POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

COSTRUZIONE DI UN MODELLO IDROLOGICO DI STIMA DELLA DISPONIBILITA' IDRICA IN AREA PEDEMONTANA

Relatori:

Prof. Pierluigi Claps

Prof.ssa Stefania Tamea

Ing. Andrea Zamperone

Candidato:

Corrado Patta

Anno accademico 2017/2018

SOMMARIO

INTRODUZIONE 14

1 I MODELLI AFFLUSSI-DEFLUSSI 17

1.1 I tipi di modello 19

1.2 GEOframe-NewAGE 24

1.2.1 Embedded Reservoir Model 26

1.2.2 Neve 29

1.2.3 Canopy 31

1.2.4 Root zone 33

1.2.5 Groundwater 34

1.2.6 Direct run off 34

2 STRUMENTI 38

2.1 uDig Spatial Toolbox 38

2.1.1 J-Grasstools e Horton Machine 39

2.2 OMS3: Object Modeling System 46

2.2.1 Krigings component 49

2.2.2 SWRB component 52

2.2.3 LWRB component 54

2.2.4 Net Radiation Balance component 57

2.2.5 ET component 58

2.2.6 Rain Snow Separation component 59

2.2.7 Snow component 59

2.2.8 Water Budget component 60

2.3 Il calibratore 61
2.3.1 LUCA (Let Us Calibrate) 63
2.3.2 La funzione obiettivo 64
3 APPLICAZIONE AL BACINO DEL TORRENTE CERVO 67
3.1 Il bacino del Torrente Cervo 67
3.1.1 Inquadramento 69
3.1.2 Topografia e morfologia 71
3.1.3 Analisi geomorfologica 73
3.1.4 Dati di misura metereologici e idrometrici 75
3.2 Set up del modello 78
3.2.1 Procedura GIS 82
3.2.2 Spazializzazione dei dati di temperatura e precipitazione 87
3.2.3 Calcolo della radiazione solare netta 92
3.2.4 Calcolo dell'evapotraspirazione potenziale 96
3.2.5 Calcolo del LAI index 98
3.2.6 Building del grafo 99
3.2.7 Muskingum-Cunge 103
3.3 Procedura di calibrazione e validazione 104
3.3.1 Lista dei parametri di calibrazione 105
3.3.2 Sequenze di calibrazione e validazione 107
4 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI 111
4.1 Deflussi e volumi 113
4.1.1 Deflussi e volumi nelle sezioni strumentate 115
4.1.2 Deflussi e volumi nella sezione non strumentata 125
4.2 Curve di durata delle portate 130

4.2.1 Curve di durata delle portate nelle sezioni strumentate 132

4.2.2 Curve di durata delle portate nella sezione non strumentata 139

4.3 Confronto con i deflussi valutati in base al PTA Regione Piemonte nella sezione non strumentata 142

CONCLUSIONI 153

BIBLIOGRAFIA 158

A. ALLEGATI: TAVOLE PER UN ANNO DI CALIBRAZIONE 166

B. ALLEGATI: TAVOLE PER UN ANNO DI VALIDAZIONE 173

C. ALLEGATI: ESEMPIO DI *SIM* FILE PER IL SINGOLO HRU 179

D. ALLEGATI: ESEMPIO DI *SIM* FILE PER LA CALIBRAZIONE 185

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: Diagramma semplificato del ciclo idrologico (US Geological Survey, 2017 [1]). 18

Figura 1.2: Diagramma di scelta che lega la disponibilità di dati con la complessità e la capacità di previsione di un modello (Grayson & Blosch, 2001 [2]). 22

Figura 1.3: La calibrazione di un modello idrologico (UniRC, 2018). 24

Figura 1.4: Logo di GEOframe-NewAGE (Rigon, 2015 [3]). 25

Figura 1.5: Schematizzazione della serie di invasi all'interno del singolo HRU (Bancheri, 2017 [8]). 27

Figura 2.1: Rappresentazione di un raster (Franceschi et al. [22]). 39

Figura 2.2: Lo Spatial Toolbox. 40

Figura 2.3: Distribuzione delle quote del bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese. 41

Figura 2.4: Le otto possibili direzioni di drenaggio (Franceschi et al. [22]). 42

Figura 2.5: Distribuzione delle direzioni di drenaggio del bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese. 42

Figura 2.6: Dettaglio della mappa delle aree contribuenti per il bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese. 44

Figura 2.7: Mappa dello Skyview Factor per i punti del bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese. 45

Figura 2.8: Lo sim file (Rigon et al., 2015 [25]). 46

Figura 2.9: Organizzazione di un progetto in *GEOframe-NewAGE* (Rigon et al., 2015 [25]). 47

Figura 2.10: Formattazione dei dati in *GEOframe-NewAGE.* 48

Figura 2.11: Il semivariogramma. 51

Figura 2.12: Modelli per l'emissività in condizioni di cielo sgombro disponibili all'interno della componente (Bancheri et al., 2016 [30]). 56

Figura 2.13: Valori dei parametri dei modelli per l'emissività in condizioni di cielo sgombro disponibili all'interno della componente (Bancheri et al., 2016 [30]). 57

Figura 2.14: Struttura di uno *sim* file di calibrazione (Formetta et al., 2016 [39]). 62

Figura 2.15: Divisione in steps e rounds (Bancheri, 2017 [8]). 64

Figura 3.1: Foto del T.Cervo a Quinto Vercellese. 68

Figura 3.2: Estratto dall'Allestimento Cartografico di Riferimento BDTRE 2018 B/N 1:10000 (GEOPortale Piemonte, [43]). 69

Figura 3.3: Foto della traversa di sbarramento esistente. 70

Figura 3.4: Distribuzione delle quote sul bacino idrografico chiuso alla sezione a Castelletto Cervo (BI). 71

Figura 3.5: Distribuzione delle pendenze sul bacino idrografico chiuso alla sezione a Castelletto Cervo (BI). 72

Figura 3.6: Distribuzione della direzione di esposizione dei versanti per il bacino chiuso a Castelletto Cervo (BI). 73

Figura 3.7: Mappa per le direzioni di drenaggio per il bacino chiuso a Castelletto Cervo (BI). 74

Figura 3.8: Classificazione dell'ordine della rete per il bacino chiuso a Castelletto Cervo (BI). 75

Figura 3.9: Sequenza di assemblaggio delle componenti di GEOframe-NewAGE per la realizzazione del modello (Bancheri, [8]). 81

Figura 3.10: Flowchart della procedura GIS per il ritaglio del bacino idrografico. 83

Figura 3.11: Flowchart della procedura GIS per la scomposizione in sottobacini. 84

Figura 3.12: Bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI). 85

Figura 3.13: Bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese. 86

Figura 3.14: Distribuzione delle stazioni metereologiche (in rosso) sul bacino idrografico di studio. 87

Figura 3.15: *sim* file per il Particle Swarm. 89

Figura 3.16: Esempio di leave one out. 90

Figura 3.17: Scatterplot per la valutazione del *leave one out.* 91

Figura 3.18: Interpolazione spaziale: confronto fra serie di Temperatura ottenute per HRU posti a quote diverse per l'anno Ott 2011- Sett 2012. 92

Figura 3.19: Confronto fra serie orarie di radiazione solare ad onda corta per una settimana di Aprile 2012; in blu la serie dell'HRU 14 (213 m) e in arancione la serie dell'HRU 23 (1630 m). 94

Figura 3.20: Confronto fra serie orarie di evapotraspirazione potenziale per una settimana di Agosto 2012; in blu la serie dell'HRU 21 (1794 m) e in rosso la serie dell'HRU 36 (230 m). 97

Figura 3.21: Serie di Leaf Area Index per l'HRU 63 (Anno 2012). 98

Figura 3.22: Schematizzazione delle porzioni del bacino in una lista di nodi connessi tra di loro sino alla sezione di chiusura del bacino idrografico in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese. 100

Figura 3.23: *sim* file del grafo per la generazione dei deflussi per il bacino idrografico chiuso nel T.Strona a Strona Cossato. 102

Figura 3.24: Modello di Muskingum-Cunge. 103

Figura 3.25: Organizzazione degli HRU per le sequenze di calibrazione. In cerchi blu le stazioni di misura, in cerchio rosso la sezione non strumentata. 107

Figura 4.1: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Passobreve Cervo. 115

Figura 4.2: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Passobreve Cervo. 115

Figura 4.3: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Vigliano Cervo. 116

Figura 4.4: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Vigliano Cervo. 116

Figura 4.5: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Strona Cossato. 117

Figura 4.6: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Strona Cossato. 117

Figura 4.7: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Elvo Carisio. 118

Figura 4.8: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Elvo Carisio. 118

Figura 4.9: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Quinto Vercellese. 119

Figura 4.10: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Quinto Vercellese. 119

Figura 4.11: Confronto dei volumi cumulati a Passobreve Cervo. 121

Figura 4.12: Confronto dei volumi cumulati a Vigliano Cervo. 121

Figura 4.13: Confronto dei volumi cumulati a Strona Cossato. 122

Figura 4.14: Confronto dei volumi cumulati a Elvo Carisio. 122

Figura 4.15: Confronto dei volumi cumulati a Quinto Vercellese. 123

Figura 4.16: Confronto dei volumi cumulati a Vigliano cervo per il primo anno del periodo di calibrazione (KGE=0,90). 124

Figura 4.17: Confronto dei volumi cumulati a Vigliano cervo per il terzo anno del periodo di calibrazione (KGE=0,90). 125

Figura 4.18: Idrogramma generato dal modello per la sezione di Castelletto Cervo. 126

Figura 4.19: Deflussi medi mensili del periodo di calibrazione (in blu) e del periodo di validazione (in rosso) per la serie simulata generata dal modello per la sezione di Castelletto Cervo (BI). 127

Figura 4.20: Volumi cumulati di precipitazione nei mesi di Maggio per gli anni di calibrazione e di validazione per il bacino chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI). 128

Figura 4.21: Deflussi medi mensili per la serie simulata a Castelletto Cervo (BI). 129

Figura 4.22: Volumi cumulati a Castelletto Cervo (BI). 130

Figura 4.23: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Passobreve Cervo. 132

Figura 4.24: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Passobreve.Cervo. 132

Figura 4.25: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Passobreve Cervo. 133

Figura 4.26: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Vigliano Cervo. 133

Figura 4.27: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Vigliano Cervo. 134

Figura 4.28: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Vigliano Cervo. 134

Figura 4.29: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Strona Cossato. 135

Figura 4.30: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Strona Cossato. 135

Figura 4.31: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Vigliano Cervo. 136

Figura 4.32: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Elvo Carisio. 136

Figura 4.33: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Elvo Carisio. 137

Figura 4.34: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Elvo Carisio. 137

Figura 4.35: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Quinto Vercellese. 138

Figura 4.36: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Quinto Vercellese. 138

Figura 4.37: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Quinto Vercellese. 139

Figura 4.38: Curva di durata totale delle serie simulate per la sezione di Castelletto Cervo (BI). 141

Figura 4.39: Curva di durata totale delle serie simulate per la sezione di Castelletto Cervo (BI). 141

Figura 4.40: Deflussi medi mensili in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte. 145

Figura 4.41: Confronto tra i deflussi medi mensili generati dal modello realizzato con il sistema *GEOframe-NewAGE* (in blu) e quelli ricavati con l'applicazione delle indicazioni del PTA della regione Piemonte (in rosso) per la sezione di Castelletto Cervo (BI). 146

Figura 4.42: CDP per il bacino chiuso a Castelletto Cervo valutata con le indicazioni contenute all'interno del PTA della Regione Piemonte. 149

Figura 4.43: Confonto tra le curve di durata delle portate ottenute con i due metodi per la sezione di Castelletto Cervo (BI). In blu la CDP ottenuta con il modello *GEOframe-NewAGE*, in rosso la CDP ottenuta con l'applicazione delle indicazioni contenute nel PTA della Regione Piemonte. 151

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1: Parametri di calibrazione del sistema a serie di invasi. 36

Tabella 3.1: Anagrafica del Bacino del T.Cervo chiuso alla confl. con il fiume Sesia 68

Tabella 3.2: Coordinate della sezione di chiusura del bacino del T.Cervo a Castelletto Cervo (BI). 70

Tabella 3.3: Elenco delle stazioni idrometriche. 76

Tabella 3.4: Elenco delle stazioni metereologiche. 78

Tabella 3.5: Tipo di kriging adottato. 88

Tabella 3.6: Parametri per la componente SWRB. 93

Tabella 3.7: Parametri per la componente LWRB. 95

Tabella 3.8: Parametri per la componente ETP. 96

Tabella 3.9: Lista dei parametri da calibrare. 106

Tabella 3.10: Tempi di processamento. 109

Tabella 4.1: Valori della funzione obiettivo in corrispondenza delle cinque stazioni idrometriche di misura per il periodo di calibrazione e per il periodo di validazione. 111

Tabella 4.2: Lista dei valori ottimizzati per i parametri del modello ottenuti in corrispondenza delle cinque stazioni idrometriche. 112

Tabella 4.3: Superfici sottese dalle stazioni di misura. 120

Tabella 4.4: Deflussi medi mensili per la serie simulata a Castelletto Cervo (BI). 129

Tabella 4.5: Superficie sottesa dalla sezione di Castelletto Cervo (BI). 130

Tabella 4.6: Curva di durata delle portate per la sezione di Castelletto Cervo (BI). 140

Tabella 4.7: Valutazione della portata media specifica in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte. 143

Tabella 4.8: Valutazione dei deflussi medi mensili in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte. 144

Tabella 4.9: Valutazione della curva di durata delle portate in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte. 148

