

**POLITECNICO DI MILANO**

**Facoltà di Ingegneria**

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



**MODELLISTICA DISTRIBUITA PER LA SIMULAZIONE DEGLI  
IMPATTI CAUSATI DAI MUTAMENTI CLIMATICI SUL CICLO  
IDROLOGICO: CASO DI STUDIO DEL FIUME TOCE**

**Relatore: Ing. Giovanni Ravazzani**

**Tesi di laurea di:  
Matteo Ghilardi  
Matr. 745620**

**Anno Accademico 2010-2011**

---

## Indice generale

1	Introduzione.....	10
2	Area di studio e dati disponibili.....	17
2.1	Bacino del Toce.....	18
2.2	Dati disponibili.....	21
2.2.1	Dati meteo.....	21
2.2.2	Dati di portata.....	22
2.2.3	Dati delle dighe Enel Produzione.....	23
2.2.4	Modelli e scenari climatici.....	33
3	Materiali e metodi.....	35
3.1	Modello idrologico.....	35
3.2	Mappe tematiche.....	36
4	Calibrazione e validazione del modello.....	42
5	Confronto tra modelli idrologici.....	53
6	Analisi dei risultati.....	68
6.1	Rianalisi del periodo storico.....	68
6.2	Simulazioni da scenario climatico.....	86
7	Conclusioni e sviluppi futuri.....	101
	Appendice A: Modelli idrologici.....	104
	Appendice B: Analisi degli output.....	118

---

## Indice delle illustrazioni

Figura 2.1: modello digitale delle quote tridimensionale per il bacino del Toce.....	17
Figura 2.2: vista aerea del fiume Toce.....	18
Figura 2.3: le cascate del Toce, dove il fiume supera un dislivello di 130m.....	19
Figura 2.4: area drenata dal fiume Toce alle cascate del Toce considerando anche i bacini collegati.....	26
Figura 2.5: curva di durata delle portate per il fiume Toce alla cascata.....	27
Figura 2.6: area drenata dal fiume Toce a fondovalle considerando i bacini collegati .....	28
Figura 2.7: area drenata dal fiume Devero presso la diga di Codelago e dai bacini collegati.....	29
Figura 2.8: area drenata dal fiume a Domodossola, considerando anche gli invasi artificiali.....	30
Figura 2.9: area drenata dal Loranco presso la diga di Alpe Cavalli, considerando anche i bacini collegati.....	31
Figura 2.10: curva di durata delle portate per il fiume Toce a Candoglia.....	32
Figura 3.1: modello digitale delle quote per il bacino del Toce chiuso a Candoglia.	37
Figura 3.2: mappa delle aree contribuenti al deflusso per il bacino del Toce.....	39
Figura 3.3: mappa dei puntatori ottenuta mediante software ERIS.....	40
Figura 3.4: idrografia del bacino in formato raster (griglia).....	41
Figura 4.1: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontemaglio nel periodo di calibrazione.....	46
Figura 4.2: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Candoglia nel periodo di calibrazione.....	46
Figura 4.3: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Candoglia nel periodo di validazione.....	46
Figura 4.4: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontemaglio nel periodo di validazione.....	46

---

Figura 4.5: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontetto nel periodo di calibrazione.....	47
Figura 4.6: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontetto nel periodo di validazione.....	47
Figura 4.7: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Masera nel periodo di calibrazione.....	47
Figura 4.8: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Masera nel periodo di validazione.....	47
Figura 4.9: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Ponte Caddo nel periodo di calibrazione.....	48
Figura 4.10: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Ponte Caddo nel periodo di validazione.....	48
Figura 4.11: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Codelago nel periodo di calibrazione.....	48
Figura 4.12: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Codelago nel periodo di validazione.....	48
Figura 4.13: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Alpe Cavalli nel periodo di calibrazione.....	49
Figura 4.14: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Alpe Cavalli nel periodo di validazione.....	49
Figura 5.1: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante gli eventi di piena dell'ottobre 2000.....	54
Figura 5.2: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante gli eventi di piena del novembre 2004.....	55
Figura 5.3: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante la piena del maggio 2008.....	56
Figura 5.4: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante gli eventi di piena del novembre 2008.....	57
Figura 5.5: andamento del volume cumulato predetto dal modello energetico e da quella semplificato per il bacino del Toce nel periodo 2000-2008.....	58

---

Figura 5.6: curve di durata delle portate simulate dai modelli idrologici nel periodo 2000-2008.....	59
Figura 5.7: evapotraspirazione media mensile simulata per il bacino del Toce durante il periodo di calibrazione.....	60
Figura 5.8: curve di evapotraspirazione simulata cumulata durante il periodo di calibrazione nel bacino del Toce.....	61
Figura 5.9: analisi statistica delle serie simulate da differenti modelli idrologici nella sezione di Fondovalle.....	62
Figura 5.10: volumi cumulati predetti nella sezione di Fondovalle.....	62
Figura 5.11: analisi statistica delle serie simulate da differenti modelli idrologici nella sezione di Candoglia.....	63
Figura 5.12: volumi cumulati predetti nella sezione di Candoglia.....	63
Figura 5.13: analisi statistica delle serie simulate da differenti modelli idrologici nella sezione di Alpe Cavalli.....	64
Figura 5.14: volumi cumulati predetti nella sezione di Alpe Cavalli.....	64
Figura 5.15: test di buon adattamento per le serie simulate dai due modelli a Candoglia; in rosso vengono rappresentati gli scarti.....	65
Figura 5.16: test di buon adattamento per le serie di dati simulati a Candoglia: vengono evidenziate la mediana e la deviazione standard registrate.....	66
Figura 6.1: curve di durata delle portate per le elaborazioni da scenario climatico messe a confronto con quelle elaborate a partire da simulazioni con dati osservati nella sezione di Candoglia.....	70
Figura 6.2: curve di durata delle portate per le elaborazioni da scenario climatico messe a confronto con quelle elaborate a partire da simulazioni con dati osservati nella sezione di Alpe Cavalli.....	71
Figura 6.3: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello energetico nella sezione di Candoglia.....	72
Figura 6.4: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello semplificato nella sezione di Candoglia.....	72
Figura 6.5: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello	

---

energetico nella sezione di Alpe Cavalli.....	73
Figura 6.6: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello semplificato nella sezione di Alpe Cavalli.....	73
Figura 6.7: volumi cumulati simulati dai modelli FEST-WB e FEST-EWB nel periodo 2000-2008 a Candoglia.....	75
Figura 6.8: volumi cumulati predetti dai modelli energetico e semplificato nel periodo 2000-2008 ad Alpe Cavalli.....	76
Figura 6.9: LSPP calcolate, per il bacino del Toce, nel periodo 2000-2008. La serie Simulata fa riferimento ai dati pluviometrici provenienti dallo scenario climatico.....	80
Figura 6.10: LSPP calcolate, per la sezione di Alpe Cavalli, nel periodo 2000-2008. La serie Simulata fa riferimento ai dati pluviometrici provenienti dallo scenario climatico.....	81
Figura 6.11: tasso di evapotraspirazione medio mensile simulato a scala di bacino nel periodo storico. Vengono messi a confronto differenti modelli idrologici inizializzati con dati diversi.....	82
Figura 6.12: evapotraspirazione cumulata simulata dai due modelli nel periodo 2000-2008 basandosi sullo scenario climatico.....	84
Figura 6.13: tasso di evapotraspirazione medio mensile simulato a scala locale (Alpe Cavalli) nel periodo storico. Vengono messi a confronto differenti modelli idrologici inizializzati con dati diversi.....	85
Figura 6.14: evapotraspirazione cumulata simulata dai due modelli nel periodo 2000-2008 basandosi sullo scenario climatico.....	86
Figura 6.15: curve di durata simulate dal modello energetico e semplificato nel periodo 2009-2050.....	88
Figura 6.16: curve di durata simulate dal modello energetico e semplificato nel periodo 2009-2050, presso la diga di Alpe Cavalli.....	89
Figura 6.17: analisi statistica delle curve di durata simulate dai due differenti modelli idrologici a Candoglia.....	90
Figura 6.18: analisi statistica delle curve di durata simulate dai due differenti modelli	

---

idrologici ad Alpe Cavalli.....	90
Figura 6.19: andamento dei volumi cumulati simulati dal modello idrologico semplificato e da quello energetico nel periodo 2009-2050.....	92
Figura 6.20: andamento dei volumi cumulati simulati dal modello idrologico semplificato e da quello energetico nel periodo 2009-2050, per la sezione di Alpe Cavalli.....	93
Figura 6.21: linea segnalatrice di probabilità pluviometrica elaborata per lo scenario climatico a Candoglia.....	95
Figura 6.22: linea segnalatrice di probabilità pluviometrica elaborata per lo scenario climatico, presso la diga di Alpe Cavalli.....	96
Figura 6.23: tasso di evapotraspirazione media mensile simulata a Candoglia.....	97
Figura 6.24: evapotraspirazione cumulata simulata dai modelli idrologici dal 2009 al 2050.....	98
Figura 6.25: tasso di evapotraspirazione media mensile simulata ad Alpe Cavalli..	99
Figura 6.26: evapotraspirazione cumulata simulata dai modelli idrologici, nella sezione di Alpe Cavalli.....	100

---

## Indice delle tabelle

Tabella 2.1: caratteristiche principali dei vari bacini ed impianti idroelettrici considerati nella naturalizzazione dei flussi in ogni sezione.....	25
Tabella 4.1: Indici statistici valutati sul bacino del Toce nei periodi di calibrazione (2000-2004) e di validazione (2005-2008).....	51
Tabella 4.2: Errori relativi del modello rispetto alle osservazioni; i valori sono da intendersi adimensionali.....	51
Tabella 5.1: indici statistici valutati mettendo a confronto le simulazioni del modello energetico con quelle del modello semplificato.....	65
Tabella 5.2: parametri statistici calcolati per le serie di dati simulati a Candoglia nel periodo 2000-2008.....	66
Tabella 6.1: indici statistici valutati per le curve di durata delle portate simulate rispettivamente da modello energetico e semplificato con differenti set di dati in ingresso. I dati si riferiscono al confronto tra modello FEST con dato osservato e modello FEST basato su scenario climatico Remo. .....	74
Tabella 6.2: errore relativo tra i volumi cumulati simulati basandosi su dati osservati e quelli simulati da scenario climatico: i valori sono da intendersi adimensionali.....	76
Tabella 6.3: massimi di portata annui simulati a Candoglia nel periodo 2000-2008.	77
Tabella 6.4: massimi di portata annui simulati ad Alpe Cavalli nel periodo 2000- 2008.....	78
Tabella 6.5: portata indice valutata sui massimi annuali di piena simulati nel periodo 2000-2008.....	78
Tabella 6.6: precipitazione media oraria valutata nel periodo 2000-2008 per la simulazione da dato osservato e per la simulazione da scenario climatico.....	79
Tabella 6.7: tassi di precipitazione oraria massimi simulati dallo scenario climatico a confronto con quelli osservati nel periodo 2000-2008.....	79



---

Tabella 6.8: confronto tra la radiazione osservata e quella prevista da scenario climatico, nel periodo 2000-2008.....	83
Tabella 6.9: variazione della portata media annua prevista dai modelli idrologici seguendo lo scenario climatico. Le variazioni sono calcolate rispetto al periodo 2000-2008.....	91
Tabella 6.10: indici statistici valutati mettendo a confronto le previsioni dei differenti modelli idrologici, per il periodo che va dal 2009 al 2050.....	91
Tabella 6.11: errori relativi commessi sulla previsione dei volumi cumulati.....	92
Tabella 6.12: portata indice calcolata per le simulazioni da scenario climatico. La colonna 2000-2008 si riferisce alle simulazioni con scenario climatico ed è inserita a scopo comparativo.....	94
Tabella 6.13: precipitazione media annua prevista dal modello regionale climatico Remo.....	94
Tabella 6.14: massimi di altezza di precipitazione oraria simulati dallo scenario climatico.....	94
Tabella 6.15: evapotraspirazione media annua valutata per lo scenario climatico e per il periodo storico.....	101

# 1 Introduzione

Il rapido e continuo incremento dell'immissione di gas serra in atmosfera, a partire dalla Rivoluzione Industriale, ha dato origine ad alcuni dei più grandi interrogativi della storia della scienza. L'aumento della temperatura atmosferica registrato da allora sino ad oggi può essere realmente attribuito all'incremento delle concentrazioni di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CFC<sub>s</sub> ed altri gas serra in atmosfera? Se così fosse, quale sarà l'incremento medio di temperatura negli anni a venire? E infine, quale sarà l'effetto di questo incremento sul clima terrestre, gli esseri umani e l'ambiente su larga scala? La comunità scientifica cerca le risposte a queste domande concentrandosi sul monitoraggio dei cambiamenti climatici e sulla misurazione dei fattori chiave del processo: radiazione solare, albedo, flussi energetici superficiali, concentrazione dei gas serra e temperatura superficiale.

L'evoluzione futura di alcune variabili, come la temperatura media superficiale della superficie terrestre, può essere al giorno d'oggi stimata, ma con un grado di approssimazione che non è ancora soddisfacente.

A partire dai primi anni novanta l'idrologia si è imposta come scienza di importanza primaria nel tentativo di studiare al meglio il riscaldamento globale indotto (Eagleson, 1991). Questo ha condotto ad un processo di ripensamento critico dei metodi utilizzati per pianificare la gestione della risorsa idrica.

Il ciclo idrologico gioca intuitivamente un ruolo fondamentale all'interno del meccanismo di riscaldamento globale associato ad emissioni di gas serra. Una delle difficoltà principali della modellazione dei potenziali cambiamenti climatici risiede nella forte influenza che l'accoppiamento oceano-atmosfera esercita sul trasporto di calore ed umidità atmosferica attorno al globo terrestre. Il moto di rotazione terrestre e la distribuzione delle terre emerse e degli oceani (che occupano circa il 70% della

superficie complessiva) determinano lo schema di circolazione generale a larga scala. Il regime idrologico a scala regionale (ovvero del singolo bacino) è figlio di questa “trama” di circolazione atmosferica generale, della latitudine, delle caratteristiche morfo-geografiche dell'area, della geologia, della vegetazione e della insolazione, nonché dell'uso del suolo.

Attualmente si stanno utilizzando diversi General Circulation Models (GCMs) per simulare il grado di sensibilità climatica all'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera (principalmente biossido di carbonio). Il primo GCM, che risale al 1956 (Phillips), fu concepito come un risolutore di problemi di condizioni al contorno, nel tentativo di descrivere il pattern generale di circolazione atmosferica, sotto forzanti esterne note. I GCMs utilizzano la legge di conservazione della massa, della quantità di moto e del calore in atmosfera, espresse sotto forma di un sistema di equazioni non lineari alle derivate parziali. Per poter determinare la soluzione numerica necessitano delle condizioni al contorno per lo strato superiore (radiazione solare incidente) ed inferiore (terra, oceano, albedo, distribuzione della vegetazione ecc...).

All'inizio degli anni novanta le prime simulazioni da GCM (Mitchell et al. 1990), basate su uno scenario di incremento della concentrazione di CO<sub>2</sub>, mostrarono tutte un incremento della temperatura non trascurabile (tra 1°C e 5°C), previsto per la metà del XXI secolo. Queste previsioni suggerirono un probabile riscaldamento delle future stagioni invernali e primaverili alle alte latitudini (sopra i 50° circa) ed estati più secche alle medie latitudini. A livello globale ciò si traduce in un'intensificazione generale del ciclo idrologico: alte temperature porterebbero ad alti tassi di evapotraspirazione ed un incremento della precipitazione liquida stimato originariamente tra il 3% ed il 15%.

i GCMs furono concettualmente concepiti per simulare la circolazione atmosferica media a larga scala (Holton, 1992): le variabili previste dai modelli sono temperatura, umidità, vento, pressione e altri indicatori basilari delle condizioni meteo. Altre variabili di grande importanza, che giocano un ruolo fondamentale

all'interno del ciclo idrologico, come il runoff e la evapotraspirazione, non vengono simulate dai GCM perchè hanno luogo lungo le frontiere del dominio di calcolo. In particolare l'evapotraspirazione (che rappresenta lo scambio di calore latente e massa d'acqua tra superficie terrestre e atmosfera) assume, all'interno dell'equazione di bilancio di massa, lo stesso peso che ha la precipitazione.

Per questo motivo le previsioni effettuate da modelli GCM (che hanno risoluzioni spaziali massime di circa 200-300km) si rivelano inadeguate a rappresentare i processi idrologici a breve termine (a scala giornaliera) che avvengono sulla terra emersa. Una prima soluzione consiste nella possibilità di utilizzare dei Regional Climate Models (RCM) per affinare la griglia dei modelli globali. I RCM vengono innestati all'interno delle previsioni effettuate a larga-scala: in pratica i GCM forniscono le condizioni al contorno con le quali i RCM operano, in modo da restituire la previsione delle principali forzanti meteorologiche ad una scala di aggregazione spaziale sensibilmente migliorata. Tuttavia anche l'utilizzo dei RCM si rivela non particolarmente adatto a descrivere nel dettaglio alcuni processi idrologici, soprattutto nei bacini idrografici di modeste dimensioni.

Contemporaneamente allo sviluppo dei modelli climatici l'idrologia ha proposto a livello internazionale una grande quantità di modelli idrologici che hanno il pregio di riuscire a cogliere, con buona accuratezza, ogni aspetto del ciclo dell'acqua a scala regionale. I modelli idrologici possono essere innestati all'interno dei GCMs o dei RCMs in modo da inquadrare il problema da un punto di vista differente e simulare le grandezze caratteristiche dei processi idrologici direttamente a scala di bacino. Tuttavia innestare dei modelli idrologici, a scala più o meno estesa, all'interno di modelli climatici richiede una serie di operazioni non banali: downscaling spaziale, time scaling, parametrizzazione di alcune grandezze idrologiche e infine calibrazione e validazione del modello stesso.

Una descrizione accurata dei processi idrologici, e delle loro eventuali variazioni a seguito di mutamenti climatici, può avvenire solo attraverso l'utilizzo di una "catena" che, partendo dai modelli a circolazione globale arriva, seguendo una serie

di innesti, ad un modello idrologico ad alta risoluzione operante a scala di bacino. In questo modo si realizza un infittimento della griglia di calcolo procedendo lungo la catena di simulazione e si riescono a cogliere i delicati processi che hanno luogo sulla superficie, come l'evapotraspirazione, che sfuggono ai modelli a vasta scala. In letteratura si trovano esempi di approcci simili già a partire dai primissimi anni novanta (Holsteter e Giorgi, 1993).

Nonostante le difficoltà tecniche sono stati fatti notevoli progressi, che hanno reso attuabili le simulazioni idrologiche basate su scenari di riscaldamento da gas serra. Tali scenari possono essere simulati dai GCM oppure essere puramente ipotetici. A livello generale le varie simulazioni da modelli globali mostrano una tendenza che porta all'intensificazione del ciclo idrologico, con un incremento del tasso di evapotraspirazione e del tasso di precipitazione media annua.

Questo lavoro di tesi prende in esame la possibilità di utilizzare la modellazione idrologica distribuita come strumento per analizzare e studiare gli impatti causati dal riscaldamento globale sul ciclo idrologico di un bacino meso-alpino. L'approccio distribuito discretizza il dominio di calcolo in celle di uguali dimensioni, risolvendo in ognuna di esse le equazioni del sistema. In questo modo si ottiene una maggiore risoluzione spaziale nella descrizione delle variabili idrologiche. L'idea basilare è utilizzare gli scenari provenienti da downscaling di modelli climatici regionali come input per i modelli idrologici e simulare l'andamento futuro dei parametri chiave a scala distribuita all'interno del bacino.

Le simulazioni sono molto onerose dal punto di vista computazionale: viene pertanto presa in considerazione l'ipotesi di poter utilizzare modelli idrologici semplificati (che risolvono il bilancio di massa per ogni cella del dominio di calcolo e valutano la evapotraspirazione come una quota parte, empiricamente determinata, della ET potenziale) al fianco di modelli a bilancio idrico ed energetico (che descrivono in maniera fisicamente basata la ET ed eseguono un bilancio energetico accoppiato ad un bilancio di massa).

Il primo obiettivo è la calibrazione multiscala dei modelli idrologici. Utilizzando una serie di dati osservati da stazioni di misurazione idro-meteorologica è stata effettuata una calibrazione dei modelli a differenti scale. La prima è la scala di bacino e coinvolge in modo classico l'intera superficie del bacino idrografico del fiume Toce. La seconda scala riguarda i piccoli sottobacini con presenza di invasi artificiali (che alterano il naturale deflusso) e ghiacciai di modeste dimensioni. Queste sezioni presentano un carattere fortemente alpino, piccole portate giornaliere, e soprattutto dinamiche di formazione del deflusso superficiale differenti da quelle osservabili a scala più ampia. Per portare a termine la calibrazione in questa scala ridotta si rendono necessari i dati della portata trattenuta e successivamente rilasciata dalle dighe. Calibrare e successivamente validare i modelli in questo modo è oneroso ma migliora le prestazioni di simulazione.

Il secondo obiettivo consiste nel valutare scientificamente la bontà delle simulazioni ottenute da entrambi i modelli. E' necessario verificare che i due output siano comparabili ma soprattutto controllare che sia il semplificato che l'energetico forniscano un'interpretazione verosimile dei dati in ingresso, dando luogo a simulazioni prossime al dato osservato.

Si vuole valutare anche la possibilità di utilizzare modelli semplificati al posto di quelli energetici per la simulazione con dati in ingresso provenienti da scenari climatici di riscaldamento globale. Questo consentirebbe di risparmiare notevolmente in termini di tempo di calcolo. Le simulazioni di scenari climatici sono infatti molto onerose dal punto di vista computazionale: si tratta di simulare l'evoluzione del ciclo idrologico di un intero bacino per un periodo che si estende per alcune decadi, con una risoluzione di calcolo oraria. L'utilizzo di un modello meno complicato, che prenda in esame un numero inferiore di variabili e parametri, consentirebbe di ridurre sensibilmente i tempi di calcolo. Occorre però verificare che l'errore commesso da tali elaborazioni sia dello stesso ordine di quello commesso dai modelli completi.

L'interpretazione delle simulazioni di scenari climatici è molto delicata: è complesso

estrarre implicazioni pratiche da una serie di previsioni che sono figlie di diverse ipotesi semplificative, ed interpretare scenari le cui conseguenze, se reali, potranno essere osservate solamente tra alcune decadi. Nonostante ciò il presente lavoro di tesi si propone di analizzare in maniera critica i risultati ottenuti e di valutare i possibili impatti causati dall'aumento di temperatura sul regime idrologico del bacino del Toce. Benchè il contributo antropico alle variazioni del clima sia ancora oggetto di dibattito presso la comunità scientifica, risulta evidente l'importanza di prevedere l'andamento futuro dei mutamenti climatici e valutarne l'impatto che essi potranno avere, non soltanto sulle variabili climatiche, ma sul sistema socio-economico terrestre e sugli ecosistemi in generale.

Gli obiettivi e le analisi effettuate in questa tesi si inseriscono all'interno del progetto europeo ACQWA (Assessing Climate Impacts on the Quantity and quality of WAter). Si tratta di un progetto a larga scala a cui prendono parte 35 membri (tra cui università, centri di ricerca, enti pubblici e privati), che ha visto ufficialmente il via nell'Ottobre del 2008, sotto la direzione dell' università di Ginevra. Lo scopo di questo progetto è di valutare gli impatti causati dai cambiamenti climatici, focalizzandosi sulla quantità e qualità dell'acqua che viene scambiata, mediante processi idrologici, nelle regioni montuose. In queste zone i processi di scioglimento del manto nevoso ed i ghiacciai rappresentano una risorsa idrica preziosa per l'irrigazione e per gli impianti idroelettrici, oltre ad influenzare fortemente il regime di runoff e la portata disponibile nei corsi d'acqua posti a valle. L'obiettivo principale dell'intero progetto è quello di utilizzare tecniche di modellazione avanzata, a diverse scale spazio-temporali, in modo da quantificare l'influenza dei mutamenti climatici sul regime idrico dei fiumi. Questo può essere realizzato basandosi su scenari climatici di riscaldamento globale elaborati per un arco temporale che va dal 1960 sino al 2050, a partire da modelli climatici regionali innestati all'interno di GCMs.

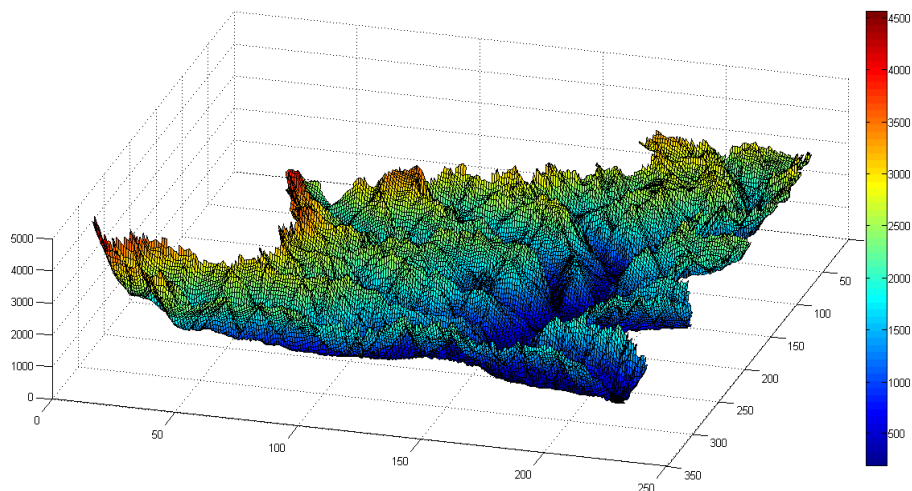
All'interno del capitolo 2 (Area di studio e dati disponibili) vengono illustrate brevemente le caratteristiche del bacino idrografico del Toce e vengono inoltre

mostrati tutti i dati disponibili, tra cui anche gli scenari ed i dati climatici distribuiti dalla direzione del progetto ACQWA. Nel capitolo 3 (Materiali e metodi) è stato introdotto il modello idrologico utilizzato per le simulazioni, il FEST-EWB, un modello spazialmente distribuito sviluppato dal Politecnico di Milano. Viene inoltre presentata brevemente la versione semplificata del modello stesso: il FEST-WB (che viene utilizzato come modello semplificato). Successivamente (capitolo 4: Calibrazione e validazione del modello) vengono espone le modalità con cui i modelli sono stati calibrati per il bacino del Toce e quindi validati. Il capitolo 5 illustra uno dei punti fondamentali del lavoro di tesi: il confronto tra il modello idrologico a bilancio energetico (FEST-EWB) e il modello semplificato (FEST-WB), che prevede unicamente un bilancio di massa. Lo scopo è di verificare se i risultati ottenuti, simulando col medesimo set di dati, e confrontando con la serie di dati osservati, siano comparabili. Le caratteristiche tecniche e le principali differenze tra i due modelli sono brevemente riassunte nella Appendice A: Modelli idrologici. All'interno del capitolo 6 viene introdotta la simulazione da scenario climatico. In primo luogo sono stati confrontati i dati simulati dai modelli idrologici, nel periodo di calibrazione e validazione, con quelli simulati utilizzando, come dati in ingresso, quelli provenienti da un modello climatico regionale (riscalato per il bacino del Toce). Infine viene illustrata ed analizzata la simulazione vera e propria, che copre il periodo 2009-2050. Nel capitolo 7 sono riportate le conclusioni ed alcune considerazioni in merito ai possibili sviluppi futuri.



## 2 Area di studio e dati disponibili

In questa sezione verranno brevemente illustrate le caratteristiche dell'area oggetto di studio. Il presente lavoro è stato svolto prendendo in esame il bacino idrografico del fiume Toce mentre i dati disponibili provengono dall'agenzia ARPA Piemonte e, per quanto riguarda le elaborazioni degli scenari climatici, dai partners europei del progetto ACQWA, tra cui Enel Produzione.



*Figura 2.1: modello digitale delle quote tridimensionale per il bacino del Toce*

## 2.1 *Bacino del Toce*

Il Toce, o più propriamente la Toce, è il fiume principale della Val d'Ossola e si allunga da nord a sud attraversando tutta la valle. Il bacino idrografico è situato nella parte settentrionale del Piemonte ed in piccola parte, circa per il 10% dell'estensione complessiva, in Svizzera.



*Figura 2.2: vista aerea del fiume Toce*

La sorgente è situata ad un'altezza di circa 1720m ed è formata dall'unione di tre torrenti: Morasco, Gries e Roni. L'asta principale si sviluppa per ben 83.2 km ed il bacino copre una superficie di 1780 km<sup>2</sup>. Le caratteristiche fondamentali sono quelle tipiche dei bacini alpini, in particolar modo per quanto riguarda l'aspetto topografico. L'altitudine media è di 1641 metri calcolata tra la cima del Monte Rosa e la sezione di chiusura a valle; il fiume scorre con una portata media di 70 metri

cubi al secondo. Partendo dal corso principale si diramano diverse valli di origine glaciale, caratterizzate da ripidi versanti e piane alluvionali lungo le quali scorrono i vari affluenti. L'area è caratterizzata da imponenti massicci montuosi, in particolare nella zona del Monte Rosa. Il fiume Toce è alimentato dai ghiacciai Dei Camosci, dei Sabbioni e di Ban, tutti all'interno della Val Formazza. Nella parte medio-alta del bacino si nota una struttura a gradini, formatasi dal sovrapporsi di blocchi di gneiss molto compatto. Questo costringe il corso d'acqua a compiere diversi salti scorrendo verso fondovalle, tra cui il più spettacolare è sicuramente quello de La Frua (Figura 2.3).



*Figura 2.3: le cascate del Toce, dove il fiume supera un dislivello di 130m.*

Nel tratto a monte di Domodossola i due versanti si allontanano e il fondovalle, ampliandosi, diviene un piano. A Vogogna il fiume piega bruscamente ad est e, data la lieve pendenza del fondovalle (180 m in 40 Km di percorso finale), si allarga in numerose anse. Il cambiamento della morfologia della valle è imputabile alla

variazione della litologia e alla presenza di disturbi tettonici: in questa zona, infatti, lo gneiss delle falde penniniche cede il passo ai meno compatti micascisti, alle rocce basiche eruttive, alle rocce metamorfiche ricche di granito e biotite e infine alle intrusioni granitiche di Mergozzo.

La resistenza all'erosione di quest'ultima formazione inoltre costringe il fiume ad un'ansa attorno al Monte Orfano prima dello sbocco a lago. I due versanti della Val d'Ossola presentano caratteristiche morfologiche differenti: il versante destro è tagliato da profonde valli parallele che conducono alle più alte vette dello spartiacque (Divedro, Bognanco, Antrona, Anzasca, Strona); il versante sinistro ha invece un solo solco evidente (Val Vigezzo) e un complesso ramificarsi di valli minori. Per quanto riguarda l'aspetto climatico, si può notare come l'Ossola sia la zona più umida di tutto il Piemonte. Infatti, tutta l'area presenta una piovosità annua superiore ai 1500 mm, in particolare nel settore orientale le precipitazioni superano i 2000 mm ed in talune zone anche i 2500 mm. Le massime si registrano solitamente nell'autunno e nella tarda primavera. Data la notevole altitudine della maggior parte della regione, le precipitazioni assumono spesso forma nevosa e la coltre resta al suolo per lunghi periodi, normalmente da dicembre a marzo. Il limite delle nevi perenni sul versante italiano del Monte Rosa e sui rilievi dell'Ossola si aggira sui 2900 m. Il clima umido e fresco favorisce una copertura vegetale assai fitta in tutta la regione, in modo particolare nelle basse e medie valli dove però l'uomo ha sostituito la vegetazione originaria con le specie utili all'attività agricola (viti, foraggiere, cereali, alberi da frutta). Nelle aree naturali domina il bosco misto di latifoglie: boschi di querce, betulle, frassini, roveri, castagni, che verso l'alto cedono il posto ai faggi e alle conifere. Oltre i 1800-2000 m si trovano soprattutto pascoli e arbusti e poi i ghiacciai. Le aree urbanizzate e le aree coltivate sono localizzate essenzialmente nel fondovalle, strettamente associate tra di loro e diffuse maggiormente alle quote meno elevate.

## **2.2 Dati disponibili**

All'interno di questo capitolo vengono mostrati i vari dati disponibili: i dati meteorologici, quelli elaborati dai partners del progetto ACQWA ed infine i dati degli scenari climatici necessari per le simulazioni idrologiche.

