

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

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

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione concettuale di bilancio idrologico in area montana con applicazione al bacino della Stura di Demonte



Relatore

Prof. Pierluigi Claps

Correlatori

Prof. Davide Poggi

Prof.ssa Stefania Tamea

Candidato

Matteo Pinna

Dicembre 2020

Sommario

ABSTRACT	4
1. INTRODUZIONE	5
2. BILANCIO IDROLOGICO: CARATTERISTICHE E MODELLI	8
2.1 Bilancio idrologico dei bacini montani	8
2.2 Analisi del clima regionale del Piemonte	11
2.2.1 Temperatura	11
2.2.2 Precipitazioni.....	11
2.2.3 Neve.....	12
2.3 La sottostima delle precipitazioni nevose	12
2.4 Modelli afflussi-deflussi	13
2.5 Tipologie di modelli afflussi-deflussi	14
2.5.1 Modelli fisicamente basati	15
2.5.2 Modelli concettuali	16
2.5.3 Modelli empirici	17
3. IL CASO STUDIO.....	18
3.1 inquadramento del bacino.....	18
3.1.1 Caratteristiche generali.....	19
3.1.2 Caratteristiche del paesaggio naturale ed antropizzato.....	20
3.1.3 Aspetti idrologici	21
3.2 Le stazioni di rilevamento meteorologiche	22
3.3 La stazione idrometrica di Fossano	26
4. MODELLO CONCETTUALE HBV-EC	27
4.1 Il modello HBV	27
4.2 Il modello HBV-EC	28
4.2.1 Funzionamento del modello	29
4.2.2 Dati di input	33
4.2.3 Suddivisione in fasce altimetriche.....	37

4.2.4	Partizione solido/liquida delle precipitazioni	38
4.2.5	Fusione nivale e ricongelamento	39
4.2.6	Bilancio idrico nel suolo	40
4.2.7	Evaporazione.....	41
4.2.8	Fusione glaciale.....	43
4.2.9	Deflusso	45
4.2.10	Calibrazione e validazione.....	46
4.2.11	Riepilogo equazioni modello HBV-EC.....	48
5.	APPLICAZIONE DEL MODELLO HBV-EC.....	49
5.1	Il bacino della Stura di Demonte a Fossano	49
5.2	Classi di uso del suolo	49
5.3	Suddivisione del bacino in fasce altimetriche	51
5.4	Suddivisione del bacino secondo l'orientazione e la pendenza	52
5.5	Parametri non soggetti a calibrazione	55
5.6	Simulazioni e calibrazione dei parametri	56
5.6.1	Simulazione 1.....	57
5.6.2	Simulazione 2.....	60
5.6.3	Simulazione 3.....	63
5.6.4	Simulazione 4.....	65
5.6.5	Riepilogo simulazioni	68
6.	CONCLUSIONI.....	69
	INDICE DELLE FIGURE	75
	INDICE DELLE TABELLE.....	78
	BIBLIOGRAFIA	79
	RINGRAZIAMENTI	82

ABSTRACT

Alla base dei bilanci idrologici si hanno i modelli afflussi-deflussi, i quali consentono il calcolo delle principali caratteristiche dell'onda di piena ad una determinata sezione di chiusura del bacino, quali la portata al colmo, il volume totale della piena e l'idrogramma.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi metodi di calcolo da applicare ai modelli afflussi-deflussi, raggruppabili in tre grandi famiglie: i modelli fisicamente basati, i modelli concettuali ed i modelli a scatola chiusa o black box. Tuttavia per effettuare delle analisi dettagliate dovute alla grande complessità dei bacini reali, e grazie all'avvento dell'informatica, i modelli precedentemente elencati sono stati implementati su svariati software grazie all'utilizzo dei metodi numerici.

Nella presente tesi è stato scelto di utilizzare una modellazione di tipo concettuale, ovvero in grado di parametrizzare i fenomeni fisici che entrano in gioco nel bilancio idrologico, in particolare sfruttando il modello HBV-EC, sviluppato dall'ente di ricerca Canadese, ed implementato grazie al programma GreenKenue.

Tale modello è stato applicato al bacino montano della Stura di Demonte fino alla sezione di chiusura di Fossano.

Lo scopo del presente lavoro è duplice: da un lato fornire una panoramica globale sui modelli concettuali per concentrarsi infine sull'utilizzo del modello HBV-EC, spiegandone in maniera dettagliata il funzionamento, dall'altro lato fornire un'analisi critica di diverse simulazioni per osservare come i parametri influenzano i risultati finali.

Sono quindi state discusse le simulazioni principali che si sono ottenute, al fine di poter comprendere come i diversi parametri modifichino il risultato finale, fino all'ottenimento di un idrogramma simulato ed un grafico dei volumi cumulati simulati alla sezione di chiusura di Fossano che rispecchino il più fedelmente possibile i relativi diagrammi reali, sia in termini qualitativi che quantitativi.

1. INTRODUZIONE

Alla base dei bilanci idrologici si hanno i modelli afflussi-deflussi, i quali consentono il calcolo delle principali caratteristiche dell'onda di piena ad una determinata sezione di chiusura del bacino, quali la portata al colmo, il volume totale della piena e l'idrogramma.

Le piene si originano dalle precipitazioni meteoriche, siano esse solide o liquide, le quali possono essere variabili nello spazio e nel tempo all'interno di uno stesso bacino, o addirittura di un sottobacino. Le precipitazioni, una volta raggiunto il suolo, formano il deflusso idrico, il quale non è mai uguale alla quantità di precipitazione caduta; infatti il deflusso è a sua volta dipendente da una serie di fattori, quali evapotraspirazione, infiltrazione e fenomeni di invaso superficiali. Nelle metodologie più semplici, tutti questi fenomeni vengono raggruppati generalmente in un coefficiente d'afflusso ϕ .

Per la determinazione del bilancio idrologico è necessario conoscere, oltre al quantitativo delle precipitazioni, il confine del bacino idrologico al fine di poter determinare la superficie effettiva sulla quale si genera il deflusso. Grazie all'utilizzo dei DTM (Digital Terrain Model) è possibile conoscere tutte le caratteristiche del bacino, come la superficie, la pendenza, la lunghezza dell'asta fluviale, la curva ipsografica e molte altre caratteristiche geomorfologiche.

I modelli di trasformazione afflussi-deflussi che cercano di essere il più aderente possibile alla realtà sono chiamati fisicamente basati. Essi riproducono in modo deterministico la dinamica dei singoli processi idrologici ed idraulici con delle relazioni, anche complesse, che simulano tutti i processi in gioco. Questi sono modelli di tipo distribuito, ovvero la simulazione dei fenomeni è fatta tenendo conto della reale distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni meteorologici e delle caratteristiche del territorio. Ovvero il modello discretizza il territorio in una maglia regolare, più o meno fitta a seconda della precisione, e su ogni cella effettua un bilancio di massa e di energia per poter determinare il bilancio idrologico.

Esistono anche altre tipologie di modelli afflussi-deflussi più semplici, detti globali, i quali suddividono il bacino in diversi sottobacini procedendo da monte verso valle. Ogni sottobacino è caratterizzato da una risposta omogenea ad un evento meteorologico e le caratteristiche del territorio vengono considerate simili per tutto il sottobacino. Questi modelli vengono utilizzati quando non si dispone di tutte le informazioni utili all'applicazione di un modello fisicamente basato. Grazie a questi modelli sono state sviluppate nel tempo diverse formule analitiche, come la formula razionale, che permettono di conoscere la portata alla sezione di chiusura partendo dallo

ietogramma di progetto depurato della frazione di precipitazione non utile alla formazione del deflusso (precipitazione netta).

Questi metodi sono stati quelli maggiormente utilizzati prima dell'avvento dell'informatica che ha permesso lo sviluppo dei modelli numerici, i quali consentono di discretizzare il bacino in tante piccole celle unitarie al fine di avere una risposta diversa per ognuna di esse, dipendente dalle loro caratteristiche geomorfologiche e all'interazione che queste possono avere con le precipitazioni. Infatti a partire dagli anni '70, sono stati sviluppati diversi modelli: questi avevano come base di partenza i modelli fisicamente basati; essi andavano ad implementare tutte le equazioni utili al bilancio idrologico e potevano gestire una mole considerevole di dati di input; oppure potevano basarsi sui metodi cosiddetti semi-distribuiti, ovvero veniva applicata una simulazione di tipo globale suddividendo il bacino in diversi sottobacini aventi caratteristiche geomorfologiche simili e stessa risposta all'evento meteorologico.

La scelta sul modello da utilizzare nel presente lavoro è ricaduta su quelli del tipo semi-distribuito di tipo concettuale, ovvero modelli che suddividano il bacino in diversi sottobacini aventi le medesime caratteristiche e che parametrizzino le diverse variabili che entrano in gioco nella simulazione, come l'infiltrazione, l'evapotraspirazione, il deflusso lento e veloce, ecc.

Infatti per il bacino in esame, come anche in molti altri casi pratici, è quasi impossibile disporre di tutte le informazioni che i modelli fisicamente basati richiedono, ed è quindi consigliabile l'utilizzo di modelli semi-distribuiti di tipo concettuale.

Il modello è stato applicato al bacino della Stura di Demonte, con sezione di chiusura posta all'altezza della stazione idrometrica di Fossano.

Tale bacino è composto sostanzialmente da tre sottobacini montani, i quali sfociano nella pianura Cuneese fino a raggiungere Fossano. I tre sottobacini montani sono quelli della Stura di Demonte, del Gesso e del Vermenagna, ognuno di essi caratterizzato da una risposta idrodinamica diversa a seconda degli eventi meteorologici.

Per riuscire dunque a caratterizzare ogni sottobacino, è stato individuato un numero congruo di stazioni di rilevamento meteorologiche tali da consentire la conoscenza della precipitazione per ognuno di essi.

Dopo aver esaminato diversi modelli concettuali, la scelta è ricaduta sul modello HBV sviluppato per la prima volta nel 1976 da Bergstrom, testato su diversi bacini montani (in particolare quelli svedesi) e quindi adatto al caso in esame.

Sono stati sviluppati diversi modelli HBV nel corso degli anni, e per questo lavoro è stato scelto il modello HBV-EC, sviluppato dal Canadian Hydraulics Center nel 2006 ed implementato in un ambiente di lavoro user friendly grazie al software Green Kenue™.

Grazie all'utilizzo di HBV-EC, si è resa possibile la modellazione del bacino della Stura di Demonte ottenendo l'idrogramma alla sezione di chiusura di Fossano.

Il lavoro si è quindi concentrato sulla calibrazione dei parametri utilizzati dal modello per rappresentare tutti i fenomeni fisici che fanno parte del bilancio idrologico, al fine di ottenere:

- un idrogramma simulato il più possibile simile all'idrogramma misurato a Fossano;
- una corrispondenza tra i volumi di acqua transitanti alla sezione di chiusura il più simile possibile.

Il filo logico alla base della presente tesi è in un primo luogo quello di mostrare il funzionamento del modello HBV-EC, ed in un secondo luogo quello di riportare non solo la simulazione finale, ovvero quella che si è ritenuta essere la migliore sia in termini qualitativi che quantitativi, ma mostrare diverse simulazioni, grazie alle quali è stato possibile effettuare un commento critico ad ognuna di esse per poter osservare come la calibrazione dei parametri e la scelta del numero e della localizzazione delle stazioni di rilevamento meteorologiche possa portare a risultati molto diversi.

Nel capitolo finale del presente lavoro sono infine riportate le conclusioni e le osservazioni sui risultati ottenuti, con una breve considerazione sugli sviluppi futuri che si potrebbero ottenere grazie all'utilizzo del modello HBV-EC.

2. BILANCIO IDROLOGICO: CARATTERISTICHE E MODELLI

2.1 Bilancio idrologico dei bacini montani

Per descrivere il bilancio idrologico, è utile in primo luogo definire il bacino idrologico o imbrifero, ovvero la porzione di territorio circoscritto da linee di cresta topografiche che seguono la sommità dei rilievi (linea di displuvio o spartiacque), delimitanti il bacino di raccolta, o collettore, di un corso d'acqua e dei suoi affluenti (Castany, 1985). Ovvero, tutta l'acqua proveniente dalla fusione di ghiacciai o nevai o dalle precipitazioni che cadono all'interno del bacino, confluirà tutta in un corso d'acqua collocato all'interno del bacino stesso. In un bacino imbrifero è possibile identificare un luogo, detto sezione di chiusura, attraverso il quale passa tutto il volume dell'acqua raccolta superficialmente. Tale sezione rappresenta il punto finale del bacino. È importante distinguere il bacino idrologico dal bacino idrogeologico, in quanto il secondo è la frazione dello spazio del bacino idrologico situata sotto la superficie del suolo ed i suoi limiti sono imposti dalla struttura idrogeologica (Figura 2.1).

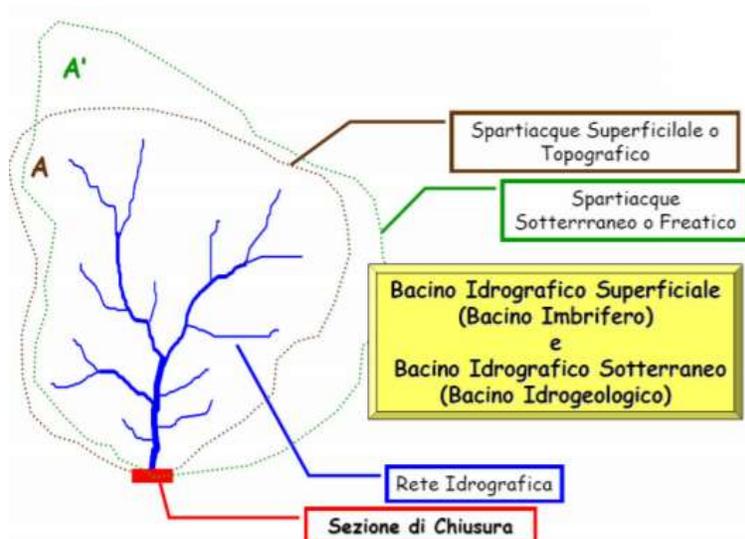


Figura 2.1: Schematizzazione del bacino idrologico o imbrifero e bacino idrogeologico

All'interno del bacino idrologico vi è un'entrata d'acqua, dovuta principalmente alle precipitazioni, ed acqua in uscita per evapotraspirazione, deflussi superficiali e perdite sotterranee. Il confronto tra entrate ed uscite costituisce il bilancio idrologico (Figura 2.2).

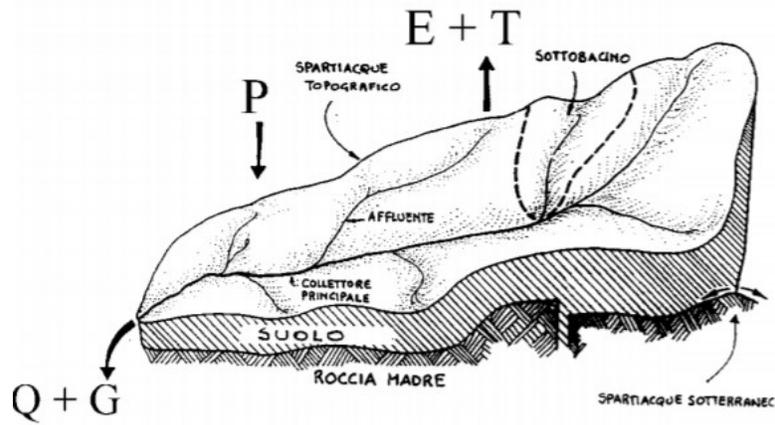


Figura 2.2: Schematizzazione del bilancio idrologico. P indica le precipitazioni E e T sono rispettivamente l'evaporazione e la traspirazione, Q e G sono i deflussi superficiali e sotterranei.

L'influenza che la neve ha in un bacino montano è considerevole, e va ad influire sulle portate in uscita. Per capirlo è sufficiente osservare un idrogramma pluriennale, come quello riportato in Figura 2.3.

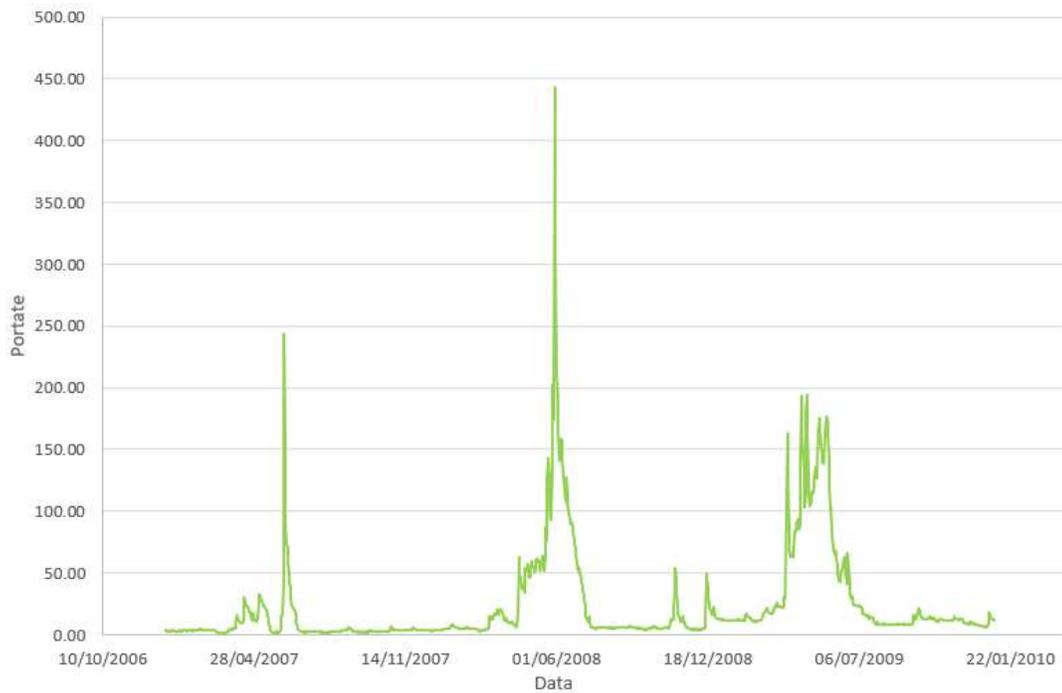


Figura 2.3: Idrogramma pluriennale della Stura di Demonte a Fossano (portate in m^3/s)

Il ruscellamento da fusione nivale varia a livello stagionale e anno per anno. Dalla Figura 2.3 sono evidenti i picchi di portata nei mesi tra fine maggio ed inizio luglio, mentre si osservano periodi di

magra nei mesi estivi ed invernali con dei piccoli picchi nei mesi autunnali, in particolare a novembre, a causa delle abbondanti precipitazioni.

L'accumulo nevoso invernale è fortemente dipendente dal quantitativo di precipitazione caduta, e di conseguenza varia il deflusso primaverile causato dalla fusione nivale. Infatti, in Figura 2.4, è possibile osservare, con riferimento ai dati della stazione di Limone Pancani, come ad inverni privi di abbondanti precipitazioni nevose corrispondano deflussi non elevati nei mesi tardo primaverili (anno 2007). Viceversa in anni come il 2009, in cui sono presenti abbondanti precipitazioni nevose, si osserva come non ci sia la presenza di un solo picco, ma come le portate massime perdurino per molto più tempo per periodi temporali anche continuativi.

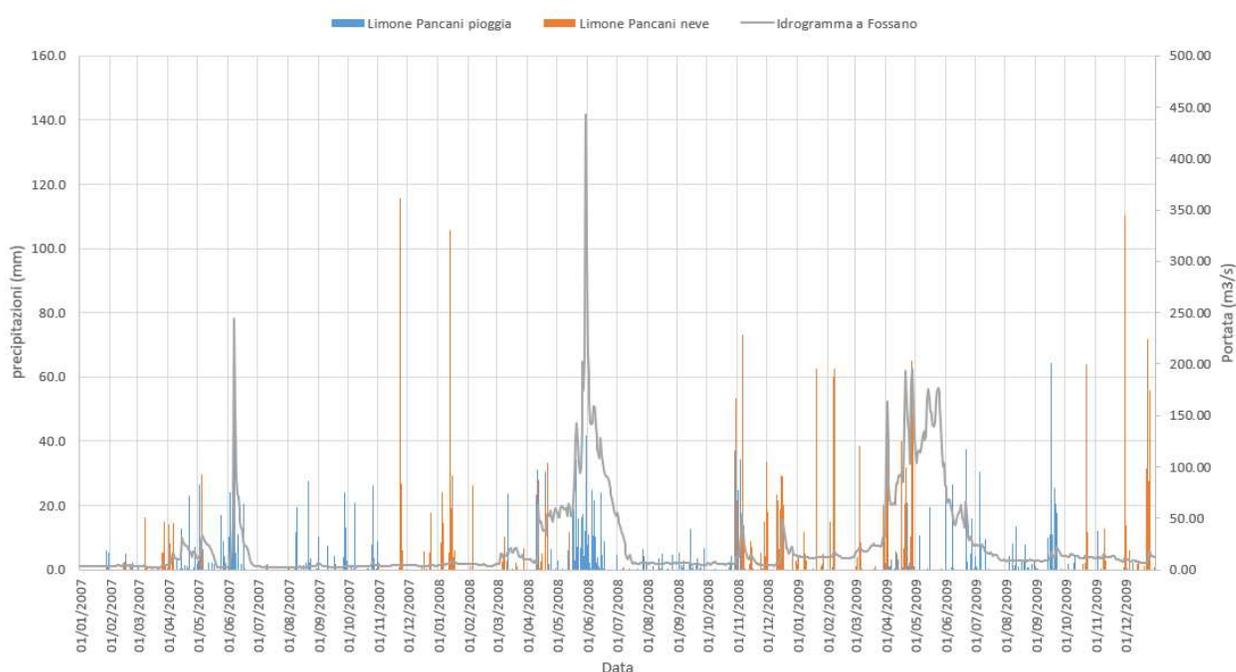


Figura 2.4: Precipitazioni registrate a Limone Pancani vs. idrogramma delle portate a Fossano

Di conseguenza, è possibile capire come la carenza di acqua accumulata come manto nevoso in inverno, si rifletta in una diminuzione della disponibilità idrica per il resto dell'anno, con effetti che vanno a ripercuotersi su tutte le matrici ambientali del territorio, quali ittiofauna, specie animali terrestri, agricoltura ed eventuali impianti idroelettrici.

Ad esempio sono stati effettuati degli studi negli Stati Uniti, dove è stato evidenziato come la riduzione della portata media sembra essere strettamente correlata al quantitativo di neve caduta durante i mesi invernali (Berghuijs et al. 2014). Inoltre, i cambiamenti climatici, specialmente per quanto concerne le variazioni di temperatura, modificano sostanzialmente sia il quantitativo di neve e di ghiaccio che si accumula e poi fonde nel corso di un anno, che la tempistica relativa al massimo deflusso registrato nei corsi d'acqua (Bettina Schaepli et al. 2005).

In conclusione, è possibile constatare come i bacini montani siano molto sensibili alle variazioni climatiche, che a loro volta influiscono sull'accumulo nevoso nei mesi invernali.

2.2 Analisi del clima regionale del Piemonte

Per avere una visione più chiara di come la componente meteorologica giochi un ruolo importante nella formazione delle precipitazioni e come queste vadano a formare il deflusso idrico, è utile fare un'analisi del clima regionale degli ultimi anni. Per questo è di utile consultazione il report 2020 – Analisi clima regionale periodo 1981-2010 edito da Regione Piemonte ed ARPA Piemonte, il quale analizza il cambiamento delle variabili meteorologiche, quali ad esempio temperatura, precipitazioni e neve avvenute negli ultimi 60 anni.

2.2.1 Temperatura

Le temperature della regione mostrano una tendenza all'aumento negli ultimi 60 anni (1958-2018), maggiore rispetto alla temperatura media globale. In questo arco di tempo le temperature massime sono aumentate con un tasso di 0,38 °C/10 anni. Se si considerano solo gli ultimi 30 anni (1981-2018) il tasso di aumento è circa il doppio (0,58 °C/10 anni), confermando la tendenza all'accelerazione del riscaldamento/surriscaldamento globale.

La temperatura massima è aumentata soprattutto in inverno e, negli ultimi trent'anni, anche in primavera.

Considerando le sole zone di montagna dal 1958 al 2018, i trend di temperatura sono superiori. In particolare si riscontra che la temperatura massima e minima sono aumentate rispettivamente di circa 2,5°C e di 1,8°C; questi dati sono stati verificati durante la stagione primaverile.

Sono aumentati anche i valori estremi: sia la temperatura massima che quella minima mostrano un aumento di tutti i percentili più elevati, soprattutto per quanto riguarda la temperatura massima nella stagione invernale.

2.2.2 Precipitazioni

A livello regionale, non si riscontrano variazioni significative per le precipitazioni cumulate annue, né sull'intero territorio, né considerando separatamente le zone di pianura o le zone di montagna; si riscontra invece una variabilità delle precipitazioni inter-annuale molto elevata.

I valori medi sull'intero territorio sono lievemente diminuiti negli ultimi 30 anni rispetto all'intera serie storica di dati, in particolare in pianura, anche se in percentuale davvero minima (circa il 4 %). Maggiori differenze si riscontrano analizzando le tendenze delle precipitazioni stagionali negli

ultimi 30 anni: si è riscontrato un incremento delle precipitazioni autunnali e una diminuzione di quelle primaverili.

La distribuzione della precipitazione annuale del periodo 1981-2010 conferma la localizzazione delle zone a maggior piovosità della regione, evidenziando la zona del Lago Maggiore e della Valle Ossola come quelle a maggior piovosità annuale. Le valli esposte da ovest a est nel Cuneese, ovvero le zone oggetto della presente tesi, tra le aree montane, sono quelle a minor piovosità.

Qualitativamente, si osserva una diminuzione del numero di giorni piovosi con precipitazioni fino a 10 mm e un aumento del numero dei giorni con precipitazioni superiori a 50 mm (aumento dei fenomeni intensi).

2.2.3 Neve

L'indice di anomalie standardizzato (SAI Standardized Anomaly Index) mostra qualitativamente una diminuzione dei quantitativi di neve fresca negli ultimi 20 anni rispetto al ventennio precedente, caratterizzato da inverni con un surplus anche importante di neve. Si registra comunque una discreta variabilità inter-annuale, molto variabile da zona a zona, con estremi positivi più rari e contenuti. La diminuzione risulta più rilevante per le stazioni al di sotto dei 1500 m.

Per quanto riguarda la permanenza della neve al suolo, le stazioni poste a quote intermedie sulle Alpi occidentali e sudoccidentali mostrano un accorciamento del periodo in cui la neve è presente al suolo, con una forte variabilità inter-annuale.

Per le stazioni poste a quote più basse, intorno o al di sotto dei 1500 m e affacciate alle pianure, si evince altresì una tendenza alla diminuzione del numero di giorni in cui il suolo è coperto dalla neve, associata anche in questo caso ad una grande variabilità.

Le curve stagionali di spessore dell'altezza della neve al suolo mostrano come nell'ultimo trentennio vi sia stata ovunque una riduzione dell'altezza della neve al suolo rispetto a trent'anni precedenti.