Tabella 4.10: Confonto tra le curve di durata delle portate ottenute con i due metodi per la sezione di Castelletto Cervo (BI). 150

INDICE DEGLI ALLEGATI

Allegato A.1: Afflusso medio annuo 166

Allegato A.2: Distribuzione della radiazione solare giornaliera sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012. 167

Allegato A.3: Distribuzione della evapotraspirazione reale sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012. 168

Allegato A.4: Tavola di dettaglio di distribuzione dello SWE sul bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) per due giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012. 169

Allegato A.5: Deflussi medi annui. 169

Allegato A.6: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Passobreve Cervo per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012. 170

Allegato A.7: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Vigliano Cervo per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012. 170

Allegato A.8: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Strona Cossato per l'anno di calibrazione 2011-2012. 171

Allegato A.9: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Elvo Carisio per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012. 171

Allegato A.10: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Quinto Vercellese per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012. 172

Allegato B.1: Afflusso medio annuo 173

Allegato B.2: Distribuzione della radiazione solare giornaliera sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012. 174

Allegato B.3: Distribuzione della evapotraspirazione reale sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012. 174

Allegato B.4: Tavola di dettaglio di distribuzione dello SWE sul bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) per due giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012. 175

Allegato B.5: Deflusso medio annuo 176

Allegato B.6: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Passobreve Cervo per l'anno idrologico di validazione 2014-2015. 176

Allegato B.7: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Vigliano Cervo per l'anno idrologico di validazione 2014-2015. 177

Allegato B.8: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Strona Cossato per l'anno idrologico di validazione 2014-2015. 177

Allegato B.9: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Elvo Carisio per l'anno idrologico di validazione 2014-2015. 178

Allegato B.10: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Quinto Vercellese per l'anno idrologico di validazione 2014-2015. 178

INTRODUZIONE

In un contesto come quello moderno, di continua e crescente richiesta di fabbisogno d'acqua per l'agricoltura, lo sviluppo industriale, la produzione di energia elettrica e l'uso civile, diventa fondamentale la costruzione di strumenti ed elementi per la conoscenza e valutazione della risorsa idrica di fiumi e torrenti, in quanto principali fonti di sostentamento di più apparati che trovano nello sfruttamento dei corsi d'acqua naturali il veicolo indispensabile per il soddisfacimento delle loro necessità.

La riproduzione del carattere naturale del fiume diventa dunque, in questo quadro, il primo elemento per l'inserimento del corso d'acqua all'interno di un piano di gestione che ne consenta l'uso ma allo stesso tempo rispetti la sua possibilità di sfruttamento. Per questo, i modelli idrologici, possiedono quelle caratteristiche di stima e previsione delle quantità d'acqua disponibili che diventano utili, per chi pianifica e decide, alla comprensione del reale potenziale a disposizione.

Il presente studio mediante l'applicazione di un di un modello idrologico concettuale a parametri semi distribuiti denominato *GEOframe-NewAGE* si propone di determinare i deflussi di una sezione non strumentata del T. Cervo, collocata a Castelletto Cervo (BI) e d'interesse per lo sfruttamento idroelettrico e l'alimentazione dei canali ad uso irriguo che si sviluppano per la pianura ad esso circostante. Lo scopo del modello è quello di riprodurre i deflussi di questa sezione nell'ottica di una gestione della risorsa idrica di questo corso d'acqua e di una rappresentazione delle caratteristiche pedemontane del bacino idrografico all'interno del quale si sviluppa la sua rete. Tali bacini piemontesi sono infatti contraddistinti da piene tardo primaverili dovute allo scioglimento delle nevi, piogge abbondanti nei mesi autunnali e periodi di secca dovuti a prelievi per gli sfruttamenti ad uso agricolo ed idroelettrico.

Il modello *GEOframe-NewAGE* è il risultato di una sequenza composta da diverse componenti che simulano individualmente i processi fisici del ciclo idrologico e assemblate insieme riescono a riprodurre il deflusso superficiale e la risposta idrologica del bacino idrografico a partire da dati metereologici, pluviometrici e idrometrici orari a disposizione.

Il bacino idrografico viene suddiviso in singole unità dette HRU, ognuna schematizzata con una serie di invasi, di cui il modello risolve il bilancio e infine connette tra loro le singole unità per ottenere la risposta complessiva dell'intero bacino.

La risoluzione dei bilanci della serie di invasi con cui si schematizza la singola porzione di bacino avviene attraverso la calibrazione di un set di parametri in corrispondenza di quelle sezioni della rete con dati di misura idrometrici. L'esito della procedura fornisce i valori di ottimo da attribuire a ciascun HRU e con i quali generare la serie di stima per la sezione non strumentata con la quale costruire la curva di durata delle portate da impiegarsi per la valutazione della disponibilità della risorsa idrica per lo sfruttamento elettrico e agricolo.

La trattazione è strutturata in quattro capitoli: la prima parte riepiloga alcuni concetti sui modelli idrologici e introduce il modello a serie di invasi *GEOframe-NewAGE*; il secondo capitolo illustra gli strumenti di calcolo che si sono assemblati insieme per la costruzione del modello idrologico; la terza parte applica gli strumenti al caso reale del T. Cervo e illustra passo dopo passo il set up delle componenti e delle procedure di calibrazione e validazione che sono state impiegate. Infine, nell'ultimo capitolo si riportano i risultati delle elaborazioni, la stima in corrispondenza della sezione di Castelletto Cervo (BI) e inoltre il confronto dei risultati ottenuti con quelli che derivano dall'applicazione di un modello regionale afflussi-deflussi.

Capitolo 1

1 I MODELLI AFFLUSSI-DEFLUSSI

Un *modello idrologico* consiste in un sistema di equazioni matematiche tale da riprodurre in maniera semplificata e quantitativa parti, o porzioni più estese, dei processi e delle interazioni fisiche che contraddistinguono il ciclo naturale dell'acqua ovvero *il ciclo idrologico*.

Quest'ultimo, che in natura governa i passaggi di stato, il flusso e la circolazione dell'acqua (nel sottosuolo, sulla nostra superficie e nell'atmosfera) è di fatto un sistema di fenomeni naturali complesso, non sempre direttamente osservabili, diversi punto per punto e non lineari. Tuttavia non può prescindere da alcuni aspetti essenziali che coinvolgono le interazioni fra l'atmosfera, il suolo, l'acqua di superficie ed il sottosuolo. Questi sono:

- le precipitazioni;
- l'intercettazione dell'acqua proveniente dagli eventi meteorici da parte dell'insieme di foglie e rami degli alberi e della vegetazione;
- l'evapotraspirazione delle piante e del suolo;
- l'infiltrazione dell'acqua nel terreno;
- la percolazione verso le acque di falda;
- il deflusso sugli strati superficiali e la portata d'acqua sotterranea.

Nella figura successiva viene riportato un semplice diagramma del ciclo idrologico (Figura 1.1).

Figura 1.1: Diagramma semplificato del ciclo idrologico (US Geological Survey, 2017 [1]).

La dinamica di queste interazioni può essere riassunta in trasferimenti di massa che avvengono tramite scambi di tipo energetico; come la trasformazione da energia potenziale a energia cinetica che avviene nel momento in cui una particella d'acqua si muove da monte verso valle dissipando parte di questa energia per attrito. Dunque sono interazioni che possono essere descritte e approssimate da equazioni differenziali di equilibrio e di bilancio per un dominio e per un elemento che siano infinitesimi e in cui si possa assumere che il processo sia omogeneo.

Il modello idrologico si propone di risolvere queste equazioni differenziali all'interno di un *volume di controllo*, una regione di spazio di cui siano ben definiti i confini per il quale il modello prende in ingresso dei flussi in entrata, lavora sulla risoluzione dell'equazione di bilancio ed infine restituisce i flussi in uscita della grandezza incognita di interesse. Il bilancio può essere applicato a diversi volumi di controllo come uno specifico per le acque superficiali, un altro per le acque sotterranee e via di seguito. L'insieme di questi volumi determina un sistema idrologico, rappresentato dal modello, il

quale descrive, attivato da variabili esterne di input, la risposta idrologica del bacino ottenuta mediante la risoluzione di un sistema di equazioni matematiche accoppiate con un set di parametri cui spetta descrivere le caratteristiche del modello.

Nel dettaglio il modello *afflussi-deflussi* accoglie in input le precipitazioni meteoriche e vi opera sopra al fine di simulare quelle trasformazioni che producono così in output i deflussi in una sezione di interesse di un corso d'acqua.

1.1 I tipi di modello

Il modello afflussi-deflussi rientra nella categoria dei modelli che si dicono di tipo *integrato*. Questo perché, a differenza di modelli che si propongono di rappresentare una singola o particolare porzione del ciclo idrologico, detti modelli di *singolo processo*, lavorare sulle trasformazioni che producono deflussi a partire da input di precipitazione richiede la modellazione di più variabili e porzioni estese del ciclo dell'acqua nonché la simulazione del comportamento del bacino per una scala temporale più lunga di quella del singolo evento.

Si dicono infatti:

- Modelli *completi*: i modelli che includono la simulazione della gran parte dei processi del ciclo idrologico e studiano il comportamento del bacino per una scala temporale continua e prolungata.
- Modelli *di piena*: i modelli a scala di evento, costruiti principalmente allo scopo di riprodurre simulazioni degli eventi di piena dunque di breve estensione temporale. Questi sono focalizzati su singoli eventi meteorici di interesse e liberi dei processi del ciclo idrologico non influenti allo scopo.

Oltre la scala temporale anche il tipo di approccio influenza la struttura del modello. Si distinguono in merito due tipologie:

- Modelli di tipo *deterministico*: cioè elaborazioni che comprendano un valore di tipo fisso per i dati di input, senza l'attribuzione di range di variabilità. Ne consegue che gli output di risposta del bacino non variano fornendo in ingresso lo stesso set di dati.
- Modelli di tipo *stocastico*: modelli che restituiscono, invece, risultati in termini di probabilità. Ovvero attribuiscono delle caratteristiche di tipo aleatorio alle variabili di input, ne consegue che per lo stesso set di dati in ingresso il modello restituisce in output risultati differenti.

In base alla organizzazione e impostazione delle equazioni costitutive all'interno del modello, le quali descrivono i processi fisici che si vogliono rappresentare, si distinguono ancora:

- Modelli *fisicamente basati*: ovvero elaborazioni in cui vengono riprodotte e risolte senza approssimazioni e semplificazioni le equazioni di equilibrio dinamico e di bilancio di massa che caratterizzano i processi idraulici e idrologici.
- Modelli *concettuali*: modelli che operano una successiva semplificazione del processo fisico, idraulico e idrologico che si vuole riprodurre tuttavia sempre ricavata in funzione della dinamica e della natura del fenomeno che si vuole rappresentare. Un esempio consiste nello schematizzare le diverse forme di immagazzinamento dei deflussi all'interno di un bacino con una serie di serbatoi collegati internamente.
- Modelli *empirici*: elaborazioni che correlano le variabili di input con i risultati di output tramite relazioni che non sono il risultato di

rappresentazioni o schematizzazione dei processi idraulici e idrologici.

Ne consegue, all'interno di questa ultima distinzione, che i modelli concettuali si collochino in mezzo rispetto ai due estremi. I parametri di questo tipo di modello possono essere di diverso tipo e attribuiscono allo stesso una ulteriore classificazione dal punto di vista spaziale.

Si dicono infatti:

- Modelli a parametri *concentrati*: l'insieme di modelli contraddistinti da parametri che hanno la caratteristica di essere costanti su tutto il bacino oppure funzioni del tempo. Un approccio di questo tipo comporta definire il bacino idrografico come una singola unità, o comunque comporta l'assunzione di una scala spaziale molto estesa, con le stesse proprietà punto per punto dunque senza una variabilità di tipo spaziale.
- Modelli a parametri *distribuiti*: comprendono invece elaborazioni che attribuiscono ai parametri una dipendenza dallo spazio, quindi una variabilità punto per punto, oltre che eventualmente nel tempo, di solito rappresentata con una suddivisione del bacino in celle di forma quadrata con un buon livello di dettaglio, ovvero dei raster.

La seconda tipologia risulta essere quella più vicina alla rappresentazione dello stato fisico del bacino il quale dimostra avere proprietà dipendenti dallo spazio con qualità diverse punto per punto. Tuttavia risulta complicato esprimere al meglio questa distribuzione e, allo stesso tempo, le particolareggiate proprietà fisiche e caratteristiche di utilizzo del bacino. Per questo risulta necessario il ricorso a parametri concentrati, assunti mediamente validi per tutto il bacino. Risulta evidente la necessità di una categoria di modello che sintetizzi i due estremi. Si dicono infatti:

- Modelli a parametri *semidistribuiti*: quelle elaborazioni che consistono in una tipologia intermedia che ha la caratteristica di considerare il bacino suddiviso in sotto porzioni sulle quali si opera in modo concettuale.

Molti tipi di modello sono disponibili in letteratura e ancora è viva la discussione su quale sia il più adatto per rappresentare nel suo complesso un sistema idrologico. I modelli fisicamente basati riescono a fornire un risultato molto dettagliato in piccola scala tanto da poter essere utilizzati anche per descrivere i complessi meccanismi del trasporto solido; tuttavia l'uso di questi modelli a scala di bacino risulta essere ancora complesso. Nonostante lo sviluppo dei software di calcolo sia progredito, e si siano superate certe incertezze in merito all'impiego di questo tipo di modelli, restano ancora dispendiose tutte le procedure di pre processamento e costo computazionale che contraddistinguono queste elaborazioni. Un altro elemento a sfavore consiste nel numero e nella complessità di dati che sono richiesti in ingresso.

