 7; sul modello idrologico FEST-WB è stata effettuata la taratura sfruttando i dati in ingresso presentati nel capitolo 4.

La taratura prevede due fasi: la calibrazione, eseguita prendendo come riferimento gli eventi di piena più importanti verificati nel periodo: 2003 – 2010; e la validazione negli anni seguenti: 2011-2012.

Nei paragrafi seguenti viene mostrato nel dettaglio la procedura utilizzata, che costituisce il fulcro del lavoro di tesi.

6.1 CALIBRAZIONE

In questa fase di lavoro si è agito sulle mappe di K_{sat} e del CN: a partire dalla situazione iniziale, che si riferiscono rispettivamente alle Figura 4-7 e Figura 4-11, sono stati modificati tali parametri allo scopo di ottenere un andamento delle portate prossimo a quello osservato. Affinché si rimanesse il più possibile coerenti con i dati utilizzati, si è deciso di variare la permeabilità satura verticale attraverso un coefficiente moltiplicativo tra $\times 0.01$ e $\times 100$ mentre il Curve Number con un coefficiente additivo tra -10 e $+10$. Nell'ambito dell'analisi di sensitività è stata fatta luce su come la loro variazione influenzi il risultato finale, dando inoltre uno spunto su come operare sui parametri citati.

La calibrazione è stata effettuata prendendo come riferimento gli eventi di piena più importanti che si sono verificati nel periodo in esame: 2003 – 2010. Per ottenere i risultati conclusivi mostrati in questo paragrafo sono state compiute circa novanta simulazioni.

Inizialmente si sono individuati dieci eventi per stazione di misura su cui è stato fatto un controllo sull'attendibilità del dato di ingresso, individuando tre diverse problematiche:

- eventi con un andamento inverosimile a causa di errori di misurazione o malfunzionamento dello strumento sono stati scartati;
- eventi con dati nulli, che sono stati sostituiti mediante un'interpolazione lineare;
- eventi durante i quali il livello idrico ha raggiunto valori al di fuori del range di validità della scala di deflusso.

A queste si aggiunge la difficoltà di rilevare in maniera completa il campo di precipitazioni attraverso le stazioni meteorologiche presentate in Figura 4-1.

Gli eventi che presentano una di questa problematiche verranno opportunamente segnalati e adeguatamente considerati nel corso della calibrazione.

Per confrontare i risultati ottenuti con i valori di portata osservati si sono stimati quattro indici differenti per ogni evento: l'errore relativo sulla portata al colmo di piena, $err Q_{max}$, l'errore assoluto sul tempo di massimo, $err T_{max}$, l'RMSE, acronimo di "Root Mean Square Error", e l'indice di Nash. Questi ultimi due sono utile nella valutazione della riproduzione della forma dell'idrogramma di piena; quando si ha perfetta corrispondenza tra l'osservato e il simulato l'RMSE tende a 0 e l'indice di Nash invece tende a 1.

Per avere un'idea generale sulle prestazioni del modello per ciascuna stazione sono stati calcolati anche i valori medi degli indici sugli eventi. Rispettivamente hanno la seguente espressione:

$$err Q_{max} = \frac{Q_{sim} - Q_{oss}}{Q_{oss}} \quad (6.1)$$

$$era t_{max} = t_{sim} - t_{oss} \quad (6.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim}^i - Q_{oss}^i)^2} \quad (6.3)$$

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}^i - Q_{oss}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{Q}_{sim} - Q_{oss}^i)^2} \quad (6.4)$$

dove Q_{sim}^i è la portata simulata al tempo i-esimo, Q_{oss}^i è la portata osservata al tempo i-esimo e \bar{Q}_{sim} è la portata simulata media sull'evento.

In particolare si è dato maggior peso all'errore relativo sul colmo di piena e all'errore assoluto sul tempo, in quanto questo studio ha come scopo la riproduzione, nella maniera più accurata possibile, del massimo della piena. La ricerca del picco però ha come conseguenza la sottostima dei volumi, come possiamo vedere dal grafico riportato in Figura 6-1 i volumi simulati risultano notevolmente inferiori rispetto a quelli osservati.

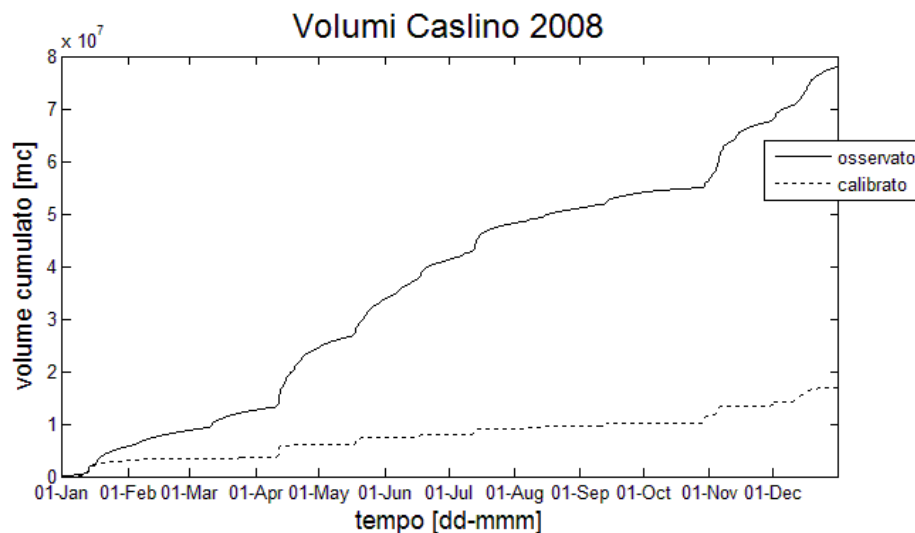


Figura 6-1: andamento del volume cumulato per l'anno 2008 alla stazione di Caslino.

La simulazione calibrata si è ritenuta soddisfacente se l'errore mediato sugli eventi è risultato inferiore al $\pm 20\%$.

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti per ogni stazione.

6.1.1 Olona

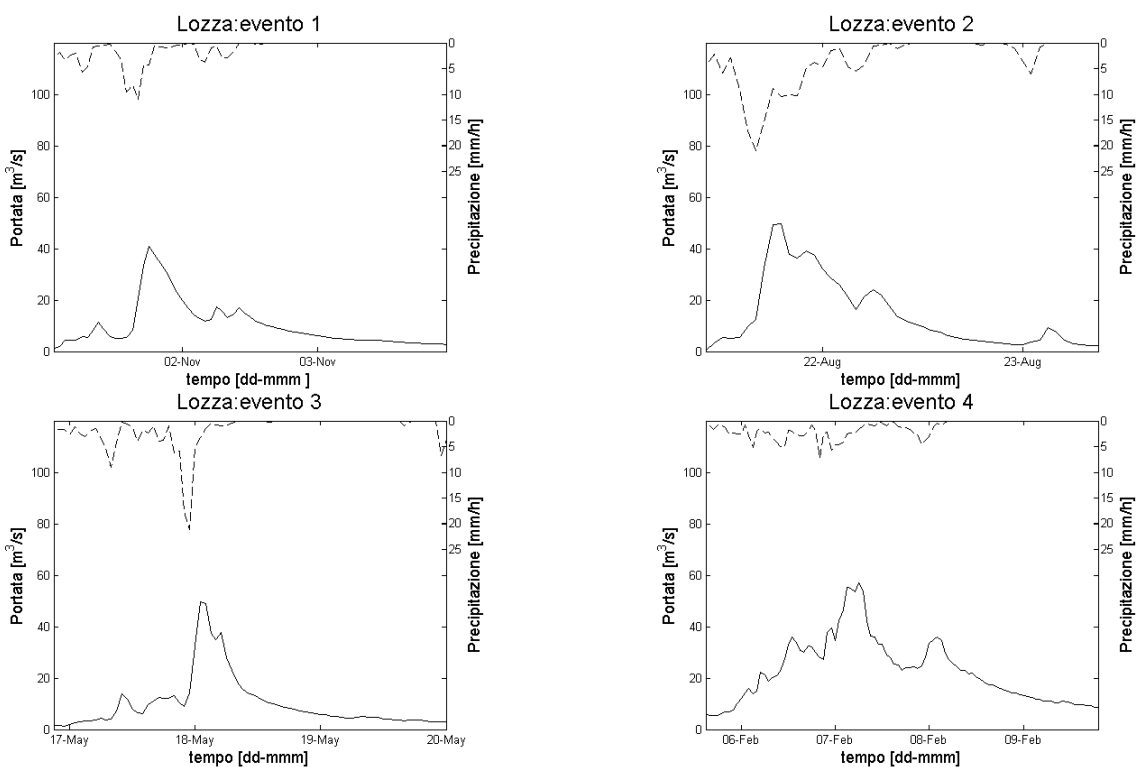
Le sezioni considerate sono quelle di Lozza e Castellanza. Per la stazione di misurazione di Castiglione non è stato possibile eseguire tale analisi in quanto è stata installata il 29 marzo 2013 ed è sprovvista della scala di deflusso. È importante sottolineare che a Ponte Gurone, poco più a monte di Lozza, il 12 dicembre 2009 è stata inaugurata la vasca di laminazione (Varesenews s.d.). Superata la fase di collaudo verificatasi tra maggio e giugno del 2010, l'opera di prevenzione delle piene è stata attivata; in particolare il decimo evento considerato per la stazione di Castellanza coincide con l'entrata in funzione della diga.

6.1.1.1 Lozza

Per la stazione di Lozza, inizialmente sono stati presi in esame i dieci eventi riportati nella Tabella 6-1. Dopo una analisi più accorta si è deciso di non considerare l'ottavo evento nella stima degli indici in quanto l'andamento della portata osservata risulta essere poco realistico: si presume che nell'occasione ci sia stato un malfunzionamento dello strumento. E' possibile apprezzare quanto detto nella Figura 6-2, dove sono rappresentati tutti gli eventi trovati.

Tabella 6-1: eventi presi in esame per la stazione di Lozza. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.

	inizio	fine
1	01/11/2004 01:00:00	03/11/2004 23:00:00
2	21/08/2007 10:00:00	23/08/2007 09:00:00
3	16/05/2008 21:00:00	20/05/2008 00:00:00
4**	05/02/2009 15:00:00	09/02/2009 19:00:00
5**	27/04/2009 02:00:00	30/04/2009 16:00:00
6**	06/07/2009 18:00:00	10/07/2009 20:00:00
7**	14/07/2009 19:00:00	16/07/2009 19:00:00
8**	02/05/2010 09:00:00	03/05/2010 11:00:00
9**	10/05/2010 17:00:00	15/05/2010 03:00:00
10**	15/11/2010 11:00:00	17/11/2010 12:00:00



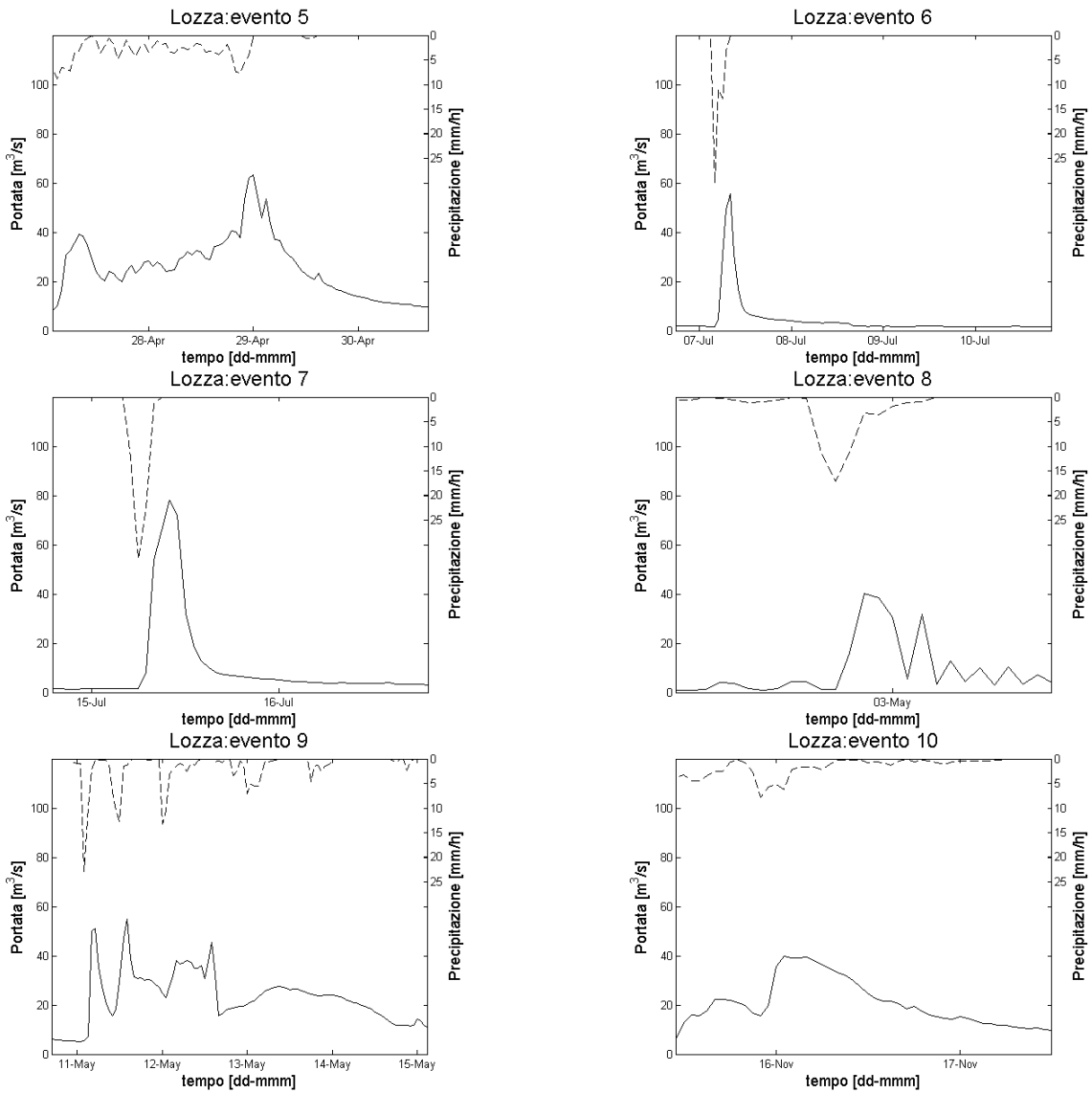


Figura 6-2: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Lozza, ponte Vedano.

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 0.02 e sottraendo al coefficiente CN 10 unità. In Tabella 6-2 sono riportati i valori degli indici stimati.

Tabella 6-2: stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza.

# eventi	err $Q_{max}[-]$		era $t_{max}[h]$		RMSE[m ³ /s]		Nash[-]	
	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata
1	-0.73	0.26	0	-1	9.89	5.18	-0.61	0.80
2	0.18	0.36	2	2	10.96	12.69	0.65	0.65
3	-0.22	0.46	-1	-2	7.71	9.20	0.26	0.60
4	-0.46	-0.12	-4	-4	14.66	8.67	0.13	0.66
5	-0.02	0.23	-2	-2	13.23	9.56	0.40	0.69
6	-0.90	-0.65	0	-1	8.29	6.06	-3.73	-1.03
7	-0.81	-0.58	-2	-3	17.92	16.21	-3.17	-2.31
9	-0.84	0.26	-1	-2	22.23	13.63	-0.21	0.31
10	-0.77	-0.20	1	1	18.93	12.06	-0.16	0.25

MEDIA	-50.7%	0.27%	-0.78	-1.33	13.76	10.36	-0.71	0.07
Dev.St	0.40	0.41						

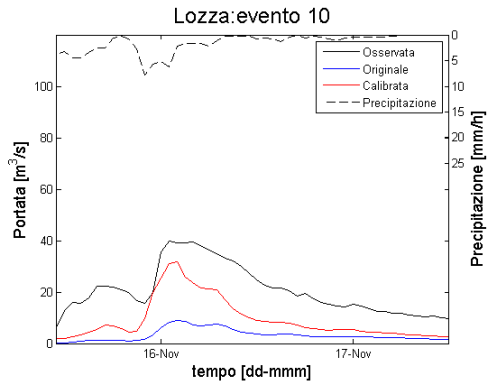
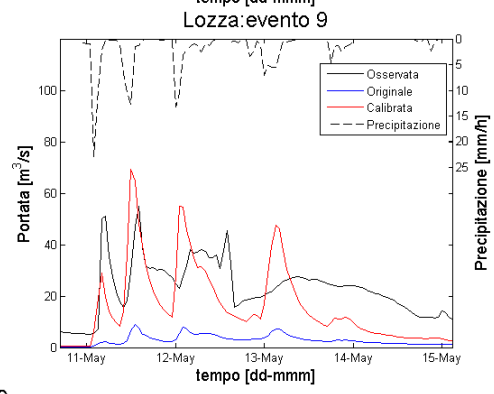
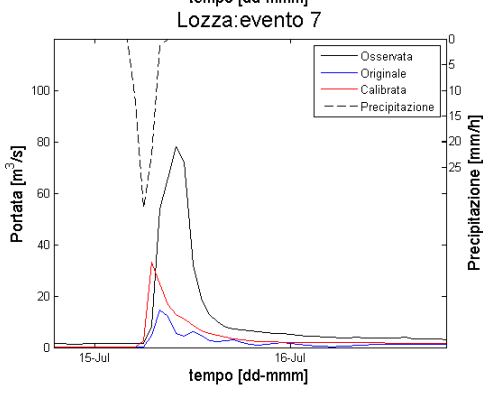
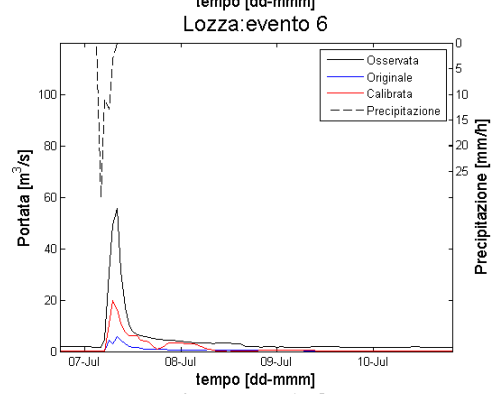
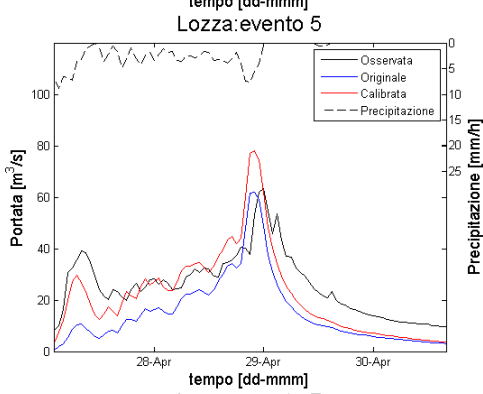
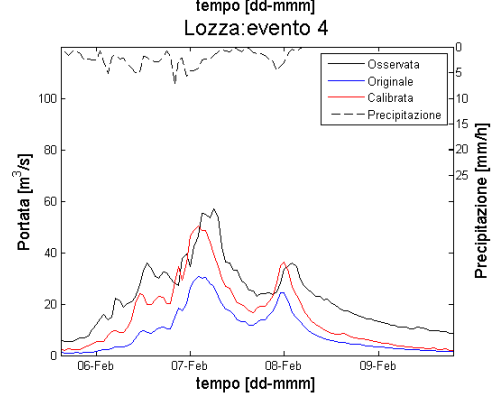
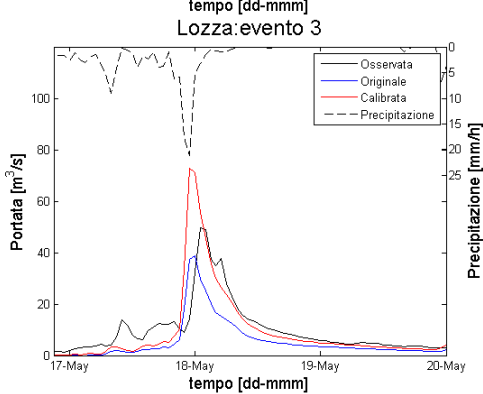
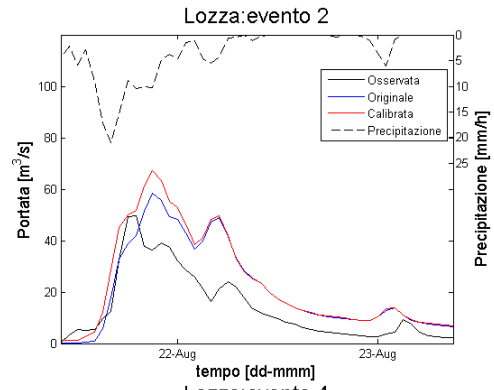
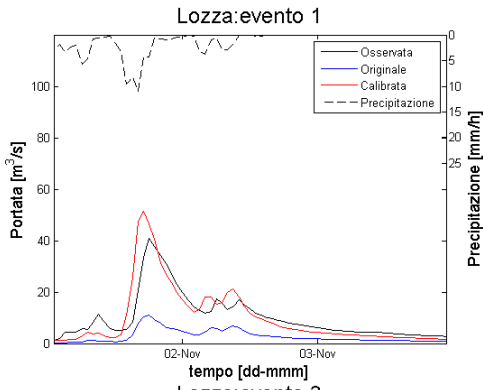


Figura 6-3: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza, ponte Vedano.

Dai grafici appena mostrati è possibile fare già una prima considerazione sulla risposta del modello. Gli eventi 6 e 7 sono il risultato di tipici temporali estivi, molto intensi, di breve durata ma poco estesi sul territorio: in questi casi il modello produce una consistente sottostima delle portate. Questo comportamento può essere imputabile alle condizioni di scarsa umidità del suolo all’inizio dell’evento, tipiche di un mese estivo come Luglio, che causano un deflusso superficiale limitato; Analogamente si può spiegare ciò che succede nell’evento 9, dove si hanno una successione di precipitazioni piuttosto intense e di breve durata: si può vedere infatti che il primo picco di portata viene molto sottostimato, mentre i successivi vengono addirittura sovrastimati, nonostante il primo evento di pioggia sia quello più consistente.

Come controprova e per dimostrare che la sottostima è da imputare alle condizioni iniziali, ci si è concentrati sul giorno in cui si verifica il picco di portata nell’evento 6, il 07 Luglio 2009: si ha una condizione iniziale di umidità del suolo media sul bacino di 0.29. E’ stato ripetuta la simulazione impostandone una diversa, riferita al 29 Aprile 2009, che ha portato alla sovrastima del picco dell’evento 5: l’umidità del suolo media è di 0.41. In Figura 6-4 sono messe a confronto le mappe di umidità coinvolte.

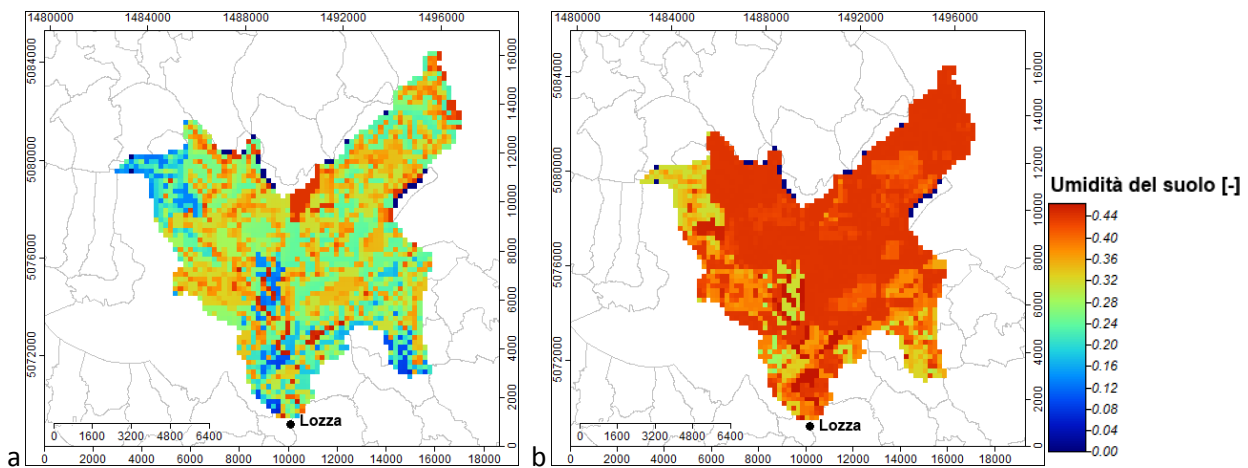


Figura 6-4: mappe dell’umidità del suolo del 07-07-2009 (a) e del 29-04-2009(b).

I risultati delle due diverse simulazioni sono mostrate in Figura 6-5 in cui si può vedere che le nuove condizioni iniziali di umidità del suolo sono sufficienti ad ottenere una portata massima quasi doppia rispetto a quella osservata, che invece con quelle originali veniva decisamente sottostimata.

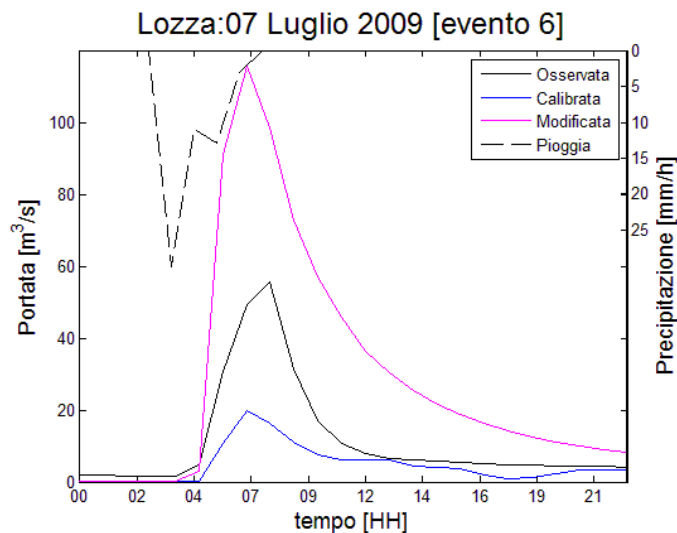


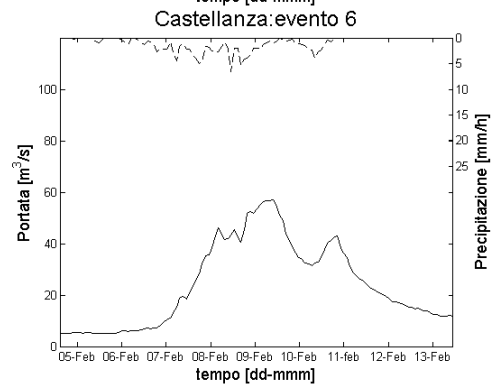
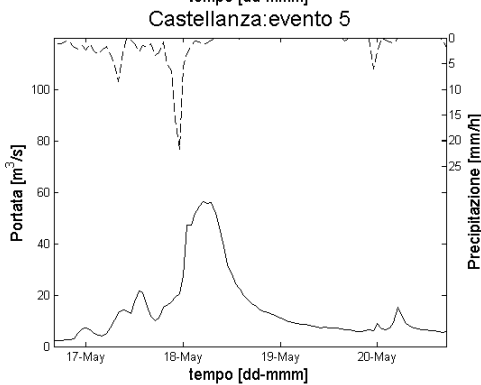
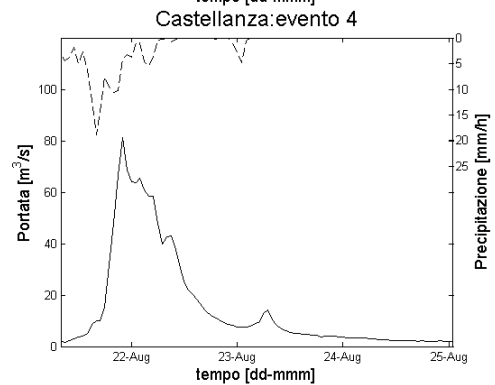
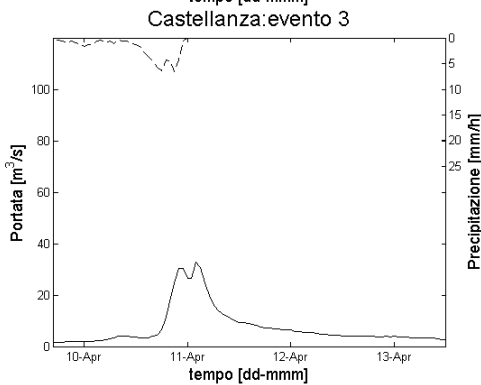
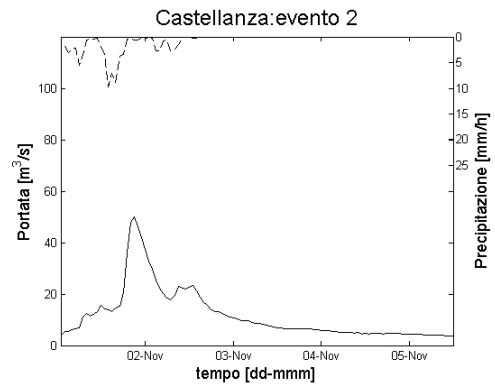
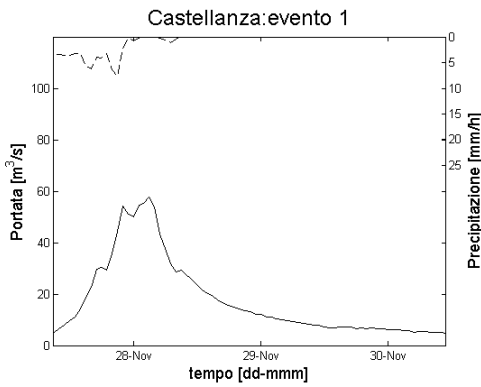
Figura 6-5: confronto tra i risultati ottenuti con due diverse condizioni iniziali.

6.1.1.2 Castellanza

Per la stazione di Castellanza sono stati presi in esame i dieci eventi riportati nella Tabella 6-3.