2.3 La sottostima delle precipitazioni nevose

Dal lavoro di Claps e Allamano (2010) sulla conoscenza della riserva idrica nevosa, è possibile capire come le misure di precipitazione possono esser affette sia da errori sistematici che da errori non sistematici. Gli errori non sistematici possono essere dovuti al malfunzionamento del pluviometro e ad errori umani, e portano a valori non veritieri riscontrabili tramite dati anomali (Duchon e Essenberg, 2001; Sevruk, 1982; Groisman e Legates, 1994; Sevruk e Klemm, 1989). Gli errori sistematici sono più importanti perché difficili da individuare con metodi automatici;

tuttavia una volta individuati, possono essere corretti effettuando una rielaborazione dei dati. Tra questi vi è la sottostima della precipitazione dovuta al vento che si scontra con la bocca del pluviometro e che “devia” le gocce d’acqua, le perdite date dall’acqua che aderisce alle pareti dello strumento, l’evaporazione di parte dell’acqua accumulata tra il momento della precipitazione e quello della misura, etc. (Goodison et al., 1898). L’effetto complessivo di tutti questi errori sistematici, in genere, consiste in una sottostima netta della precipitazione totale. Fra gli errori sistematici, l’errore dovuto al vento è noto per essere quello che pesa di più: questo causa piccoli errori in caso di precipitazioni liquide, invece si hanno errori anche molto rilevanti in caso di precipitazioni solide, ovvero durante le nevicate (Sevruk, 1982; Duchon e Essenberg, 2001).

All’interno del bacino dello Stura di Demonte sono presenti dei pluviometri riscaldati per le stazioni collocate ad alta quota, mentre si hanno pluviometri non riscaldati per quelli posti alle quote più basse. Studi recenti sulla stima della precipitazione nevosa in alta quota (Cugerone et al. 2012) riportano che i pluviometri riscaldati, anche complice le folate di vento, sottostimano il valore di neve convertito in precipitazione liquida, ovvero lo SWE (Snow Water Equivalent), dal 30% al 40%. Di conseguenza i pluviometri riscaldati, nonostante forniscano valori più accurati rispetto ai pluviometri non riscaldati in caso di precipitazione nevosa, risentono comunque di errori sistematici legati al vento.

Nel presente lavoro si è ovviato a questo problema andando ad inserire dei parametri correttivi delle precipitazioni nevose, come sarà meglio illustrato nel Capitolo 4.

2.4 Modelli afflussi-deflussi

L’idea alla base dei modelli afflussi-deflussi è quella di creare una relazione, attraverso l’utilizzo di una serie di equazioni, tra gli afflussi meteorici (input) e i deflussi che questi generano (output). Questo significa modellare le variabili che entrano in gioco in questo processo.

In generale si può considerare come input lo ietogramma delle precipitazioni (grafico intensità di precipitazione $i(t)$ vs. durata della precipitazione), il quale può essere di progetto teorico o sintetico, costruito a partire dalla curva di possibilità pluviometrica corrispondente al tempo di ritorno T prefissato, oppure uno ietogramma reale, ovvero costruito a partire dai dati registrati da una o più stazioni di rilevamento (Becciu e Paoletti, 2010).

Sempre gli stessi autori sottolineano come la prima metodologia (ietogramma di progetto teorico) sia quella più tradizionale e come questa conduca alle più note metodologie pratiche di stima delle portate di piena (formula razionale, metodo dell’invaso, metodo della corrivazione). La seconda metodologia è senza dubbio da preferire, in quanto prende in considerazione dei dati e non delle simulazioni; tuttavia, anche se negli ultimi anni è aumentato notevolmente il numero delle serie

pluviometriche in Italia e nel mondo, esse non sono sempre facilmente reperibili con il grado di dettaglio necessario.

Il dato di input dello ietogramma va a sua volta depurato di una certa quantità corrispondente alle perdite, ovvero la frazione di acqua che non ruscella ma che si perde per fenomeni di infiltrazione nel sottosuolo o per evapotraspirazione. Il risultato che si ottiene è lo ietogramma netto, formato dalle sole precipitazioni nette.

Il dato di output che si ottiene dal modello afflussi-deflussi è un idrogramma delle portate, dal quale è possibile desumere la portata al colmo, la portata istantanea per i diversi tempi e calcolare i volumi di piena.

In Figura 2.5 si riporta uno schema generale a blocchi di un modello di trasformazione afflussi-deflussi.

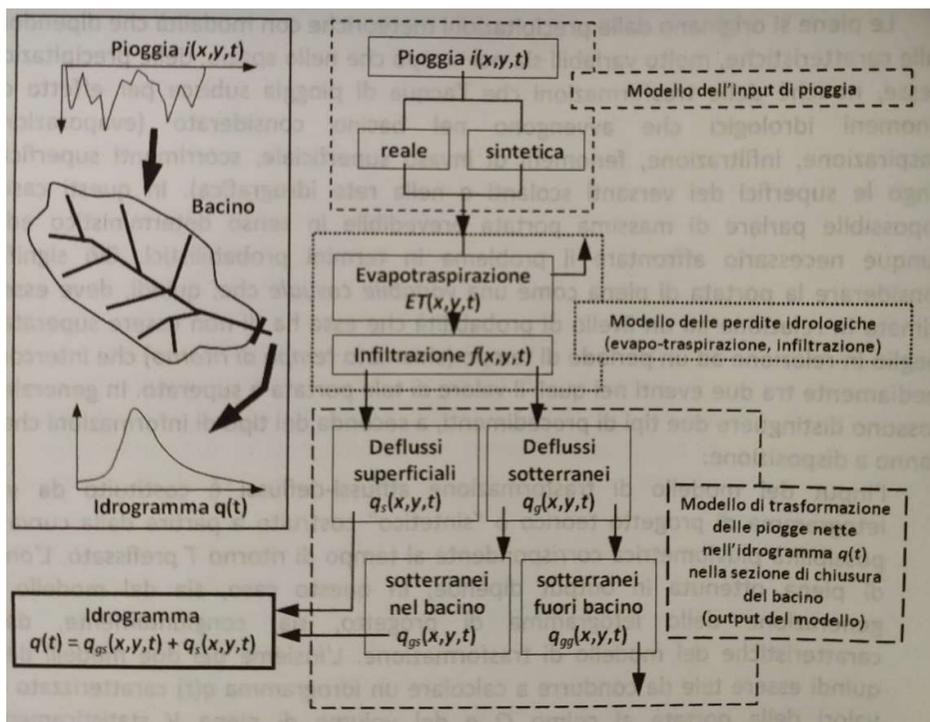


Figura 2.5: Schema generale a blocchi di un modello di trasformazione afflussi-deflussi (Becciu e Paoletti, 2010)

2.5 Tipologie di modelli afflussi-deflussi

In base al grado di dettaglio che si vuole raggiungere in fase di simulazione ed in base alle informazioni (dati di input) che si hanno a disposizione, si possono distinguere tre principali tipologie di modelli: i modelli fisicamente basati, i modelli concettuali ed i modelli empirici.

2.5.1 Modelli fisicamente basati

I modelli fisicamente basati rappresentano la tipologia più complessa di modello in termini di equazioni e di informazioni richieste come dati di input.

Essi consistono in modelli di bilancio energetico e idrologico incentrati su equazioni che cercano di riprodurre il più fedelmente possibile i processi fisici che riguardano il ciclo idrologico. Data la richiesta di molte informazioni, possono essere utilizzati solo in aree dotate di un'elevata presenza di stazioni di rilevamento idrometeorologiche.

L'inizio della modellistica fisicamente basata risale alla fine degli anni '60, grazie al lavoro di Freeze e Harlan (1969), in cui è presente una descrizione fisica delle diverse componenti del ciclo idrologico. Negli anni a seguire sono stati sviluppati svariati modelli, ma la base rimane quella del modello sviluppato nel 1969 dagli autori sopra citati.

Secondo Versace (2004), i modelli fisicamente basati hanno una struttura che pur variando da modello a modello può essere ritenuta simile per ogni tipologia. In particolare gli elementi strutturali più importanti sono la generalizzazione dei deflussi alla scala di versante e il trasferimento dei deflussi così generati alla parte finale del bacino, ovvero la sezione di chiusura. La generalizzazione dei deflussi richiede la discretizzazione spaziale della superficie del bacino in elementi bidimensionali o tridimensionali che rappresentano la cella elementare di riferimento. In ogni cella elementare si effettua il bilancio idrologico e il bilancio energetico del suolo (Figura 2.6), considerando tutti i processi che si sviluppano al suo interno compresa l'iterazione tra celle limitrofe. Si possono in tal modo identificare le aliquote di afflusso che concorrono alla generazione dei deflussi superficiali e sub-superficiali.

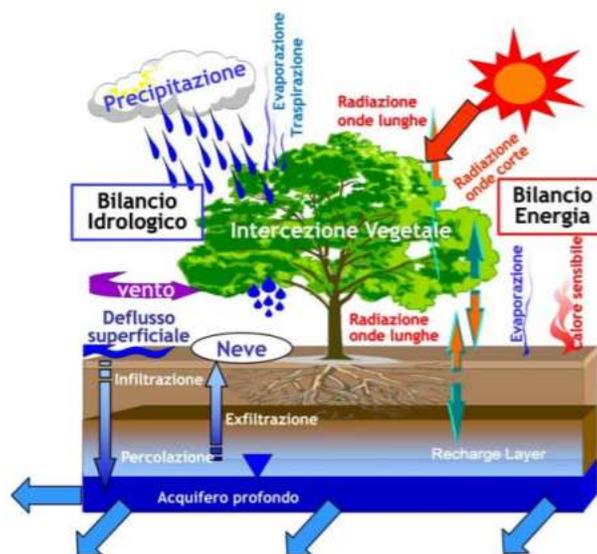


Figura 2.6: Schematizzazione dei principali processi coinvolti nel bilancio idrologico ed energetico della singola cella

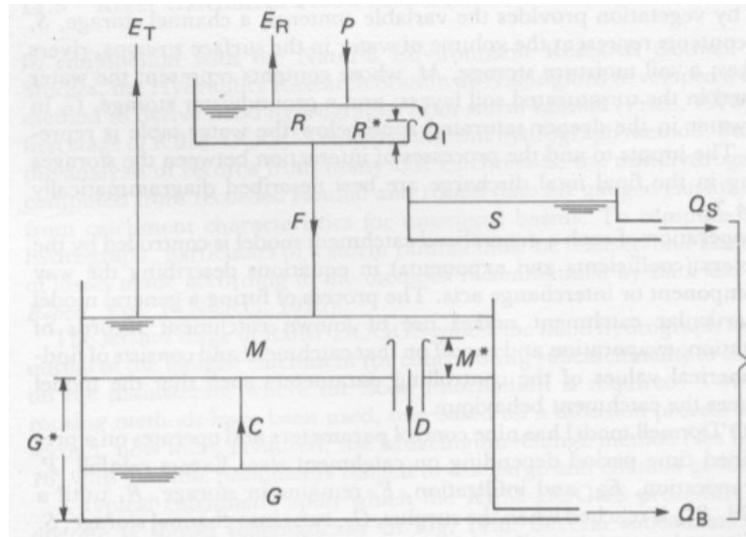


Figura 2.8: Schematizzazione modello concettuale afflussi-deflussi

2.5.3 Modelli empirici

Questi modelli mettono in relazione le variabili di ingresso con quelle di uscita attraverso operatori matematici. Di conseguenza non rappresentano i processi idrologici che intervengono nella trasformazione degli afflussi in deflussi. Infatti, tali metodi sono anche conosciuti come modelli black-box.

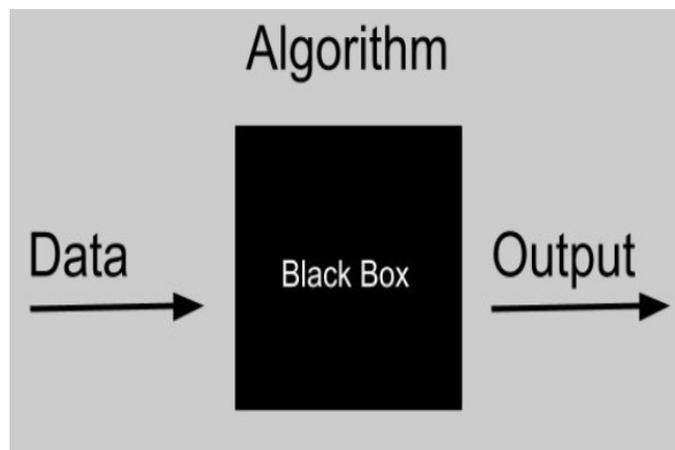


Figura 2.9: Schematizzazione modelli black box

3. IL CASO STUDIO

3.1 inquadramento del bacino

Il bacino oggetto di studio della presente Tesi è quello della Stura di Demonte, con estensione fino all'idrometro posto nei pressi della Città di Fossano.

Esso si colloca nel sud del Piemonte, in Provincia di Cuneo, a cavallo tra le Alpi Marittime e le Alpi Liguri (Figura 3.1 e 3.2).

È stato scelto di porre la sezione di chiusura del bacino della Stura di Demonte a Fossano in quanto è presente una stazione idrometrica attiva sin dal 2000 ed attualmente funzionante.

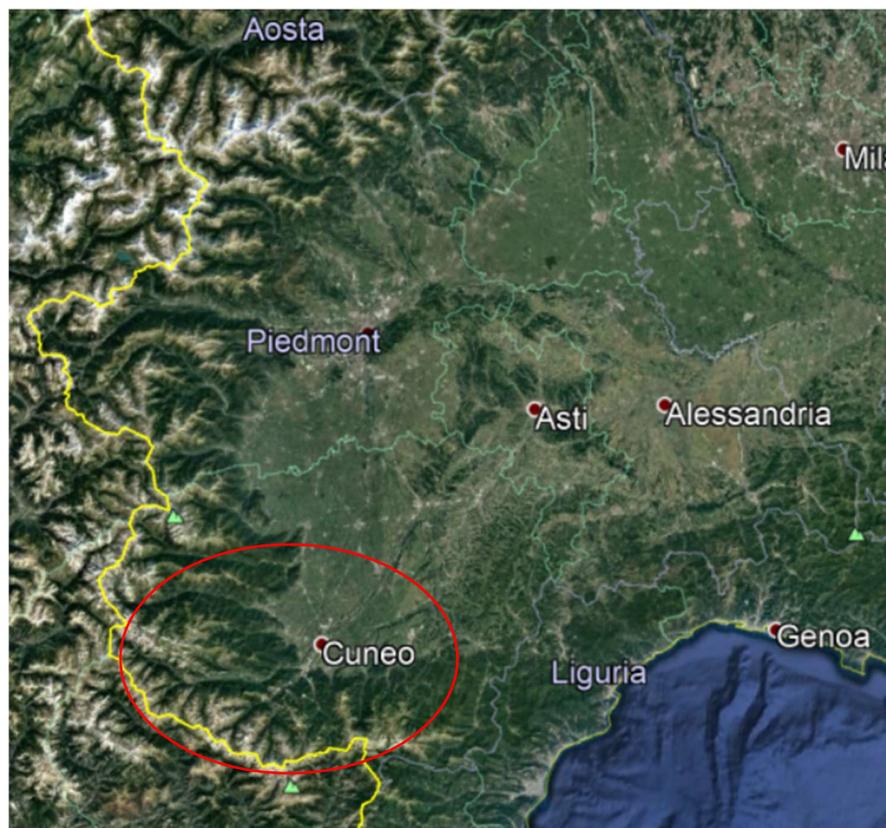


Figura 3.1: Ortofoto del Piemonte (tratta da Google Earth)

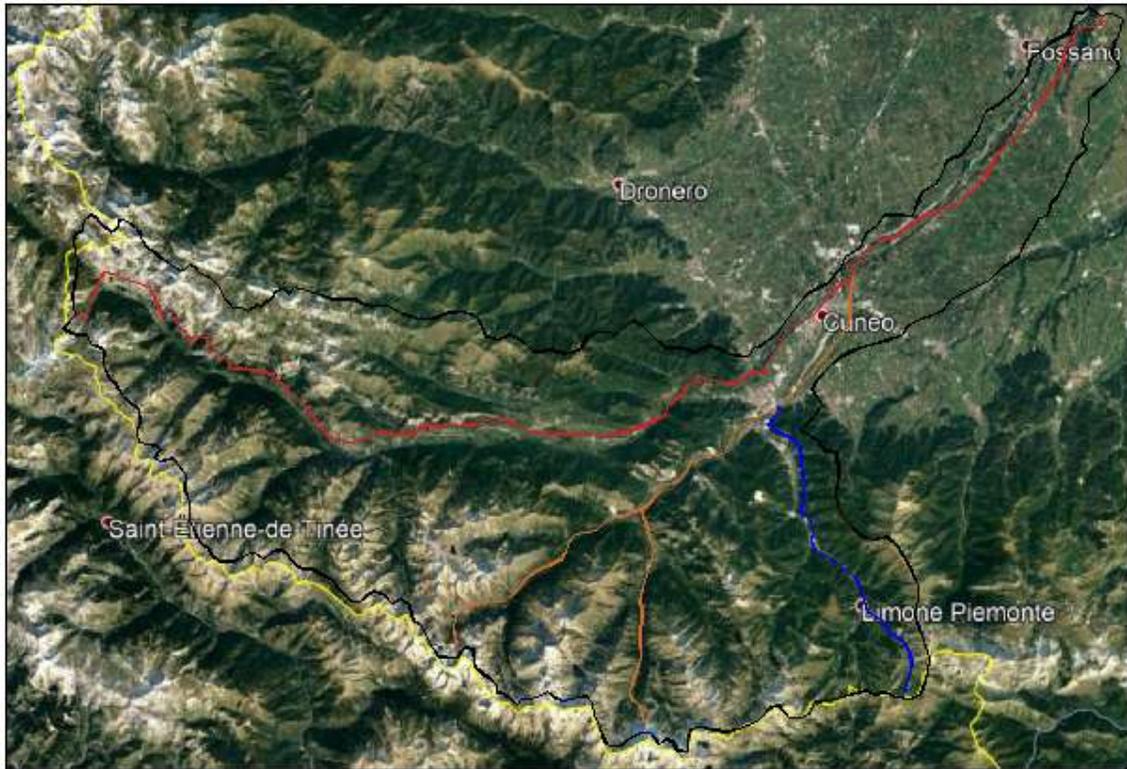


Figura 3.1: Ortofoto del bacino della Stura di Demonte a Fossano. Lo spartiacque è individuabile dalla linea nera, mentre in rosso è individuabile la Stura di Demonte, in arancione il Gesso ed in blu il Vermenagna (rielaborazione da Google Earth)

3.1.1 Caratteristiche generali

Dall'analisi dell'Atlante dei bacini imbriferi piemontesi (Claps et al. 2013) è possibile desumere le caratteristiche principali circa il bacino in esame, come ad esempio: estensione, quota massima, media, minima e altre informazioni geomorfologiche e climatiche (alcune di queste informazioni sono riportate in Tabella 3.1); possiamo inoltre trovare informazioni sull'individuazione dello spartiacque che identifica il bacino idrografico della Stura di Demonte fino a Fossano (Figura 3.3). Il bacino della Stura di Demonte fa parte del più ampio bacino del Tanaro, il quale ha una superficie complessiva di circa 8.080 km² (12% del bacino del Po), di cui l'82% in ambito montano.

Il bacino della Stura di Demonte a Fossano ha una superficie di 1.326,78 km², con quota massima di 3.197 m s.l.m. in corrispondenza del Monte Argentera e una quota minima di 269 m s.l.m. a Fossano. L'asta fluviale principale è lo Stura di Demonte, avente uno sviluppo complessivo di circa 110 km, dalla sorgente alla confluenza in Tanaro. Il tratto montano (56 km) si sviluppa dalla sorgente fino a Vignolo (Borgo San Dalmazzo), mentre quello di pianura (55 km) prosegue fino alla confluenza in Tanaro. Quest'ultimo presenta caratteristiche di alveo prevalentemente a canali intrecciati fino a Sant'Albano Stura e con andamento meandriforme fino alla confluenza in Tanaro.

In quest'ultimo tratto sono sottesi i bacini del Gesso e del Vermenagna. Il principale centro abitato attraversato è Cuneo (PAI-Piano per l'Assetto Idrogeologico, 2001).

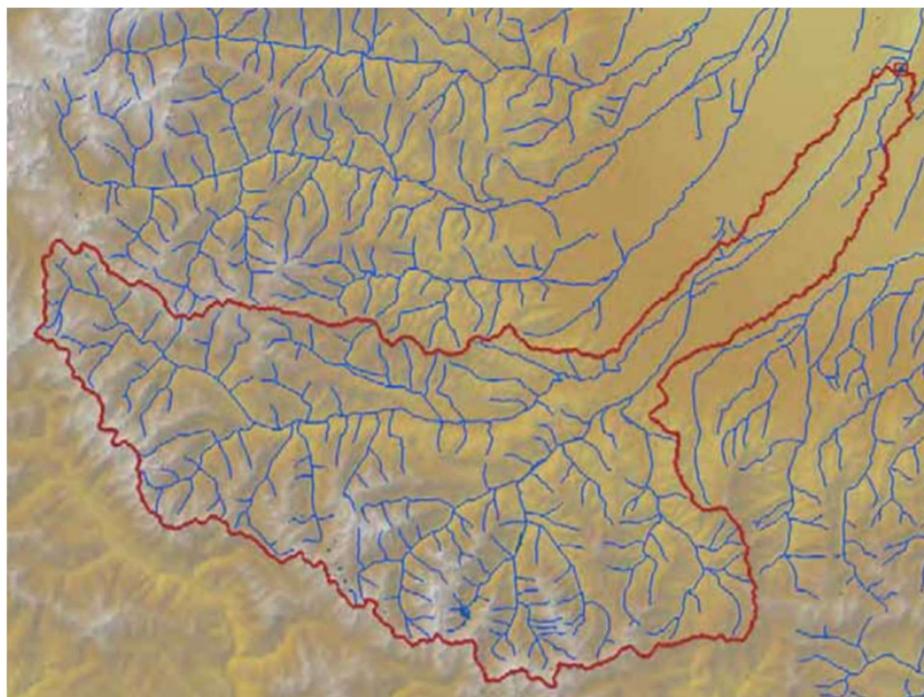


Figura 3.2: Spartiacque del Bacino della Stura di Demonte a Fossano (Claps et al. 2013)

Tabella 3.1: Estratto della tabella riportanti le informazioni geomorfoclimatiche da Claps et al. 2013

Area bacino	1.326,78 km ²
Quota massima	3.197 m s.l.m.
Quota minima	269 m s.l.m.
Quota media	1.518 m s.l.m.
Lunghezza asta principale	102,42 km
Lunghezza tot. reticolo	863 km
Pendenza bacino	21,662

3.2.2 Caratteristiche del paesaggio naturale ed antropizzato

La valle della Stura di Demonte divide le Alpi Marittime a sud dalle Alpi Cozie a nord. La valle si presenta ampia e circondata da rilievi dominati da paesaggi costituiti da pascoli e castagneti fino al centro abitato di Vinadio; a seguire si restringe gradualmente per poi schiudersi nuovamente in prossimità dell'abitato di Bersezio e aprirsi infine, alla testata, nel bacino pianeggiante del lago

della Maddalena e nell'ampia depressione del Colle della Maddalena, al confine italo-francese. Tra i rilievi elevati che caratterizzano la parte montana del bacino della Stura spiccano quelli del massiccio dell'Argentera. Nel 1980 è stato istituito il Parco Naturale dell'Argentera che comprende, oltre il massiccio montuoso, i due rami della Valle del Gesso. L'area del Parco è dominata prevalentemente da rocce; infatti i boschi, di alto fusto, occupano soltanto il 18,8% della superficie totale. Alle quote più elevate prevalgono i prati e formazioni arbustive di rododendro e ginepro. La scarsa antropizzazione di gran parte del bacino della Stura di Demonte, in particolare la mancanza di grossi insediamenti industriali lungo l'asta principale e i suoi affluenti, ha permesso la conservazione di rilevanti ambiti naturali anche in pianura (PAI-Piano per l'Assetto Idrogeologico, 2001).

Una caratteristica peculiare del bacino è la forte presenza di carsismo. Tale caratteristica fa sì che all'interno del bacino ci siano punti, nell'asta fluviale, dove l'acqua filtra attraverso l'alveo (perdite fluviali) per andare ad alimentare il sistema carsico posto sotto di esso. L'acqua che entra nel sistema carsico, dopo averlo percorso, affiora nuovamente in alveo grazie alle sorgenti presenti in esso. Un esempio è il caso del Torrente Vermenagna, dove nella zona di San Macario si presenta sovente in secca, in quanto l'acqua filtra attraverso l'alveo e confluisce nel sistema carsico che alimenta la Sorgente di San Macario. In prossimità della Sorgente, l'acqua affiora nuovamente in alveo ristabilendo la condizione di portata che si aveva prima delle perdite in alveo.

Lo stesso fenomeno avviene per la Sorgente del Bandito, alimentata dalle perdite del Torrente Gesso.

3.2.3 Aspetti idrologici

Nel bacino della Stura di Demonte la presenza di catene montuose che proteggono dall'arrivo diretto di aria umida dall'Atlantico o dal Mediterraneo fa sì che le precipitazioni siano piuttosto modeste sia in termini di valori totali che di intensità orarie. Inoltre per la presenza di ampie zone al di sopra dei 2.000 m s.l.m. le precipitazioni si manifestano per parte estesa dell'anno prevalentemente sotto forma nevosa, non contribuendo alla formazione delle piene. Le piene si verificano generalmente tra la fine della primavera e l'inizio dell'autunno, quando le precipitazioni nevose sono in proporzione scarse e la neve accumulatasi durante il periodo invernale è completamente fusa. In particolare a fine primavera, la presenza di un manto nevoso ancora consistente provoca un importante incremento del contributo di piena per effetto della fusione nivale. In questo ambito territoriale, tipico dei bacini alpini interni, spesso il verificarsi delle piene critiche non corrisponde ai valori di massima intensità di pioggia registrati alle stazioni pluviometriche, ma alla coincidenza di una serie di fattori negativi che (oltre alla elevata intensità

delle precipitazioni) comprende essenzialmente il manifestarsi di rialzi termici anomali e la presenza di una coltre nevosa consistente. Gli eventi di piena a carattere esteso sono piuttosto rari. Nell'ultimo cinquantennio, oltre alla piena dell'ottobre 1996, che ha interessato i torrenti Vermenagna, Gesso, Stura di Demonte, si ricorda quella del giugno 1957, a carattere estivo che ha comportato danni ingenti nel fondovalle della Stura di Demonte. Il bacino montano del Gesso ha le caratteristiche tipiche dei bacini alpini pedemontani. Avendo parti prossime alla pianura sono, almeno per consistenti settori del loro territorio, direttamente esposti alle correnti umide provenienti dal Mediterraneo attraverso il golfo di Genova e l'Appennino Ligure. Le precipitazioni sono decisamente più intense; inoltre l'altitudine minore rispetto ai bacini del caso precedente fa sì che le precipitazioni siano prive di apporti nevosi consistenti per ampi periodi dell'anno, determinando portate specifiche nettamente più elevate. In questi bacini le piene si verificano generalmente in autunno, ed in misura minore a fine primavera o a fine estate. Possono comportare deflussi molto elevati, con portate specifiche molto alte e frequenza nettamente superiore rispetto a quella dei bacini alpini interni (PAI-Piano per l'Assetto Idrogeologico, 2001).