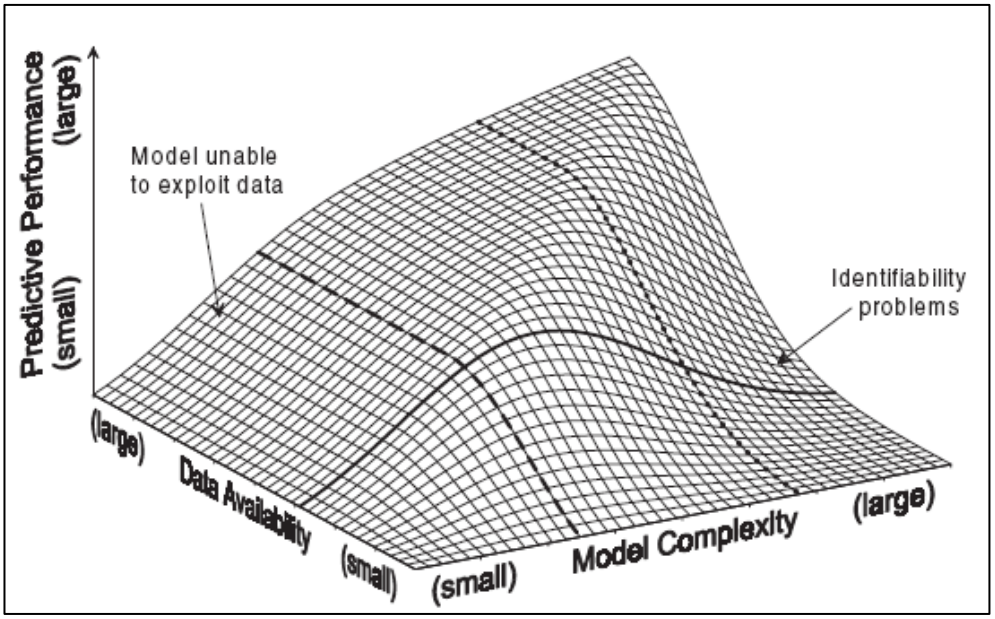


Figura 1.2: Diagramma di scelta che lega la disponibilità di dati con la complessità e la capacità di previsione di un modello (Grayson & Blosch, 2001 [2]).

Infatti, come illustra il diagramma in Figura 1.2, data una certa disponibilità di dati seguendo la superficie del diagramma si evince che solo alcuni modelli con una certa complessità sono in grado di fornire la migliore prestazione con il set fornito. Un modello troppo complesso richiede molti più dati di quelli che vi sono a disposizione per fornire output che possano essere ritenuti attendibili. Viceversa, assegnato un modello meno complesso e più semplice, all'aumento del tipo di dati disponibili non corrisponde una performance attendibile ed adeguata dei risultati delle elaborazioni. Le problematiche elencate in precedenza rendono ancora non conveniente l'impiego di modelli fisicamente basati per le applicazioni a scala di bacino mentre riescono ad essere impiegati con profitto nelle applicazioni alla scala di dettaglio. D'altra parte i modelli concettuali emergono invece per una maggiore velocità di calcolo e di set up nonché una ridotta domanda di numero e qualità di tipi di dato in ingresso. Questi risultano essere più efficaci per gli studi dei sistemi a scala di bacino.

I moderni modelli più diffusi fondano sull'idea di ridurre il sistema a scala di bacino in una rete di serbatoi connessi tra di loro ovvero in porzioni sulle quali si opera in maniera concettuale sulla risoluzione del bilancio idrico di ciascuna di queste unità. Questo è il modello di tipo *concettuale a parametri semidistribuiti* il quale coniuga la necessità di considerare una variabilità spaziale delle proprietà del bacino di studio con l'attribuzione, alla caratteristica descrittiva di volta in volta presa in esame, di un valore unico per ogni sotto area. Tuttavia si rende necessaria la *calibrazione* di questi parametri i quali identificano le relazioni concettuali del modello stesso.

La calibrazione di un modello consiste infatti nella scelta dei valori dei parametri che siano in grado di massimizzare l'aderenza fra le misure degli idrogrammi osservati e le serie simulate prodotte dal modello in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino. Ne consegue che i modelli concettuali si possano utilizzare propriamente solo in quei contesti in cui si abbiano a disposizione delle serie di portata di misura.

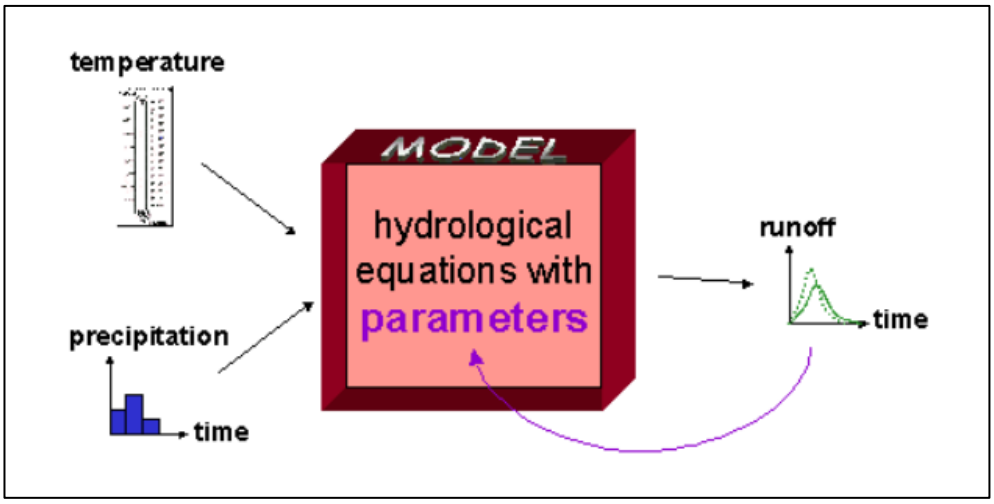


Figura 1.3: La calibrazione di un modello idrologico (UniRC, 2018).

Su queste premesse si basa l'impiego del modello idrologico oggetto di questa trattazione illustrato nel prossimo paragrafo.

1.2 GEOframe-NewAGE

La trattazione propone l'impiego di un modello idrologico integrato, concettuale e a parametri semidistribuiti denominato *GEOframe-NewAGE* (Figura 1.4), in origine conosciuto come *JGRASS-NewAGE,* per la stima delle portate idriche in una sezione non strumentata del bacino idrografico del T. Cervo a partire dall'impiego di parametri determinati in seguito alla calibrazione del modello in punti con serie di deflussi misurate a scala oraria in stazioni appartenenti alla stessa area di studio.

Figura 1.4: Logo di GEOframe-NewAGE (Rigon, 2015 [3]).

GEOframe-NewAGE è un sistema modellistico per l'idrologia (Rigon, 2017 [4]) sviluppato dall'Università di Trento e da HydroloGIS [5] di cui si ha rapporto e applicazione in tre riferimenti principali: *Hydrological modelling with components: a GIS-based open-source framework* (Formetta et al., 2014 [6]); *The JGrass-NewAge system for precasting and managing the hydrological budgets at the basin scale: model of flow generation and propagation/routing* (Formetta et al., 2011 [7]) e *A flexible approach to the extimation of water budgets and its connection to the travel time theory* (Bancheri, 2017 [8]).

Il sistema offre gli strumenti per la realizzazione di un modello idrologico concettuale a parametri semidistribuiti risultato di una catena composta da diverse componenti connesse tra di loro le quali simulano i processi fisici che intervengono nella formazione del deflusso superficiale. I paragrafi successivi illustrano le equazioni costitutive, i legami funzionali e i parametri del metodo della serie di invasi su cui fonda il modello.

1.2.1 Embedded Reservoir Model

L'applicazione del sistema *GEOframe-NewAGE* comprende la partizione del bacino di studio in sotto unità dette HRU "Hydrological Response Units" (Bancheri, 2017 [8]) da connettere tra di loro per rappresentare la risposta dell'intero bacino.

Queste sotto unità vengono successivamente schematizzate in una serie di invasi che accumulano, per una certa quantità, l'acqua proveniente dalle precipitazioni meteoriche che di seguito rilasciano come portate idriche, attraverso una determinata quantità di scarichi, all'invaso sottostante appartenente alla stessa unità o verso il canale collegato alla sezione di chiusura dello specifico HRU.

Gli scarichi operano nel momento in cui si raggiunge il valore soglia di capacità del singolo invaso il quale viene configurato come uno dei parametri del modello. Gli altri parametri si accoppiano, anche loro, alle equazioni costitutive matematiche e ai legami funzionali che illustrano i processi attraverso i quali l'acqua entra ed esce da questi serbatoi.

Il risultato è che: le equazioni matematiche descrivono in forma semplificata le parti del ciclo idrologico e il bilancio idrico della serie di invasi all'interno delle singola unità; i parametri del modello rappresentano i valori medi delle caratteristiche di un insieme di singole unità (dunque di tutto il bacino o di un insieme di porzioni chiuse in corrispondenza della sezione strumentata) ed infine l'insieme di scarichi permette di rappresentare e quantificare più tipi di flusso ovvero, in generale, un flusso di tipo superficiale, uno di tipo sotto superficiale e uno di tipo profondo.

La discretizzazione dell'unità in una serie di invasi prende il nome di *Embedded Reservoir Model* (Bancheri, 2017 [8]), un *sistema di serbatoi integrato*.

Il sistema si chiama così perché i serbatoi del singolo HRU lavorano nella stessa posizione spaziale ma modellano processi idrologici differenti che in

questa trattazione sono organizzati in cinque layer successivi come rappresentato di seguito (Figura 1.5):

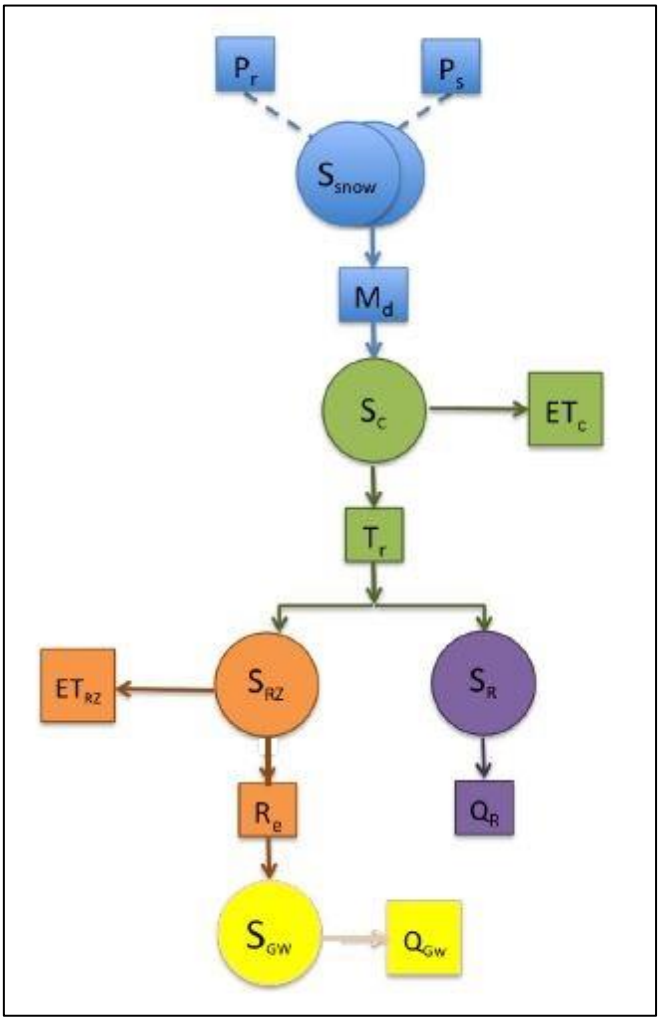


Figura 1.5: Schematizzazione della serie di invasi all'interno del singolo HRU (Bancheri, 2017 [8]).

I layer sono:

- lo strato di neve;
- il livello della canopy;
- il livello della root zone;
- il livello del direct run off
- il livello della groundwater

Ciascun layer si può rappresentare con un nodo, attraversato da flussi in entrata e in uscita, il quale identifica l'equazione differenziale risolvente il bilancio idrico del livello corrispondente (Clark et al., 2015 [9]). L'equazione differenziale risolta, da adattare di volta in volta al layer di studio, è del tipo

$$\frac{dS(t)}{dt} = J(t) - Q(t) - AET\ (t) \tag{1.1}$$

dove $S(t)$ [mm] è il volume d'acqua accumulato nel layer, $J(t)$ [mm/h] è il flusso in ingresso, $Q(t)$ [mc/s] la portata in uscita e $AET(t)$ [mm/h] l'evapotraspirazione reale.

Queste equazioni differenziali sono descritte in funzione della sola variabile temporale trascurando dunque una dipendenza dal punto di vista spaziale nell'ipotesi che i parametri e le variabili del modello mantengano valori costanti nello spazio individuato dall'insieme di HRU chiusi in corrispondenza della sezione strumentata.

Sia il flusso in uscita che l'evapotraspirazione reale sono il risultato di una stima a partire dai valori del volume di accumulo $S(t)$ del tipo non lineare per le portate

$$Q(t) = aS(t)^b \tag{1.2}$$

e in funzione del termine di evapotraspirazione potenziale $ET(t)$ [mm/h] per il calcolo dell'evapotraspirazione reale

$$AET(t) = \frac{S(t)}{S_{max}} ET(t) \tag{1.3}$$

L'esito della sequenza di Figura 1.5 è la generazione per ciascun HRU di un deflusso lungo versanti che fornisce una portata idrica alla rete dei canali.