Tabella 6-3: eventi presi in esame per la stazione di Castellanza. *=dati mancanti. Per ovviare al problema si sono congiunte le misure presenti con un andamento lineare; *=è entrata in funzione la diga di Ponte Gurone.**

	inizio	fine
1	27/11/2003 09:00:00	30/11/2003 11:00:00
2*	01/11/2004 01:00:00	05/11/2004 12:00:00
3	09/04/2006 17:00:00	13/04/2006 12:00:00
4	21/08/2007 08:00:00	25/08/2007 01:00:00
5	16/05/2008 16:00:00	20/05/2008 17:00:00
6	04/02/2009 15:00:00	13/02/2009 11:00:00
7	26/04/2009 15:00:00	04/05/2009 11:00:00
8	07/07/2009 01:00:00	08/07/2009 19:00:00
9	10/05/2010 22:00:00	18/05/2010 01:00:00
10***	30/10/2010 22:00:00	05/11/2010 08:00:00



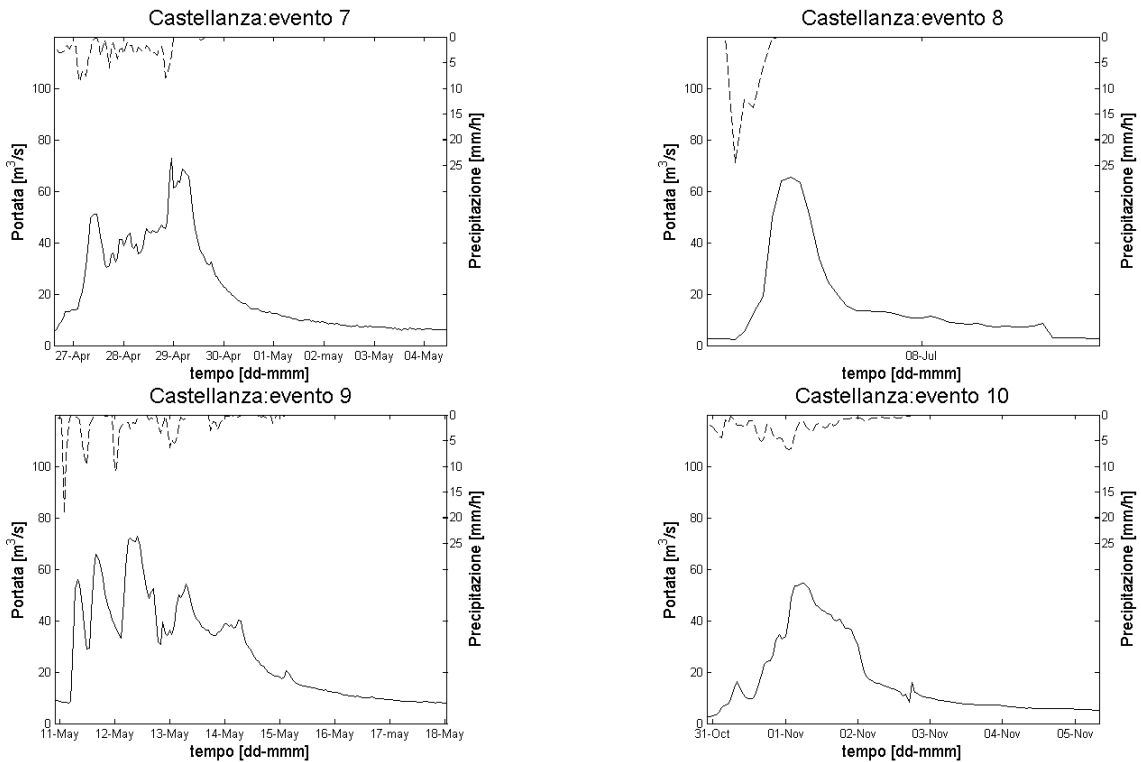


Figura 6-6: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Castellanza.

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 0.04 e sommando al coefficiente CN 5 unità. In Tabella 6-4 sono riportati i valori degli indici stimati.

Tabella 6-4: stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza.

# eventi	err $Q_{max}[-]$		era $t_{max}[h]$		RMSE $[m^3/s]$		Nash $[-]$	
	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata
1	-0.75	-0.02	-2	-3	19.83	10.20	-0.62	0.52
2	-0.76	0.11	-1	-2	12.39	6.02	-0.56	0.73
3	-0.76	-0.63	2	-1	9.83	7.95	-1.12	-0.58
4	-0.18	-0.03	1	1	8.12	5.00	0.78	0.94
5	-0.21	0.53	-3	-4	12.13	9.18	0.03	0.67
6	-0.42	0.03	-5	-5	17.96	10.12	-0.01	0.67
7	0.06	0.43	0	0	15.10	10.33	0.34	0.77
8	-0.93	-0.69	4	0	22.50	18.60	-1.41	-1.20
9	-0.87	0.00	-5	-7	29.80	17.93	-0.43	0.26
10	-0.36	0.28	-1	-2	11.62	6.07	0.11	0.87
MEDIA	-51.8%	0.12%	-2.3	-3.60	15.93	10.14	-0.29	0.36
Dev.St	0.34	0.40						

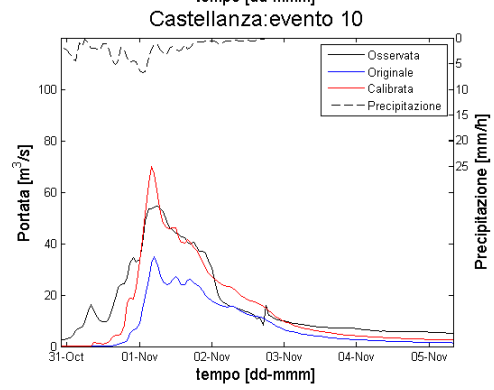
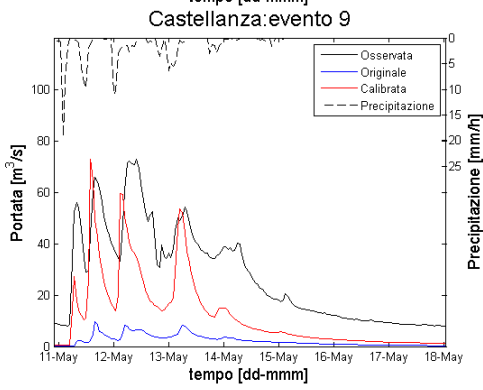
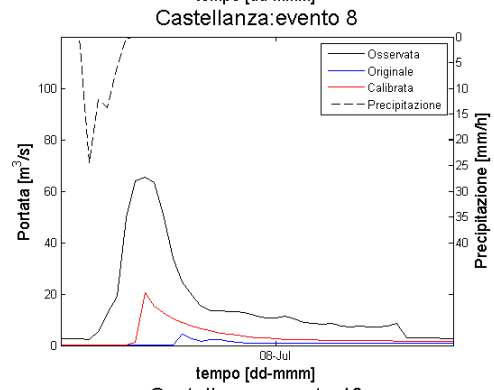
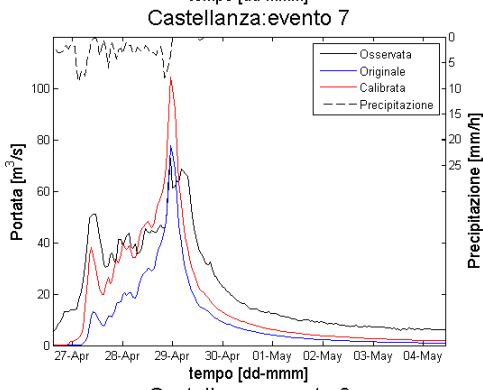
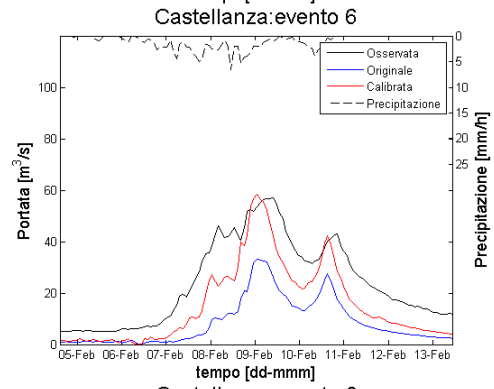
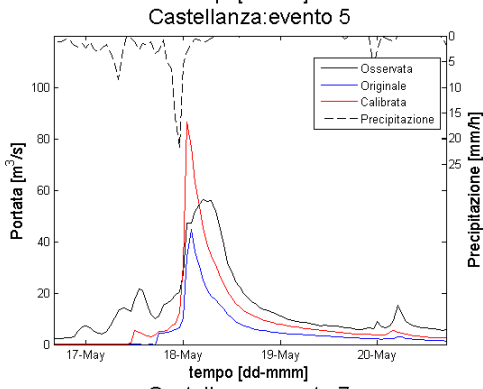
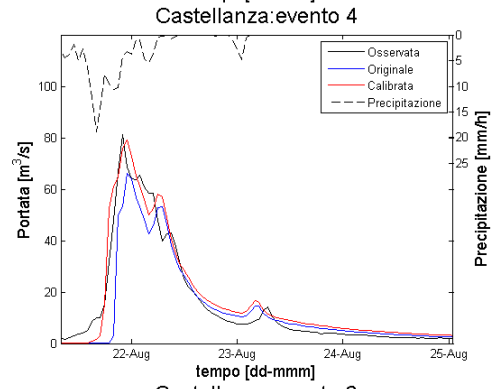
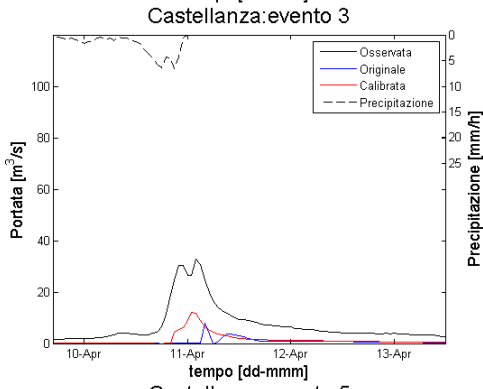
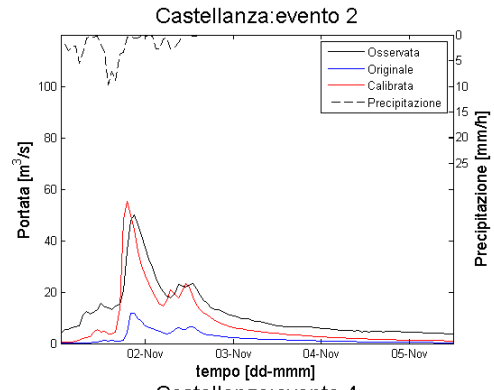
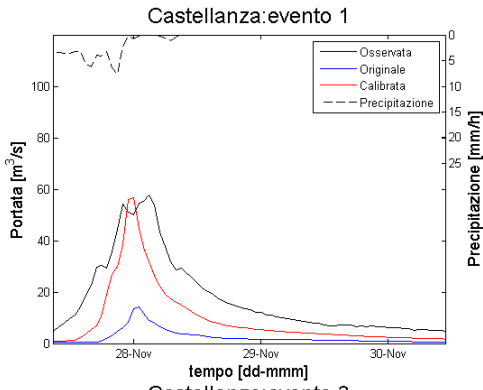


Figura 6-7: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

6.1.2 Seveso

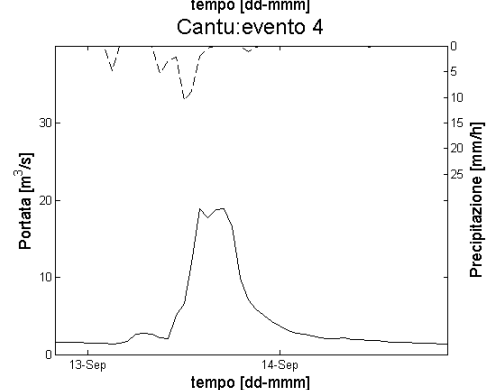
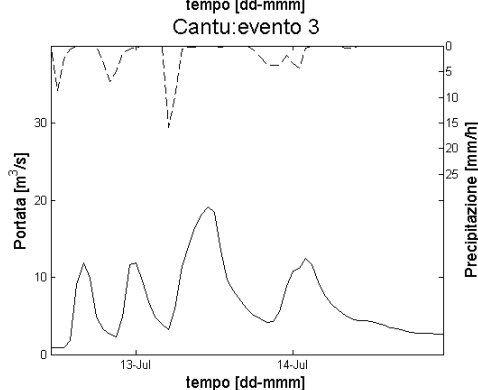
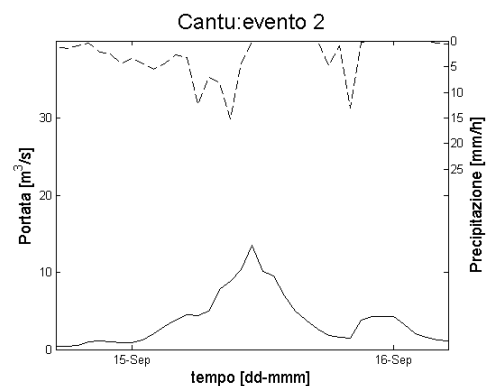
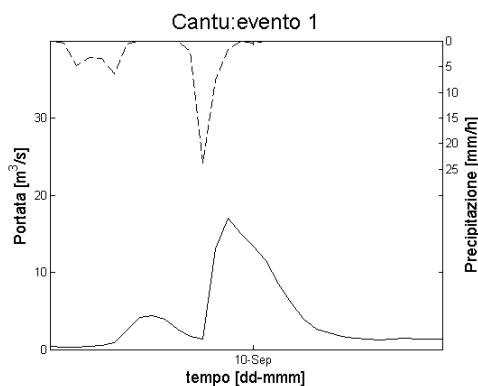
La sezione presa in esame è quella di Cantù. Per la stazione di Paderno Dugnano non è stato possibile eseguire tale analisi in quanto sprovvista della scala di deflusso: l'idrometro è posto vicino all'ingresso del canale scolmatore Nord Ovest, di conseguenza il livello dell'acqua risente della struttura.

6.1.2.1 Cantù

Per la stazione di Cantù sono stati presi in esame i sette eventi riportati nella Tabella 6-5. Nello specifico sono gli eventi che si sono verificati fino al 2009, l'anno 2010 verrà utilizzato in seguito nella fase di validazione (paragrafo 6.2.2.1) in quanto non sono presenti i valori storici del livello idrometrico degli ultimi anni: 2011-2012 utilizzati per la validazione delle altre stazioni.

Tabella 6-5: eventi presi in esame per la stazione di Cantù.

	inizio	fine
1	09/09/2005 08:00:00	10/09/2005 15:00:00
2	14/09/2006 17:00:00	16/09/2006 05:00:00
3	12/07/2008 11:00:00	14/07/2008 23:00:00
4	12/09/2008 20:00:00	14/09/2008 21:00:00
5	06/02/2009 03:00:00	08/02/2009 20:00:00
6	26/04/2009 09:00:00	30/04/2009 03:00:00
7	23/12/2009 20:00:00	27/12/2009 01:00:00



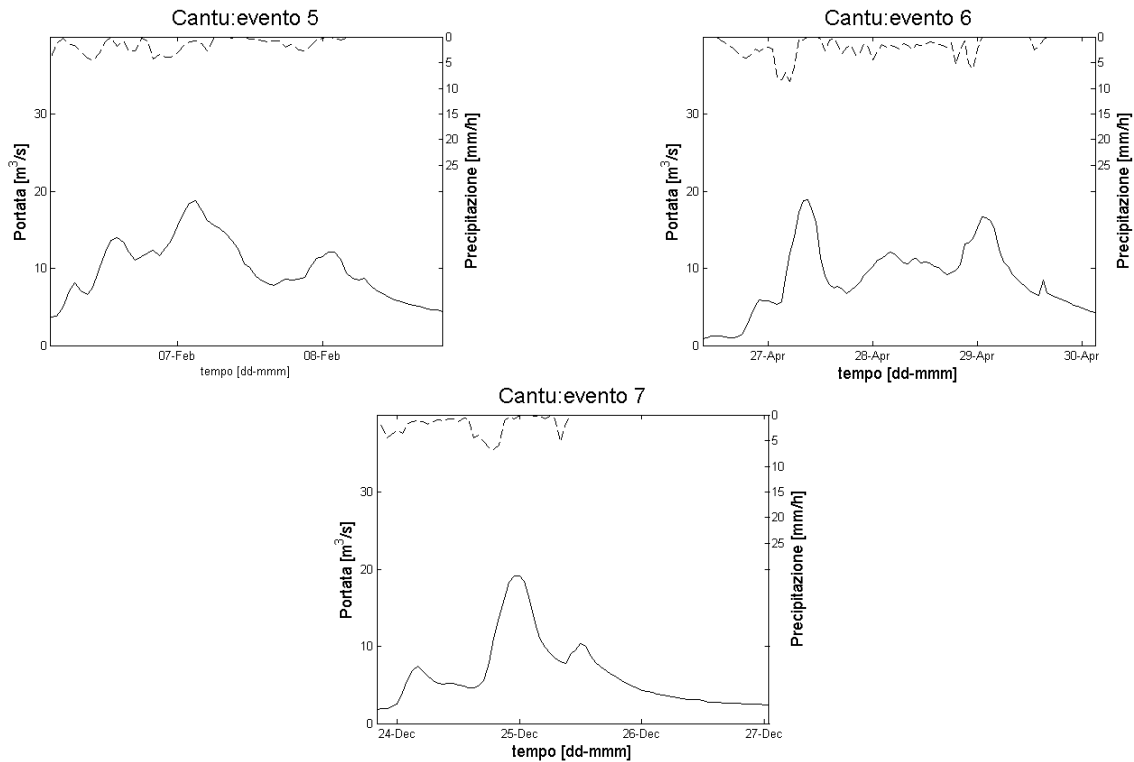
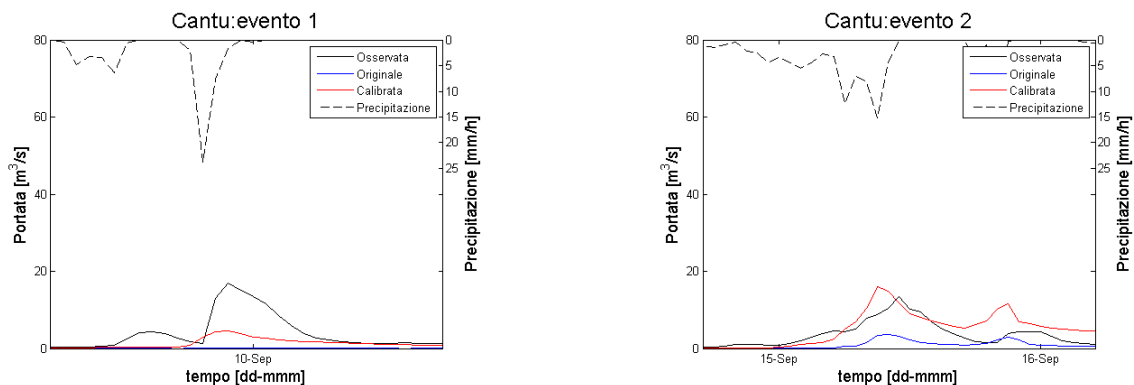


Figura 6-8: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Cantù.

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 0.01 e sommando al coefficiente CN 10 unità. In Tabella 6-6 sono riportati i valori degli indici stimati.

Tabella 6-6: stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù.

# eventi	err $Q_{max}[-]$		era $t_{max}[h]$		RMSE[m ³ /s]		Nash[-]	
	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata
1	-0.99	-0.73	1	0	6.1091	4.55	-1.33	-1.39
2	-0.73	0.18	-1	-2	3.7722	3.16	-0.62	0.51
3	-1.00	-0.58	3	-4	8.1775	6.03	-0.44	-0.61
4	-0.99	-0.76	4	0	6.6758	5.62	-1.37	-1.31
5	-0.93	-0.51	-2	-3	9.9454	5.48	-0.15	-0.16
6	-0.61	0.25	3	3	7.7369	3.33	-0.24	0.62
7	0.66	1.38	9	9	5.5441	8.98	0.22	0.24
MEDIA	-65.5%	-10.9%	7.57	5.43	6.8516	5.31	-0.56	-0.30
Dev.St	0.60	0.78						



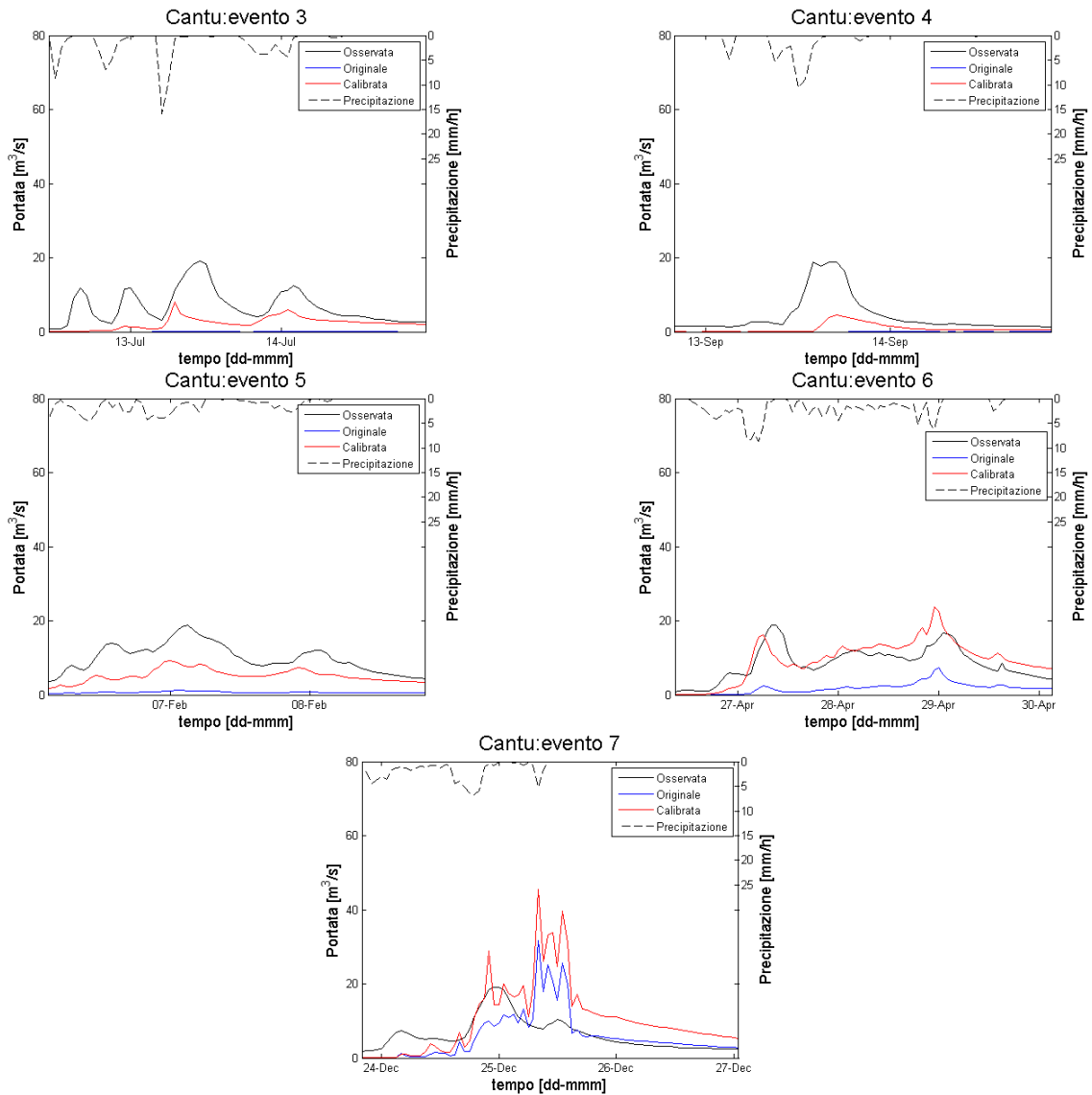


Figura 6-9: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù.

Nell'evento 7, le precipitazioni osservate non sono sufficienti a spiegare l'andamento delle portate simulate; questo perché entra in gioco la dinamica della neve che ha una certa rilevanza per bacini piccoli montani come quello del Seveso chiuso a Cantù. In particolare determina un ritardo nella propagazione del picco, oltre che una consistente sovrastima. Nella Figura 6-10 è mostrato come prima dell'evento ci sia un aumento dello SWE, vale a dire che per il modello le precipitazioni sono di carattere nevoso; proprio in corrispondenza del primo picco di portata simulata (ultime ore del 24 Dicembre), tale grandezza comincia a diminuire, segno che la neve fusa va ad aggiungersi al deflusso superficiale causato dalle precipitazioni.

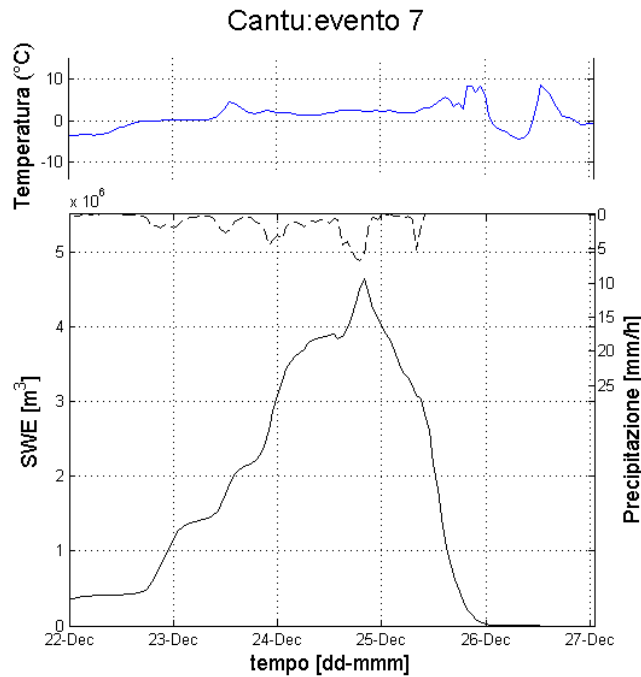


Figura 6-10: andamento dello SWE nel bacino del Seveso chiuso a Cantù prima e durante l'evento 7.

6.1.3 Lambro

La calibrazione del fiume Lambro è risultata più complicata rispetto ai fiumi sopra citati. Il bacino di interesse, oltre a essere caratterizzato a nord dalla presenza del lago di Pusiano e Alserio, che determinano una laminazione delle portate derivanti da monte, presenta a sud un territorio con un elevato grado di urbanizzazione: ne segue una variazione del bacino idrografico rispetto a quello che si avrebbe in condizioni "naturali".

Inizialmente nel modello idrologico venivano tenuti in considerazione gli invasi presenti nel territorio in esame, ma dopo una attenta analisi si è notato come tale presenza determina una laminazione eccessiva delle piene. Infatti, la mancata conoscenza dei parametri idraulici necessari per la descrizione del processo di svaso e invaso e sull'incertezza riguardante l'influenza della sua regolazione da parte dell'uomo sul livello del Lambro, hanno reso la loro modellazione estremamente complicata.

Queste difficoltà hanno interessato soprattutto la sezione di Lambrugo, immediatamente a valle del lago di Pusiano: considerare tale stazione di rilevamento avrebbe reso impossibile una soddisfacente calibrazione delle stazioni a valle, che costituisce il vero obiettivo di questo studio. Pertanto le sezioni prese in esame sono quelle di Caslino d'Erba, Peregallo e Milano. Inoltre per le ultime due sono stati eliminati alcuni eventi, in quanto concomitanti con le regolazioni del lago di Pusiano.



Figura 6-11: paratoia di regolazione del cavo Diotti.

Successivamente ci siamo concentrati sulla definizione del bacino idrografico nei dintorni di Milano; la presenza delle fognature e la minima pendenza che caratterizza questa porzione di territorio hanno determinato un'incertezza nell'individuazione dell'area che determina il deflusso superficiale. Inizialmente il bacino idrografico "naturale", mostrato in Figura 2-7 era caratterizzato da un'area di 380 kmq, dopo tale analisi è risultato di circa 500 kmq: sono stati aggiunti i territori dei comuni di Nova Milanese, Desio, Seregno, Giussano, Concorezzo, Arcore, Camparada e Usmate Velate, a partire dai quali i collettori dell'ALSI s.p.a. (Alto Lambro Servizi Idrici s.p.a.) si diramano verso il corso d'acqua, come visibile da Figura 6-12.

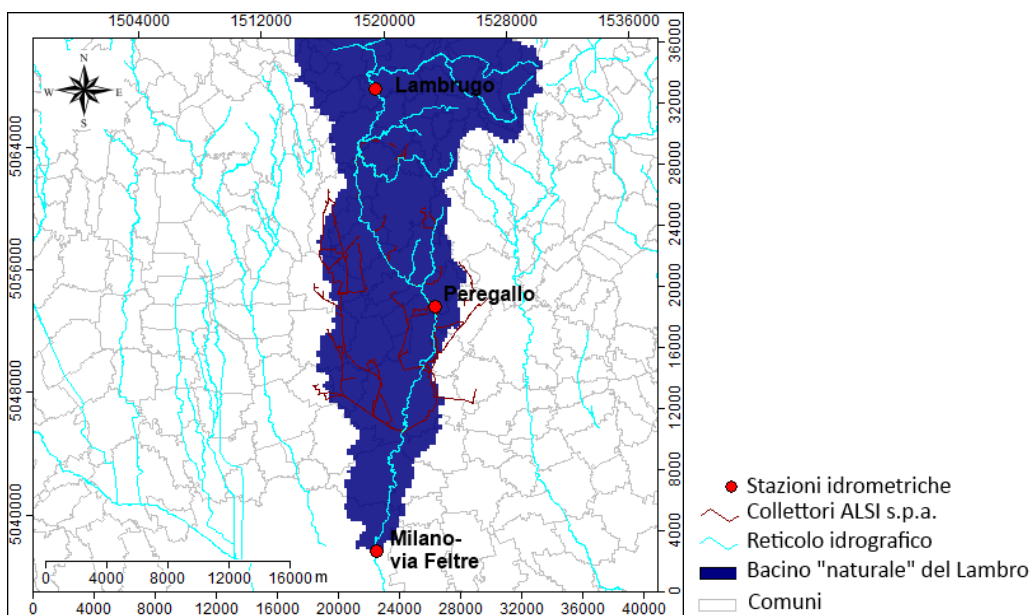


Figura 6-12: rete dei collettori ALSI s.p.a.