### **2.2.1 Dati meteo**

I dati relativi alle principali forzanti meteorologiche sono stati reperiti da ARPA Piemonte e riguardano le registrazioni relative al periodo 2000-2009. L'agenzia piemontese possiede infatti una rete di stazioni meteorologiche installate all'interno del territorio regionale, in modo da garantire una copertura che sia il più efficiente possibile. I dati disponibili sono suddivisi in alcune categorie principali:

- **Dati pluviometrici:** riguardano le registrazioni provenienti da pluviometri e pluviografi, piuttosto che da stazioni meteo complete, e costituiscono il dato di precipitazione liquida che viene usato come input per il modello idrologico. Queste serie presentano una scansione oraria e sono disponibili in 21 stazioni della rete di misurazione.
- **Dati di temperatura:** sono disponibili in 24 stazioni e vengono riportati in tre files distinti. Il primo contiene una serie che rappresenta la temperatura atmosferica registrata ad intervalli regolari di un'ora. Gli altri due contengono rispettivamente la temperatura massima e minima oraria registrata e forniscono informazioni aggiuntive sull'andamento giornaliero della temperatura.
- **Dati di radiazione:** dati di radiazione solare incidente al suolo che sono stati registrati, con l'ausilio di radiometri, in 5 stazioni appartenenti alla rete idro-meteorologica. Questi dati, assieme alla temperatura, sono fondamentali per

la valutazione dell'evapotraspirazione effettiva (a scala di bacino) eseguita dal modello idrologico a bilancio energetico. Questo concetto verrà meglio illustrato all'interno del capitolo 3, Materiali e metodi.

- Dati di velocità del vento: serie temporali di registrazioni anemometriche. Sono disponibili in una 5 stazioni , ovvero in quelle munite di anemometri di vario tipo.

### **2.2.2 Dati di portata**

I dati di portata sono stati forniti da ARPA Piemonte e sono costituiti da una serie di misurazioni idrometriche registrate in varie stazioni di misura distribuite all'interno del territorio piemontese. Quelle di interesse per il caso di studio (ovvero quelle che ricadono all'interno del bacino del Toce) sono Codelago, Candoglia, Ponte Caddo, Crevola, Pontemaglio, Pontetto, Masera e Villadossola. Si tratta di registrazioni delle misurazioni effettuate in ogni sezione, ad intervalli regolari di 30 minuti. Dal livello idrico è poi possibile risalire alla portata transitante utilizzando la scala di deflusso delle portate, caratteristica per ogni sezione fluviale. I dati di portata sono disponibili per gli anni 2000-2008, periodo che verrà utilizzato nelle fasi di calibrazione e validazione del modello idrologico. Altri dati di portata sono stati forniti da Enel Produzione e riguardano delle ricostruzioni di alcune serie giornaliere di portate “naturalizzate” ovvero modificate per tenere conto del volume d'acqua prelevato piuttosto che rilasciato dai numerosi invasi artificiali presenti nel bacino del Toce. Per i dettagli riguardo alle modalità con cui sono state ottenute le portate “naturalizzate” si rimanda al paragrafo 2.2.3.

### **2.2.3 Dati delle dighe Enel Produzione**

La società italiana Enel Produzione prende parte al progetto Europeo ACQWA partecipando al quarto Working Package (WP4), con l'obiettivo di quantificare gli effetti dei cambiamenti climatici sul sistema socio-economico, focalizzandosi in particolare sugli impatti generati dal cambiamento del clima sulla produzione idroelettrica. Tali impatti vengono analizzati e stimati, nel corso dei cinque anni previsti dal progetto, mediante l'analisi di un caso di studio reale: gli impianti idroelettrici localizzati all'interno del bacino idrografico del fiume Toce. Quest'area è molto interessante ai fini del progetto ACQWA in quanto è caratterizzata dalla presenza di vaste aree glaciali ed una cospicua porzione della superficie del bacino risulta coperta da neve per diversi mesi all'anno. L'obiettivo finale del lavoro svolto da Enel Produzione consiste nel valutare la portata media giornaliera in ogni sbarramento gestito dalla società lungo il fiume Toce.

Per la corretta calibrazione dei modelli afflussi/deflussi è necessario ottenere dati di portata che siano il più possibile esenti da importanti alterazioni antropiche del deflusso naturale. Sfortunatamente il reticolo idrografico dell'area in esame è fortemente caratterizzato da uno sfruttamento intensivo della risorsa, a causa di diverse opere di regimazione nei corsi d'acqua d'alta montagna, che deviano il corso naturale per alimentare numerosi serbatoi, e dalla presenza di importanti impianti per la produzione di energia idroelettrica. Risulta quindi opportuno cercare di "naturalizzare" il deflusso in queste zone critiche, ottenendo informazioni giornaliere di portata che andranno ad integrare i dati idrografici ricavati dalle stazioni idrometriche dell'ARPA Piemonte. Per poter ricostruire al meglio le "portate naturali" sono state identificate sei sezioni di interesse primario, che vengono in seguito riportate assieme all'area drenata da ciascuna:

- Fiume Toce presso le Cascate del Toce (60.4 km<sup>2</sup>) e prese allacciate (12.8

km<sup>2</sup>)

- Fiume Toce presso lo sbarramento di Fondovalle (123.3 Km<sup>2</sup>) e prese allacciate (11.1 km<sup>2</sup>)
- Torrente Devero alla diga di Codelago (26.1 km<sup>2</sup>) e prese allacciate (14.6 km<sup>2</sup>)
- Fiume Toce a Domodossola (916.7 km<sup>2</sup>)
- Torrente Loranco presso la diga di Alpe Cavalli (24.1 km<sup>2</sup>) e prese allacciate (2.3 km<sup>2</sup>)
- Fiume Toce a Candoglia (1531.7 km<sup>2</sup>)

La Tabella 2.1 riporta invece nel dettaglio le caratteristiche principali dei bacini e degli impianti idroelettrici che rientrano nell'analisi.



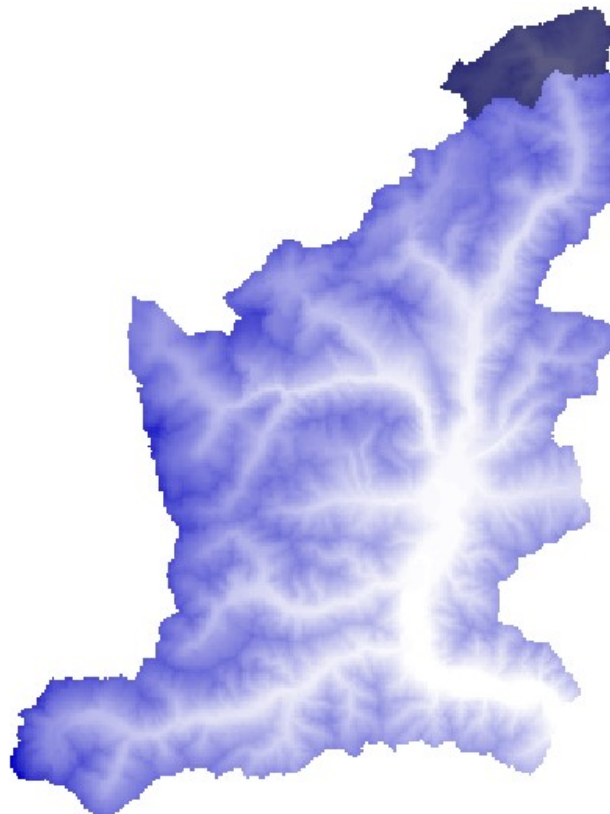
Catchment	Catchment Area (km <sup>2</sup> )	Average altitude (m s.l.m.)	Upstream reservoirs considered	Storage capacity (m <sup>3</sup> x10 <sup>6</sup> )	Power plant	Maximum power plant discharge * (m <sup>3</sup> /s)
The River Toce at the Waterfall and connected catchments	73.2	2458	Sabbione	44.0	Ponte Morasco	8.1
			Morasco	17.0		
			Toggia	15.7	Ponte Toggia	4.2
			Castel	5.9		
The River Toce at the Fondovalle barrage and connected catchments	134.4	2303	Sabbione	44.0	Fondovalle	14.
			Morasco	17.0		
			Toggia	15.7		
			Castel	5.9		
			Vannino	9.4		
			Obersee	1.2		
Lago Busin	4.1					
Devero Torrent at Codelago Dam and connected catchments	40.7	2358	Codelago	15.9	Devero	3.
The River Toce at Domodossola	916.7	1817	Sabbione	44.0	Calice	46.
			Morasco	17.0		
			Toggia	15.7		
			Castel	5.9		
			Vannino	9.4		
			Obersee	1.2		
			Lago Busin	4.1		
			Codelago	15.9		
			Agaro	19.3		
Lago Avino	6.6					
Loranco Torrent at Alpe Cavalli Dam and connected catchment	26.4	2247	Alpe Cavalli	8.0	Ovesca Cavalli	4.3
The River Toce at Candoglia	1531.7	1668	Sabbione	44.0	-	
			Morasco	17.0		
			Toggia	15.7		
			Castel	5.9		
			Vannino	9.4		
			Obersee	1.2		
			Lago Busin	4.1		
			Codelago	15.9		
			Agaro	19.3		
			Lago Avino	6.6		
			Cingino	4.5		
			Campliccioli	8.1		
			Camposecco	5.4		
Lago Antrona	5.5					
Alpe Cavalli	8.0					

\* Sometimes during power/discharge conversion we obtained discharge rates exceeding the maximum discharge as reported in Table 1. It is not known whether this is due to a major capacity of derivation of the plants or to an approximate power/discharge conversion factor. It was considered appropriate in this table to indicate the nominal values of the plants rather than the maximum obtained value converting power into discharge. We point out that in general these values have been exceeded for durations smaller than 1%. One exception is the plant Devero for which the maximum capacity of 3 m<sup>3</sup>/s is relative only to the flow derived from the dam. The maximum discharge of the plant, taking into consideration the other intake results to be equal to at least 4.2 m<sup>3</sup>/s.

Tabella 2.1: caratteristiche principali dei vari bacini ed impianti idroelettrici considerati nella naturalizzazione dei flussi in ogni sezione

**Fiume Toce presso le Cascate del Toce e bacini allacciati**

La serie temporale rappresenta il deflusso naturale dell'area idrologica drenata mostrata in Figura 2.4, formata dalla rete idrografica del fiume Toce chiuso alla cascata, alla quale è stata aggiunta la superficie drenata dai serbatoi numero (complessivamente 12.8 km<sup>2</sup>).



*Figura 2.4: area drenata dal fiume Toce alle cascate del Toce considerando anche i bacini collegati*

Nel valutare le portate è stato tenuto conto anche dalla quantità d'acqua utilizzata dalle centrali elettriche di Ponte Toggia e Ponte Morasco. Per calcolare la portata media giornaliera si è partiti dai livelli idrometrici registrati con frequenza oraria appena a monte della cascata del Toce, che sono stati trasformati in portate orarie utilizzando la scala di deflusso delle portate.

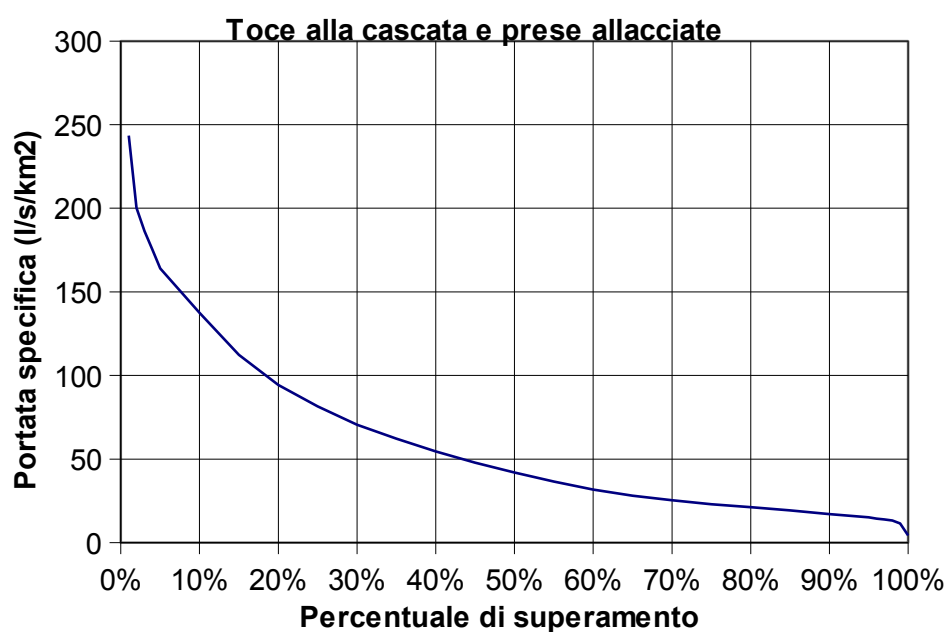


Figura 2.5: curva di durata delle portate per il fiume Toce alla cascata

### **Fiume Toce presso lo sbarramento di Fondovalle e bacini allacciati**

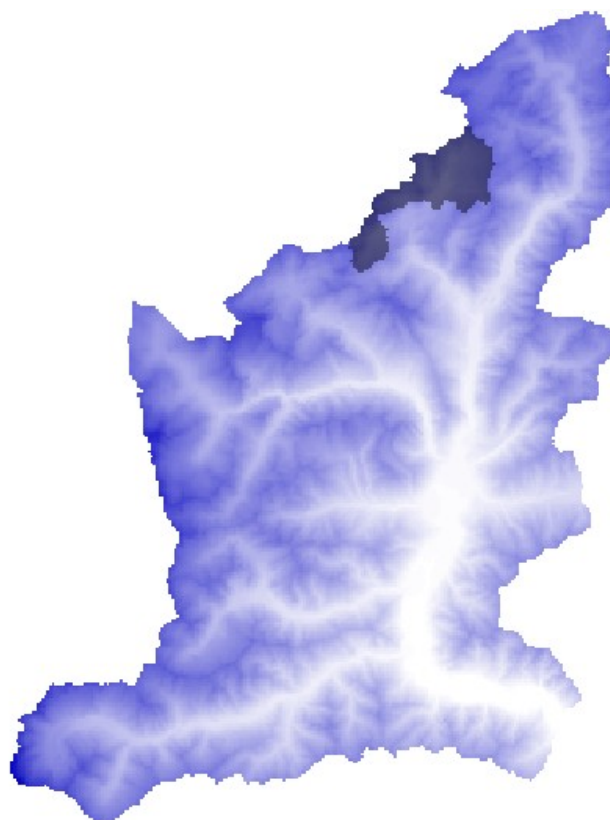
Questa serie temporale mostra i deflussi naturali prodotti dalle strutture di captazione idrica mostrate in Figura 2.6 costituiti dall'idrografia del fiume Toce, chiuso alla diga di Fondovalle ( che drena 123.3 km<sup>2</sup>), e dai bacini di Rio Cramec, Rio Stivello, Lago Busin e Rio Giove per un'area complessiva di 11.1 km<sup>2</sup>. Le portate naturali (virtuali) sono state stimate aggiungendo la portata media turbinata a Fondovalle tra le 8:00 del giorno  $n$  e le 8:00 del giorno  $n+1$ .



*Figura 2.6: area drenata dal fiume Toce a fondovalle considerando i bacini collegati*

### **Fiume Devero presso la diga di Codelago e bacini allacciati**

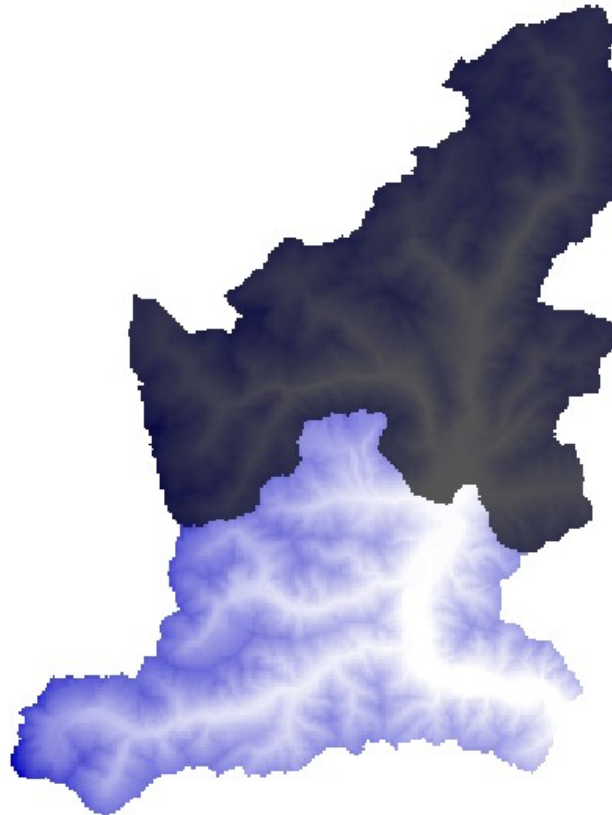
La serie temporale si riferisce all'area illustrata nella Figura 2.7 che comprende la superficie drena dal torrente Devero chiuso alla diga (26.1 km<sup>2</sup>) a cui è stata sommata l'area dei bacini di Rio della Rossa e Rio Buscaglia. Come nei casi precedenti le portate sono state ricavate aggiungendo a quelle naturali la portata media turbinata dall'impianto di Codelago lungo un arco temporale di 24 ore e considerando anche le portate in ingresso/uscita per il bacino artificiale della diga, che ha un volume netto di invaso pari a  $15.9 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.



*Figura 2.7: area drenata dal fiume Devero presso la diga di Codelago e dai bacini collegati*

### **Fiume Toce a Domodossola**

La serie rappresenta i deflussi naturali prodotti all'interno dell'area idrografica mostrata in Figura 2.8. La sezione di chiusura è posizionata in corrispondenza della stazione idrometrica di Domodossola, gestita da Arpa Piemonte.

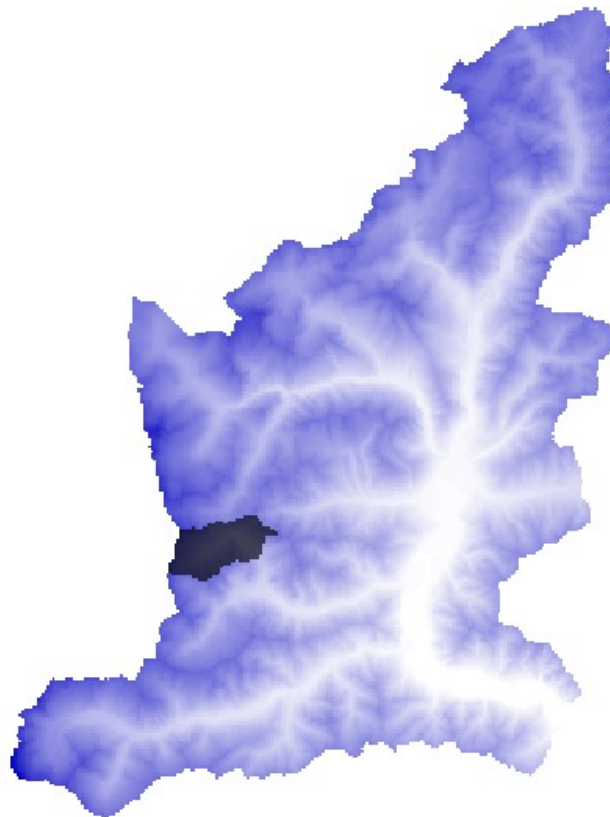


*Figura 2.8: area drenata dal fiume a Domodossola, considerando anche gli invasi artificiali*

Siccome l'area in esame è sottesa dall'impianto Enel di Calice è stato necessario, per ricostruire virtualmente le portate naturali, sommare le portate misurate dalla stazione alla portata media utilizzata giornalmente dall'impianto di produzione elettrica di Calice, oltre a tenere in considerazione il volume d'acqua sottratto o rilasciato dai serbatoi posti a monte ( Sabbione, Morasco, Toggia, Castel, Vannino, Obersee, Lago di Busin, Codelago, Agaro e Avino Lago che complessivamente hanno una capacità di immagazzinamento di 139 milioni di metri cubi. In questo caso la portata indicata al giorno  $n$  è stata ottenuta sommando la portata deviata verso l'impianto di Calice e le portate misurate dalla stazione idrometrica tra le 0:00 e le 24:00 del giorno  $n$  mentre le correzioni relative ai serbatoi sono state applicate tra le 8:00 del giorno  $n-1$  e le 8:00 del giorno  $n$ .

**Torrente Loranco presso la diga di Alpe Cavalli e bacini allacciati**

La serie temporale si riferisce all'area illustrata in figura X, ovvero la superficie drenata dal torrente chiuso alla diga di Alpe Cavalli, alla quale va aggiunta la superficie complessiva drenata dal Rio Cantonaccio ( $2.3 \text{ km}^2$ ), bacino collegato alla diga attraverso un tunnel sotterraneo. La diga presenta un volume netto di invaso pari a circa  $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . La stima delle portate giornaliere è stata ottenuta come per gli altri bacini mediando nell'arco di 24 ore.



*Figura 2.9: area drenata dal Loranco presso la diga di Alpe Cavalli, considerando anche i bacini collegati*

**Fiume Toce a Candoglia**

Infine è stata elaborata la serie riferita all'area complessiva drenata dal fiume Toce ed i suoi affluenti ( $1531.7 \text{ km}^2$ ), considerando la stazione idrometrica di Candoglia come sezione di chiusura. Per la stima delle portate naturali (virtualizzate) è stato

necessario aggiungere alle portate misurate dalla stazione idrometrica di Arpa Piemonte la portata media giornaliera rilasciata o prelevata dai serbatoi posti a monte, che nel complesso presentano una capacità di immagazzinamento che ammonta a  $170 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Anche in questo particolare caso le portate indicate al giorno  $n$  sono state calcolate sommando la portata media misurata dalla stazione tra le 0:00 e le 24:00 del giorno  $n$  e le variazioni di volume registrate nei serbatoi a monte tra le 8:00 del giorno  $n-1$  e le 8:00 del giorno  $n$ .

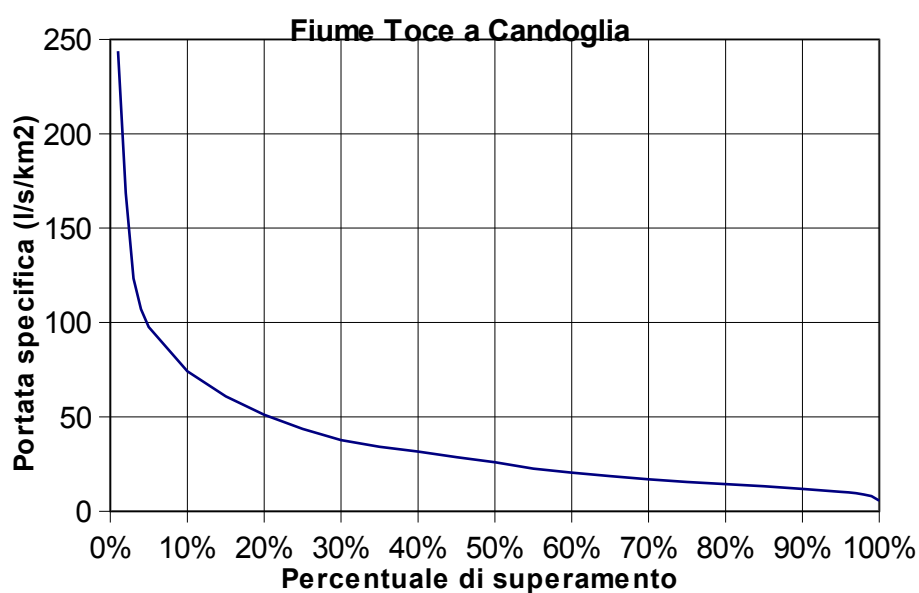


Figura 2.10: curva di durata delle portate per il fiume Toce a Candoglia



#### **2.2.4 Modelli e scenari climatici**

I modelli climatici regionali, o *Regional Climate Model (RCM)*, forniscono informazioni fondamentali riguardo alla variazione di temperatura, precipitazione e delle altre forzanti meteorologiche, in funzione dello scenario climatico stabilito, e si innestano all'interno dei modelli *Global Circulation Model (GCM)*. Per quanto riguarda la modellazione meteo del bacino del Toce sono stati utilizzati, all'interno del progetto ACQWA, il modello regionale REMO (D.Jacob, R. Podzun, 1997) e il modello globale ECHAM5 (Roeckner et al., 2003).

I GCM sono strumenti avanzati che consentono di simulare la risposta del sistema climatico all'aumento di concentrazione di gas serra nell'atmosfera. Descrivono in modo completo la risposta del sistema alla forzante di origine antropica. Tuttavia i GMC lavorano con una griglia a maglie relativamente larghe ( tra i 250 km e i 600 km) e sono dotati, di conseguenza, di una risoluzione grossolana che non si adatta al livello di dettaglio richiesto dalle analisi locali a scala di bacino.

I dati vengono generati per le stazioni meteorologiche desiderate, a scala della singola stazione, e il modello climatico viene calibrato per un periodo arbitrario che sia sufficientemente lungo. Ai fini della calibrazione vengono utilizzati i dati osservati raccolti per l'area del progetto ACQWA all'interno di un database europeo (Haylock et al., 2008). Le stazioni in cui mancano dati osservati, per un intervallo temporale superiore al 10% del periodo complessivo di calibrazione, vengono escluse dal procedimento.

Nel caso di studio è stato utilizzato un periodo di calibrazione dei modelli climatici che si estende dal 1-1-2000 al 21-12-2009.

Per le analisi a scala regionale è possibile ottenere i dati idrologici mediante interpolazione dagli output dei modelli a circolazione globale, oppure mediante

downscaling statistico degli stessi, oppure inizializzando i RCM con le condizioni al contorno provenienti dai GCM (Markku Rummukainen, 2010). I modelli regionali presentano una risoluzione più elevata e forniscono informazioni maggiormente dettagliate, per questo si adattano alle analisi degli impatti alla microscala.

Dalle simulazioni del modello REMO si ottengono dati di precipitazione cumulata (con passo temporale di 3 ore), di temperatura media giornaliera, di temperatura minima e massima giornaliera, per un periodo di tempo che va sino al 2050. I dati di output vengono corretti per via statistica seguendo il metodo “Quantile Mapping” (Themessl, 2009), che utilizza distribuzioni di probabilità empiriche per rimuovere gli errori sistematici dai dati osservati e simulati. I dati così ottenuti fungono da input per il modello idrologico che può così fornire risultati sino al 2050.

Lo scenario climatico che viene preso in considerazione è lo scenario A1B elaborato dall' IPCC (IPCC, Emissions Scenarios, “Special Report of IPCC Working Group III”, 2000). A1B prevede un mondo in rapida crescita economica, con un picco di popolazione a metà secolo, e la rapida introduzione di nuove ed efficienti tecnologie, in cui l'apporto energetico necessario sarà fornito da un mix di varie fonti energetiche (Nebojša Nakićenović, 2010).

### **3 Materiali e metodi**

All'interno di questo capitolo vengono brevemente illustrati gli strumenti e le metodologie utilizzate durante il lavoro di tesi. Gran parte del materiale tecnico fa riferimento al modello idrologico FEST sviluppato dal Politecnico di Milano, ma sono di vitale importanza anche le mappe tematiche e le indagini effettuate nell'ambito di lavori precedenti, al fine di possedere una notevole quantità di informazioni accurate sul territorio in esame.

#### **3.1 Modello idrologico**

Per l'analisi del bacino del Toce è stato utilizzato un modello idrologico distribuito e fisicamente basato, il FEST-EWB, sviluppato presso il Politecnico di Milano (C. Corbari, G. Ravazzani e M. Mancini, 2010). Questo modello rappresenta l'evoluzione del precedente FEST-WB che prevedeva unicamente un bilancio di massa per le celle con cui viene discretizzato il bacino idrografico. Nella nuova versione del codice viene introdotto, parallelamente al bilancio idrologico, un nuovo blocco che risolve il bilancio energetico permettendo quindi di stimare in maniera fisicamente basata l'evapotraspirazione effettiva. Per ulteriori approfondimenti sul modello idrologico si rimanda ad Appendice A: Modelli idrologici.

### **3.2 Mappe tematiche**

Allo scopo di definire il reticolo idrografico del bacino sono state effettuate diverse elaborazioni software. Il dato di partenza è costituito dal modello digitale delle quote (DEM) dell'area drenata dal Toce, considerando Candoglia come sezione di chiusura. Si tratta di un file con codifica ASCII, che è possibile importare in un Sistema Informativo Territoriale (SIT), e rappresenta una griglia in cui ogni singolo pixel contiene il dato relativo alla quota media della cella. Nel caso di studio è stato utilizzato, come base di partenza, un DEM del bacino caratterizzato da una griglia con passo di 200 metri (ogni cella rappresenta una porzione quadrata di suolo delle dimensioni di 200 metri per 200 metri). Il modello delle quote è stato importato all'interno del software ArcView GIS 3.3, sviluppato dalla ESRI, che ne consente la visualizzazione in formato raster, come mostrato nella Figura 3.1.

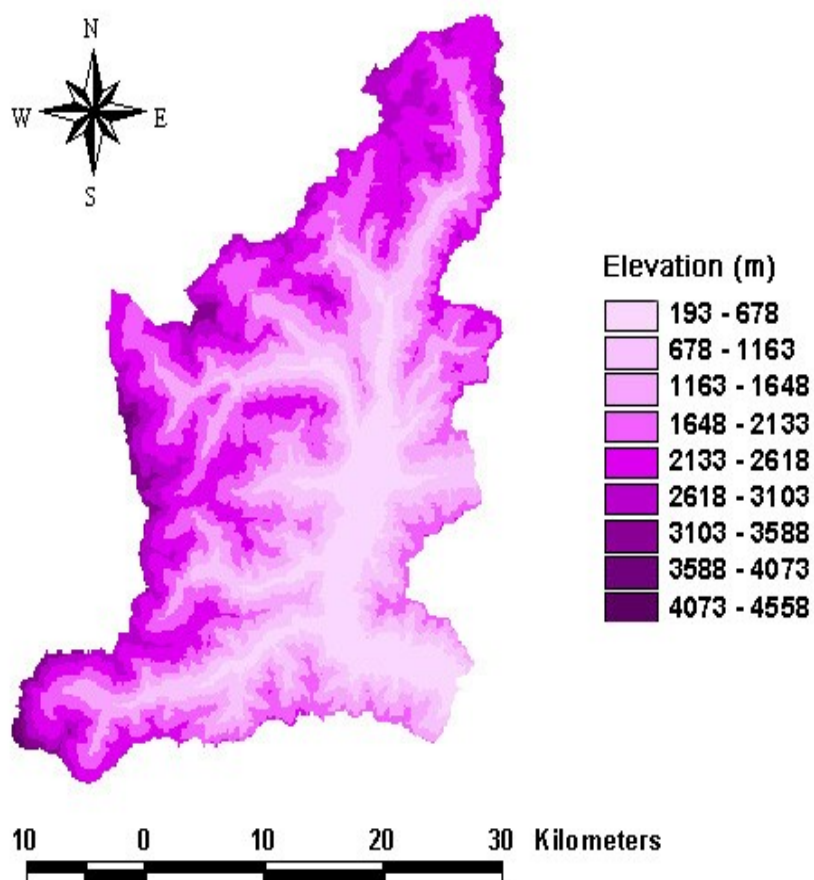


Figura 3.1: modello digitale delle quote per il bacino del Toce chiuso a Candoglia

L'estrazione del reticolo idrografico è stata effettuata con l'ausilio di un programma di terze parti, ERIS, sviluppato dal Politecnico di Milano ed in grado di stimare, con buona precisione, le probabili linee di deflusso superficiale all'interno del bacino. L'algoritmo integrato nel software GIS della ESRI, il deterministic 8 (D8), che consente in maniera simile di estrarre il reticolo, si è dimostrato infatti meno adatto allo scopo preposto. In particolar modo, nelle porzioni di bacino dove le pendenze diventano irrisorie, l'algoritmo di calcolo commette degli errori di valutazione non trascurabili, col risultato che il fiume viene spesso fatto transitare al di fuori dell'alveo naturale.

Il programma ERIS, che lavora con dati in formato ASCII, consente inoltre, una volta estratto il reticolo, di esportare una serie di mappe tematiche tra cui quella delle aree e quella dei puntatori. La mappa delle aree rappresenta una griglia raster delle stesse dimensioni del DEM di partenza, all'interno della quale viene assegnato, ad ogni singola cella, un valore numerico di tipo intero: tale valore rappresenta il numero di celle poste a monte e contribuenti al deflusso attraverso la cella in esame. Pertanto esaminando una cella posta all'estremità di monte di un impluvio essa conterrà probabilmente il valore 1, poiché nessuna tra le celle poste più a monte contribuisce al runoff. Al contrario una cella collocata in prossimità della sezione di chiusura conterrà un valore più elevato ed idealmente prossimo al numero di celle (non nulle) complessive del raster.

Osservando l'immagine in Figura 3.2 risulta evidente come, procedendo verso valle, i valori delle celle aumentino sensibilmente: infatti, come è lecito aspettarsi, l'area drenata aumenta man mano che ci si sposta verso la sezione di chiusura.