I paragrafi successivi illustrano come le equazioni matematiche costitutive, i legami funzionali e i parametri del modello a loro associati vengano configurati in ciascuno di questi layer in cui si scompone la singola unità di area nota. Il riferimento principale è la struttura illustrata in *A flexible approach to the extimation of water budgets and its connection to the travel time theory* (Bancheri, 2017 [8]).

1.2.2 Neve

La neve è modellata nel rispetto del bilancio di massa dello strato nevoso a partire dall'andamento nel tempo della temperatura dell'aria e della radiazione solare (Hock, 1999 [10]).

Per ogni step temporale si valuta sia l'evoluzione della parte solida contenuta nello strato $M_i(t)$ [mm]

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = P_s(t) + F(t) - M(t) \tag{1.4}$$

che l'evoluzione della parte liquida $M_w(t)$ [mm]

$$\frac{dM_w(t)}{dt} = P_r(t) - F(t) + M(t) - M_d(t) \tag{1.5}$$

Le quote parti di Pioggia $P_r(t)$ [mm/h] e di neve $P_s(t)$ [mm/h] che compaiono nelle due equazioni di bilancio (1.4) e (1.5) sono il risultato della separazione in frazione liquida e frazione solida dei valori di precipitazione totale $P(t)$.

La precipitazione viene considerata solida se nell'istante temporale la temperatura dell'aria è inferiore alla temperatura di scioglimento T_s [°C] come descritto nelle due seguenti formule filtro (1.6) e (1.7) (Kavetski et al., 2011 [11]):

$$P_r(t) = \alpha_r \left[\frac{P(t)}{\pi} \cdot arctg\left(\frac{T(t)-T_s}{m_1}\right) + \frac{P(t)}{2}\right] \tag{1.6}$$

$$P_s(t) = \alpha_s(P(t) - P_r(t)) \tag{1.7}$$

di cui si calibrano i due coefficienti alfa che differiscono per regioni climatiche.

Le equazioni di bilancio (1.4) e (1.5) tengono conto sia di un tasso di accumulo $F(t)$ [mm/h] che di un tasso di fusione $M(t)$ [mm/h]. Il tasso di fusione $M(t)$ è funzione sia della temperatura dell'aria che della radiazione solare ad onda corta perciò modellato nel rispetto delle teorie di Hock [10].

Si stabilisce che (1.8):

per $T(t) > T_s \quad M(t) = \left(\alpha_m + \alpha_e R_e(t)\right) \cdot (T(t) - T_s) \cdot V_s$

per $T(t) < T_s \quad M(t) = 0$

Il congelamento $F(t)$ è funzione della temperatura dell'aria.

$$F(t) = \alpha_f \cdot (T_s - T(t)) \tag{1.9}$$

I coefficienti alfa delle due funzioni, $M(t)$ e $F(t)$, nonché la temperatura soglia di scioglimento sono parametri da calibrare.

Un altro coefficiente da calibrare interviene sulla definizione della capacità di ritenzione idrica dello strato nevoso M_{max} [mm], correlata al contenuto di acqua solido come segue

$$M_{max} = \alpha_l M_i \tag{1.10}$$

se il quantitativo di acqua liquida $M_w\ (t)$ supera tale soglia, la differenza definisce la portata di scioglimento $M_d(t)$ ovvero il flusso in uscita dal layer dello strato nevoso che viene passato al livello successivo.

$$M_d(t) = M(t) \cdot (1 - \alpha_l) \tag{1.11}$$

La portata di scioglimento $M_d(t)$ [mm/h] è da intendersi come effettivo scioglimento nivale quando nell'istante temporale in esame c'è neve oppure come pioggia in assenza di accumulo.

1.2.3 Canopy

Portata di scioglimento, evapotraspirazione potenziale e il Leaf Area Index (LAI) [-] sono i dati di input dello strato di canopy formato dall'insieme di foglie e rami di alberi e piante. I dati di Leaf Area Index sono il risultato della conversione, per la regione e il periodo di interesse, delle specifiche immagini satellitari "*MODIS/Terra+Aqua*" con risoluzione spaziale di 500m pubblicate dal *Nasa Earth Observation System* [12].

L'equazione differenziale (1.12) risolvente il budget del quantitativo di acqua accumulato nella canopy $S_c(t)$ [mm] è il bilancio fra il flusso in ingresso $M_d(t)$ [mm/h], la throughfall $T_r(t)$ [mm/h] e l'evaporazione $ET_c(t)$ [mm/h] (Rutter et al., 1971 [13]):

$$\frac{dS_c(t)}{dt} = M_d(t) - T_r(t) - ET_c(t) \tag{1.12}$$

La throughfall $T_r(t)$ è la parte di precipitazione che raggiunge direttamente il suolo senza essere intercettata dalla canopy e consiste nel flusso in uscita dal layer. In assenza di misure, fissato un valore di coefficiente di "free throughfall" p [-] uguale a 0,65, il quale distingue la percentuale di acqua che passa da quella che viene trattenuta, la throughfall viene definita dalla relazione:

$$T_r(t) = D(t) + pM_d(t) \tag{1.13}$$

dove $D(t)$ [mm/h] è la funzione di drenaggio (Valente et al., 1997 [14]) la cui evoluzione nel tempo è definita dalla relazione

$$D(t) = \max(0, (S_c(t) - S_{c,max}(t)) \tag{1.14}$$

nella quale la massima capacità di ritenzione dello store della canopy $S_{c,max}(t)$ [mm] è funzione della variazione nel tempo del LAI index

$$S_{c,max}(t) = k_c \cdot LAI(t) \tag{1.15}$$

con il coefficiente k_c (Dickinson, 1984 [15]) parametro di calibrazione.

La funzione di drenaggio $D(t)$ quantifica il quantitativo di acqua che viene prelevato dalle cime della canopy.

Con queste sostituzioni l'equazione differenziale (1.12) risolvente diventa:

$$\frac{dS_c(t)}{dt} = [(1-p)M_d(t)] - D(t) - ET_c(t) \tag{1.16}$$

con l'evaporazione della canopy $ET_c(t)$ modellata a partire dai dati di input della serie temporale dell'evapotraspirazione potenziale $ET_p(t)$ [mm/h]

$$ET_c(t) = \max\left\{0, \left[ET_p(t) \cdot min\left(1, \frac{S_c(t)}{S_{c,max}}\right)\right]\right\} \tag{1.17}$$

1.2.4 Root zone

La root zone, ovvero lo spessore in profondità che le radici delle piante penetrano e nella quale svolgono la loro attività, accoglie il flusso in uscita dal layer della canopy. Il quantitativo d'acqua eccedente la massima capacità di accumulo della root zone $S_{rz}(t)$ [mm] fluisce nel layer della direct run off, l'acqua di ruscellamento che in seguito ad una precipitazione o lo scioglimento della neve fluisce direttamente verso il corpo idrico. Ciò che invece è riuscito ad infiltrarsi passa al livello inferiore ovvero il layer della groundwater. Per questo nell'equazione di bilancio (1.18) compare il parametro di calibrazione α (Moore, 1985 [16]), già applicato in altri modelli a serbatoio come il modello HyMOD (Boyle, 2001 [17]); questo è un coefficiente di partizione tra il layer della root zone e della direct run off.

L'equazione differenziale risolvente è:

$$\frac{dS_{rz}(t)}{dt} = (1-\alpha)T_r(t) - Re(t) - ET_{rz}(t) \tag{1.18}$$

Il flusso in uscita dal layer è il termine di recharge $Re(t)$ [mm/h] ovvero il quantitativo di addizione di acqua che si infiltra naturalmente in profondità nel suolo e modellato con legge non lineare

$$R_e(t) = a(S_{rz}(t))^b \tag{1.19}$$

L'evapotraspirazione in uscita dal layer $ET_{rz}(t)$ [mm/h] si è modellata invece come segue

$$ET_{rz}(t) = \min\left(1, \frac{4}{3}\frac{S_{rz}(t)}{S_{rz,max}(t)}\right) \cdot (ET_p(t) - ET_c(t)) \tag{1.20}$$

1.2.5 Groundwater

Lo strato di suolo poroso presente sotto la superficie accoglie in ingresso il termine di Recharge, parte dell'equazione differenziale risolvente il bilancio di questo layer espressa di seguito:

$$\frac{dS_{GW}(t)}{dt} = R_e(t) - Q_{GW}(t) \tag{1.21}$$

dove il flusso in uscita (detto anche baseflow) $Q_{GW}(t)$ [mc/s] è il risultato di una stima a partire dai valori di $S_{GW}(t)$ [mm]

$$Q_{GW} = e\left(\frac{S_{GW}(t)}{S_{GW_{max}}}\right)^f \tag{1.22}$$

1.2.6 Direct run off

Il quantitativo d'acqua eccedente la massima capacità di accumulo della root zone fluisce nel layer della direct run off. Per questo, l'equazione differenziale risolvente il bilancio idrico del layer contiene il coefficiente di partizione α presente nell'equazione di bilancio del layer della root zone (18):

$$\frac{dS_{ro}(t)}{dt} = \alpha T_r(t) - Q_{ro}(t) \tag{1.23}$$

dove il flusso in uscita $Q_{ro}(t)$ [mc/s] è il risultato di una stima a partire dai valori di accumulo di questo layer $S_{ro}(t)$ [mm]

$$Q_{ro}(t) = c(S_{ro}(t))^d \tag{1.24}$$

La portata totale che defluisce dai versanti del singolo HRU e viene accolta dal canale è la somma delle serie temporali di portata della baseflow e della direct run off.

La Tabella 1.1 di seguito riepiloga i nomi, i simboli e le dimensioni dei termini dei parametri del modello da calibrare associati alle equazioni costitutive e ai legami funzionali che caratterizzano il sistema a serie di invasi.

Layer	Simbolo	Parametro	Dimensioni
Neve	T_s	Temperatura di scioglimento	[°C]
Neve	α_r	Coefficiente di regolazione	[-]
Neve	α_s	Coefficiente di regolazione	[-]
Neve	α_m	Fattore di scioglimento	$[L^0C^{-1}T^{-1}]$
Neve	α_f	Fattore di congelamento	$[L^0C^{-1}T^{-1}]$
Neve	α_e	Fattore di radiazione	$[L^0C^{-1}\ E^{-1}T^{-1}]$
Neve	α_l	Coefficiente capacità di ritenzione idrica	[-]
Canopy	k_c	Coefficiente LAI	$[L^3]$
Root zone	$S_{rz,max}$	Volume di accumulo limite	$[L^3]$
Root zone	a	Coefficiente del modello non lineare	$[T^{-1}]$
Root zone	b	Esponente del modello non lineare	[-]
Root zone	α	Coeff. di partizione tra root zone e direct run off	[-]
Direct Run off	c	Coeff. del modello non lineare	$[T^{-1}]$
Direct Run off	d	Esponente del modello non lineare	[-]
Direct Run off	$S_{ro,max}$	Volume di accumulo limite	$[L^3]$
Groundwater	e	Coeff. del modello non lineare	$[L^3T^{-1}]$
Groundwater	f	Esponente del modello non lineare	[-]
Groundwater	$S_{GW,max}$	Volume di accumulo limite	$[L^3]$

Tabella 1.1: Parametri di calibrazione del sistema a serie di invasi.

Capitolo 2

2 STRUMENTI

Il sistema *GEOframe-NewAGE* è il risultato dell'interazione di più strumenti (Formetta et al., 2014 [6]) che coordinati insieme producono la costruzione del modello idrologico di questa trattazione.

Il sistema è fondato principalmente sull'impiego di una piattaforma di visualizzazione GIS, *uDig* (*user friendly Desktop Internet GIS*) [18], la quale consente la manipolazione del modello digitale del terreno attraverso la feature *uDig Spatial toolbox*, e sull'impiego del framework *OMS3 (Object Modelling System)* (David, 2013 [19]), una console che permette di connettere tra loro, in seguito alla gestione e scrittura di codici in linguaggio OMS3, le cosiddette *componenti*, che, raccolte in librerie software, prendono il nome di *OMSGEOframe components* [20] attraverso le quali simulare lo specifico processo idrologico e calibrare il modello.

La caratteristica di questi mezzi è quella di essere completamente Open Source e di essere disponibili in linguaggio Java. Ciò facilita il dialogo tra gli strumenti utilizzati; l'estensione a nuove possibili features e di parti del modello stesso, infine, l'integrazione con altri strumenti di visualizzazione GIS e analisi dei dati e dei risultati.

Il capitolo illustra le caratteristiche e le funzionalità di questi strumenti mentre il capitolo successivo descrive il loro impiego e sequenza di assemblamento nella realizzazione del modello per lo studio del bacino di interesse e la stima della serie di deflussi nella sezione non strumentata.

2.1 uDig Spatial Toolbox

Lo Spatial toolbox è un pacchetto che contiene tutti gli strumenti (denominati *JGrasstools*) per l'importazione, l'esportazione e la realizzazione di mappe raster e vettoriali utilizzate nel modello nonché le features per l'analisi

morfologica del bacino denominate *Horton Machines*. I riferimenti a queste features, spiegate di seguito, sono raccolti in un manuale disponibile on line (Rigon et al. [21]) e in slides che ne illustrano l'applicazione in uDig e altri strumenti di visualizzazione GIS (Franceschi et al. [22]).

La forma che rappresenta un Modello Digitale del Terreno (D.T.M.) nella maniera più efficace è una griglia quadrata regolare di dati che prende il nome di *raster* (Figura 2.1). Ciascun punto del raster rappresenta la coordinata verticale z di quota per una serie di punti successivi lungo un profilo spaziale.