3.2 Le stazioni di rilevamento meteorologiche

All'interno del bacino sono presenti diverse stazioni meteorologiche, i cui dati sono resi pubblici da ARPA Piemonte, le quali possono misurare una serie di parametri come precipitazioni liquide o nevose, altezza neve, temperatura, umidità e velocità del vento.

La scelta delle stazioni considerate in questo lavoro è ricaduta sulla loro significatività in termini di area coperta e collocazione all'interno del bacino. In particolare, la scelta delle stazioni è stata fatta a seguito di diverse simulazioni atte a tarare i parametri del modello concettuale; tale operazione è descritta nel dettaglio nei Capitoli 4 e 5. Grazie a queste simulazioni si è potuto scegliere le stazioni meteorologiche che potessero fornire le informazioni migliori per ottenere un buon risultato dell'idrogramma delle portate simulato a Fossano.

Di seguito si riportano le stazioni considerate, le loro caratteristiche e la loro collocazione all'interno del bacino (dati estrapolati dal sito di ARPA Piemonte).

Tabella 3.1: Stazione meteorologica Terme di Valdieri

Tipo stazione	Termopluviometrica con sensori nivologici
Codice stazione	303
Quota (m s.l.m.)	1390
Comune e località di installazione	Valdieri, Terme di Valdieri
Inizio pubblicazione	29/07/1993
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	361627
UTM_Y_WGS84	4896075

Tabella 3.3: Stazione meteorologica Fossano

Tipo stazione	Termoigro-pluviobarometrica con radiometro
Codice stazione	323
Quota (m s.l.m.)	403
Comune e località di installazione	Fossano, Madonna di Loreto
Inizio pubblicazione	04/08/1993
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	403647
UTM_Y_WGS84	4932439

Tabella 3.4: Stazione meteorologica Limone Pancani

Tipo stazione	Termoigro-pluvioanemometrica con radiometro e sensori nivologici
Codice stazione	S4613
Quota (m s.l.m.)	1875
Comune e località di installazione	Limone Piemonte, Pancani
Inizio pubblicazione	06/10/2006
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	387259
UTM_Y_WGS84	4890704

Tabella 3.5: Stazione meteorologica Dronero

Tipo stazione	Termopluviometrica
Codice stazione	342
Quota (m s.l.m.)	575
Comune e località di installazione	Dronero, Pratavecchia
Inizio pubblicazione	15/07/1999
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	373550
UTM_Y_WGS84	4923232

Tabella 3.6: Stazione meteorologica Demonte

Tipo stazione	Termopluviometrica
Codice stazione	S2571
Quota (m s.l.m.)	765
Comune e località di installazione	Demonte, Azienda Imalpi
Inizio pubblicazione	01/10/2001
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	365399
UTM_Y_WGS84	4908394

Tabella 3.7: Stazione meteorologica Cuneo

Tipo stazione	Termoigropluviometrica con sensori nivologici
Codice stazione	S3254
Quota (m s.l.m.)	575
Comune e località di installazione	Cuneo, Cascina Vecchia
Inizio pubblicazione	31/05/2002
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	382659
UTM_Y_WGS84	4914027

In Figura 3.4 è possibile osservare il bacino oggetto di studio con la localizzazione delle stazioni meteorologiche prese in esame, mentre in Figura 3.5 è riportata la suddivisione del bacino per aree afferenti alle stazioni meteorologiche avvenuta secondo la regola dei poligoni di Thiessen.

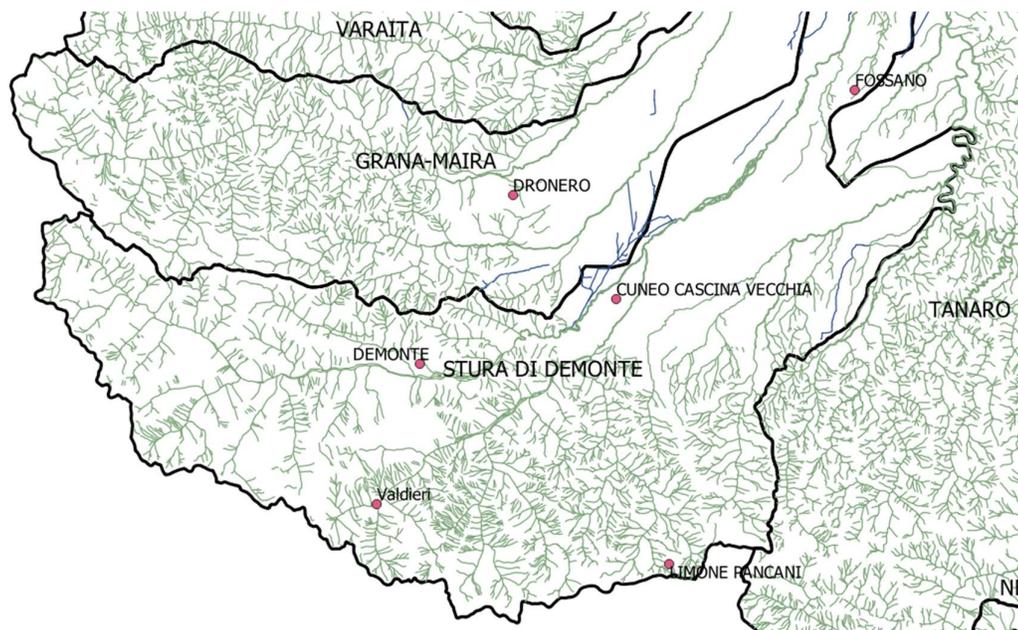


Figura 3.3: Bacino della Stura di Demonte con indicazione delle stazioni meteorologiche (rielaborazione tramite software QGIS)

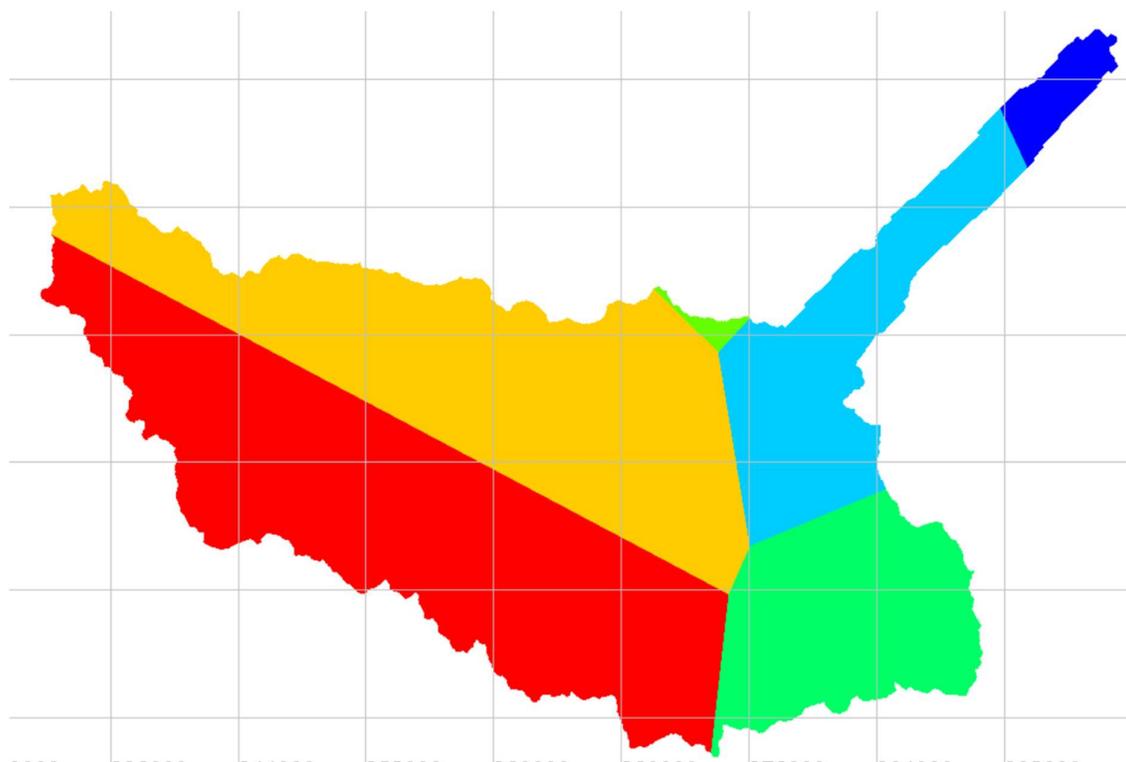


Figura 3.4: Suddivisione del bacino secondo la regola dei poligoni di Thiessen (elaborazione effettuata tramite software HBC-EC)

3.3 La stazione idrometrica di Fossano

La stazione idrometrica di Fossano sulla Stura di Demonte è attiva dal 2000 ed è tuttora funzionante.

È stata scelta in quanto permette di porre la sezione di chiusura del bacino idrografico in un punto strumentato attivo già da più di vent'anni, oltre ad avere molte informazioni disponibili circa il bacino della Stura di Demonte fino a Fossano grazie all'Atlante dei bacini imbriferi piemontesi (Claps et al. 2013).

In Tabella 3.8 si riportano le informazioni essenziali sulla stazione idrometrica.

Tabella 3.8: Stazione idrometrica Fossano

Tipo stazione	Idrometrica
Codice stazione	292
Quota (m s.l.m.)	330
Comune e località di installazione	Fossano, ponte S.P. 231
Inizio pubblicazione	01/01/2000
Fine pubblicazione	attiva
UTM_X_WGS84	398627
UTM_Y_WGS84	4930852

4. MODELLO CONCETTUALE HBV-EC

4.1 Il modello HBV

Il grande sviluppo che ebbe l'informatica negli anni '70 permise la creazione di una serie di nuovi modelli numerici che potevano sfruttare la capacità di calcolo che i computer iniziavano a fornire.

Il modello HBV fu sviluppato per la prima volta nel 1976 grazie al lavoro di Bergstrom.

Secondo Bergstrom, il modello aveva la necessità di essere di tipo concettuale in quanto poteva ben simulare tutte le principali componenti che andavano ad influire sulla creazione del deflusso idrico.

Il modello, sviluppato all'interno della Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), aveva come obiettivo la simulazione dei deflussi idrici; doveva, inoltre, essere applicabile alla maggior parte dei bacini idrografici svedesi, il che significava costruire un modello che non richiedesse una copertura totale in termini di informazioni di input, in modo da poter essere anche utilizzato in aree piuttosto remote; doveva anche essere flessibile in maniera tale da poter essere utilizzato in diversi bacini senza troppe modifiche alla sua struttura di base.

Il modello HBV è di tipo concettuale e, come già richiamato nel capitolo 2, questa tipologia di modelli afflussi-deflussi si pone a "metà" tra i modelli fisicamente basati e i modelli black box. L'intento è quindi quello di considerare i fenomeni fisici che intervengono nella formazione del deflusso al pari di un modello fisicamente basato, ma di trattare questi con l'ausilio di parametri calibrati per ottenere il miglior risultato possibile tra dati di input e output, ricercandone la correlazione al pari di un modello black box.

Il modello è del tipo semi-distribuito: il bacino può essere separato in diverse fasce altimetriche e si possono indicare diverse classi di uso del suolo (foreste, prati, laghi, ghiacciai, ecc); è inoltre possibile suddividere il bacino stesso in più sottobacini.

Il modello è costituito da diverse routine (snow routine, soil routine e groundwater routine), e si basa su informazioni in ingresso quali precipitazioni giornaliere, temperatura media giornaliera ed evapotraspirazione potenziale (Figura 4.1). Nella routine della neve, l'accumulo nevoso e la fusione nivale sono calcolati con il metodo del grado-giorno (Bergstrom, 1995; Lindstrom et al. 1997; Seibert 1999).

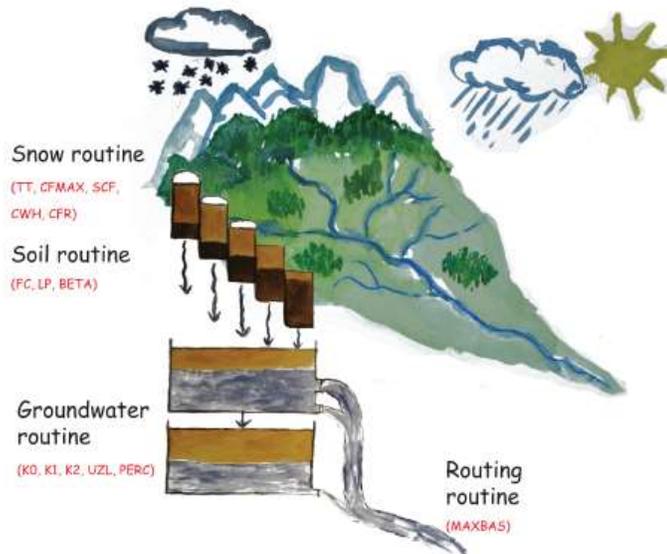


Figura 4.1: Schema di funzionamento del modello HBV (Seibert et al. 2012)

4.2 Il modello HBV-EC

Il modello HBV sviluppato nel 1976 da Bergstrom fu solo il primo modello della generazione HBV; diverse versioni vennero implementate da altri gruppi di ricerca, mantenendo tuttavia la stessa struttura del modello sviluppato nel 1976.

Ad esempio, uno di questi è il modello HBV-96 (Lindstrom et al. 1997), che mantiene identica la struttura del modello sviluppato da Bergstrom nel 1976, ma va a fare una rivalutazione delle routine del modello originale.

La versione utilizzata per il presente lavoro è quella sviluppata dal National Research Council canadese, nota come HBV-EC (Hamilton et al. 2000; Stahl et al. 2008); l'attuale modello è stato integrato nell'ambiente di modellazione EnSimTM (Canadian Hydraulics Center, 2006) e nell'ambiente di lavoro Green KenueTM (Canadian Hydraulics Center, 2010).

Questa versione è stata validata in recenti studi riguardanti bacini idrografici con importante accumulo nevoso stagionale.

Per la presente Tesi è stato utilizzato il modello HBV-EC in quanto, grazie all'ambiente di lavoro Green KenueTM, è facilmente importabile il DTM (Digital Terrain Model), per una veloce modellazione del territorio, oltre al fatto che tale modello, la cui struttura è fondata sui modelli di Bergstrom (1976) e Lindstrom (1997), è stato sviluppato e testato per la stima del deflusso idrico invernale, specialmente in bacini di alta montagna (Hamilton et al. 2000), come nel caso in esame. Inoltre il software HBV-EC presenta un'interfaccia grafica di immediata comprensione.

L'unico inconveniente è la mancanza di un algoritmo che permetta la calibrazione del modello basata sulla minimizzazione dell'errore per ottenere l'idrogramma simulato alla sezione di chiusura. Infatti è necessario applicare una procedura "per tentativi" cambiando un solo parametro alla volta, il che può rendere il lavoro di calibrazione e simulazione molto dispendioso in termini di tempo per l'utente.

Il modello HBV-EC è un modello afflussi-deflussi che gli autori definiscono semi-distribuito e concettuale: viene considerato semi-distribuito in quanto si può tener conto di diversi aspetti morfologici e della variabilità altimetrica del territorio, raggruppando determinate aree del territorio in zone aventi lo stesso tipo di risposta idrologica, ovvero ragionando grazie al concetto di Grouped Response Units (GRU); mentre viene considerato concettuale in quanto la modellazione delle variabili fisiche è parametrica.

Per minimizzare il costo computazionale, il modello si basa, come già accennato in precedenza, sul concetto di GRU, ovvero celle aventi stesse caratteristiche altimetriche, stessa pendenza, orientazione e copertura del suolo, venendo considerate uniformi nella loro risposta idrologica.

Nel modello, che sfrutta in input un DTM (Digital Terrain Model), ogni cella viene definita secondo quattro tipi di uso del suolo: aree aperte, foreste, specchi d'acqua (laghi) e ghiacciai.

Per rappresentare i gradienti altimetrici, il bacino viene suddiviso in differenti zone climatiche, ognuna delle quali è associata ad un'unica stazione meteorologica che definisce le variabili di input. Il deflusso alla sezione di chiusura è modellato in modo diverso a seconda della classificazione delle celle: per i GRU non caratterizzati da ghiaccio, il routing è descritto da una risposta lenta e da una veloce, mediante due serbatoi (tipico dei modelli concettuali), mentre nel caso di aree coperte da ghiaccio, la fusione glaciale alimenta un terzo serbatoio. Nel caso in esame, quest'ultima parte non è di interesse particolare in quanto nel bacino della Stura di Demonte non si riscontra la presenza di ghiacciai, ma di sole aree aperte e foreste.

Nei paragrafi successivi, si riporta una accurata descrizione sul funzionamento del modello, sui dati di input e su tutte le equazioni che sono alla base del programma e la relativa descrizione dei parametri. Tali informazioni sono state desunte in parte dalla guida pratica del software GreenKenue™ (Canadian Hydraulics Center, 2010) ed in parte dal lavoro effettuato da Bongio (2014).

4.2.1 Funzionamento del modello

Il software Green Kenue presenta un'interfaccia grafica intuitiva ed è disponibile una guida all'utilizzo che descrive il funzionamento del modello in ogni sua parte (Figura 4.2).

È possibile iniziare un nuovo lavoro selezionando dal menù file → new → HBV-EC Run..

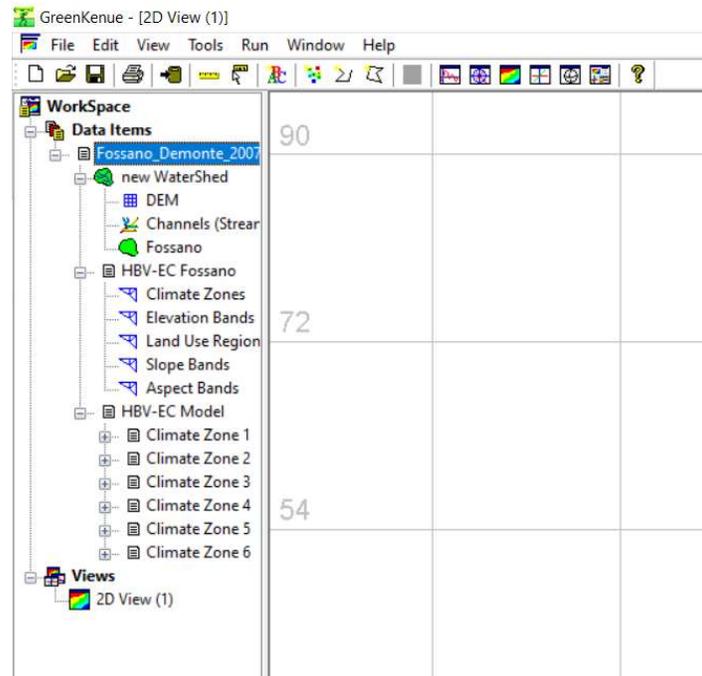


Figura 4.2: Interfaccia software GreenKenue™ che implementa il modello HBV-EC

Esso si basa sull'utilizzo di un DTM (Digital Terrain Model), il quale si può importare nel software dal menù file → import → arcINFO grid (ASCII) (Figura 4.3).

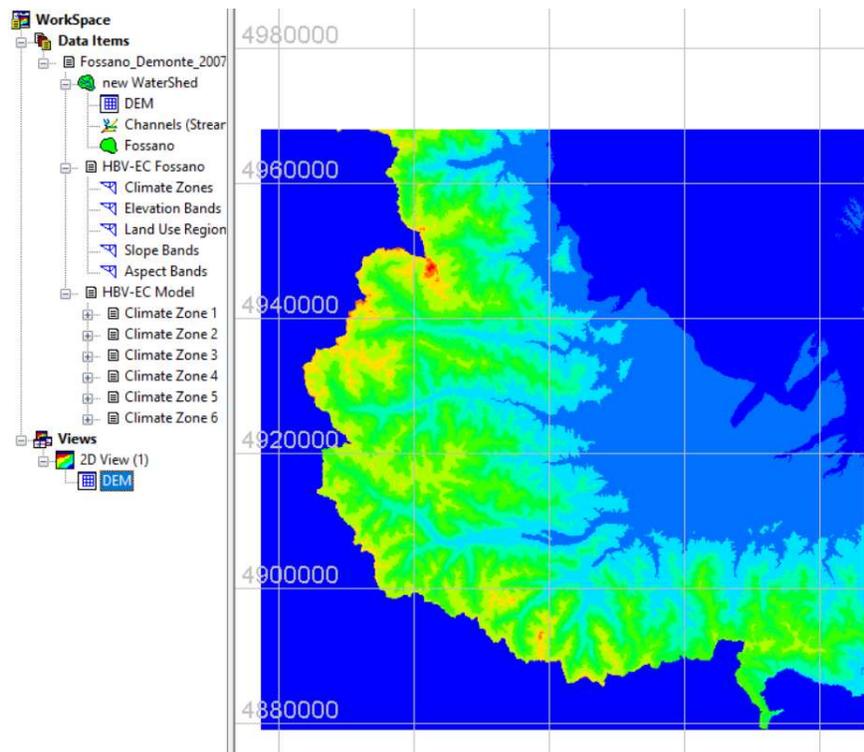


Figura 4.3: DTM della zona oggetto di studio

Una volta inserito il DTM, il programma permette in primo luogo di indicare le caratteristiche delle aree drenanti per la definizione dei corsi d'acqua, attraverso il menù a tendina alla voce "Channels" (Figura 4.4), mentre in un secondo momento è possibile indicare la sezione di chiusura del bacino attraverso un doppio click del mouse sul DTM mostrato in Figura 4.3 nel punto dove si vuole porre la sezione di chiusura. Il programma quindi in automatico individua lo spartiacque del bacino in maniera tale da effettuare tutte le simulazioni unicamente su quell'area.

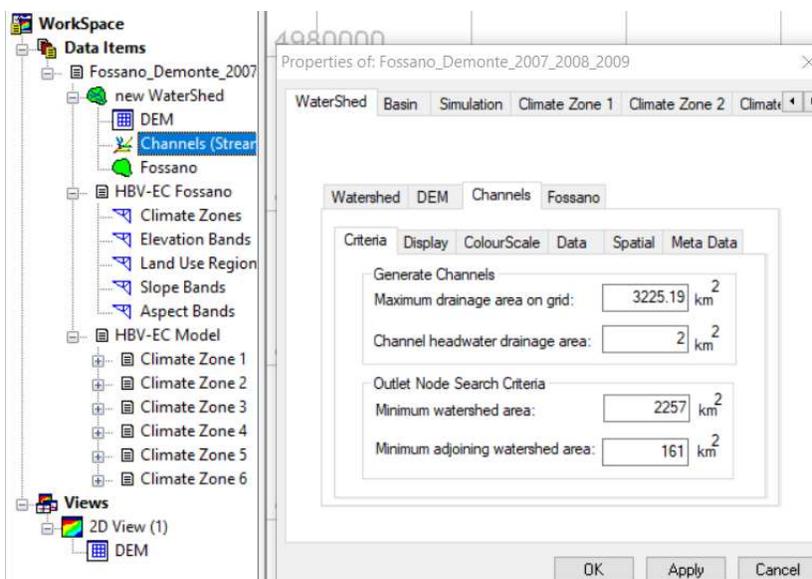


Figura 4.4: Finestra per impostazioni aree di drenaggio

Una volta importato il DTM ed individuati i limiti del bacino grazie all'indicazione della localizzazione della sezione di chiusura, è possibile riportare le informazioni inerenti alla zona climatica (climate zone), alla suddivisione in fasce altimetriche (elevation), all'uso del suolo (land use), alla pendenza dei versanti (slope) e alla loro esposizione (aspect). Tutti questi dati di input saranno descritti nel dettaglio nel paragrafo seguente.

Nella sezione "Simulation" (Figura 4.5) è possibile inserire tutte le informazioni sulla simulazione, come il periodo di inizio e fine simulazione, l'intervallo temporale (time step) in ore ed una serie di parametri che vanno a modellare il deflusso.

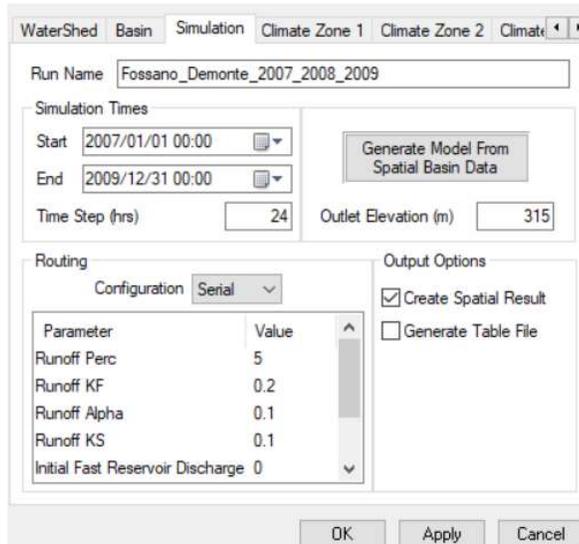


Figura 4.5: Finestra per inserimento dei dati inerenti la simulazione

Inserite queste informazioni, è possibile generare il modello premendo sul bottone apposito, il quale crea tante nuove finestre quante sono le zone climatiche individuate in precedenza (Figura 4.6). Per ciascuna zona climatica vanno inseriti i parametri specifici associati a ognuna di esse, oltre alle informazioni sulle precipitazioni tramite il file .met, dal momento che a ciascuna zona climatica corrisponde sola una stazione di rilevamento meteorologica.

Il programma fornisce già dei valori di default dei parametri, i quali saranno soggetti a successiva calibrazione (Capitolo 5).

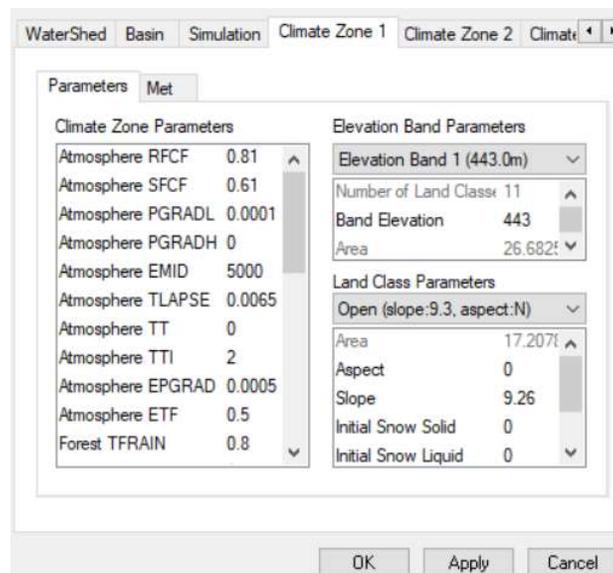


Figura 4.6: Finestra per inserire i parametri per ogni zona climatica

Per lanciare la simulazione una volta inserite tutte le informazioni, è sufficiente premere sul bottone “Run” sulla barra dei comandi e successivamente “Launch simulation”. Il programma fornirà come output l'idrogramma delle portate alla sezione di chiusura per il periodo temporale indicato nella simulazione (Figura 4.7).

Oltre al grafico riportato in Figura 4.7, il modello genera anche delle tabelle riportanti le portate simulate giorno per giorno, in maniera tale da poter essere esportate facilmente su altri software (Excel, Matlab, ecc) per un'elaborazione dei dati a seconda delle esigenze dell'utente.