Per garantire una maggiore compatibilità tra i dati simulati e quelli osservati in termini di tempo del picco di piena, si è deciso di calibrare prima dei parametri K_{sat} e CN le variabili che regolano la propagazione del deflusso superficiale e che dipendono dall'area drenata da ciascuna cella:

- r_f , parametro geometrico che tiene conto della larghezza del corso d'acqua;
- il coefficiente di Strickler, ks , grandezza che varia rispetto alla scabrezza della superficie di riferimento;
- l'area soglia minima, che consente di distinguere una cella tra tipo "versante" e "canale".

Il risultato finale è stato ottenuto imponendo i valori riportati in Tabella 6-7 per quanto riguarda ks e r_f ; l'area soglia minima è stata imposta pari a 150000 mq.

Tabella 6-7: valore associati alle grandezza r_f e ks al variare dell'area soglia.

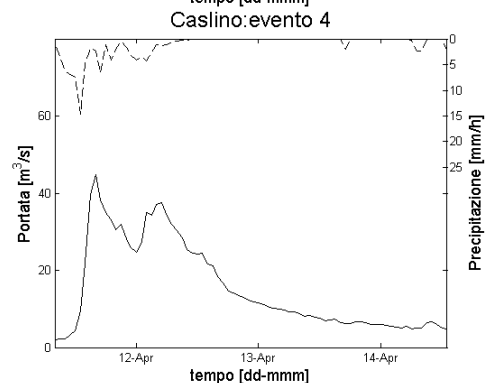
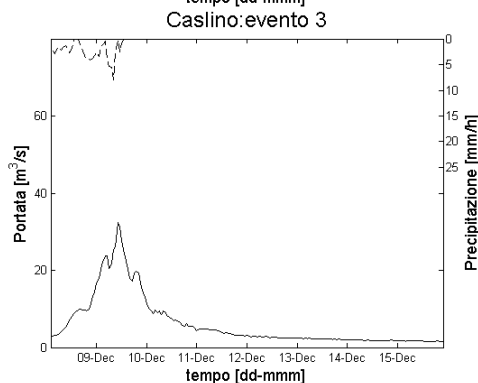
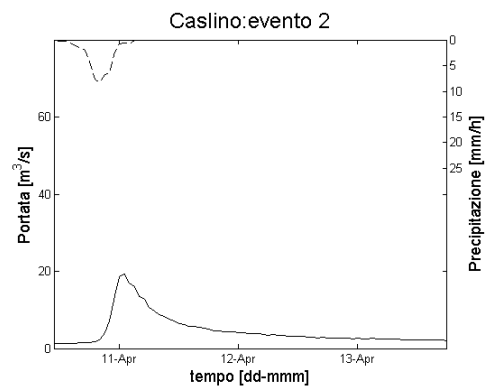
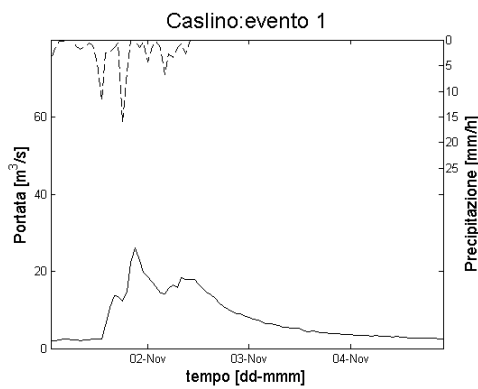
	area drenata [mq]	r_f [-]		ks [$m^1/3s^{-1}$]	
		default	calibrato	default	calibrato
1	< 1000000	5	5	20	10
2	< 5000000	7	7	25	12
3	< 10000000	10	10	30	30
4	< 20000000	20	20	35	35
5	< 30000000	25	25	40	40

6.1.3.1 Caslino d'Erba

Per la stazione di Caslino d'Erba sono stati presi in esame i dieci eventi riportati nella Tabella 6-8.

Tabella 6-8: eventi presi in esame per la stazione di Caslino d'Erba. *=dati mancanti in quelli osservati. Per ovviare al problema si sono congiunte le misure presenti con un andamento lineare. **= il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.

	inizio	fine
1*	01/11/2004 01:00:00	04/11/2004 22:00:00
2	10/04/2006 11:00:00	13/04/2006 18:00:00
3	08/12/2006 02:00:00	15/12/2006 22:00:00
4**	11/04/2008 08:00:00	14/04/2008 13:00:00
5	17/05/2008 19:00:00	20/05/2008 15:00:00
6**	05/02/2009 22:00:00	10/02/2009 13:00:00
7**	26/04/2009 23:00:00	03/05/2009 01:00:00
8**	17/07/2009 04:00:00	20/07/2009 15:00:00
9	02/05/2010 11:00:00	09/05/2010 16:00:00
10**	31/10/2010 08:00:00	06/11/2010 01:00:00



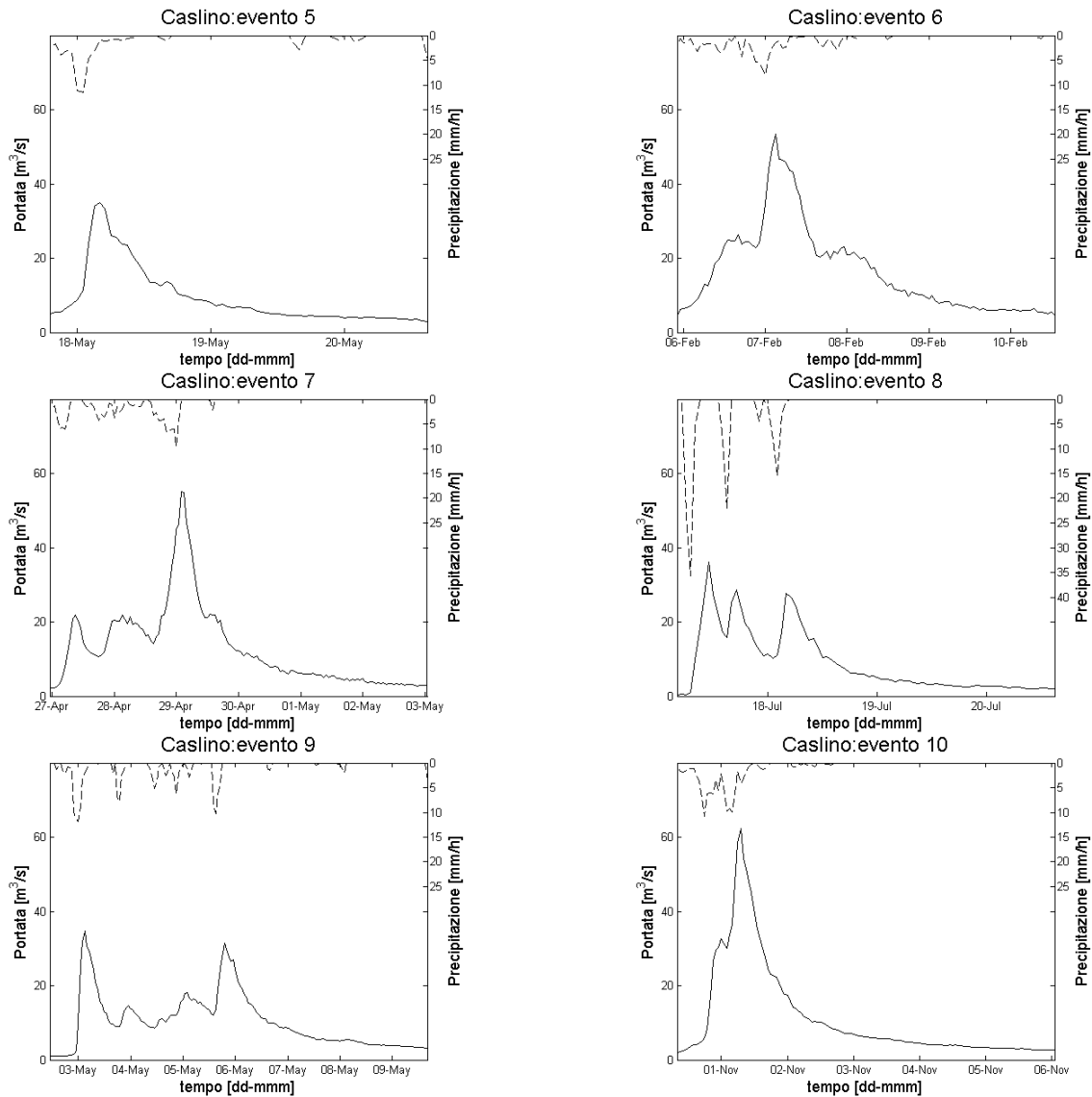


Figura 6-13: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Caslino d'Erba.

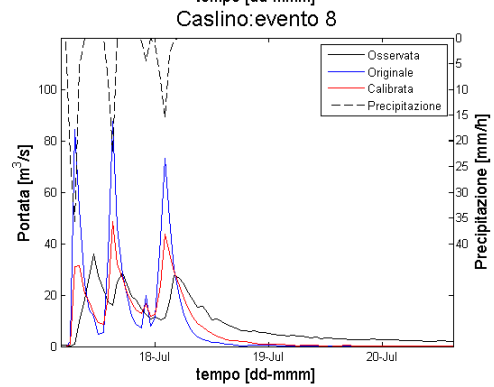
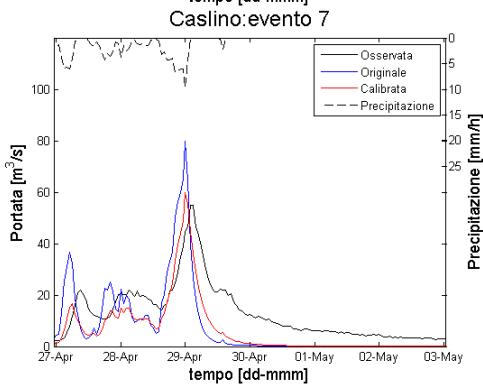
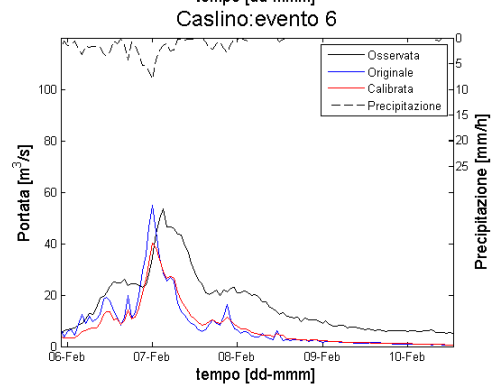
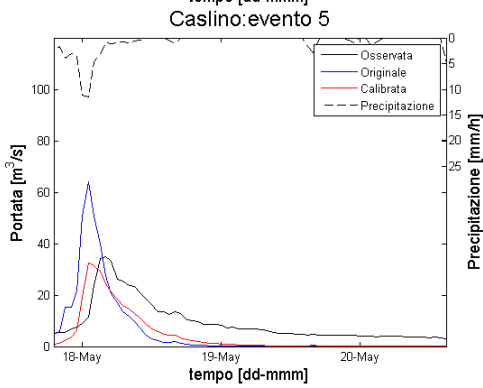
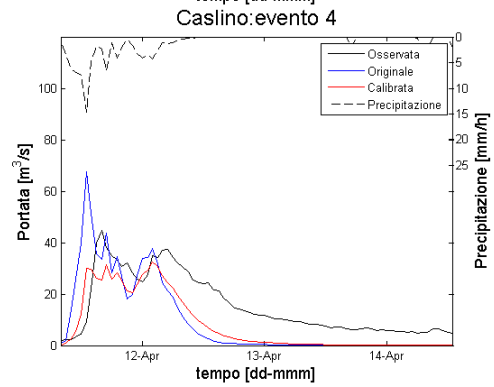
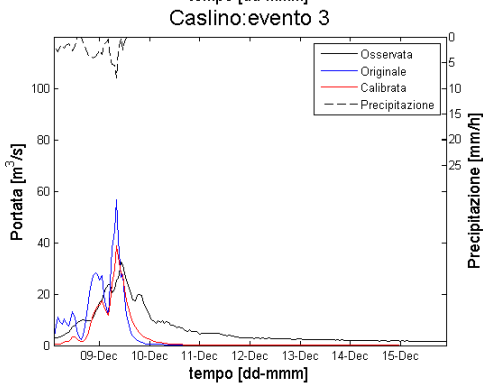
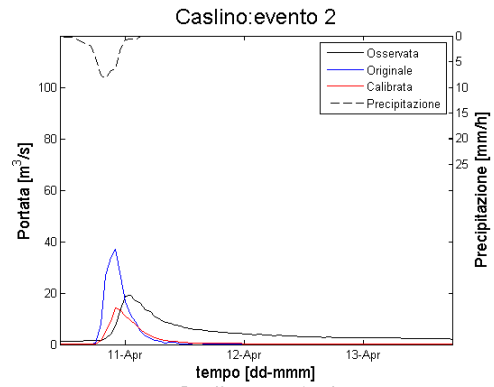
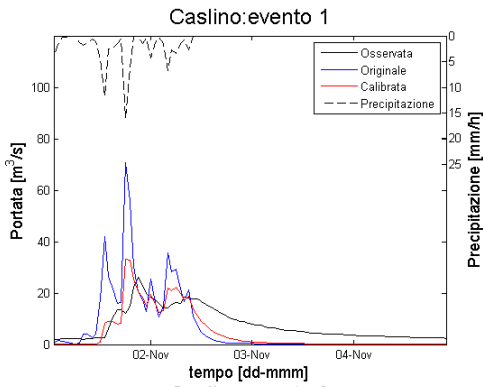
Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 3 e sommando al coefficiente CN 2 unità. In Tabella 6-9 sono riportati i valori degli indici stimati.

Tabella 6-9: stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino d'Erba.

# eventi	err Q_{max} [-]		era t_{max} [h]		RMSE [m^3/s]		Nash [-]	
	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata
1	1.72	0.27	-3	-3	10.73	5.44	0.29	0.59
2	0.92	-0.25	-3	-3	7.13	4.38	0.09	0.05
3	0.75	0.19	-2	-2	6.80	4.91	0.47	0.56
4	0.51	-0.27	-3	10	13.60	9.44	0.30	0.49
5	0.83	-0.08	-3	-3	11.46	6.76	0.27	0.48
6	0.03	-0.25	-3	-3	11.46	10.67	0.24	0.25
7	0.45	0.09	-2	-2	12.38	8.75	0.35	0.53
8	1.42	0.35	4	4	17.03	8.62	0.14	0.42
9	0.72	-0.13	-2	-2	11.20	9.10	0.08	0.01
10	0.50	0.15	-3	-3	14.40	8.61	0.48	0.73

MEDIA	78.4%	0.57%	-2	-0.70	11.62	7.67	0.27	0.41
--------------	-------	-------	----	-------	-------	------	------	------

Dev.St	0.49	0.23		
--------	------	------	--	--



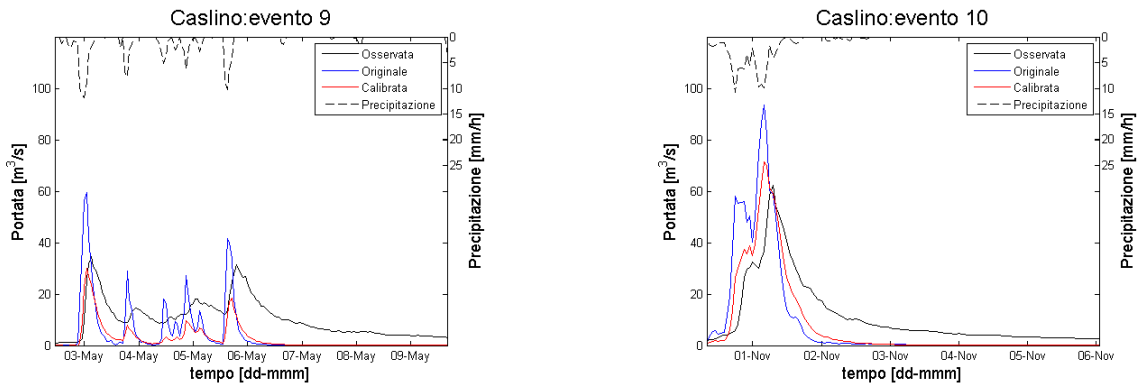


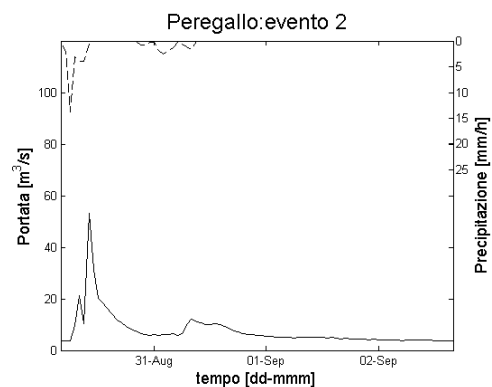
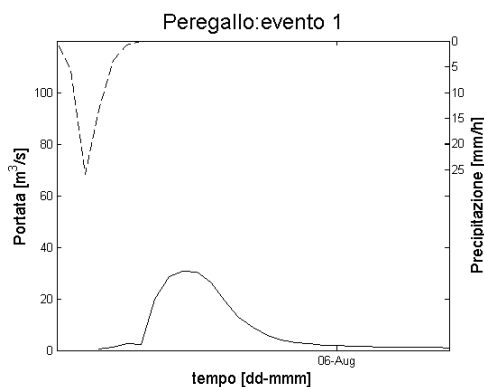
Figura 6-14: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Casino d'Erba.

6.1.3.2 Peregallo

Per la stazione di Peregallo, inizialmente sono stati presi in esame i dieci eventi riportati nella Tabella 6-10. Dopo una analisi più accorta si è deciso di non considerare gli eventi 1, 2, 3, 8 nella stima degli indici in quanto i primi due sono caratterizzati da dati in ingresso poco affidabili, cioè l'intensità della precipitazione osservata risulta troppo piccola per determinare l'idrogramma di piena osservato e i restanti sono interessati dalle regolazioni sul lago di Pusiano.

Tabella 6-10: eventi presi in esame per la stazione di Peregallo. *=dati mancanti in quelli osservati. Per ovviare al problema si sono congiunte le misure presenti con un andamento lineare. **= il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.

	inizio	fine
1*	05/08/2004 07:00:00	06/08/2004 08:00:00
2	30/08/2007 04:00:00	02/09/2007 16:00:00
3*	19/05/2008 12:00:00	28/05/2008 20:00:00
4	30/11/2008 21:00:00	07/12/2008 07:00:00
5	04/02/2009 09:00:00	16/02/2009 16:00:00
6**	26/04/2009 06:00:00	06/05/2009 16:00:00
7	23/12/2009 18:00:00	05/01/2010 08:00:00
8	09/05/2010 14:00:00	22/05/2010 00:00:00
9	10/08/2010 05:00:00	20/08/2010 18:00:00
10*	30/10/2010 20:00:00	06/11/2010 14:00:00



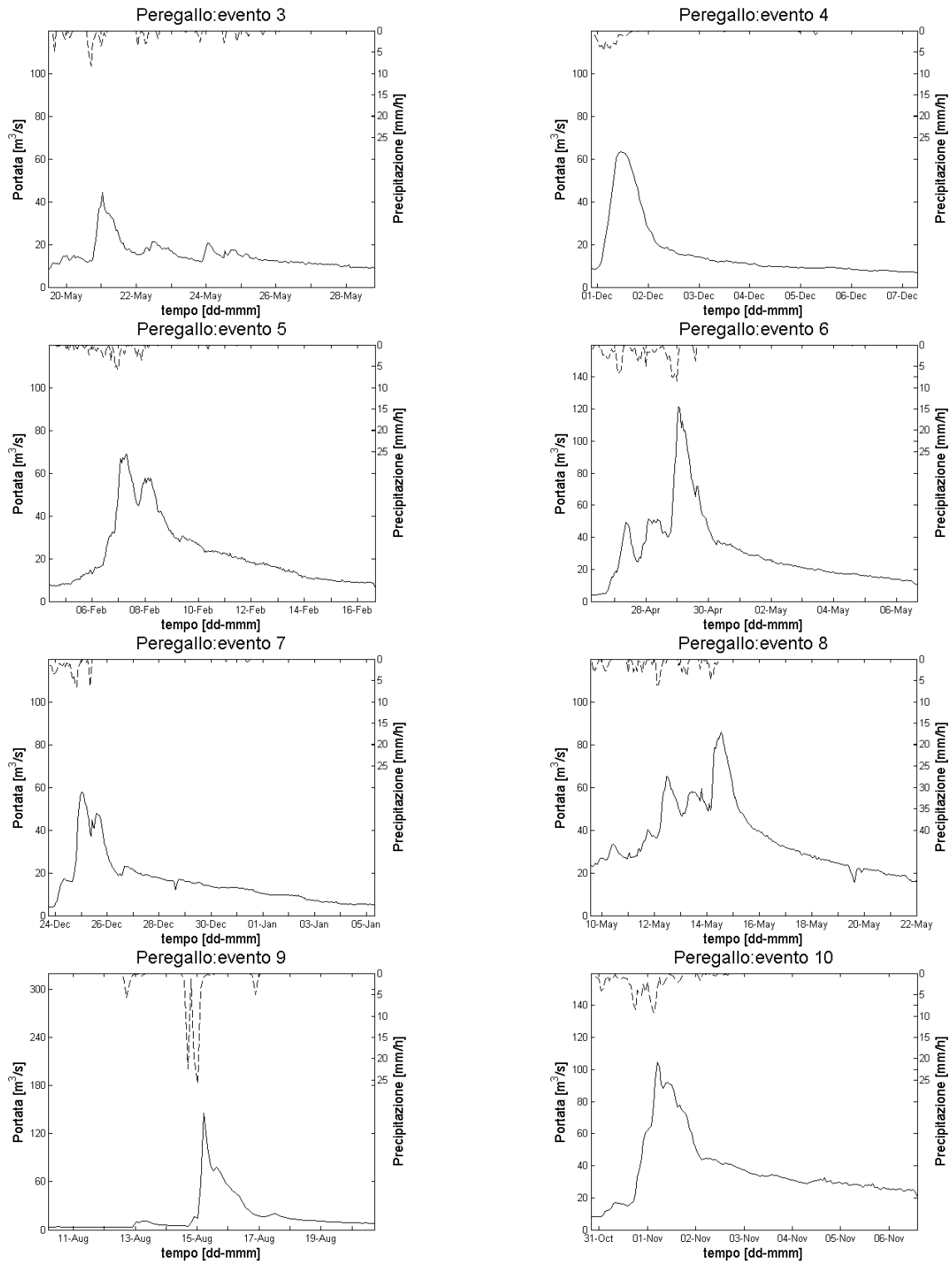
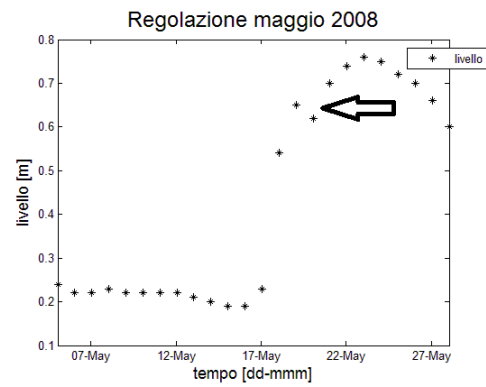
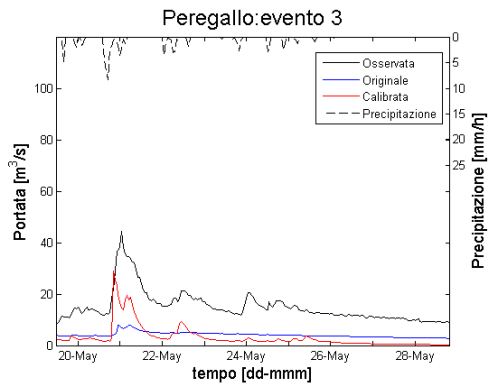


Figura 6-15: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Peregallo.

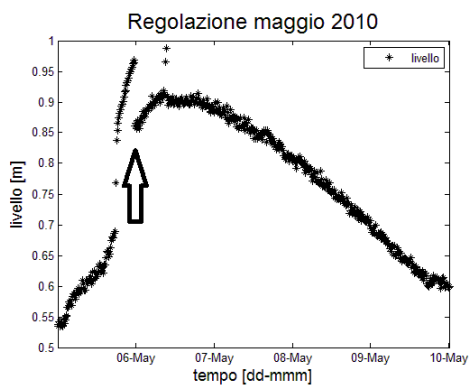
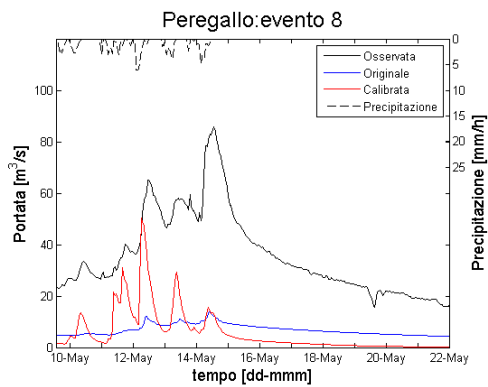
Come possiamo vedere dai grafici in Figura 6-16b e Figura 6-17b, i livelli del Cavo Diotti presentano degli andamenti riconducibili a una regolazione artificiale nei giorni precedenti all'evento di piena, il che ha portato all'esclusione dell'evento. Dalle Figura 6-16a e Figura 6-17a si vede come il modello calibrato non sia in grado di riprodurre adeguatamente né il picco di portata né il deflusso di base.



a

b

Figura 6-16: simulazione dell'evento di piena maggio 2008 (a); andamento giornaliero del livello idrico nel Cavo Diotti (b), (Parco Regionale della Valle del Lambro s.d.) .



a

b

Figura 6-17: simulazione dell'evento di piena maggio 2010(a);andamento del livello idrico nel Cavo Diotti, dati ogni 15 minuti (b), (Parco Regionale della Valle del Lambro s.d.).

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 0.6 e sommando al coefficiente CN 2 unità. In Tabella 6-11 sono riportati i valori degli indici stimati.

Tabella 6-11: stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo.

# eventi	err Q_{max} [-]		era t_{max} [h]		RMSE[m ³ /s]		Nash[-]	
	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata
4	-0.81	-0.55	-2	1	16.41	13.56	-1.03	-0.21
5	-0.82	0.03	-2	-5	21.02	17.08	-0.62	0.18
6	-0.66	0.09	0	1	26.03	18.75	-0.43	0.52
7	-0.53	0.38	-3	-3	9.65	9.45	-0.20	0.68
9	-0.81	-0.18	3	0	21.63	8.72	-2.50	0.84
10	-0.70	0.32	2	1	29.16	23.09	-0.23	0.55
MEDIA	-72.1%	1.5%	-0.33	-0.83	20.65	15.11	-0.83	0.43
Dev.St	0.12	0.34						

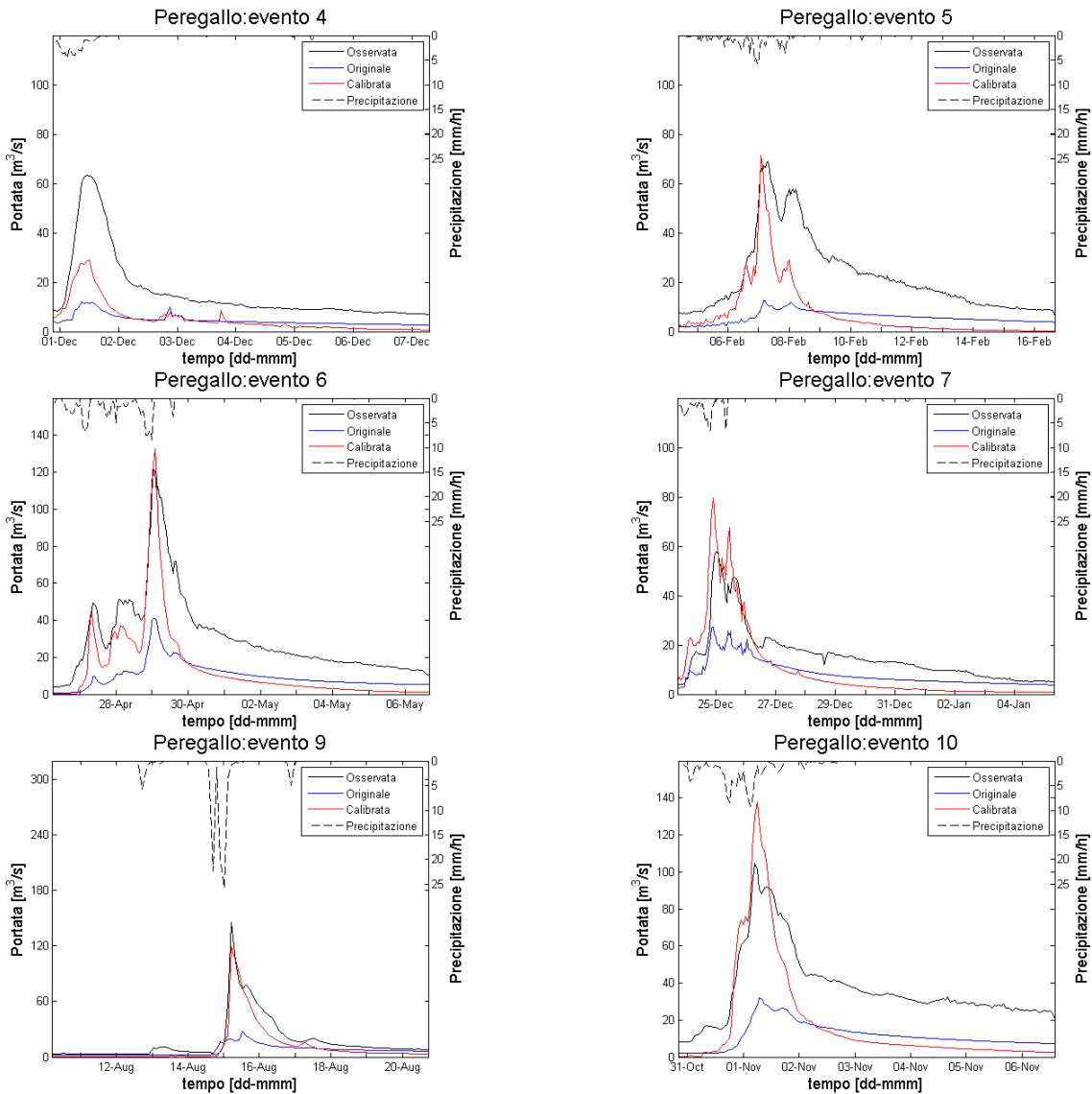


Figura 6-18: risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

6.1.3.3 Milano via Feltre

Per la stazione di Milano, inizialmente sono stati presi in esame i dieci eventi riportati nella Tabella 6-12. Dopo una analisi più accorta si è deciso di non considerare il terzo evento nella stima degli indici in quanto caratterizzato da dati in ingresso poco affidabili, cioè l'intensità della precipitazione osservata risulta troppo piccola per determinare l'idrogramma di piena osservato.