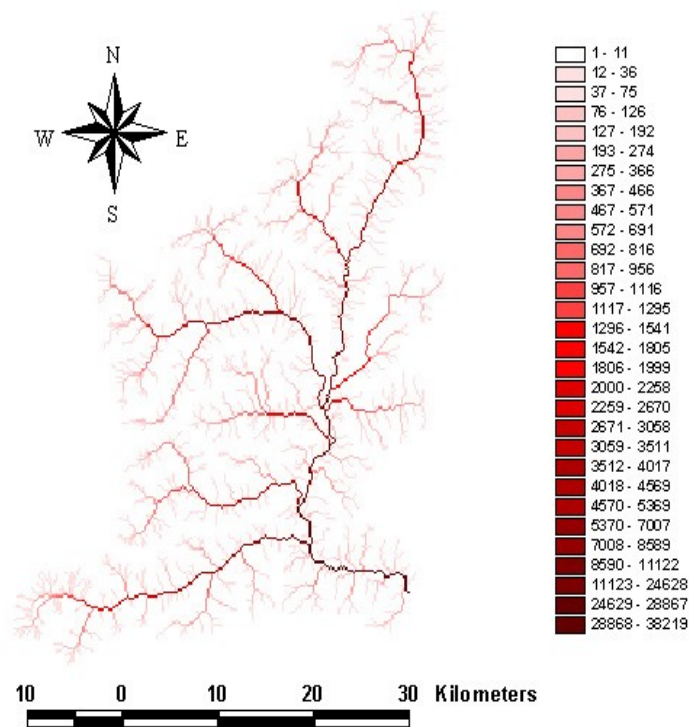
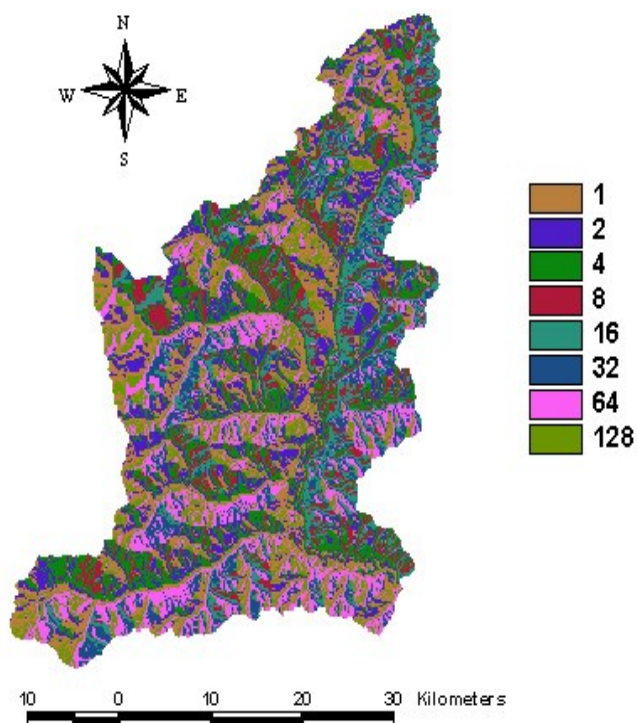


Figura 3.2: mappa delle aree contribuenti al deflusso per il bacino del Toce

La mappa dei puntatori, riportata in Figura 3.3, rappresenta invece una griglia composta da celle che possono assumere solamente i valori interi riportati nella corrispondente legenda. Ogni numero, assegnato per convenzione dal programma, indica la direzione principale di scorrimento del deflusso superficiale all'interno della corrispondente cella.



*Figura 3.3: mappa dei puntatori ottenuta mediante software ERIS*

Il DEM, la mappa delle aree e quella dei puntatori sono dati fondamentali per le elaborazioni del modello FEST-EWB. Il reticolo idrografico del Toce è stato ricavato convertendo lo shapefile ufficiale dell'idrografia locale in formato raster ed applicando successivamente una maschera costituita dal bacino stesso. In Figura 3.4 viene mostrato il reticolo idrografico di riferimento.



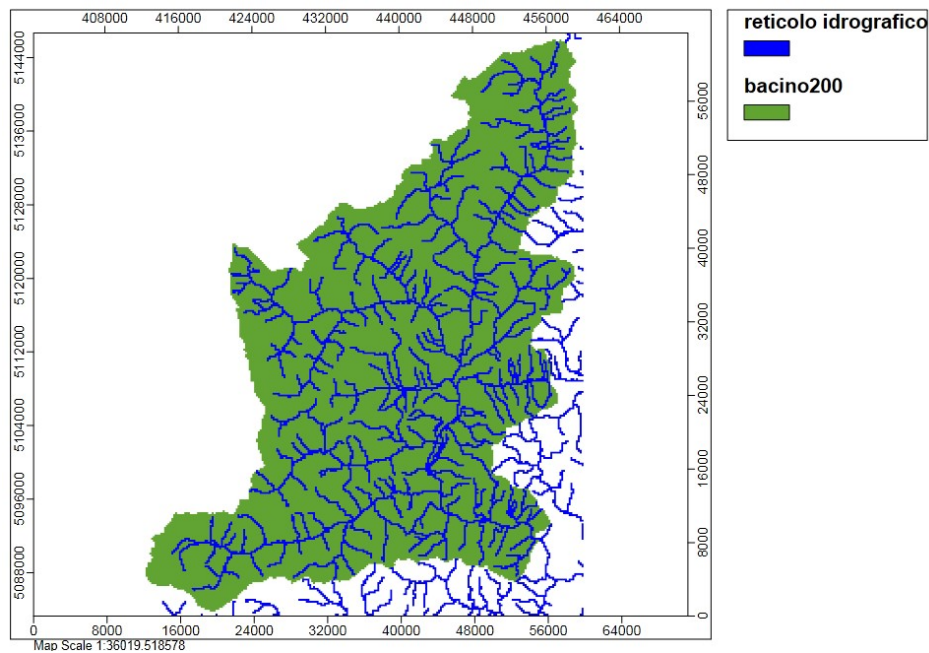


Figura 3.4: idrografia del bacino in formato raster (griglia)

Le altre mappe tematiche in ingresso comprendono: L'indice di copertura fogliare ovvero Leaf Area Index (LAI), albedo, mappa del Curve Number (CN definito col metodo del Soil Conservation Service), la capacità di campo (field capacity), uso del suolo, profondità di campo, wilting point e mappa della saturazione residua del suolo. Queste informazioni sono state ricavate, per il bacino del Toce, nell'ambito del lavoro svolto in una precedente tesi (Jacopo Martinelli, 2003) e registrate all'interno di mappe ASCII con celle di lato 200 metri per 200 metri.

## 4 Calibrazione e validazione del modello

La calibrazione di un modello idrologico consiste in un'operazione di taratura e ricerca di alcuni valori fondamentali che regolano i processi idrologici all'interno del bacino. Cambiando questi parametri si va a modificare l'esito delle simulazioni operate dal modello. Durante la fase di calibrazione si eseguono delle simulazioni idrologiche e si va a confrontarle direttamente con una serie di dati registrati. L'obiettivo è quello di andare a modificare iterativamente i parametri più opportuni, finchè non si ottiene una corrispondenza soddisfacente con i dati realmente osservati. Nell'ambito del presente studio sono stati utilizzati, come parametri di calibrazione per il FEST-EWB:

- La scabrezza: influisce direttamente sulla celerità di propagazione della portata ed è utile modificarla quando l'idrogramma simulato risulta sfasato temporalmente rispetto a quello osservato. Per questo la scabrezza è definibile come un parametro cinematico di calibrazione, in quanto regola a tutti gli effetti l'aspetto temporale dell'idrogramma, influenzando sui tempi di propagazione del deflusso.
- Permeabilità satura del suolo: regola la velocità con cui si propaga l'acqua nel sottosuolo, influisce sulla quantità d'acqua che si infiltra effettivamente nel terreno, e partecipa al flusso ipodermico, e su quella che invece viene destinata all'infiltrazione profonda.
- Permeabilità profonda: serve ad impostare la permeabilità dello strato di suolo più profondo, in modo da regolare la quantità d'acqua che partecipa al deflusso ipodermico.
- Profondità del suolo: la variazione di questo parametro produce effetti simili ad una modifica della permeabilità e può essere utile in casi particolari.

Le simulazioni effettuate coprono il periodo 2000-2004 e sono state confrontate con la serie di portate registrate dalle stazioni idrometriche di ARPA Piemonte. L'attenzione è stata focalizzata sugli eventi di piena dell'ottobre 2000 e gli eventi principali del 2002, essendo stato il 2001 un anno privo di piene significative per il Toce. Il confronto tra gli idrogrammi è stato affiancato ad un'analisi dei volumi cumulati, nella quale la curva dei volumi cumulati simulata dal FEST è stata confrontata con quella ricavata, mediante semplici passaggi aritmetici, dai dati osservati nelle stazioni idrometriche.

Una volta terminata con successo la fase di calibrazione è stato possibile procedere con la validazione. Il modello idrologico esegue una simulazione, per un periodo che sia il più ampio possibile, utilizzando gli stessi parametri ricavati durante la calibrazione. Questo serve per valutare la bontà della calibrazione e stabilire se il modello si comporta bene simulando con un set di dati differenti. Qualora la simulazione non risulti accettabile sarà necessario ripetere la calibrazione di alcuni parametri. Nel caso del Toce la validazione è stata effettuata con il set di dati meteorologici registrati da ARPA Piemonte nel periodo 2005-2008. Le verifiche operate per valutare la qualità e la prestazione del modello sono le medesime utilizzate nella fase precedente.

Nel seguito vengo presentati, in maniera sintetica, i risultati delle analisi. Per ogni bacino è stato prima elaborato un grafico di tipo scatter plot, che correla la serie osservata e quella simulata. Successivamente è stata operata una regressione lineare che porta al tracciamento della retta di regressione all'interno dell'area grafica. Questo serve a fornire una prima stima visiva di come la simulazione interpreti la serie di dati osservati: i punti che si trovano al di sopra della bisettrice del quadrante indicano che il modello ha restituito una sovrastima, mentre quelli situati al di sotto evidenziano una sottostima. Inoltre è stato eseguito un test di buon adattamento sulla serie di dati simulati contro osservati, che restituisce i seguenti indici:

- $R^2$  o coefficiente di correlazione: nell'analisi di regressione è utilizzato come principale indice di bontà della retta di regressione. Si determina analiticamente come segue:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad \text{dove:}$$

$ESS = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  è la devianza spiegata del modello (ovvero Explained Sum of Squares),  $TSS = \sum (y_i - \bar{y})^2$  è la devianza totale (Total Sum of Squares) e  $RSS = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$  è la devianza residua (Residual Sum of Squares). I dati osservati sono espressi da  $y_i$  e  $\bar{y}$  rappresenta la loro media;  $\hat{y}_i$  sono i dati simulati dal modello.  $R^2$  assume valori compresi tra 0 e 1: per valori pari o prossimi a 1 il modello spiega perfettamente i dati mentre per valori vicini allo 0 il modello non spiega i dati osservati e, a monte di risultati di questo tipo, vi possono essere molteplici cause (Everitt, 2002).

- $\bar{R}^2$  o  $R^2$  corretto: viene utilizzato per il medesimo scopo dell'indice di correlazione ma, a differenza di quest'ultimo, tiene conto del numero di predittori utilizzati ed è quindi una preziosa risorsa per l'analisi multivariata.

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-k-1)} \frac{RSS}{TSS}$$

Dove  $n$  è il numero di osservazioni e  $k$  il numero di regressori. Questo indice può assumere valori negativi.

- RMSE: acronimo di Root Mean Square Error indica, come suggerito dal nome stesso, l'errore quadratico medio valutato sull'intera serie di dati ed è determinato come segue:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}$$

Non rappresenta un indice assoluto dell'affidabilità del modello utilizzato

nella simulazione, ma bensì misura il range di variazione dei dati simulati ed osservati. RMSE assume l'unità di misura della grandezza originaria.

- SSE: Sum of Squared Error (conosciuto anche come RSS: Residual Sum of Squares) è la funzione che viene minimizzata durante la stima dei parametri con regressione ai minimi quadrati lineari, ed è espressa come:

$$SSE = \sum e_i^2$$

dove gli scarti sono valutati come segue:

$$e = y_i - f(x_i)$$

SSE fornisce una chiara stima della discrepanza esistente tra dati osservati e predetti.

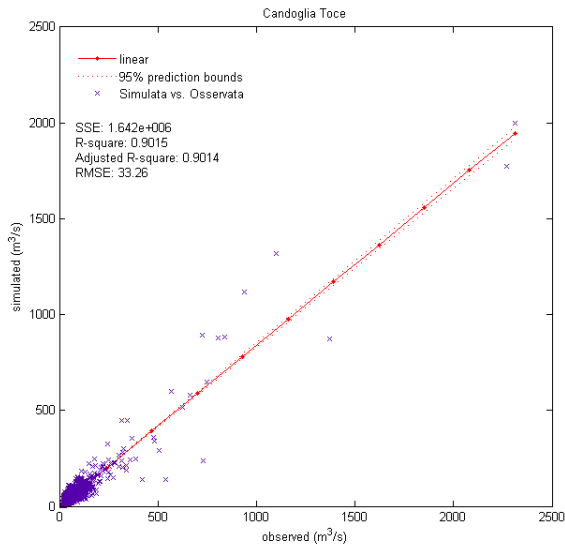


Figura 4.2: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Candoglia nel periodo di calibrazione.

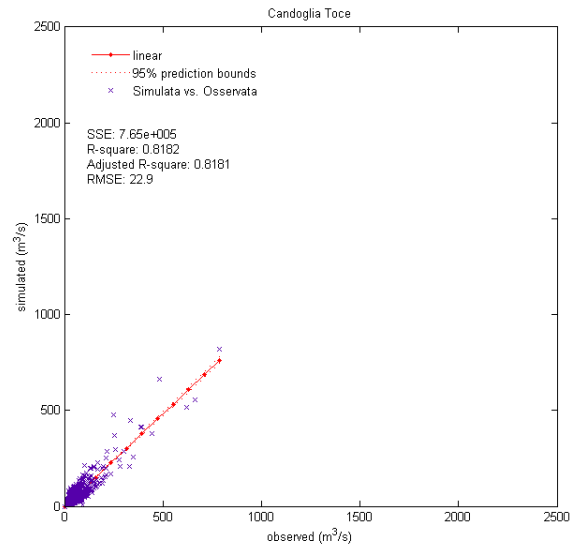


Figura 4.3: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Candoglia nel periodo di validazione.

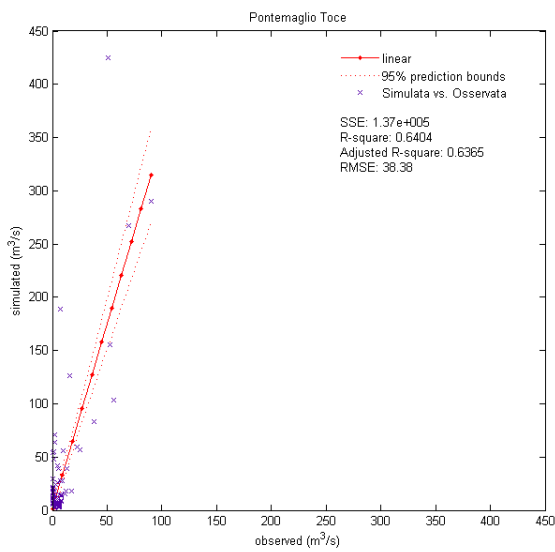


Figura 4.1: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontemaglio nel periodo di calibrazione.

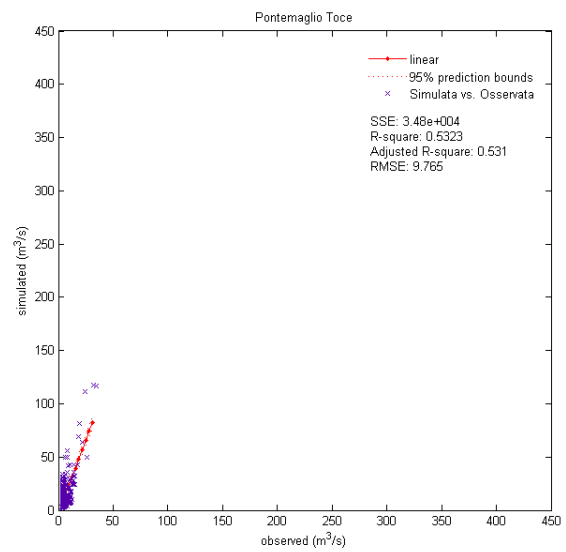


Figura 4.4: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontemaglio nel periodo di validazione.

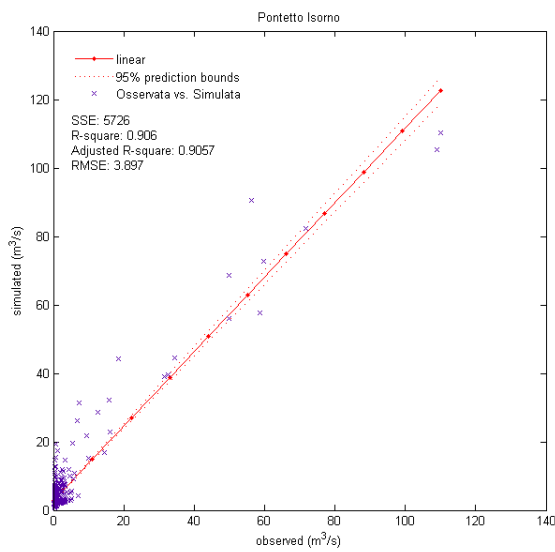


Figura 4.5: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontetto nel periodo di calibrazione.

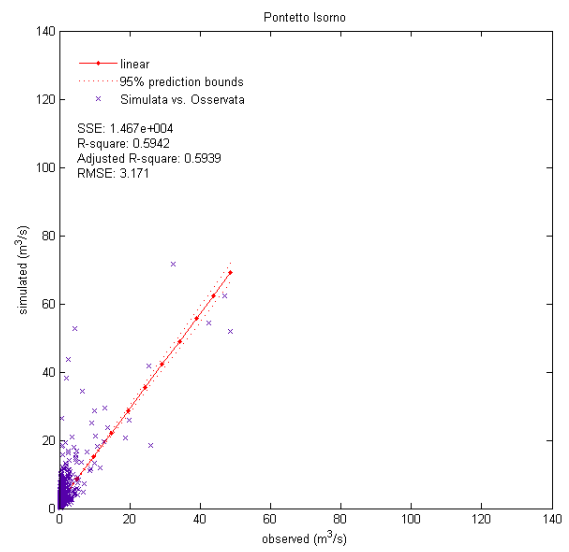


Figura 4.6: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Pontetto nel periodo di validazione.

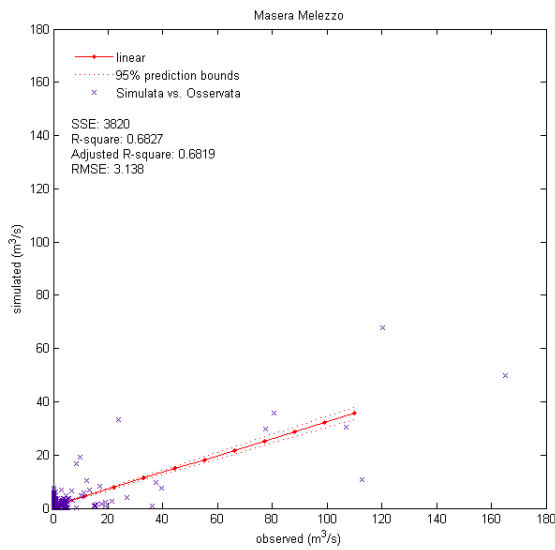


Figura 4.7: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Masera nel periodo di calibrazione.

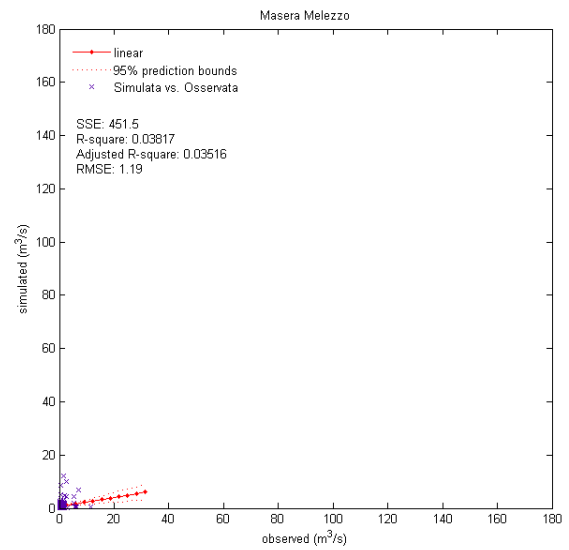


Figura 4.8: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Masera nel periodo di validazione.

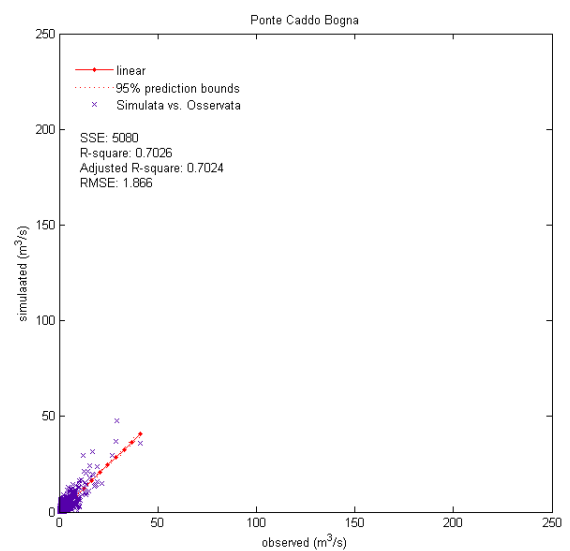
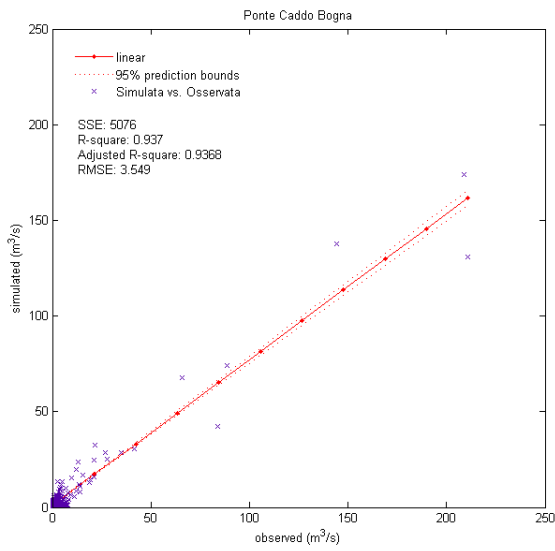


Figura 4.9: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Ponte Caddo nel periodo di calibrazione. Figura 4.10: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la stazione di Ponte Caddo nel periodo di validazione.

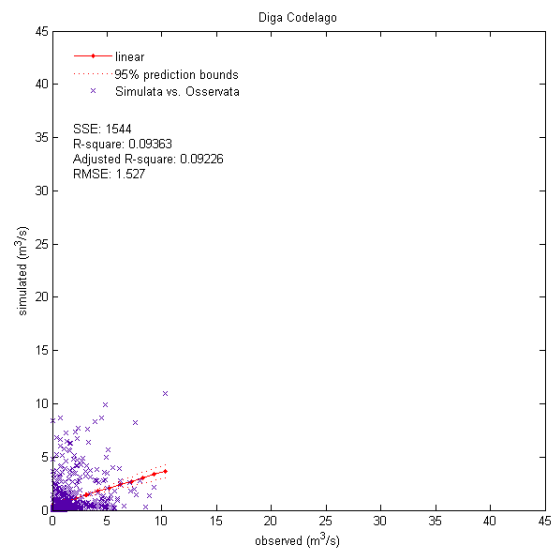
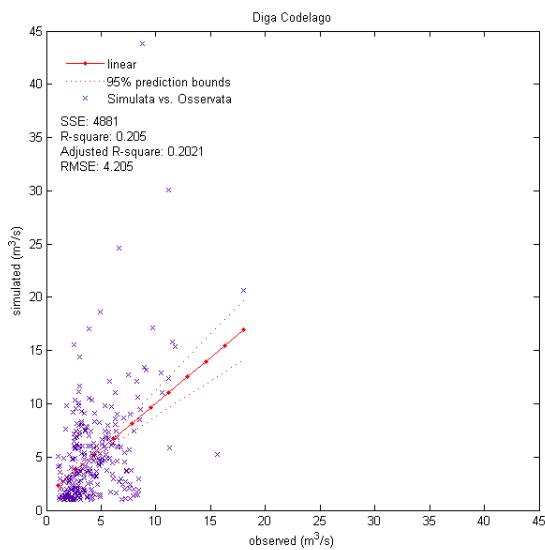


Figura 4.11: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Codelago nel periodo di calibrazione. Figura 4.12: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Codelago nel periodo di validazione.



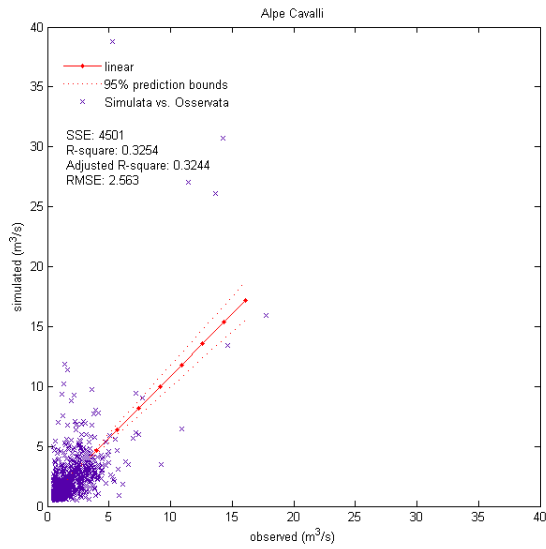


Figura 4.13: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Alpe Cavalli nel periodo di calibrazione.

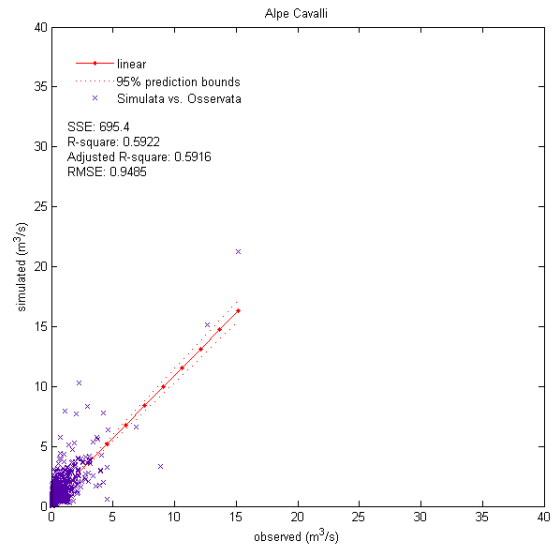


Figura 4.14: test di buon adattamento per le serie di dati simulati ed osservati presso la diga di Alpe Cavalli nel periodo di validazione.

La Tabella 4.1 riassume in maniera compatta il calcolo degli indici statistici. In alcune stazioni non è stato possibile effettuare la regressione lineare a causa della mancanza di dati osservati. Nelle stazioni valutate da ENEL Produzione la portata osservata fa riferimento alla serie temporale di portate naturalizzate (come descritto nel Capitolo 2.2.3) che sono soggette a notevole incertezza; questo giustifica alcuni valori particolarmente bassi nelle sezioni di Alpe Cavalli, Codelago e Toce alle Cascate. Per ogni serie di dati è stato valutato l'indice di Nash-Sutcliffe, usato in idrologia per verificare la bontà delle simulazioni (Nash e Sutcliffe, 1970). La formula del coefficiente di Nash è la seguente:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_m)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

dove  $Q_o$  rappresenta la portata osservata,  $Q_m$  quella simulata dal modello e  $\bar{Q}_o$  la media delle osservazioni. L'indice assume valori variabili tra  $-\infty$  e 1. Un valore pari all'unità indica una perfetta corrispondenza tra valori osservati e predetti. Un  $E_{ns}$  pari a 0 indica che le simulazioni del modello hanno la stessa precisione della media delle osservazioni. Valori negativi si verificano quando la media si dimostra essere un miglior predittore rispetto all'output del modello stesso (ovvero quando la varianza residua è maggiore della varianza dei dati osservati).

La Tabella 4.2 riporta invece l'errore relativo commesso dal modello nella stima del volume cumulato, nell'arco dei due periodi di simulazione. L'errore è riferito alla grandezza simulate ragguagliate a scala dell'intero bacino rispetto a quelle osservata nella stazione di Candoglia. I valori negativi indicano una sottostima dei volumi cumulati da parte del modello. Valori positivi indicano invece una sovrastima rispetto al dato osservato.

	Calibrazione			Validazione		
	RMSE	R <sup>2</sup>	Nash	RMSE	R <sup>2</sup>	Nash
Candoglia	33.26	0.90	0.88	22.9	0.82	0.81
Crevola	25.2	0.83	0.60	-	-	-
Pontemaglio	38.38	0.84	-14.27	9.77	0.53	-11.92
Pontetto	3.90	0.91	0.80	3.17	0.59	-0.99
Masera	3.14	0.68	0.47	1.19	0.04	-1.81
Ponte Caddo	3.55	0.94	0.91	1.87	0.70	0.60
Villadossola	-	-	-	-	-	-
Codelago Diga	4.20	0.21	-0.69	1.53	0.10	-0.11
Alpe Cavalli	2.56	0.33	-0.63	0.95	0.59	-0.22
Fondovalle	-	-	-	4.41	0.48	-0.83
Cascate Toce	-	-	-	2.44	0.36	-0.63

Tabella 4.1: Indici statistici valutati sul bacino del Toce nei periodi di calibrazione (2000-2004) e di validazione (2005-2008)

	Errore relativo sul volume cumulato	
	Calibrazione	Validazione
Candoglia	-0.192	-0.089

Tabella 4.2: Errori relativi del modello rispetto alle osservazioni; i valori sono da intendersi adimensionali.

Come è possibile notare dalle tabelle gli indici statistici assumono valori bassi nelle sezioni piccole e con presenza di dighe (in particolar modo Codelago e Alpe Cavalli). Questa imprecisione ha molteplici spiegazioni: in primo luogo il modello idrologico effettua una simulazione su di un'area drenata di estensione inferiore rispetto al bacino artificializzato, e le portate simulate vengono quindi riscalate rispetto all'area, per essere comparabili con quelle valutate da ENEL. Questa procedura si rende necessaria poiché il FEST non è in grado di modellizzare le complessità idrauliche delle varie dighe artificiali e delle stazioni di pompaggio, che inevitabilmente alterano il naturale deflusso superficiale. L'incertezza introdotta dal

riscaldare le portate previste (in ipotesi di invarianza delle portate rispetto all'area, all'interno di regioni omogenee) è notevole e si ripercuote in maniera negativa sull'affidabilità dei risultati. In secondo luogo, come già accennato in precedenza, la serie utilizzata come dato osservato all'interno di questi bacini è in realtà un dato calcolato sulla base di un procedimento affetto da incertezza.

Inoltre nelle sezioni di Masera e Pontemaglio si registrano valori negativi sia in calibrazione che in validazione. Questo è dovuto al fatto che la serie di dati osservati da ARPA Piemonte nelle stazioni idrometriche mostra un forte carattere bimodale, con una discreta quantità di letture “addensate” in prossimità dello zero. E' lecito considerare perlomeno dubbia la lettura idrometrica in queste stazioni.

## 5 Confronto tra modelli idrologici

Nel caso di studio in esame sono stati utilizzati due modelli idrologici differenti per effettuare le simulazioni. Il primo è il FEST-EWB, distribuito e fisicamente basato, che utilizza in maniera accoppiata un'equazione di bilancio di massa ed una di bilancio energetico. L'alternativa è costituita dal FEST-WB, la versione precedente, che si limita ad un bilancio di massa (per maggiori dettagli sulle differenze si rimanda alla Appendice A: Modelli idrologici). Lo scopo delle analisi effettuate è di stabilire se l'utilizzo del modello energetico, che è computazionalmente più oneroso, comporta un netto miglioramento della precisione delle previsioni idrologiche effettuate, rispetto a quelle del modello semplificato.

Dopo aver determinato il miglior set di parametri per il bacino del Toce (Capitolo 4 Calibrazione e validazione del modello), entrambi i modelli hanno simulato con lo stesso set di dati e le medesime impostazioni. Il periodo considerato è stato il 2000-2008, senza necessità di distinguere tra calibrazione e validazione per le ragioni sopra esposte.

Le immagini seguenti mostrano il comportamento dei due modelli durante la simulazione dei deflussi superficiali degli eventi più intensi del periodo 2000-2008, come le piene dell'ottobre 2000 e del novembre 2004. La scala di aggregazione delle portate è oraria e non più giornaliera come nel capitolo precedente: questo è necessario per cogliere al meglio il carattere degli eventi di piena sul fiume Toce, che hanno una dinamica temporale piuttosto veloce. La serie di dati simulati dal modello energetico (FEST-EWB) verrà mostrata in rosso mentre la serie relativa al modello semplificato verrà riportata in verde. Il dato osservato da ARPA Piemonte sarà raffigurato in blu. I grafici fanno riferimento alla stazione di Candoglia, che è sezione di chiusura del bacino. La scala temporale è da leggersi in ore dall'inizio della simulazione.