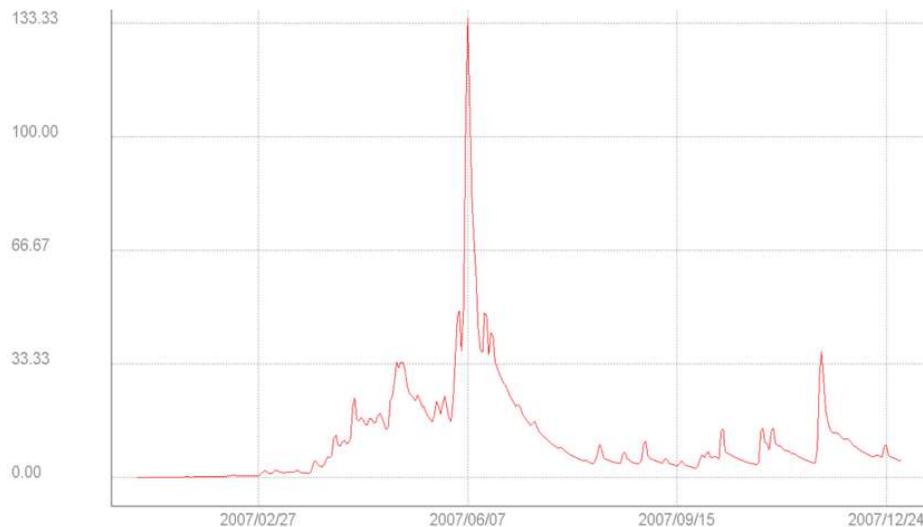


Figura 4.7: Idrogramma ottenuto dal modello HBV-EC

4.2.2 Dati di input

Il modello, come già detto in precedenza, è semi-distribuito in spazio poiché è possibile tenere conto delle principali caratteristiche morfologiche del bacino, ricavate dal modello digitale del terreno (DTM). Infatti, dopo aver definito la sezione di chiusura, è possibile ricavare il reticolo idrografico e assegnare le seguenti caratteristiche ad ogni pixel:

- *Suddivisione in fasce altimetriche*: la suddivisione in fasce altimetriche del bacino serve per diminuire l'onere computazionale del modello. Infatti il modello effettua la simulazione considerando la quota media per ogni fascia altimetrica, come se considerasse tutta la fascia altimetrica riferita ad una sola quota. La suddivisione in fasce altimetriche viene definita dall'utente in base alle caratteristiche geomorfologiche del bacino, in particolare maggiore è il dislivello tra la quota massima e la quota minima all'interno del bacino, maggiore dovranno essere le fasce altimetriche (Figura 4.8).

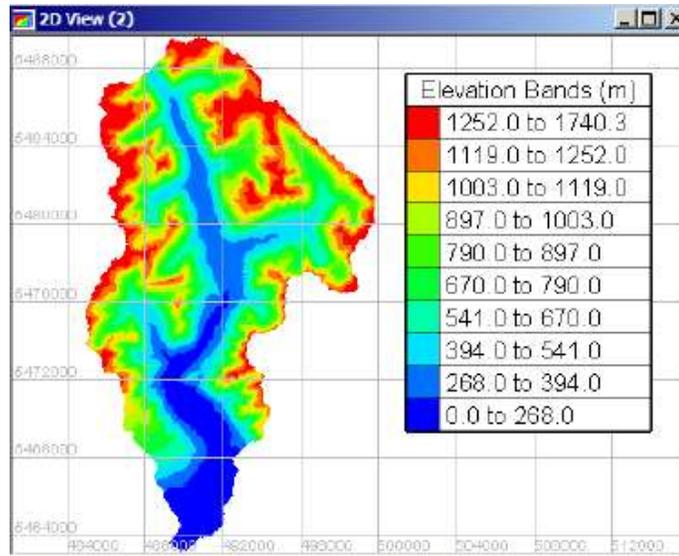


Figura 4.8: Suddivisione del bacino in fasce altimetriche

- *Uso del suolo*: ogni pixel del DTM è classificato secondo quattro categorie: laghi (Lake), suolo libero (Open), suolo coperto da vegetazione (Forest) e superficie coperta da ghiaccio (Glacier) (Figura 4.9). Questo permette di tener conto dell'intercettazione vegetale e dell'effetto protettivo della stessa sulla neve. Nel caso in cui la superficie sia di tipo lago, questa verrà automaticamente considerata a pendenza nulla. Nel caso di suolo coperto da vegetazione, viene raggruppato tutto il territorio coperto da foreste di conifere ad alto fusto, foreste miste e arbusti a basso fusto. Per suolo nudo si intende invece ogni altra tipologia di suolo non collocabile nelle altre tre classi.

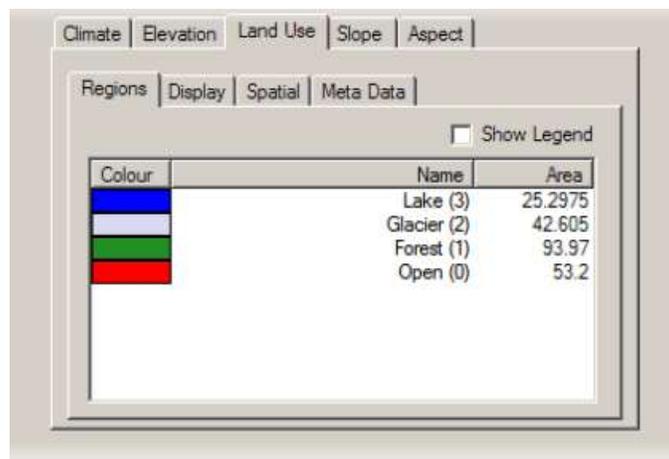


Figura 4.9: Suddivisione del bacino secondo l'uso del suolo

- *Orientamento*: l'orientamento influenza il tasso di fusione della neve, in quanto i versanti a sud saranno esposti al sole per periodi maggiori durante l'anno. È possibile selezionare tre opzioni: 'None', in tal caso l'orientazione non viene considerata nel programma;

‘North-South’, il terreno viene suddiviso solo nel terreno esposto a nord e a sud; ‘North-East-South-West’, il terreno viene suddiviso nelle quattro categorie corrispondente appunto all’orientamento nord, est, sud e ovest (Figura 4.10).

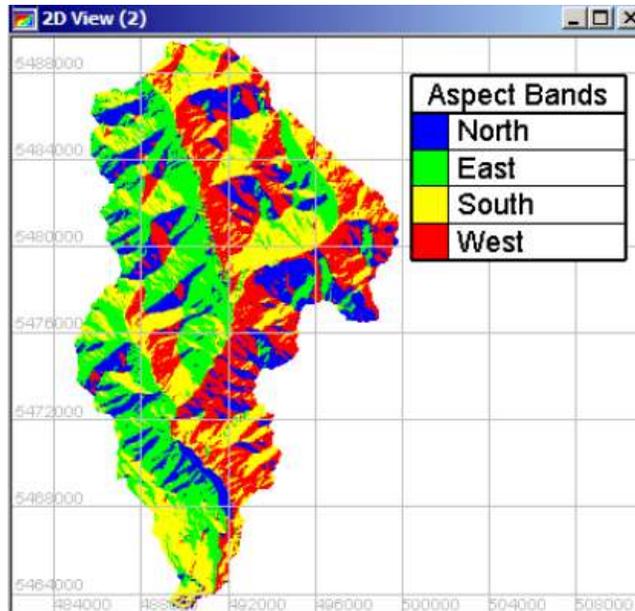


Figura 4.10: Suddivisione del bacino in base all’orientazione

- *Pendenza*: questa informazione è utilizzata per correggere il degree day della neve ed è correlata alla rapidità della trasformazione dell’afflusso in deflusso. Il programma richiede all’utente di indicare il numero di classi per rappresentare la pendenza. Maggiori saranno queste classi, maggiore sarà la fedeltà con cui il programma rappresenta il terreno dal momento che ad ogni classe sarà associato un range di pendenza inferiore (Figura 4.11).

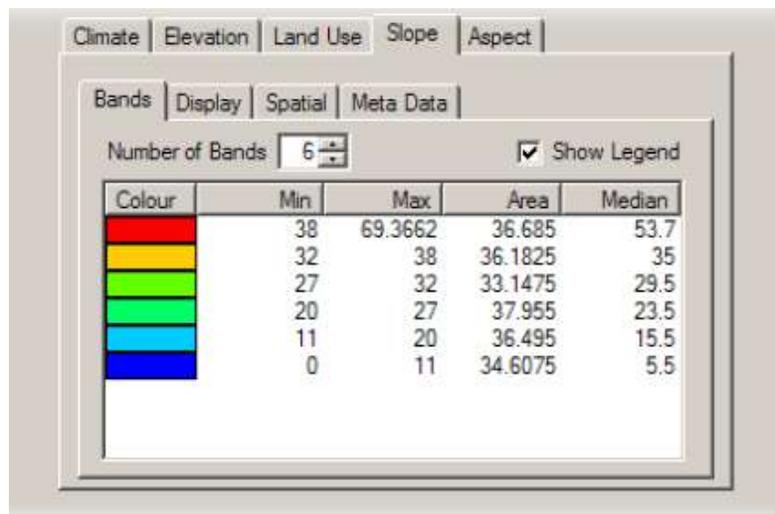


Figura 4.11: Suddivisione del bacino in base all’orientamento

- *Precipitazioni*: il modello richiede in input le informazioni sulle precipitazioni, siano esse liquide oppure solide. Per ogni stazione meteorologica dovranno essere forniti i valori di precipitazione a scala giornaliera ed anche i valori di precipitazione media mensile.

Tali informazioni si possono inserire tramite l'utilizzo di un file di testo del tipo .met (Figura 4.12). Il file richiede come informazioni il nome della stazione meteorologica, la sua quota e la sua localizzazione in coordinate UTM. Richiede, inoltre, le temperature medie mensili e l'evapotraspirazione media mensile. Le ultime tre righe in Figura 4.12 riportano i valori di precipitazione e temperatura solo per i primi tre giorni dell'anno: le righe saranno pari alla durata dei giorni della simulazione. Ad esempio se la simulazione è di durata pari ad un anno, le righe saranno in totale 365. Rispettivamente nella prima colonna si riportano le precipitazioni giornaliere liquide (in mm), nella seconda le precipitazioni nevose (in mm), e nella terza la temperatura media giornaliera (in °C).

```
#####
:FileType hbm ASCII EnSim 1.0
# Canadian Hydraulics Centre/National Research Council (c) 1998-2012
# DataType HBV-EC Met File
#
:Application GreenKenue
:Version 3.3.10
:WrittenBy mattp
:CreationDate Sun, Apr 19, 2020 09:23 PM
#
#-----
#
:ColumnMetaData
:ColumnName Rainfall Snowfall Temperature
:ColumnUnits mm mm degC
:ColumnType float float float
:EndColumnMetaData
#
#
:StationName Demonte
:Elevation 765
:LocationX 365399
:LocationY 4908394
#
:MonthlyTemperature -0.8 0.6 5.4 9.3 13.8 18.3 20.1 19.3 14.9 9.6 4.1 -0.3
:MonthlyEvaporation 1.9 6.2 21.9 48.7 78.2 106.1 120.5 102.7 69.7 38.2 13.3 2.5
#
:StartTime 2007/01/01 00:00
:DeltaT 24:00:00.000
:StartTime 2007/01/01 00:00:00.000
:DeltaT 24:00:00.000
#
:EndHeader
0 0 3.4
0 0 5.6
0 0 1.6
```

Figura 4.12: Estratto del file .met per l'inserimento dei dati meteorologici per ogni stazione

4.2.3 Suddivisione in fasce altimetriche

Il bacino idrografico viene diviso in fasce altimetriche dall'utente in base alle caratteristiche morfologiche del bacino. Infatti dovranno essere definite tante più classi tanto è maggiore il dislivello tra la quota massima e la quota minima del bacino, per tener conto della variabilità della temperatura con la quota.

La suddivisione in fasce altimetriche del bacino permette di tener conto di:

- Incremento della precipitazione all'aumentare della quota: mediante un parametro di scala è possibile definire il tasso di aumento della precipitazione giornaliera a causa dell'effetto topografico tipico delle aree montane. Ci si aspetta, infatti, che a quote maggiore si abbia un aumento delle precipitazioni rispetto alle aree aventi quote più basse (Smith, 1979). È possibile per tener conto della variazione della precipitazione all'aumentare della quota, utilizzare la seguente relazione suggerita dagli autori del modello.

$$P(z) = P[1 + PC(z)(z - z_{rif})]$$

Dove:

- P è la precipitazione in mm riferita alla quota della stazione meteorologica.
 - PC(z) è un parametro correttivo in funzione della quota z. Si definisce un valore di quota massimo oltre il quale non si assiste ad un ulteriore aumento della precipitazione per evitare di incorrere in sovrastime dell'apporto liquido.
 - P(z) è la precipitazione ad una determinata quota z.
 - z_{rif} è la quota alla quale è collocata la stazione di rilevamento associata alla precipitazione P.
- Diminuzione della temperatura media all'aumentare della quota. Infatti è evidente come all'aumentare della quota, corrisponda una diminuzione della temperatura

$$T(z) = T[1 - TLR(z - z_{rif})]$$

Dove:

- T è la temperatura registrata dalla stazione di rilevamento ad una determinata quota z_{rif} .
- z è la quota media della generica fascia altimetrica in cui è suddiviso il bacino.
- T(z) è la temperatura ad una determinata quota z.

- TLR è un parametro suggerito dall'autore è deve essere compreso nell'intervallo 0,6 - 1 °C ogni 100 m di dislivello. Tale parametro infatti definisce di quanti gradi diminuisce la temperatura all'aumentare della quota.
- Diminuzione dell'evapotraspirazione potenziale all'aumentare della quota: nelle aree montane si osserva come le temperature minori portino ad un decremento dell'evapotraspirazione potenziale, che nel modello è riassunta grazie al parametro ECALT (Lindstrom et al. 1997).

$$ETP(z) = ETP[1 - ECALT(z - z_{rif})]$$

Valori tipici del parametro ECALT suggeriti dagli autori è dell'ordine di -0,0005 per metro.

4.2.4 Partizione solido/liquida delle precipitazioni

Uno dei problemi maggiori che deve affrontare il modello è quello di poter “capire” quando la precipitazione sia liquida oppure solida, ovvero quando le condizioni climatiche e morfologiche permettano la formazione di neve e il conseguente accumulo al suolo.

Per far ciò il modello considera una temperatura soglia, sotto la quale la precipitazione diventa solida, mentre sopra rimane liquida.

È inoltre anche possibile definire un range all'interno del quale l'evento di precipitazione è classificato come misto:

$$P = \begin{cases} \text{Se } T(z) \geq TT + \frac{TTI}{2} \rightarrow RF(Rainfall) = P * RFCF \\ \text{Se } T(z) \leq TT + \frac{TTI}{2} \rightarrow SF(Snowfall) = P * SFCF \end{cases}$$

Dove:

- TT è il valore della soglia di partizione solido/liquida, di default pari a 0°C.
- TTI indica l'ampiezza del range all'interno del quale la precipitazione è considerata mista; gli autori consigliano di inserire un intervallo di larghezza pari a 2°C.
- RFCF e SFCF sono rispettivamente i fattori moltiplicativi di precipitazione liquida e di quella solida. Tale fattore è definito dall'utente in base alle osservazioni e deve essere modificato in fase di calibrazione del modello. Valori maggiori di 1 indicano che lo

strumento ha sottostimato la precipitazione, mentre valori inferiori indicano una sovrastima del dato.

4.2.5 Fusione nivale e ricongelamento

La fusione nivale viene calcolata mediante l'approccio del degree day, che stima il tasso giornaliero di fusione secondo la definizione:

$$MELT = MF \cdot [T(z) - TM]$$

Dove:

- MF è il fattore di fusione, in mm/giorno°C, con andamento sinusoidale, avente un minimo il 21 dicembre e un massimo il 21 giugno. Nel modello HBV-EC, esso è in funzione delle caratteristiche morfologiche secondo la definizione:

$$MF = MF_{FLAT} \cdot [1 - AM \cdot \text{sen}(s) \cdot \text{cos}(b)] \cdot MRF$$

Dove:

- MF_{FLAT} è il fattore di fusione per terreni pianeggianti.
 - s rappresenta la pendenza locale, desumibile grazie al dato in input relativo alla pendenza (slope).
 - b è l'orientazione della singola cella, desumibile grazie al dato di input dell'orientazione (aspect).
 - AM è un fattore che varia tra 0 e 1, posto di default pari a 0, che rappresenta il fattore di riduzione morfologico.
 - MRF , posto di default pari a 0,7, è il fattore di riduzione della fusione nivale nelle aree coperte da foresta.
- TM è la temperatura di soglia oltre la quale si manifesta la fusione, con un valore di default suggerito dagli autori pari a 0 °C.

Nel caso in cui la temperatura sia inferiore al valore soglia, avviene il ricongelamento, stimato secondo la definizione:

$$REFR = CRFR \cdot MF \cdot [T(z) - TM]$$

Dove CRFR è il fattore di refreezing che lega il tasso di ricongelamento a quello di fusione. Gli autori suggeriscono un tasso massimo di ricongelamento pari a 2 mm/giorno °C. Il ricongelamento diurno non può superare la frazione liquida della neve stoccata al generico giorno di simulazione. Pertanto il bilancio dell'equivalente idrico nivale sarà dato da:

$$\begin{cases} \text{se } WC < WHC * SP \rightarrow WC = WC + MELT + REFR \\ \text{se } WC \geq WHC * SP \rightarrow IN = MELT + RF \end{cases}$$

L'acqua non è rilasciata dall'accumulo nevoso finché non è raggiunta la soglia di massima capacità di ritenzione dell'acqua da parte della neve, stimata come prodotto tra la water holding capacity (WHC) e l'accumulo nevoso giornaliero SP.

4.2.6 Bilancio idrico nel suolo

La precipitazione liquida e la fusione nivale in eccesso rispetto alla capacità di ritenzione della neve (WR), formano il deflusso che prende parte al bilancio idrico nel suolo; il quantitativo d'acqua nel suolo viene confrontato con la capacità di ritenzione idrica del suolo stesso per definire il deflusso.

In particolare, l'umidità del suolo è modellata separatamente a seconda della tipologia di suolo, distinguendo fra area aperta e superficie coperta da foresta.

L'ammontare del quantitativo idrico percolato attraverso il suolo che forma il runoff (RO) è calcolato come:

$$RO = \begin{cases} \text{se } SM < FC \rightarrow RO = WR * \left(\frac{SM}{FC}\right)^{BETA} \\ \text{se } SM \geq FC \rightarrow RO = WR \end{cases}$$

Dove:

- SM rappresenta l'accumulo liquido nel suolo, o contenuto di umidità (soil moisture), ed è funzione della quota e della classe di uso del suolo.
- FC è la capacità di campo del suolo, pari a 200 mm come suggerito dagli autori. Questo parametro indica l'ammontare massimo d'acqua che il suolo è in grado di trattenere.
- BETA è un parametro di calibrazione del modello che tiene in conto la relazione tra l'infiltrazione nel suolo e la capacità di rilascio dell'acqua che ha il suolo stesso. Gli autori consigliano come valore di default 1.

Se l'umidità del suolo SM è superiore alla capacità di campo, l'intero quantitativo idrico in ingresso al suolo stesso andrà a formare il deflusso. In caso contrario, il deflusso sarà una frazione della quantità idrica derivante da fusione e precipitazione, secondo il rapporto $\left(\frac{SM}{FC}\right)^{BETA}$.

4.2.7 Evaporazione

L'evaporazione (EP) è funzione dell'evapotraspirazione potenziale (ET0 o ETP), che viene stimata a priori e fornita come dato di input al modello grazie al file .met, attraverso diversi possibili metodi che verranno spiegati più dettagliatamente nel seguito.

$$EP = \begin{cases} se\ SM \leq LP \rightarrow EP = ETP \left(\frac{SM}{LP}\right) \\ se\ SM > LP \rightarrow EP = ETP \end{cases}$$

Dove:

- SM rappresenta l'accumulo di umidità nel suolo.
- LP rappresenta il contenuto di umidità nel suolo al di sotto del quale l'evaporazione viene limitata, il che significa che l'evaporazione effettiva sarà inferiore all'evaporazione potenziale. Gli autori suggeriscono valori compresi tra 0 ed 1, fornendo come valore di default 0,7.

Il modello calcola l'evaporazione solo per le celle classificate come "suolo nudo" o nel caso in cui la copertura nevosa sia completamente scomparsa.

Nella sua opera, Castany (1985) spiega come l'evapotraspirazione, o emissione di vapore acqueo, si verifichi in tutti i mezzi. Essa è il risultato di due fenomeni: uno fisico, l'evaporazione, l'altro biologico, la traspirazione. L'evaporazione avviene nell'atmosfera, durante le precipitazioni, alla superficie dei laghi, dei corsi d'acqua ed anche del suolo nudo. La traspirazione invece è il fenomeno legato alla copertura vegetale. L'evapotraspirazione nel suolo raggiunge una profondità di qualche metro secondo le sue caratteristiche e il clima.

L'evapotraspirazione potenziale è definita invece come "l'altezza di evapotraspirazione da un'ampia superficie ricoperta da un prato in pieno sviluppo, fitto, omogeneo, di uniforme altezza, compresa fra gli otto ed i 15 cm, che ombreggi completamente la superficie del suolo ed al quale sia assicurato il pieno soddisfacimento delle proprie esigenze idriche" (Doorenbos e Pruitt, 1977). Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, in letteratura sono presenti diverse relazioni empiriche (Thornthwaite, 1948; Turc, 1954; Penman, 1948; Allen et al. 1998).

Esistono anche metodi diretti per la misura dell'evapotraspirazione potenziale, quali ad esempio la vasca evaporimetrica o evaporimetro e il lisimetro (Figura 4.13).

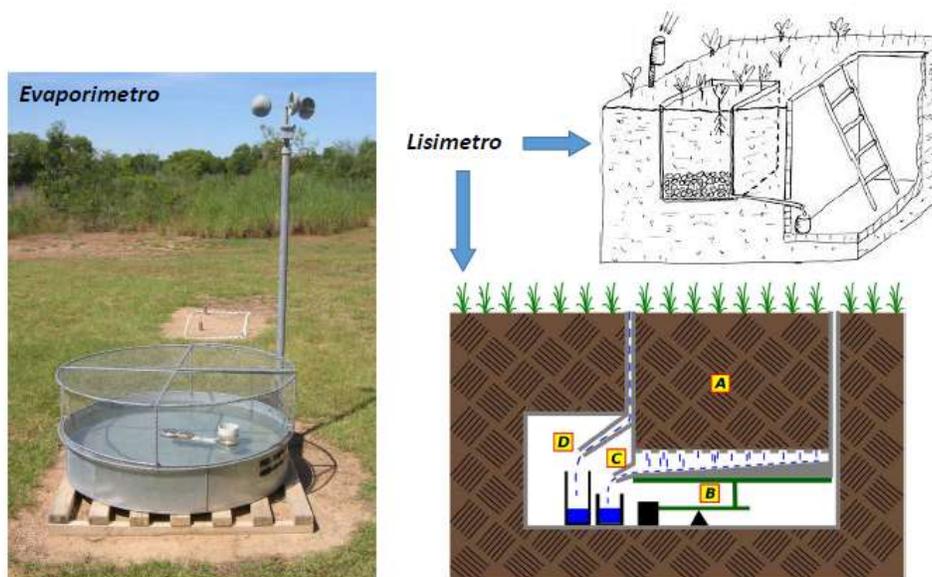


Figura 4.13: Evaporimetro e lisimetro

Tali metodi diretti forniscono valori molto precisi di evapotraspirazione potenziale, ma la loro presenza sul territorio non è capillare e pertanto in siti non strumentati è necessario ricorrere alle formule empiriche.

In particolare gli autori consigliano per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale la formula di Penman o quella di Thornthwaite.

Nella presente tesi tuttavia, al fine di ottenere valori più precisi, è stato preso in considerazione il lavoro di Merlo (2001), dove viene fornita una stima dell'evapotraspirazione potenziale per la Regione Piemonte.

Tale lavoro viene anche citato nel P.T.A.-Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte (2004), dove viene richiamato il metodo e indicata la metodologia di calcolo dell'evapotraspirazione potenziale.

Data la disponibilità effettiva solo di alcuni dati necessari alla stima dell'evapotraspirazione di riferimento, nello studio effettuato da Merlo, si è ritenuto significativo procedere alla taratura del metodo di Blaney-Criddle mod. FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations), sulla base dei valori di evapotraspirazione potenziale (ET₀ o ETP) ottenuti con un metodo più preciso, vale a dire con quello di Penman mod. FAO, il quale richiede la disponibilità dei valori dei seguenti parametri meteorologici, reperibili solo a scala locale: radiazione globale o eliofania assoluta, temperatura e umidità relativa dell'aria, velocità del vento.

Di seguito vengono riportate le operazioni effettuate nel lavoro di Merlo per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento.

Nell'ambito del territorio di pianura e di collina della Regione Piemonte sono state individuate 13 stazioni meteorologiche automatiche per le quali sono disponibili i valori medi mensili delle grandezze meteorologiche necessarie per calcolare il valore di ET0 con la formula di Penman (per ogni stazione il periodo utilizzato risulta compreso tra il 1988 ed il 1998 ed ha una durata minima di cinque anni). Su questi valori è stata tarata la formula di Blaney-Criddle e si è arrivati quindi ad una stima dell'evapotraspirazione di riferimento mensile sulle 13 stazioni.

Lo studio ha quindi permesso, oltre alla taratura della formula di Blaney-Criddle (uno dei metodi più conosciuti per la stima della ET0) per l'impiego specifico in Piemonte, la redazione delle carte regionali dell'evapotraspirazione di riferimento (mensile e totale annua). Tali carte sono reperibili in letteratura in forma grafica, tramite la sovrapposizione con curve di isovalore di evapotraspirazione potenziale, ed in formato tabellare.

E' evidente che alle alte quote, dove la vegetazione è quasi del tutto assente, tale grandezza abbia valori trascurabili e prossimi allo zero; sulle aree pedemontane e di pianura si osserva invece come l'evapotraspirazione annua vari fra gli 800 e i 1000 mm/anno; ma a quote intermedie (sotto i 2000 m s.m. e sopra gli 800 m s.m., circa), non si può non assumere che tale fenomeno sia invece comunque significativo ai fini della valutazione del bilancio idrologico.

In Tabella 4.1 si riportano i valori di evapotraspirazione potenziale ottenute dal lavoro di Merlo (2001).

Tabella 4.1: valori di evapotraspirazione potenziale mensile (Merlo, 2001)

QUOTA (m s.m.)	genn (mm)	feb (mm)	mar (mm)	apr (mm)	mag (mm)	giu (mm)	lug (mm)	ago (mm)	set (mm)	ott (mm)	nov (mm)	dic (mm)	anno (mm)
200	2.6	8.4	28.5	65.3	102.9	136.9	153.3	130.0	89.6	49.0	16.9	3.2	787
400	2.3	7.7	26.3	59.7	94.6	126.7	142.4	120.9	82.9	45.4	15.7	3.0	728
600	2.1	6.9	24.1	54.2	86.4	116.4	131.4	111.8	76.3	41.8	14.5	2.7	669
800	1.9	6.2	21.9	48.7	78.2	106.1	120.5	102.7	69.7	38.2	13.3	2.5	610
1000	1.7	5.4	19.8	43.1	70.0	95.9	109.5	93.6	63.0	34.6	12.1	2.2	551
1200	1.4	4.7	17.6	37.6	61.8	85.6	98.6	84.5	56.4	31.0	10.9	2.0	492
1400	1.2	3.9	15.4	32.0	53.5	75.4	87.6	75.4	49.8	27.4	9.6	1.7	433
1600	1.0	3.2	13.2	26.5	45.3	65.1	76.7	66.3	43.1	23.8	8.4	1.5	374
1800	0.8	2.4	11.0	21.0	37.1	54.8	65.7	57.2	36.5	20.2	7.2	1.2	315
2000	0.5	1.7	8.8	15.4	28.9	44.6	54.8	48.1	29.9	16.6	6.0	1.0	256
2200	0.3	0.9	6.7	9.9	20.7	34.3	43.8	39.0	23.2	13.1	4.8	0.7	197

4.2.8 Fusione glaciale

La fusione glaciale viene considerata dal modello solo qualora siano presenti superfici coperte da ghiacciaio.