Tabella 6-12: eventi presi in esame per la stazione di Milano.

	inizio	fine
1	29/11/2004 10:00:00	01/12/2004 19:00:00
2	09/09/2005 09:00:00	11/09/2005 10:00:00
3	16/09/2007 21:00:00	18/09/2007 10:00:00
4	17/05/2008 14:00:00	19/05/2008 11:00:00
5	04/11/2008 13:00:00	07/11/2008 04:00:00
6	26/04/2009 15:00:00	02/05/2009 19:00:00
7	07/07/2009 05:00:00	09/07/2009 07:00:00
8	12/08/2010 02:00:00	14/08/2010 10:00:00
9	18/09/2010 08:00:00	21/09/2010 09:00:00
10	30/10/2010 22:00:00	04/11/2010 04:00:00

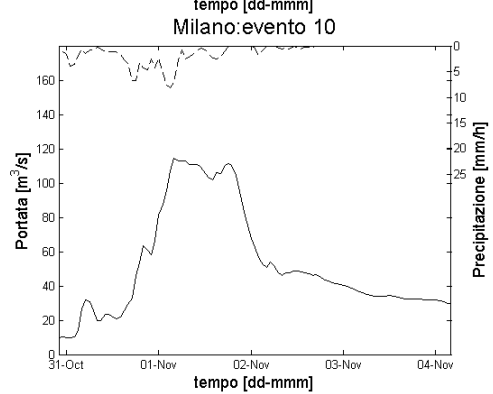
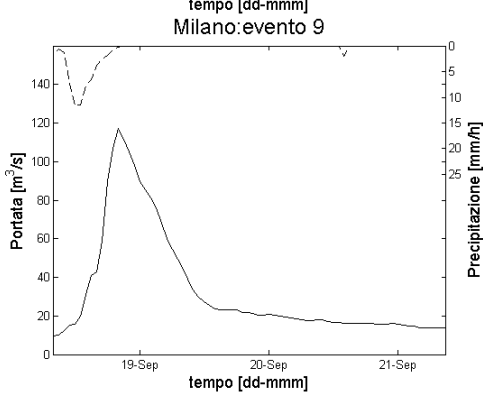
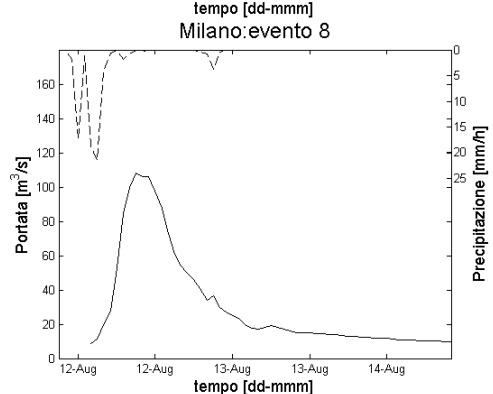
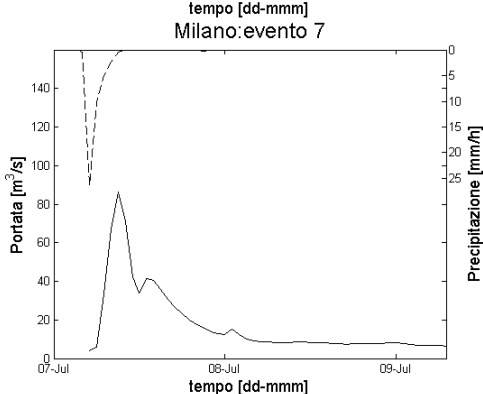
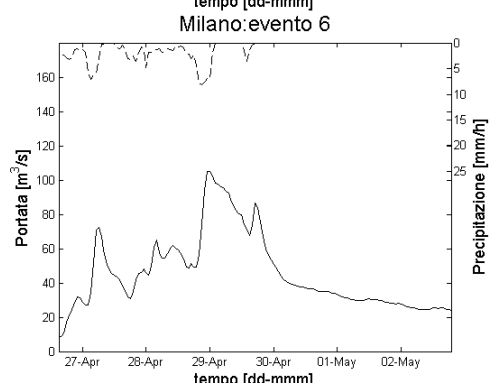
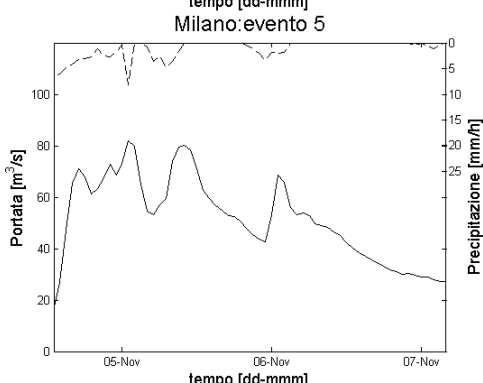
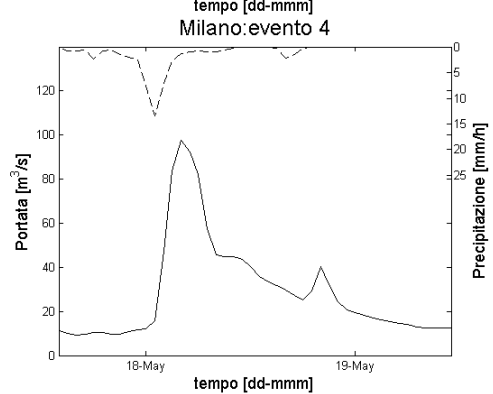
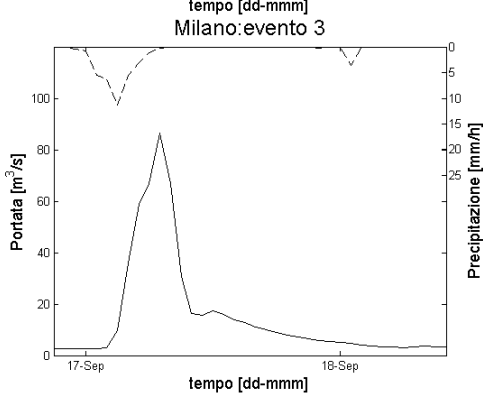
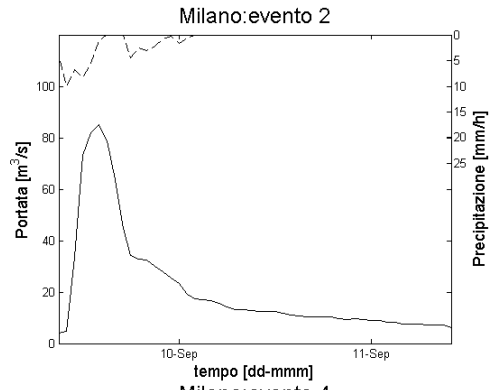
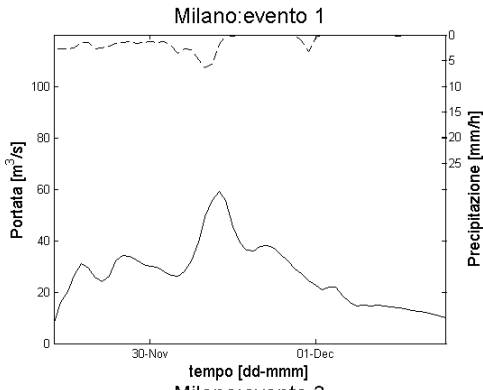
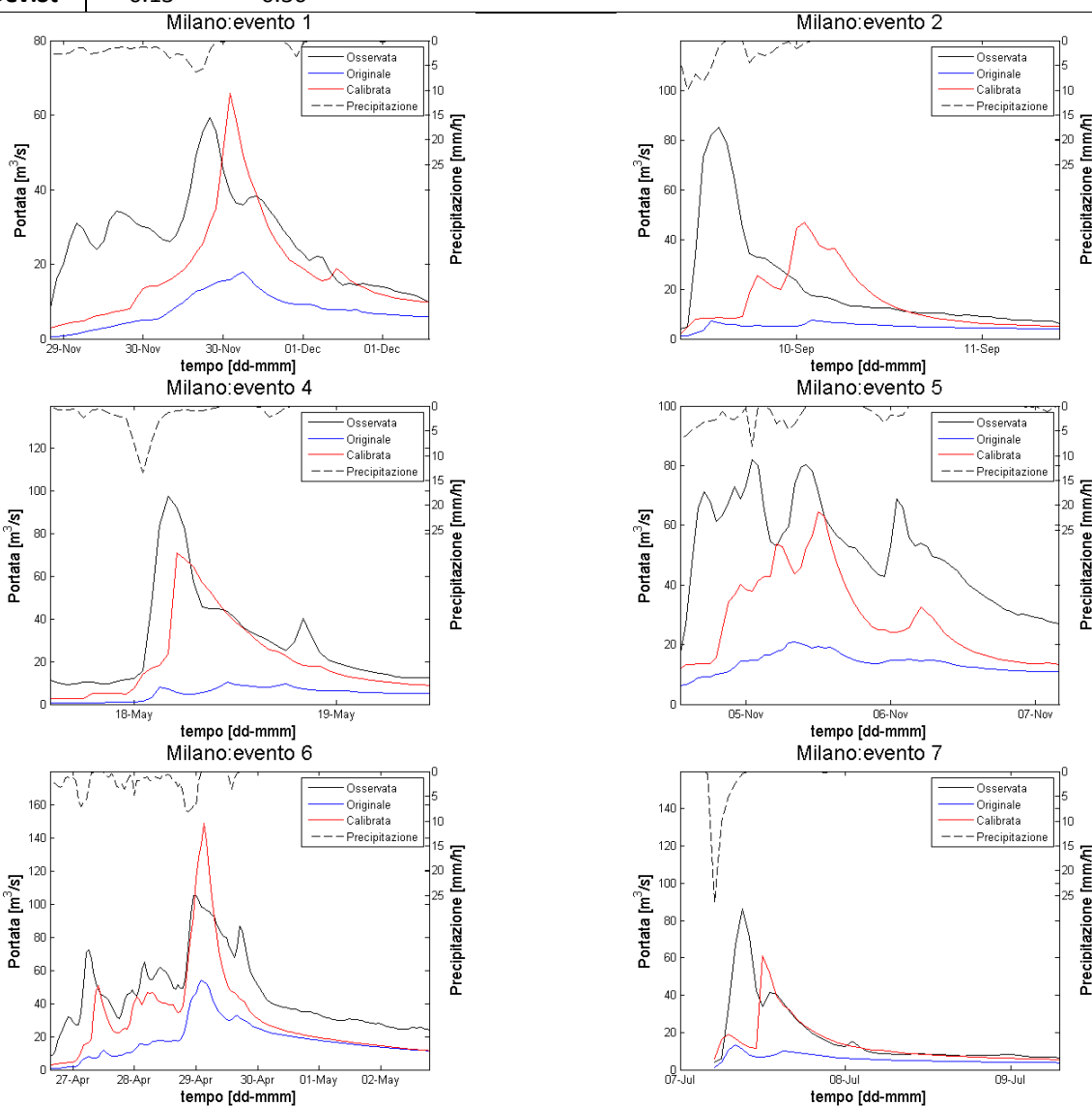


Figura 6-19: eventi osservati dalla stazione idrometrica di Milano, via Feltre.

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 0.01 e sommando al coefficiente CN 10 unità. In Tabella 6-13 sono riportati i valori degli indici stimati.

Tabella 6-13: stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano.

# eventi	err $Q_{max}[-]$		era $t_{max}[h]$		RMSE[m ³ /s]		Nash[-]	
	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata	originale	calibrata
1	-0.70	0.11	5	3	21.46	14.71	-0.22	0.16
2	-0.91	-0.45	12	11	25.93	24.49	-1.58	-2.40
4	-0.89	-0.27	7	1	31.87	16.91	-0.81	0.28
5	-0.74	-0.22	7	11	40.55	26.06	-0.14	0.07
6	-0.49	0.41	2	3	31.17	19.04	-0.10	0.61
7	-0.84	-0.29	-1	3	19.75	16.27	-1.77	-0.80
8	-0.74	0.20	1	-2	31.56	14.95	-1.37	0.68
9	-0.76	-0.13	0	-1	34.52	19.87	-0.79	0.41
10	-0.66	0.32	5	3	41.85	21.04	-0.33	0.72
MEDIA	-74.8%	-3.54%	4.22	3.56	30.96	19.26	-0.79	-0.03
Dev.St	0.13	0.30						



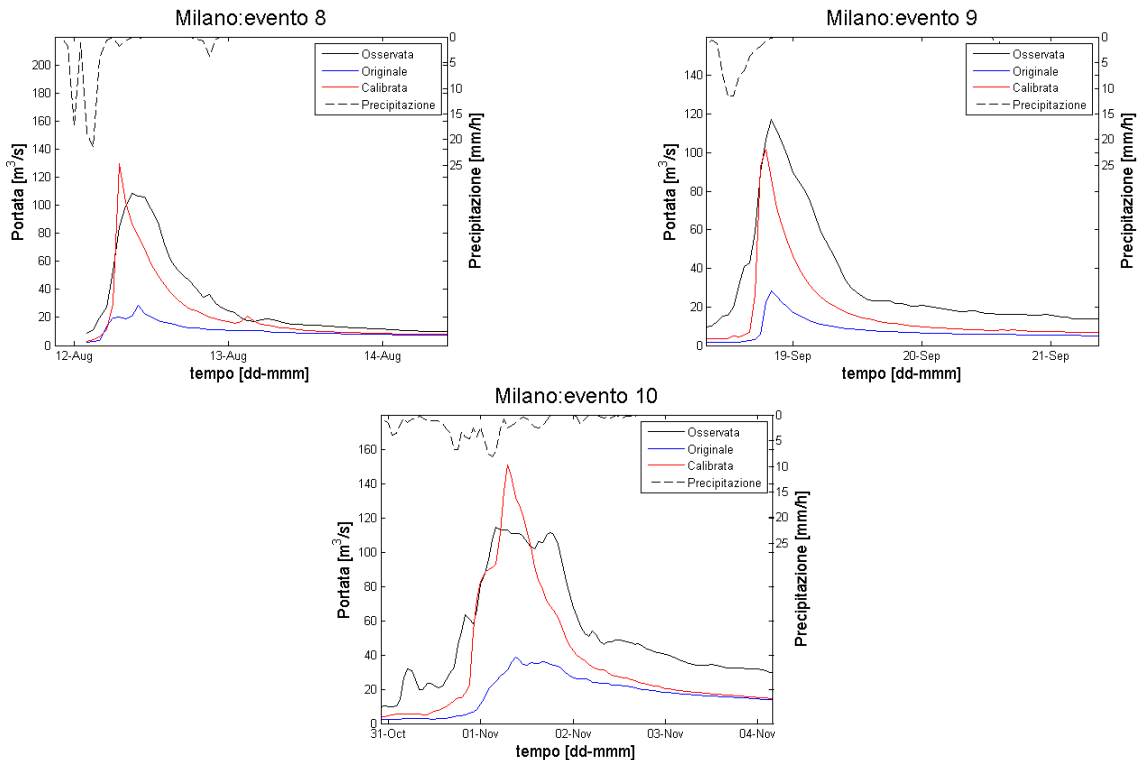


Figura 6-20: risultati della calibrazione per la stazione di Milano, via Feltre.

6.2 VALIDAZIONE

In seguito alla calibrazione, è stata effettuata la validazione del modello idrologico FEST-WB. Sono state considerate una serie di eventi negli anni 2011-2012 per ogni stazione, in particolare si è cercato di ottenere, indicativamente, un numero di eventi pari al 30% per la validazione sul totale di quelli analizzati.

In Tabella 6-14 sono riassunti i coefficienti moltiplicati di k_{sat} e additivi di CN per i vari sottobacini considerati.

Tabella 6-14: coefficienti applicati alle mappe dei parametri k_{sat} e CN al termine della calibrazione.

	k_{sat}	CN
Lozza	*0.02	-10
Castellanza	*0.04	+5
Cantù	*0.01	+10
Casolino d'Erba	*3.00	+2
Peregallo	*0.06	+2
Milano-via Feltre	*0.01	+10

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti per ogni stazione.

6.2.1 Olona

Come già accennato in precedenza nel paragrafo 6.1.1, gli eventi di piena più rilevanti che si verificano sull'Olona vengono laminati dall'opera presente a Ponte Gurone. In particolare l'evento del 26 novembre 2012 è stato caratterizzato dall'entrata in funzione dell'opera.

6.2.1.1 Lozza

Per la stazione di Lozza sono stati presi in esame gli eventi riportati in Tabella 6-15 per i quali sono stati stimati e indicati gli indici di valutazione.

Tabella 6-15: eventi presi in esame per la stazione di Lozza e stima degli indici. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato, ; *=è entrata in funzione la diga di Ponte Gurone.**

	inizio	fine	err $Q_{max}[-]$	era $t_{max}[h]$	RMSE[m ³ /s]	Nash[-]
11	23/04/2012 19:00:00	26/04/2012 00:00:00	0.29	-2	8.15	0.49
12***	26/11/2012 16:00:00	01/12/2012 23:00:00	0.23	12	7.07	0.80

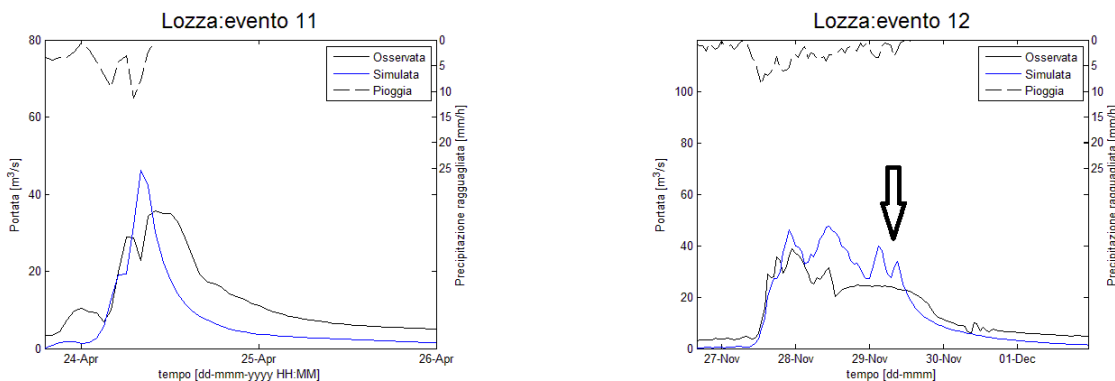


Figura 6-21: risultati della validazione per la stazione di Lozza.

6.2.1.2 Castellanza

Per la stazione di Castellanza sono stati presi in esame gli eventi riportati in Tabella 6-16 per i quali sono stati stimati e indicati gli indici di valutazione.

Tabella 6-16: eventi presi in esame per la stazione di Castellanza e stima degli indici; ; *=è entrata in funzione la diga di Ponte Gurone.**

	inizio	fine	err $Q_{max}[-]$	era $t_{max}[h]$	RMSE[m ³ /s]	Nash[-]
11	23/04/2012 19:00:00	26/04/2012 17:00:00	0.05	1	9.37	0.43
12	10/11/2012 12:00:00	13/11/2012 03:00:00	0.27	-2	5.54	0.63
13***	26/11/2012 10:00:00	02/12/2012 14:00:00	0.18	10	8.03	0.84

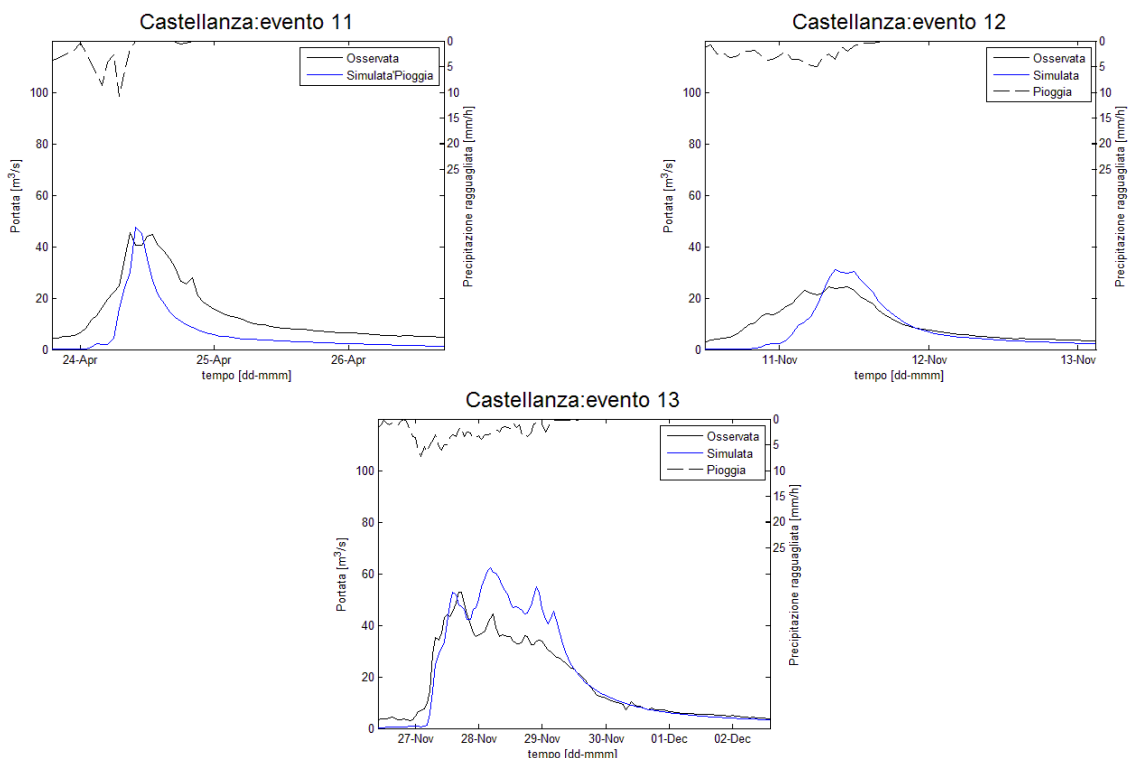


Figura 6-22: risultati della validazione per la stazione di Castellanza.

6.2.2 Seveso

6.2.2.1 Cantù

Per la stazione di Cantù sono stati presi in esame gli eventi riportati in Tabella 6-17 per i quali sono stati stimati e indicati gli indici di valutazione.

Tabella 6-17: eventi presi in esame per la stazione di Cantù e stima degli indici. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.

	inizio	fine	err $Q_{max}[-]$	era $t_{max}[h]$	RMSE[m ³ /s]	Nash[-]
8**	11/05/2010 01:00:00	14/05/2010 19:00:00	-0.09	-1	5.84	-0.11
9**	17/09/2010 15:00:00	20/09/2010 05:00:00	-0.24	1	1.83	0.70
10**	31/10/2010 07:00:00	02/11/2010 07:00:00	0.06	-2	2.85	0.80

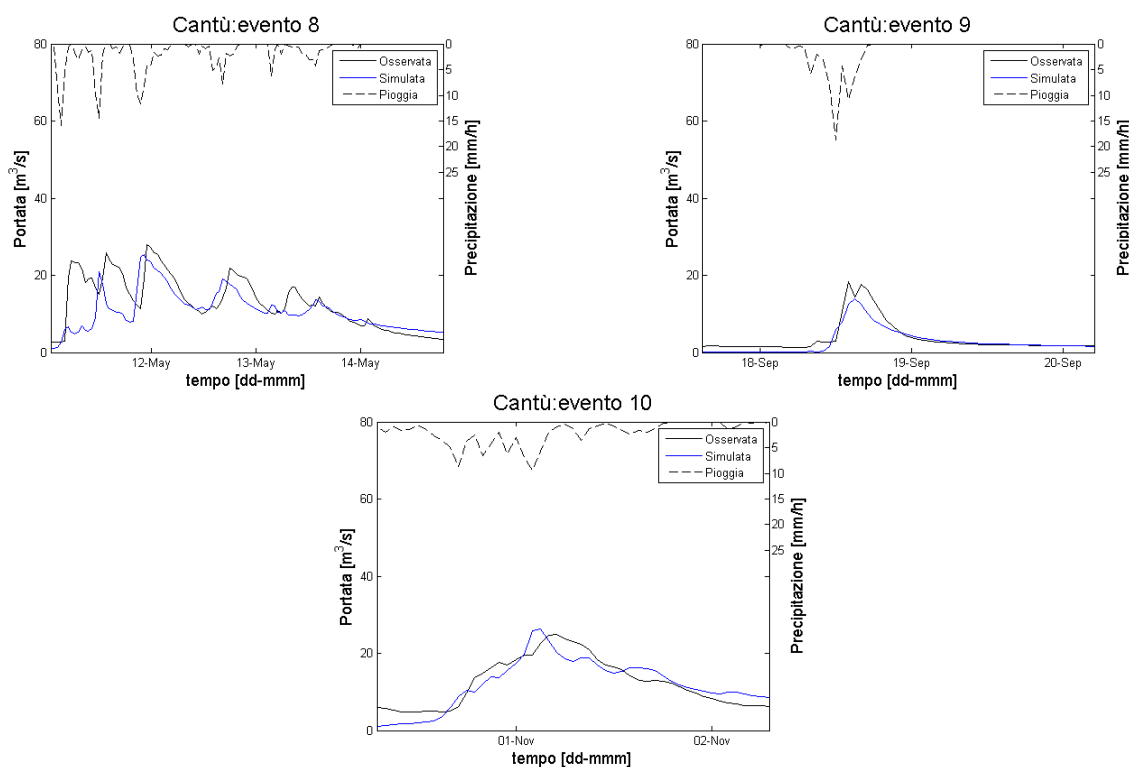


Figura 6-23: risultati della validazione per la stazione Cantù.

Per l'evento 8 è possibile fare un discorso analogo per gli eventi temporaleschi di Lozza nel paragrafo 6.1.1.1 in cui la sottostima del primo picco è imputabile alle condizioni iniziali.

6.2.3 Lambro

6.2.3.1 Caslino d'Erba

Per la stazione di Caslino sono stati presi in esame gli eventi riportati in Tabella 6-18 per i quali sono stati stimati e indicati gli indici di valutazione.

Tabella 6-18: eventi presi in esame per la stazione di Caslino e stima degli indici. **=il limite massimo della scala di deflusso è risultato inferiore rispetto al livello idrometrico misurato.

	inizio	fine	err $Q_{max}[-]$	era $t_{max}[h]$	RMSE[m ³ /s]	Nash[-]
11**	13/07/2011 14:00:00	16/07/2011 17:00:00	0.25	-2	6.95	0.49
12	04/11/2012 14:00:00	07/11/2012 04:00:00	0.13	-2	4.68	0.31
13	10/11/2012 17:00:00	13/11/2012 14:00:00	0.18	-4	4.85	0.44
14**	27/11/2012 15:00:00	01/12/2012 22:00:00	0.02	2	5.38	0.55

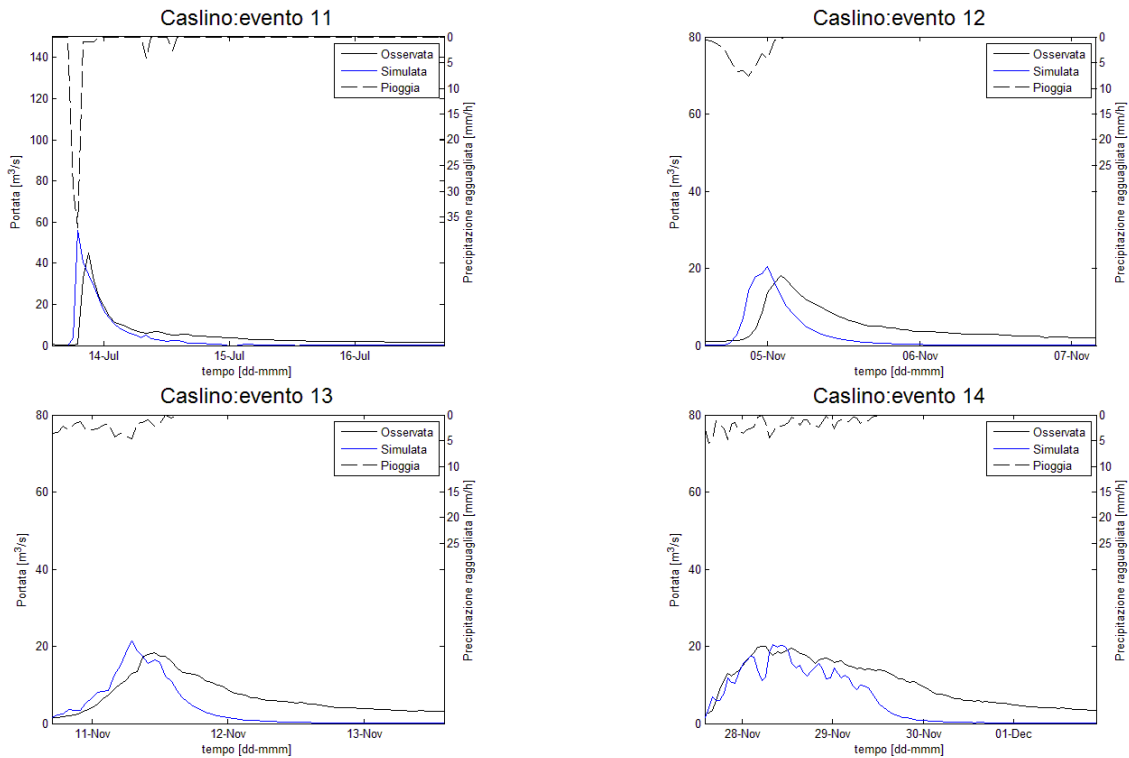


Figura 6-24: risultati della calibrazione per la stazione di Caslino d'Erba.