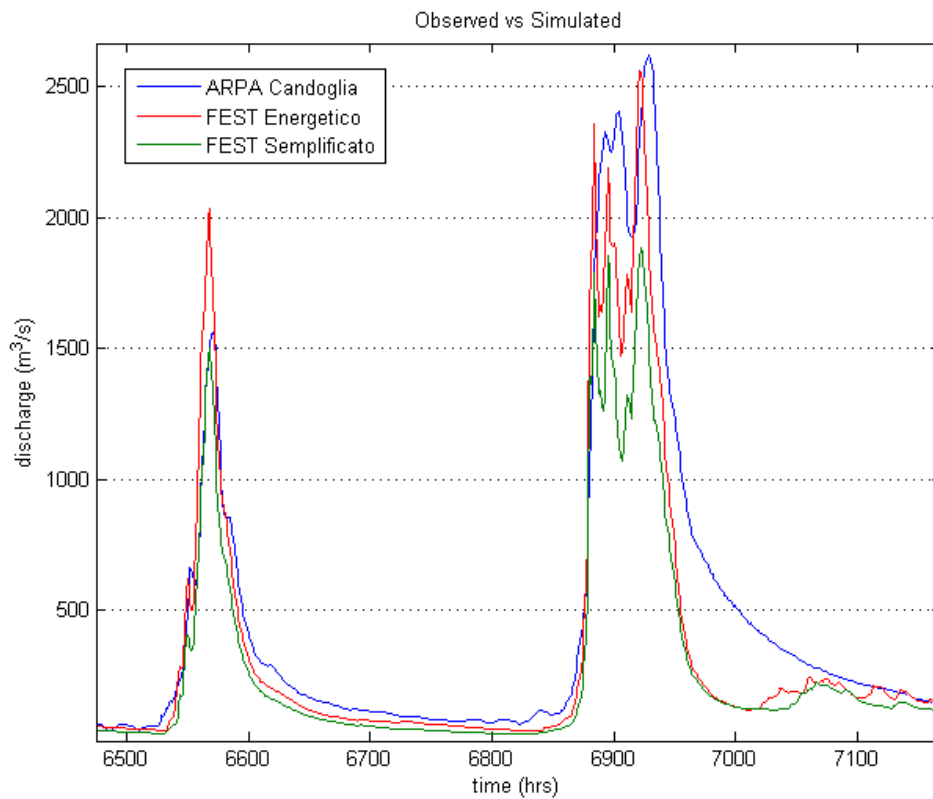


Figura 5.1: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante gli eventi di piena dell'ottobre 2000.

Si nota immediatamente come entrambi i modelli sottostimano notevolmente il volume di piena durante gli eventi intensi (questo giustifica in parte la sottostima dei volumi cumulati illustrata all'interno del capitolo precedente: Calibrazione e validazione del modello). Non è stato possibile correggere il problema del volume in fase di calibrazione senza compromettere sensibilmente le prestazioni del modello sotto altri aspetti.

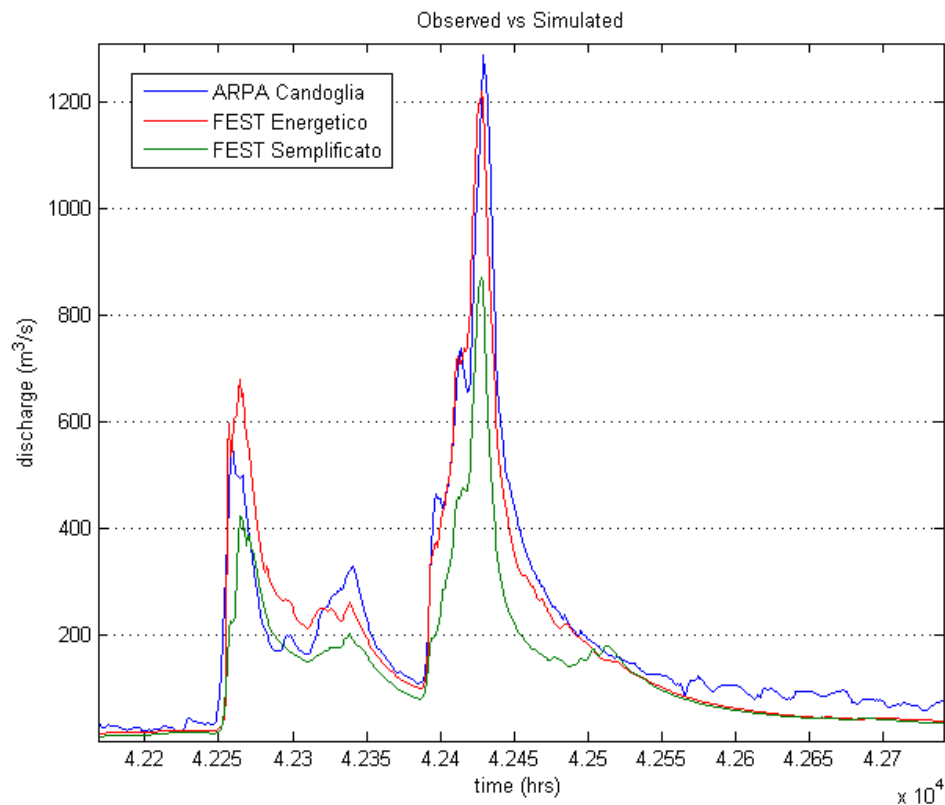


Figura 5.2: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante gli eventi di piena del novembre 2004.

Dalla Figura 5.1 e Figura 5.2 si osserva una certa sottostima dei picchi di piena da parte del modello idrologico semplificato FEST-WEB. Tale sottostima rimane un caso isolato in quanto, nel periodo 2000-2008, la corrispondenza tra i dati simulati dai due diversi modelli è sempre stata molto buona, come mostrato in precedenza dall'analisi statistica (si faccia riferimento al capitolo 4).

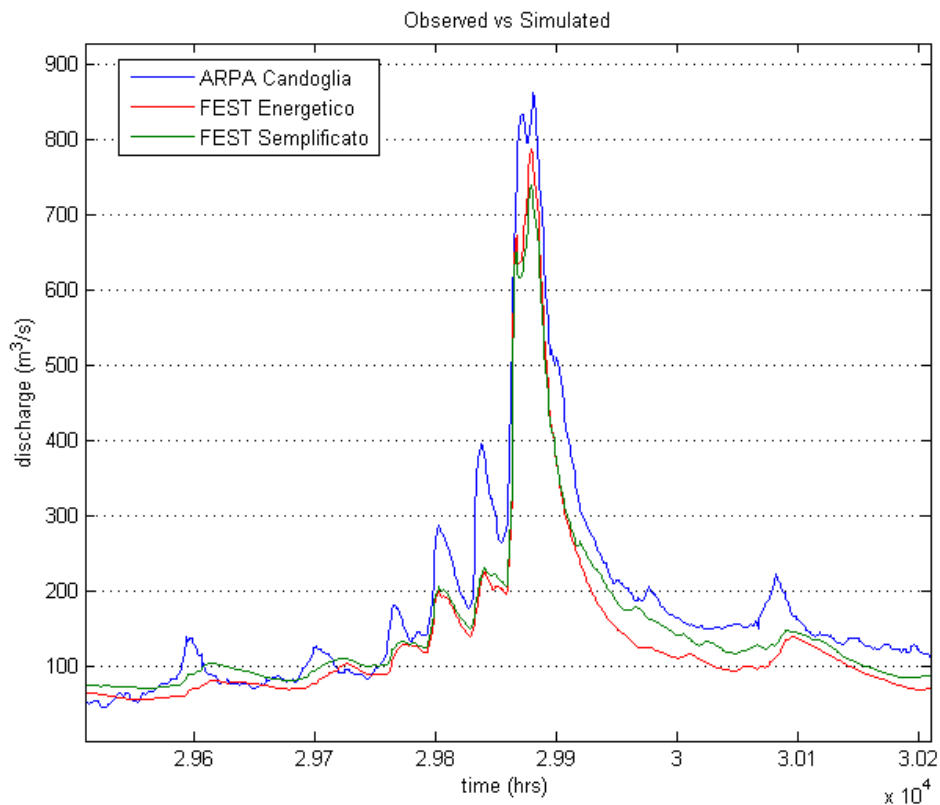


Figura 5.3: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante la piena del maggio 2008.

Il primo evento di piena dell'ottobre 2000 è stato escluso dalla analisi in Figura 5.1 poiché rappresenta anche il primo evento di piena in assoluto simulato dai modelli idrologici e può essere ritenuto non affidabile. In Figura 5.3 e Figura 5.4 si nota come entrambi i modelli FEST riescano a simulare discretamente bene anche i picchi multipli ravvicinati, fornendo una buona risposta in termini di deflussi superficiali.



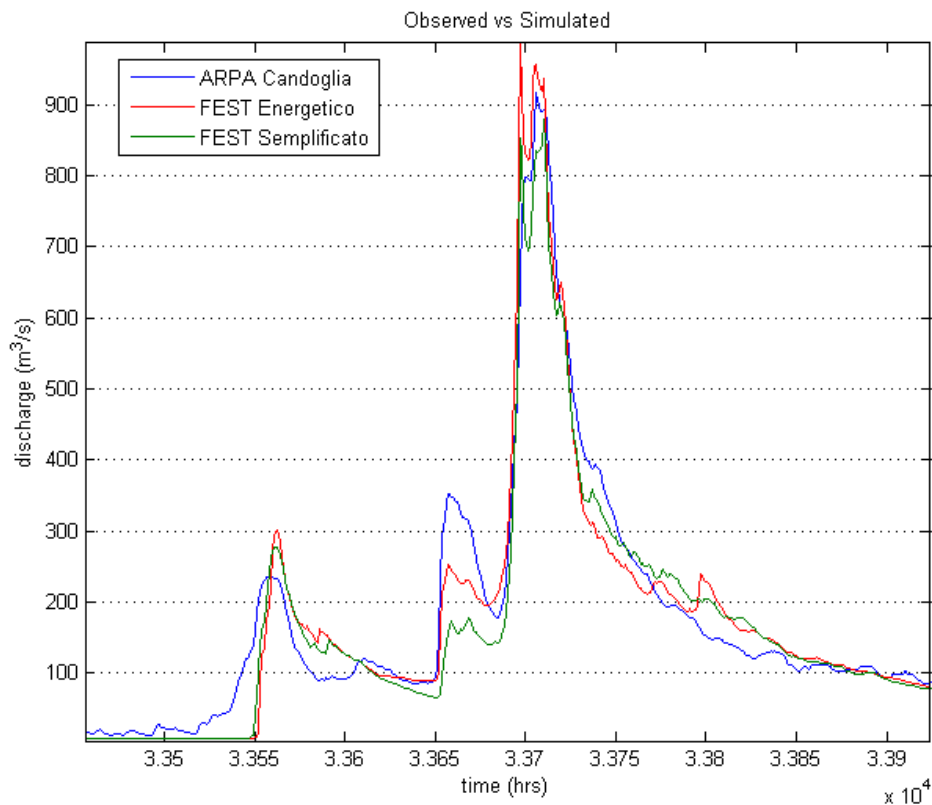


Figura 5.4: deflussi superficiali simulati dai modelli idrologici durante gli eventi di piena del novembre 2008.

La seconda analisi è stata effettuata sui volumi cumulati. La Figura 5.5 mostra l'andamento del volume, in funzione del tempo di simulazione, per entrambi i modelli. La curva ARPA fa riferimento ai volumi elaborati partendo dalle serie di portata osservata a scala oraria. Il periodo di warm-up è stato rimosso dai dati simulati, come precedentemente mostrato, in modo da garantire che ambedue i modelli abbiano assorbito adeguatamente le condizioni iniziali.

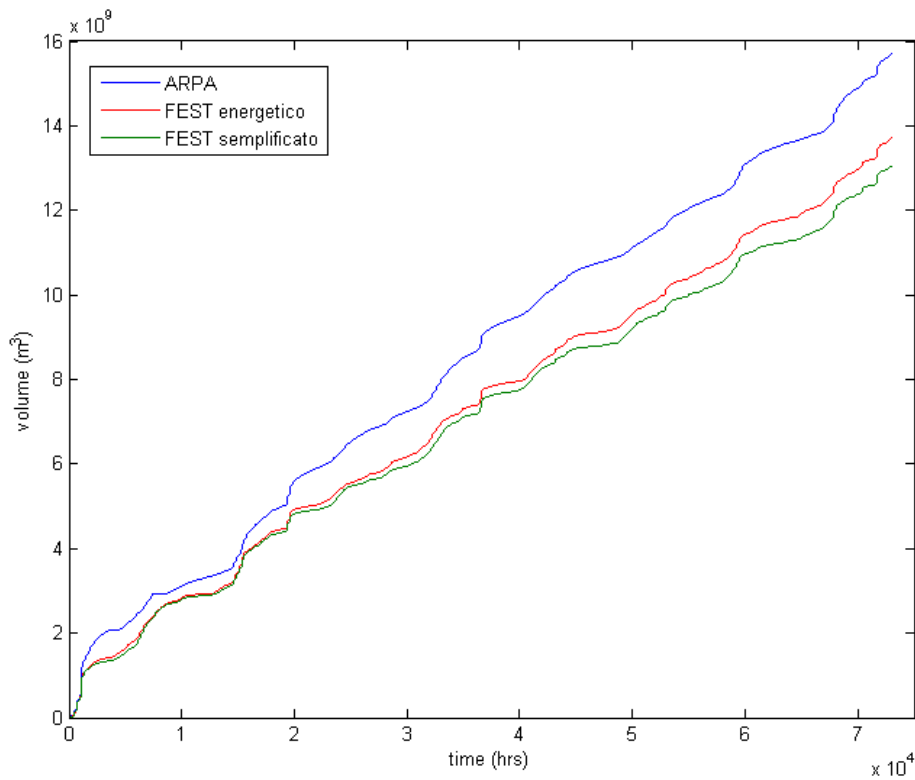


Figura 5.5: andamento del volume cumulato predetto dal modello energetico e da quella semplificato per il bacino del Toce nel periodo 2000-2008.

In secondo luogo vengono mostrate le curve di durata delle portate elaborate per le due diverse simulazioni. Per realizzarle è stata calcolata, per ogni valore di portata giornaliera, la probabilità di superamento secondo un distribuzione di tipo Weibull. I risultati vengono mostrati su di un piano semilogaritmico.

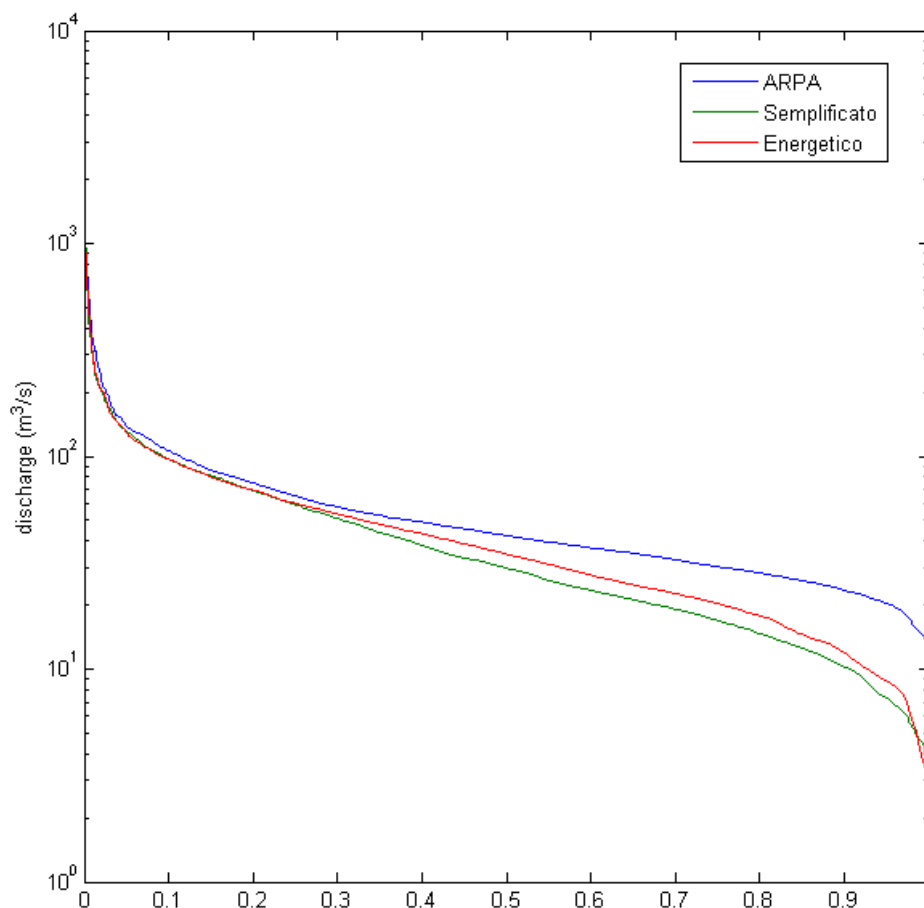


Figura 5.6: curve di durata delle portate simulate dai modelli idrologici nel periodo 2000-2008.

Dalla Figura 5.6 si nota come per gli eventi estremi, con bassa probabilità di superamento, non vi siano grosse differenze tra i due modelli. Nelle parte di destra il modello energetico si avvicina maggiormente alla curva “reale”, anche se rimane comparabile a quello semplificato. Questo implica una difficoltà dei modelli FEST a simulare il deflusso superficiale nei periodi estivi, in cui l'apporto meteorico è minimo e lo scioglimento nivale contribuisce ad alimentare i corsi d'acqua (come risulta evidente anche dalla sottostima dei volumi cumulati).

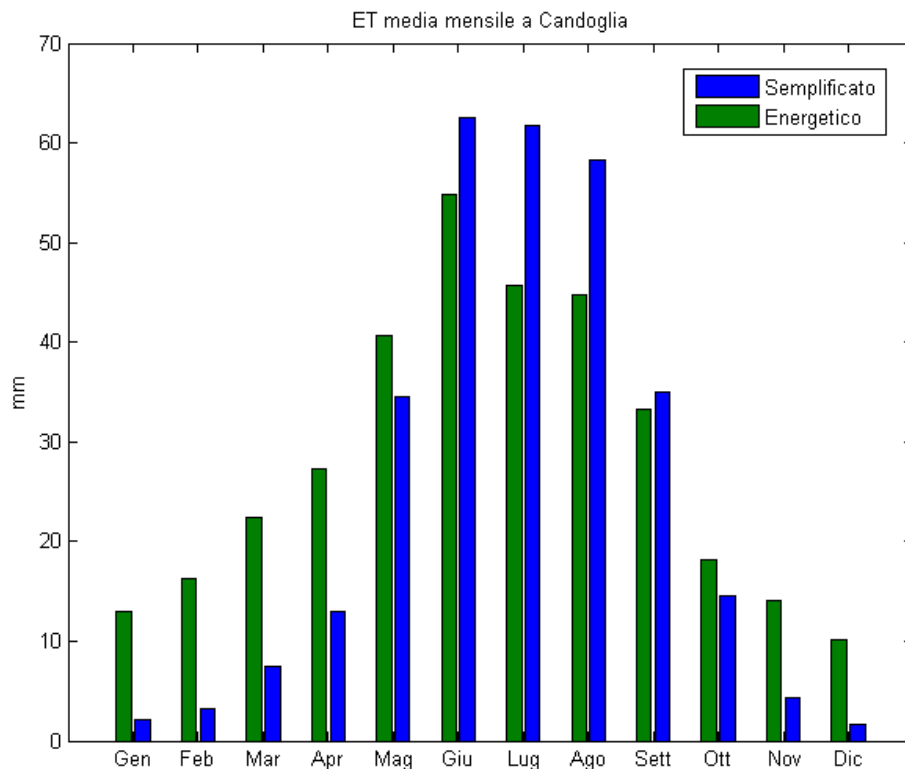


Figura 5.7: evapotraspirazione media mensile simulata per il bacino del Toce durante il periodo di calibrazione.

La Figura 5.7 mostra un confronto dell'evapotraspirazione predetta dai due differenti modelli. Ogni riga dell'istogramma fa riferimento alla ET media mensile, mediata a sua volta lungo tutto il periodo di simulazione (a titolo di esempio la ET di ottobre è ottenuta calcolando la ET media nel mese di ottobre in ogni anno di simulazione e facendo quindi la media di tutti i valori così ottenuti). Per il modello semplificato, rappresentato in blu, si nota il prevedibile andamento a plateau: il processo di ET in è molto marcato nei mesi estivi mentre diventa esiguo in quelli invernali. Questo è dovuto al fatto che la evapotraspirazione viene valutata come una frazione empirica di quella potenziale (ETP). Per il modello energetico si nota invece una distribuzione più uniforme durante l'anno. L'istogramma pone in evidenza il comportamento diverso dei due modelli, soprattutto nei mesi climaticamente molto freddi o molto caldi, ma nel complesso i risultati rimangono perfettamente comparabili.

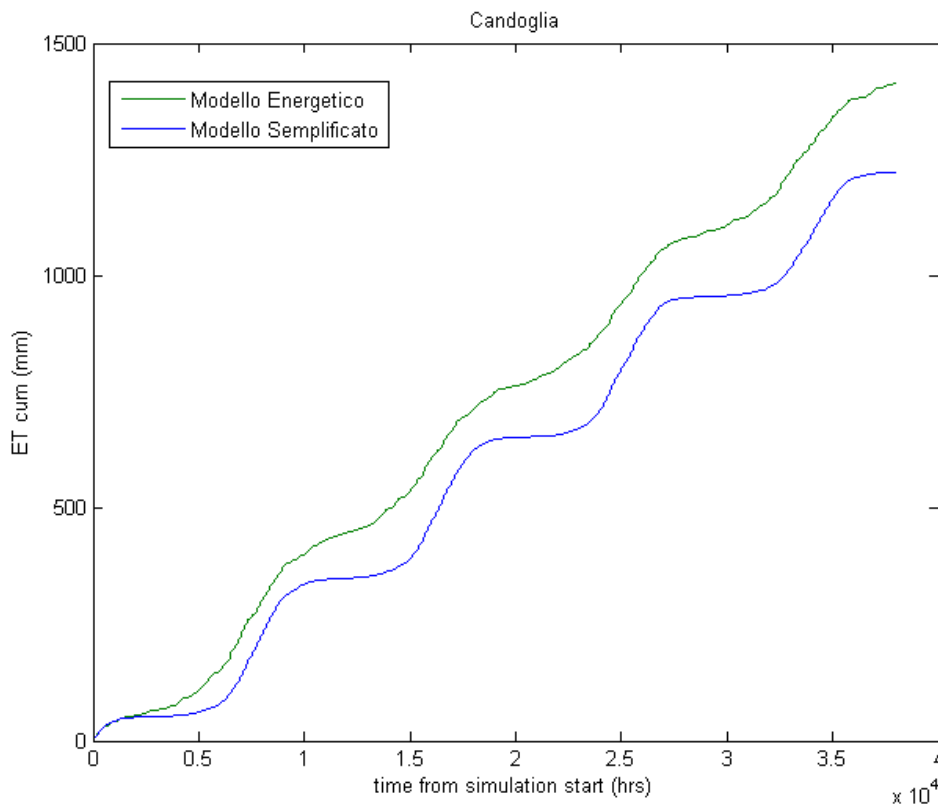


Figura 5.8: curve di evapotraspirazione simulata cumulata durante il periodo di calibrazione nel bacino del Toce.

La Figura 5.8 mostra l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata durante il periodo di calibrazione. Da ambedue le serie simulate è stato rimosso il periodo di warm-up, come fatto in precedenza per il confronto dei volumi cumulati. Il grafico conferma le informazioni contenute nell'istogramma di Figura 5.7: è evidente come il modello FEST-WB sottostimi la ET nel periodo invernale (con la pendenza della curva cumulata che è quasi orizzontale) e sovrastimi il processo nei mesi estivi (dove la pendenza della curva cumulata è maggiore rispetto a quella simulata del modello energetico). Il FEST-EWB simula in maniera differente questo processo e porta ad una sovrastima complessiva pari al 13.7% rispetto al semplificato. Per concludere le analisi è stata effettuata un'analisi statistica dei dati simulati in tre sezioni differenti del bacino idrografico. I grafici successivi (da Figura 5.9 a Figura 5.14) mettono a confronto la serie simulata dal modello energetico con quella simulata dal modello

semplificato: l'obiettivo è quello di stabilire se le due predizioni siano comparabili o meno. La Tabella 5.1 riassume il calcolo degli indici statistici nelle sezioni di Fondovalle, Alpe Cavalli e Candoglia.

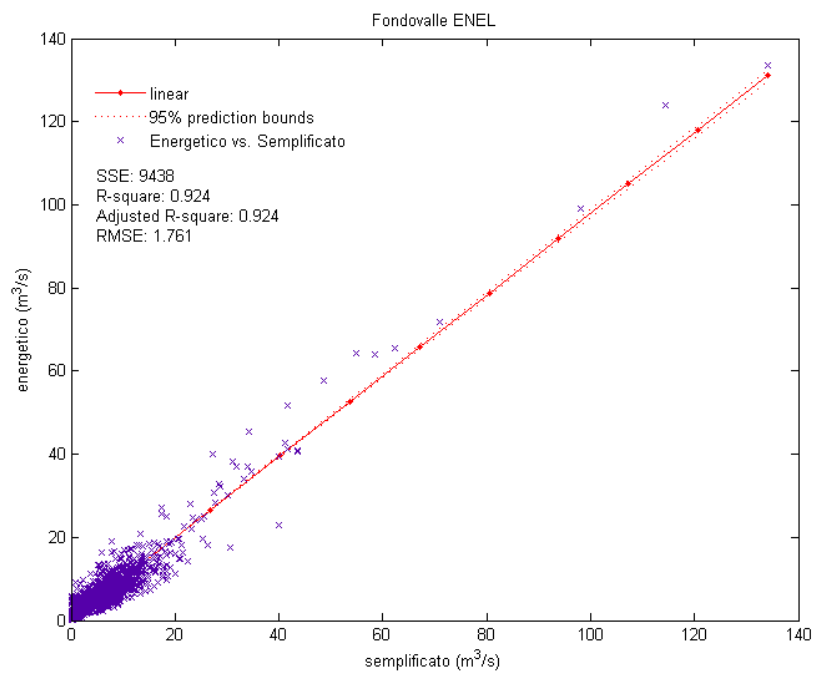


Figura 5.9: analisi statistica delle serie simulate da differenti modelli idrologici nella sezione di Fondovalle.

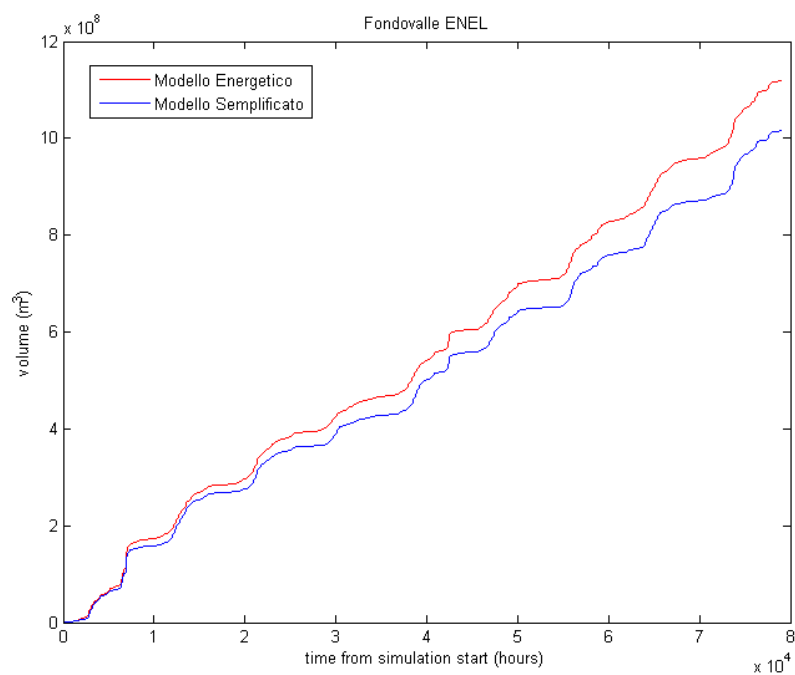


Figura 5.10: volumi cumulati predetti nella sezione di Fondovalle

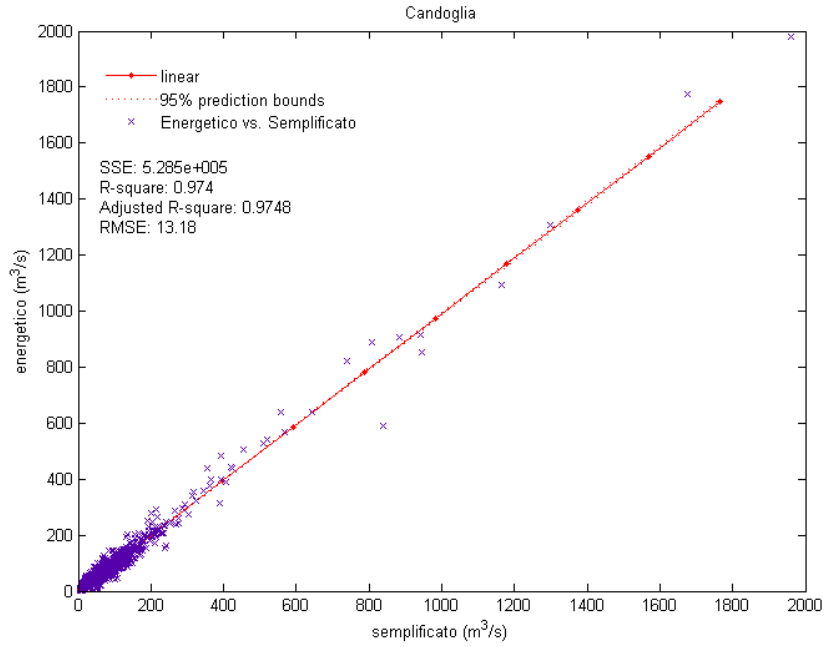


Figura 5.11: analisi statistica delle serie simulate da differenti modelli idrologici nella sezione di Candoglia.

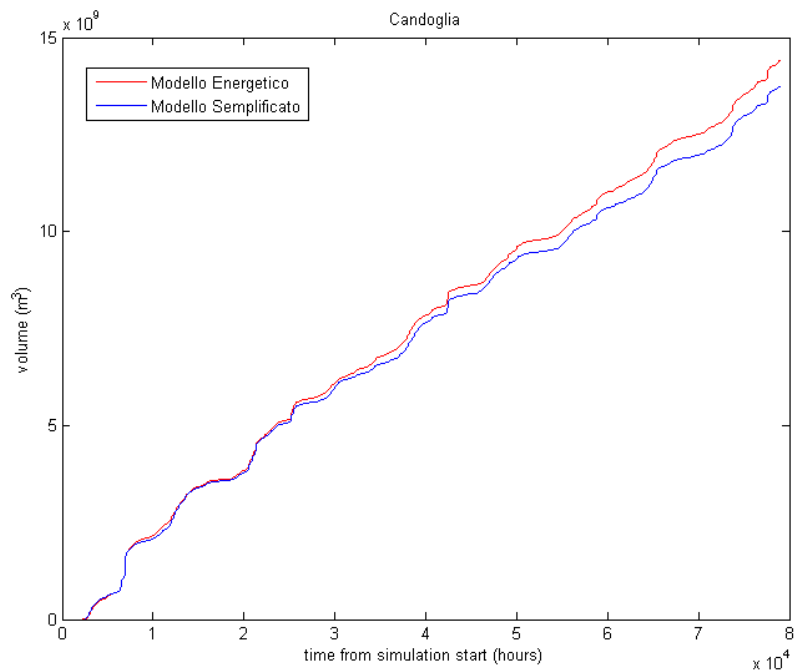


Figura 5.12: volumi cumulati predetti nella sezione di Candoglia.

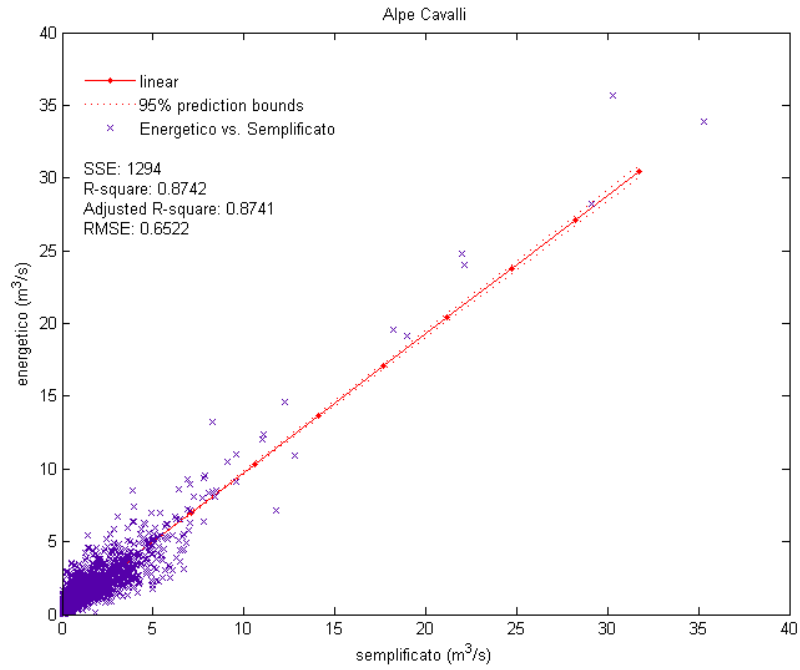


Figura 5.13: analisi statistica delle serie simulate da differenti modelli idrologici nella sezione di Alpe Cavalli.