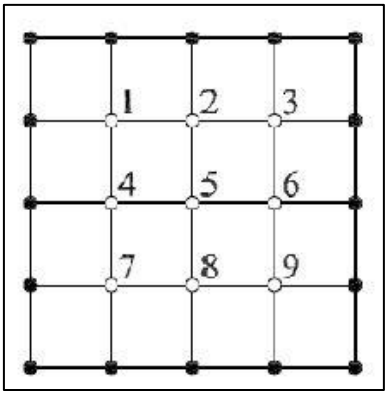


Figura 2.1: Rappresentazione di un raster (Franceschi et al. [22]).

Il D.T.M. della regione di interesse rappresenta dunque l'unico dato di ingresso da manipolare con i *JGrasstools* in ambiente uDig.

2.1.1 J-Grasstools e Horton Machine

I comandi del pacchetto *JGrasstools* sono suddivisi in più categorie (Figura 2.2) e consentono le elaborazioni del DTM di partenza ai fini dell'estrazione del bacino e della rete idrografica di interesse.

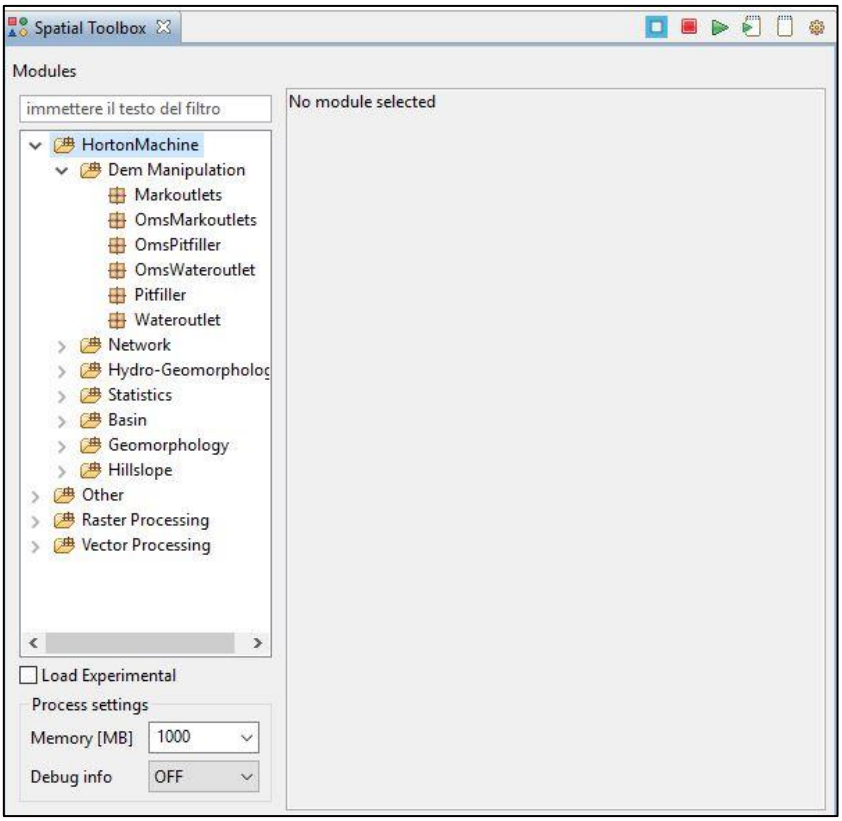


Figura 2.2: Lo Spatial Toolbox.

Il paragrafo illustra i comandi utilizzati allo scopo e quelli necessari per la produzione delle mappe raster che occorrono per lo studio dell'analisi geomorfologica del bacino e alle componenti del framework OMS3 per la riproduzione dei processi idrologici. Dalla lista riportata di seguito sono escluse le normali funzionalità che consentono la trasformazione dei raster in diversi formati o la realizzazione di mappe vettoriali, gli *shapefile*, a partire da l'inserimento di punti di coordinate (x,y) oppure dalla conversione di file in formato raster.

Di seguito si riportano le funzioni utilizzate per l'elaborazione.

- *Pitfiller*

La funzione riempie i punti di depressione presenti nel D.T.M. in modo da definire in maniera univoca le direzioni di drenaggio in ogni punto. Questi punti spesso non consistono in reali depressioni rilevati dagli strumenti di

rilievo LIDAR ma generalmente si tratta di errori di calcolo generatisi nella fase di creazione del D.E.M. Il risultato è una mappa raster che rappresenta la distribuzione delle quote all'interno del bacino di interesse (Figura 2.3).

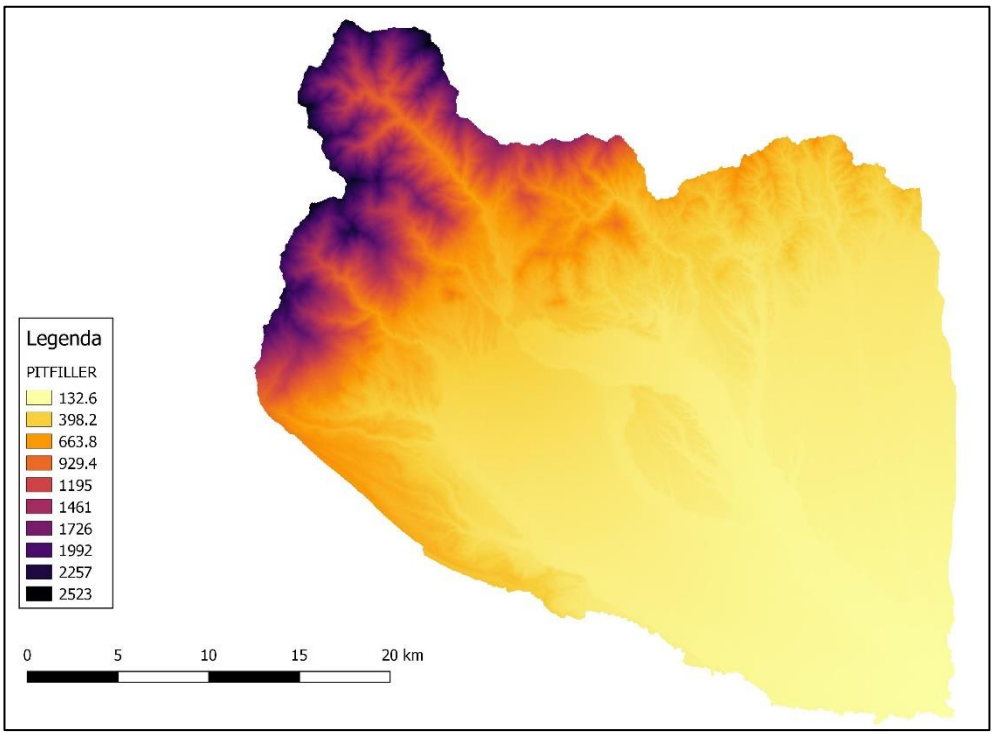


Figura 2.3: Distribuzione delle quote del bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese.

- *Flowdirections*

Il comando viene utilizzato allo scopo di calcolare le direzioni di drenaggio nella direzione della massima pendenza discendente. Le direzioni di drenaggio, infatti, definiscono come l'acqua si muove sulla superficie del terreno in relazione alla topografia della regione in analisi. Poiché lo stesso terreno viene rappresentato con un insieme di celle tale da formare una griglia di dimensioni quadrate ogni cella del D.T.M. può drenare al più in una delle 8 celle adiacenti che rappresentano le uniche direzioni possibili per il flusso (Figura 2.4).

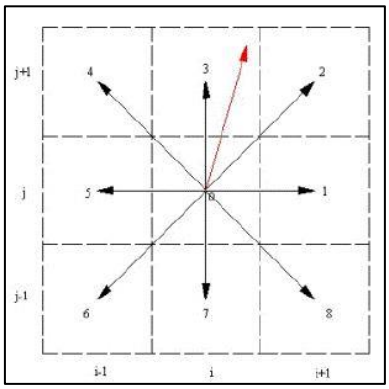


Figura 2.4: Le otto possibili direzioni di drenaggio (Franceschi et al. [22]).

L'esito della operazione è un grigliato di numeri compresi dall'1 all'8 dove il numero 1 corrisponde alla direzione Est (Figura 2.5).

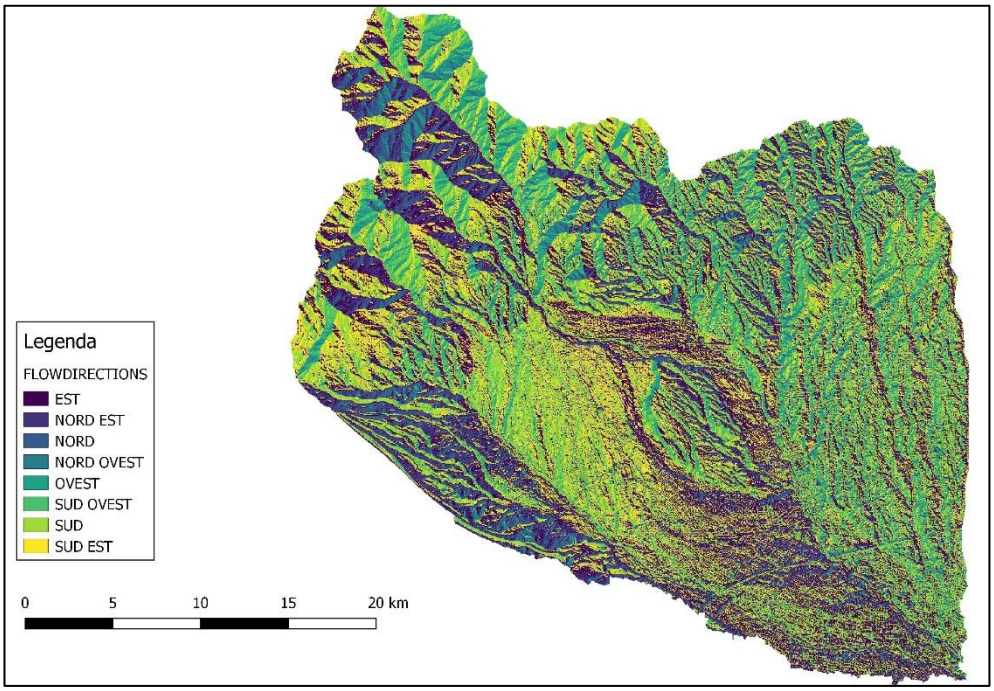


Figura 2.5: Distribuzione delle direzioni di drenaggio del bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese.

- *Draindirections*

L'uso di sole 8 possibili direzioni produce un effetto di deviazione dalla reale direzione identificata dal gradiente. La funzione consiste dunque in un algoritmo di correzione che minimizza tale effetto.

- *Markoutlets*

La funzione attribuisce alla mappa delle direzioni di drenaggio un nuovo valore pari a 10. Questo nuovo valore identifica i punti che drenano all'esterno del bacino in analisi.

- *TCA*

Questo applicativo consente di determinare una mappa di celle che rappresentano l'area che contribuisce all'afflusso in un punto del bacino. L'area i-esima è così definita:

$$A_i = \sum A_j \cdot W_j \tag{2.1}$$

dove W_j = 1, se il pixel j drena nell'i-esimo pixel, mentre vale zero negli altri casi. uDig consente di visualizzare la mappa di output in scala logaritmica (Figura 2.6), solo in questo modo è possibile visualizzare nel dettaglio l'asta principale della rete idrografica che si vuole estrarre e i valori di soglia massimo e minimo che consentono l'estrazione dei tributari che immettono nelle aste principali.

- *Water Outlet*

Date le coordinate della sezione di chiusura il comando estrae una maschera raster della forma del bacino che è poi possibile successivamente ritagliare sul DTM con il comando *Cut Out.*

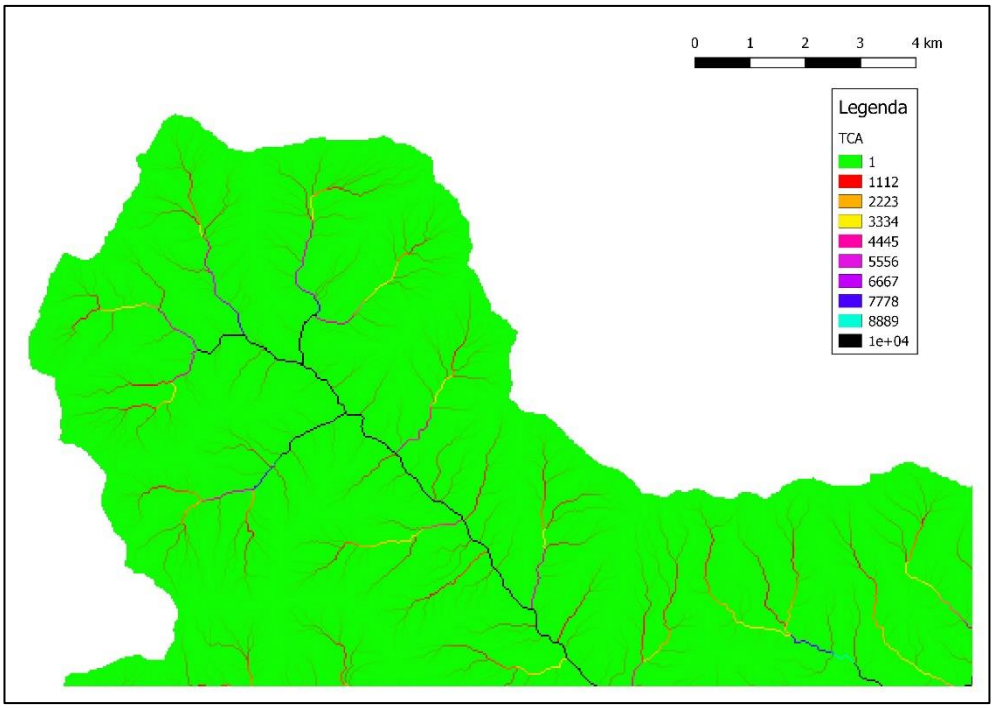


Figura 2.6: Dettaglio della mappa delle aree contribuenti per il bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese.