6.2.3.2 Peregallo

Per la stazione di Peregallo sono stati presi in esame gli eventi riportati in Tabella 6-19 per i quali sono stati stimati e indicati gli indici di valutazione.

Tabella 6-19: eventi presi in esame per la stazione di Peregallo e stima degli indici.

	inizio	fine	err $Q_{max}[-]$	era $t_{max}[h]$	RMSE[m ³ /s]	Nash[-]
11	25/10/2011 12:00:00	27/10/2011 05:00:00	0.18	0	1.95	0.93
12	20/05/2012 09:00:00	27/05/2012 23:00:00	-0.15	2	8.56	0.46
13	04/11/2012 00:00:00	09/11/2012 18:00:00	0.01	-1	7.49	0.50

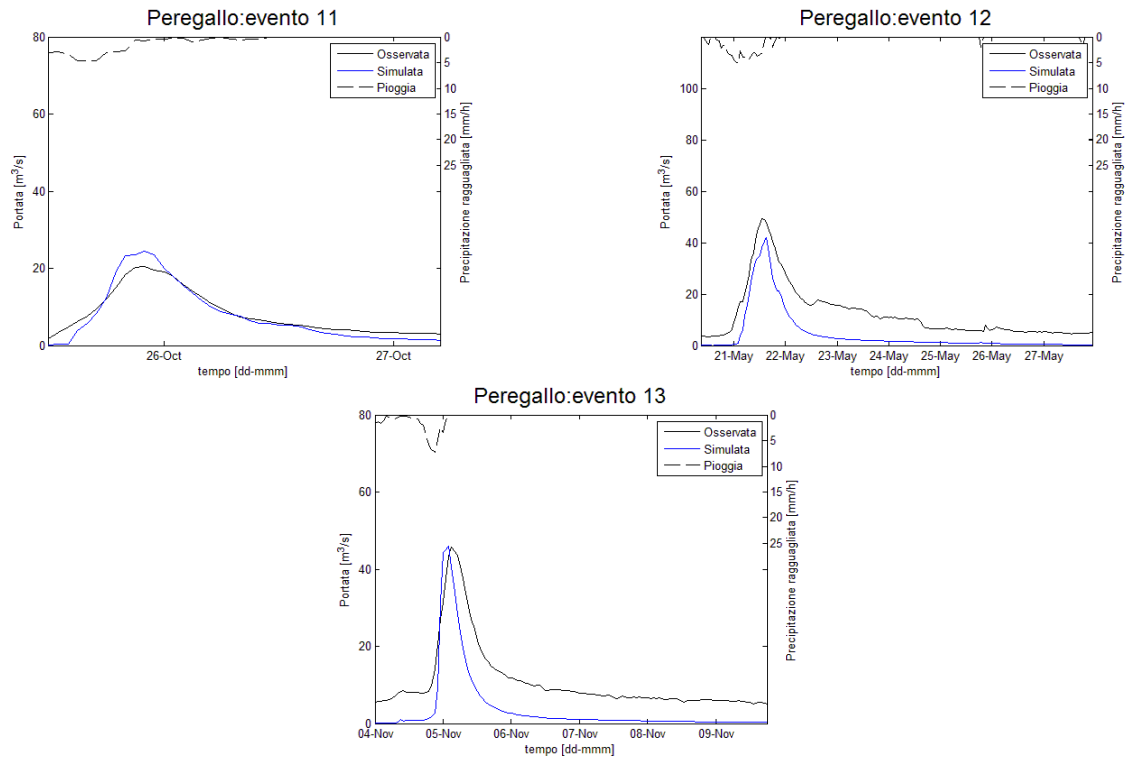


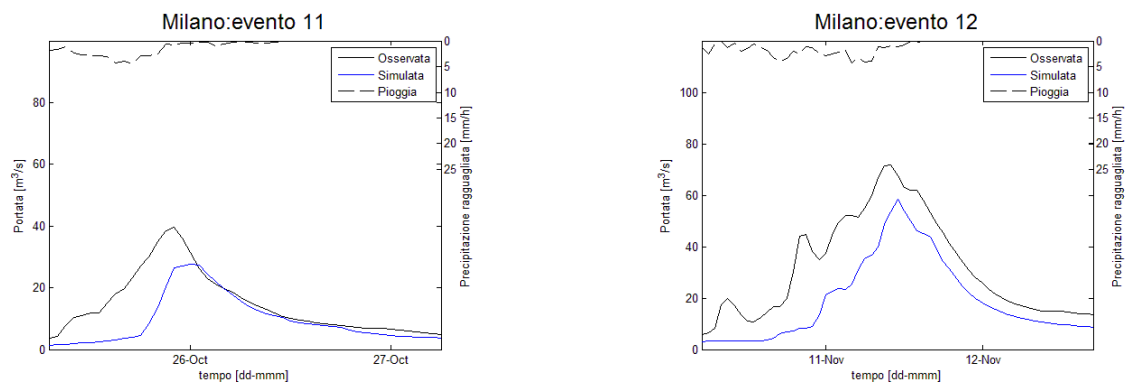
Figura 6-25: risultati della validazione per la stazione di Peregallo.

6.2.3.3 Milano via Feltre

Per la stazione di Milano sono stati presi in esame gli eventi riportati in Tabella 6-20 per i quali sono stati stimati e indicati gli indici di valutazione.

Tabella 6-20: eventi presi in esame per la stazione di Milano e stima degli indici.

	inizio	fine	err $Q_{max}[-]$	era $t_{max}[h]$	RMSE[m ³ /s]	Nash[-]
11	25/10/2011 07:00:00	27/10/2011 06:00:00	-0.3	2	8.48	0.17
12	10/11/2012 05:00:00	12/11/2012 17:00:00	-0.18	1	15.05	0.43
13	27/11/2012 10:00:00	04/12/2012 09:00:00	-0.28	1	13.93	0.44



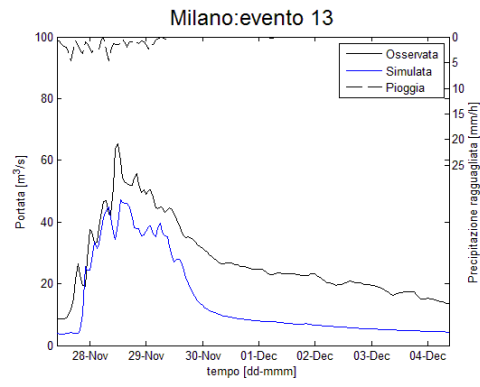


Figura 6-26: risultati della validazione per la stazione di Milano, via Feltre.

7 PRESTAZIONI DEL MODELLO METEO: Weather Research and Forecasting Model - WRF

Il Centro Epsilon Meteo ha compiuto una re-analisi delle previsioni di precipitazione e temperatura giornaliere a cadenza oraria per i giorni corrispondenti agli eventi di piena oggetto della calibrazione (capitolo 6.1): gli eventi sono 8 per un totale di 21 giorni. L'output del modello meteorologico è una griglia regolare con risoluzione di 1 km, che comprende tutta l'area in esame; nelle figure **NN e NN** sono mostrati due esempi per **l'ora xx del xxxxxxxx**.

FIGURA

COMMENTI FIGURA

In questo capitolo vengono analizzate le prestazioni del modello WRF per quanto riguarda la precipitazioni sull'area di interesse. Questo è possibile perché il modello idrologico FEST-WB è in grado di ragguagliare le precipitazioni presso le 6 stazioni idrometriche di interesse anche ricevendo in input una griglia regolare, oltre che dati puntuali: vengono quindi confrontati i valori di precipitazioni ricavati a partire dai dati osservati dalle stazioni meteorologiche dell'ARPA Lombardia e dalla mappa della previsione presso Cantù, Caslino d'Erba, Castellanza, Lozza, Milano e Peregallo.

E' stato quindi stimato l'errore relativo sulla precipitazione cumulata, *err PC*:

$$err PC = \frac{PC_{fct} - PC_{oss}}{PC_{oss}} \quad (7.1)$$

Inoltre per una maggiore completezza sono state determinate la media dell'errore sull'intero arco temporale per ogni singola stazione e la media dell'errore giornaliero sull'intero territorio in analisi. Nelle tabelle presenti nei prossimi paragrafi sarà riportata tale analisi; la lettura della stima dell'errore dovrà essere analizzata in relazione all'intensità di precipitazione per poter dare il giusto peso al valore numerico trovato.

I risultati vengono presentati per evento.

7.1 PRESTAZIONE DEL MODELLO PER EVENTO

7.1.1 Evento del 17-18 maggio 2008

Le piogge diffuse e molto intense hanno raggiunto la fase più acuta nella notte tra il 17 e il 18 maggio. Tali precipitazioni si sono manifestate spesso sottoforma di rovesci o temporali, anche di forte intensità, con differenza notevolissime di accumuli anche nel giro di pochi km, (Centro Meteorologico Lombardo s.d.).

Il modello WRF è riuscito a riprodurre con errori relativamente contenuti i valori di precipitazione cumulata giornaliera, tuttavia si riscontra una consistente traslazione dell'evento nell'arco temporale per quanto riguarda il giorno 18 maggio.

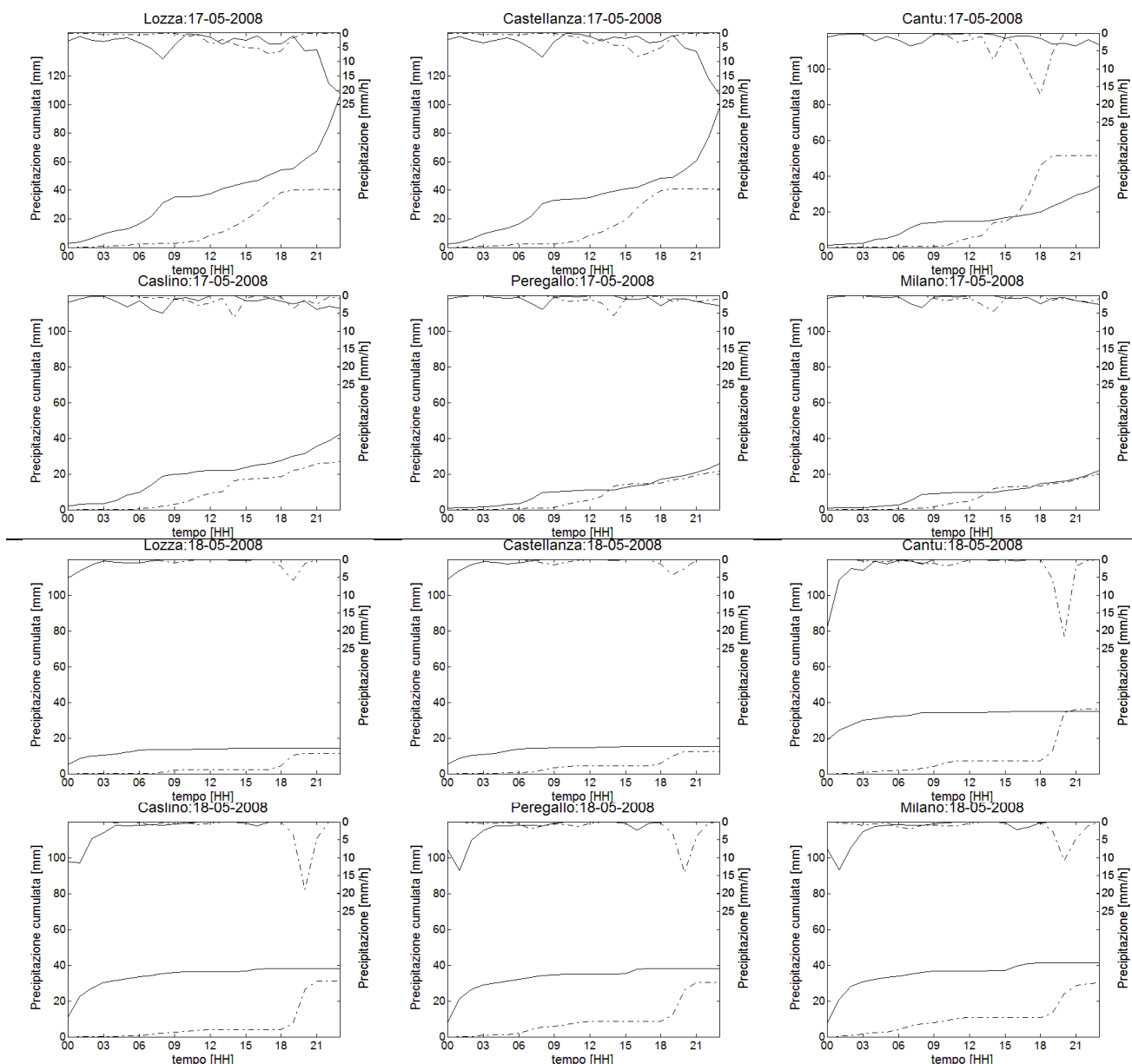


Figura 7-1: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 17-18 maggio 2008.

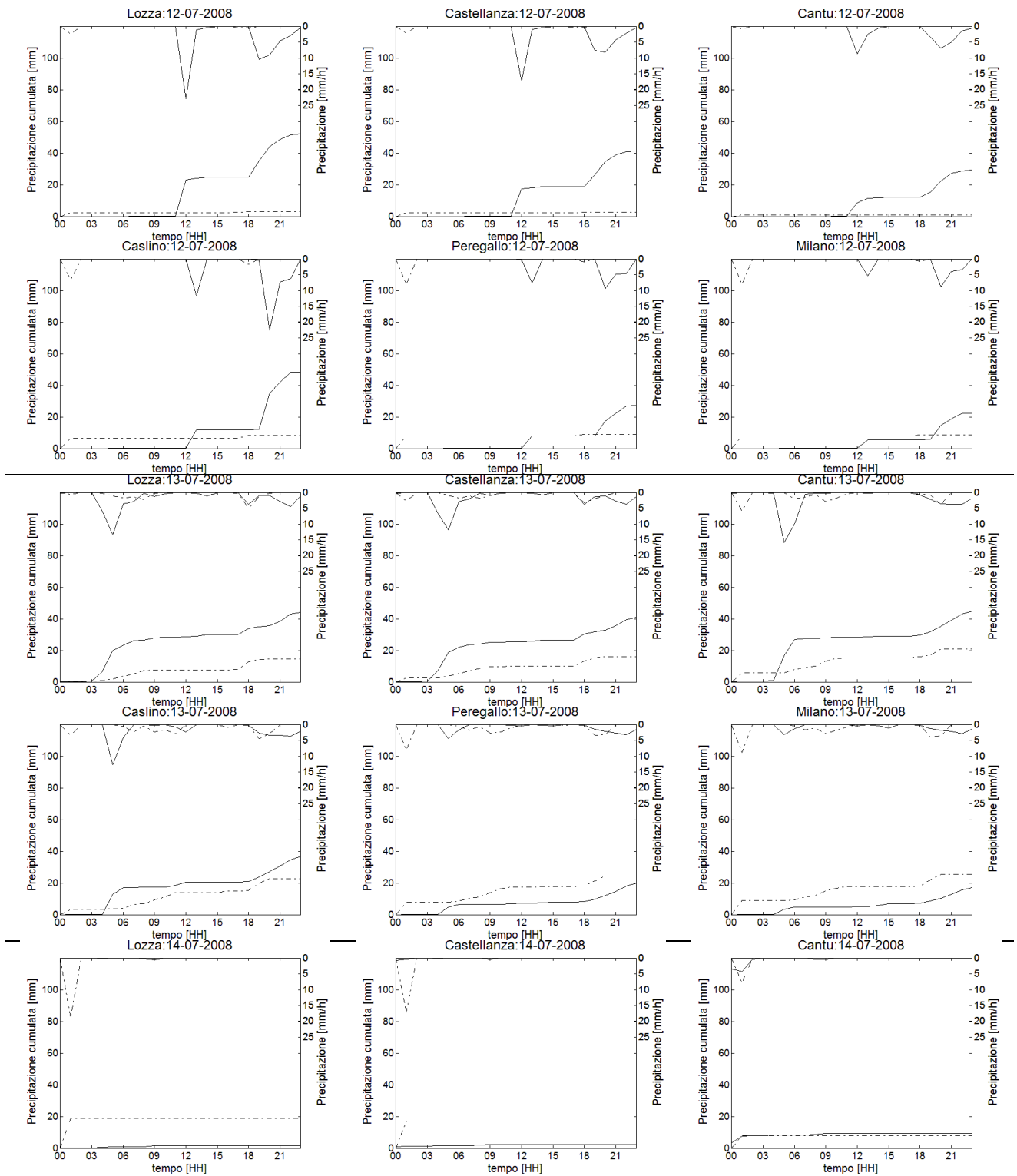
Tabella 7-1: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 17-18 maggio 2008.

	gg 17	gg 18	media
Lozza	-61,8%	-20,8%	-41,3%
Castellanza	-58,0%	-17,1%	-37,6%
Cantù	50,0%	3,5%	26,7%
Caslino	-36,3%	-18,6%	-27,5%
Peregallo	-16,0%	-20,2%	-18,1%
Milano	-10,0%	-27,6%	-18,8%
media	-22,0%	-16,8%	

7.1.2 Evento del 12-13-14 luglio 2008

Temporali di forte intensità si sono abbattuti nei giorni in esame su alcune zone della Lombardia, principalmente su Alpi, Prealpi ed Alta Pianura, Milano compresa. I fenomeni più intensi si sono concentrati in zone circoscritte e limitate a seconda della direzione di spostamento delle celle

temporalesche, che però nell’arco delle giornate si sono abbattute a momenti alterni in diverse località della fascia pedemontana. Molto difficoltoso come sempre in questi casi per il modello meteorologico prevedere con esattezza la localizzazione e la tempistica dei fenomeni più violenti, complice anche la presenza di forti venti, (Centro Meteorologico Lombardo s.d.).



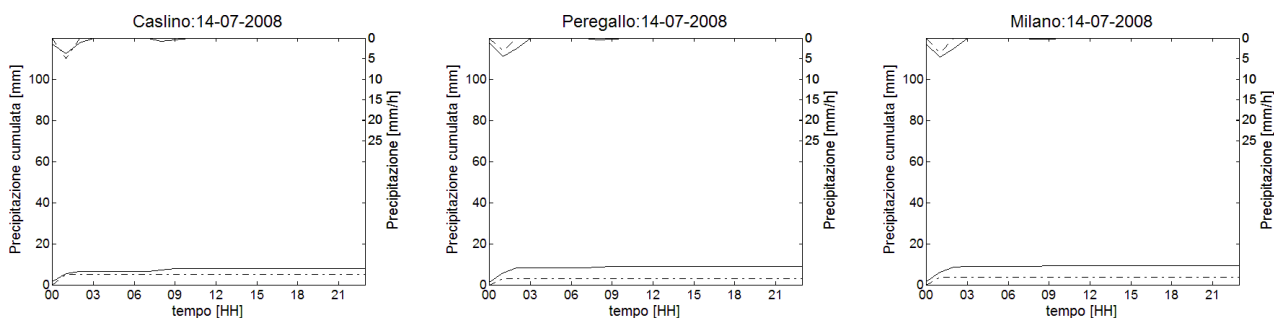


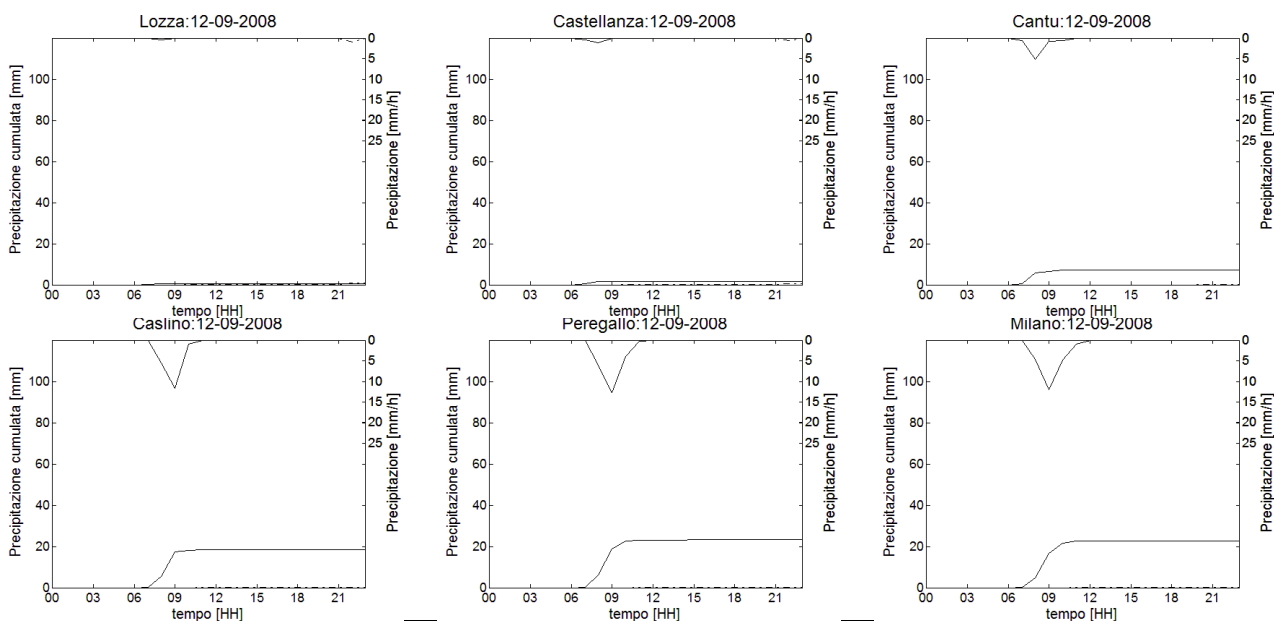
Figura 7-2: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 12-13-14 luglio 2008.

Tabella 7-2: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 12-13-14 luglio 2008.

	gg 12	gg 13	gg 14	media
Lozza	-94,0%	-66,7%	1022,6%	287,3%
Castellanza	-93,5%	-60,5%	613,4%	153,1%
Cantù	-97,5%	-53,7%	-16,6%	-55,9%
Caslino	-82,7%	-37,9%	-36,2%	-52,2%
Peregallo	-66,9%	24,9%	-65,3%	-35,8%
Milano	-61,0%	49,8%	-62,4%	-24,5%
media	-82,6%	-24,0%	242,6%	

7.1.3 Evento del 12-13-14 settembre 2008

Il modello WRF prevede correttamente la presenza di un evento temporalesco il giorno 13 settembre pur con una certa sovrastima sia in termini di intensità che di durata. Nei restanti giorni in analisi le precipitazioni osservate non sono state correttamente previste: in particolare da sottolineare una mancata previsione per il giorno 12 settembre lungo il Lambro.



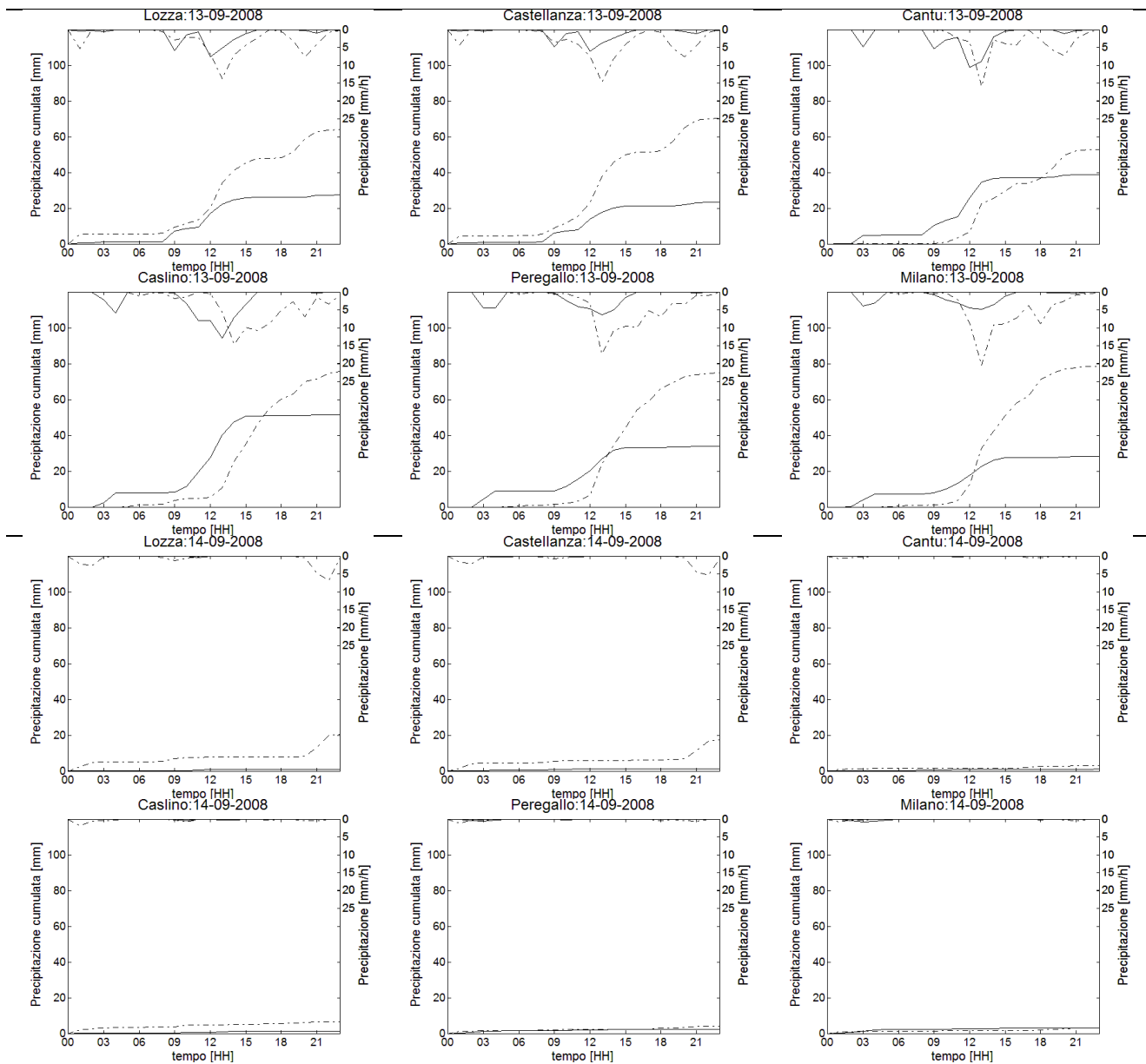


Figura 7-3: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 12-13-14 settembre 2008.

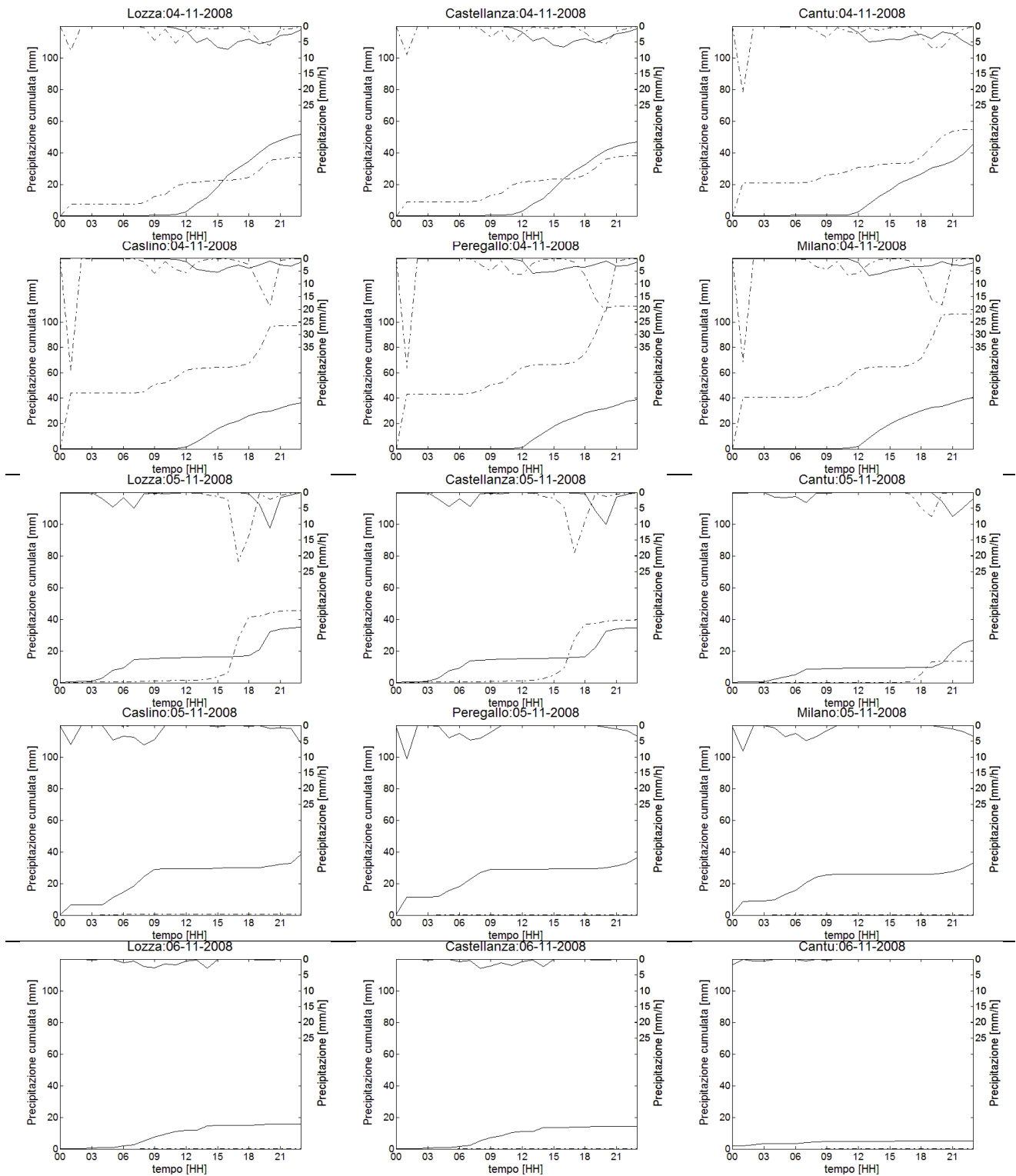
Tabella 7-3: relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 12-13-14 settembre 2008.

	gg 12	gg 13	gg 14	media
Lozza	139,8%	132,1%	2101,0%	791,0%
Castellanza	-59,4%	200,8%	1134,9%	425,4%
Cantù	-99,9%	36,4%	165,6%	34,1%
Caslino	-100,0%	47,0%	433,0%	126,7%
Peregallo	-100,0%	121,0%	80,5%	33,8%
Milano	-100,0%	176,4%	4,8%	27,1%
media	-53,2%	118,9%	653,3%	

7.1.4 Evento del 04-05-06 novembre 2008

Il giorno 04 novembre è stato caratterizzato da piogge persistenti, abbondanti e diffuse sul territorio; al contrario il giorno 05 novembre sono stati segnalati forti temporali talvolta accompagnati da episodi di

grandine, fenomeni sicuramente non abituali per il periodo anche se non proprio eccezionali, (Centro Meteorologico Lombardo s.d.). Il modello WRF ha previsto una serie di eventi di maggiore intensità ma di minore durata ad eccezione del giorno 05 novembre lungo il fiume Lambro in cui non è stata ravvisata nessuna perturbazione.