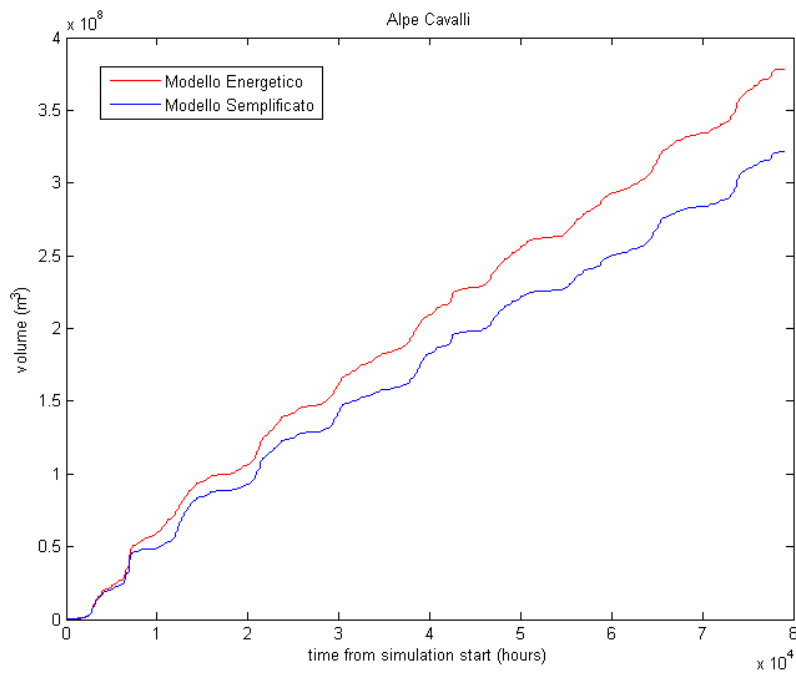


Figura 5.14: volumi cumulati predetti nella sezione di Alpe Cavalli.



	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
<b>Fondovalle</b>	0.92	1.76
<b>Alpe Cavalli</b>	0.87	0.65
<b>Candoglia</b>	0.97	13.18

Tabella 5.1: indici statistici valutati mettendo a confronto le simulazioni del modello energetico con quelle del modello semplificato.

In Figura 5.15 viene riportato l'andamento degli scarti valutato a scala di bacino: è interessante notare come al crescere della portata simulata gli scarti rimangano contenuti. Questo avviene perchè ambedue i modelli simulano correttamente gli eventi di piena e non si registrano differenze marcate (i dati sono ben addensati nei pressi della retta di regressione lineare).

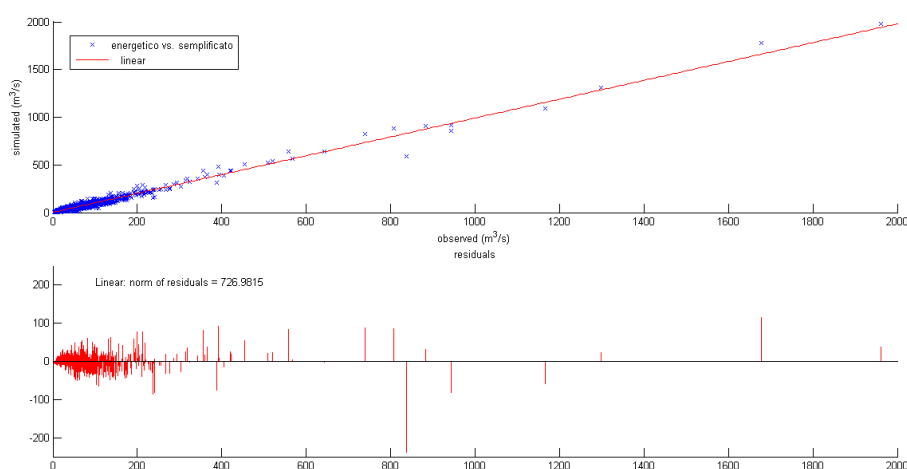


Figura 5.15: test di buon adattamento per le serie simulate dai due modelli a Candoglia; in rosso vengono rappresentati gli scarti.

A conferma di ciò vengono evidenziati, in Figura 5.16, i valori della mediana e della deviazione standard per le due serie di dati simulati.. Dalla tabella seguente si evince come le differenze registrate in questo tipo di dati siano molto sottili.

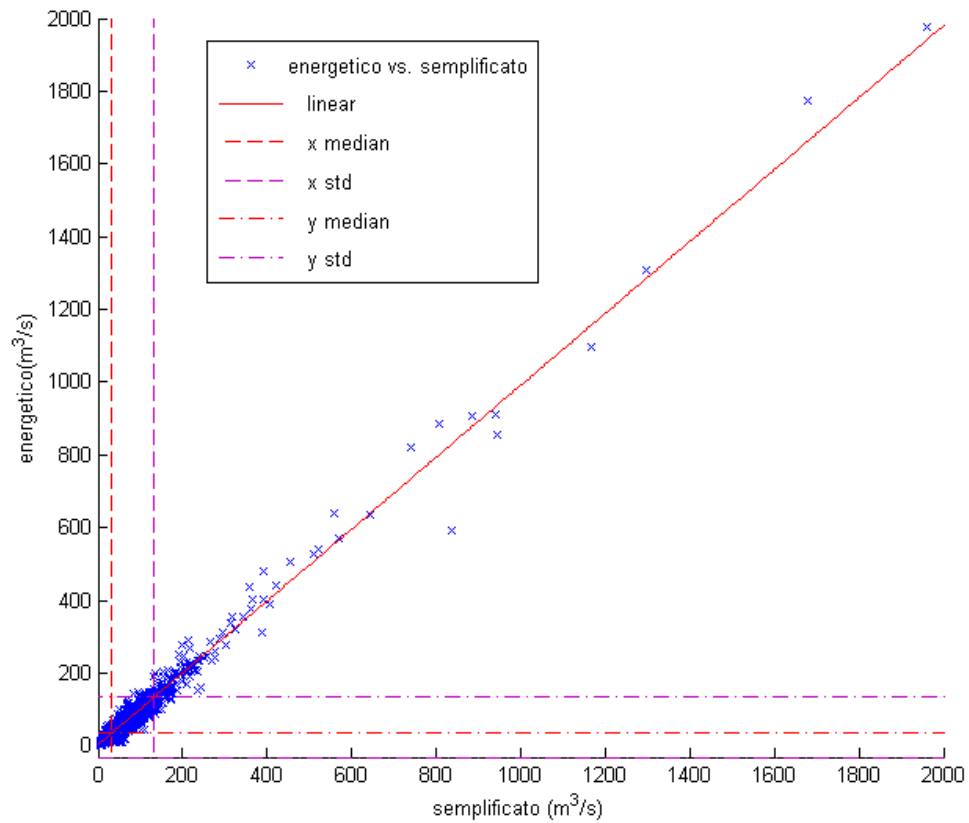


Figura 5.16: test di buon adattamento per le serie di dati simulati a Candoglia: vengono evidenziate la mediana e la deviazione standard registrate.

	<b>Semplificato</b>	<b>Energetico</b>
<b>min</b>	3,7	3,2
<b>max</b>	1961	1978
<b>media</b>	49,6	52,1
<b>mediana</b>	29,9	34,8
<b>moda</b>	3,7	3,2
<b>dev. std.</b>	82,9	83,0
<b>range</b>	1958	1975

Tabella 5.2: parametri statistici calcolati per le serie di dati simulati a Candoglia nel periodo 2000-2008

Dalle analisi effettuate non emergono grosse differenze tra i due modelli. Le predizioni effettuate sono interscambiabili, come dimostrato dagli indici statistici, che assumono valori elevati. Anche analizzando le curve di durata si nota come il modello semplificato si comporti sostanzialmente come quello energetico.

L'unica vera differenza è riscontrabile nelle simulazioni della evapotraspirazione ed è dovuta al differente metodo utilizzato per il calcolo fisico della ETP all'interno dei due modelli. Nel modello semplificato viene utilizzata l'equazione di Hargraves (su base empirica) mentre nel modello energetico si fa ricorso ad un'equazione differenziale di bilancio energetico per stimare la ET descrivendone fisicamente il processo. Questo porta il modello semplificato a sovrastimare l'evapotraspirazione nei periodi estivi. Il ciclo si chiude considerando che, a causa di questa sovrastima nel processo di ET, il FEST-WB sottostima leggermente i volumi cumulati.

Nel complesso i risultati sono comparabili ed è quindi possibile affermare che, in simulazioni idrologiche di questo genere, il modello semplificato può sostituire il modello energetico senza commettere errori.

## **6 Analisi dei risultati**

Le simulazioni finali sono state effettuate inizializzando i modelli idrologici con i dati degli scenari climatici. Questi dati provengono dal downscaling statistico dello scenario elaborato dal modello climatico regionale Remo ( capitolo 2.2.4: Modelli e scenari climatici). Tramite il procedimento “quantile mapping” sono stati generati dati di pioggia, umidità dell'aria, velocità del vento, radiazione, temperatura con scala di aggregazione trioraria per ogni stazione presente sul bacino. Questi dati costituiscono il vero e proprio input dei modelli idrologici.

All'interno di questo capitolo vengono presentati ed analizzati i dati delle simulazioni da scenario climatico che coprono il periodo 2000-2050, effettuate dal modello semplificato (FEST-WB) e da quello energetico (FEST-EWB).

### ***6.1 Rianalisi del periodo storico***

In questa sezione sono stati esaminate le previsioni basate su scenari climatici nel periodo che va dal settembre 2000 al dicembre 2008. Questo periodo è definito storico perchè sono disponibili dei dati osservati con cui valutare le prestazioni dei modelli idrologici. E' bene precisare che queste simulazioni, con input proveniente da modelli climatici, non rappresentano una ricostruzione del periodo storico e quindi una proiezione verso il futuro, ma bensì sono dei veri e propri scenari elaborati basandosi sull'andamento delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera e il conseguente aumento di temperatura. L'analisi dei dati non può più essere effettuata con le modalità viste nel capitolo 5: Confronto tra modelli idrologici. I modelli restituiscono un output orario che deve essere aggregato opportunamente per poter essere confrontato. Per semplicità faremo riferimento alla simulazioni del modello semplificato con l'appellativo “Remo semplificato”, ad indicare che

l'inizializzazione è stata effettuata con dati provenienti dal modello regionale Remo. Allo stesso modo lo scenario simulato dal modello energetico sarà denominato "Remo energetico". Ciò non implica l'impiego di un differente modello idrologico, che rimane il FEST, nella configurazione con la quale era stato validato in precedenza, ma semplicemente un differente set di dati in ingresso per il modello.

Per le analisi multiscala sono state scelte due sezioni di riferimento. Per quanto riguarda la scala regionale è stata presa in esame Candoglia, che rappresenta la stazione di chiusura del bacino e lo drena completamente. Per la scala di sottobacino si è preso in esame il sistema creato dalla diga di Alpe Cavalli, per due motivi principali: in primo luogo ha caratteristiche decisamente più alpine e contiene un ghiacciaio di modeste dimensioni, che contribuisce al deflusso nei corsi d'acqua; secondariamente, ma non per importanza, è un sottobacino creato da un invaso artificiale ed quindi è di grande interesse valutare gli impatti climatici locali.

Un metodo efficace per confrontare la simulazione da scenario climatico e quella da dati osservati consiste nel calcolare le curve di durata delle portate e analizzare le eventuali differenze. In Figura 6.1 e Figura 6.2 vengono illustrate le curve di durata delle portate elaborate per le sezioni di Candoglia e Alpe Cavalli. Le serie relative alle previsioni del modello energetico vengono riportate in rosso mentre quelle elaborate dal modello semplificato sono tracciate in verde. Per la sezione di Candoglia è stata inserita, a titolo di riferimento, la curva di durata creata a partire dalla serie di osservazioni idrometriche di ARPA Piemonte. Per quanto riguarda invece Alpe Cavalli viene riportata, in Figura 6.2, la curva creata basandosi sui deflussi naturalizzati calcolati da ENEL Produzione presso la diga. A causa dell'assenza di una stazione idrometrica nella sezione considerata è necessario fare ricorso a questa serie calcolata (per le modalità con cui sono stati ricostruiti da ENEL i deflussi naturali si faccia riferimento al capitolo 2.2.3 : Dati delle dighe Enel Produzione).

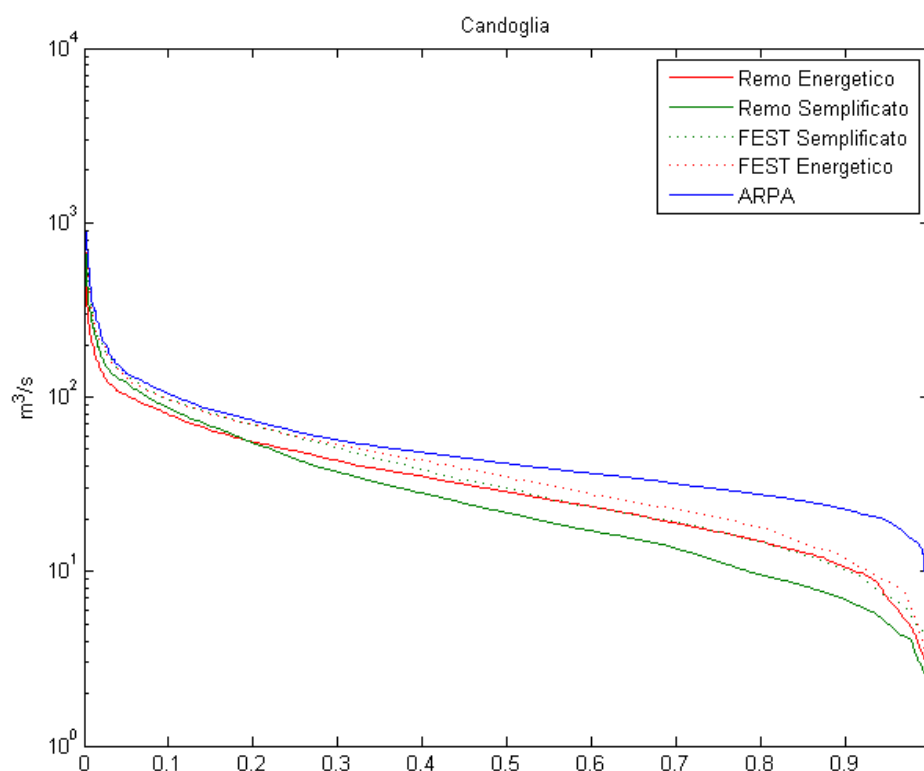


Figura 6.1: curve di durata delle portate per le elaborazioni da scenario climatico messe a confronto con quelle elaborate a partire da simulazioni con dati osservati nella sezione di Candoglia.

Dalle immagini si nota immediatamente come le curve siano più “basse” rispetto a quelle simulate dal FEST-WB e dal FEST-EWB, inizializzati con dati osservati. In particolare questo si verifica per probabilità di superamento medio-alte (maggiori del 50%).

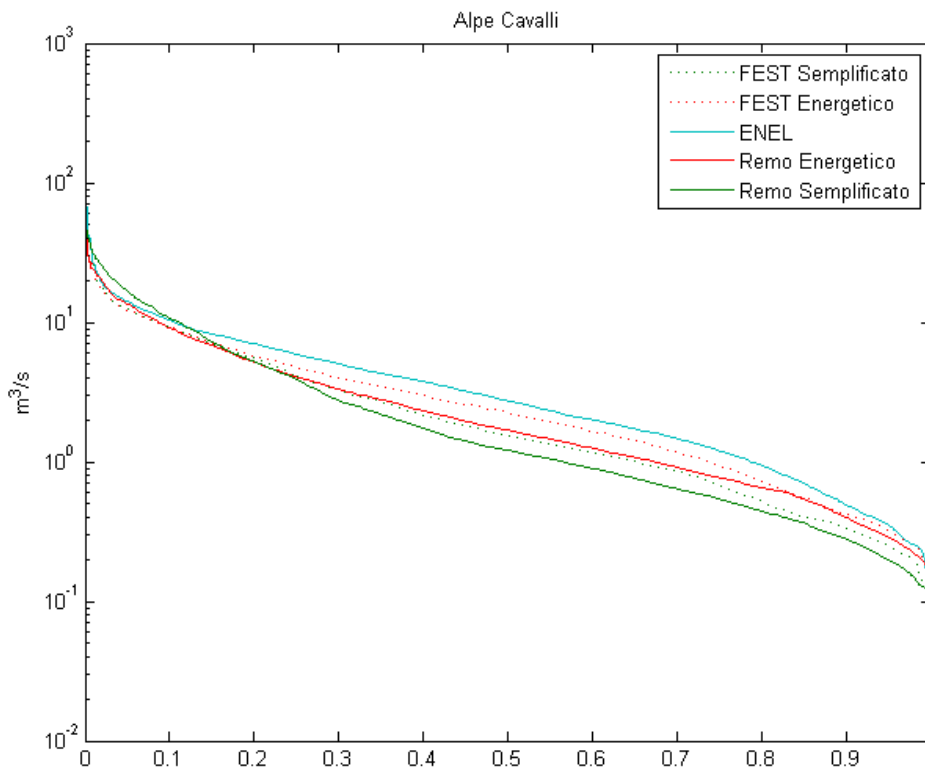


Figura 6.2: curve di durata delle portate per le elaborazioni da scenario climatico messe a confronto con quelle elaborate a partire da simulazioni con dati osservati nella sezione di Alpe Cavalli.

Per meglio quantificare la differenza esistente tra le curve di durata delle portate è stata effettuata un'analisi statistica sui massimi registrati in entrambe le simulazioni del periodo 2000-2008. Le serie di portate simulate sono state ordinate in modo decrescente e quindi plottate all'interno di un grafico a dispersione. La perfetta corrispondenza tra le due serie è data quando i punti si dispongono lungo una retta. A partire da questo grafico è stata operata una regressione lineare ai minimi quadrati in modo da valutare l'errore quadratico medio. Le figure 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 mostrano la regressione lineare operata sulle curve di durata simulate a Candoglia e Alpe Cavalli.

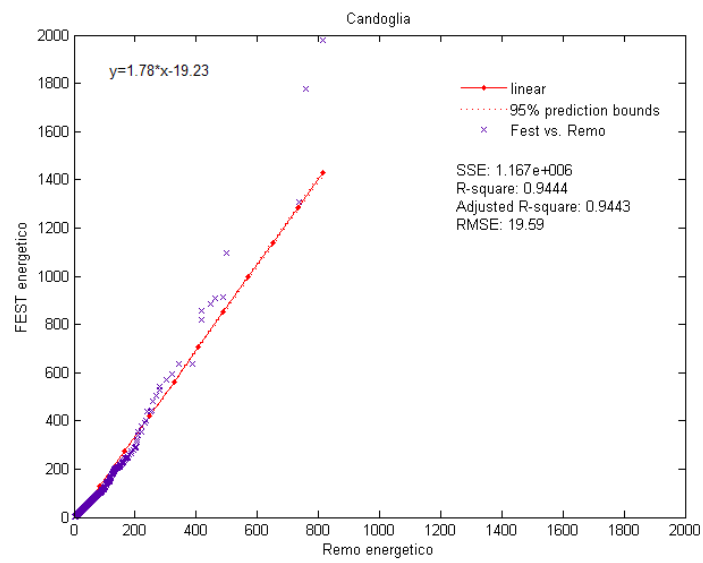


Figura 6.3: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello energetico nella sezione di Candoglia.

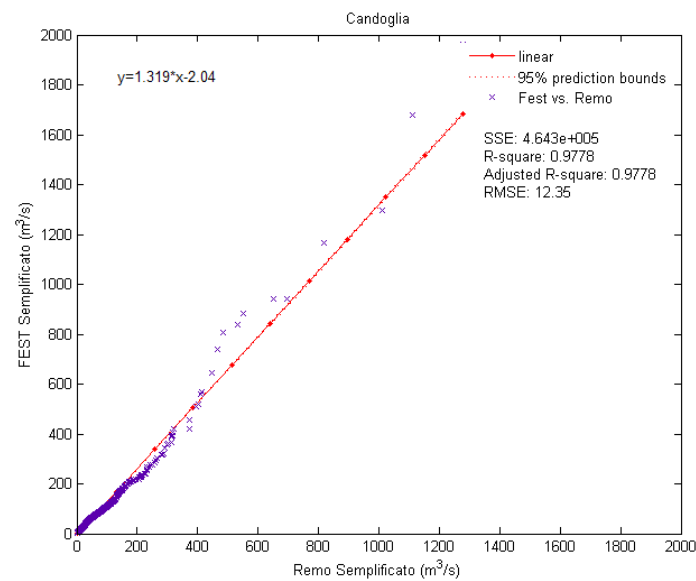


Figura 6.4: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello semplificato nella sezione di Candoglia.



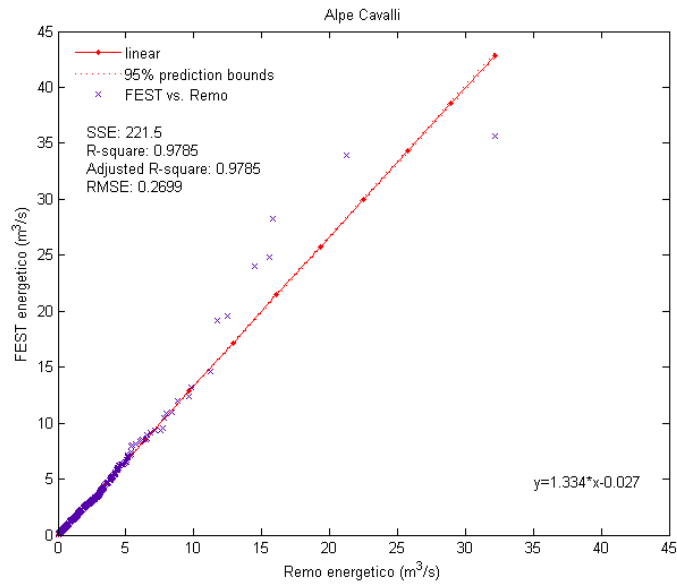


Figura 6.5: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello energetico nella sezione di Alpe Cavalli.

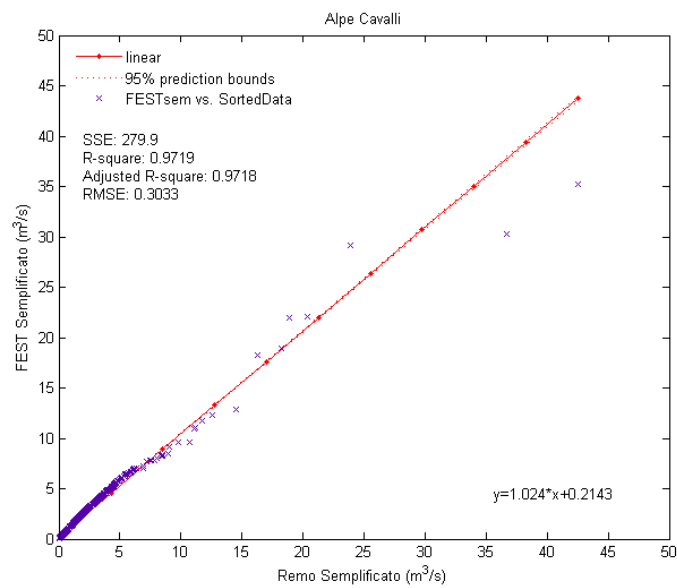


Figura 6.6: Analisi statistica delle curve di durata delle portate simulate dal modello semplificato nella sezione di Alpe Cavalli.

I grafici confermano quanto era visivamente osservabile nelle curve di durata delle portate. I modelli semplificato ed energetico, inizializzati con i dati osservati, restituiscono valori di portata tendenzialmente più elevati rispetto a quelli simulati basandosi sullo scenario climatico del modello Remo.

La Tabella 6.1 riassume brevemente gli indici più interessanti ricavati da questa analisi. La prima colonna fa riferimento alla portata che si osserva mediamente nella metà dei giorni dell'anno idrologico ed è riportata come differenza tra quella simulata con dato noto e quella ricavata da scenario climatico. L'errore quadratico medio è invece il medesimo ricavato dalla regressione lineare sulla serie dei massimi di portata, ordinati in modo decrescente.

<b>FEST vs. Remo</b>	<b>Semplificato</b>		<b>Energetico</b>	
	Differenza Q media [m3/s]	RMSE [m3/s]	Differenza Q media [m3/s]	RMSE [m3/s]
<b>Candoglia</b>	8,14	12,35	6,00	19,59
<b>Alpe Cavalli</b>	0,35	0,46	0,56	0,39

*Tabella 6.1: indici statistici valutati per le curve di durata delle portate simulate rispettivamente da modello energetico e semplificato con differenti set di dati in ingresso. I dati si riferiscono al confronto tra modello FEST con dato osservato e modello FEST basato su scenario climatico Remo.*

La Figura 6.7 mostra l'andamento dei volumi cumulati calcolati partendo dalle simulazioni dei modelli idrologici nel periodo storico a Candoglia. I volumi vengono ricavati partendo dalla portata simulata che è somma del deflusso superficiale simulato e del deflusso ipodermico simulato. Dalla figura si evince che le previsioni originate dal dato Remo sottostimano i volumi cumulati. Questo è in accordo con quanto mostrato in precedenza con la curva di durata delle portate (ove si evidenzia una minor disponibilità idrica). La serie di volume cumulato ARPA è inserita come riferimento ed il problema della sottostima generalizzata dei volumi, da parte di entrambe le versioni del modello idrologico, è stato presentato all'interno del capitolo 4: Calibrazione e validazione del modello.

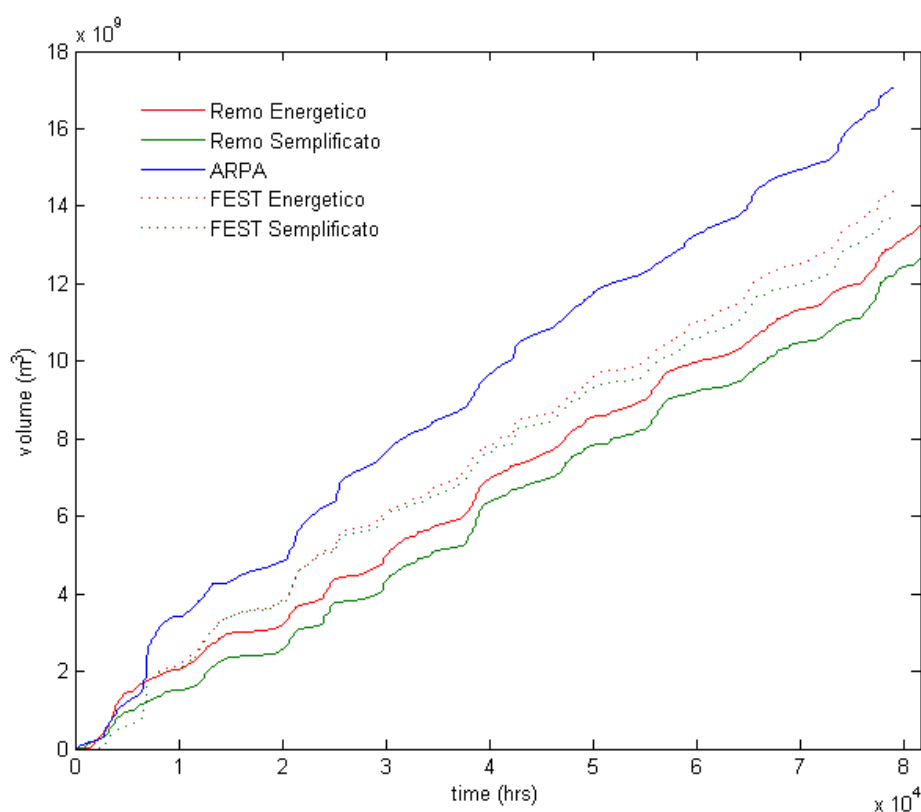


Figura 6.7: volumi cumulati simulati dai modelli FEST-WB e FEST-EWB nel periodo 2000-2008 a Candoglia.

La Figura 6.8 mostra l'andamento dei volumi cumulati simulati presso la diga di Alpe Cavalli. La serie di riferimento è stata elaborata partendo dai deflussi giornalieri calcolati da ENEL Produzione. Questi dati sopperiscono alla mancanza di una stazione idrometrica all'interno della sezione. Anche il sotto-bacino conferma la tendenza alla sottostima da parte dello scenario climatico Remo rispetto all'osservato.

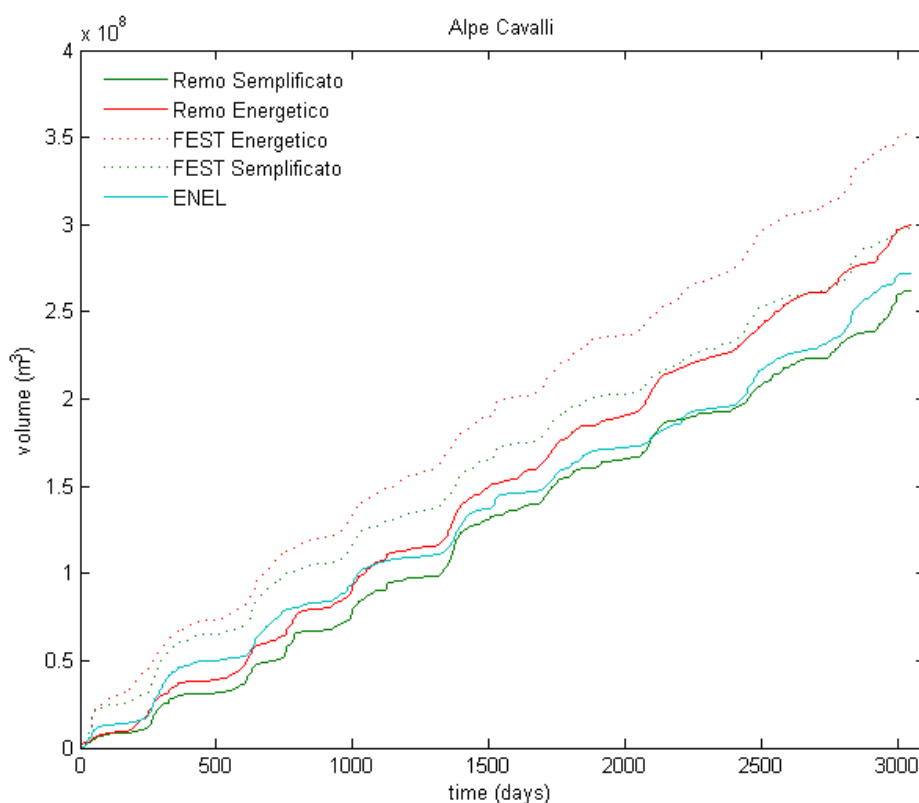


Figura 6.8: volumi cumulati predetti dai modelli energetico e semplificato nel periodo 2000-2008 ad Alpe Cavalli.

La Tabella 6.2 mostra l'errore relativo commesso dalla simulazione da scenario climatico, rispetto a quella da dato osservato, nella previsione dei volumi cumulati. Valori negativi indicano una sottostima da parte dello scenario Remo.

FEST vs. Remo	Errore sui volumi cumulati [-]	
	Semplificato	Energetico
Candoglia	-0,128	-0,113
Alpe Cavalli	-0,138	-0,158

Tabella 6.2: errore relativo tra i volumi cumulati simulati basandosi su dati osservati e quelli simulati da scenario climatico: i valori sono da intendersi adimensionali.

Un altro metodo per confrontare efficacemente lo scenario climatico con la

simulazione ad ingressi noti è calcolare i massimi di portata simulati ogni anno e metterli a confronto tra di loro. In particolare la media di tutti i massimi annuali aiuta a capire se le due simulazioni sono compatibili oppure divergono. La Tabella 6.3 riporta i massimi simulati dai due differenti modelli nella sezione di Candoglia. In questo caso si fa riferimento all'anno idrologico: siccome la simulazione è stata inizializzata a gennaio 2000, il periodo che va sino a fine agosto 2000 è stato considerato di “riscaldamento” per il modello e quindi escluso da tutte le analisi. A titolo di esempio l'anno idrologico 2000 va dal primo settembre 2000 sino al 31 agosto del 2001.

	<b>Massimi di portata annui a Candoglia [m<sup>3</sup>/s]</b>			
	<b>FEST semplificato</b>	<b>Remo semplificato</b>	<b>FEST energetico</b>	<b>Remo energetico</b>
<b>2000</b>	2560	1256	2560	1155
<b>2001</b>	321	400	362	293
<b>2002</b>	2335	3151	2395	2134
<b>2003</b>	263	2955	178	1944
<b>2004</b>	1110	823	1219	584
<b>2005</b>	566	582	657	381
<b>2006</b>	1085	1166	1119	1077
<b>2007</b>	818	674	886	483

*Tabella 6.3: massimi di portata annui simulati a Candoglia nel periodo 2000-2008.*

La stessa analisi viene riproposta, in Tabella 6.4, per la sezione di Alpe Cavalli. La Tabella 6.5 riassume invece il calcolo della portata indice basata sulle simulazioni del periodo storico, sia per lo scenario climatico che per i dati osservati. L'informazione che si può estrarre immediatamente è che la sovrastima che il modello energetico comportava in fase di validazione con dati osservati si è tramutata in una sottostima per le simulazioni basate sullo scenario climatico.