Il deflusso da fusione glaciale sarà calcolato solo nel caso in cui la neve accumulata in inverno si sia totalmente fusa. In caso contrario, il deflusso verrà calcolato come se la cella fosse classificata come suolo nudo, con le equazioni di bilancio già descritte in precedenza.

Nel caso di accumulo nevoso completamente esaurito, la fusione glaciale viene calcolata, secondo l'approccio del degree day come:

$$MELT_G = MRG * MF * [T(z) - TM]$$

Cioè il coefficiente di fusione giornaliero del ghiaccio è in funzione di quello della neve (MF), amplificato dal coefficiente MRG, che tiene conto del minor albedo del ghiaccio rispetto a quello della neve.

Ogni cella è modellata mediante un invaso lineare, il quale è alimentato dal quantitativo idrico di fusione, unito alla precipitazione liquida. Pertanto il deflusso è calcolato secondo la definizione:

$$Q_G = KG * S$$

Dove:

- S è l'equivalente idrico stoccato al generico giorno di simulazione, nel serbatoio che rappresenta il ghiacciaio.
- KG è il coefficiente di deflusso, funzione parametrica dello snow water equivalent (SWE)

$$KG = KGMin + dKG * EXP(-AG * SWE)$$

- KGMin è il coefficiente di deflusso minimo, che rappresenta le condizioni di forte innevamento e sistema di drenaggio sub-glaciale scarsamente sviluppato. Il valore suggerito dagli autori è pari a 0,5.
- KGMin + dKG è il coefficiente di deflusso massimo, che rappresenta le condizioni estive di ghiaccio scoperto e sistema di drenaggio completamente sviluppato. Il valore massimo di incremento suggerito dagli autori è pari a 0,01.
- AG è un parametro di calibrazione che agisce sulla decrescita del coefficiente di deflusso.
- SWE è l'equivalente idrico nivale al generico giorno di simulazione per la generica cella di ghiaccio, lo SWE infatti viene utilizzato per modulare l'efficienza di drenaggio del ghiaccio in funzione della stagione.

4.2.9 Deflusso

Il deflusso idrico totale è dato dalla somma di due componenti: il deflusso lento e il deflusso veloce. Il deflusso lento è quello dovuto al graduale rilascio idrico da parte del sottosuolo e alla ricarica che la falda può fornire al corso d'acqua, mentre il deflusso veloce rappresenta la risposta del sistema al ruscellamento superficiale creato dalle precipitazioni e che va a confluire direttamente nel corso d'acqua.

La ripartizione tra queste due componenti è regolata grazie al coefficiente f , come mostrato nella Figura 4.14.

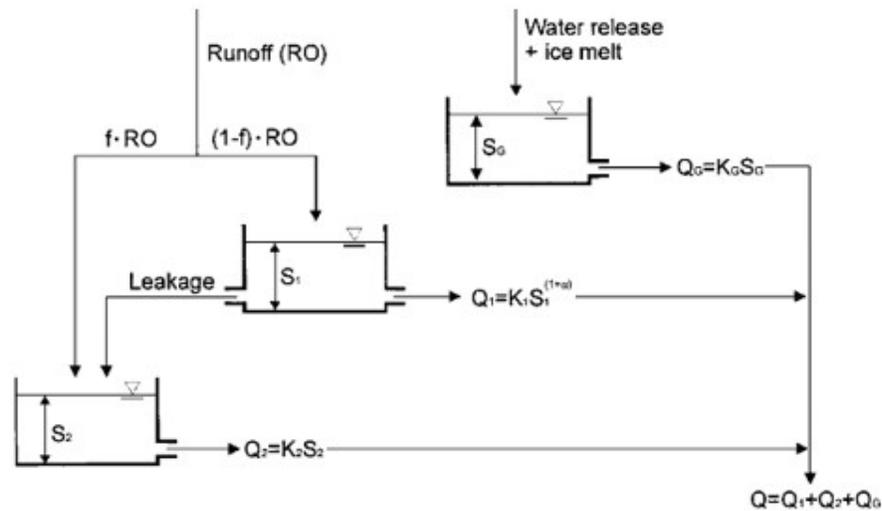


Figura 4.14: Schema del deflusso alla sezione di chiusura (Q_1 coincide con Q_F , mentre Q_2 coincide con Q_S)

Il deflusso veloce è definito dalla seguente relazione:

$$Q_F = K_F * S_F^{1+\alpha}$$

Dove:

- K_F rappresenta il coefficiente di deflusso del serbatoio utilizzato per la modellazione della componente veloce. Aumentando il valore di questo coefficiente si aumenta il deflusso in corrispondenza di eventi liquidi. Il valore suggerito dagli autori è di 0,2.
- α agisce sulla rapidità del deflusso stesso. Il valore di default è pari a 0,1.
- S_F rappresenta il quantitativo idrico stoccato nel primo serbatoio e che va a formare la componente del deflusso veloce.

Entrambe le costanti sono parametri di calibrazione del modello in quanto non hanno uno specifico significato fisico.

Il deflusso lento è definito dalla seguente relazione:

$$Q_S = K_S * S_S$$

Dove:

- K_S rappresenta il coefficiente di deflusso del serbatoio utilizzato per modellare la componente lenta. Questo coefficiente simula l'acqua che viene trattenuta nel suolo e che viene rilasciata lentamente percorrendo i canali di drenaggio secondari. Il coefficiente modula il deflusso invernale poiché va ad influire sul comportamento del modello che cerca di riprodurre il graduale rilascio idrico da parte del sottosuolo e la ricarica che la falda può fornire al corso d'acqua. Gli autori suggeriscono come valore di default 0,05.
- S_S rappresenta il quantitativo idrico stoccato nel secondo serbatoio e che va a formare la componente del deflusso lento.

Di conseguenza, il deflusso totale Q_{tot} è dato dalla somma di Q_F , Q_S e Q_G .

4.2.10 Calibrazione e validazione

Come già esposto in precedenza, HBV-EC è un modello concettuale legato ad una serie di parametri che cercano di simulare tutti i fenomeni fisici che fanno parte del bilancio idrologico.

Gli autori suggeriscono dei valori di default di tali parametri, che possono esser modificati liberamente dall'utente entro un certo range, sempre definito dagli autori. Tuttavia, per evitare di forzare eccessivamente la simulazione, si consiglia di andare a modificare solo un numero ristretto di tali parametri.

L'operazione di andare a modificare i parametri per ottenere una simulazione che sia la più rappresentativa possibile dell'idrogramma delle portate misurato alla sezione di chiusura è detta calibrazione.

I parametri soggetti a calibrazione sono quelli che influenzano maggiormente il volume idrico alla sezione di chiusura, indicati nell'articolo di Jost et al. (2012), dove viene riportato per ogni singolo parametro il coefficiente di correlazione con gli indici che descrivono l'accuratezza del modello.

I parametri che gli autori consigliano di calibrare sono:

- K_F coefficiente di deflusso del serbatoio utilizzato per la modellazione della componente veloce, già descritto nel paragrafo precedente.
- K_S coefficiente di deflusso del serbatoio utilizzato per la modellazione della componente lenta, già descritto nel paragrafo precedente.

- RFCF fattore moltiplicativo legato alle precipitazioni liquide (RainFall Coefficient Factor)
- SFCF fattore moltiplicativo legato alle precipitazioni solide (Snowfall Coefficient Factor).

Siccome nel programma non è disponibile una procedura di calibrazione automatica dei parametri, è necessario di volta in volta variare i parametri partendo da quelli di default suggeriti dagli autori, salvare i risultati della simulazione e confrontare a “vista” gli idrogrammi misurati alla sezione di chiusura con quelli simulati.

Una volta ottenuti degli idrogrammi simulati che cercano di riprodurre il più fedelmente possibile l'idrogramma misurato, è necessario creare un grafico punti simulati vs. punti misurati (scatter plot) al fine di poter osservare la correlazione tra i dati e ricercare il miglior R^2 . Di volta in volta quindi si andranno a calibrare i parametri fino ad ottenere il valore più alto possibile di R^2 .

4.2.11 Riepilogo equazioni modello HBV-EC

<p>PARTIZIONE SOLIDO/LIQUIDA</p>	$P(z) = P[1 + PC(z)(z - z_{rif})]$ $T(z) = T[1 - TLR(z - z_{rif})]$ $P = \begin{cases} \text{se } T(z) \geq TT + \frac{TTI}{2} \rightarrow RF(Rainfall) = P * RFCF \\ \text{se } T(z) \leq TT + \frac{TTI}{2} \rightarrow SF(Snowfall) = P * SFCF \end{cases}$
<p>BILANCIO IDRICO NIVALE</p>	$MELT = MF \cdot [T(z) - TM]$ $MF = MF_{FLAT} \cdot [1 - AM \cdot \text{sen}(s) \cdot \text{cos}(b)] \cdot MRF$ $REFR = CRFR \cdot MF \cdot [T(z) - TM]$ $\text{se } WC < WHC * SP \rightarrow WC = WC + MELT + REFR$ $\text{se } WC \geq WHC * SP \rightarrow IN = MELT + RF$
<p>BILANCIO IDRICO NEL SUOLO</p>	$RO = \begin{cases} \text{se } SM < FC \rightarrow RO = WR * \left(\frac{SM}{FC}\right)^{BETA} \\ \text{se } SM \geq FC \rightarrow RO = WR \end{cases}$
<p>EVAPORAZIONE</p>	$ETP(z) = ETP[1 - ECALT(z - z_{rif})]$ $EP = \begin{cases} \text{se } SM \leq LP \rightarrow EP = ETP \left(\frac{SM}{LP}\right) \\ \text{se } SM > LP \rightarrow EP = ETP \end{cases}$
<p>DEFLUSSO TOTALE</p>	$MELT_G = MRG * MF * [T(z) - TM]$ $Q_G = KG * S$ $KG = KG_{Min} + dKG * EXP(-AG * SWE)$ $Q_F = K_F * S_F^{1+\alpha}$ $Q_S = K_S * S_S$ $Q_{tot} = Q_F + Q_S + Q_G$

5. APPLICAZIONE DEL MODELLO HBV-EC

5.1 Il bacino della Stura di Demonte a Fossano

Il bacino oggetto di studio è già stato ampiamente descritto nel Capitolo 3, dove si sono riportate le caratteristiche geomorfologiche del bacino fino alla sezione di chiusura posta all'altezza di Fossano, il numero e la localizzazione delle stazioni meteorologiche.

In questo capitolo, dopo una breve descrizione sulla suddivisione del bacino in classi di uso del suolo, si andrà a spiegare nel dettaglio le scelte effettuate nella modellazione del bacino, come la scelta del numero delle fasce altimetriche, la scelta del numero delle stazioni meteorologiche considerate e la calibrazione dei parametri.

5.2 Classi di uso del suolo

Il programma HBV-EC richiede che il territorio del bacino sia suddiviso in 4 classi di uso del suolo, ovvero in suolo aperto (Open), suolo coperto da foreste (Forest), specchi d'acqua (Lake) e superficie coperta perennemente da ghiaccio (Glacier).

Per effettuare tale operazione, è possibile utilizzare la mappa di uso del suolo realizzata all'interno del progetto Corine Land Cover 2010. Tuttavia in tale mappa sono presenti numerose classi di uso del suolo, mentre come detto in precedenza, il programma richiede l'inserimento di sole 4 classi.

Nel caso in esame, non sono presenti ghiacciai all'interno del bacino e non si riscontra la presenza di specchi d'acqua significativi se non piccoli invasi artificiali a monte di sbarramenti artificiali sull'asta fluviale principale. Di conseguenza, la superficie all'intero delle classi di uso del suolo Lake e Glacier è pari a zero.

È invece necessario effettuare una suddivisione del territorio in suolo aperto ed in foreste; per tale operazione è sufficiente raggruppare tutte le classi di uso del suolo indicate nel progetto Corine Land Cover 2010 che siano classificabili come foreste e terreno vegetato, mentre tutto il resto del territorio sarà collocato nella classe di uso del suolo Open.

In Figura 5.1 è possibile osservare la suddivisione del territorio.

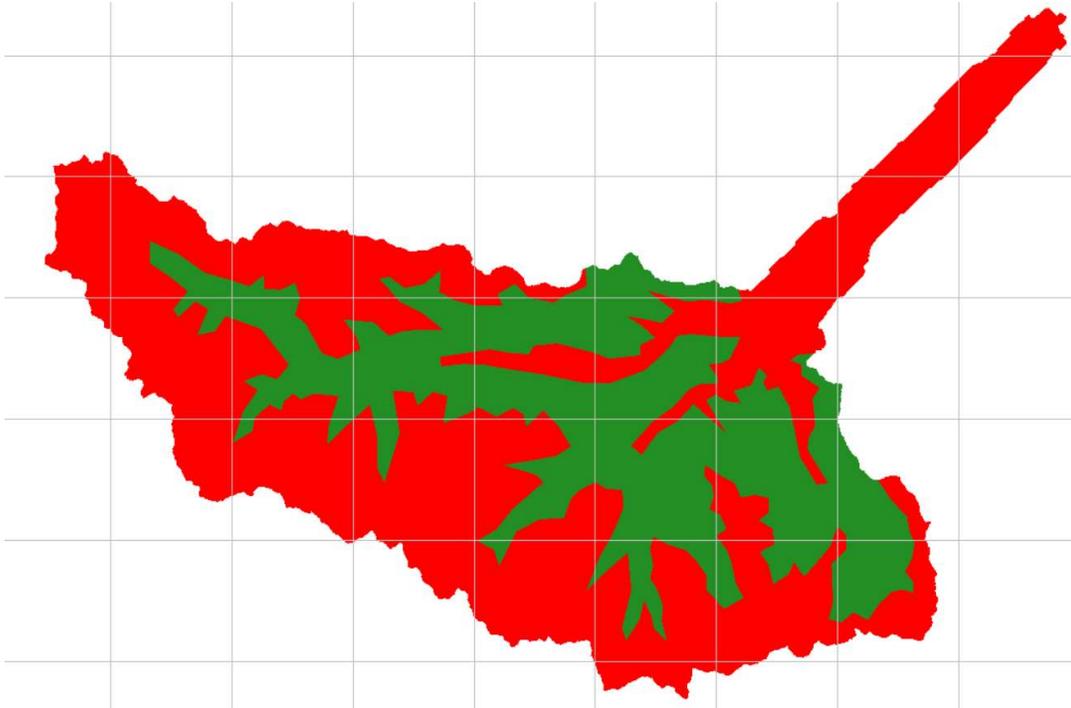


Figura 5.1: Suddivisione del bacino in classi di uso del suolo ottenute dal modello HBV-EC. In verde sono identificate le aree occupate da foreste, mentre in rosso è indicato il suolo libero o suolo nudo.

La superficie coperta da foreste e l'area a suolo nudo si può desumere sul software selezionando dal menù a tendina la voce "Land Use Region", grazie al quale si apre una finestra con indicazione delle aree occupate (Figura 5.2).

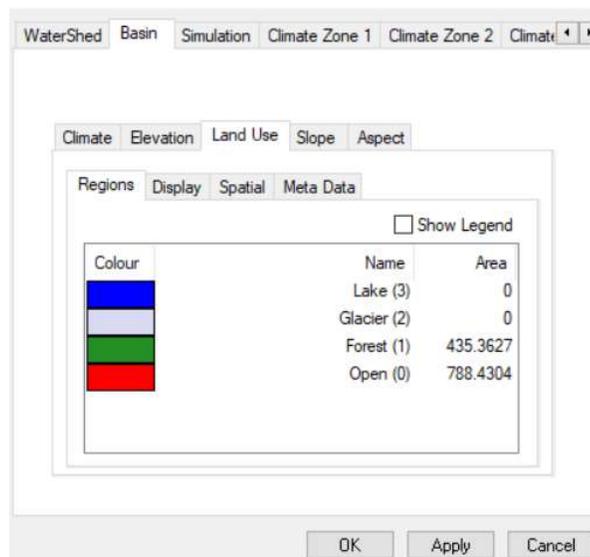


Figura 5.2: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in classi di uso del suolo

È interessante osservare come la porzione di territorio occupata da foreste sia assente ad una quota superiore a circa 2000 m s.l.m., dove prevalgono suoli con vegetazione rada o quasi assente e suolo nudo costituito per la maggior parte da rocce affioranti o detriti. Il fondo valle è anch'esso classificato come suolo nudo, dal momento che non si riscontra la presenza di gradi foreste, ma vi si trovano prati ed aree edificate. In particolare la zona a valle di Cuneo è caratterizzata da gradi distese di terreno dedicate all'agricoltura.

5.3 Suddivisione del bacino in fasce altimetriche

Come già accennato nel Paragrafo 4.2.2, la suddivisione in fasce altimetriche del bacino serve per diminuire l'onere computazionale del modello. Infatti il modello effettua la simulazione utilizzando la quota media per ogni fascia altimetrica, come se considerasse tutta la fascia altimetrica riferita ad una sola quota.

Questo inciderà sulla temperatura media della fascia altimetrica, che viene definita in funzione della quota e considerata omogenea e rappresentativa dell'intera area.

Si è scelto di suddividere il bacino in 12 fasce altimetriche equidistanti, per tener conto dell'elevato dislivello tra la sezione di chiusura a Fossano (269 m) e la quota massima del bacino pari a 3197 m (Figura 5.3).

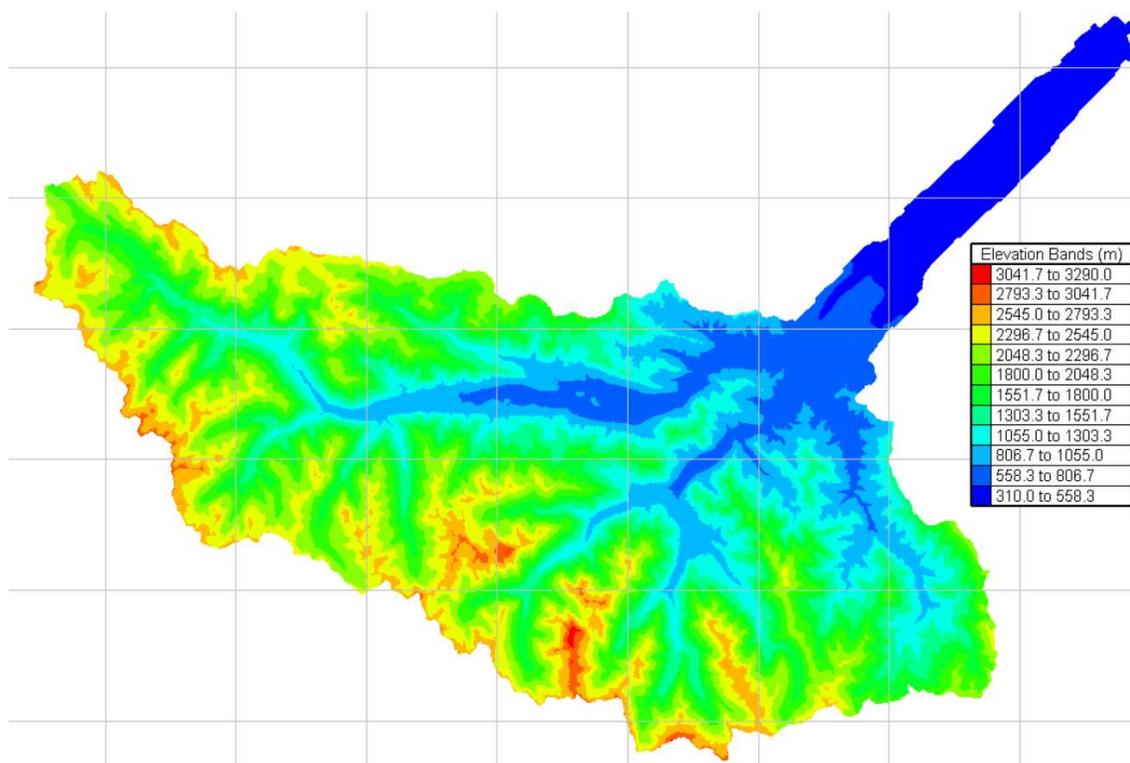


Figura 5.3: Suddivisione del bacino in fasce altimetriche

Tale operazione si effettua dal menù a tendina del software selezionando la voce “Elevation Bands” e indicando il numero di fasce in cui si vuole dividere il bacino (Figura 5.4). Dalla finestra che si apre è possibile desumere le informazioni per ogni fascia altimetrica, quali le quote massime, medie e minime e l’area di superficie del bacino associata a ciascuna fascia altimetrica.

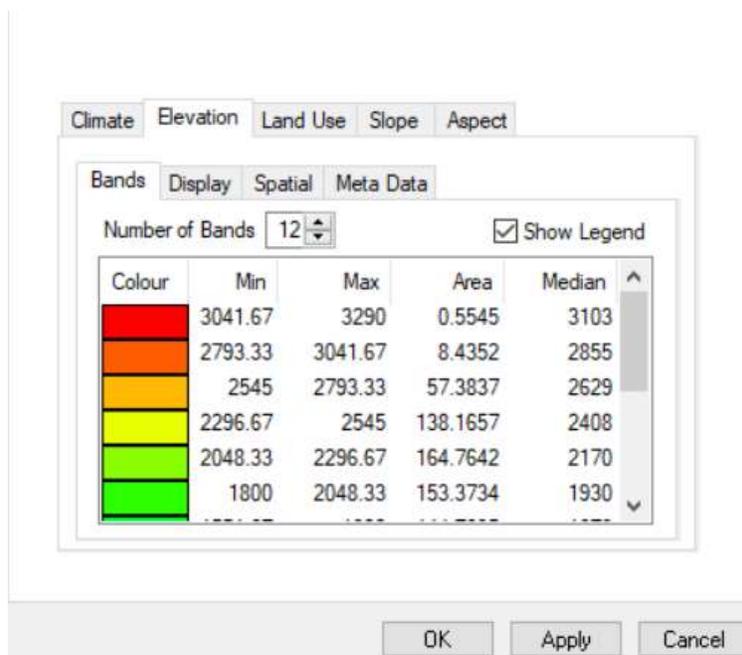


Figura 5.4: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in fasce altimetriche

5.4 Suddivisione del bacino secondo l’orientazione e la pendenza

Il programma richiede che il bacino sia suddiviso secondo l’orientazione e la pendenza dei versanti.

Per quanto riguarda l’orientazione, il programma permette di decidere se non considerarla al fine della simulazione, oppure se dividere il bacino nelle sole zone esposte a nord e sud, oppure se dividere il bacino secondo le orientazioni nord, sud, est ed ovest. Per la presente simulazione si è deciso di considerare l’ultima opzione, in maniera tale da avere il territorio ben rappresentato richiedendo un piccolo sforzo computazionale in più al programma senza la necessità di grandi tempi per una singola simulazione (Figura 5.5).

Tale operazione è eseguibile dal menù a tendina alla voce “Aspect Bands”, dalla quale è possibile aprire la finestra per la scelta delle tre opzioni sopra descritte (Figura 5.6). Da tale finestra è possibile desumere le porzioni di superficie per ogni orientazione dei versanti.

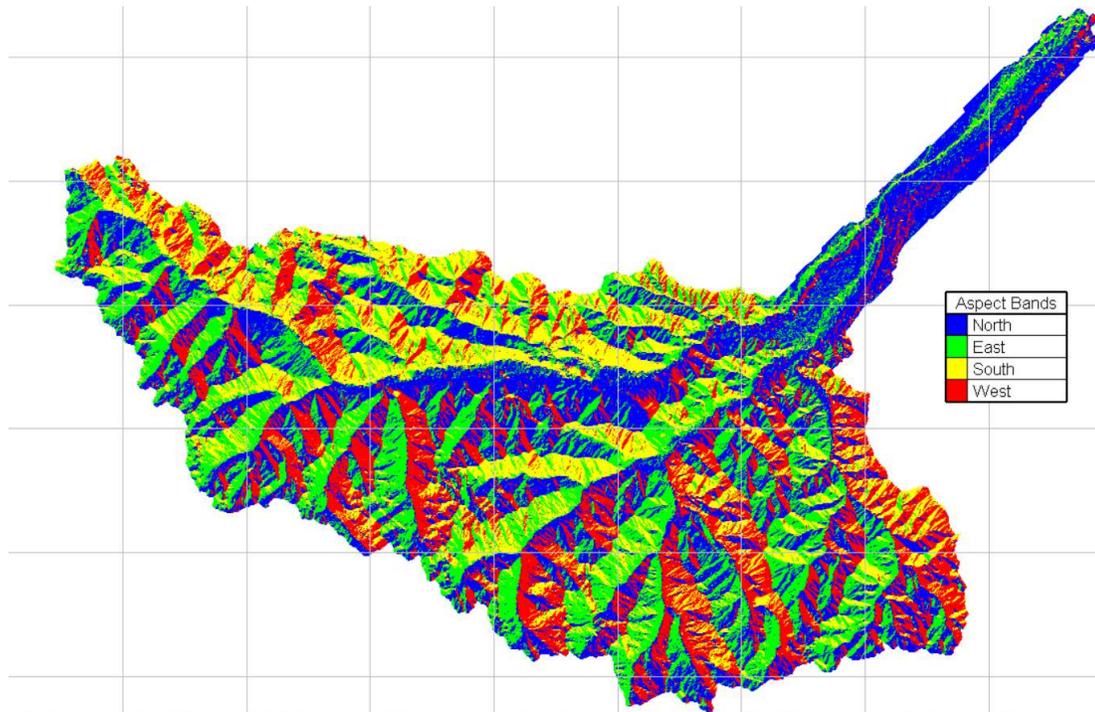


Figura 5.5: Suddivisione del bacino secondo l'orientazione

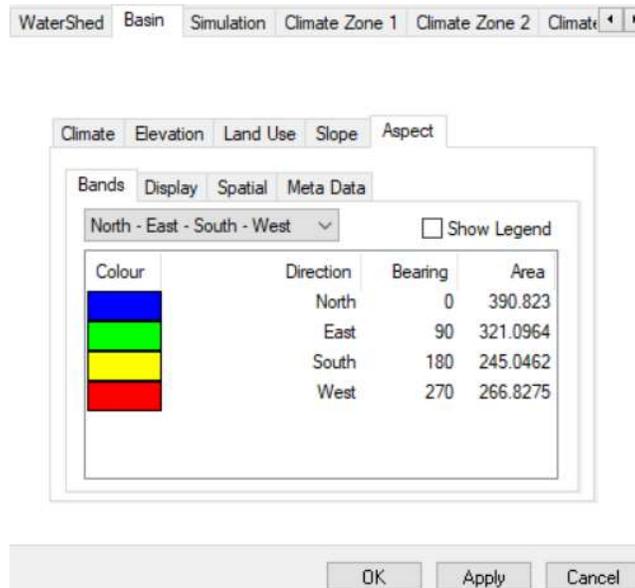


Figura 5.6: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in base all'orientazione dei versanti

Per quanto riguarda invece la pendenza, il programma richiede di suddividere il bacino secondo diversi intervalli di pendenza a discrezione dell'utente.