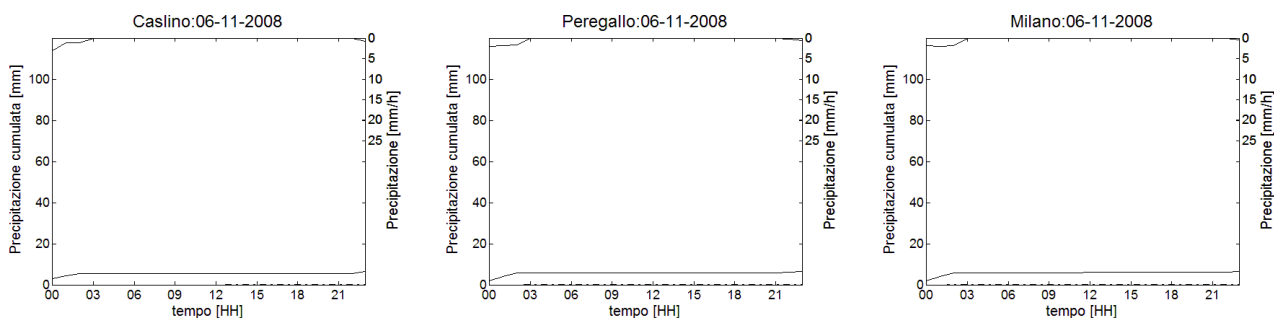


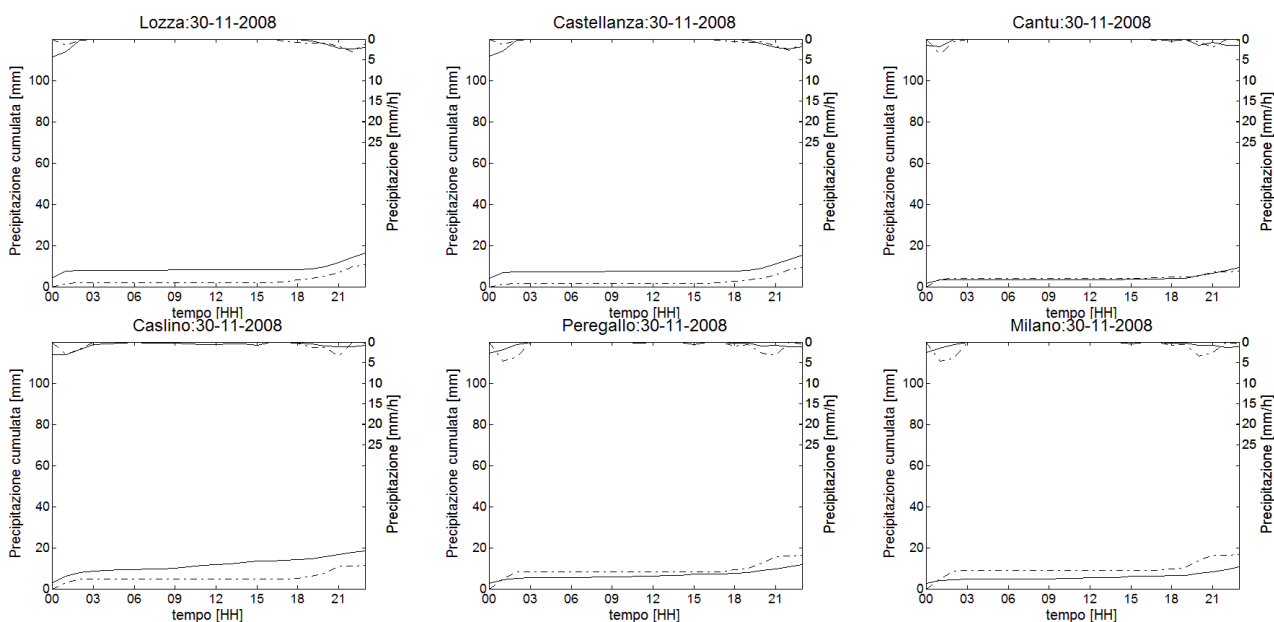
Figura 7-4: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 04-05-06 novembre 2008.

Tabella 7-4: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 04-05-06 novembre 2008.

	gg 04	gg 05	gg 06	media
Lozza	-28,3%	30,4%	-99,7%	-32,5%
Castellanza	-18,3%	14,9%	-99,7%	-34,4%
Cantù	19,6%	-50,5%	-97,0%	-42,7%
Caslino	167,1%	-99,0%	-98,5%	-10,2%
Peregallo	189,3%	-99,5%	-98,0%	-2,7%
Milano	163,3%	-99,6%	-98,3%	-11,5%
media	82,1%	-50,6%	-98,5%	

7.1.5 Evento del 30 novembre e 01-02 dicembre 2008

L'evento in questione è caratterizzato da una intensità non elevata ma mantenutasi costante per un buon numero di ore; da segnalare eventi nevosi, (Centro Meteorologico Lombardo s.d.). Il modello meteorologico non ha previsto la perturbazione con il risultato di una sottostima piuttosto elevata per il giorno 01 dicembre caratterizzato da una intensità di precipitazione maggiore.



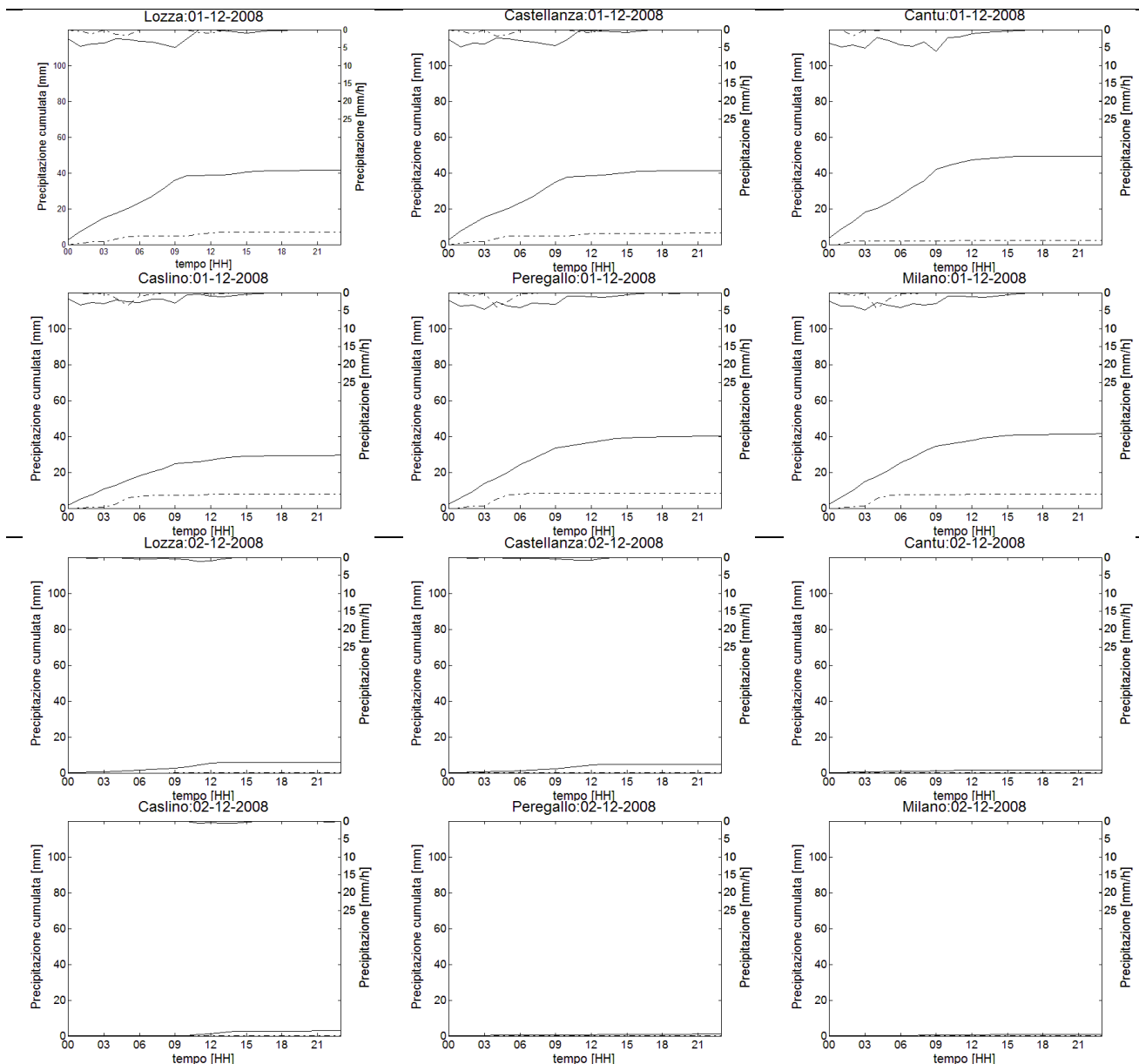


Figura 7-5: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 30 novembre e 01-02 dicembre 2008.

Tabella 7-5: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 30 novembre e 01-02 dicembre 2008.

	gg 30	gg 01	gg 02	media
Lozza	-33,0%	-83,3%	-100,0%	-72,1%
Castellanza	-38,4%	-84,6%	-99,7%	-74,3%
Cantù	-18,7%	-95,4%	-98,7%	-70,9%
Caslino	-38,3%	-73,0%	-99,3%	-70,2%
Peregallo	36,9%	-79,3%	-98,0%	-46,8%
Milano	57,9%	-81,2%	-97,0%	-40,1%
media	-5,6%	-82,8%	-98,8%	

7.1.6 Evento del 06-07-08 febbraio 2009

L'evento in questione presenta caratteristiche analoghe al precedente, il WRF non ha previsto la perturbazione del 06 febbraio in cui si verifica la massima cumulata nei giorni in esame.

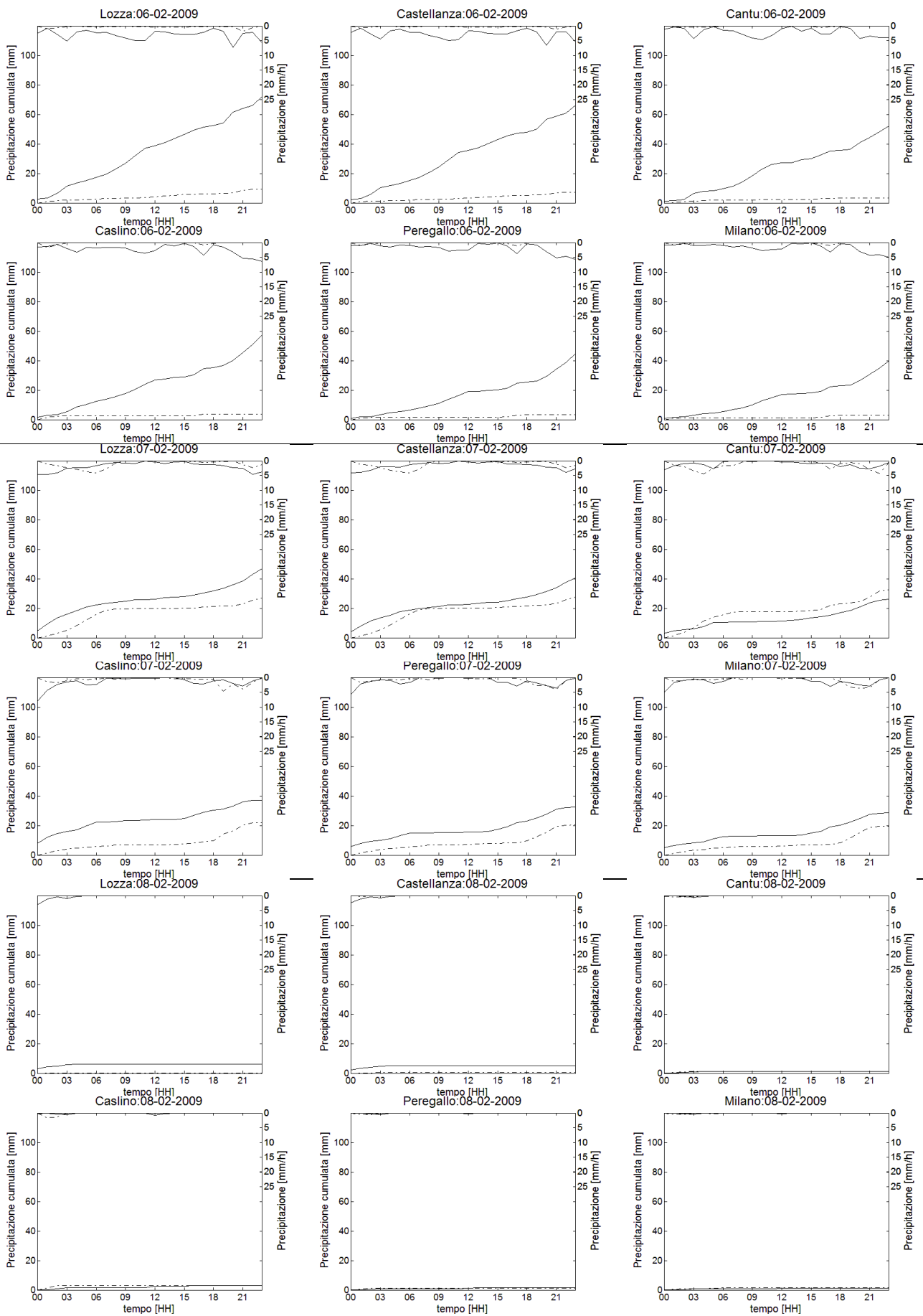


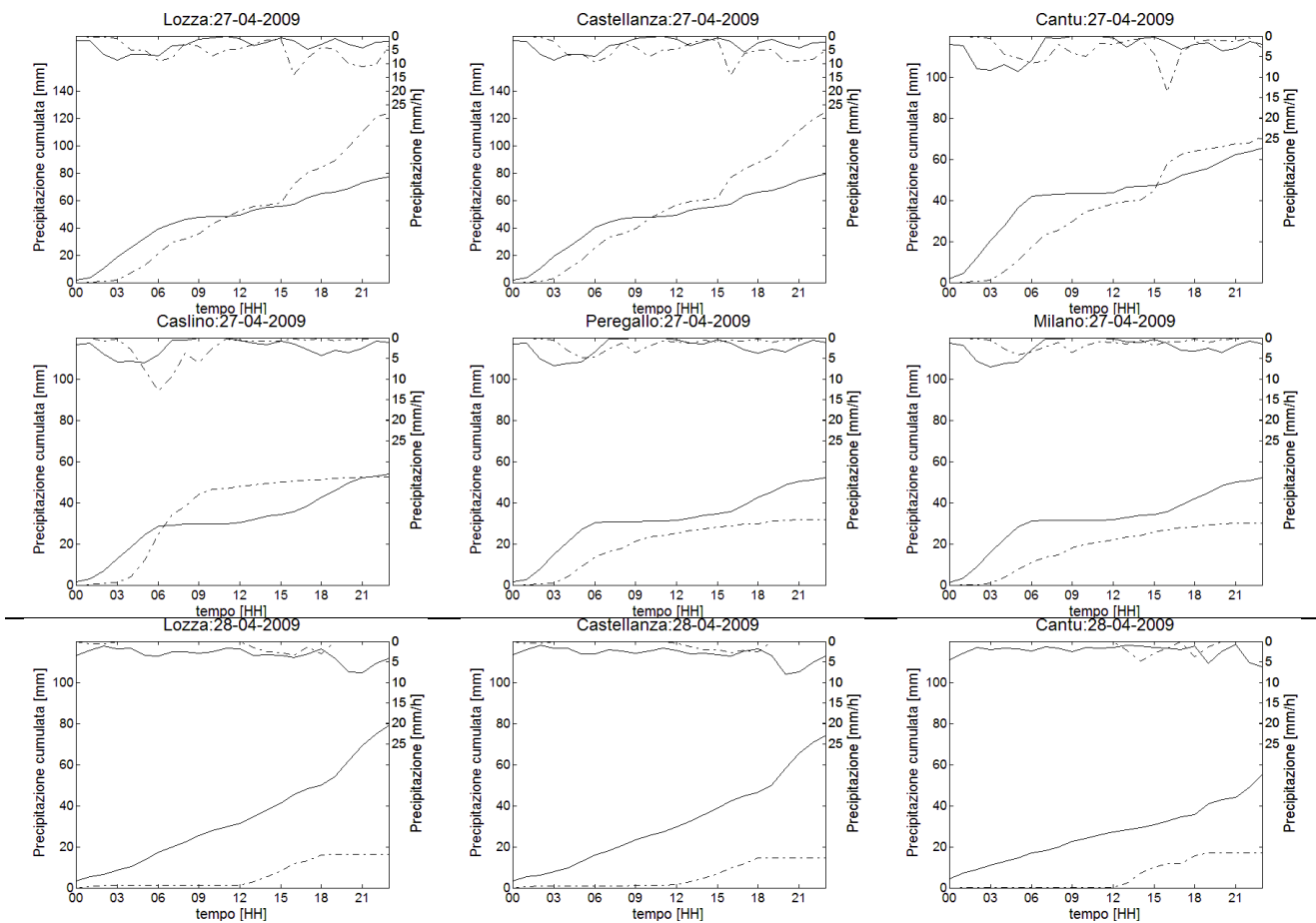
Figura 7-6: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 06-07-08 febbraio 2009.

Tabella 7-6: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 06-07-08 febbraio 2009.

	gg 06	gg 07	gg 08	media
Lozza	-87,3%	-42,9%	-97,4%	-75,8%
Castellanza	-89,0%	-32,1%	-91,0%	-70,7%
Cantù	-93,8%	25,1%	-1,1%	-23,3%
Casino	-93,3%	-40,7%	4,0%	-43,3%
Peregallo	-92,7%	-37,1%	-13,0%	-47,6%
Milano	-92,5%	-31,5%	6,8%	-39,1%
media	-91,4%	-26,5%	-32,0%	

7.1.7 Evento del 27-28-29 aprile 2009

L'evento in analisi è caratterizzato da piogge davvero abbondanti, insistenti e "monsoniche" sull'Ovest della Lombardia, risultato del sollevamento orografico delle correnti umide meridionali, (Centro Meteorologico Lombardo s.d.). Il modello meteorologico lo prevede mediamente in maniera corretta per il giorno 27 aprile, per il giorno 28 si ha una sottostima uniforme su tutto il territorio.



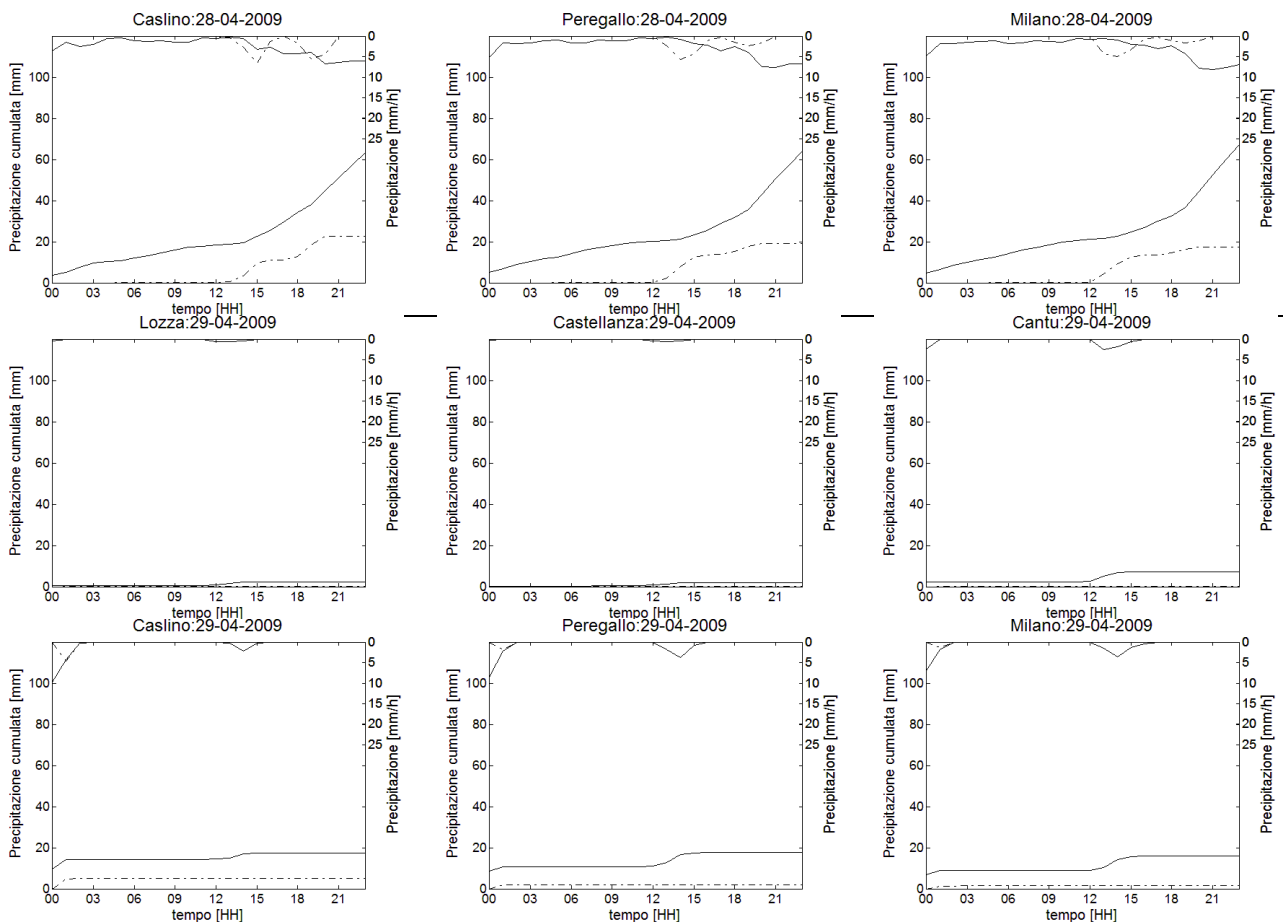


Figura 7-7: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 27-28-29 aprile 2009.

Tabella 7-7: relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 27-28-29 aprile 2009.

	gg 27	gg 28	gg 29	media
Lozza	60,4%	-79,5%	-92,3%	-37,1%
Castellanza	57,1%	-80,4%	-94,3%	-39,2%
Cantù	8,3%	-69,3%	-99,2%	-53,4%
Caslino	-2,6%	-64,1%	-70,8%	-45,8%
Peregallo	-39,4%	-69,9%	-88,3%	-65,8%
Milano	-42,4%	-74,0%	-90,9%	-69,1%
media	6,9%	-72,8%	-89,3%	

7.1.8 Evento del 07 luglio 2009

Come possiamo notare dalle stime dell'indice riportate in Tabella 7-8 e dalle immagini seguenti, il modello WRF non riesce a prevedere la perturbazione convettiva.

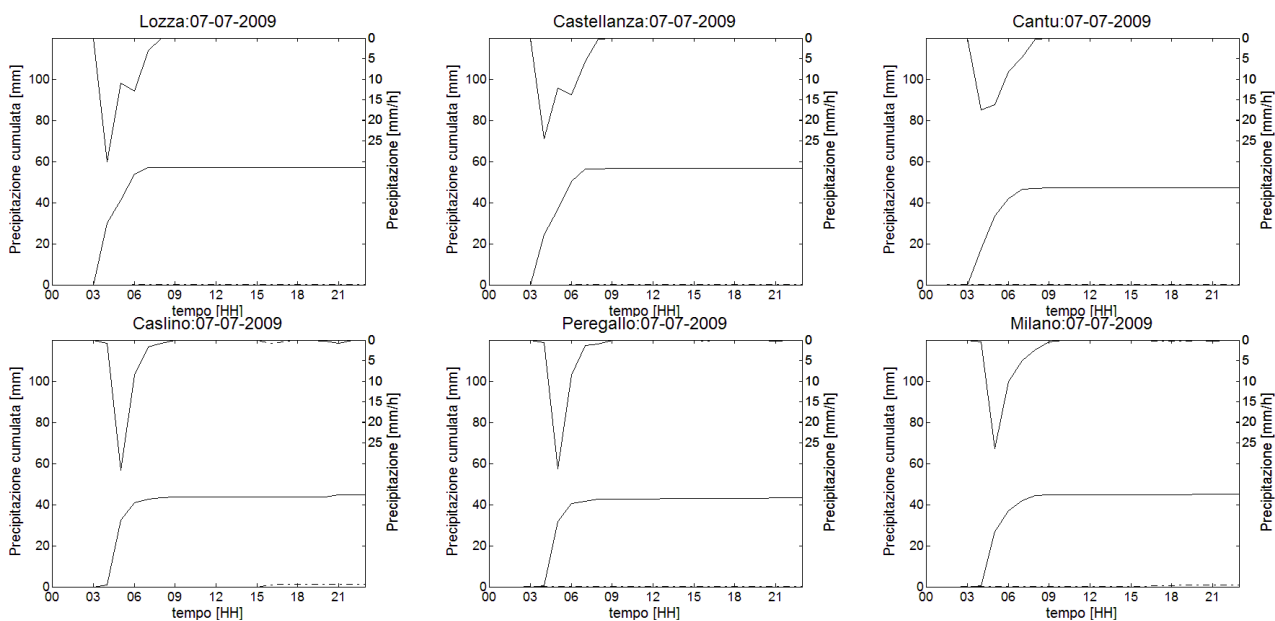


Figura 7-8: andamento delle precipitazioni cumulate osservate (linea continua) e previste dal modello WRF (linea tratto punto) per le diverse stazione durante l'evento del 07 luglio 2009.

Tabella 7-8: errore relativo calcolato sulla portata cumulata per l'evento del 07 luglio 2009.

	gg 07
Lozza	-99,9%
Castellanza	-99,9%
Cantù	-99,8%
Caslino	-97,1%
Peregallo	-99,3%
Milano	-98,0%
media	-99,0%

8 REAL TIME

In questo capitolo verrà presentata l'implementazione del sistema previsionale in tempo reale degli eventi di piena corrispondenti a quelli di precipitazione trattati nel capitolo 7 per le sei stazioni in esame.

L'utilizzo accoppiato del modello meteorologico e idrologico prevede un loro utilizzo a cascata, che ha come output finale i valori di portata a cadenza oraria tra le ore 00.00 e le ore 23.00 del giorno di interesse. In modello FEST-WB preleva lo stato iniziale direttamente dai dati osservati alle ore 22.00 del giorno precedente, a partire dal quale simula la portata defluente ricevendo in ingresso i campi di precipitazione e temperatura, output del WRF: il lasso di tempo tra le ore 22.00 e le 00.00 del giorno di cui interessano le previsioni costituiscono semplicemente un periodo di inizializzazione del modello. In Figura 8-1 è rappresentata uno schema esemplificativo dell'arco temporale appena descritto.

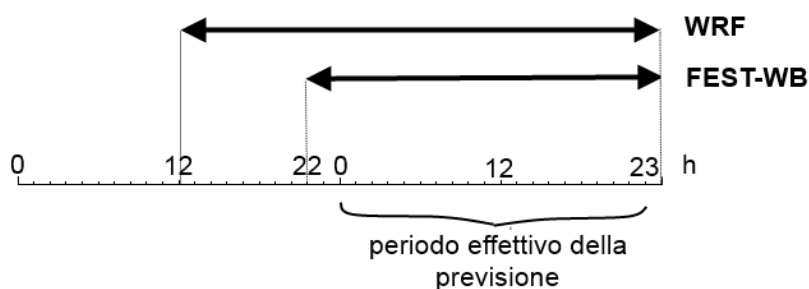


Figura 8-1: *schema esemplificativo del funzionamento a cascata del sistema previsionale.*

Il sistema previsionale si pone l'obiettivo di individuare gli eventuali eventi di piena che si possono verificare, per far ciò si confronta la portata prevista con il modello FEST-WB inizializzato con il modello WRF con una soglia limite che descrive la capacità di deflusso del fiume in oggetto. In Tabella 8-1 sono elencati i valori delle soglie assunte in assenza di informazioni specifiche per le sezioni in esame, per un maggior chiarimento leggere i seguenti paragrafi.

Tabella 8-1: *soglie di portata per le sei stazioni.*

	Soglia [m^3/s]
Lozza	36
Castellanza	43
Cantù	15
Caslino d'Erba	16
Peregallo	80
Milano, via Feltre	100

Nei paragrafi seguenti verrà anche presentata un'analisi delle prestazioni del sistema previsionale confrontando il valore osservato di portata con quello previsto. Nello specifico si andrà a valutare, sui 19 giorni in oggetto, n , il numero di eventi previsti in caso di superamento della soglia da parte di entrambi gli idrogrammi, h ; non eventi previsti in caso di non superamento della soglia da parte di entrambi gli idrogrammi, c ; mancato allarme, m e falso allarme, f .