	<b>Massimi di portata annui a Alpe Cavalli [m<sup>3</sup>/s]</b>			
	<b>FEST semplificato</b>	<b>Remo semplificato</b>	<b>FEST energetico</b>	<b>Remo energetico</b>
<b>2000</b>	61	26	84	90
<b>2001</b>	18	35	25	35
<b>2002</b>	57	90	65	47
<b>2003</b>	8	73	5	69
<b>2004</b>	26	19	30	10
<b>2005</b>	27	20	30	11
<b>2006</b>	31	13	32	15
<b>2007</b>	29	56	30	40

Tabella 6.4: massimi di portata annui simulati ad Alpe Cavalli nel periodo 2000-2008.

<b>2000-2008</b>	<b>Portata indice [m<sup>3</sup>/s]</b>			
	<b>FEST semplificato</b>	<b>Remo semplificato</b>	<b>FEST energetico</b>	<b>Remo energetico</b>
<b>Candoglia</b>	1132,25	1375,88	1172,00	1006,38
<b>Alpe Cavalli</b>	32,13	41,5	33,88	39,62

Tabella 6.5: portata indice valutata sui massimi annuali di piena simulati nel periodo 2000-2008.

Risulta interessante analizzare anche l'andamento delle precipitazioni previste dallo scenario climatico. In questo caso non è più necessario distinguere tra modello energetico e distribuito poiché l'input meteorologico è il medesimo. La Tabella 6.6 riassume il calcolo della precipitazione media annua prevista dallo scenario Remo, messa a confronto con quella osservata dalla rete idro-meteorologica durante il periodo storico.

	<b>Precipitazione media annua[mm]</b>	
	<b>FEST (osservata)</b>	<b>Remo (scenario)</b>
<b>Candoglia</b>	1559,28	1278,96
<b>Alpe Cavalli</b>	1515,48	1296,48

*Tabella 6.6: precipitazione media oraria valutata nel periodo 2000-2008 per la simulazione da dato osservato e per la simulazione da scenario climatico.*

	<b>Massimi di precipitazione oraria [mm/ora]</b>	
	<b>FEST</b>	<b>Remo</b>
<b>Candoglia</b>	15,95	14,21
<b>Alpe Cavalli</b>	51,19	18,75

*Tabella 6.7: tassi di precipitazione oraria massimi simulati dallo scenario climatico a confronto con quelli osservati nel periodo 2000-2008.*

Per ogni anno del periodo storico è stata ricavata l'altezza massima di precipitazione per le durate di 1h, 3h, 6h, 12h e 24h. L'altezza di precipitazione massima per assegnata durata (durante il periodo 2000-2008) è stata quindi ricavata mediando i valori massimi annui calcolati in precedenza. Con i dati a disposizione è stato possibile riportare a grafico delle rette che rappresentano, in modo approssimato, le Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP). La Figura 6.9 mostra le LSPP valutate a scala di bacino. La serie proveniente da simulazione con dato osservato viene riportata in blu ed è denominata "Osservata" ( in realtà rappresenta un'interpolazione del dato di afflusso meteo registrato dalle varie stazioni ARPA Piemonte). La serie in verde rappresenta invece la LSPP proveniente dal dato di afflusso meteo fornito dallo scenario Remo, per le stazioni che ricadono all'interno del bacino del Toce.

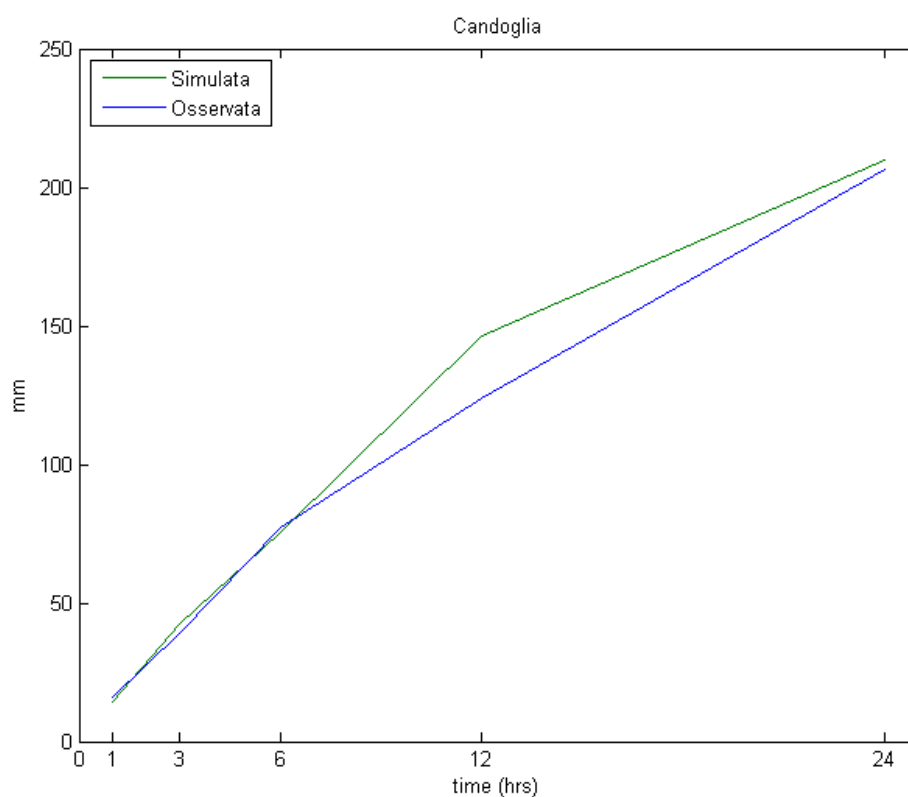


Figura 6.9: LSPP calcolate, per il bacino del Toce, nel periodo 2000-2008. La serie Simulata fa riferimento ai dati pluviometrici provenienti dallo scenario climatico.

La Figura 6.10 mostra le LSPP calcolate per la sezione di Alpe Cavalli, come fatto in precedenza per Candoglia.



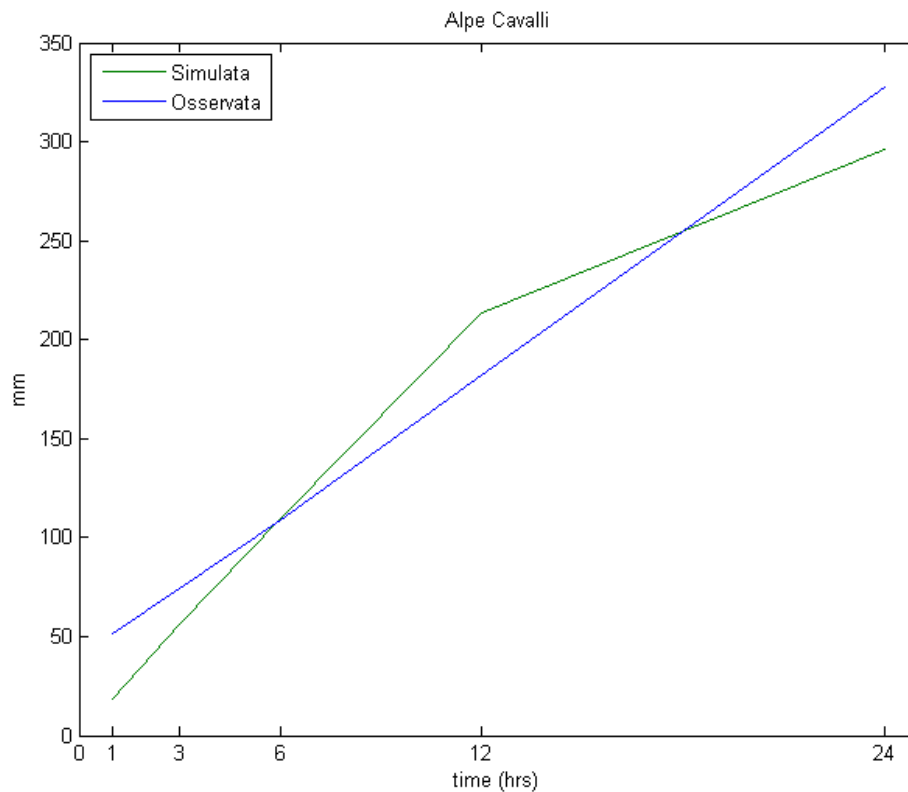


Figura 6.10: LSPP calcolate, per la sezione di Alpe Cavalli, nel periodo 2000-2008. La serie Simulata fa riferimento ai dati pluviometrici provenienti dallo scenario climatico

Per concludere l'analisi del periodo storico vengono presentate le valutazioni condotte su parametro chiave del ciclo idrologico: il tasso di evapotraspirazione effettiva. La ET influisce direttamente sulla disponibilità idrica ed è perciò, assieme al tasso medio di precipitazione annua e al runoff, un importante indicatore dell'impatto causato dall'innalzamento di temperatura previsto. Nel seguito viene appaiata la ET simulata dai modelli idrologici inizializzati con dati dello scenario Remo con la ET simulata dagli stessi modelli inizializzati con dato meteo osservato. I dati vengono presentati sotto forma di tasso di evapotraspirazione medio mensile (mediato lungo tutto il periodo storico) con le modalità già descritte nel capitolo 5.

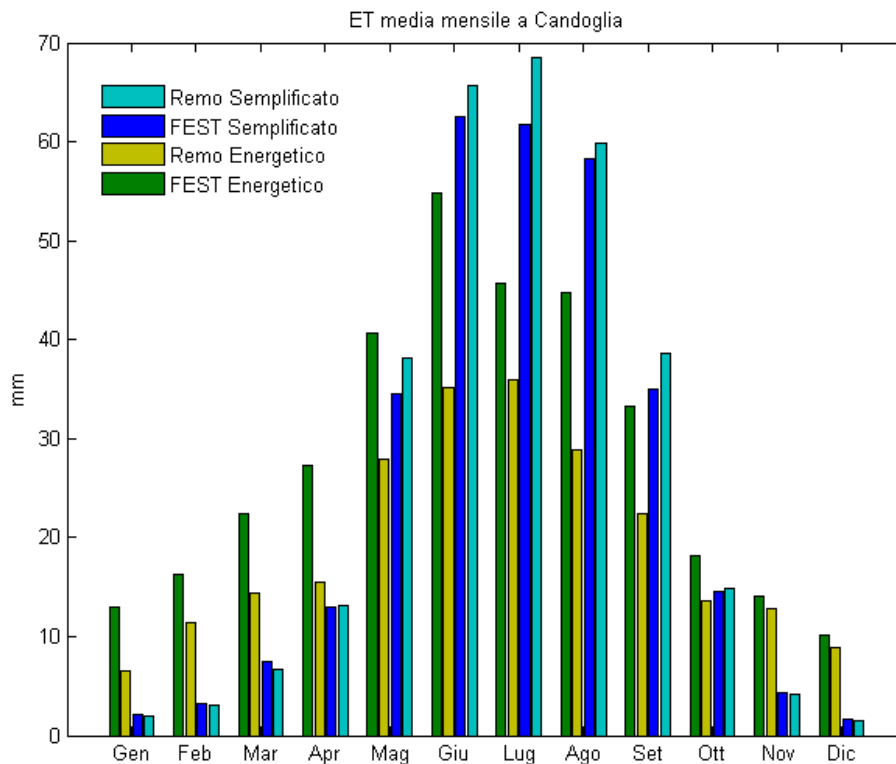


Figura 6.11: tasso di evapotraspirazione medio mensile simulato a scala di bacino nel periodo storico. Vengono messi a confronto differenti modelli idrologici inizializzati con dati diversi.

Dalla Figura 6.11 si possono trarre numerose conclusioni. In primo luogo il modello energetico (FEST-EWB) ha prodotto una sottostima generalizzata del tasso medio di evapotraspirazione: si nota come in tutti i mesi dell'anno tale sottostima non sia trascurabile. Quando sono stati generati i dati dello scenario climatico, a scala di ogni singola stazione, alcune di esse sono state escluse dal procedimento di calibrazione (per maggiori dettagli si veda capitolo 2.2.4 : Modelli e scenari climatici). Delle 5 stazioni dotate di dati radiometrici ben 3 sono state escluse dal processo di calibrazione. Per quanto riguarda la velocità del vento solamente una stazione aveva i requisiti di completezza della serie osservata per poter essere inclusa. Il risultato è stato quello di ottenere la generazione di dati di radiazione e velocità del vento in un numero esiguo di stazioni, rispetto alla superficie

complessiva del bacino. Pertanto il modello a bilancio idrico ed energetico ha dato luogo a simulazioni probabilmente meno affidabili rispetto a quello semplificato proprio per la mancanza di questi dati (fondamentali per stimare fisicamente il processo di ET). La Tabella 6.14 riporta la radiazione media osservata annualmente tra il 2000 ed il 2008, a confronto con quella prevista dal modello climatico. Si può notare come quest'ultima risulti essere superiore. L'incremento di radiazione giustifica in parte l'aumento di ET simulata dal modello energetico.

<b>2000-2008</b>	<b>Radiazione media [W/m<sup>2</sup>]</b>	
	<b>Remo (scenario)</b>	<b>FEST (osservata)</b>
<b>Candoglia</b>	139,32	133,08
<b>Alpe Cavalli</b>	135,82	131,97

*Tabella 6.8: confronto tra la radiazione osservata e quella prevista da scenario climatico, nel periodo 2000-2008.*

La seconda osservazione riguarda il modello semplificato FEST-WB che ha generato invece una previsione perfettamente comparabile con quella da dato osservato. Si nota come nei mesi maggiormente caldi ci sia una leggera sovrastima del tasso di ET. Si ricorda che l'andamento a “campana” osservabile per il modello semplificato è dovuto alla modalità con cui esso stima la ET. Il tasso effettivo viene calcolato come una frazione empirica della evapotraspirazione potenziale. Pertanto la evapotraspirazione effettiva sarà massima in estate e minima in inverno.

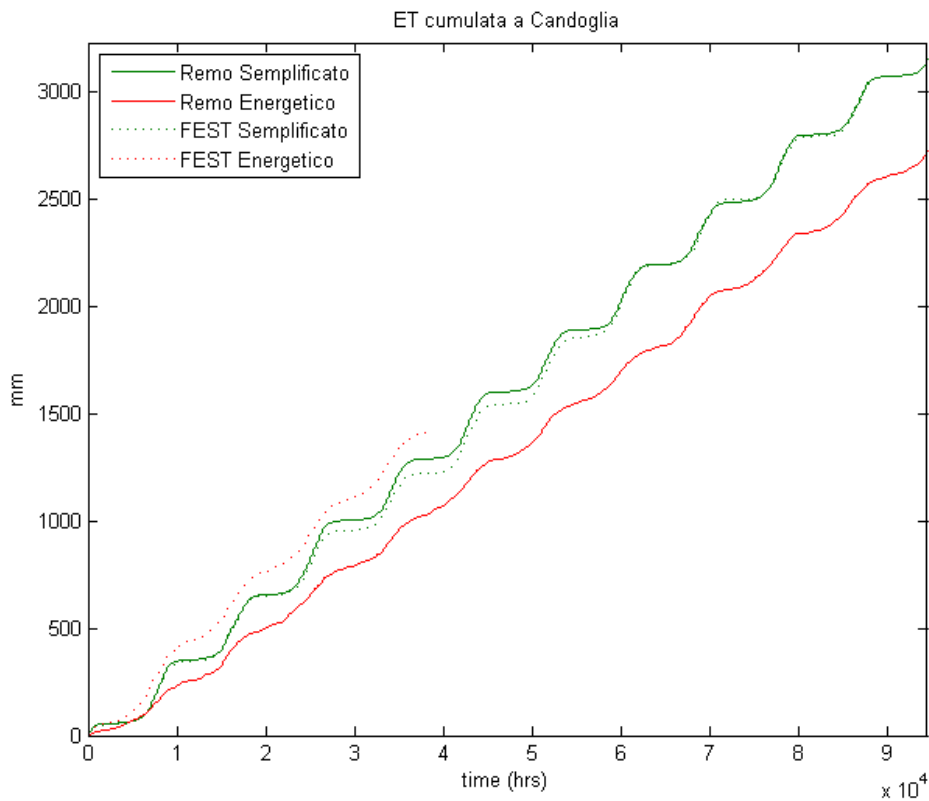


Figura 6.12: evapotraspirazione cumulata simulata dai due modelli nel periodo 2000-2008 basandosi sullo scenario climatico.

La Figura 6.12 mostra l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata predetta dai due modelli a scala di bacino. Come riferimento sono state inserite le serie simulate basandosi su dato osservato (linee tratteggiate). Si nota chiaramente come vi sia una pesante sottostima da parte del modello energetico. Per il modello semplificato l'andamento di evapotraspirazione da scenario climatico è comparabile con quello simulato in precedenza sino al 2008. Dall'andamento delle curve si riconoscono i vari periodi dell'anno idrologico. Si distingue in particolare per il FEST-WB il periodo invernale durante il quale la cumulata è quasi orizzontale. Nel periodo estivo invece la curva assume grandi pendenze e questo è dovuto alla stima empirica della ET effettuata dal modello (osservabile anche nell'istogramma).

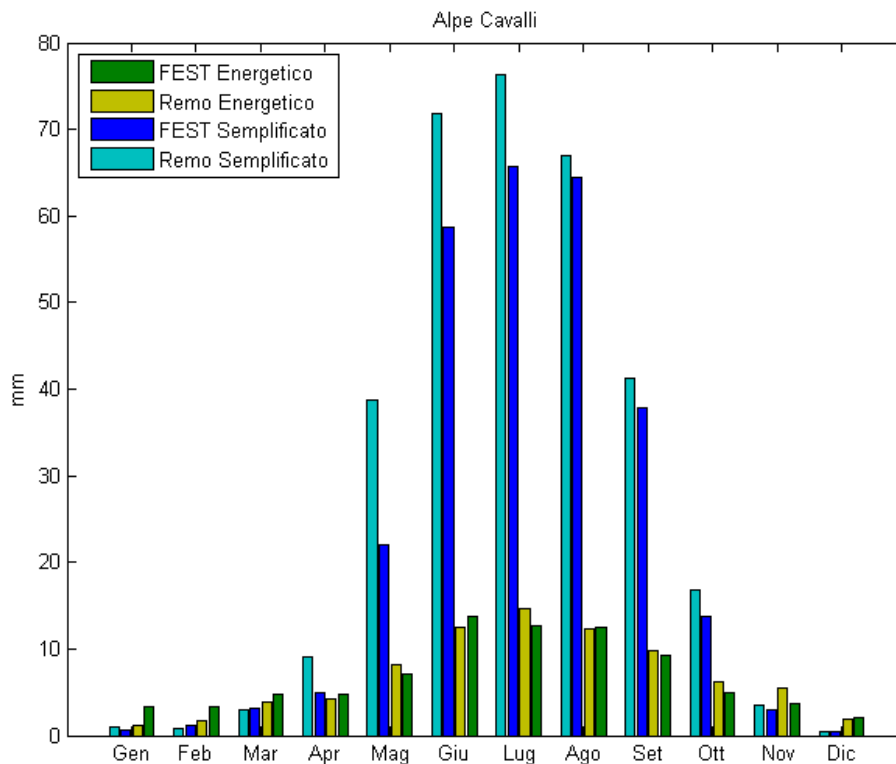


Figura 6.13: tasso di evapotraspirazione medio mensile simulato a scala locale (Alpe Cavalli) nel periodo storico. Vengono messi a confronto differenti modelli idrologici inizializzati con dati diversi.

Per la sezione di Alpe Cavalli sono state effettuate le stesse indagini riguardo alla evapotraspirazione, al fine di ottenere risultati anche per un sottobacino dalle dimensioni ridotte e caratteristiche differenti. La stima del tasso medio mensile è di difficile interpretazione: dalla Figura 6.13 si osserva un notevole divario tra il modello semplificato e quello energetico. Risulta complesso stabilire se sia più affidabile la simulazione data dal modello energetico (che sottostimava a scala di bacino ma computa sempre la ET in modo fisicamente basato) oppure quella del modello semplificato (che viceversa è in linea con il dato a scala di bacino ma d'altronde effettua una stima empirica).

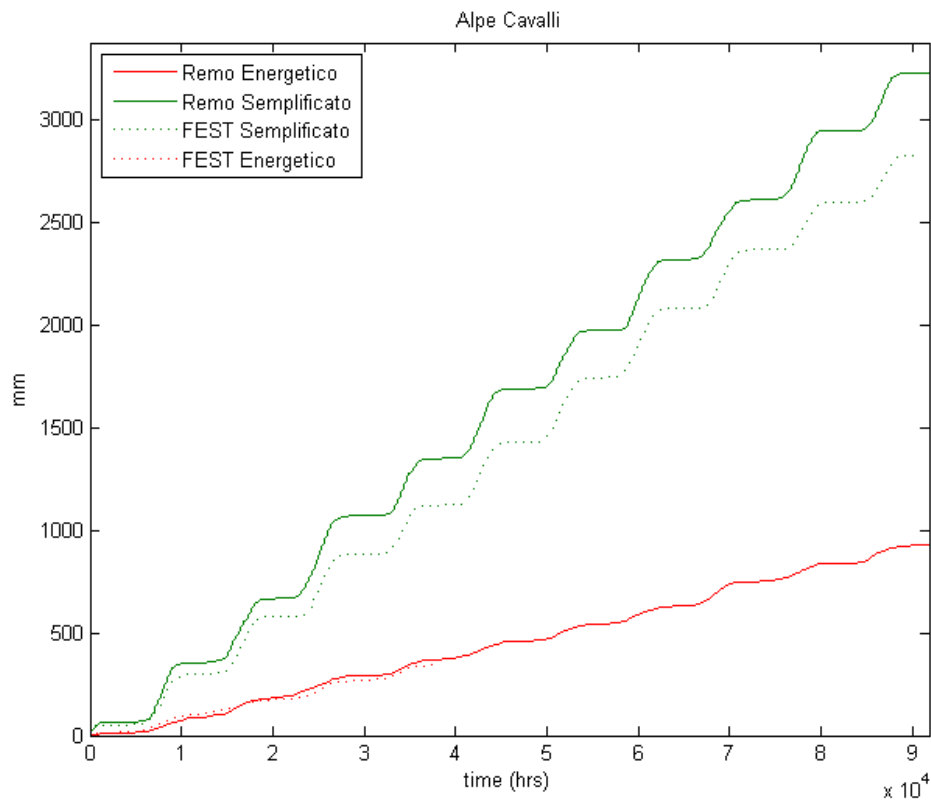


Figura 6.14: evapotraspirazione cumulata simulata dai due modelli nel periodo 2000-2008 basandosi sullo scenario climatico.

La Figura 6.14 riporta le curve di evapotraspirazione simulata cumulata per tutto il periodo che va dal 2000 al 2008. L'andamento temporale di entrambe le curve sembra confermare quanto illustrato in precedenza con l'istogramma, e mette in evidenza la differenza esistente tra i modelli idrologici.

## **6.2 Simulazioni da scenario climatico**

All'interno di questa sezione verranno illustrati e commentati i risultati delle simulazioni finali, operate con due differenti modelli idrologici e basate sui dati in ingresso generati dal modello climatico Remo. Il FEST-WB (modello semplificato) ed il FEST-EWB (modello a bilancio idrico ed energetico) hanno eseguito la simulazione sino al 2050 restituendo output delle principali variabili idrologiche a scala oraria. Considerando l'assenza di un dato "osservato" l'analisi dei risultati è stata eseguita confrontando i dati simulati nel periodo 2009-2050 con i dati dello stato attuale (simulati durante il periodo storico 2000-2008 e illustrati nel sottocapitolo precedente). L'idea è di fornire chiare indicazioni sull'evoluzione dei principali parametri idro-meteorologici, per poter poi valutare gli impatti dei cambiamenti climatici sul bacino del fiume Toce. Le analisi effettuate seguono le stesse modalità del capitolo 6.1.

La Figura 6.15 mostra la curva di durata delle portate ottenuta per le simulazioni da scenario climatico a scala di bacino. Ad un aumento del regime idrico per alte probabilità di superamento corrisponde un netto aumento dell'intensità degli eventi di piena estremi (parte sinistra del grafico, ovvero basse probabilità di superamento).

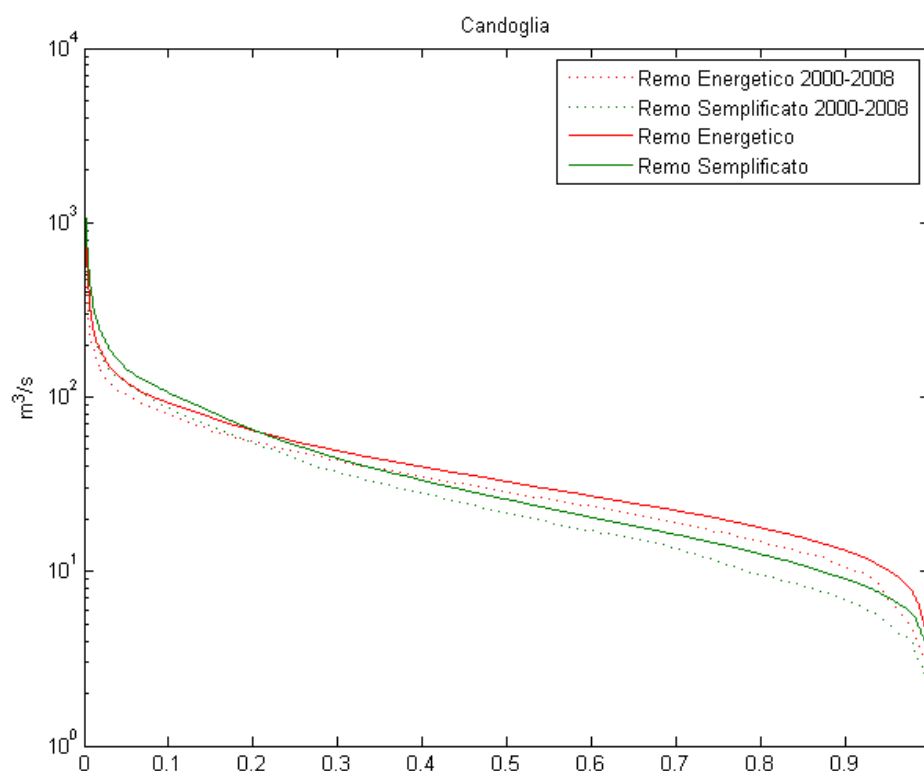


Figura 6.15: curve di durata simulate dal modello energetico e semplificato nel periodo 2009-2050.

La situazione si presenta completamente differente nel sotto-bacino di Alpe Cavalli. La Figura 6.16 pone in evidenza un netto abbassamento delle curve di durata simulate dallo scenario 2009-2050 rispetto a quelle simulate durante il periodo storico di riferimento. L'abbassamento si tradurrebbe in una drastica riduzione della quantità d'acqua disponibile per la captazione all'interno dell'invaso artificiale. Le capacità di utilizzo e di gestione dell'impianto presso la diga di Alpe Cavalli verrebbero ridimensionate, dato il volume ridotto su cui operare.



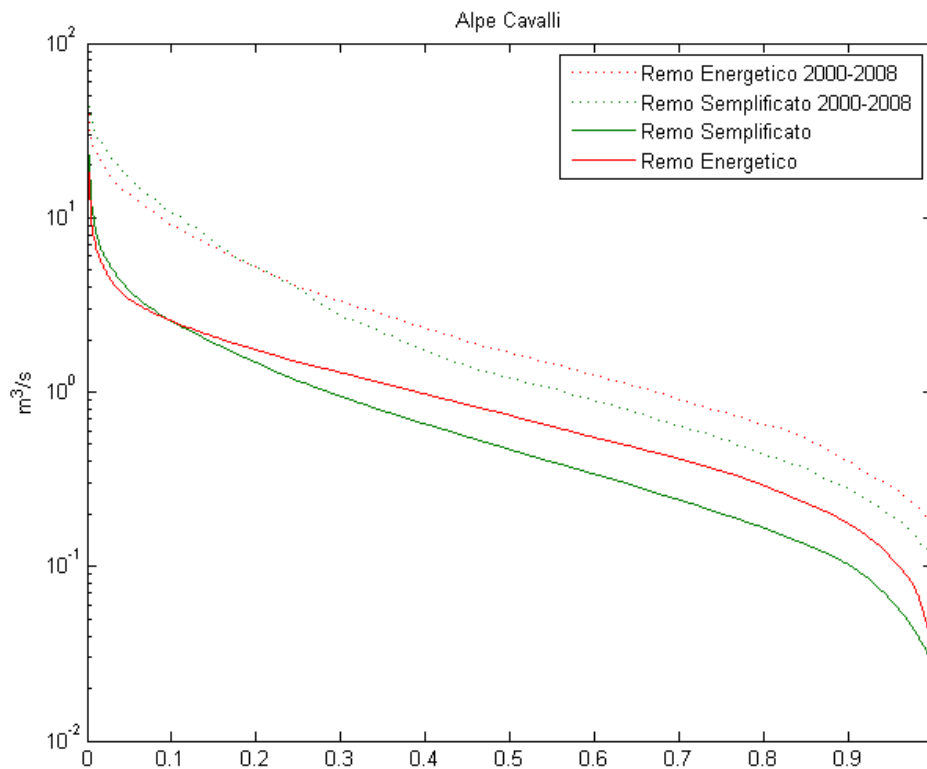


Figura 6.16: curve di durata simulate dal modello energetico e semplificato nel periodo 2009-2050, presso la diga di Alpe Cavalli.

Per valutare analiticamente le differenze sono state poste a confronto la serie simulata nel periodo 2009-2050 dal modello energetico e dal modello semplificato. Le serie temporali di portate giornaliere sono state ordinate in ordine decrescente e quindi riportate in un grafico a dispersione. Una regressione lineare permette di valutare la corrispondenza tra le due serie e l'errore quadratico medio. Lo scopo è di valutare se le simulazioni del modello semplificato siano comparabili a quelle dell'energetico. Dalle figure 6.17 e 6.18 si nota come le differenze siano minime e i modelli si trovino in disaccordo soprattutto nella simulazione degli eventi estremi (per portate elevate).

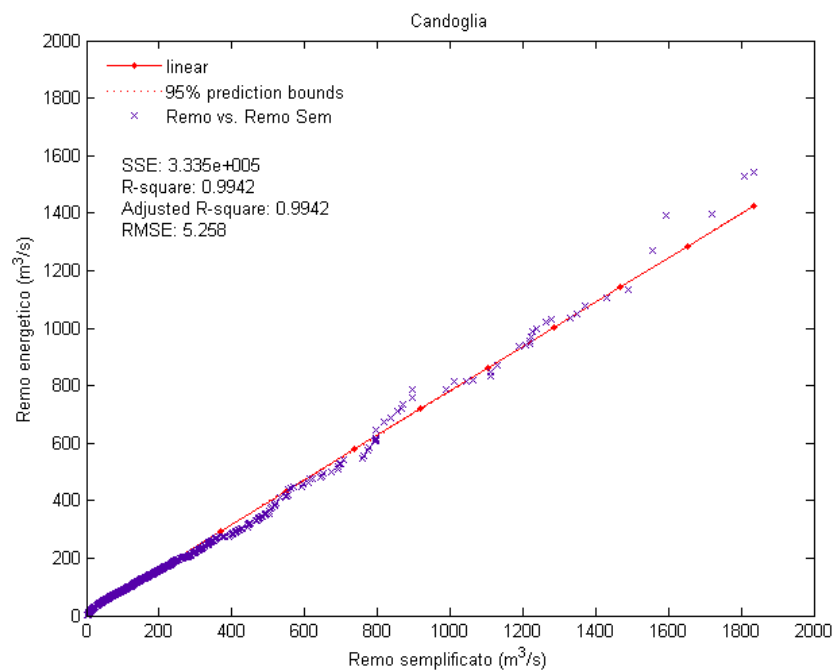


Figura 6.17: analisi statistica delle curve di durata simulate dai due differenti modelli idrologici a Candoglia.

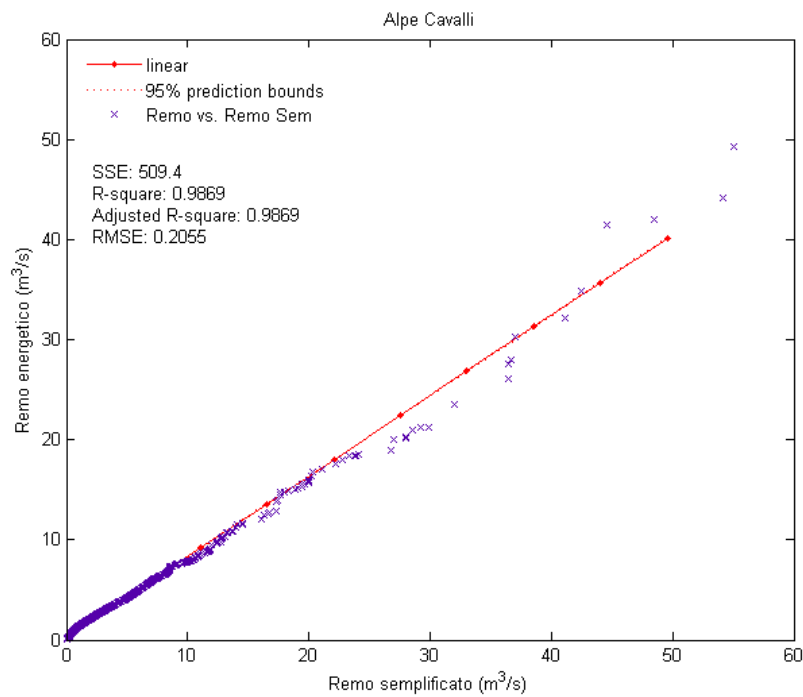


Figura 6.18: analisi statistica delle curve di durata simulate dai due differenti modelli idrologici ad Alpe Cavalli.