- *Extract Network*

La funzione permette l'estrazione della rete idrografica mediante una soglia sulle aree contribuenti, solo i punti con area contribuente maggiore della soglia danno luogo alla formazione dei canali. Il valore soglia scelto distingue una estrazione che comprende la sola asta principale da un'altra più di dettaglio che prende in considerazione il contributo dei rami capillari e dei tributari che si innestano nel percorso principale. Ciò influisce sul numero di unità con cui si parzializza il bacino di interesse.

- *Net Attributes Builder*

Questo applicativo consente di ottenere la mappa vettoriale e gli attributi dei rami (ordine all'interno della rete, lunghezza dei rami etc.) che costituiscono la rete precedentemente estratta.

- *Net Numbering*

Il comando consente l'estrazione dei sottobacini, ovvero la realizzazione di un raster, e successivamente di una mappa vettoriale con gli attributi di ciascuna porzione (area, perimetro, quota media etc.) da realizzarsi con il comando *BasinShape*, in base al grado di ramificazione imposto con il valore di soglia delle aree contribuenti e alle coordinate delle stazioni di misura ovvero dei punti di monitoraggio all'interno del bacino con cui si forza la chiusura di queste unità in corrispondenza di questi stessi punti.

- *Skyview*

La funzione restituisce una mappa raster di numeri compresi tra 0 e 1. Ciascuna cella di questo raster rappresenta il valore di Skyview Factor cioè un valore che rappresenta la porzione di cielo visibile. I valori che tendono allo zero descrivono punti della regione di interesse in cui il cielo è poco visibile o completamente ostruito mentre il massimo, il valore 1, rappresenta un punto di completa visibilità a 360 gradi (Figura 2.7).

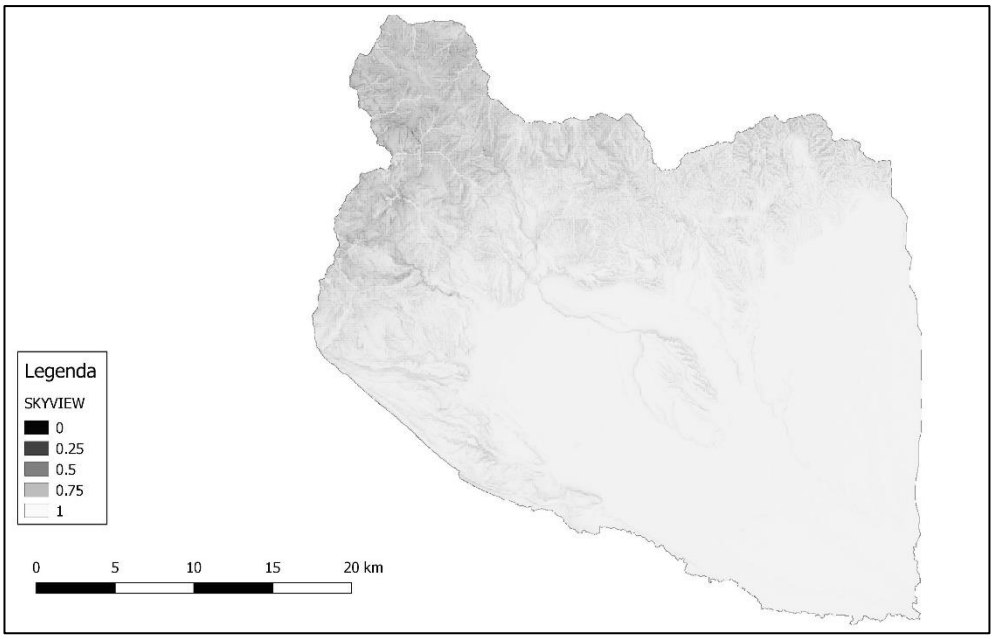


Figura 2.7: Mappa dello Skyview Factor per i punti del bacino chiuso in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese.

2.2 OMS3: Object Modeling System

OMS3 (Object Modelling System) (David, 2013 [19]) è la piattaforma liberamente scaricabile (detta *OMS console* [23]) che mette a disposizione l'ambiente nel quale eseguire, connettere e concatenare tra loro le *componenti* del modello.

La componente è una unità discreta ed autonoma di software (Rigon et al., 2017 [4]) scritta in linguaggio Java che contiene, al suo interno, il codice sorgente di risoluzione del singolo processo idrologico cui fa riferimento.

Questa può essere liberamente eseguita o connessa con altre componenti all'interno dei file di simulazione: gli *sim* file.

Lo *sim* file è una scheda dallo standard predefinito in cui si organizza la sequenza di lancio della simulazione connettendo tra di loro le componenti raccolte in una apposita libreria all'interno del *progetto*.

Una scheda si suddivide in tre parti principali dove organizzare lo script in linguaggio *groovy* [24] che dirige i movimenti di input e di output tra le componenti scelte e attivate in sequenza nella simulazione (Figura 2.8).

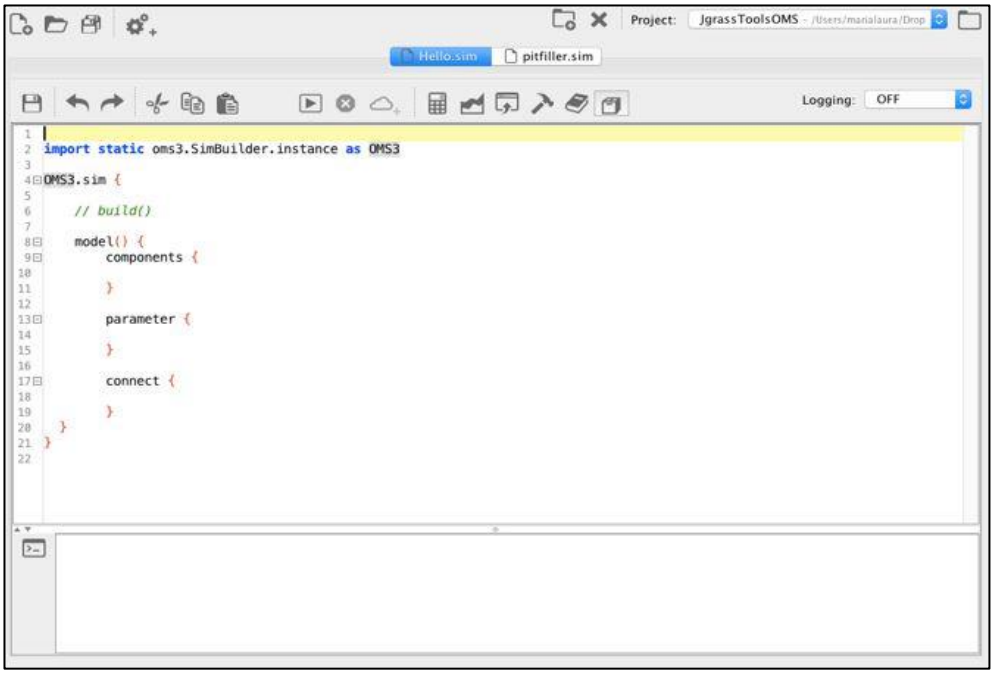


Figura 2.8: Lo sim file (Rigon et al., 2015 [25]).

Le tre parti in cui è diviso lo *sim* file sono:

- *components*: lo spazio di script riservato alla dichiarazione delle componenti da attivare poste all'interno della libreria;
- *parameter*: la parte di codice dove si elencano i percorsi di destinazione, all'interno del *progetto*, dei file in formato .csv dei dati di input e dei risultati di output nonché i valori che si assegnano ai parametri dei processi idrologici delle componenti attivate;
- *connect*: lo spazio di script dove si dirigono i movimenti di input e di output tra le componenti attivate in sequenza.

Una volta impostato lo script della scheda è possibile, con i comandi della piattaforma, lanciare ed eseguire la simulazione desiderata.

Il *progetto* è dunque costituito da un insieme di sottocartelle (Figura 2.9):

- *data*: lo spazio all'interno del progetto dove allocare i dati di input;
- *lib*: la libreria dove collocare le componenti del progetto da attivare;
- *output*: lo spazio dove collocare i file di output;
- *sim*: l'ambiente dove stanziare i *sim* file del progetto.

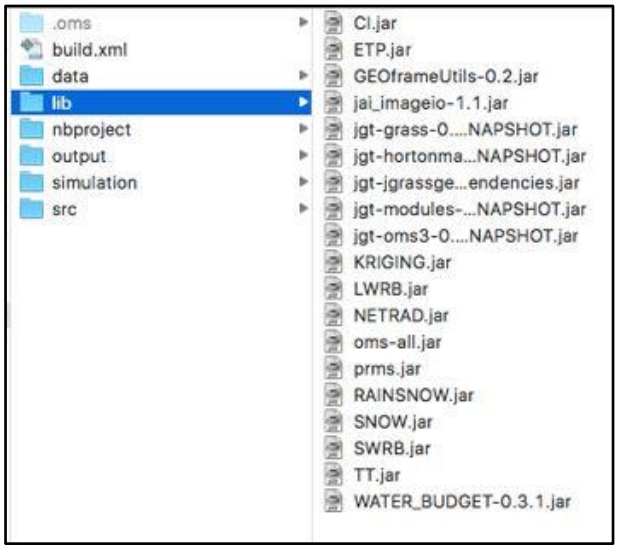


Figura 2.9: Organizzazione di un progetto in *GEOframe-NewAGE* (Rigon et al., 2015 [25]).

Per essere lette in *OMS3* le serie di dati devono essere formattate in un file di tipo ".csv" con una intestazione standardizzata del tipo in Figura 2.10. Nel dettaglio la quarta e la quinta riga devono contenere gli ID dei punti cui fa riferimento la serie di dati (nell'esempio in Figura 2.10 sono le stazioni 1,2,3,4,5); la sesta riga deve contenere le informazioni sul tipo di dato di input e la settima riga specifica il formato con cui devono essere registrate data e ora di ogni record (YYYY-MM-dd hh:mm).

```
@T,table
Created,2017-04-03 09:31
Author,HortonMachine library
@H,timestamp,value_1,value_2,value_3,value_4,value_5
ID,,1,2,3,4,5
Type,Date,Double,Double,Double,Double,Double
Format,yyyy-MM-dd HH:mm,,,,,
,2008-01-01 00:00,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
,2008-01-01 01:00,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
,2008-01-01 02:00,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
,2008-01-01 03:00,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
,2008-01-01 04:00,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
,2008-01-01 05:00,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
```

Figura 2.10: Formattazione dei dati in *GEOframe-NewAGE*.

I paragrafi successivi illustrano i contenuti delle componenti del sistema *GEOframe-NewAGE* utilizzate per la costruzione del modello idrologico di questa trattazione. Questi elementi di libreria, come si visualizza in Figura 2.9, sono file di tipo ".jar" e sono liberamente scaricabili dalle repository GitHub di *GEOframe-NewAGE* [20]. All'interno dello stesso sito è possibile la consultazione del codice sorgente di ciascuna componente [26] utile, nella fase di assemblamento, per la direzione dei movimenti di input e di output nel momento in cui più componenti vengono assemblate per la risoluzione di una unica sequenza. Ciascuna componente ha il suo manuale di riferimento per l'uso.

2.2.1 Krigings component

La componente *Krigings* del sistema *GEOframe-NewAGE* [27] viene utilizzata per l'interpolazione spaziale delle variabili climatologiche del modello ovvero le precipitazioni e la temperatura dell'aria. Il kriging è infatti un metodo di regressione utilizzato in geostatica che consente di interpolare una variabile nello spazio in punti di cui non si conoscono le misure minimizzando l'errore quadratico medio. L'interpolazione si esegue a partire da punti della stessa regione in cui si conoscono i valori effettivi della grandezza che si vuole interpolare. Questi punti sono le stazioni meteorologiche e pluviometriche di misura interne o prossime al bacino di interesse.

Il kriging fonda sul concetto che la grandezza in oggetto che si vuole interpolare vari nello spazio con continuità nell'idea che la dispersione di una variabile spaziale decresca con la distanza. Lo strumento che correla le osservazioni con la distanza è il *semivariogramma sperimentale* (Cressie et al., 1993)

$$\gamma = \frac{1}{2N(h)} \sum_{j=1}^{N(h)} (Z(x_0) - Z(x_i))^2 \tag{2.2}$$

dove $N(h)$ è il numero di punti di cui si conosce il valore della variabile spaziale compreso nell'intervallo della distanza h; $Z(x_0)$ è la variabile aleatoria del valore di misura assunto dalla variabile nel punto x_0 dove ho lo strumento di misura, ovvero $z(x_0)$, e $Z(x_i)$ è la variabile aleatoria associata alla stessa variabile ma nel punto i-esimo dove questa è incognita, ovvero $z(x_i)$.