Tabella 8-2: schema concettuale delle tabelle di contingenza per la verifica del sistema di previsione.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	EVENTO PREVISTO, h	MANCATO ALLARME, m
	NO	FALSO ALLARME, f	NON-EVENTO PREVISTO, c

Vengono inoltre calcolati i seguenti indici per la quantificazione dell'attendibilità del sistema previsionale (Ravazzani, Mancini, et al. 2007):

$$POD \text{ (Probability Of Detection)} = \frac{h}{h + m} \quad (8.1)$$

$$FAR \text{ (False Alarm Ratio)} = \frac{f}{f + c} \quad (8.2)$$

$$CSI \text{ (Critical Success Index)} = \frac{1}{[1/(1 - FAR) + (1/POD) - 1]} \quad (8.3)$$

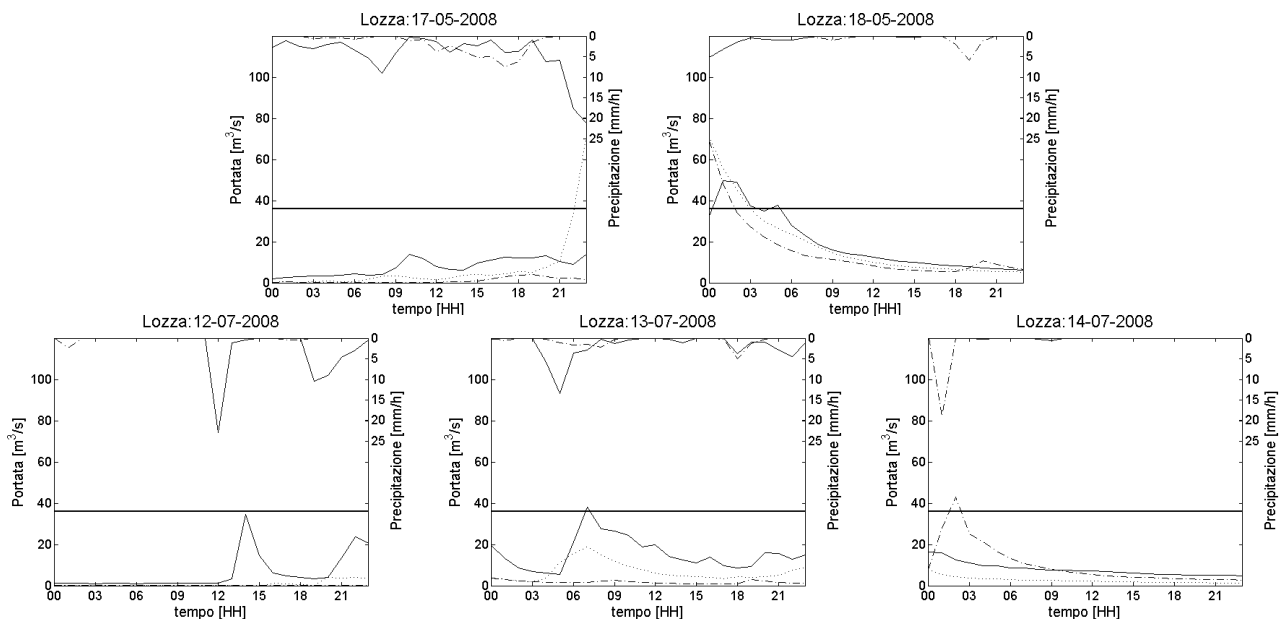
$$CPI \text{ (Correct Performnce Index)} = \frac{c + h}{n} \quad (8.4)$$

8.1 Verifica del sistema di previsione

8.1.1 Olona

8.1.1.1 Lozza

Per la stazione di Lozza è stata determinata una soglia pari a $36 \text{ m}^3/\text{s}$, corrispondente alla portata in uscita per un tempo di ritorno di 100 anni dalla diga di ponte Gurone situata poco più a monte della sezione in esame, (Comune di Castiglione Olona s.d.). In Figura 8-2 sono rappresentati i 19 giorni analizzati, in particolare ogni riga rappresenta un evento.



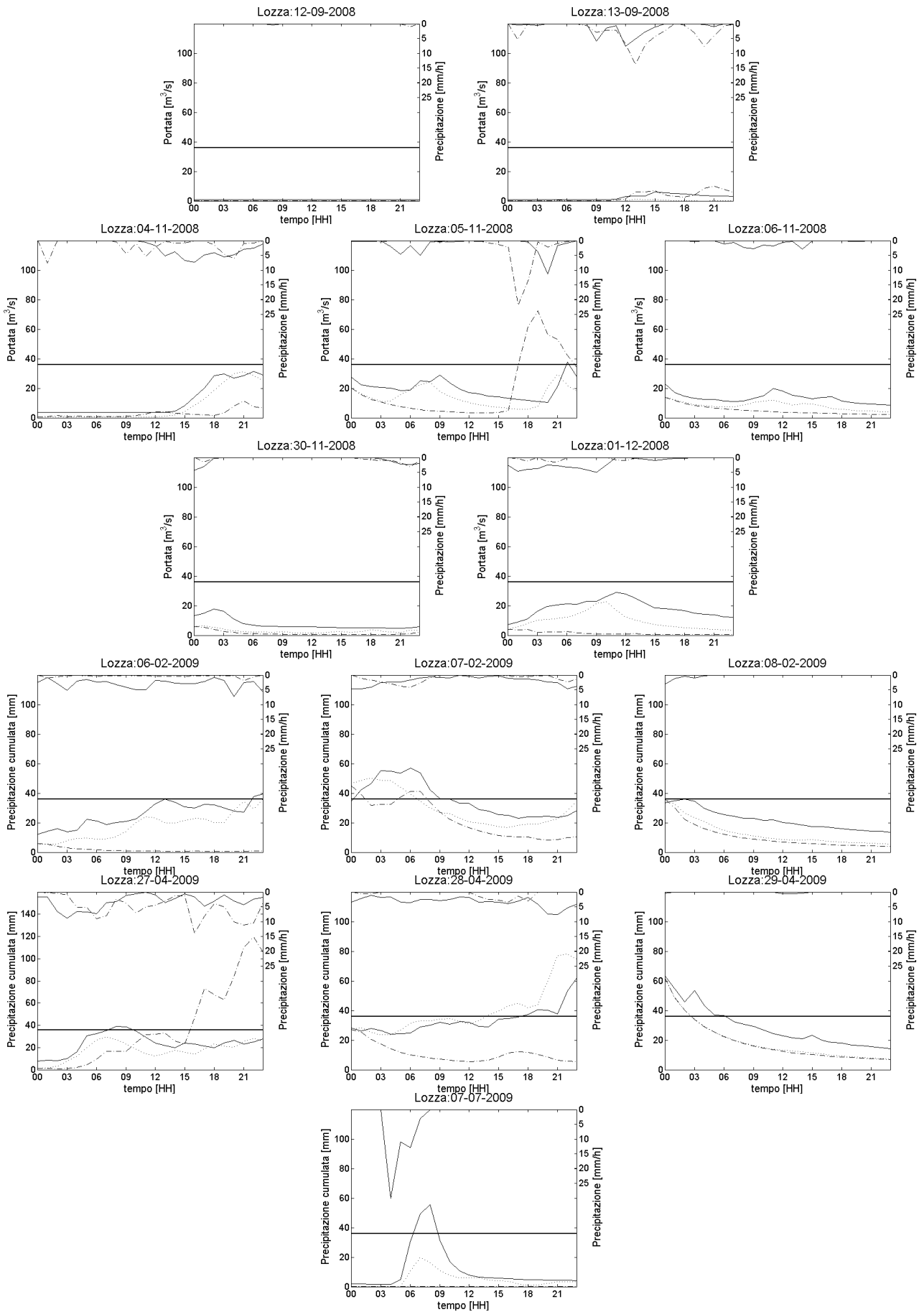


Figura 8-2: per la stazione di Lozza è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.

Tabella 8-3: tabella di contingenza per la sezione di Lozza.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	5	4
	NO	1	9

Tabella 8-4: indici di prestazione per la sezione di Lozza.

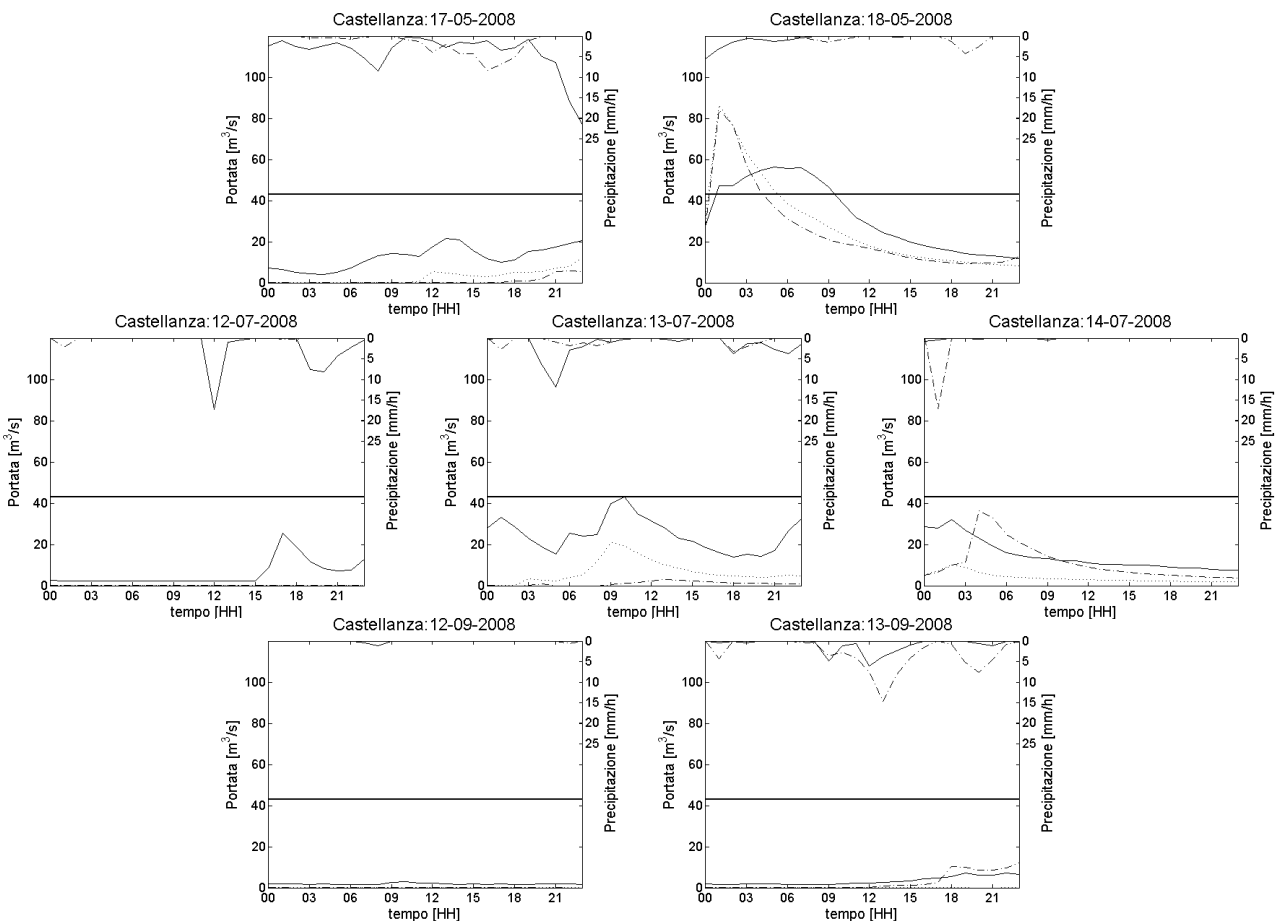
POD	0,556
FAR	0,100
CSI	0,523
CPI	0,737

In caso di superamento della soglia il sistema previsionale ha una probabilità di successo pari al 50% circa; esso ha migliori prestazioni quando prevede un non-evento, con la probabilità di falso allarme relativamente bassa. In generale si può affermare che per la stazione di Lozza il sistema funziona bene, in quanto in più del 70% dei casi la previsione è risultata corretta.

8.1.1.2 Castellanza

La soglia per la sezione di Castellanza è pari a $43\text{m}^3/\text{s}$ stimata assumendo una proporzionalità diretta tra le aree dei bacini e le portate.

$$Q2 = Q1 \frac{A2}{A1} \tag{8.5}$$



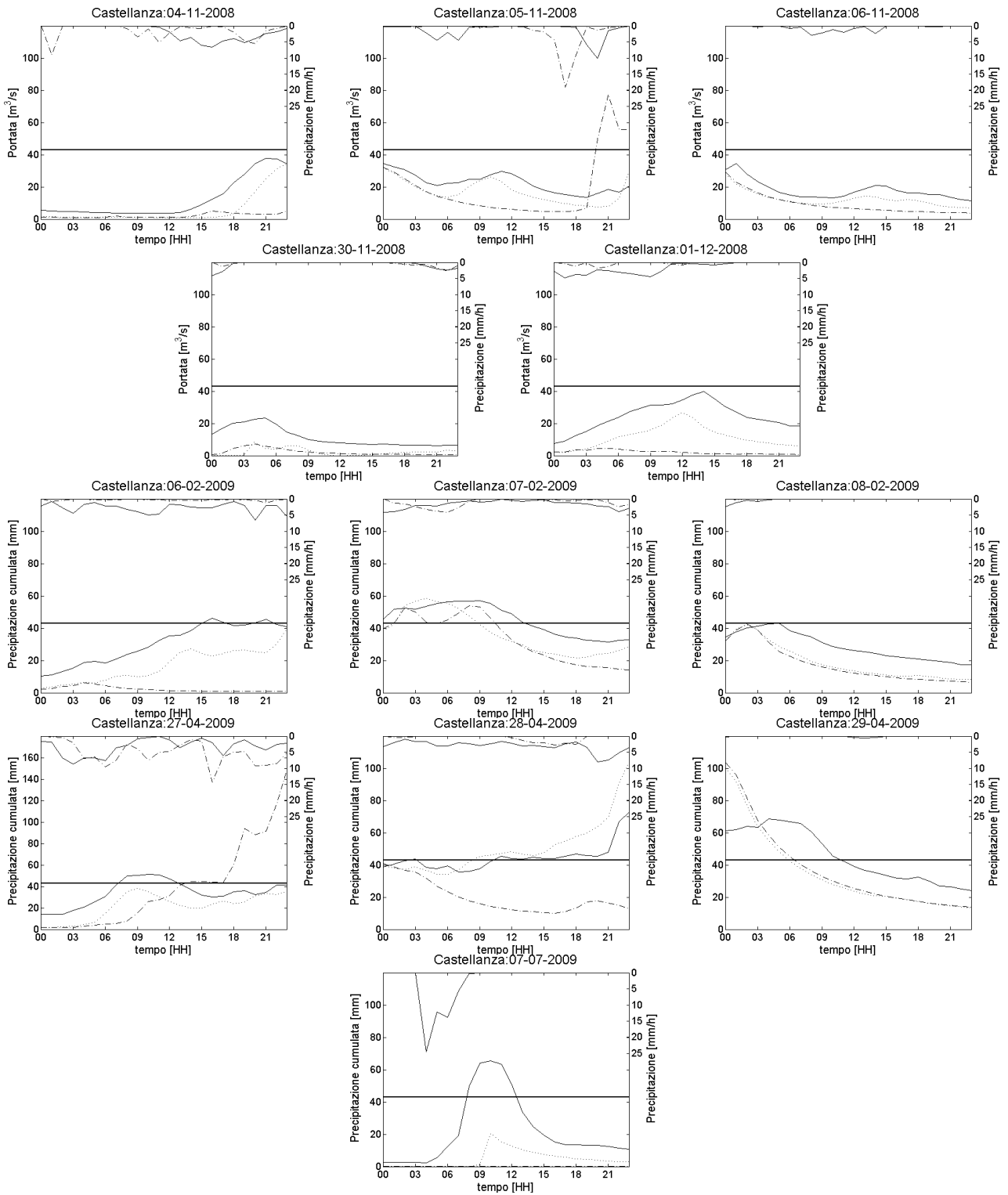


Figura 8-3: per la stazione di Castellanza è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FESW-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FESW-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.

Tabella 8-5: tabella di contingenza per la sezione di Castellanza.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	4	3
	NO	1	11

Tabella 8-6: indici di prestazione per la sezione di Castellanza.

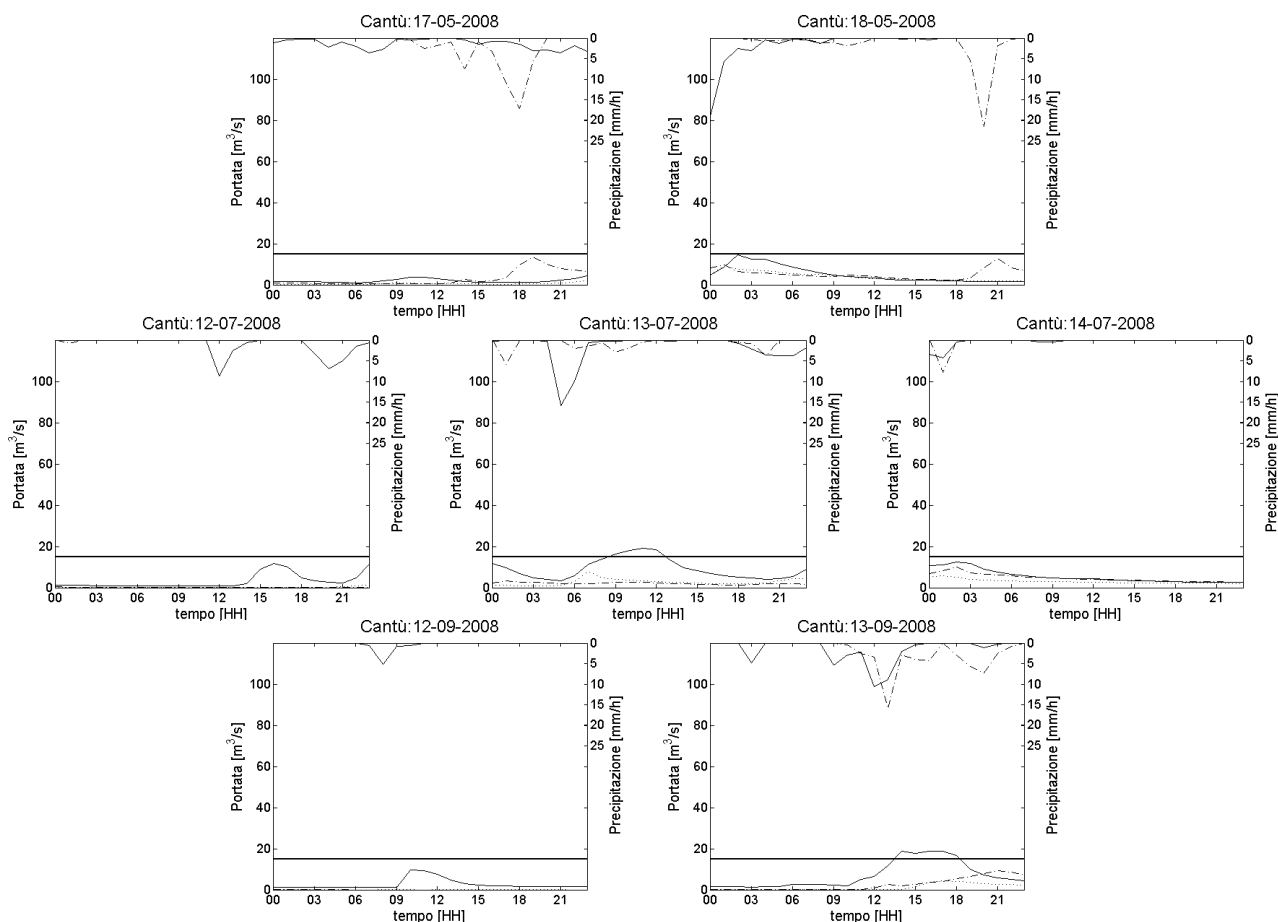
POD	0,571
FAR	0,083
CSI	0,543
CPI	0,789

Per la stazione di Castellanza il comportamento è analogo a quello di Lozza, con la differenza che il numero maggiore di non-eventi porta ad avere delle performance migliori: per quasi l'80% dei casi il sistema prevede correttamente l'allarme o meno.

8.1.2 Seveso

8.1.2.1 Cantù

La portata assunta per la stazione di Cantù è pari a $15 \text{ m}^3/\text{s}$ determinata seguendo un ragionamento analogo a quello di Castellanza (8.1.1.2). In particolare si è presa come riferimento la portata massima transitante per il manufatto in via Ornati a Milano di $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (LegaAmbiente s.d.) presso il quale il bacino del fiume Seveso ha un'area di circa 3 volte maggiore rispetto a quella del bacino chiuso alla stazione di Cantù.



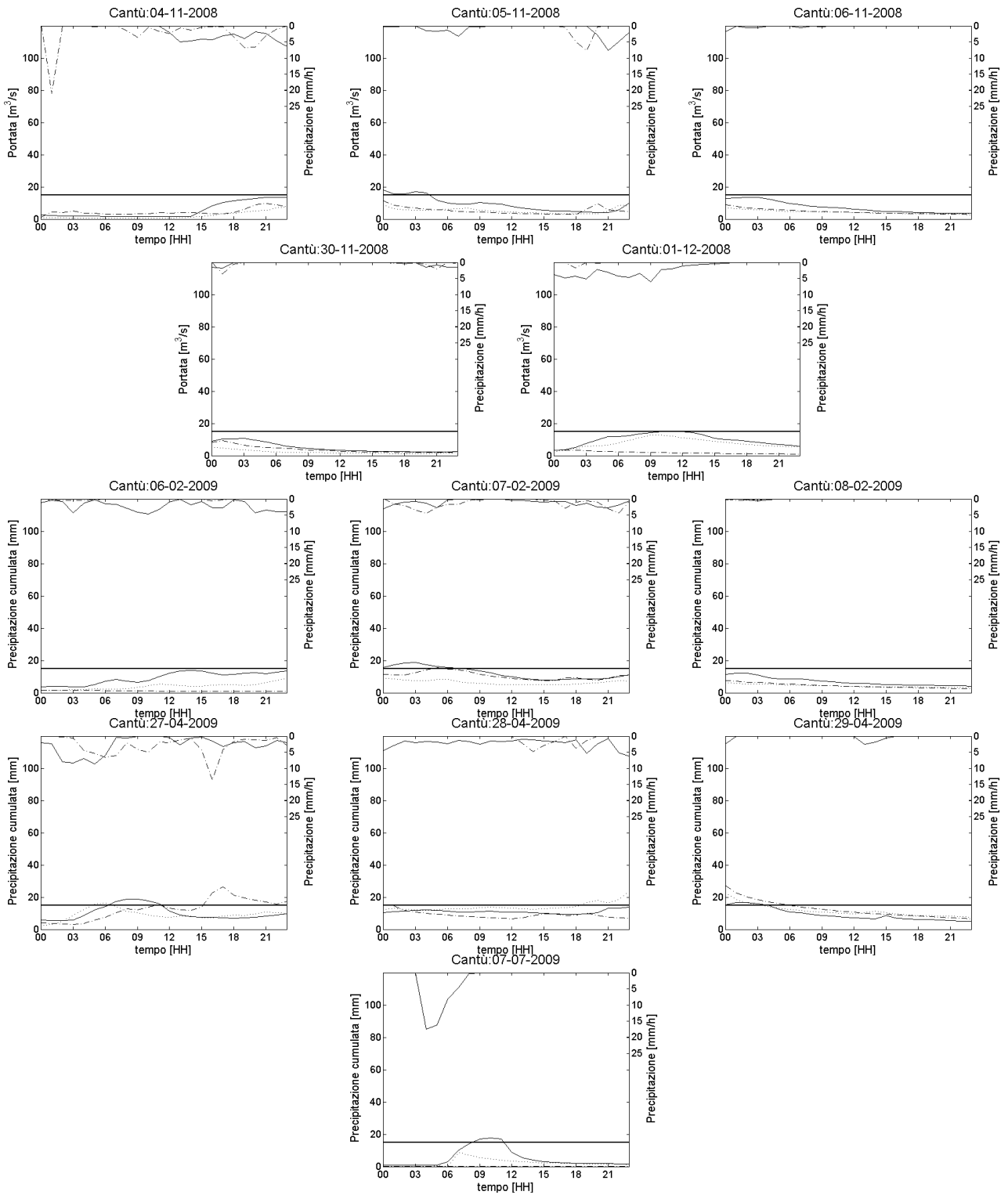


Figura 8-4: per la stazione di Cantù è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.

Tabella 8-7: tabella di contingenza per la sezione di Cantù.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	3	5
	NO	1	10

Tabella 8-8: indici di prestazione per la sezione di Cantù.

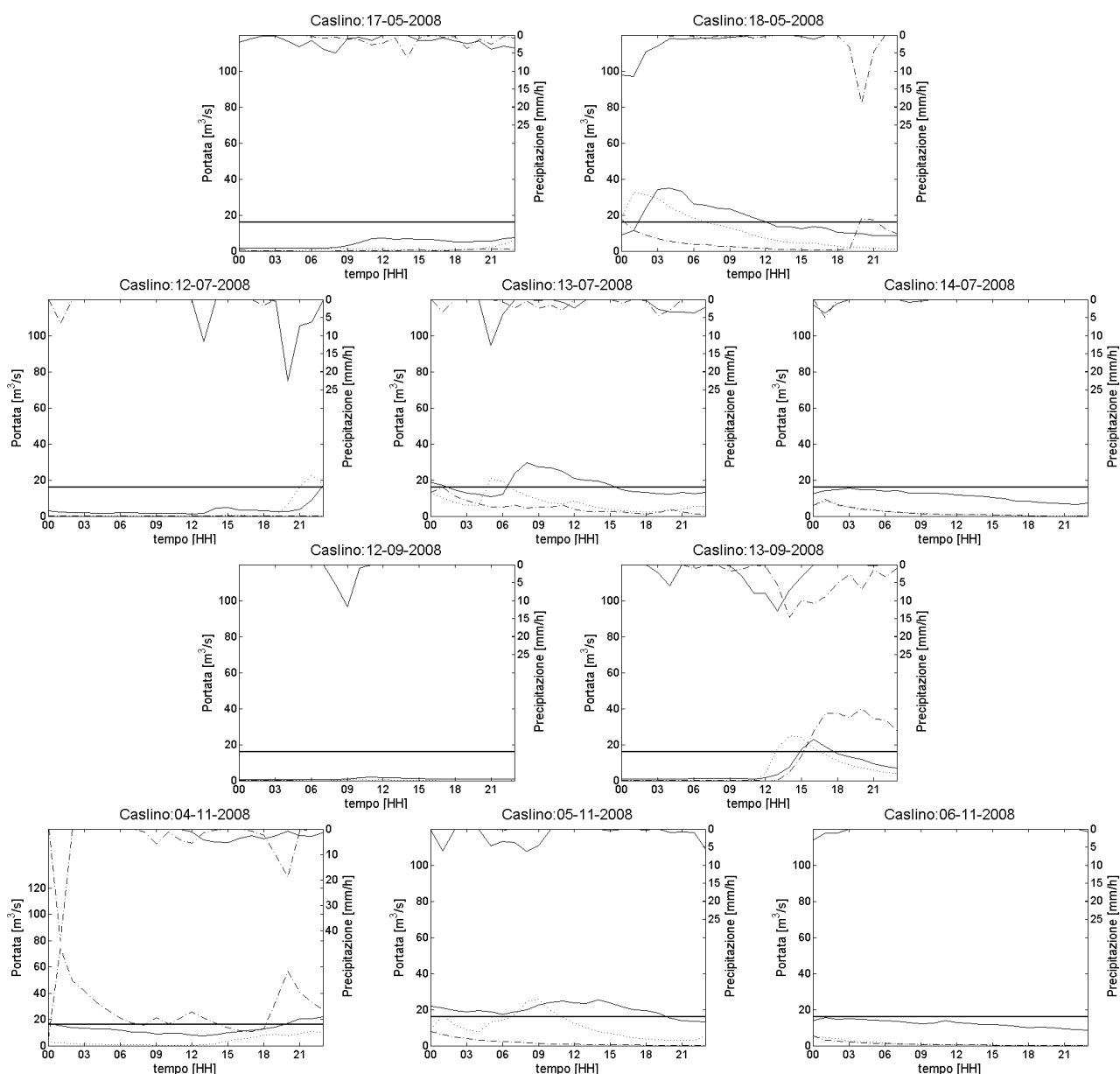
POD	0.375
FAR	0.091
CSI	0.361
CPI	0.684

Per la stazione di Cantù si osserva come la prestazione sia più scadente rispetto alle precedenti con probabilità di corretta previsione pari al 68%: questo peggioramento è dettato dalla scarsa capacità di prevedere l'evento di piena.

8.1.3 Lambro

8.1.3.1 Caslino d'Erba

La soglia stimata per la sezione in esame è di $16\text{m}^3/\text{s}$, determinata a partire da quella della stazione di Peregallo attraverso la proporzione tra le aree dei bacini, equazione 8.5.