La Tabella 6.9 riporta il calcolo della portata media annua. In colonna sono riportate le variazioni simulate dai modelli idrologici rispetto al periodo storico di riferimento. Come risultava evidente dalle curve di durata si registra una diminuzione netta della portata disponibile ad Alpe Cavalli.

<i>Scenario vs. 2000-2008</i>	<b>Differenza di portata media annua [m<sup>3</sup>/s]</b>	
	<b>Energetico</b>	<b>Semplificato</b>
<b>Candoglia</b>	4,13 (+ 12%)	4,20 (+16%)
<b>Alpe Cavalli</b>	- 0,87 (- 51%)	- 0,74 (- 61%)

*Tabella 6.9: variazione della portata media annua prevista dai modelli idrologici seguendo lo scenario climatico. Le variazioni sono calcolate rispetto al periodo 2000-2008.*

<i>Energetico vs Semplificato</i>	<b>RMSE [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Candoglia</b>	5,26	0,994
<b>Alpe Cavalli</b>	0,21	0,987

*Tabella 6.10: indici statistici valutati mettendo a confronto le previsioni dei differenti modelli idrologici, per il periodo che va dal 2009 al 2050.*

La Tabella 6.10 riporta sinteticamente le valutazioni effettuate mediante regressione lineare sulle curve di durata delle portate.

Nel seguito verrà introdotta l'analisi sui volumi. Risulta evidente ( Figura 6.19 ) che il modello idrologico FEST-WB ed il FEST-EWB si trovino in discreto accordo sulla quantità di volume simulato, a scala di bacino, seguendo lo scenario climatico. In Tabella 6.11 sono stati riportati gli errori relativi commessi dai modelli nel prevedere i volumi cumulati. In Figura 6.20 sono invece riportati i volumi calcolati per la sezione di Alpe Cavalli.

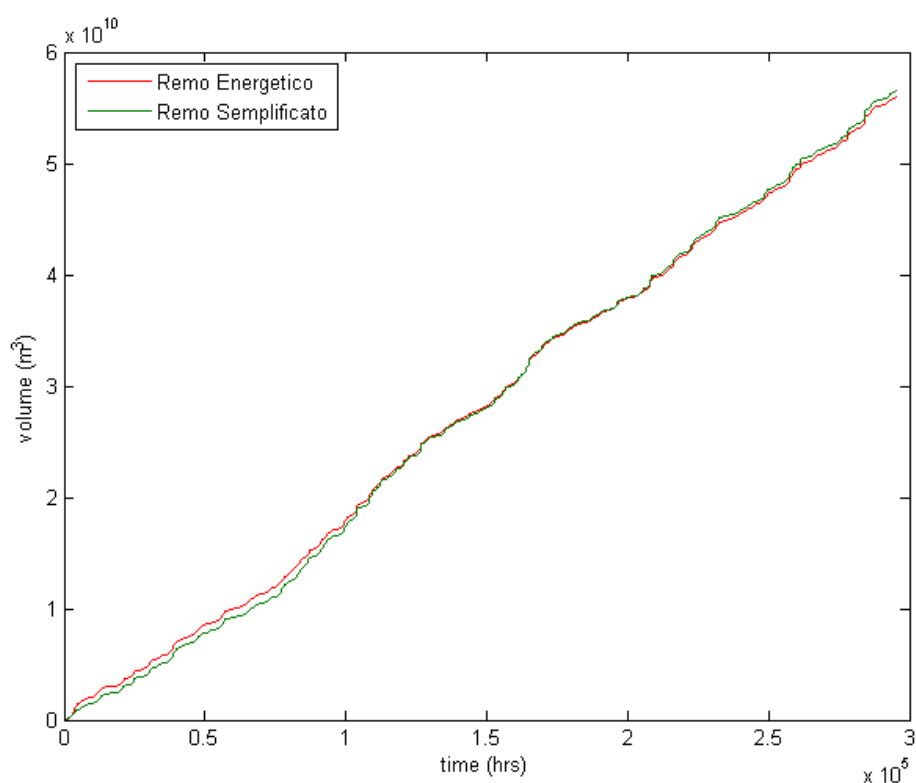


Figura 6.19: andamento dei volumi cumulati simulati dal modello idrologico semplificato e da quello energetico nel periodo 2009-2050.

<i><b>Energetico vs. Semplificato</b></i>	<b>Candoglia</b>	<b>Alpe Cavalli</b>
<b>Errore relativo sul volume cumulato simulato [-]</b>	- 0,0092	0,1039

Tabella 6.11: errori relativi commessi sulla previsione dei volumi cumulati.

Sul sotto-bacino di Alpe Cavalli il modello energetico ha restituito una sovrastima del 10% circa rispetto al modello semplificato. L'errore è probabilmente legato alla stima dell'evapotraspirazione. Infatti, nel periodo 2000-2008, le simulazioni con modello FEST-EWB e dati provenienti da scenario climatico sottostimavano notevolmente la ET per la sezione di Alpe Cavalli. Il volume in eccesso può essere spiegato da valori bassi del tasso medio di evapotraspirazione annua.

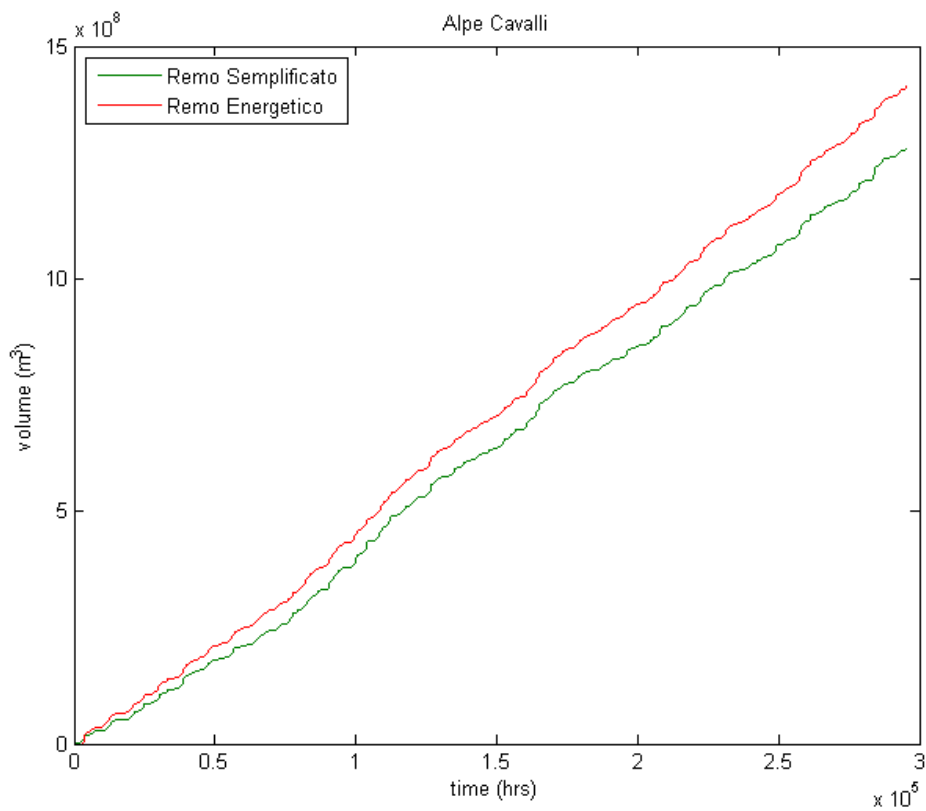


Figura 6.20: andamento dei volumi cumulati simulati dal modello idrologico semplificato e da quello energetico nel periodo 2009-2050, per la sezione di Alpe Cavalli.

L'analisi dei massimi di piena ha condotto a risultati interessanti. Come da previsione la simulazione evolve verso uno scenario di intensificazione generale del ciclo idrologico. La Tabella 6.12 riassume i calcoli effettuati. E' stato osservato un netto innalzamento del valore della portata indice rispetto al periodo di riferimento (tale portata è calcolata mediando i massimi di piena annui lungo tutto il periodo). A scala di bacino tale incremento raggiunge quasi il 30%. Inoltre il modello semplificato mostra la tendenza a sovrastimare i colmi di piena rispetto al modello energetico. Questo dato rimane, per il momento, di ardua interpretazione.

<b>2009-2050</b>	<b>Portata indice [m<sup>3</sup>/s]</b>					
	<b>Energetico 2009-2050</b>	<b>2000- 2008</b>	<b>Variazio ne[-]</b>	<b>Semplificato 2009-2050</b>	<b>2000- 2008</b>	<b>Variazio ne [-]</b>
<b>Candoglia</b>	1437,5	1006,38	+29,9%	1816,8	1375,88	+24,2%
<b>Alpe Cavalli</b>	48,0	39,62	+17,4%	54,57	41,5	+23,9%

Tabella 6.12: portata indice calcolata per le simulazioni da scenario climatico. La colonna 2000-2008 si riferisce alle simulazioni con scenario climatico ed è inserita a scopo comparativo.

Le precipitazioni sono state esaminate andando a calcolare la precipitazione media annua nel periodo di simulazione. I valori ottenuti sono stati confrontati con quelli del periodo storico, sempre provenienti da scenario climatico. L'incremento del tasso medio annuo è riportato in Tabella 6.12. La Tabella 6.14 mostra invece il netto aumento dei massimi di intensità di pioggia oraria nel periodo successivo al 2008. Questi dati consentono di ipotizzare un'intensificazione del ciclo idrologico già a partire dalla prime decadi, con eventi di precipitazione più intensi e frequenti.

<b>2009-2050</b>	<b>Precipitazione media annua [mm]</b>		
	<b>Remo 2009-2050</b>	<b>Remo 2000-2008</b>	<b>Variazione [-]</b>
<b>Candoglia</b>	1585,56	1278,96	+ 19,3 %
<b>Alpe Cavalli</b>	1665,64	1296,48	+ 21,6 %

Tabella 6.13: precipitazione media annua prevista dal modello regionale climatico Remo.

	<b>Massimi di precipitazione oraria [mm/ora]</b>		
	<b>Remo 2000-2008</b>	<b>Remo 2009-2050</b>	<b>Variazione [-]</b>
<b>Candoglia</b>	14,21	22,48	+ 36,7%
<b>Alpe Cavalli</b>	18,75	33,04	+ 43,2%

Tabella 6.14: massimi di altezza di precipitazione oraria simulati dallo scenario climatico.

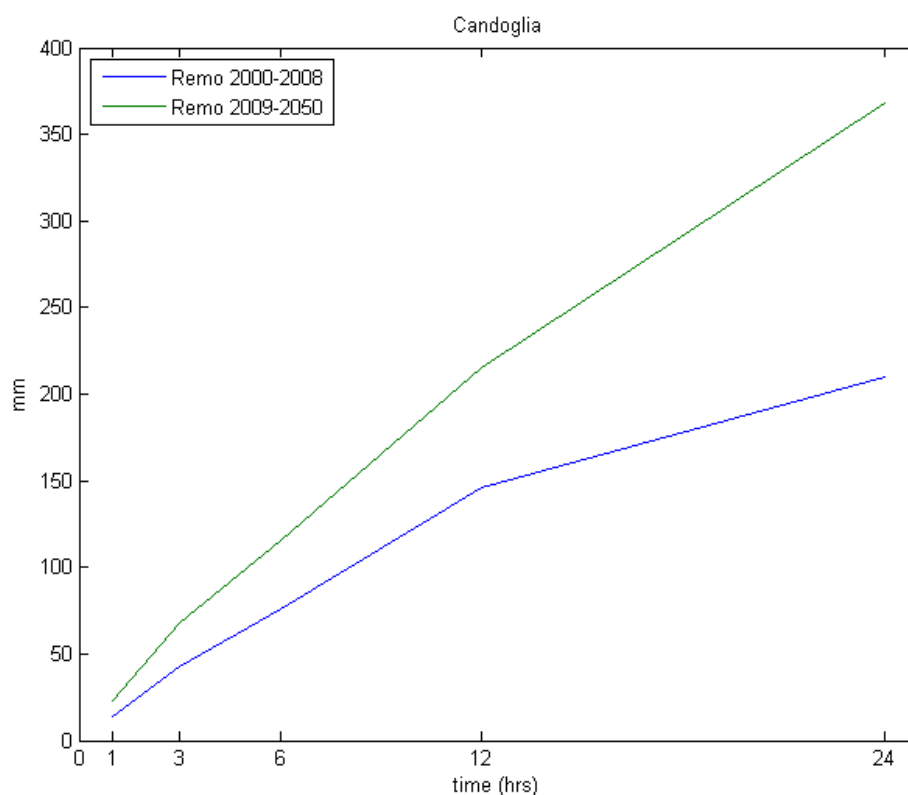


Figura 6.21: linea segnalatrice di probabilità pluviometrica elaborata per lo scenario climatico a Candoglia.

Le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica (tracciate in Figura 6.21 e Figura 6.22) raffigurano in maniera molto intuitiva quanto descritto in precedenza per il regime pluviometrico del bacino del Toce. L'incremento dei massimi di precipitazione oraria e del tasso medio annuo di pioggia portano ad un'intensificazione generale del ciclo idrologico. I dati fin qui calcolati fanno riferimento alla precipitazione complessiva. A seconda delle condizioni di umidità e temperatura parte di questa potrebbe presentarsi in forma solida e non liquida.

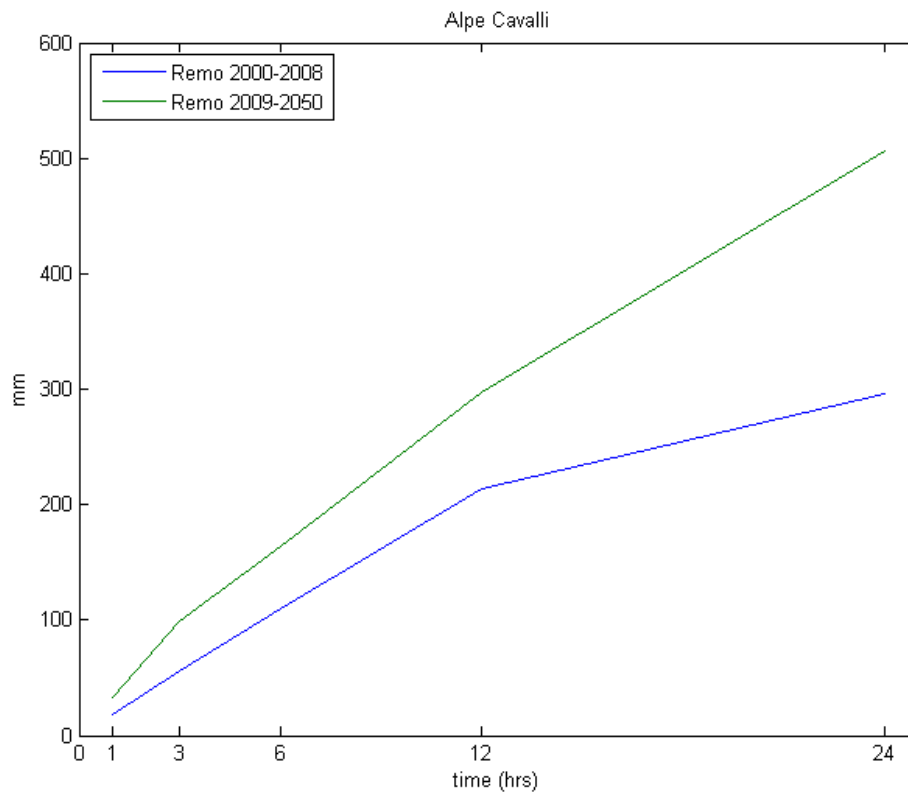


Figura 6.22: linea segnalatrice di probabilità pluviometrica elaborata per lo scenario climatico, presso la diga di Alpe Cavalli.

Infine è stata analizzato l'andamento del tasso di evapotraspirazione medio mensile. La simulazione estesa dal 2009 al 2050 è stata confrontata con quella riferita al periodo storico. La Figura 6.23 rappresenta in forma di istogramma l'evoluzione del tasso di ET simulato a scala dell'intero bacino. Per il modello semplificato non risultano differenze evidenti ma il modello energetico fornisce una lettura interessante. Il FEST-EWB simula un notevole aumento della ET, soprattutto nei mesi primaverile ed invernali. Questo innalzamento medio contribuisce ad aumentare la quantità d'acqua disponibile, nel ciclo, per la precipitazione liquida. Contemporaneamente si ha una riduzione della portata d'acqua nei corsi d'acqua (interpretazione confermata dalle curve di durata delle portate esaminate in precedenza).



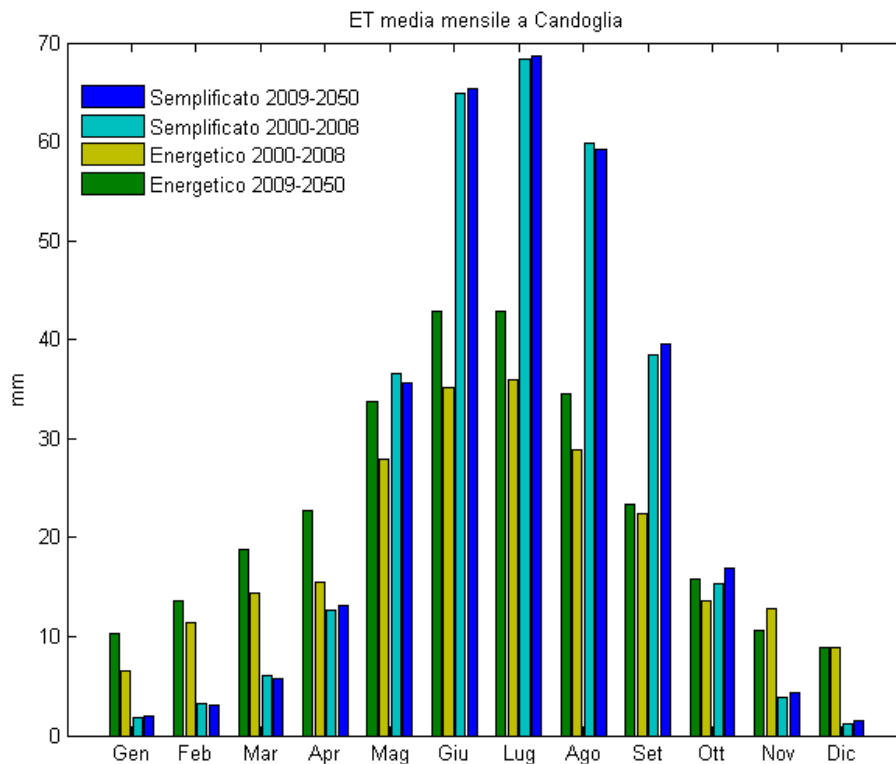


Figura 6.23: tasso di evapotraspirazione media mensile simulata a Candoglia.

La Figura 6.24 mostra invece la evapotraspirazione cumulata simulata dai differenti modelli idrologici. Il periodo si estende per l'intera lunghezza dello scenario climatico. Non è disponibile alcun dato di riferimento: l'analisi serve unicamente a valutare il comportamento dei modelli idrologici nel lungo termine. Si conferma la sovrastima da parte del modello semplificato. Un comportamento analogo era stato precedentemente evidenziato nel periodo 2000-2008, analizzando le simulazioni del FEST-WB, inizializzato con i dati provenienti dal modello climatico.

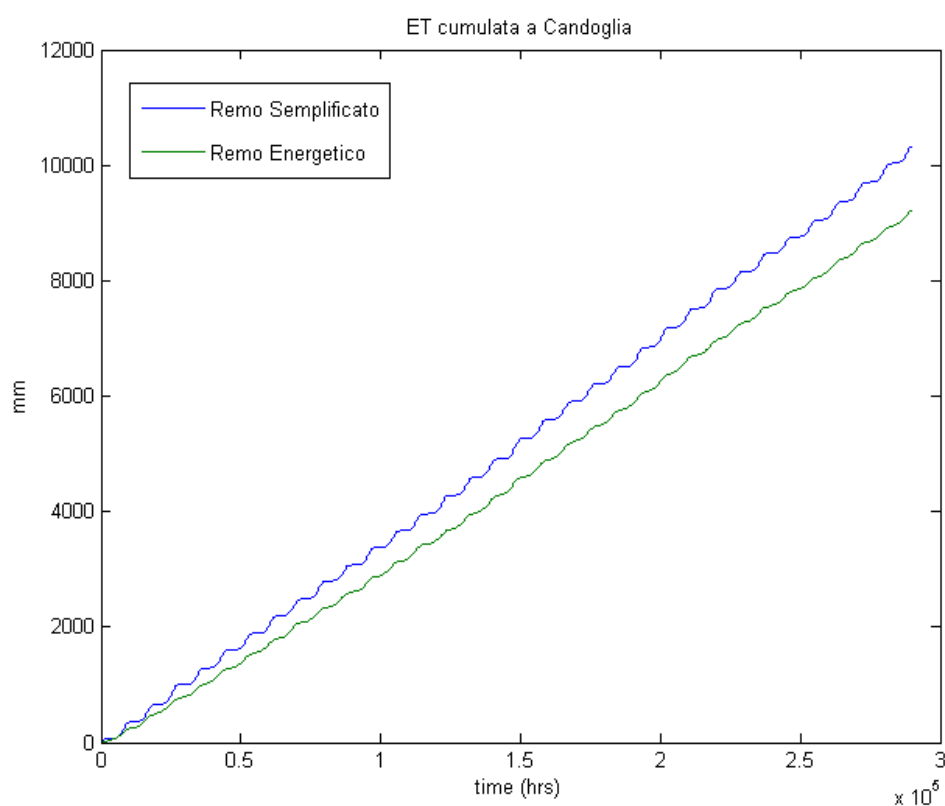


Figura 6.24: evapotraspirazione cumulata simulata dai modelli idrologici dal 2009 al 2050.

Analizzando il sotto-bacino di Alpe Cavalli si nota come la situazione non subisca inversioni di tendenza. L'istogramma di Figura 6.25 mostra come il tasso medio di evapotraspirazione mensile, simulato dal FEST-EWB, vada ad aumentare dal 2009 al 2050. Il modello semplificato rimane in linea con quanto aveva previsto nel periodo storico, a meno di piccole variazioni registrate nei mesi più caldi dell'anno.

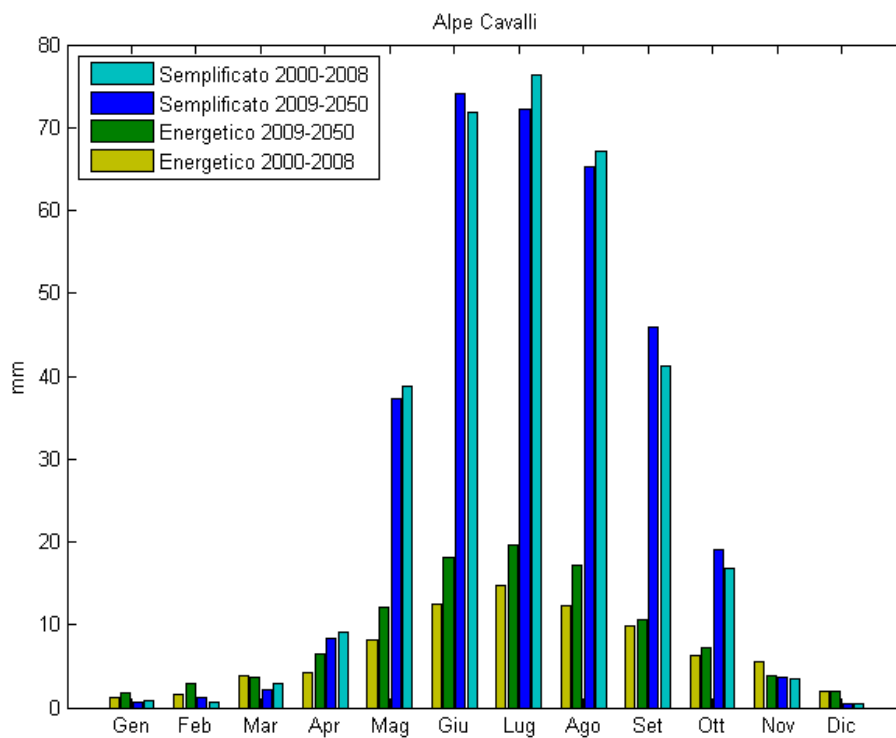


Figura 6.25: tasso di evapotraspirazione media mensile simulata ad Alpe Cavalli.

Nel seguito viene riportato anche l'andamento delle curve di evapotraspirazione cumulata. In questo caso il divario tra il modello idrologico energetico e quello semplificato è nettamente più marcato. Risulta difficile stabile quale dei due modelli si sia comportato “male” restituendo simulazioni poco verosimili. Probabilmente il FEST-EWB non è riuscito a simulare il fenomeno della ET con buona precisione all'interno di un bacino così piccolo. Come detto in precedenza l'assenza di un numero consistente di stazioni, con dati di radiazione e velocità del vento, potrebbe aver influito negativamente sulle prestazioni del bilancio energetico.

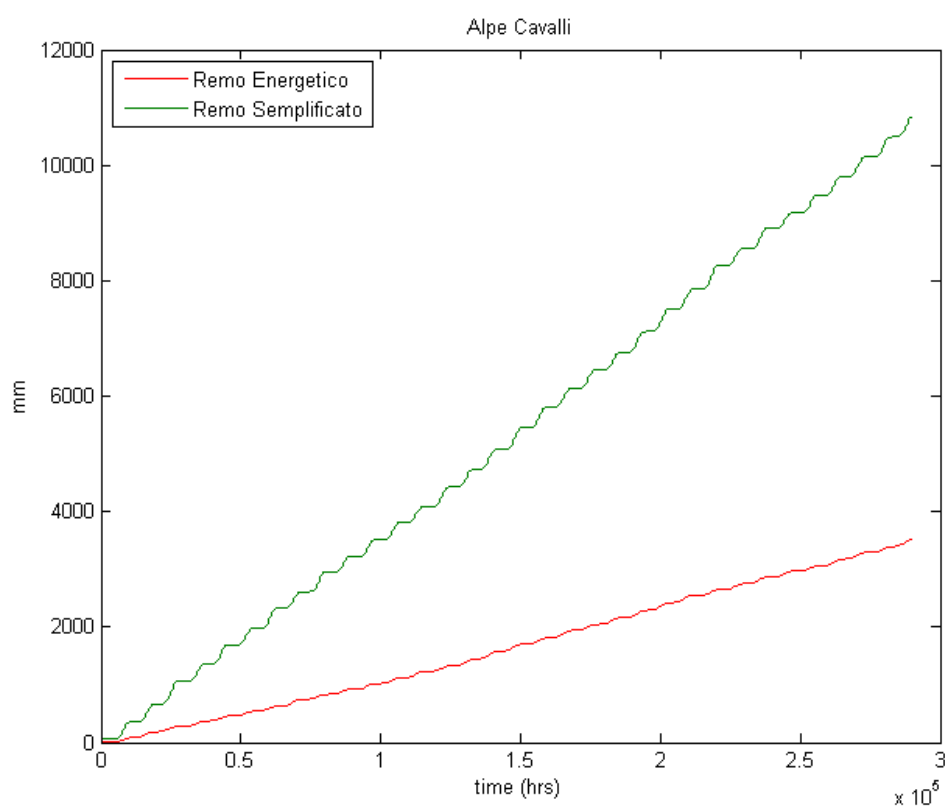


Figura 6.26: evapotraspirazione cumulata simulata dai modelli idrologici, nella sezione di Alpe Cavalli.

La Tabella 6.15 mostra l'aumento del tasso di evapotraspirazione annuo dal 2009 sino al 2050. Il metro di paragone è sempre il periodo 2000-2008. I dati confermano quanto rappresentato dagli istogrammi: il modello semplificato rimane in linea, anche con l'evolvere della situazione climatica. Il modello energetico prevede, dopo il 2009, un netto aumento della ET, sia a scala di bacino che nella sezione di Alpe Cavalli.

<b><i>Scenario vs. 2000-2008</i></b>	<b>ET media annua [mm]</b>			
	<b>Semplificato 2000-2008</b>	<b>Semplificato 2009-2050</b>	<b>Energetico 2000-2008</b>	<b>Energetico 2009-2050</b>
<b>Candoglia</b>	312,35	314,9 (+0,8%)	233,03	277,88 (+19,0%)
<b>Alpe Cavalli</b>	329,81	330,15 (+0,1%)	82,14	101,93 (+24,1%)

*Tabella 6.15: evapotraspirazione media annua valutata per lo scenario climatico e per il periodo storico.*

## 7 Conclusioni e sviluppi futuri

Per raggiungere gli obiettivi del lavoro di tesi sono stati introdotti e utilizzati due differenti modelli idrologici. Il FEST-EWB, un modello distribuito che risolve, per ogni singola cella, un'equazione di bilancio di massa idrica e un'equazione di bilancio energetico, sviluppato presso il Politecnico di Milano. Il FEST-WB, predecessore del FEST-EWB, anch'esso distribuito ma che risolve unicamente un'equazione di bilancio di massa. La sostanziale differenza risiede nel fatto che il primo modello (cui si fa spesso riferimento, all'interno della tesi, con l'appellativo "energetico") stima in modo fisicamente basato anche la evapotraspirazione effettiva per ogni cella, mentre il FEST-WB stima la ET come una quota parte, empiricamente determinata, della potenziale (ed è per questo denominato "semplificato").

I modelli idrologici sono stati calibrati e successivamente validati all'interno del bacino idrografico del fiume Toce. I dati provenienti da stazioni idro-meteorologiche di ARPA Piemonte, situate all'interno del bacino, sono stati utilizzati come input per il modello. Le mappe tematiche sono state determinate durante il lavoro svolto in una precedente tesi (Martinelli J., 2003). La calibrazione è stata effettuata nel periodo 2000-2004 mentre la validazione nel seguente 2005-2008. E' stato adottato un approccio multiscala: l'analisi degli output e la successiva taratura dei parametri ha riguardato anche i piccoli sotto-bacini (con presenza di dighe e/o ghiacciai), e non solo l'intero bacino chiuso a Candoglia. Entrambi i modelli hanno restituito ottimi risultati, in fase di validazione, simulando con efficacia i deflussi superficiali, ed in particolar modo gli eventi di piena critici, del periodo 2000-2005.

Dalle analisi effettuate nel capitolo 5 emerge che il modello semplificato rappresenta una valida alternativa al modello energetico. La corrispondenza tra le serie simulate, dai due diversi modelli, è ottima a scala di bacino. Nelle piccole sezioni a monte di

Candoglia la verifica dei dati simulati rispetto a quelli osservati è stata problematica, a causa di mancate letture idrometriche nelle stazioni di ARPA Piemonte. ENEL Produzione ha contribuito fornendo dati, per i sottobacini in cui gestisce invasi artificiali e stazioni idroelettriche. Questi dati si riferiscono a serie di deflussi medi giornalieri “naturalizzati”, tenendo conto dei volumi captati e rilasciati dal sistema di dighe. L'assenza di dati osservati, e l'incertezza che caratterizza il processo di “naturalizzazione” operato da ENEL, non hanno consentito una calibrazione fine a scala dei piccoli sotto-bacini. La prima conclusione è che il modello semplificato può efficacemente sostituire quello energetico, col valore aggiunto di essere meno oneroso dal punto di vista computazionale.

A calibrazione avvenuta è stata inizializzata la simulazione basata sui dati del modello climatico. Il RCM Remo è stato riscaldato, dal gruppo del progetto ACQWA predisposto, sul bacino del Toce e quindi calibrato a scala delle singole stazioni idrometeorologiche. Il modello climatico è basato sullo scenario climatico A1B (definito dal IPCC). I dati ottenuti per ogni stazione ( a scansione di 3h ) sono stati utilizzati come input per i modelli idrologici, che hanno simulato per un periodo esteso dal 2000 al 2050. L'analisi degli output (capitolo 6) ha evidenziato come un aumento di temperatura, dovuto all'incremento della concentrazione di gas serra in atmosfera, possa portare ad un'intensificazione generale del ciclo idrologico. Sul bacino del Toce entrambi i modelli hanno infatti previsto un aumento sensibile del tasso di precipitazione medio annuo, dei massimi di piena e del tasso di evapotraspirazione effettiva. Lo scenario elaborato è in linea con quanto predetto da molte analisi simili riscontrabili nella letteratura idrologica.

I modelli idrologici hanno previsto in modo comparabile i deflussi giornalieri ma hanno restituito previsioni discordanti riguardo alla evapotraspirazione effettiva. La scarsità di dati di radiazione solare e vento ha probabilmente reso inaffidabili le previsioni del modello energetico. In conclusione è possibile affermare che il modello semplificato FEST-WB sia una scelta migliore per simulazioni basate su scenari climatici. Risulta robusto ed affidabile, necessita di un numero minore di dati

spazialmente distribuiti in ingresso ma soprattutto presenta dei tempi di calcolo sensibilmente ridotti.