Nel momento in cui la variabile aleatoria $Z(x_i)$ è correlata con la variabile aleatoria $Z(x_0)$ attraverso il peso assegnato a $z(x_0)$, ovvero il termine $\lambda(x_0)$, allora, indicati con il pedice α tutti i punti in cui il valore della variabile è noto all'interno della distanza h, la stima di $Z(x_i)$, cui è associato il valore

della variabile che si vuole determinare $z(x_i)$, è data dalla relazione (Goovaerts, 1997):

$$Z(x_i) - m(x_i) = \sum_{\alpha=1}^{N} \lambda(x_\alpha) Z(x_\alpha) - m(x_\alpha) \tag{2.3}$$

dove con m rappresenta la media delle variabili aleatorie e il peso λ viene scelto le rispetto di tre condizioni: i pesi sono tali da minimizzare l'errore di stima; l'errore medio deve essere nullo ed infine, come esprime la relazione di seguito, la sommatoria dei pesi deve essere uguale a zero:

$$\sum_{\alpha=1}^{N} \lambda(x_\alpha) Z(x_\alpha) = 0 \tag{2.4}$$

Le condizioni appena elencate consistono in un sistema lineare (Kitanidis, 1997) in cui l'incognita è il peso del sistema di dati. La matrice di questo sistema dipende proprio dal semivariogramma sperimentale. Nell'ordine di essere esteso a qualsiasi distanza il semivariogramma sperimentale necessita di essere aderente ad un *semivariogramma teorico*.

Il semivariogramma teorico contiene tre parametri (i numeri di range, sill e nugget) che necessitano di essere confrontati con i dati esistenti prima di essere inseriti nell'equazione (2.2) la cui soluzione restituisce i pesi delle misure. Con il termine *sill* si indica il limite superiore del semivariogramma; il *range* consiste nella distanza di massima correlazione tra le variabili per la quale si raggiunge il valore di sill mentre il *nugget* consente la stima del residuo in quanto combina quelle variazioni spaziali presenti sulle distanze più brevi del passo di campionamento (Figura 2.11**).**

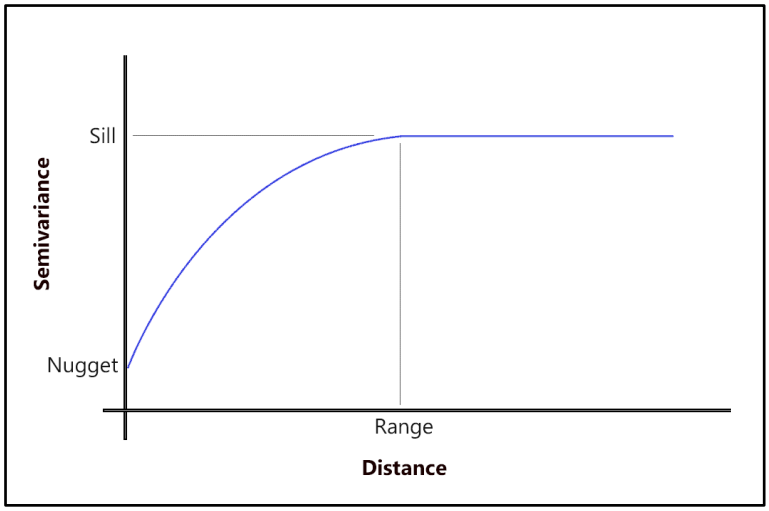


Figura 2.11: Il semivariogramma.

Si distinguono due tipi di Kriging:

- *Simple kriging*: il quale considera noto e costante per tutta l'area di studio il valore della media $m(x_i)$;
- *Ordinary kriging*: il quale prende in conto le fluttuazioni locali della media. In questo caso si considera incognito il valore della media $m(x_i)$;
- *Detrend Kriging*: il quale considera un trend, ovvero la variazione della media delle osservazioni con la quota. La procedura in questi casi consiste nel rimuovere il trend dai dati originali e di eseguire un ordinary kriging. La somma dei valori così interpolati e del trend restituisce il risultato finale.

La componente è composta di quattro *sim* file:

- *EV.sim* per lo studio del semivariogramma sperimentale: fissata la distanza e forniti in ingresso sia le serie temporali misurate della grandezza da spazializzare che le posizioni delle stazioni di misura, la simulazione restituisce le semivarianze e le distanze.

- *PS_EV_TV.sim* per la determinazione dei numeri di range, sill e nugget del semivariogramma: la ricerca dei valori di questi parametri che meglio aderiscono al semivariogramma sperimentale avviene attraverso il *Particle Swarm*, un calibratore integrato in *OMS3* che confronta il diagramma sperimentale con il semivariogramma teorico generato a seconda del tipo di modello teorico scelto tra quelli disponibili (lineare, esponenziale, gaussiano, Bessel etc.). La simulazione prende in ingresso le semivarianze e le distanze generate nella simulazione precedente.
- *LeaveOneOut.sim* per la generazione di una serie simulata (con i valori di range, sill e nugget ottimizzati) in corrispondenza dei punti con le serie osservate. La procedura serve per stabilire se ritenere accettabili i valori dei parametri ottimizzati nella fase precedente in base all'esito del confronto fra le serie simulata generata con questa simulazione e le serie misurate. La simulazione prende in ingresso i valori dei parametri ottimizzati; le coordinate delle stazioni di misura e le serie temporali osservate della grandezza che si vuole spazializzare. All'interno della stessa scheda si specifica anche il tipo di kriging che si intende eseguire.
- *Krigings_points.sim* per la spazializzazione della grandezza che si vuole interpolare nei punti di cui non si conosce la misura. A differenza della fase precedente questa simulazione prende in ingresso anche le coordinate dei punti non strumentati su cui si vuole eseguire il tipo di kriging scelto.

2.2.2 SWRB component

La componente *SWRB* [28] di *GEOframe-NewAGE* stima le serie temporali di radiazione solare ad onda corta $SW_{\downarrow}$ per i punti georefenziati specificati in ingresso combinando le loro serie di temperatura con i dati estratti dalle mappe raster del terreno e dello skyview. Questi consistono nei file di input

da preparare per la scheda di simulazione presente all'interno della componente.

Si definiscono ad *onda corta* le radiazioni elettromagnetiche appartenenti allo spettro del visibile e dell'ultravioletto che emesse dal Sole raggiungono e scaldano la superficie terrestre. Queste, prima di incedere su un punto della superficie, devono attraversare gli strati dell'atmosfera in parte venendo assorbiti o deviati dal loro percorso diretto. La radiazione solare ad onda corta calcolata dalla componente è il risultato di due quote parti: una frazione che consiste nel termine radiazione solare diretta $S_{\downarrow}$ e un'altra che rappresenta la radiazione solare diffusa $d_{\downarrow}$. La prima è la radiazione incidente che arriva nel punto direttamente dal Sole, la seconda giunge invece nello stesso punto solo una volta che è stata deviata dal suo percorso originale dagli strati di gas e dalle nubi presenti nell'atmosfera. Entrambi i termini si misurano in [W·m^{-2}]. La componente modella le due parti nel rispetto delle soluzioni formulate da Javier Gonzales Corripio nel 2002 (Corripio, 2002 [29]) e nel 2003 (Corripio, 2003 [29]).

In presenza di cielo sereno, la parte di radiazione solare incidente diretta $S_{\downarrow}$, valutata su una superficie arbitraria inclinata in un punto, si calcola come il prodotto:

$$S_{\downarrow} = C_1 \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos(\theta_s) \cdot T_s \cdot \beta_s \cdot \psi \qquad (2.5)$$

I termini contenuti all'interno della formula rappresentano:

- C_1, la frazione di onda solare compresa in un intervallo di lunghezza d'onda (0,3 – 3,0 μm) e per il quale si assume che $C_1 = 0{,}9751$;
- I_{sc} [W·m^{-2}], la costante solare;
- E_0 [-], un fattore correttivo che tiene conto della eccentricità dell'orbita terrestre;
- ϑ_s [rad], l'angolo compreso tra il raggio solare e la superficie terrestre;

- T_s [-], il prodotto della trasmittanza atmosferica;
- β_s [-], un coefficiente di correzione che tiene conto di un andamento di aumento della trasmittanza al crescere della quota;
- ψ [-] indice di zona d'ombra.

Nel dettaglio il termine T_s è il risultato del prodotto tra i fattori τ [-] di trasmittanza dello scattering di Rayleigh; dello strato di ozono; della miscela di gas che compone l'atmosfera; del vapore acqueo e dell'aerosol.

La parte di radiazione diffusa $d_\downarrow$ calcolata in un punto è invece il risultato della operazione riportata di seguito:

$$d_\downarrow = (d_{\downarrow r} + d_{\downarrow a} + d_{\downarrow m}) \cdot V_s \tag{2.6}$$

dove la frazione di cielo visibile dedotta dalla mappa dello skyview V_s [-] viene moltiplicata per una somma composta rispettivamente dal termine di irradianza diffusa; il termine di scattering prodotto dall'aerosol ed infine il termine di riflessione multipla.

Al termine del calcolo delle due parti:

$$SW_\downarrow = S_\downarrow + d_\downarrow \tag{2.7}$$

2.2.3 LWRB component

Le onde di radiazione solare che raggiungono la Terra vengono in parte assorbite e, soprattutto, in parte riemesse dalla superficie terrestre nello spettro dell'infrarosso. Per tale motivo quest'ultimo tipo di radiazione si dice ad *onda lunga*. L'insieme di radiazioni che appartengono a questa categoria sono:

- le onde di *upwelling* $LW_{\uparrow}$, che rilasciate dalla superficie terrestre riescono a superare lo strato di atmosfera e si liberano nello spazio;
- le onde di *downwelling* $LW_{\downarrow}$, che non riescono a liberarsi nello spazio e trattenute per effetto serra compiono il percorso inverso, ovvero dall'atmosfera alla superficie terrestre, riscaldando ulteriormente la Terra.

La componente *LWRB* del sistema *GEOframe-NewAGE* [30] contiene i *sim* file per il calcolo delle due LW nei punti geo riferiti che possiedono le loro serie di temperatura dell'aria. Le formulazioni per i due contributi si basano sulla legge di Stefan-Boltzmann [31].

Definite:

- σ, la costante di Stefan-Boltzmann. $\sigma = 5{,}670 \cdot 10^{-8}$;
- T_a [K], la temperatura dell'aria in corrispondenza della superficie del suolo;
- T_s [K], la temperatura superficiale del suolo;
- ε_s [-], l'emissività del suolo;
- $\varepsilon_{all-sky}$ [-], l'emissività dell'atmosfera

La formula per il calcolo dell'upwelling è:

$$LW_{\uparrow} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \tag{2.8}$$

La formula per il calcolo del downwelling è:

$$LW_{\downarrow} = \varepsilon_{all-sky} \cdot \sigma \cdot T_a^4 \tag{2.9}$$

Per la risoluzione delle due formule la componente offre una possibilità di scelta per:

- i valori di emissività del suolo ε_s in quanto variabili rispetto ai diversi tipi di superficie (**Fig.2.11**)

Nature of surface	Emissivity
Bare soil (mineral)	$0.95 - 0.97$
Bare soil (organic)	$0.97 - 0.98$
Grassy vegetation	$0.97 - 0.98$
Tree vegetation	$0.96 - 0.97$
Snow (old)	0.97
Snow (fresh)	0.99

Fig.2.11: Valori di emissività del suolo per tipo di superficie (Bancheri et al., 2016 [30]**).**

- i modelli per implementare una correzione nel downwelling che tenga conto delle condizioni di cielo nuvoloso. Tale condizione si esplica in una riformulazione della emissività dell'atmosfera:

$$\varepsilon_{all-sky} = \varepsilon_{clear} \cdot (1 + a \cdot c^b) \qquad (2.10)$$

nella quale c è il *clearness index* [-] (un indice che quantifica quanto il cielo sia sgombro di nubi) e l'emissività ε_{clear} viene modellata nel rispetto di una delle possibili formulazioni raccolte in letteratura e riassunte, come estratto dal manuale della componente, in Figura 2.12 per i coefficienti X, Y e Z di Figura 2.13.

#	Component Name	Formulation	Reference
1	Angstrom	$\epsilon_{clear} = X - Y \cdot 10^{Ze}$	Angstrom [1918] (2)
2	Brunt's	$\epsilon_{clear} = X + Y \cdot e^{0.5}$	Brunt's [1932](3)
3	Swinbank	$\epsilon_{clear} = X \cdot 10^{-13} \cdot T_a^6$	Swinbank [1963](4)
4	Idso and Jackson	$\epsilon_{clear} = 1 - X \cdot exp(-Y \cdot 10^{-4} \cdot (273 - T_a)^2)$	Idso and Jackson [1969](5)
5	Brutsaert	$\epsilon_{clear} = X \cdot (e/T_a)^{1/7}$	Brutsaert [1975] (6)
6	Idso	$\epsilon_{clear} = X + Y \cdot 10^{-4} \cdot e \cdot exp(1500/T_a)$	Idso [1981] (7)
7	Monteith and Unsworth	$\epsilon_{clear} = X + Y \cdot \sigma \cdot T_a^4$	Monteith and Unsworth [1990] (8)
8	Konzelmann	$\epsilon_{clear} = X + Y \cdot (e/T_a)^{1/8}$	Konzelmann et al [1994] (9)
9	Prata	$\epsilon_{clear} = [1 - (X + w) \cdot exp(-(Y + Z \cdot w)^{1/2})]$	Prata [1996](10)
10	Dilley and O'brien	$\epsilon_{clear} = X + Y \cdot (T_a/273.16)^6 + Z \cdot (w/25)^{1/2}$	Dilley and O'brien [1998] (11)

Table 1 Clear sky emissivity formulations: T_a is the air temperatue [K], w $[kg/m^2]$ is precipitable water = 4650 $[e_0/T_a]$ and e [kPa] screen-level water-vapour pressure.