Si è osservato dalle simulazioni che per ottenere un buon risultato non è necessario utilizzare troppi intervalli di pendenza dei versanti, ma è sufficiente considerare 4-6 intervalli. In questo caso, è

stato scelto di dividere il bacino secondo 6 classi di pendenza dei versanti (Figura 5.7). Sempre dal menù a tendina alla voce “Slope Bands” è possibile scegliere in quanti intervalli di pendenza suddividere il bacino (Figura 5.8).

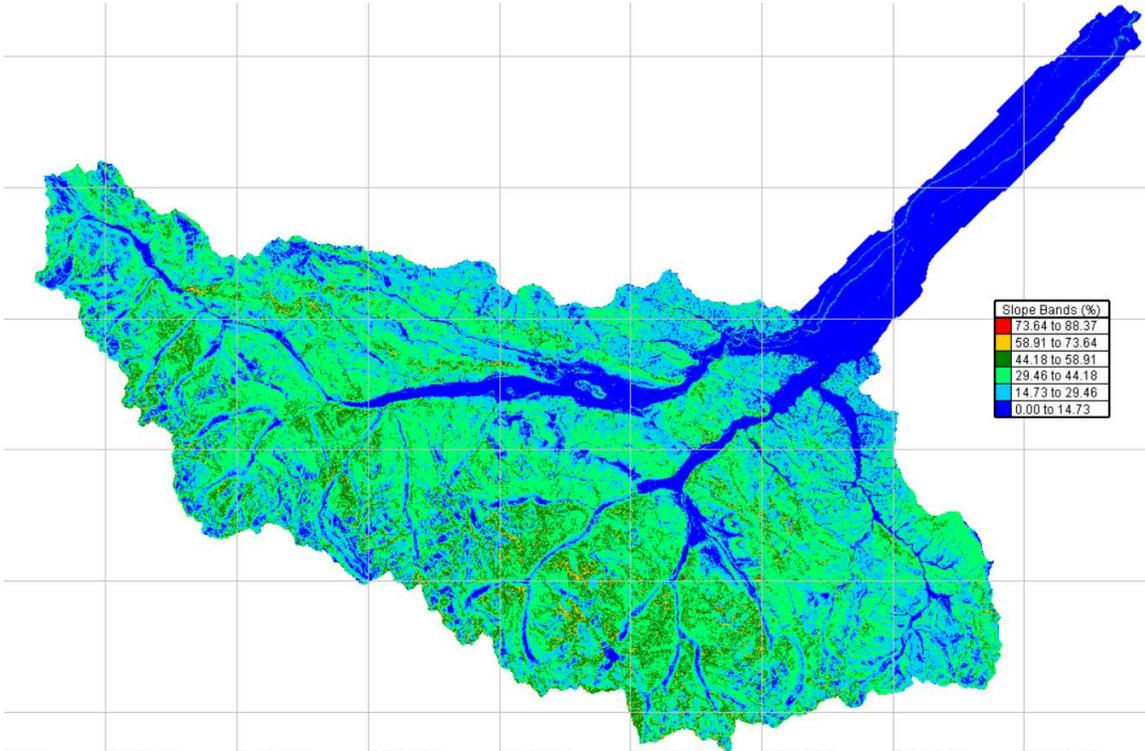


Figura 5.8: Suddivisione del bacino secondo la pendenza dei versanti

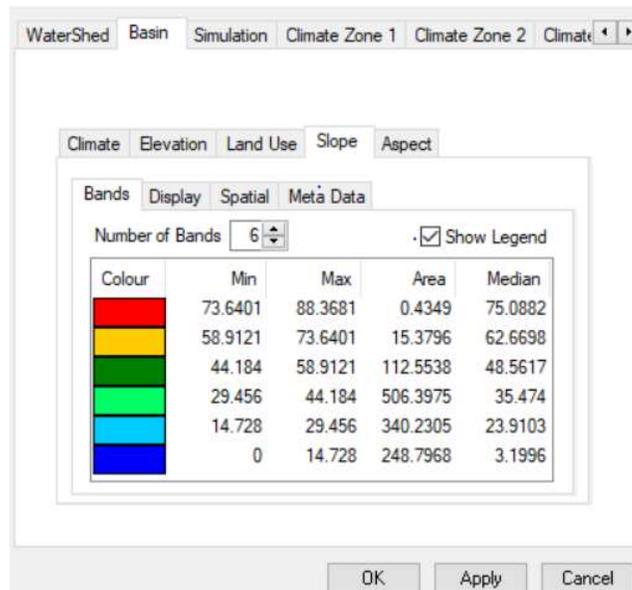


Figura 5.8: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in base alla pendenza dei versanti

Come è possibile desumere dalle Figure 5.7 e 5.8, i versanti non presentano forti acclività, ma la maggior parte di essi presentano pendenza al di sotto del 44%. Solo piccole porzioni di versante hanno pendenza maggiori, comunque comprese tra il 44 % e il 73 %. Infine, un'area molto piccola, pari a 0,43 km², presenta una forte pendenza superiore al 73 %.

5.5 Parametri non soggetti a calibrazione

I parametri che entrano in gioco nella simulazione sono stati discussi nel Capitolo 4.

Di seguito si riportano i parametri non soggetti a calibrazione, ovvero quei parametri che gli autori consigliano di lasciare fissi. I motivi che hanno portato a questa scelta sono:

- Evitare di forzare eccessivamente il modello.
- Alcuni parametri vengono fissati a priori in quanto non si dispone di misure precise per una loro taratura, come ad esempio l'intercettazione vegetale. Si ricorda che tali parametri sono stati recentemente tarati in bacini montani degli Stati Uniti e pertanto hanno una validità generale.
- Utilizzando un numero elevato di parametri si aumenta il tempo necessario ad eseguire una singola simulazione, che può variare da 1 minuto a 2-3 minuti a seconda del grado di dettaglio dei dati di input. Inoltre, forzare troppi parametri da un lato permette di ottenere un risultato migliore, dall'altro allontana il parametro dal suo significato fisico, con il risultato di ottenere un puro adattamento numerico.

Di seguito in Tabella 5.1 si riportano i valori dei parametri non oggetto di calibrazione.

Tabella 5.1: Parametri non oggetto di calibrazione del modello HBV-EC

	PARAMETRO	DESCRIZIONE	VALORE
ATMOSFERICI	PGRADL (1/m)	Gradiente precipitazione liquida verticale	0,0001
	PGRADH (%/m)	Gradiente precipitazione liquida orizzontale	0
	EMID (m)	Quota limite del gradiente di precipitazione liquida verticale	5000
	TLAPSE (°C/m)	Temperature laps rate	0,0065
	TT (°C)	Soglia partizione solido/liquida	0
	TTI (°C)	Range di precipitazione mista	2
	EPGRAD (1/m)	Gradiente altimetrico evapotraspirazione potenziale	0,0005
	ETF (-)	Limite dell'anomalia di evapotraspirazione potenziale	0,5
FOREST	TFRAIN (-)	Intercettazione vegetale della precipitazione liquida	0,8
	TFSNOW (-)	Intercettazione vegetale della precipitazione nevosa	0,8
SNOW	AM (-)	Correzione in funzione di slope ed aspect	0
	TM (°C)	Temperatura soglia per la fusione	0
	CMIN (mm/day°C)	Degree day minimo della neve	2
	DC (mm/day°C)	Incremento del degree day annuo	2
	MRF (-)	Fattore di riduzione della fusione	0,7
	CRFR (mm/day)	Coefficiente di refreezing	2
	WHC (-)	Water holding capacity	0,05
	LWR (mm)	Massimo contenuto idrico della neve	2500
	FC (mm)	Capacità di campo	200
	BETA (-)	Modulazione dell'infiltrazione	1
	LP (-)	Limitazione dell'evapotraspirazione potenziale massima	0,7
GLACIER	MRG	Rapporto tra degree day della neve e del ghiaccio	2
	AG (-)	Infiltrazione del ghiaccio	0,05
	DKG (-)	Regolazione della velocità di deflusso	0,05
	KGMin (-)	Minimo coefficiente di deflusso	0,05
	KGRC (-)	Variazione annuale di KGMin	0,7

5.6 Simulazioni e calibrazione dei parametri

Per la calibrazione dei parametri, con lo scopo di ottenere il miglior risultato possibile tra idrogramma misurato e simulato a Fossano, si è scelta una finestra temporale di 3 anni, dal 2007 al 2009.

Le ragioni di tale scelta sono dovute principalmente a due fattori: prima del 2007 la stazione di Limone Pancani era collocata in una posizione diversa rispetto a quella attuale, mentre le simulazioni sono state spinte fino al 2009 in quanto si è ritenuta sufficiente la calibrazione dei

parametri su tre anni. Inoltre i primi due anni presentano un regime idrologico simile, dove tuttavia variano i picchi di portata, mentre il 2009 presenta un andamento leggermente diverso dai precedenti anni. La calibrazione su tre anni dei parametri con andamenti diversi dell'idrogramma può fornire un risultato con una validità generale tale da potersi adattare anche ad altri anni.

Nel seguito verranno commentate diverse simulazioni nelle quali sono variate sia il numero delle stazioni meteorologiche prese in esame, sia i parametri oggetto di calibrazione, fino al raggiungimento della simulazione che si ritiene essere la migliore in termine di volumi simulati che di R^2 .

5.6.1 Simulazione 1

In questa prima simulazione sono state considerate solo tre stazioni di rilevamento meteorologiche, in particolare quella di Limone Pancani, di Cuneo Cascina Vecchia e di Valdieri.

La scelta di considerare solo tre stazioni meteorologiche serve a capire se un numero limitato di stazioni meteorologiche possa ben rappresentare le precipitazioni che cadono all'interno del bacino, oppure se sia necessario considerare un numero più elevato di stazioni.

Al fine di ottenere il risultato migliore, sono stati calibrati i soli parametri che gli autori consigliano di modificare (Paragrafo 4.2.10), mentre sono rimasti costanti tutti gli altri parametri. In Tabella 5.2 si riportano i parametri calibrati.

Tabella 5.2: Parametri calibrati 1° simulazione

Parametro	Valore calibrato
K_F	0,5
K_S	0,1
RFC	1
SFC	0,7

Questi parametri hanno permesso di ottenere l'idrogramma simulato a Fossano riportato in Figura 5.9. In tale figura si riporta anche l'idrogramma misurato a Fossano, in maniera tale da permettere un rapido confronto visivo tra i due idrogrammi per poterne apprezzare la bontà o meno.

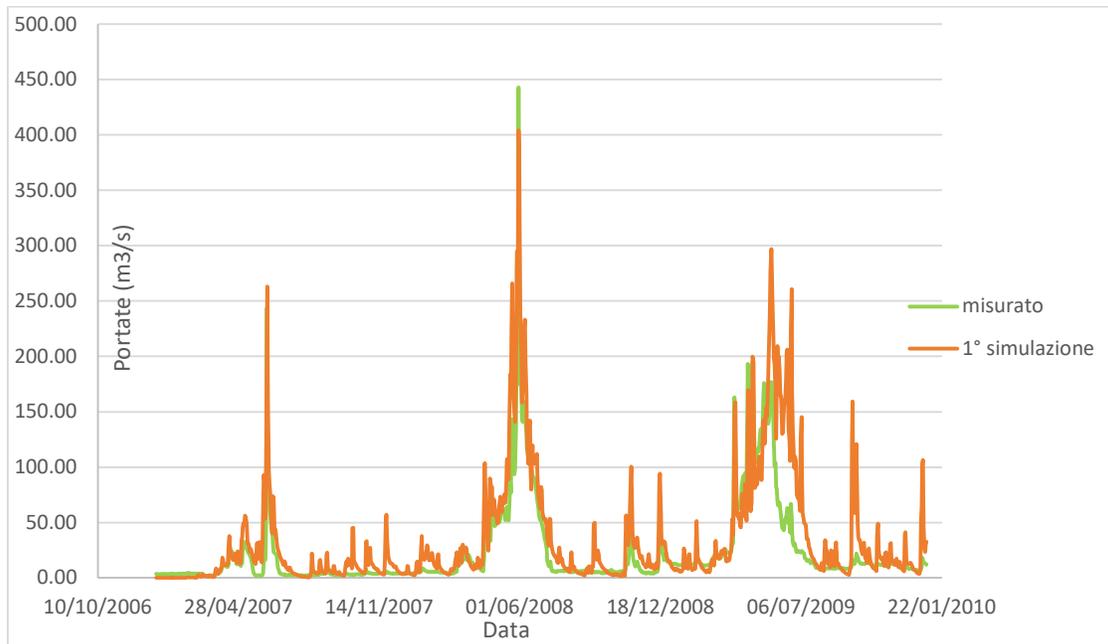


Figura 5.9: Confronto idrogramma misurato e simulato della 1° simulazione

Dall'analisi della Figura 5.9, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Si osserva una buona corrispondenza tra l'idrogramma misurato e simulato per gli anni 2007 e 2008, dove si vede inoltre come si riescano anche a simulare bene i picchi di portata e le curve di decrescita.
- Per l'anno 2009 invece si osserva una discrepanza anche notevole tra i due idrogrammi: quello simulato è traslato verso destra e presenta molti picchi anomali durante il periodo estivo ed autunnale, dovuti probabilmente ad una scarsa capacità del modello di “gestire” gli eventi intensi che si sono verificati nel 2009, come è possibile vedere dalle Figure 5.10 e 5.11 relative alle precipitazioni e alle temperature per gli anni 2007, 2008, 2009 delle stazioni di Limone Pancani e Valdieri. L'anno 2009 è stato caratterizzato da abbondanti precipitazioni soprattutto di tipo solido, e queste possono aver creato un accumulo di neve al suolo che il modello ha trasformato in un deflusso eccessivo. È necessario tuttavia notare come due stazioni su tre siano poste ad alta quota, ed è quindi molto probabilmente che il valore simulato sia ottenuto da una sovrastima della precipitazione solida.

Grazie a queste osservazioni, è probabile che l'inserimento di un numero maggiore di stazioni, collocate anche a quote più basse, possa portare ad un risultato migliore.

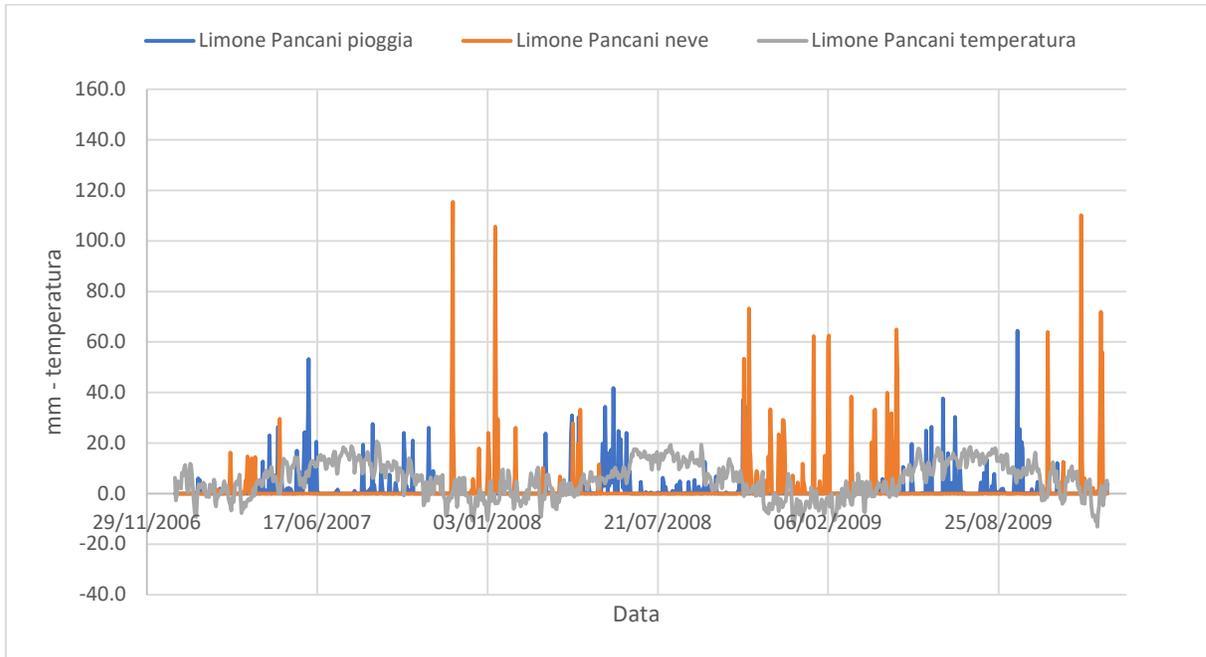


Figura 5.10: Grafico delle precipitazioni e della temperatura per la stazione di Limone Pancani

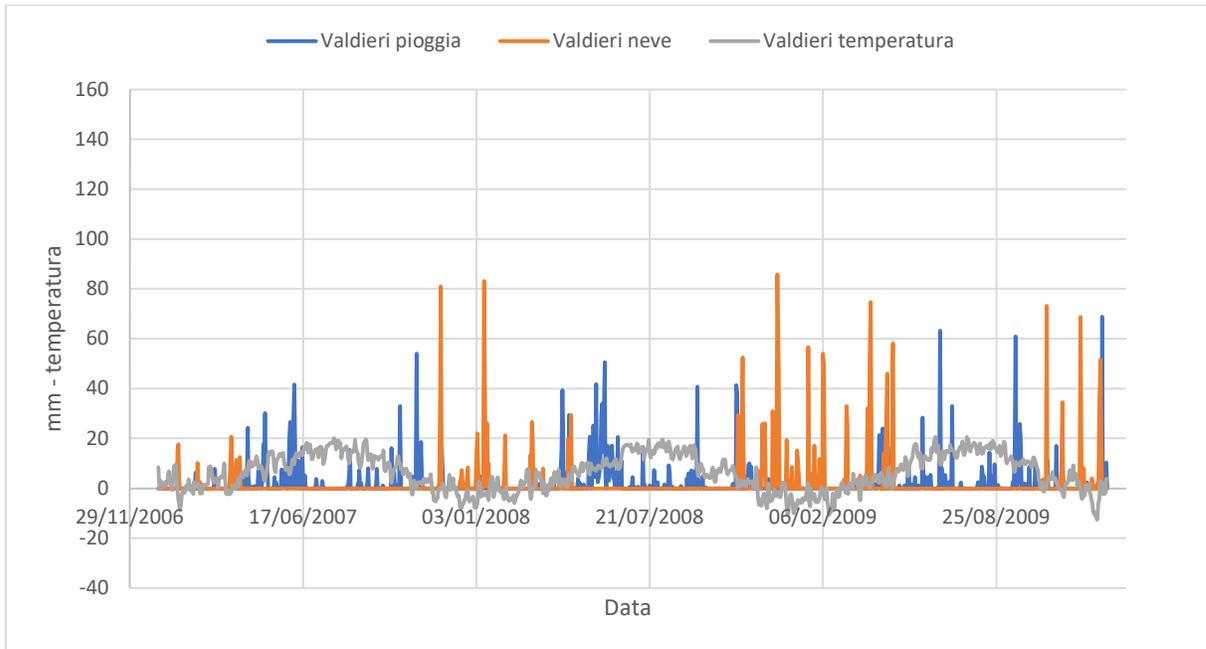


Figura 5.11: Grafico delle precipitazioni e della temperatura per la stazione di Valdieri

Di seguito si riporta lo scatter plot tra la portata simulata e quella misurata (Figura 5.12).

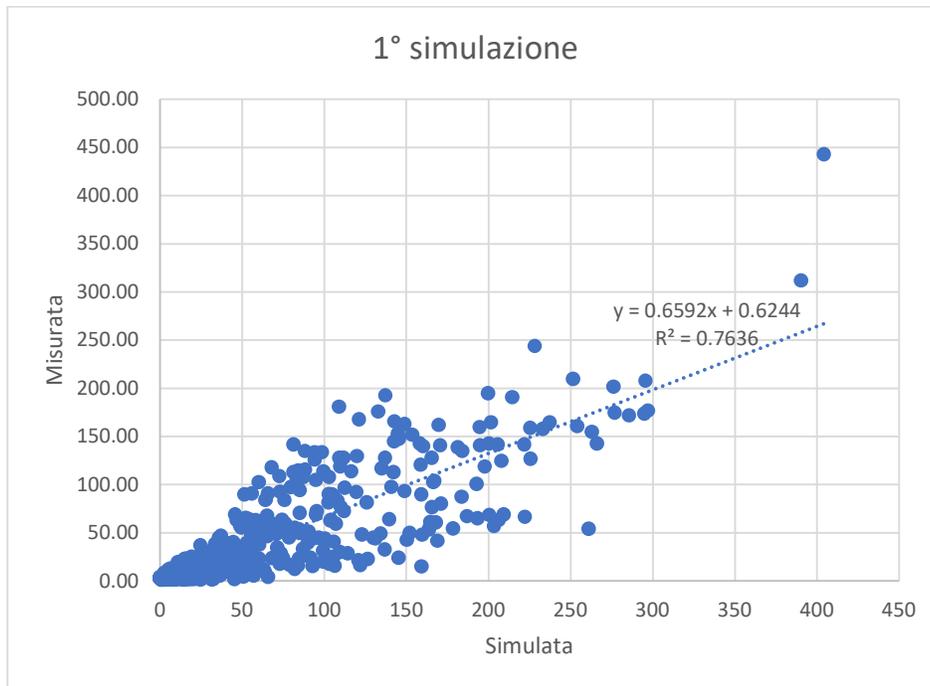


Figura 5.12: Scatter plot tra portata misurata e portata simulata per la 1° simulazione

Effettuando la media delle portate misurate giornalmente per tutto il periodo dal 2007 al 2009, si ottiene un valore pari a 23,61 m³/s, mentre la media delle portate simulate è di 34,89 m³/s. Di conseguenza è facile capire come in questo caso il modello sovrastimi le portate e di conseguenza i volumi.

5.6.2 Simulazione 2

In questa simulazione si sono considerate sempre le tre stazioni meteorologiche prese in esame nella precedente simulazione, effettuando tuttavia una nuova calibrazione sui parametri per vedere se fosse possibile ottenere un risultato migliore.

I parametri calibrati per la seconda simulazione sono riportati in Tabella 5.3, dove si riportano anche i parametri della precedente simulazione.

Tabella 5.3: Parametri calibrati 1° simulazione e 2° simulazione

Parametro	Valore calibrato 1° sim.	Valore calibrato 2° sim.
K _F	0,5	0,2
K _S	0,1	0,1
RFC	1	0,8
SFC	0,7	0,6

In Figura 5.13 si riporta il grafico con gli idrogrammi delle portate misurate e simulate per la seconda simulazione, mentre in Figura 5.14 si riporta un diagramma con il confronto tra gli idrogrammi simulati per la 1° e 2° simulazione.

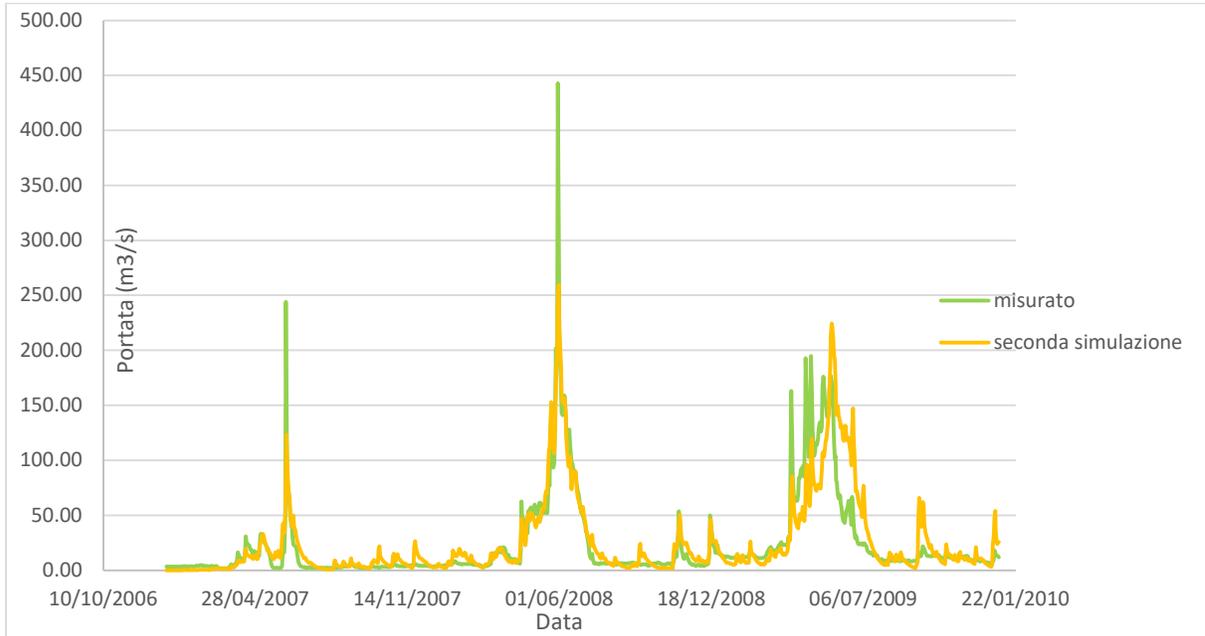


Figura 5.13: Confronto idrogramma misurato e simulato della 2° simulazione

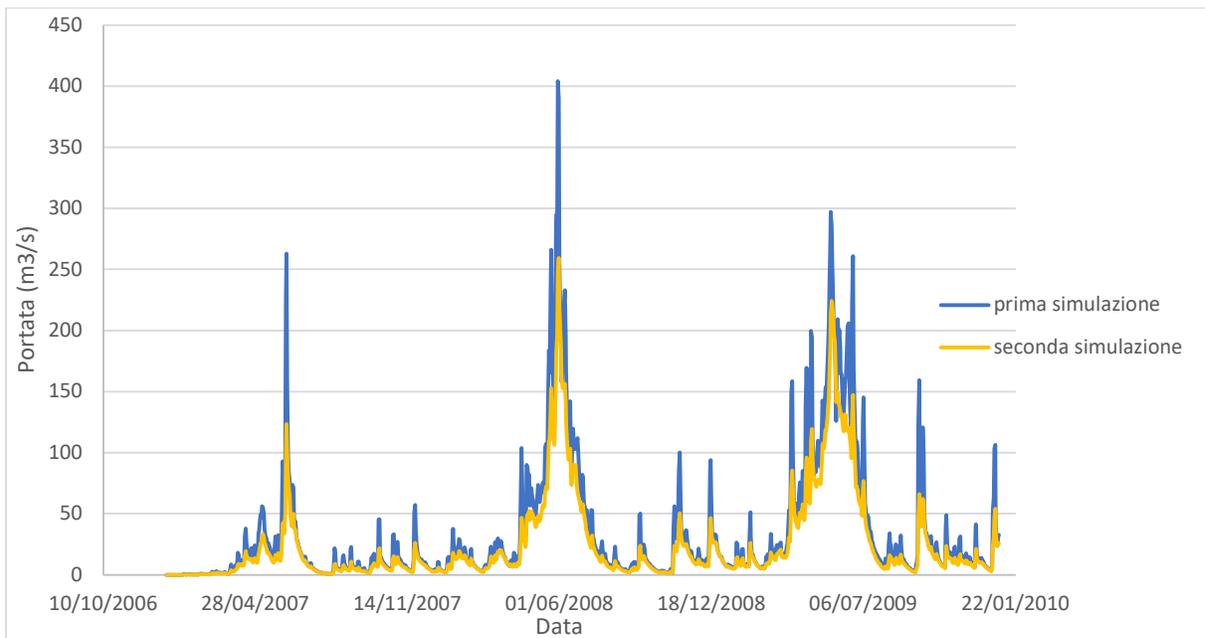


Figura 5.14: Confronto idrogrammi 1° e 2° simulazione

Effettuando la media delle portate simulate giornalmente per tutto il periodo dal 2007 al 2009, si ottiene un valore di $25,07 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre si ricorda che il valore di portata media è pari a $23,61 \text{ m}^3/\text{s}$, ottenendo un risultato certamente migliore rispetto alla prima simulazione, dove si aveva un valore medio di portata simulata pari a $34,89 \text{ m}^3/\text{s}$.