Sulla base delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti verranno ora riportati alcuni commenti e suggerimenti per gli sviluppi futuri:

- Eseguire un'altra simulazione utilizzando i medesimi modelli idrologici ma i dati provenienti da un diverso modello climatico (RegCM) e comparare i risultati ottenuti.
- Controllare l'affidabilità delle letture idrometriche nei sotto-bacini del fiume Toce.
- Valutare le prestazioni del modello energetico in un bacino con maggiore disponibilità di dati di radiazione e velocità del vento.
- Monitorare l'andamento delle variabili idrologiche all'interno del bacino.
- Sviluppare un sistema di gestione e condivisione dei risultati che si estenda oltre i limiti del progetto ACQWA, nel pieno interesse della comunità scientifica.



## Appendice A: Modelli idrologici

In generale un modello idrologico si propone di simulare accuratamente i deflussi superficiali, in particolar modo quando il bacino in esame è sottoposto a intensi eventi meteorici. Tutti i modelli vengono sviluppati in due passi fondamentali: scelta della tipologia di modello e stima dei parametri. La prima fase consiste sostanzialmente nella scelta delle equazioni in gioco, generalmente si ottiene un sistema di equazioni differenziali che legano gli input agli output del processo. La seconda fase, che permette di stimare i parametri del sistema, viene chiamata calibrazione del modello. Infine si ha una fase di validazione, dove viene verificato il comportamento delle simulazioni utilizzando un set di dati diverso da quello utilizzato per la calibrazione.

Esistono diversi tipi di modellazione, ognuna delle quali si basa su diverse assunzioni. Secondo una prima classificazione si possono distinguere modelli fisicamente basati, o deterministici, e modelli sintetici, o black box. I modelli sintetici sono costituiti da equazioni che legano le grandezze in ingresso a quelle in uscita, senza cercare di descrivere fisicamente i processi interni al sistema, per questo sono chiamati 'black box' ovvero a scatola chiusa. Al contrario i modelli deterministici cercano di descrivere fisicamente i processi in gioco, prendendo in considerazione parametri fisici, come ad esempio l'umidità del suolo o temperatura, che possono essere stimati per via indiretta o misurati direttamente sul campo.

Un'altra distinzione importante si ha tra modelli concentrati e modelli distribuiti. Nei modelli concentrati le equazioni descrivono il sistema a scala di bacino, considerandolo come un' unica cella. I parametri sono quindi stimati a livello globale, con notevoli approssimazioni in caso di una loro grande variabilità spaziale. I modelli distribuiti invece suddividono l'intero bacino in celle elementari all'interno delle quali vengono calcolate tutte le equazioni del sistema. In questo modo

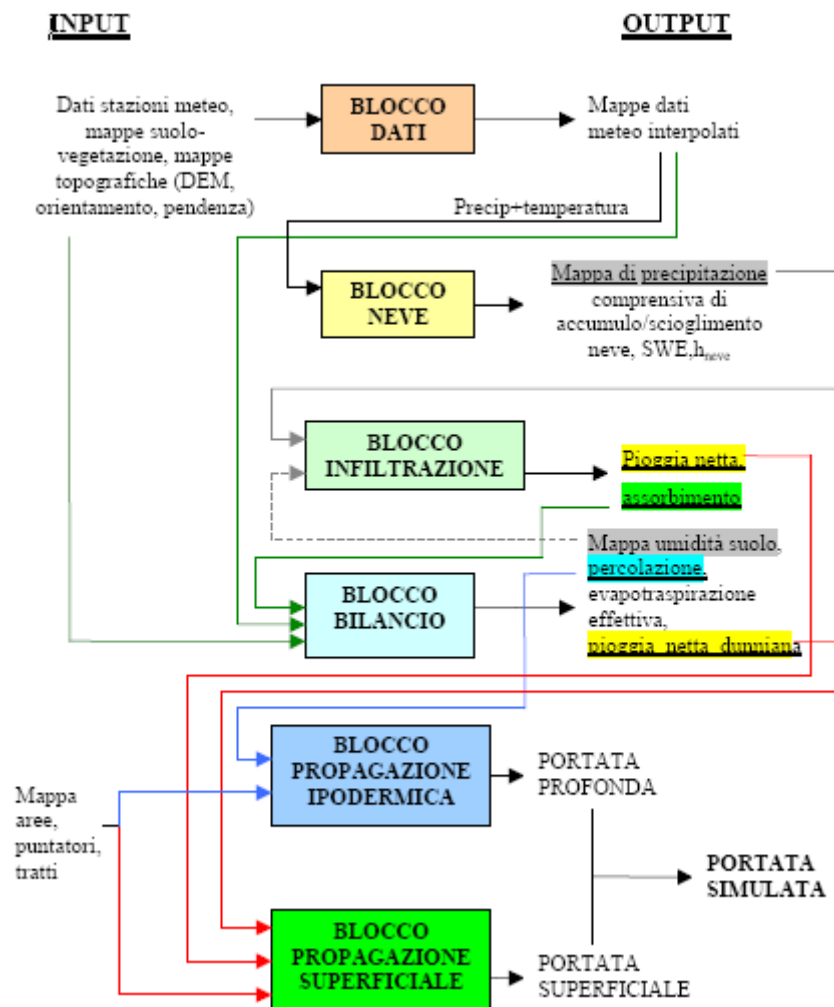
si ottiene una maggiore risoluzione nella descrizione delle variabili idrologiche.

Alcuni studi hanno evidenziato quanto questo tipo di modelli siano validi, soprattutto per la stima di parametri tramite ragionamenti fisici, e la rappresentazione dell'eterogeneità del bacino idrografico; è inoltre possibile stimare gli eventuali effetti del cambio d'uso del suolo. La mancanza o l'incertezza legata ai parametri di ciascuna cella rappresentano il limite principale di questo tipo di modelli. Questo problema è ancor più significativo se si pensa all'estensione delle aree considerate e all'incertezza intrinseca di alcuni parametri. Risulta quindi molto importante una verifica dei risultati con i dati osservati.

### **Modello idrologico FEST-WB**

Il modello idrologico utilizzato in questo studio è il FEST, sviluppato presso il Politecnico di Milano. Si tratta di un modello dinamico, distribuito, a celle regolari. Questi tipi di modello si propongono di stimare i parametri fisici del processo in ogni singola cella del reticolo. Per il loro sviluppo è necessaria una preliminare raccolta di dati spazialmente distribuiti, e una loro pre-elaborazione per portarli in formato raster. Uno strumento fondamentale per questo modello è il DEM (Digital Elevation Model), che fornisce il valore medio della quota per ogni cella elementare, da cui sono facilmente ricavabili l'esposizione e la pendenza di ogni singola cella. Partendo dal DEM, vengono poi ricavate una serie di informazioni riguardanti il reticolo idrografico, necessarie per il modello. Da queste si estraggono i dati riguardanti i parametri geomorfologici tramite l'elaborazione di carte di copertura del suolo (generalmente con l'ausilio di un software GIS) in modo da realizzare mappe tematiche per l'intero bacino. Oltre a dati riguardanti le caratteristiche del bacino il modello riceve come input anche dati meteo con cui inizializzare le elaborazioni. Questi dati vengono raccolti in modo puntuale nelle stazioni di misura, necessitano quindi di un'interpolazione per renderli distribuiti. Il modello vero proprio, nella sua versione FEST-WB, si basa sull'equazione del bilancio idrologico,

cercando di stimare in modo integrato gli afflussi-deflussi. La suddivisione è di tipo raster, cioè a griglia, con celle quadrate. In questo modo si può raggiungere un' elevata risoluzione spaziale, a fronte però di uno sforzo di calcolo oneroso in quanto tutti i parametri dell'equazione vengono stimati in ogni cella, per ogni step di calcolo. L'importanza di valutare la variabilità spaziale dei processi in esame, come ad esempio assorbimento o propagazione, ai fini di una corretta simulazione giustifica lo sforzo di calcolo. Per simulare tali processi il modello è suddiviso in diversi blocchi: in seguito viene illustrato lo schema concettuale.



schema concettuale di funzionamento del modello idrologico FEST-WB.

**Blocco dati**

Il modello necessita di dati spazialmente distribuiti, come DEM, e coperture del suolo, e di dati meteo. In particolare questi ultimi sono la radiazione, come radiazione netta ( $W/m^2$ ), frutto del bilancio tra radiazione entrante e uscente. La temperatura inoltre è particolarmente importante perché condiziona fenomeni di accumulo nivale. Per questo aspetto viene assunto un gradiente verticale di circa  $6,5$  °C ogni  $1000$  m di quota senza considerare fenomeni di inversione termica. Il dato, come quello di umidità, viene poi interpolato con il metodo della distanza inversa. La precipitazione invece viene ragguagliata con il metodo dei poligoni di Thiessen.

**Blocco neve**

Date le caratteristiche del bacino in esame il blocco neve risulta particolarmente importante e complesso in questo modello. Tiene conto di due fenomeni: accrescimento e fusione del manto nevoso. Il modello di accumulo è il seguente:

$$P_l = \alpha_p \cdot P$$

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

Dove  $P$  è definito come l'equivalente in acqua della precipitazione e  $\alpha_p$  risulta essere un coefficiente di ripartizione dipendente dalla temperatura secondo la legge:

$$\alpha_p = 0 \quad T_a < T_{\text{inf}}$$

$$\alpha_p = \frac{T_a - T_{\text{inf}}}{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}} \quad T_{\text{inf}} < T_a < T_{\text{sup}}$$

$$\alpha_p = 1 \quad T_a > T_{\text{sup}}$$

Se la temperatura dell'aria ( $T_a$ ) è più alta della soglia superiore si avrà solo precipitazione liquida; al contrario se la  $T_a$  è più bassa della soglia inferiore si avrà solo precipitazione solida; se invece risulta compresa tra le due si avrà un quota di pioggia e una quota di neve. Le soglie sono state assunte come  $0$  °C e  $-3$ °C. oltre al modello di accumulo risulta molto importante anche quello dello scioglimento in quanto influisce sul deflusso totale del bacino. La fusione del manto nevoso è stata stimata secondo la seguente legge:

$$M_s = C_m (T_a - T_b)$$

Dove  $T_a$  è sempre la temperatura dell'aria,  $T_b$  invece è la temperatura di base,  $C_m$

infine è un coefficiente empirico valutato a seconda delle condizioni geografiche, metrologiche e delle proprietà del manto nevoso. Nella sua definizione il  $C_m$  contiene tutti i parametri fisici non considerati nel modello.

### **Blocco infiltrazione**

Questo blocco riceve in ingresso i dati di umidità a ogni  $dt$ , e calcola il parametro  $S$  ogni volta che si verifica un evento piovoso. Il parametro viene poi mandato al blocco di bilancio. Per stimare l'infiltrazione è stato utilizzato il metodo SCS-CN adattato alle simulazioni continue (Ravazzani et al, 2007), ciò significa che il valore di umidità ( $\theta$ ) non viene riferito ai cinque giorni precedenti l'evento, ma viene assunto come il valore all'inizio della precipitazione, questo è possibile mediante l'aggiornamento del valore di umidità a ogni step di calcolo. Con questo valore si ricava poi la saturazione ( $\varepsilon$ ) tramite la formula:

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

Con  $\theta_{sat}$  corrispondente all'umidità a saturazione e  $\theta_{res}$  invece corrispondete umidità residua. in questo modo si ottiene quindi un valore di  $\varepsilon_t$  ad ogni step di calcolo. Con questo valore si calcola poi il parametro  $S$ :

$$S_t = S_1 (1 - \varepsilon_t)$$

In questo modo risulta essere compreso nell'intervallo  $[0; S_1]$ , non limitato inferiormente per tenere conto della situazione di terreno completamente saturo.

### **Blocco di bilancio**

Questo blocco riceve in ingresso le mappe di precipitazione e temperatura, oltre che la mappa dell'evapotraspirazione potenziale (ETP), da cui calcola quella effettiva ( $ET_{eff}$ ). Anche l'output del blocco di infiltrazione è un input di questa parte del modello. In questo vengono calcolati i valori di ruscellamento e percolazione anche in assenza di eventi di precipitazione. Al momento dell'inizio dell'evento comincia il calcolo della riserva d'acqua del terreno mediante la stima dei flussi in ingresso e in uscita dal volume di controllo. Esplicitando il parametro di umidità l'equazione di

bilancio risulta essere:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \frac{(I - D - ET)}{Z}$$

Dove:

I= infiltrazione [m/s] ottenuta come differenza tra pioggia liquida e ruscellamento superficiale

D= acqua persa per percolazione o drenaggio [m/s] calcolata tramite l'equazione:

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

dove B è il coefficiente di Brooks e Coorey

ET= evapotraspirazione [m/s] viene calcolata, nella versione WB, usando il metodo combinato Priestley Taylor per stimare l'evapotraspirazione potenziale:

$$ET = ETP \cdot \frac{\theta - WP}{FC - WP}$$

### **Evapotraspirazione**

L'evapotraspirazione (ET) è la somma di due processi simultanei, ovvero l'evaporazione e la traspirazione.

L'evaporazione è il processo per cui l'acqua liquida si trasforma in vapore acqueo sottraendosi alla superficie evaporante (suolo, specchio d'acqua o vegetazione). I parametri che influiscono fortemente sull'evaporazione sono: radiazione solare, temperatura dell'aria, umidità dell'aria e velocità del vento. Inoltre quando la superficie evaporante è il suolo diventa fondamentale valutare anche il contenuto d'acqua del mezzo.

La traspirazione è il fenomeno per il quale parte dell'acqua contenuta nei tessuti vegetali vaporizza e dipende significativamente dall'energia incidente, dal gradiente di vapore stauo, dalla temperatura, dalla velocità del vento e dalla conduttività idraulica del terreno. L'evapotraspirazione potenziale (ETP) è definita come la quantità d'acqua evaporata in condizioni di disponibilità idrica illimitata; a causa dell'apporto limitato di acqua dal terreno si ha che:  $0 \leq ET \leq ETP$  .

La ETP può essere valutata mediante la formula di Hargreaves (Hargreaves e Samani, 1985):

$$ETP = 0.0023 \cdot R_a \cdot (T_{mean} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{mean})^{0.5}$$

dove le temperature massima, minima e media sono riferite all'arco temporale giornaliero.  $R_a$ , la radiazione solare extraterrestre, può essere espressa come segue:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot R_0 \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s)$$

in cui:

- $d_r$  rappresenta la distanza Terra-Sole relativa calcolata come segue:

$$d_r = 1 + 0.0033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right) \quad \text{in cui } J \text{ è il numero del giorno all'interno}$$

dell'anno.

- La declinazione solare,  $\delta$ , è calcolata con la formula:

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1.39\right)$$

- $\omega_s$  è l'angolo orario al tramonto, espresso in radianti mediante la seguente formula:  $\omega_s = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)$
- $\phi$  è la latitudine
- $R_0$  è la costante solare

La valutazione dell'evapotraspirazione effettiva passa attraverso due coefficienti che ne esprimono la dipendenza dalla ETP e che sono a loro volta funzione dell'umidità del suolo:

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

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

in cui  $f_v$  rappresenta la quantità di vegetazione presente sulla superficie del bacino.

Infine l'evapotraspirazione effettiva può essere ottenuta come:

$$ET_{eff} = E_s + T_s$$

**Blocco di propagazione del deflusso superficiale**

Questo blocco riceve in ingresso i dati di pioggia netta, pioggia netta dunniana, e le mappe dei tratti, dei puntatori e delle aree, fornendo in uscita il valore di portata superficiale. Per determinarla il modello identifica il valore di umidità del suolo, se questo valore è maggiore del valore di saturazione, la quota di acqua in più contribuisce a dare deflusso superficiale, a questa quota va aggiunta la parte di pioggia rifiutata dal terreno. Il metodo adottato è quello Muskingum-Cunge, nella sua forma non lineare.

**Blocco di propagazione del deflusso ipodermico**

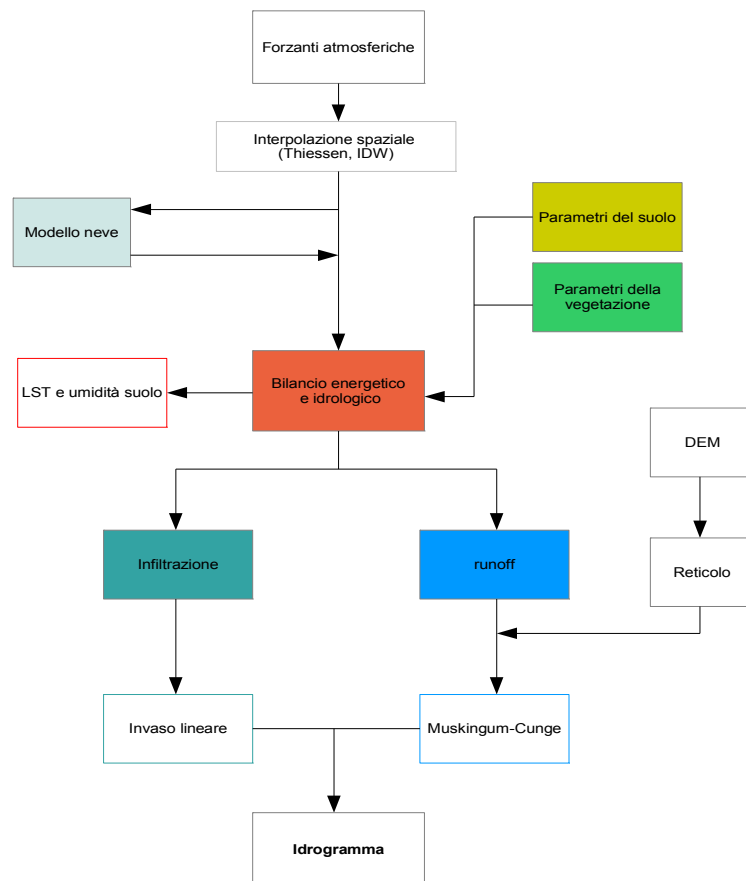
Riceve in ingresso la percolazione, le mappe di aree, tratti e puntatori, e restituisce il valore di portata profonda. Questo valore, aggiunto a quello di portata superficiale fornisce l'idrogramma di piena, output del modello. Per stimarla si utilizza lo stesso metodo usato nel blocco di propagazione del flusso superficiale.



**Modello idrologico FEST-EWB**

Il FEST-EWB è un modello idrologico distribuito, basato su bilancio di massa ed energetico (C. Corbari et al., 2008), sviluppato partendo dal modello FEST-WB e dalla base costituita da FEST98 e FEST04 (Mancini, 1990). Ciò che differenzia il FEST-EWB dal suo predecessore è l'introduzione del bilancio energetico: il cuore della modellazione risiede nel sistema costituito da un'equazione di bilancio di massa e un'equazione di bilancio energetico.

Seguendo un approccio innovativo il problema del bilancio energetico tra suolo e atmosfera viene risolto ricercando iterativamente la temperatura rappresentativa di equilibrio termodinamico (representative thermodynamic equilibrium temperature, o RET). La RET è definita come quella temperatura superficiale del suolo che è in grado di chiudere l'equazione di bilancio energetico per ogni singola cella (pixel) del bacino. Utilizzando questo approccio si mettono in relazione diretta l'umidità del suolo ed il flusso di calore latente, a sua volta collegato con la temperatura superficiale del suolo (Land Surface Temperature, o LST). L'utilizzo della RET permette inoltre di evitare di calcolare l'evapotraspirazione come una frazione, empiricamente stimata, della evapotraspirazione potenziale. La figura seguente mostra lo schema concettuale di funzionamento del modello FEST-EWB.



*schema concettuale di funzionamento del modello idrologico FEST-EWB.*

### **Dati in ingresso**

Il modello necessita in input di dati spazialmente distribuiti delle varie forzanti meteorologiche: precipitazione, temperatura e umidità relativa dell'aria, velocità del vento e radiazione solare incidente ad onde corte. I dati osservati dalle stazioni al suolo vengono interpolati in una griglia regolare con il metodo della pesatura per distanza inversa (IDW) o il metodo di Thiessen. La distribuzione spaziale della temperatura tiene conto della riduzione della stessa dell'altitudine, mediante un gradiente fisso pari a  $-0.0065 \text{ } ^\circ\text{C m}^{-1}$ . I fenomeni di inversione termica non vengono

considerati.

Per quanto riguarda i dati spaziali il modello necessita varie mappe tematiche, partendo dal modello digitale delle quote (DEM). In aggiunta, per ogni pixel del bacino si necessitano informazioni riguardanti: Curve Number (CN), direzione dei deflussi (puntatori), pendenza, direzionalità del versante (ovvero orientamento della linea di massima pendenza), albedo e profondità del suolo. Ogni pixel deve contenere inoltre dei parametri che definiscano le seguenti grandezze: conduttività idraulica, bubbling pressure, umidità del suolo residua e satura, indice di Brooks & Corey, wilting point e capacità di campo.

### **Bilancio di massa:**

L'umidità del suolo,  $\theta$ , valutata per la generica cella  $i,j$ , è descritta mediante l'equazione di bilancio (water balance):

$$\frac{\partial \theta_{i,j}}{\partial t} = \frac{1}{Z_{i,j}} (P_{i,j} - R_{i,j} - D_{i,j} - ET_{i,j})$$

Dove P è il tasso di precipitazione, R è il deflusso superficiale (runoff), D è l'infiltrazione, ET rappresenta l'evapotraspirazione mentre Z è la profondità del suolo. Nelle celle coperte da neve l'umidità è da considerarsi costante nel tempo.

Le grandezze in questione vengono stimate come nella versione precedente del modello: il FEST-WB.

### **Bilancio energetico:**

l'equazione di bilancio energetico viene sviluppata all'interno di questa subroutine, che viene definita "coffee maker", per l'analogia che esiste tra i processi osservabili

sulla superficie del bacino e quelli all'interno di una comune caffettiera. L'energia racchiusa nel complesso sistema terra-atmosfera è governata dalla leggi della termodinamica, che studiano le relazioni esistenti tra calore, lavoro ed energia. In particolar modo il bilancio energetico sulla superficie del suolo deriva da una riformulazione del primo principio della termodinamica (l'energia complessiva del sistema rimane la stessa, anche in presenza di trasformazioni). Per un sistema chiuso che non preveda scambio di massa possiamo scrivere:

$$dU = \delta Q - \delta W$$

ovvero l'energia libera è data dalla differenza tra calore assorbito dal sistema e lavoro prodotto verso l'esterno. Passando all'entalpia, che è funzione di stato, per un sistema termodinamico chiuso si ha:

$$dh = \delta W + \delta U$$

Se il sistema si trova a pressione e volume costante si ha  $\delta W = 0$  e quindi:

$$dh = \delta U = \delta Q$$

Il sistema terra riceve la quasi totalità dell'energia dalla radiazione solare incidente: parte di questa energia viene assorbita e parte viene invece riemessa come radiazione a differente lunghezza d'onda. Il flusso di calore latente è la quantità di energia assorbita o rilasciata durante un passaggio di stato a temperatura costante ed è collegato direttamente all'evapotraspirazione. Al contrario il calore sensibile è l'energia termica legata ad una variazione di temperatura.

$$Q = m \lambda$$

$$Q = m c_p \Delta T$$

L'equazione completa del bilancio energetico, all'interno del FEST-EWB, è espressa come:

$$R_n - G - (H_s + H_c) - (LE_s + LE_c) = \frac{\Delta W}{\Delta T}$$

dove  $R_n$  è la radiazione netta incidente,  $G$  è il flusso di calore del suolo,  $H$  è il flusso

di calore sensibile ( $s$  per il suolo e  $c$  per la vegetazione),  $LE$  è il flusso di calore latente.  $\frac{\Delta W}{\Delta T}$  Rappresenta l'energia immagazzinata dal sistema (processi di fotosintesi), che non è trascurabile a scala locale (Jacobs et al., 2008).

Tutti i termini del bilancio energetico dipendono dalla LST quindi l'equazione di bilancio in questione può essere risolta ricercando la RET che risolve l'equazione utilizzando il metodo Newton – Raphson. Si tratta di un metodo molto efficace per stimare approssimazioni via via più precise degli zeri di una funzione, e converge in modo rapido, specialmente se l'iterazione di calcolo inizia da un punto non troppo distante dalla soluzione.

Per le superfici coperte d'acqua, come laghi o bacini artificiali, l'equazione di bilancio diventa:

$$Rn - H_w - LE_w = S_{water}$$

dove  $Rn$  è la radiazione netta,  $H_w$  il flusso di calore sensibile,  $LE_w$  il flusso di calore latente nella sua forma potenziale ed  $S$  è l'energia immagazzinata dalla massa d'acqua.  $G$  in questi casi diventa trascurabile. Anche in questo caso la risoluzione dell'equazione viene ricercata con il metodo Newton – Raphson.

## Appendice B: Analisi degli output

Per l'analisi degli output delle simulazioni del modello idrologico è stato sviluppato un apposito script in MATLAB. Il programma si divide in alcuni blocchi fondamentali:

- **Configurazione:** si tratta di un file che racchiude le impostazioni fondamentali per la corretta esecuzione dello script. L'utente può modificare questo file in modo da ottenere solo le informazioni e le elaborazioni desiderate in un numero a piacere di stazioni. In questo modo è possibile escludere l'esecuzione di alcune subroutines velocizzando l'elaborazione dei dati.
- **Estrazione dei dati:** a partire dai files di output del FEST vengono estratte le serie temporali relative alla portata superficiale simulata ed ai volumi cumulati. Il programma ricerca automaticamente il numero di stazioni di controllo inserite nel modello. I dati vengono quindi letti e memorizzati in formato struttura. Si tratta di una matrice nella quale ad ogni elemento risultano associati tre campi: il nome della stazione in formato alfanumerico, la serie di dati registrati e la serie temporale associata (data e ora della registrazione). In questo modo è possibile accedere con semplicità ad una qualsiasi serie di dati o dato estratto dai files di output. Il software crea una matrice struttura per ogni grandezza da analizzare (portata e volume cumulato di default, ma è possibile estrarre precipitazione, evapotraspirazione o altre variabili cambiando il file di configurazione apposito).
- **Confronto sulle portate:** in questo blocco la serie di portate simulate viene accostata a quella osservata (ottenuta da ARPA Piemonte) e vengono entrambe plottate a video, in modo da consentire un rapido confronto. E' possibile selezionare la scala di aggregazione temporale desiderata: oraria

piuttosto che giornaliera. Questo permette un primo confronto visivo sulla qualità della previsione durante gli eventi critici.

- Confronto sui volumi: il volume cumulato osservato viene ricavato dalla serie di portate osservate con semplici elaborazioni aritmetiche ed è poi confrontato con il volume cumulato simulato dal FEST. Il programma provvede automaticamente ad eliminare dalle serie il tempo di warm-up (ovvero i primi mesi di simulazione che vengono scartati, perchè il modello ha bisogno di un certo intervallo di tempo per poter assorbire le condizioni iniziali e poi simulare correttamente). Le due serie vengono rappresentate graficamente e viene inoltre calcolato l'errore relativo commesso dal modello idrologico.
- Curva di durata delle portate: questo blocco è adibito alla creazione della curva di durata delle portate in ogni singolo sottobacino, sia per le serie simulate che per quelle osservate. Le serie temporali di portata vengono ordinate in modo decrescente e per ogni valore viene calcolata la corrispettiva probabilità di superamento (secondo una distribuzione di tipo Weibull). Dall'accoppiamento tra la serie ordinata e la probabilità d'eccedenza ha origine la curva di durata, che viene plottata in un piano semilogaritmico. Anche in questo blocco viene escluso, dalle serie, il periodo di warm-up, al fine di evitare incongruenze e valori negativi nella curva di durata. E' possibile plottare a video il confronto tra la curva di durata simulata e quella osservata.
- Analisi statistica: Questo blocco consente di scegliere una stazione di controllo e creare un grafico a dispersione contenente sulle ascisse i valori di portata osservati e sulle ordinate quelli simulati dal modello. Operando una regressione lineare ai minimi quadrati vengono poi valutati alcuni indici statistici (test di buon adattamento), come  $R^2$  e Root Mean Square Error (RMSE), e il coefficiente Nash – Sutcliffe, che danno chiare indicazioni sulla prestazione del modello idrologico. All'interno dell'area grafica viene

tracciata la retta di regressione la cui pendenza fornisce chiare indicazioni sulla eventuale sovra/sottostima del modello. L'operazione può essere reiterata per qualsiasi stazione.

- Confronto tra i modelli: nell'ultima parte del programma viene effettuato un confronto diretto tra la simulazione effettuata con modello FEST-EWB e quella ottenuta mediante modello semplificato (FEST-WB: senza bilancio energetico). Vengono realizzati due grafici: il primo riguarda la evapotraspirazione potenziale cumulata, mentre il secondo rappresenta la precipitazione cumulata a scala di bacino e viene utilizzato principalmente come strumento di controllo e debug dell'interpolazione delle precipitazioni liquide.
- Evapotraspirazione: si tratta dell'unica routine che non ha dipendenze dal programma principale. Si può eseguire partendo da file di output del modello FEST in formato .out e per questo potrebbe essere considerata un programma a se stante. Lo script estrae la serie di dati riguardanti l'evapotraspirazione simulata dal modello semplificato e da quello energetico. Per ogni mese dell'anno viene calcolata la ET media mensile. Successivamente viene effettuata una media di tutti i valori mensili per ogni anno di simulazione. Il risultato è un istogramma che confronta la ET mensile valutata dai due differenti modelli.

L'utilizzo di questo programma è fondamentale durante la fase di calibrazione del modello, dove è necessario gestire e analizzare una grande mole di dati, ed ottenere inoltre chiare indicazioni sulla qualità delle simulazioni effettuate. L'estrazione dei dati è un procedimento veloce e va eseguito solamente all'apertura di una nuova sessione di lavoro. Il vantaggio principale del programma è quello di produrre output in formato compatibile con i fogli calcolo (Excel, OpenOffice Calc ecc...) e la maggior parte dei software commerciali che gestiscono database. Inoltre la possibilità di accedere a lunghe serie di dati memorizzate in forma matriciale evita di dover salvare e successivamente aprire files di notevoli dimensioni, velocizzando i



tempi di calcolo.

Per concludere sono state sviluppate ed inserite alcune funzioni, completamente indipendenti del programma principale, che possono essere evocate in qualsiasi momento per eseguire le operazioni più frequenti:

- **Aggregazione a scala giornaliera:** riceve una matrice in ingresso e restituisce l'aggregazione a scala giornaliera.
- **Curva di durata:** riceve una matrice in ingresso, ordina i vettori in senso decrescente e restituisce la serie ordinata e le rispettive probabilità di superamento (Weibull)
- **Portata Indice:** riceve una matrice di portate in ingresso. Calcola per ogni anno l'evento di piena massimo. Per ogni stazione viene calcolata la portata indice in n anni, dove n è il numero di anni presenti nel dato in ingresso.
- **LSPP:** riceve un vettore di dati pluviografici in ingresso. Calcola l'altezza massima di precipitazione associata alle durate di 1h, 3h, 6h, 12h e 14h e traccia a video la linea segnalatrice di probabilità pluviometrica.
- **Precipitazione media annua:** riceve una matrice in ingresso e calcola per ogni stazione la media dei tassi di precipitazione medi annui in n anni, dove n è il numero di anni presenti nei dati in ingresso.

Le funzioni, gli script accessori ed il programma principale sono disponibili all'interno del cd-rom allegato alla tesi di laurea. All'interno è possibile trovare anche il dataset completo (dati estratti dalla calibrazione e dalla simulazione finale), i file di configurazione per i modelli idrologici, le figure ed i grafici in formato digitale.

---

## Bibliografia

- Corbari, C. , M. Mancini, G. Ravazzani. "A distributed thermodynamic model for energy and mass balance computation: FEST–EWB", *Hydrological Processes, Volume 25, Issue 9*, 2010.
- D.Jacob, R. Podzun. "Sensitivity studies with the regional climate model REMO", *Meteorology and Atmospheric Physics, Volume 63*, 1997.
- Everitt, B.S."Cambridge Dictionary of Statistics", 2002.
- Hargreaves, G. H., e Z. A. Samani. "Reference crop evapotranspiration from temperature", *Appl. Eng. Agric*, 1985.
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. "A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation", *J. Geophys. Res*, 2008.
- Martinelli J. "Un modello di bilancio idrologico per bacini idrografici con topografia complessa", *Tesi di laurea*, 2003.
- Nakićenović, N."IPCC Special Report on Emissions IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES)", 2010.
- Nash, J. E. e J. V. Sutcliffe. "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, 1970.
- Ravazzani G. , , 2007.
- Roeckner, E. e E. Manzini. "The atmospheric general circulation model ECHAM5", *Max Plank Institute for Meteorology*, 2003.
- Rummukainen, M. "State-of-the-art with regionalclimate models", *WIREs Clim Change*, 2010.
- Themessl, M., A. Gobiet, A. Leuprecht. "Empirical-statistical downscaling and

---

error correction of daily precipitation from a Regional Climate Model in the Alpine region", *Int. J. Climatol.*, 2009.