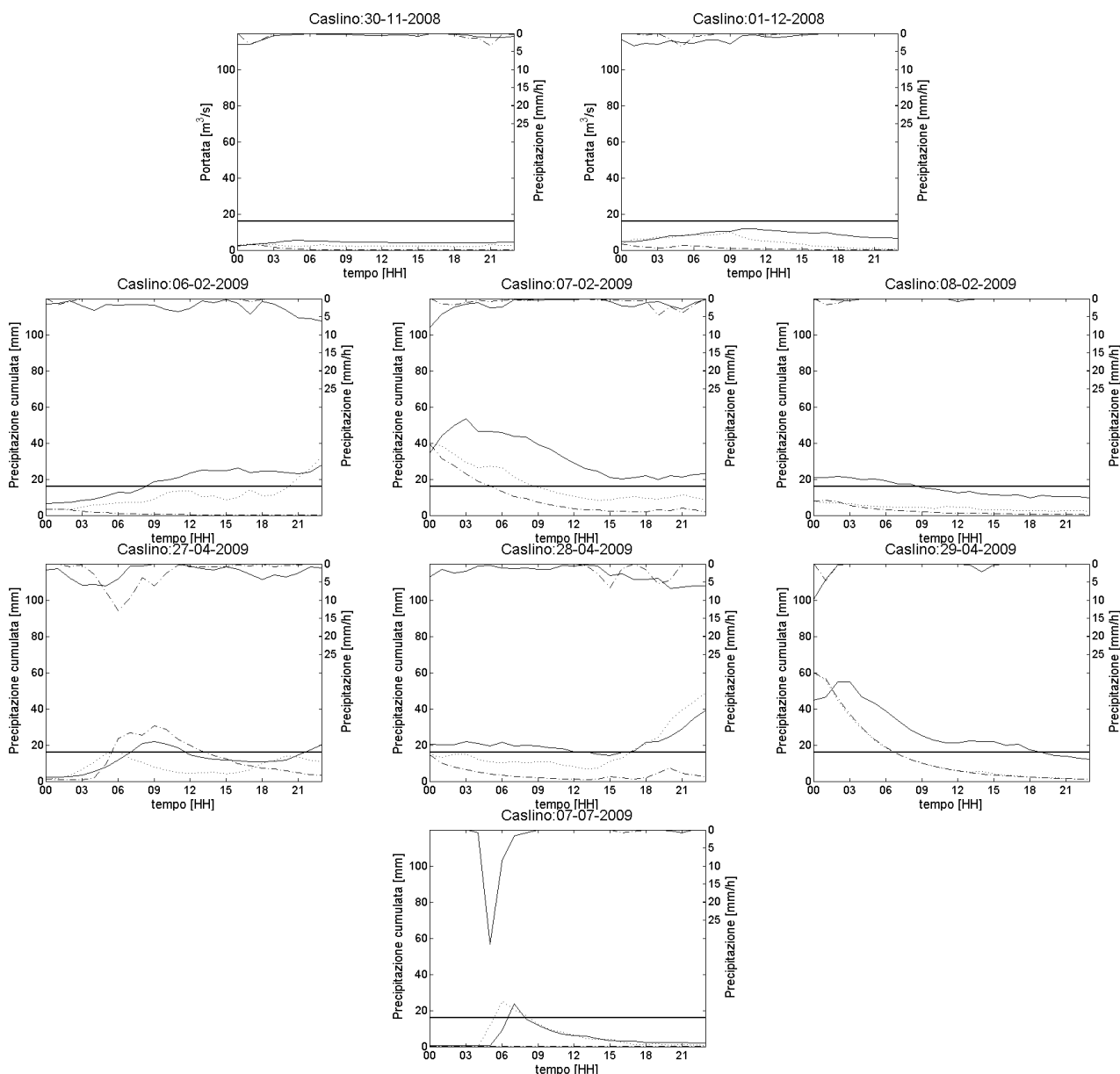


Figura 8-5: per la stazione di Caslino d'Erba è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.

Tabella 8-9: tabella di contingenza per la sezione di Caslino d'Erba.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	7	5
	NO	0	7

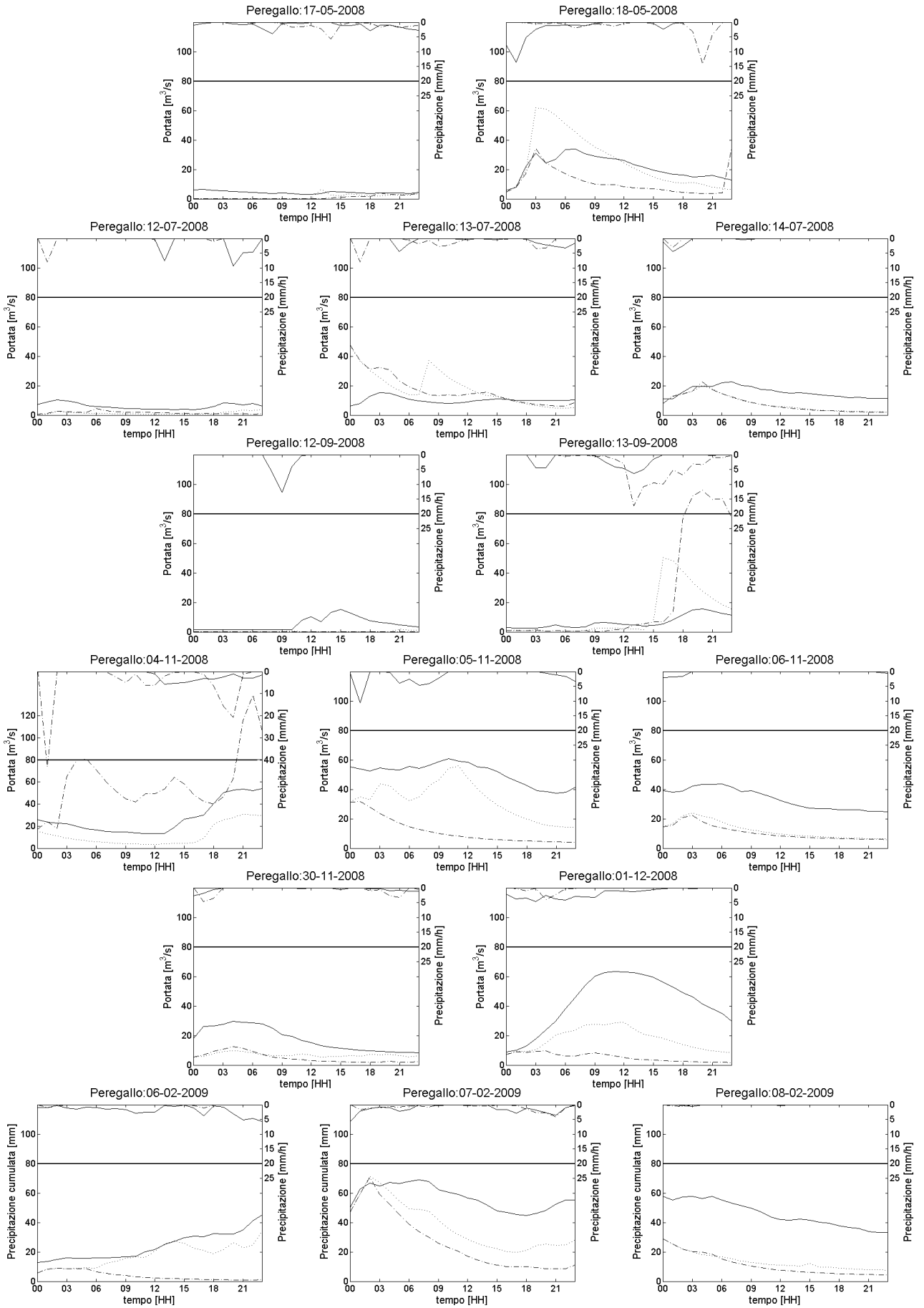
Tabella 8-10: indici di prestazione per la sezione di Caslino d'Erba.

POD	0.583
FAR	0.000
CSI	0.583
CPI	0.737

Per la stazione di Caslino d'Erba si sottolinea la mancanza di falsi allarmi; inoltre la presenza di più eventi di piena non comporta un livello prestazionale inferiore alle stazioni lungo il fiume Olona.

8.1.3.2 Peregallo

Per la stazione di Peregallo è stata assunta una soglia pari a $80\text{m}^3/\text{s}$, in quanto il centro urbano di Monza, sito poco più a valle, è compatibile con tale portata (Autorità di bacino del fiume Po s.d.).



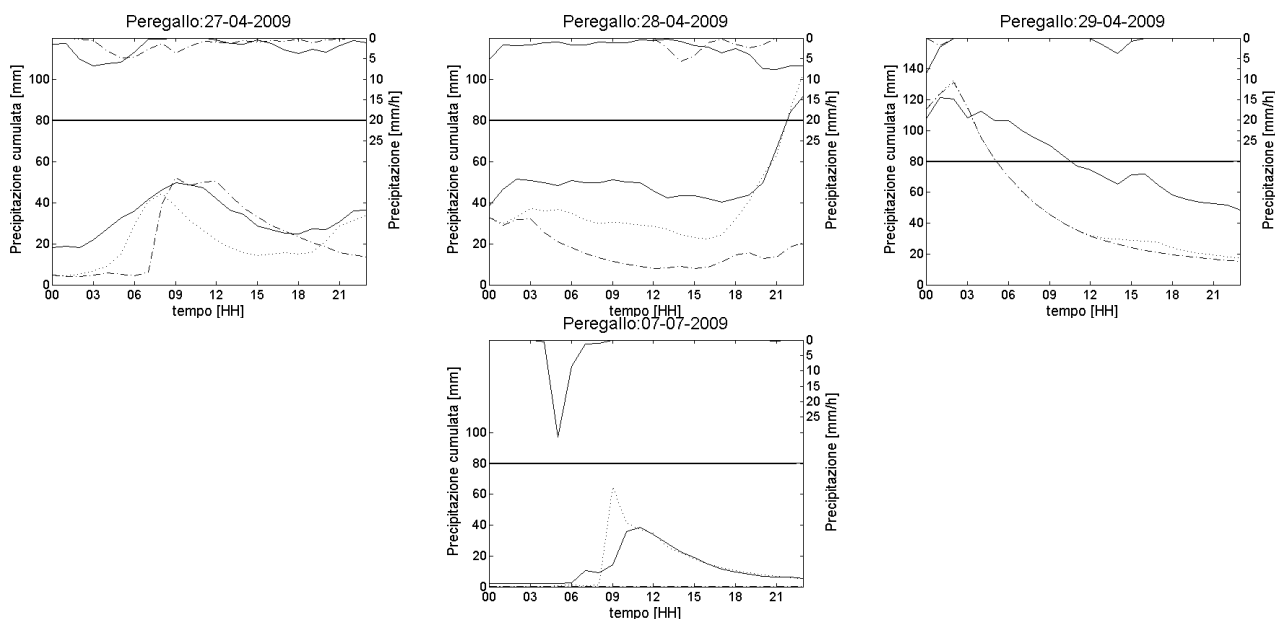


Figura 8-6: per la stazione di Peregallo è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.

Tabella 8-11: tabella di contingenza per la sezione di Peregallo.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	1	1
	NO	2	15

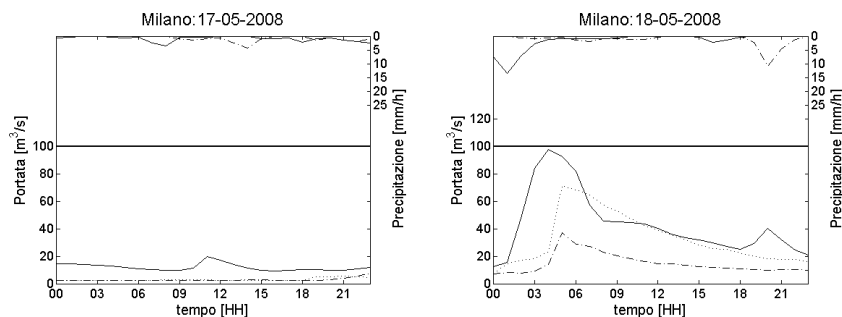
Tabella 8-12: indici di prestazione per la sezione di Peregallo.

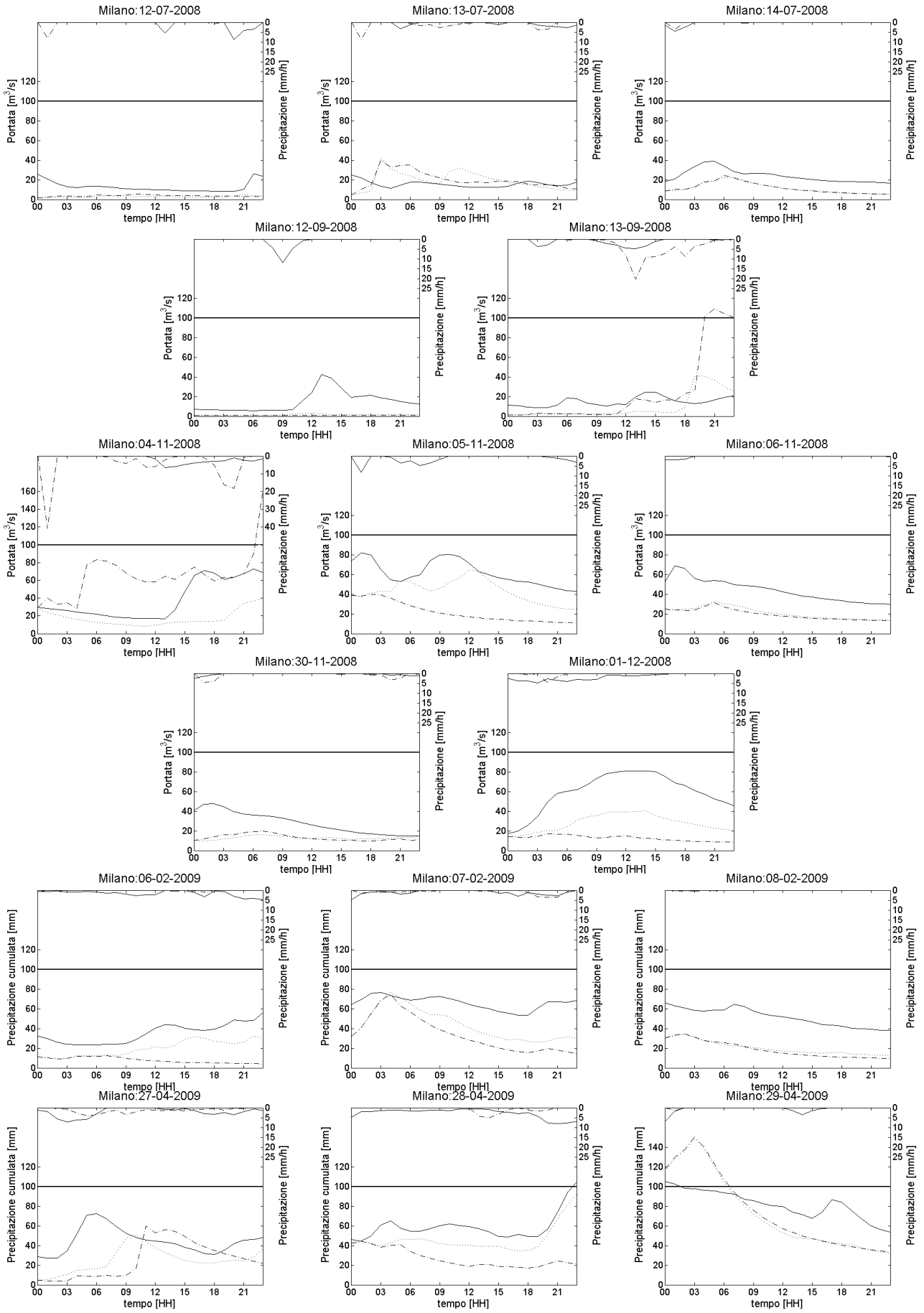
POD	0.500
FAR	0.118
CSI	0.469
CPI	0.842

Per la stazione di Peregallo si nota un altissimo livello di performance: 84% dovuto al gran numero di non-eventi previsti anche se la capacità di annunciare un evento è del 50%.

8.1.3.3 Milano, via Feltre

Per la stazione di Milano, via Feltre è stata assunta una soglia di $100\text{m}^3/\text{s}$, la massima portata compatibile con l'attraversamento dell'autostrada A4 nel comune di Sesto San Giovanni, situato poco più a monte (Autorità di bacino del fiume Po s.d.).





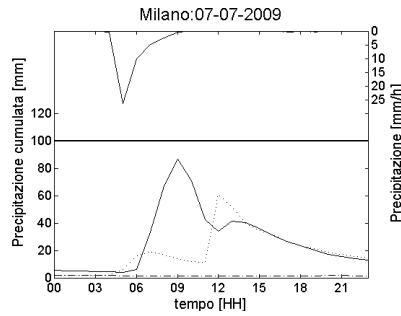


Figura 8-7: per la stazione di Milano, via Feltrina è mostrata in tratto continuo la portata osservata, in tratto puntinato la portata simulata dal modello FEST-WB con in ingresso i dati meteo osservati, in tratto punto-linea la portata simulata dal modello FEST-WB con input i dati previsti dal modello WRF. Nell'asse secondario con analogo stile sono rappresentate le precipitazioni.

Tabella 8-13: tabella di contingenza per la sezione di Milano, via Feltrina.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	1	1
	NO	2	15

Tabella 8-14: indici di prestazione per la sezione di Milano, via Feltrina.

POD	0.500
FAR	0.118
CSI	0.469
CPI	0.842

Per la stazione in oggetto possiamo fare considerazioni analoghe a quelle per Peregallo.

8.1.4 Confronto per bacino

In questo paragrafo rappresentiamo le tre tabelle di contingenza per i bacini, ottenute sommando i valori delle stazioni presenti lungo i corsi d'acqua e la tabella degli indici prestazionali.

Tabella 8-15: tabella di contingenza per il bacino dell'Olona.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	9	7
	NO	2	20

Tabella 8-16: tabella di contingenza per la sezione di Cantù.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	3	5
	NO	1	10

Tabella 8-17: tabella di contingenza per il bacino del Lambro.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	9	7
	NO	4	37

Tabella 8-18: indici di prestazione per i tre bacini di interesse.

	Olona	Seveso	Lambro
POD	0.563	0.375	0.563
FAR	0.091	0.091	0.098
CSI	0.533	0.361	0.530
CPI	0.763	0.684	0.807

Tra i tre bacini in oggetto il sistema previsionale ha le prestazioni peggiori nel caso del fiume Seveso. Per gli altri due bacini le performance sono paragonabili con una buona percentuale di eventi di previsione corrette; nel caso del Lambro il CPI risulta più elevato perché siamo in presenza di un maggior numero di non-eventi sul quale il sistema lavora meglio.

Analizzando il territorio in esame nel suo complesso, si può notare un'ottima percentuale di corrette previsioni sebbene nella metà dei casi di evento il sistema provoca un mancato allarme: questa discrepanza di prestazione è dovuta alla presenza massiccia di non-eventi e una bassa probabilità di falso allarme. Il numero di non-eventi, presenti soprattutto nelle Peregallo e Milano, può essere dovuto all'assunzione di soglie troppo elevate e/o alla disponibilità di eventi di piena di intensità tale da non costituire fonte di allarme.

Tabella 8-19: tabella di contingenza per i tre bacini di interesse aggregati.

		SIMULATO	
		SI	NO
OSSERVATO	SI	21	19
	NO	7	67

Tabella 8-20: indici di prestazione per i tre bacini di interesse aggregati.

POD	0.563
FAR	0.098
CSI	0.530
CPI	0.807

9 CONCLUSIONI

Il presente lavoro mostra come l'utilizzo in cascata di un modello meteorologico e idrologico può essere uno strumento utile all'attività di protezione idraulica di un territorio complesso come quello milanese, pur essendoci delle criticità di una certa rilevanza.

In primis, va considerato il modello meteorologico WRF, il cui output costituisce la forzante del modello idrologico: la sua risoluzione così elevata non necessariamente costituisce un punto di forza della catena. Innanzitutto costringe ad adottare un orizzonte temporale ristretto a 24 h per avere un onere computazionale ragionevole, che non permette di prevedere con un buon anticipo il potenziale evento di piena. Va poi rimarcato come le sue prestazioni non siano sempre di alto livello, come ci si potrebbe aspettare in questo caso. Le perturbazioni che il modello WRF riesce a prevedere con errori relativamente modesti sono quelle aventi una distribuzione spaziale ampia con intensità di precipitazione costante nel tempo; diversamente le perturbazioni convettive, cioè il sollevamento localizzato di una massa d'aria dovuto a un riscaldamento differenziale che determina un nubifragio di breve durata e forte intensità, il tipico temporale estivo, non vengono previste. Questo comportamento lo possiamo riscontrare se andiamo ad analizzare le prestazioni del modello per l'evento del 7 luglio 2009 (paragrafo 7.1.8), in cui non viene prevista nessun tipo di perturbazione.



Figura 9-1: sottopasso allagato a Milano in zona Tibaldi il 7 luglio 2009 dopo un intenso temporale notturno (foto di Bruno Grillini, fonte (Centro Meteorologico Lombardo 2011)).

In letteratura si è cercato di valutare i vantaggi legati a una spaziatura della griglia così ridotta, sebbene una corretta verifica richieda un'elevata densità di punti di osservazione sul territorio. E' stato rilevato che con questa impostazione si guadagna in termini di dettaglio per quanto riguarda la definizione del territorio; ma si ha un limitato miglioramento delle prestazioni rispetto a una risoluzione meno elevata in quanto non tutte le perturbazioni vengono rilevate. Un approccio ottimale potrebbe essere un ibrido tra quello probabilistico, in cui si ha un ensemble di previsioni ottenute variando l'inizializzazione del modello e la fisica, e quello deterministico ad alta risoluzione: si intende l'utilizzo di informazioni probabilistiche sull'evoluzione a larga scala e con orizzonte temporale ampio delle condizioni meteorologiche attraverso un ensemble di previsioni, seguite da un numero limitato di simulazioni ad alta risoluzione con forzante proveniente dai membri dell'ensemble più performanti o da una sorta di media pesata dei suoi risultati (Mass, et al. 2002).

Per quanto riguarda il modello idrologico FEST-WB, la cui calibrazione è la base di partenza per questo lavoro di tesi, i risultati ottenuti sono soddisfacenti per tutte le stazioni in esame, ad eccezione di Cantù e Milano: in questi due casi non si è riusciti a raggiungere un livello di prestazioni simile a quello delle altre, avendo complessivamente una sottostima delle portate, seppur sufficientemente contenuta per considerare la calibrazione adeguata. I risultati ottenuti per queste due sezioni sono rappresentativi delle criticità incontrate in questa fase imputabili a:

- i dati meteorologici osservati a disposizione, che rispetto alla risoluzione adottata risultano essere scarsi e mal distribuiti spazialmente nel territorio in esame; si vedano la Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3 e Figura 4-4;
- i dati idrometrici osservati a disposizione, che presentano una serie di problematiche relative alla quantità, qualità e al periodo temporale di validità. In particolare si fa notare come la stazione di Cantù non sia attiva al giorno d'oggi e addirittura non copre tutto l'orizzonte temporale oggetto dell'analisi; inoltre costituiscono anche degli elementi di incertezza il fatto che la scala di deflusso di Castellanza sia attiva dal 01/01/2002 senza che ci siano stati aggiornamenti e i range di validità di tutte e 6 le stazioni risultano talvolta insufficienti per la stima delle portate più elevate: quest'ultima considerazione ha una certa rilevanza in quanto l'obiettivo finale è la previsione di eventi di piena estremi;
- i dati osservati per la caratterizzazione del suolo, che non risultano avere un livello di accuratezza uniforme (vedi tessitura del suolo, capitolo 4.3) e che non comprendono la porzione svizzera del bacino dell'Olona;
- all'alto grado di urbanizzazione del territorio, che modifica il naturale assetto idrologico del bacino determinandone una risposta più rapida e più intensa alla forzante meteorologica; in particolare questo si è riscontrato nel bacino del fiume Lambro tra le città di Monza e Milano, di cui non sono noti gli apporti del sistema fognario al corso d'acqua;
- le opere idrauliche lungo i corsi d'acqua in esame, quali la diga di Ponte Gurone sull'Olona (da fine 2010 a oggi) e il cavo Diotti sul Lambro, di cui non si ha una conoscenza approfondita del funzionamento idraulico e dell'influenza sulle portate.

Tuttavia si è riusciti con risultati soddisfacenti a compensare queste fonti di errore sfruttando la versatilità del modello: per il Lambro è stato possibile aumentare l'area contribuente per la stazione di Milano ed escludere i laghi dalla modellazione.

Per ottenere risultati ancora migliori in futuro bisogna agire soprattutto sui dati in ingresso, aumentandone la densità e la qualità, e approfondire l'effetto dell'azione antropica sul territorio in esame.

Per quanto riguarda la verifica delle prestazioni compiuta si è rilevato che il sistema lavora bene in caso di non-evento, cioè piene che non superano la soglia di allarme; d'altra parte invece in occasione di un evento la probabilità di annunciarlo è paragonabile all'uscita della testa in un lancio di moneta. Complessivamente si può affermare che il sistema allarme è efficace viste le alte percentuali di previsione corretta: questo risultato è influenzato da un maggiore presenza di non-evento rispetto agli eventi.

Su queste conclusioni sussistono delle incertezze in relazione alle soglie di allarme sulla portata e agli eventi considerati. Le prime, infatti non sono il frutto di una analisi specifica per la sezione in esame, bensì di un'assunzione sulla base di studi di compatibilità idraulica sui manufatti lungo i corsi d'acqua: pertanto tali soglie possono risultare inadeguate e distorcere la valutazione complessiva della catena idro-meteorologica. Un loro studio più approfondito costituisce una possibilità di miglioramento dell'affidabilità del sistema previsionale. A proposito delle piene, scelte in base ai dati meteorologici di previsione a disposizione, possiamo affermare che non costituiscono un campione sufficientemente rappresentativo di eventi estremi, quindi in grado di superare le capacità di deflusso delle sezioni in esame.

BIBLIOGRAFIA

Andrea Rossa, Katharina Liechti, Massimiliano Zappa, Michael Bruen, Urs Germann, Günther Haase, Christian Keil, Peter Krahe. «The COST 731 Action: A review on uncertainty propagation in advanced.» *Atmospheric Research*, 2011: 150-167.

ARPA [1]. <http://idro.arpalombardia.it>.

ARPA [2]. <http://www2.arpalombardia.it>.

Autorità di Bacino del fiume Po. «Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino del Lambro.»

Autorità di bacino del fiume Po. «Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino dell'Olona.»

Autorità di bacino del fiume Po. «Variante al Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) approvato con DPCM 24 maggio 2001 - Fasce Fluviali del Fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il Deviatore Redefossi.» Relazione tecnica.

Centro Meteo Italiano. <http://www.centrometeoitaliano.it/>.

Centro Meteorologico Lombardo. *Atlante dei climi e microclimi della Lombardia*. 2011.

—. <http://www.centrometeolombardo.com>.

Ceppi, Alessandro. «Real Time flood forecasts coupling meteorological and hydrological models.» Tesi di dottorato, 2011.

Comune di Castiglione Olona. «Ridefinizione e regolamentazione delle aree soggette a P.A.I. in Comune di Castiglione Olona. Aggiornamento a seguito della realizzazione della diga di Gurone sul fiume Olona.» Relazione tecnica.

EFAS - European Flood Awareness System. <http://www.efas.eu/>.

European Commission - Joint Research Center - Institute for Environment and Sustainability. <http://floods.jrc.ec.europa.eu/ongoing-floods>.

European Space Agency. <http://due.esrin.esa.int/globcover/>.

Holland, Greg, Joe Klemp, Bob Gall, Jordan Powers, e Dale Barker. «Overview Of Recent Progress In The Development And Operational Applications Of The Weather Research And Forecasting (WRF) Model.» 15 Novembre 2007.

IPCC. «Climate Change 2013, The Physical Science Basis: working group I contribution for the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.» 2013.

LegaAmbiente. «L'Italia delle alluvioni. Gli impatti degli eventi estremi di pioggia nelle città italiane.»

Maidment. *Handbook of Hydrology*. 2001.

Mancini, Marco. «La modellazione distribuita della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e della scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento.» Tesi di dottorato, 1990.

Martinec, J., e A. Rango. «Parameter values for snowmelt runoff modelling.» *J. Hydrol*, 1986: 197-219.

Mass, C.F., D. Ovens, K. Westrick, e B.A. Colle. «Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?» *American Meteorological Society*, 2002: 407-430.

Massimiliano Zappa, Mathias W. Rotach, Marco Arpagaus, Manfred Dorninger, Christoph Hegg, Andrea Montani, Roberto Ranzi, Felix Ament, Urs Germann, Giovanna Grossi, Simon Jaun, Andrea Rossa, Stephan Vogt, André Walser, Johannes Wehrhan and Claudia Wunr. «MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological.» *Royal Meteorological Society*, 2008: 80-87.

Montaldo, N., G. Ravazzani, e M. Mancini. «On the prediction of the Toce alpine basin floods with distributed hydrologic models.» *Hydrol. Process*, 2007: 608-621.

Munich_Re. «Geo Risks Research.» Gennaio 2014.

Parco Regionale della Valle del Lambro.

Ponce, V.M. «Engineering Hydrology.» 1989: 206-261.

Priestley, C.H.B, e R.J. Taylor. «On the assesment of the surface heat flux and evaporation using large scale parameters.» *Monthly Weather rev.*, 1972: 81-92.

Provincia di Milano.

http://www.provincia.mi.it/pianificazione_territoriale/paesaggio_ambiente/difesa_del_suolo/ingegneria_naturalistica/corso2005/index.html.

Provincia di Milano. «Sperimentazione di modelli progettuali-tipo per la riqualificazione fluviale: il caso del F. Olona a Nerviano.» Dicembre 2008.

Rabuffetti, D., G. Ravazzani, C. Corbari, e M. Mancini. «Verification of operational Quantitative Discharge Forecast (QDF) for a regional warning system - the AMPHORE case studies in the upper Po River.» *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 2008: 161-163.

Ravazzani, G., D. Rabuffetti, C. Corbari, A. Ceppi, e M. Mancini. «Testing FEST-WB, a continuous distributed model for operational quantitative discharge forecast in the upper Po river.» *Proceedings of the AMHY-FRIEND International Workshop on Hydrological Extremes*. Cosenza (Italia), 2010.

Ravazzani, G., M. Mancini, I. Giudici, e P. Amadio. «Effects of soil moisture parameterization on a real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds. In Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management, Proc. Symposium HS 2004 at IUGG 2007.» *IAHS Publ.*, 2007: 407-416.

Regione Lombardia. <http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale>.

RiskNet. <http://www.risknet-alcotra.org/it/index.cfm/database-progetti.html>.

Salandin, A., D. Rabuffetti, S. Barbero, M. Cordola, G. Volontè, e Mancini M. «Il lago effimero sul ghiacciaio del Belvedere: monitoraggio e simulazione numerica del fenomeno finalizzata alla previsione e gestione dell'emergenza.» *Neve e Valaghe*, 2004: 58-65.

Tarboton, D.G., T.G. Chowdhury, e T.H. Jackson. *A Spatially Distributed Energy Balance Snowmelt Model*. Utah Water Research Laboratory, 1994.

United Nations Framework Convention on Climate Change.

https://unfccc.int/adaptation/nairobi_work_programme/knowledge_resources_and_publications/items/5367.php.

Varesenews. <http://www3.varesenews.it/varese/la-diga-e-una-realta-ora-olona-fa-meno-paura-159128.html>.

WRF. <http://www.wrf-model.org/index.php>.