In Figura 5.15 si riporta lo scatter plot tra i valori di portata misurata e simulata per la seconda simulazione, grazie al quale si può osservare come si ottenga un valore di R^2 leggermente maggiore rispetto a quello della prima simulazione.

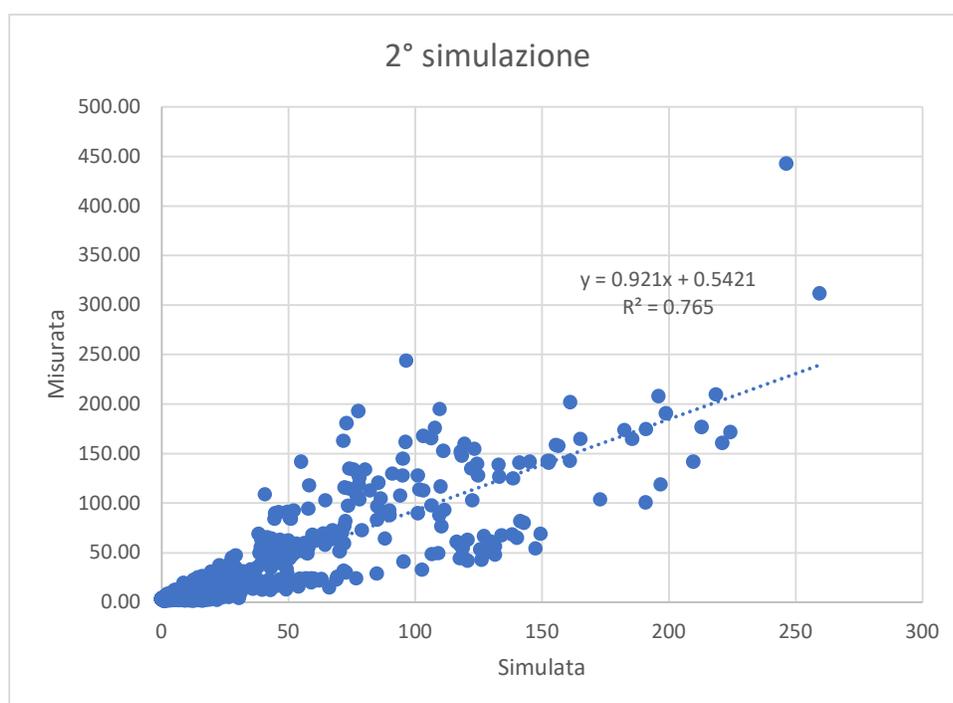


Figura 5.15: Scatter plot tra portata misurata e simulata per la 2° simulazione

È utile trarre delle conclusioni dall'analisi della Figura 5.13 per poter capire come i parametri influiscano sulla costruzione dell'idrogramma:

- Riducendo il valore di K_F si abbassano i picchi di portata.
- Riducendo il valore di RFCF e SFCF diminuiscono le portate durante tutto l'anno in corrispondenza di eventi di precipitazioni liquida o solida.

Analizzando la Figura 5.13 è possibile osservare come l'idrogramma simulato sia molto più simile all'idrogramma misurato rispetto a quello della prima simulazione, eccezion fatta per i picchi di portata che invece in questo caso non vengono ben simulati.

Persistono alcuni picchi anomali di portata nell'idrogramma simulato durante il periodo estivo, ma comunque meno accentuati rispetto alla prima simulazione.

Si possono di conseguenza trarre delle prime conclusioni: il programma può avere delle difficoltà nel simulare i picchi di portata in caso di eventi intensi nel periodo tardo primaverile, invece nel periodo estivo ed autunnale, in caso di precipitazioni abbondanti, sovente a carattere temporalesco, tende a sovrastimare la portata.

5.6.3 Simulazione 3

In questa simulazione si è deciso di mantenere inalterati i parametri calibrati grazie alla precedente simulazione, ma si è incrementato il numero delle stazioni meteorologiche considerate, portandole a 6 in maniera tale da avere una stazione per ogni sottobacino corrispondente ad una determinata valle.

Le stazioni considerate sono Limone Pancani, Cuneo Cascina Vecchia, Valdieri, Dronero, Fossano e Demonte.

Ad esempio, nelle prime due simulazioni, nessuna stazione meteorologica copriva la zona di Demonte, e di conseguenza il modello non poteva prendere in considerazione tutta questa zona dove scorre il tratto montano della Stura di Demonte.

Di seguito in Figura 5.16 si riporta il diagramma con l'idrogramma misurato e quello simulato per la 3° simulazione.

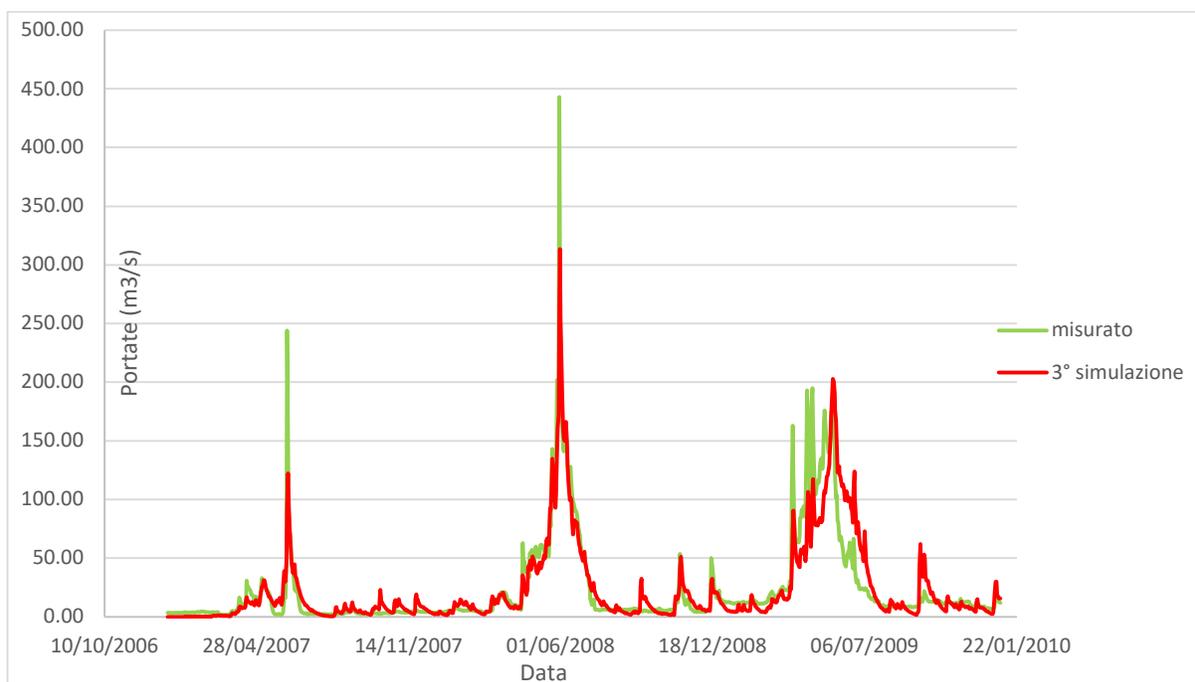


Figura 5.16: Confronto idrogramma misurato e simulato della 3° simulazione

Effettuando la media delle portate simulate giornalmente per tutto il periodo dal 2007 al 2009, si ottiene un valore di $23,31 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre si ricorda che il valore di portata media misurata è pari a $23,61 \text{ m}^3/\text{s}$, ottenendo un valore poco inferiore rispetto alla portata media misurata.

In Figura 5.17 si riporta lo scatter plot tra i valori di portata misurata e simulata per la terza simulazione, grazie al quale si può osservare come si ottenga un valore di R^2 decisamente maggiore rispetto a quello delle precedenti simulazioni.

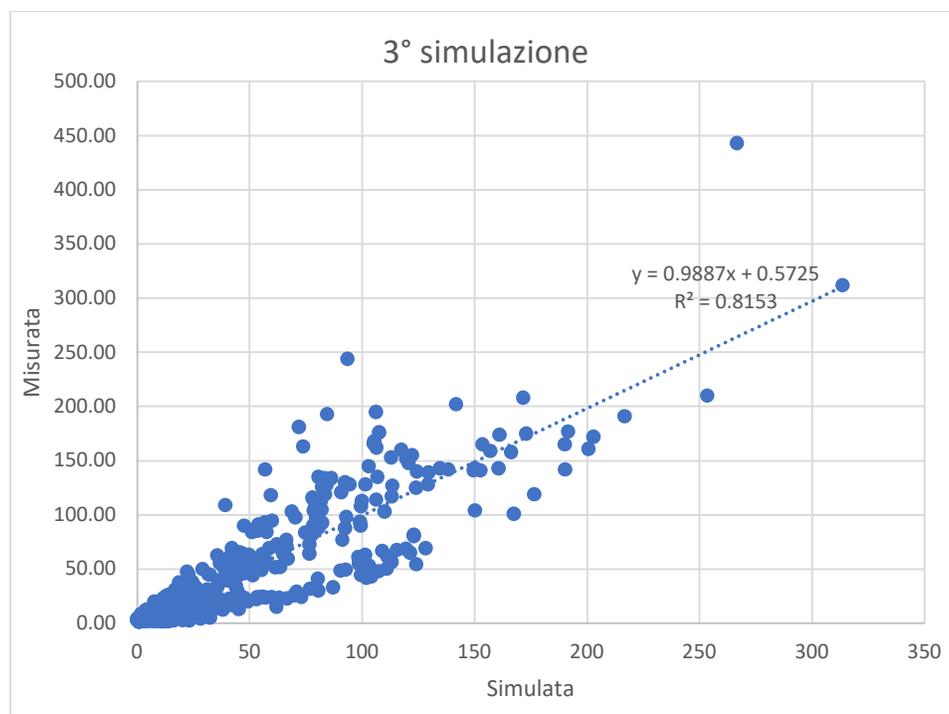


Figura 5.17: Scatter plot tra portata misurata e simulata per la 3° simulazione

Analizzando la Figura 5.16 si osserva come ci sia sempre una difficoltà nel simulare i picchi di portata in corrispondenza di eventi meteorologici intensi nel periodo tardo primaverile, mentre per il resto dell'anno l'idrogramma simulato risulta essere praticamente uguale a quello misurato, dove persistono comunque dei piccoli picchi anomali durante il periodo tardo estivo ed autunnale, ma con valori di portata sicuramente minori rispetto alle precedenti simulazioni.

Si può anche osservare la bontà della simulazione grazie al diagramma in Figura 5.18, dove vengono riportate le curve dei volumi cumulati alla sezione di chiusura di Fossano; si nota come la 3° simulazione fornisca un valore di volume di acqua che transita alla sezione di chiusura molto simile a quello misurato per tutti i tre anni.

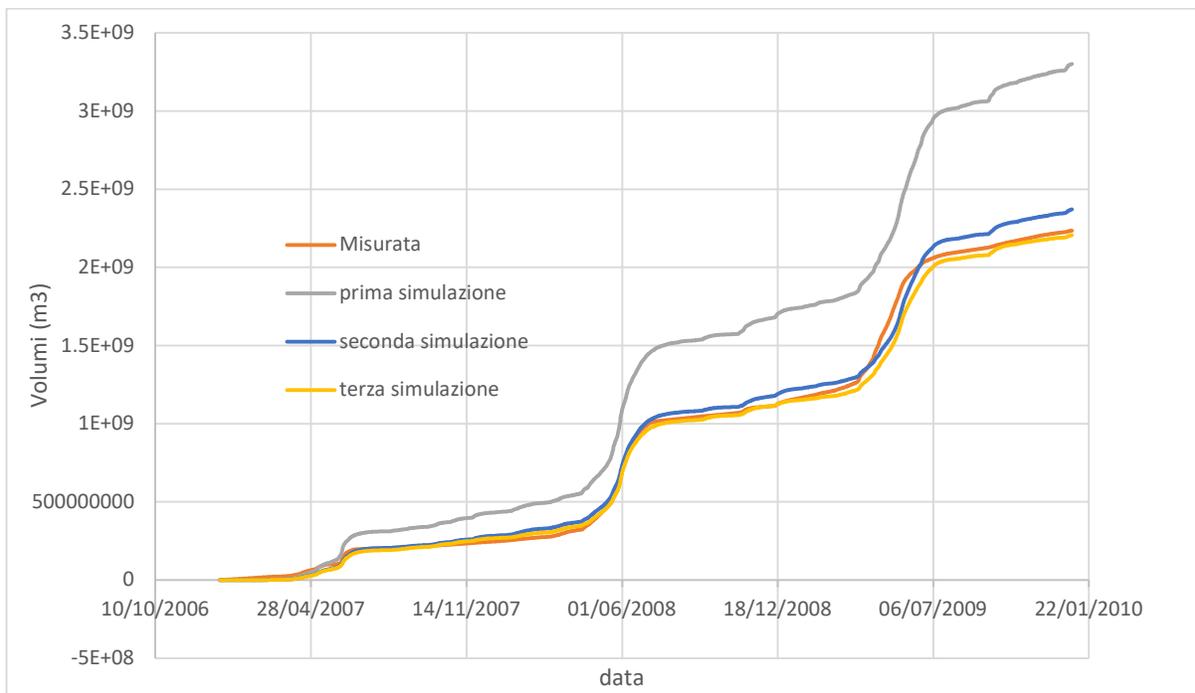


Figura 5.18: Volumi cumulati alla sezione di chiusura di Fossano

Grazie a questa simulazione, si può facilmente intuire come ad un numero maggiore di stazioni di rilevamento meteorologiche sia associato un miglior risultato in termini di idrogramma simulato e di curva dei volumi cumulati.

5.6.4 Simulazione 4

In quest'ultima simulazione, si sono considerate le stesse stazioni meteorologiche del paragrafo precedente, ma si è voluta effettuare una nuova calibrazione dei parametri per vedere se fosse possibile ottenere un risultato migliore del precedente.

In Tabella 5.4 si riportano i parametri calibrati.

Tabella 5.4: Parametri calibrati 3° simulazione e 4° simulazione

Parametro	Valore calibrato 3° sim.	Valore calibrato 4° sim.
K_F	0,2	0,2
K_S	0,1	0,1
RFC	0,8	0,81
SFC	0,6	0,61

In Figura 5.19 si riporta il grafico con gli idrogrammi della 3° e 4° simulazione.

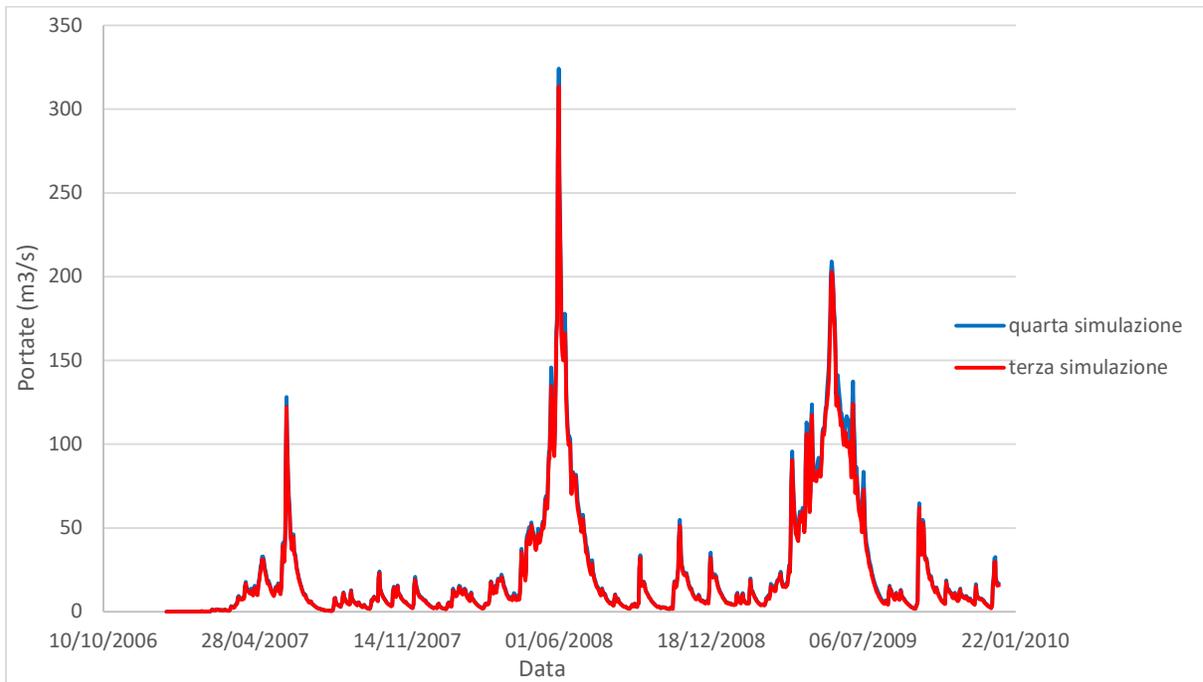


Figura 5.19: Confronto idrogrammi 3° e 4° simulazione

Come è possibile osservare dal grafico sopra riportato, le differenze tra le due simulazioni sono minime. Effettuando la media delle portate simulate giornalmente per tutto il periodo dal 2007 al 2009, si ottiene un valore di $23,73 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre si ricorda che il valore di portata media misurata è pari a $23,61 \text{ m}^3/\text{s}$, ottenendo un valore poco maggiore rispetto alla portata media.

Si riporta in Figura 5.20 lo scatter plot tra portate misurate e simulate, con indicazione di un R^2 leggermente inferiore rispetto a quello della simulazione precedente.

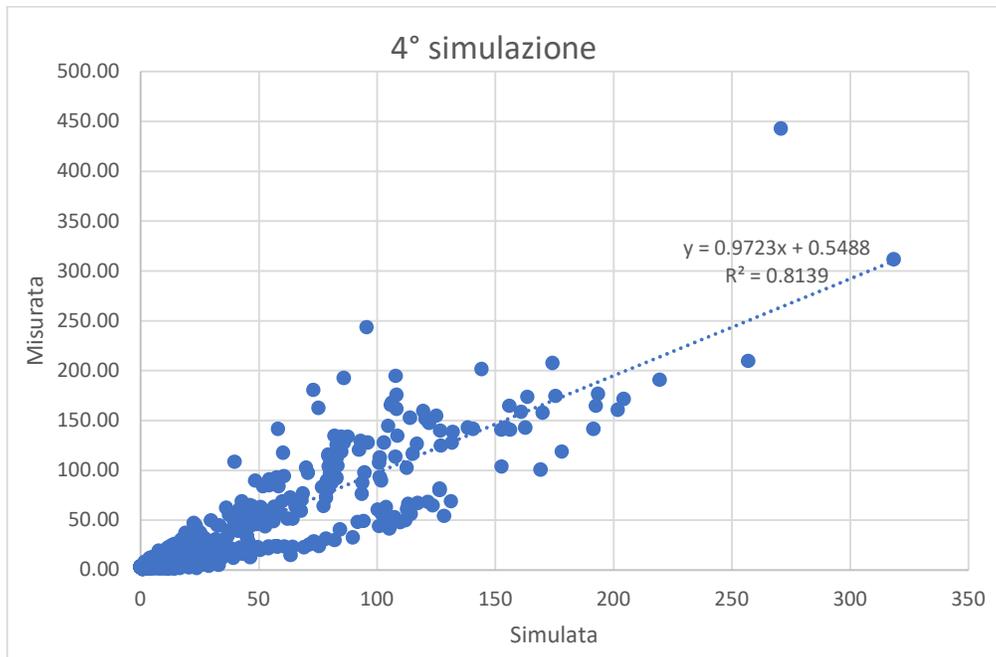


Figura 5.20: Scatter plot tra portata misurata e simulata per la 4° simulazione

È possibile apprezzare il risultato raggiunto dal grafico dei volumi cumulati mostrato in Figura 5.21, grazie al quale è possibile osservare come la 3° simulazione fornisca un volume alla sezione di chiusura leggermente inferiore rispetto al volume misurato, mentre la 4° simulazione fornisce un valore del volume simulato leggermente superiore.

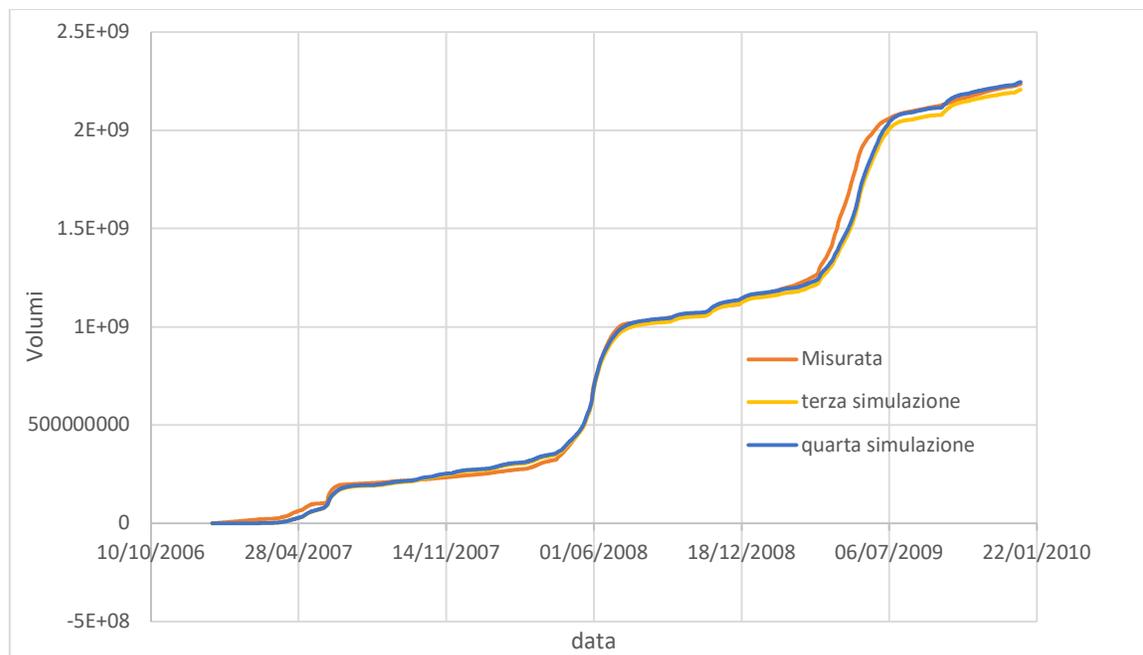


Figura 5.21: Volumi cumulati alla sezione di chiusura di Fossano

5.6.5 Riepilogo simulazioni

Le simulazioni effettuate nei paragrafi precedente hanno mostrato come la 3° e la 4 simulazione forniscano i risultati migliori, sia in termini di massima verosimiglianza tra gli idrogrammi misurati e simulati, grazie all'osservazione del diagramma stesso e dal risultato fornito da R^2 , nonché in termini di volumi, dal momento che, come mostrato in Figura 5.21, queste ultime due simulazioni sono quelle che più si avvicinano al volume misurato alla sezione di chiusura di Fossano.

Di seguito in Tabella 5.5 si riporta una sintesi dei risultati sopra ottenuti per le 4 simulazioni.

Tabella 5.5: Riepilogo dati principali simulazioni

	Misurato	1° simulazione	2° simulazione	3° simulazione	4° simulazione
N. stazioni meteorologiche	-	3	3	6	6
RFCF	-	1	0,8	0,8	0,81
SFCF	-	0,7	0,6	0,6	0,61
K_F	-	0,5	0,2	0,2	0,2
K_S	-	0,1	0,1	0,1	0,1
Q media (m ³ /s)	23,61	34,89	25,07	23,31	23,73
R^2	-	0,7636	0,765	0,8153	0,8139
Volume finale (milioni m ³)	2235	3304	2374	2208	2247
Differenza volume (milioni m ³)	-	1069 sovrastimato	139 sovrastimato	-27 sottostimato	12 sovrastimato
Errore (percentuale)		47%	6,22%	-1,21%	0,54%

6. CONCLUSIONI

Nella stesura della presente tesi si è dedicato ampio spazio alla descrizione dei diversi metodi che si hanno a disposizione in letteratura per la modellazione afflussi-deflussi (Capitolo 2).

La problematica principale che si è potuta riscontrare dall'analisi delle diverse tipologie di modelli afflussi-deflussi è quella legata alla loro complessità. Infatti si è passati dai modelli fisicamente basati, che riproducono il più fedelmente possibile tutti i fenomeni fisici che entrano in gioco nel bilancio idrologico, ai modelli concettuali, che parametrizzano le principali variabili fisiche del problema, fino ai modelli a scatola chiusa, o black box, che forniscono solo una relazione matematica tra dati di input e output senza preoccuparsi degli aspetti fisici che avvengono all'interno del bilancio idrologico.

La grande accuratezza dei modelli fisicamente basati comporta l'utilizzo di equazioni differenziali anche complesse, le quali obbligano l'utente ad inserire molteplici dati di input con risoluzioni spaziali e temporali molto elevata. Di conseguenza tali metodi si possono applicare soltanto in casi in cui si abbiano a disposizione tutte le informazioni che il modello richiede in input, altrimenti si rischiano di fornire risultati totalmente diversi rispetto alla realtà in cui ci si trova.

I modelli black box risultano essere i più semplici di tutti, dal momento che è necessario trovare solo un operatore matematico che possa mettere in relazione i dati di input con quelli di output. Tuttavia essi trascurano completamente i fenomeni fisici che intervengono nel bilancio idrologico, non potendo di conseguenza apprezzare come determinati fenomeni possano influire o meno nella formazione del deflusso. Di conseguenza è impossibile effettuare qualsiasi ragionamento sul singolo fenomeno, ad esempio lavorando solo sulle precipitazioni, sull'intercettazione vegetale, ecc.

I modelli concettuali risultano essere un buon compromesso tra quelli precedentemente descritti, in quanto non richiedono una precisione elevata dei dati di input come per i modelli fisicamente basati, e non trascurano i fenomeni fisici che entrano in gioco nel bilancio idrologico come avviene per i modelli black box, in quanto parametrizzano le diverse variabili.

Dal momento che il bacino in esame è strumentato, ma la risoluzione spaziale dei dati non è tale da poter utilizzare un modello fisicamente basato, come non sono neanche disponibili tutte le informazioni di input, si è optato per l'utilizzo dei modelli concettuali. Questi modelli possono ben rappresentare i fenomeni fisici, parametrizzando le variabili che entrano in gioco nel bilancio idrologico, oltre al fatto che richiedono un numero non elevato di dati di input facilmente reperibili per il bacino oggetto di studio.

Nel Capitolo 4, dopo aver scelto su quale famiglia di metodi orientarsi, si è dovuto individuare uno fra i tanti modelli disponibili in letteratura appartenenti al gruppo dei modelli concettuali. La scelta è ricaduta sul modello HBV sviluppato nel 1976 da Bergstrom, modello di tipo concettuale semi-distribuito, che è risultato essere il migliore per il caso in esame.

Tra le tante versioni di questo modello si è optato per quella HBV-EC, sviluppato dall'ente di ricerca canadese. Le ragioni alla base di tale scelta risiedono principalmente nella disponibilità commerciale di un software user-friendly sviluppato dallo stesso ente, denominato GreenKenue, nella possibilità di inserire il DTM (Digital Terrain Model) del bacino e nella ridotta mole di dati di input che il modello richiede per il suo funzionamento.

L'inserimento del DTM ha permesso di individuare lo spartiacque del bacino, informazione fondamentale per poter capire quanta area contribuisca effettivamente al deflusso idrico. Inoltre, sempre grazie al DTM, si possono individuare le fasce altimetriche (utili per il corretto funzionamento del programma), la pendenza dei versanti (utile per poter individuare la velocità del ruscellamento del deflusso e quanta acqua invece si infiltra), l'uso del suolo (fondamentale per poter apprezzare l'effetto dell'intercettazione vegetale e come questa interagisca con altri fenomeni, ad esempio l'evapotraspirazione), ed infine la suddivisione in zone climatiche, ognuna delle quali afferenti ad un'unica stazione di rilevamento meteorologica.

Per quanto concerne i dati di input, è sufficiente inserire i valori giornalieri e medi mensili delle precipitazioni, siano esse liquide o solide, la temperatura media giornaliera e il valore dell'evapotraspirazione potenziale mensile. È intuitivo quindi capire come il modello richieda pochi dati di input, oltre al DTM, e come questi siano oltretutto facilmente reperibili.

Per quanto riguarda i valori di precipitazione e temperatura, questi sono reperibili grazie alle stazioni di rilevamento di ARPA Piemonte, i cui dati sono resi pubblici e facilmente scaricabili.

Più complicato invece risulta essere il dato sull'evapotraspirazione potenziale (ETO o ETP). Infatti gli autori del modello suggeriscono di utilizzare la formula di Penman o di Thornthwaite, formule che tuttavia, oltre a risultare ormai desuete, possono fornire valori non completamente attinenti alla realtà. Dopo aver sperimentato diverse formule per la stima dell'evapotraspirazione potenziale, si è scelto di utilizzare il metodo proposto da Merlo per la Regione Piemonte. Tale metodo infatti fornisce i valori di ETP validi per tutta la Regione Piemonte e variabili in base alla quota in cui ci si trova.

Il modello, essendo di tipo concettuale, richiede la calibrazione dei parametri che simulano i fenomeni fisici facenti parte del bilancio idrologico. Si è visto che, in base a quanto riportato dagli

autori, non sia necessario effettuare una calibrazione di tutti i parametri, i quali risultano validati su versanti alpini come il caso in esame, ma come sia sufficiente calibrare solo un numero ristretto di questi.

Tale scelta è fatta per non forzare eccessivamente il modello, al fine di non avere un puro adattamento matematico, discostandosi troppo dal valore del parametro che rappresenta il fenomeno fisico in esame, e per evitare tempi eccessivamente lunghi nella fase di calibrazione. Infatti tale programma non permette una calibrazione automatica dei parametri, ad esempio con metodi di tipo Monte Carlo, ma consente di effettuare una calibrazione manuale dei singoli parametri andando di volta in volta ad osservare il risultato ottenuto fino al raggiungimento di un idrogramma il più simili possibile a quello reale. È evidente come una calibrazione effettuata su un numero ristretto di parametri, che gli autori consigliano di variare, permetta un più rapido raggiungimento del risultato desiderato.

All'interno del Capitolo 5 sono racchiusi tutti i risultati del presente lavoro, dove non viene riportata la sola simulazione finale, ovvero quella che si è ritenuta essere la migliore a livello qualitativo e quantitativo, ma vengono discusse diverse simulazioni.

Si è ritenuto di fondamentale importanza descrivere le principali simulazioni che hanno portato a quella finale, per poter meglio osservare come i diversi parametri oggetto di calibrazione, limitatamente a quelli consigliati dagli autori, vadano a modificare l'idrogramma simulato.

Infatti, l'obiettivo della presente tesi è quello di ottenere dal programma HBV-EC un idrogramma simulato ed un grafico dei volumi cumulati simulati alla sezione di chiusura di Fossano che rispecchino il più fedelmente possibile i relativi diagrammi reali, sia in termini qualitativi che quantitativi.

Oltre alla calibrazione dei parametri, è necessario descrivere in maniera accurata il bacino, tramite la corretta individuazione delle classi di uso del suolo, la suddivisione in un opportuno numero di fasce altimetriche, dell'orientazione, della pendenza dei versanti e nella scelta di opportune zone climatiche afferenti a determinate stazioni di rilevamento meteorologiche.

Di seguito si riportano le principali osservazioni desunte dalle simulazioni effettuate, oltre a descrivere i possibili sviluppi futuri a cui può portare questo lavoro.

Osservazioni desunte dai risultati delle simulazioni

- Un numero limitato di stazioni meteorologiche difficilmente permette di ottenere un buon idrogramma simulato: all'interno del bacino, deve essere presente almeno una stazione di

rilevamento meteorologica (pluviometro) per ogni sottobacino, tale per cui sia caratterizzato ognuno di essi. Il sottobacino generalmente comprende al suo interno una sola valle caratterizzata dalla presenza di un corso d'acqua principale.

- È necessario scegliere un numero adeguato di fasce altimetriche in cui si suddivide il bacino in base al massimo dislivello tra la quota minima e la quota massima del bacino. Maggiore è il dislivello, maggiori saranno le fasce altimetriche. Si è comunque osservato che in caso di dislivelli importanti come nel caso in esame (2928 metri), sia opportuno individuare una fascia altimetrica ogni 250 metri circa. Una fascia con altezza maggiore porta inevitabilmente ad un'approssimazione troppo grossolana del bacino, dal momento che il modello associa ad ogni fascia una temperatura media caratteristica per l'intera altezza.
- I coefficienti RFC e SNC modificano rispettivamente il quantitativo di precipitazione liquida e solida caduta sul bacino. Se i coefficienti hanno valore pari ad 1, non varia la misura di precipitazione liquida e solida fornita dai pluviometri, mentre per valori maggiori dell'unità, si ha un aumento della quantità di precipitazione caduta, con conseguente incremento del dato di portata osservabile generalmente durante tutto l'anno ed in particolare durante tutti gli eventi meteorici, siano essi solidi o liquidi (Figura 6.1).

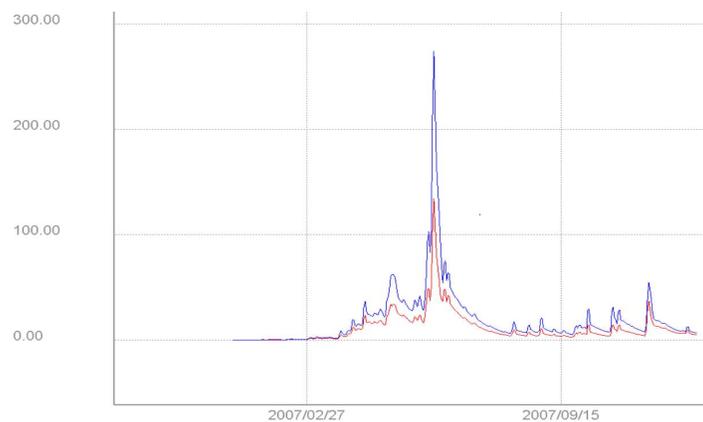


Figura 6.1: Idrogrammi delle portate a confronto: in blu è riportato un idrogramma ottenuto con valori di RFC e SFCF maggiori rispetto a quelli utilizzati per l'idrogramma in rosso

- Il coefficiente K_F caratterizza la componente veloce del deflusso. Più il coefficiente è elevato, maggiore sarà la portata simulata durante gli eventi liquidi. Si è osservato infatti come aumentando il valore di K_F , si ottenga un idrogramma con picchi di portata maggiori durante gli eventi liquidi (Figura 6.2).

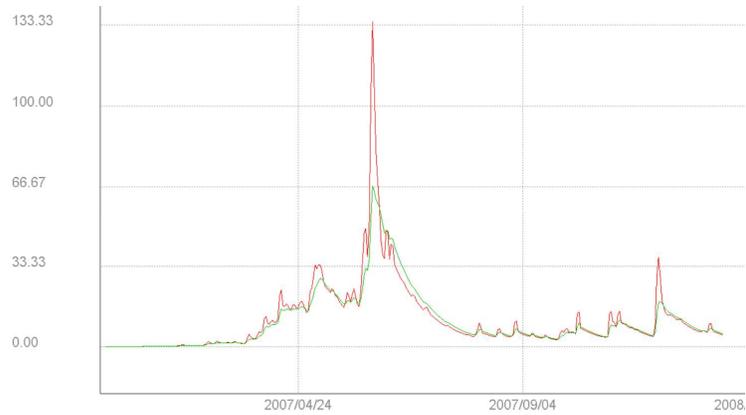


Figura 6.2: Idrogrammi a confronto: in rosso è riportato un idrogramma ottenuto con un valore di K_F maggiore rispetto a quello utilizzato per l'idrogramma in verde

- Il coefficiente K_S regola la componente del deflusso lento. Questa rappresenta l'acqua che viene trattenuta nel suolo e rilasciata lentamente, in particolare durante il periodo estivo. Si è infatti osservato che un aumento di questo coefficiente comporti un generale decremento della portata durante il periodo estivo (Figura 6.3).

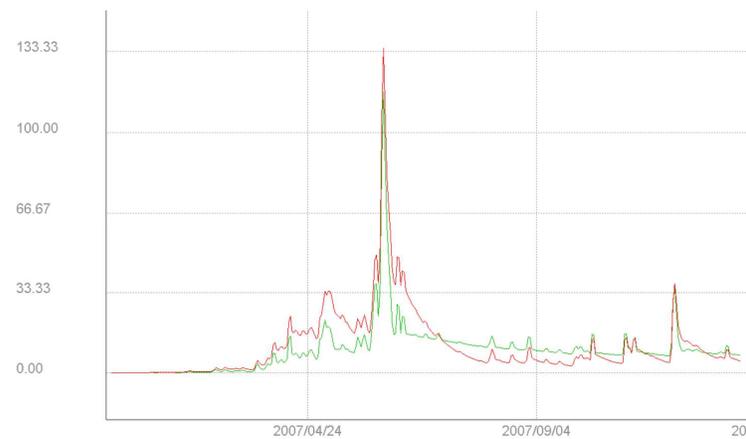


Figura 6.3: Idrogrammi a confronto: in rosso è riportato un idrogramma ottenuto con un valore di K_S maggiore rispetto a quello utilizzato per l'idrogramma in verde

- Il maggior problema del modello è quello di non essere in grado di simulare perfettamente gli eventi estremi. Infatti, qualora si cerchi di ottenere un idrogramma che simuli il più fedelmente possibile i picchi maggiori di portata, si ottiene una sovrastima generale dei volumi che transitano alla sezione di chiusura, come si è potuto osservare nella prima simulazione.

Sviluppi futuri

Come già riportato in precedenza, lo scopo della presente tesi è duplice: da un lato fornire una panoramica globale sui modelli concettuali per concentrarsi infine sull'utilizzo del modello HBV-EC, spiegandone in maniera dettagliata il funzionamento, dall'altro lato fornire un'analisi critica di diverse simulazioni per osservare come i parametri influenzano i risultati finali.

La simulazione finale ha portato ad un idrogramma che ha fornito dei valori di volume cumulato d'acqua alla sezione di chiusura molto simili a quelli realmente registrati, ottenendo di conseguenza un risultato che sembra essere soddisfacente.

Questo lavoro può servire come base per ulteriori future implementazioni del modello. Per il bacino in esame, essendo già predisposto tutto il modello, possono essere facilmente effettuate simulazioni per più anni, oppure per anni diversi (inserendo i valori di precipitazione e temperatura per i nuovi anni della simulazione), continuando ad utilizzare i parametri calibrati in questa tesi, in quanto già testati su più anni.

Un altro sviluppo futuro potrebbe essere quello di provare ad implementare questo modello su altri bacini piemontesi ed osservare come questo si comporti, ovvero se i parametri calibrati in questa tesi possano essere validi per più bacini piemontesi, oppure se sia necessaria una nuova calibrazione per ottenere dei risultati soddisfacenti.

Difatti, grazie all'utilizzo del DTM, può essere riportato qualsiasi territorio sul modello HBV-EC, e tutti i bacini possono essere identificati semplicemente inserendo sul modello la localizzazione della sezione di chiusura.

Questa tesi di fatto rappresenta solo l'inizio per un lavoro molto più esteso, essendo questa limitata ad un unico bacino montano piemontese. Avendo testato il modello prima a scala di singoli sottobacini e poi all'intero bacino, è stato possibile osservare come il modello risponda positivamente anche se il territorio risulta complesso.

Come è possibile immaginare, il lavoro futuro legato all'implementazione del modello ad altri bacini non risulta sicuramente semplice e veloce. Tuttavia questo lavoro può servire, come già detto in precedenza, come base per avere una visione chiara e schematica sul funzionamento del modello e su come i parametri influenzano il comportamento dello stesso. Il lavoro più corposo per un'analisi estesa a tutti i bacini piemontesi sarà da addebitarsi alla modellazione di ogni bacino ed ad una eventuale ricalibrazione di alcuni parametri, anche se la speranza è che i risultati ottenuti in questa tesi possano essere anche utilizzabili per altri bacini.

INDICE DELLE FIGURE

CAPITOLO 2

<i>Figura 2.1: Schematizzazione del bacino idrologico o imbrifero e bacino idrogeologico.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2: Schematizzazione del bilancio idrologico. P indica le precipitazioni E e T sono rispettivamente l'evaporazione e la traspirazione, Q e G sono i deflussi superficiali e sotterranei.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.3: Idrogramma pluriennale della Stura di Demonte a Fossano (portate in m³/s).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.4: Precipitazioni registrate a Limone Pancani vs. idrogramma delle portate a Fossano.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5: Schema generale a blocchi di un modello di trasformazione afflussi-deflussi (Becciu e Paoletti, 2010).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.6: Schematizzazione dei principali processi coinvolti nel bilancio idrologico ed energetico della singola cella.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.7: Modellazione matematica dei singoli fenomeni adottata nel modello SHE.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.8: Schematizzazione modello concettuale afflussi-deflussi.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.9: Schematizzazione modelli black box.....</i>	<i>16</i>

CAPITOLO 3

<i>Figura 3.1: Ortofoto del Piemonte (tratta da Google Earth).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.5: Ortofoto del bacino della Stura di Demonte a Fossano. Lo spartiacque è individuabile dalla linea nera, mentre in rosso è individuabile la Stura di Demonte, in arancione il Gesso ed in blu il Vermenagna (rielaborazione da Google Earth).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.6: Spartiacque del Bacino della Stura di Demonte a Fossano (Claps et al. 2013).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.7: Bacino della Stura di Demonte con indicazione delle stazioni meteorologiche (rielaborazione tramite software QGIS).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.8: Suddivisione del bacino secondo la regola dei poligoni di Thiessen (elaborazione effettuata tramite software HBC-EC).....</i>	<i>24</i>

CAPITOLO 4

<i>Figura 4.1: Schema di funzionamento del modello HBV (Seibert et al. 2012).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.2: Interfaccia software GreenKenue™ che implementa il modello HBV-EC.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.3: DTM della zona oggetto di studio.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.4: Finestra per impostazioni aree di drenaggio.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.5: Finestra per inserimento dei dati inerenti la simulazione.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.6: Finestra per inserire i parametri per ogni zona climatica.....</i>	<i>31</i>

<i>Figura 4.7: Idrogramma ottenuto dal modello HBV-EC.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.8: Suddivisione del bacino in fasce altimetriche.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.9: Suddivisione del bacino secondo l'uso del suolo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.10: Suddivisione del bacino in base all'orientazione.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.11: Suddivisione del bacino in base all'orientamento.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.12: Estratto del file .met per l'inserimento dei dati meteorologici per ogni stazione.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.13: Evaporimetro e lisimetro.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.14: Schema del deflusso alla sezione di chiusura (Q1 coincide con Q_f, mentre Q2 coincide con Q_s).....</i>	<i>44</i>

CAPITOLO 5

<i>Figura 5.1: Suddivisione del bacino in classi di uso del suolo ottenute dal modello HBV-EC. In verde sono identificate le aree occupate da foreste, mentre in rosso è indicato il suolo libero o suolo nudo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.2: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in classi di uso del suolo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.3: Suddivisione del bacino in fasce altimetriche.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.4: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in fasce altimetriche.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.5: Suddivisione del bacino secondo l'orientazione.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.6: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in base all'orientazione dei versanti.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.8: Suddivisione del bacino secondo la pendenza dei versanti.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.8: Finestra del programma HBV-EC riportante la suddivisione del bacino in base alla pendenza dei versanti.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.9: Confronto idrogramma misurato e simulato della 1° simulazione.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.10: Grafico delle precipitazioni e della temperatura per la stazione di Limone Pancani.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.11: Grafico delle precipitazioni e della temperatura per la stazione di Valdieri.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.12: Scatter plot tra portata misurata e portata simulata per la 1° simulazione.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.13: Confronto idrogramma misurato e simulato della 2° simulazione.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.14: Confronto idrogrammi 1° e 2° simulazione.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.15: Scatter plot tra portata misurata e simulata per la 2° simulazione.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.16: Confronto idrogramma misurato e simulato della 3° simulazione.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.17: Scatter plot tra portata misurata e simulata per la 3° simulazione.....</i>	<i>63</i>

<i>Figura 5.18: Volumi cumulati alla sezione di chiusura di Fossano.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.19: Confronto idrogrammi 3° e 4° simulazione.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.20: Scatter plot tra portata misurata e simulata per la 4° simulazione.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.21: Volumi cumulati alla sezione di chiusura di Fossano.....</i>	<i>66</i>

CAPITOLO 6

<i>Figura 6.1: Idrogrammi delle portate a confronto: in blu è riportato un idrogramma ottenuto con valori di RFCF e SFCF maggiori rispetto a quelli utilizzati per l'idrogramma in rosso.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 6.2: Idrogrammi a confronto: in rosso è riportato un idrogramma ottenuto con un valore di K_F maggiore rispetto a quello utilizzato per l'idrogramma in verde.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 6.3: Idrogrammi a confronto: in rosso è riportato un idrogramma ottenuto con un valore di K_S maggiore rispetto a quello utilizzato per l'idrogramma in verde.....</i>	<i>72</i>

INDICE DELLE TABELLE

CAPITOLO 3

<i>Tabella 3.1: Estratto della tabella riportanti le informazioni geomorfoclimatiche da Claps et al. 2013.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 3.2: Stazione meteorologica Terme di Valdieri.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 3.3: Stazione meteorologica Fossano.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 3.4: Stazione meteorologica Limone Pancani.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 3.5: Stazione meteorologica Dronero.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 3.6: Stazione meteorologica Demonte.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 3.7: Stazione meteorologica Cuneo.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 3.8: Stazione idrometrica Fossano.....</i>	<i>25</i>

CAPITOLO 4

<i>Tabella 4.1: valori di evapotraspirazione potenziale mensile (Merlo, 2001).....</i>	<i>42</i>
--	-----------

CAPITOLO 5

<i>Tabella 5.1: Parametri non oggetto di calibrazione del modello HBV-EC.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabella 5.2: Parametri calibrati 1° simulazione.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabella 5.3: Parametri calibrati 1° simulazione e 2° simulazione.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 5.4: Parametri calibrati 3° simulazione e 4° simulazione.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabella 5.5: Riepilogo dati principali simulazioni.....</i>	<i>67</i>

BIBLIOGRAFIA

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2), 45-59.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. In *Irrigation and Drainage*.
- Autorità di Bacino del Fiume Po. (2001). Progetto di piano stralcio per l'assetto idrogeologico – Linee generali di assetto idraulico e idrogeologico – Elaborato Piemonte: Tanaro.
- Becciu, G., Paoletti, A., (2010). Fondamenti di costruzioni idrauliche. Milano. UTET Scienze Tecniche. P. 576.
- Berghuijs, W. R., Woods, R. A., & Hrachowitz, M. (2014). A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. *Nature Climate Change*, 4(7), 583-586.
- Bergström, S. (1976). Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. *Smhi*.
- Bergström, S. (1995). The HBV model (Chapter 13), in: Computer Models of Watershed Hydrology, edited by: Singh, V. P., Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 443-476.
- Bongio, M., Avanzi, F., & De Michele, C. (2016). Hydroelectric power generation in an Alpine basin: Future water-energy scenarios in a run-of-the-river plant. *Advances in Water Resources*, 94, 318-331.
- Bongio, M., (2014). La valutazione della disponibilità idroelettrica futura del Torrente Anza a Ceppo Morelli. Tesi di Laurea. Politecnico di Milano.
- Canadian Hydraulics Centre Research (2010). Green Kenue Reference Manual.
- Castany G., (1985). Idrogeologia. Principi e metodi. Dumond. Dario Flaccovio Editore. p. 243.
- Claps P., P. Allamano, (2010) "Conoscenza della riserva idrica nevosa anche attraverso l'attivazione di siti sperimentali di misura e messa a punto di indicatori dello stato quantitativo delle risorse idriche", Relazione finale del Progetto, Politecnico di Torino e Regione Piemonte, Luglio 2010.
- Cugerone K., Allamano P., Salandin A., Barbero S., (2012). Stima della Precipitazione in Siti di Alta Quota, Neve e Valanghe, n°77, pp. 36-43.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24 revised 1977. FAO, Roma.

- Duchon, C. E., & Essenberg, G. R. (2001). Comparative rainfall observations from pit and aboveground rain gauges with and without wind shields. *Water Resources Research*.
- Freeze, R. A., & Harlan, R. L. (1969). Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*.
- Gallo, E., D. Ganora, F. Laio, A. Masoero, P. Claps. (2013) Atlante dei Bacini Imbriferi Piemontesi, Rapporto finale del progetto RENERFOR-ALCOTRA, Regione Piemonte, 978-88-96046-06-7
- Goodison, B., Louie, P., and Yang, D. (1998). Wmo solid intercomparison, final repor. Technical Report WMO/TD-872, World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland.
- Groisman, P. Y., & Legates, D. R. (1994). The accuracy of United States precipitation data. *Bulletin - American Meteorological Society*.
- Hamilton, A. S., Hutchinson, D. G., & Moore, R. D. (2000). Estimating winter streamflow using conceptual streamflow model. *Journal of Cold Regions Engineering*, 14(4), 158–175.
- Jost, G., Dan Moore, R., Smith, R., & Gluns, D. R. (2012). Distributed temperature-index snowmelt modelling for forested catchments. *Journal of Hydrology*, 420–421, 87–101.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1–4), 272–288.
- Merlo C., (2001). Metodologia di verifica dei fabbisogni lordi nei comprensori irrigui della Regione Piemonte. Torino.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, hare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*.
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M. & Musy, A., (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(1), pp.95–109.
- Schaefli, B. et al., (2005). Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods (2020-2049 , 2070-2099) Technical report.
- Seibert, J. (1999). Regionalisation of parameters for a conceptual rainfallrunoff model, *Agr. Forest Meteorol.*, 98, 279–293.
- Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325.
- Sevruk, B. (1982). Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. In *Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use*.

Sevruk, B. and Klemm, S. (1989). Precipitation Measurements, chapter Types of standard precipitation gauges, pages 227-232. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Smith, R. B. (1979). The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*.

Stahl, K., Moore, R. D., Shea, J. M., Hutchinson, D., & Cannon, A. J. (2008). Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios. *Water Resources Research*, 44(2).

Regione Piemonte, ARPA Piemonte (2020). Report 2020 – Analisi clima regionale periodo 1981-2010.

Regione Piemonte, Direzione Pianificazione Risorse Idriche. (2004). Indagini e studi finalizzati alla predisposizione del Piano di Tutela delle Acque (PTA) (D.Lgs. 152/99). Fase I Caratterizzazione dei bacini idrografici, Attività I-b Caratterizzazione Idrologica, Elaborato I.b/1 Rapporto tecnico.

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*.

Turc, L. (1954). Le Bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 5, 491–595.

Unduche, F., Tolossa, H., Senbeta, D., & Zhu, E. (2018). Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 63(8), 1133–1149.

Versace, P. (2004). Processi idrologici ed atmosferici – Relazione generale – XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche.

RINGRAZIAMENTI

Giunto alla fine della stesura della presente Tesi, non mi risulta per nulla facile riportare tutte le persone a cui devo un ringraziamento doveroso, sentito ed onesto. Chiedo dunque subito scusa a tutte quelle persone che mi dimenticherò di citare, ma che mi hanno accompagnato lungo questo incredibile percorso.

Questa Tesi è da un lato il culmine di un percorso di studi che mi ha profondamente cambiato, facendomi crescere ed insegnandomi a cavarmela da solo utilizzando le conoscenze apprese nei diversi corsi di studio; dall'altro canto è solo il punto di partenza per proseguire una carriera lavorativa da poco tempo avviata, ma che spero sfoci nel campo dell'idrologia e dell'idraulica.

Ringrazio in primis i miei Relatori, i Professori Claps, Poggi e Tamea per il loro costante aiuto e disponibilità, nonostante abbia scritto la tesi in un periodo in cui non fosse facile seguirmi, segnato dal Covid che ha messo in discussioni molte nostre priorità.

Ringrazio tutta la mia famiglia: i miei genitori, i miei nonni, mio fratello e mia sorella che mi hanno sempre supportato e sopportato nonostante si trovassero sovente davanti a loro una persona un po' rude e fin troppo concentrata sui libri, che a volte ha anche dovuto togliere del tempo agli affetti per studiare qualche ora in più, rischiando di trascurarvi. Ve ne sarò per sempre grato.

Ringrazio Silvia, una ragazza meravigliosa che mi sopporta ormai da quasi due anni, che mi aiuta, mi sta vicino e mi riempie di attenzioni; durante la stesura di questa tesi, sono stati anche preziosi e utili i tuoi consigli e le tue critiche.

Ringrazio immensamente i miei amici, in particolare Alessandro, Giorgio, Nicolò, Emanuele, Alexandra ed Elena, i quali non mi hanno mai fatto mancare la loro vicinanza nei momenti più difficili e dove grazie ad una loro battuta tutto si poteva sistemare.

Ringrazio tutti i miei colleghi di lavoro, in particolare Gianluca che mi ha permesso di ultimare il percorso di studi togliendo un po' di tempo al lavoro.

Ringrazio i miei colleghi di corso, Thomas, Andrea e Federico, che considero prima di tutto preziosi amici, per le giornate passate a seguire corsi e a studiare assieme, cercando sempre di poter apprendere qualcosa in più grazie ad un continuo confronto.

Ringrazio infine tutti i miei colleghi arbitri, i quali non mi hanno mai fatto mancare la loro vicinanza, sia in campo che durante gli studi.