Figura 2.12: Modelli per l'emissività in condizioni di cielo sgombro disponibili all'interno della componente (Bancheri et al., 2016 [30]).

Component Name	X	Y	Z
Angstrom	0.83	0.18	−0.07
Brunt?s	0.52	0.21	[−]
Swinbank	5.31	[−]	[−]
Idso and Jackson	0.26	−7.77	[−]
Brutsaert	1.72	7	[−]
Idso	0.70	5.95	[−]
Monteith and Unsworth	−119.00	1.06	[−]
Konzelmann et al	0.23	0.48	[−]
Prata	1.00	1.20	3.00
Dilley and O'brien	59.38	113.70	96.96

Figura 2.13: Valori dei parametri dei modelli per l'emissività in condizioni di cielo sgombro disponibili all'interno della componente (Bancheri et al., 2016 [30]).

In assenza di elementi per la valutazione dell'indice di clearness e dei parametri da assegnare sia alla emissività del suolo che alla correzione per il downwelling lo *sim* file all'interno della componente è già impostato su valori di default del fornitore.

2.2.4 Net Radiation Balance component

Si definisce radiazione solare *netta* R_n [W·m^{-2}] il bilancio tra le parti di radiazione ad onda corta e quelle di radiazione ad onda lunga. All'interno del sistema *GEOframe-NewAGE*, la radiazione solare netta è un dato di input per la componente che calcola l'evapotraspirazione potenziale.

Dati dei punti geo riferiti muniti di:

- $SW_{\downarrow}$ [W·m^{-2}], una serie temporale di radiazione totale ad onda corta;
- $LW_{\downarrow}$ [W·m^{-2}], una serie temporale di radiazione ad onda lunga di downwelling;
- $LW_{\uparrow}$ [W·m^{-2}], una serie temporale di radiazione ad onda lunga di upwelling

la componente *Net Radiation Balance* [32] esegue il bilancio per il calcolo della radiazione netta:

$$R_n = (1 - \alpha)SW_{\downarrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow} \tag{2.11}$$

α [-] è l'albedo che esprime il potere riflettente della superficie. In assenza di materiale per la determinazione di questo parametro la componente adotta un valore di default.

2.2.5 ET component

La componente *ET* delle repository del sistema *GEOframe-NewAGE* [33] contiene le schede di simulazione per il calcolo della evapotraspirazione potenziale nei punti geo riferiti specificati in ingresso. La soluzione tra i metodi a disposizione all'interno della componente che comprende il minor numero di parametri da inserire e quantificare è quella che implementa la soluzione formulata da Prietsley-Taylor (Prietsley-Taylor, 1972 [34]).

Questa correla l'evapotraspirazione potenziale in un punto con la sua serie di radiazione netta che consiste in un dato di partenza per l'esecuzione della componente.

Definiti con i termini:

- ETP [mm/h], l'evapotraspirazione potenziale;
- R_n [MJ·m^2 ·h^{-1}], la radiazione solare netta;
- Δ [kPa·°C^{-1}], la pendenza della curva di saturazione;
- γ [kPa·°C^{-1}], la costante psicometrica;
- G [MJ·m^2 ·h^{-1}], il flusso di calore del suolo in superficie;
- $\alpha = 1{,}26$, il coefficiente di Prietsley-Taylor.

Il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale in un punto è dato da:

$$ETP = \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{(\Delta + \gamma)} \tag{2.12}$$

dove G è valutato come il prodotto della radiazione solare R_n per G_i. Quest'ultimo è un coefficiente che può assumere due valori diversi, uno per il flusso che avviene per le ore diurne e un altro che avviene per le ore notturne.

2.2.6 Rain Snow Separation component

La componente *Rain Snow Separation* [35] del sistema *GEOframe-NewAGE* contiene al suo interno lo *sim* file che simula la separazione della serie di precipitazioni $P(t)$ di un punto in una serie di pioggia $P_r(t)$ e una di neve $P_s(t)$. Gli unici input da collegare a questa scheda di simulazione sono dunque le serie di precipitazioni per i punti geo riferiti in cui si vuole eseguire questa distinzione e i valori di temperatura di scioglimento e dei coefficienti α che compaiono nelle due formule di filtro (Kavetski et al., 2011 [11]) già illustrate nel Capitolo 1, le equazioni (1.6) e (1.7).

2.2.7 Snow component

La componente in *GEOframe-NewAGE* da attivare per la generazione delle serie di Snow Water Equivalent e di portata di scioglimento, nei punti geo riferiti da specificare in ingresso, si chiama *Snow* [36].

La simulazione si esegue una volta che si sono predisposte le serie di output della componente illustrata nel paragrafo precedente.

La caratteristica di questa componente è quella di risolvere i passaggi illustrati all'interno del Capitolo 1 nel paragrafo 1.2.2 per il bilancio dello strato nevoso. Una volta compilata la sua scheda di simulazione, con i valori dei parametri associati alle equazioni del procedimento già illustrato, e una volta che è stata collegata alle serie di temperatura e radiazione solare dei punti geo riferiti in cui si vuole fare il calcolo, la componente è dunque pronta per essere eseguita.

2.2.8 Water Budget component

Il paragrafo 1.2.1 del capitolo 1 ha illustrato le equazioni costitutive che risolvono il bilancio idrico per un HRU e che a partire da un flusso di precipitazioni in ingresso stima il deflusso in uscita.

La componente *Water Budget* del sistema *GEOframe-NewAGE* [37] è lo strumento che risolve le equazioni (1.1), (1.2) e (1.3) del paragrafo appena citato per i punti geo riferiti forniti in ingresso e stima, per gli stessi punti, una serie simulata di portata ed evapotraspirazione. La stessa però contiene al suo interno organizzate in sotto cartelle tutti gli applicativi in estensione "*java*" che occorrono per modellare il punto nel sistema a serie di invasi illustrato nel capitolo 1 ed utilizzato per il modello idrologico di questa trattazione.

Come emerge da una consultazione del codice sorgente di questa componente [26], questi applicativi sono denominati come di seguito:

- "*WaterBudgetCanopyOut.java*", per il layer della canopy;
- *"WaterBudgetRootZone.java*", per la root zone;
- "*WaterBudgetGroundwater.java*", per il layer della groundwater;
- "*WaterBudgetRunoff.java*", per la run off.

L'utente ricostruisce l'organizzazione in cinque layer con cui simulare la risposta idrologica in corrispondenza del punto di interesse come modellata

nel capitolo 1 compilando lo *sim* file nel seguente modo: attivando gli applicativi con estensione ".jar" appena elencati nella sezione *components* della scheda (Figura 2.8); definendo e attribuendo un valore ai parametri del modello nella sezione *parameters*, e dirigendo i flussi in entrata e in uscita tra gli applicativi ".jar" nella sezione *connect*.

Il risultato è una scheda per il punto di interesse compilata come riportato in Allegato C. All'interno delle repository di GitHub del sistema *GEOframe-NewAGE* [20] ci sono progetti con schede già precompilate impostate come illustrato.

Le schede contengono le stringhe per la selezione del legame non lineare della formula (1.2) e la scelta del tipo di risolutore dell'equazione di bilancio (1.1). L'integratore tra quelli disponibili nella componente utilizzato per risolvere la (1.1) in questa trattazione è il Dormand Prince, appartenente alla famiglia Runge-Kutta di metodi per la risoluzione delle equazioni differenziali.

2.3 Il calibratore

La procedura automatizzata multi-obiettivo integrata nella piattaforma OMS3, con cui si calibra il modello, si chiama *LUCA (Let Us CAlibrate)* (US Geoloical Survey, [38]) ed è suddivisa in un algoritmo globale di ricerca e in un insieme di funzioni obiettivo che valutano la differenza tra dati osservati e dati misurati.

Allo scopo, l'utente imposta il set up della calibrazione su un apposito *sim* file (Figura 2.14) che per struttura differisce dalla tipologia illustrata precedentemente per l'esecuzione delle componenti del sistema *GEOframe-NewAGE*.

```
1  import static oms3.SimBuilder.instance as OMS3
2  import static oms3.SimBuilder.*
3  def home=oms_prj
4
5  luca = OMS3.luca_run(name:"vgm", {
6      outputstrategy(dir: "$oms_prj/output", scheme:SIMPLE)
7      model() {
8
9      }
10     //Define Luca Parameters
11     rounds 2
12     run_start          "2002-01-01"
13     calibration_start "2003-01-01"
14     run_end            "2003-12-31"
15     // step definitions
16     step {
17         parameter {
18
19         }
20         objfunc(method:.., timestep:..,invalidDataValue:..) {
21             sim(file:..., table:..., column:...)
22             obs(file:..., table:..., column:...)
23         }
24     }
25     step {
26         parameter {
27
28         }
29         objfunc(method:.., timestep:..,invalidDataValue:..) {
30             sim(file:..., table:..., column:...)
31             obs(file:..., table:..., column:...)
32         }
33     }
34     })
35
```

Figura 2.14: Struttura di uno *sim* file di calibrazione (Formetta et al., 2016 [39]).

Il file è principalmente suddiviso in quattro parti. La prima parte è quella nella quale si compila, o si connette al file, la sequenza modellistica che si intende calibrare. La seconda è riservata al set up dell'algoritmo di ricerca e del numero di record posti a calibrazione. La terza parte deve contenere al suo interno l'elenco dei parametri del modello che si vogliono calibrare e il loro range di generazione. Infine, la quarta ed ultima parte, è adibita alla scelta della funzione obiettivo da utilizzare e ai percorsi in cui all'interno del *progetto* sono collocati il ".csv" con i record della serie osservata e il ".csv" con il record della serie misurata.

I paragrafi successivi illustrano le caratteristiche dell'algoritmo di calibrazione e della funzione obiettivo utilizzate in questa elaborazione. Si rimanda, invece, al capitolo successivo, e ad allegati specifici, l'illustrazione della sequenza di calibrazione e dello script compilato che si sono impostati per il modello idrologico di questo elaborato.

2.3.1 LUCA (Let Us Calibrate)

L'algoritmo di ricerca su cui fonda la procedura multi-obiettivo di calibrazione *LUCA (Let Us CAlibrate)* è la Shuffled Complex Evolution (SCE) (Duan et al., 1993 [40]).

La SCE consiste nei seguenti passaggi:

- Il set di parametri da calibrare viene considerato come un punto di n dimensioni nello spazio dove n è il numero di parametri. L'algoritmo di ricerca genera, per ciascun parametro, dei punti casuali entro il limite inferiore e superiore di range che si assegna al singolo parametro.
- Il modello viene lanciato per ogni set di parametri generati e la funzione obiettivo viene usata per calcolare un valore di criterio per ciascun punto.
- I punti vengono divisi in gruppi più piccoli chiamati complessi cosicché si distribuiscano equamente punti di buoni valori di criterio e punti di peggior valore di criterio.
- Successivamente diversi punti vengono selezionati per determinare un sotto complesso. Nel sotto complesso viene generato un nuovo punto e quello che in precedenza ha avuto un inferiore valore di criterio viene rimpiazzato con questo nuovo punto. Questo passaggio viene ripetuto tante volte all'interno del sotto complesso con diversi punti casuali.
- Tutti i punti nei complessi vengono infine riuniti in un solo gruppo.

Gli ultimi tre passaggi della procedura vengono ripetuti per diversi cicli di loop tante volte fino a quando il modello raggiunge il numero massimo di esecuzioni impostate dall'utente oppure nel caso in cui la percentuale di

cambio nel miglior valore di criterio del loop corrente sia inferiore di una certa percentuale del loop precedente.

All'interno del *sim* file di calibrazione, l'utente imposta gli *step* ed il numero di *round* (Figura 2.15).

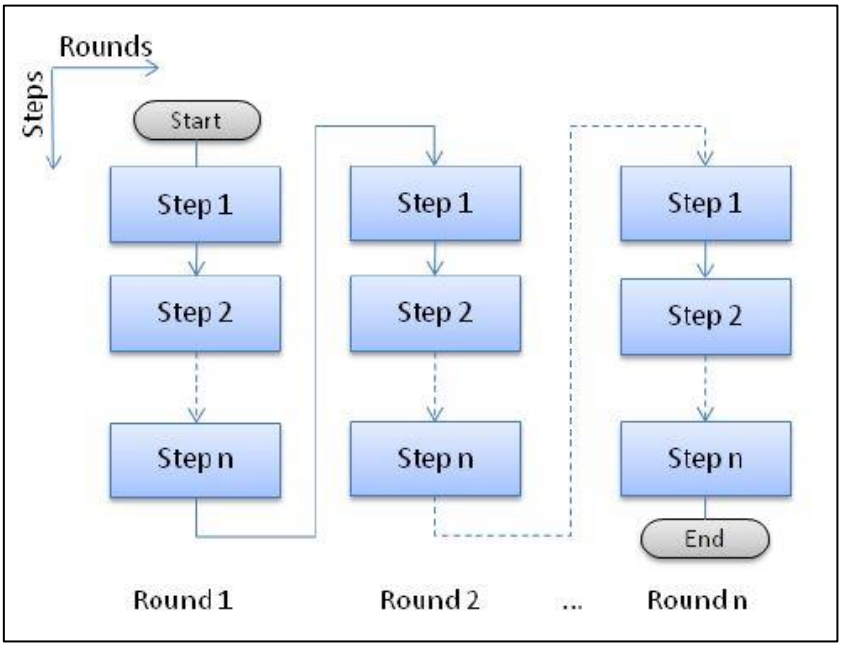


Figura 2.15: Divisione in steps e rounds (Bancheri, 2017 [8]).

Lo *step* corrisponde all'assegnazione di un set di parametri di una data distribuzione mentre il *round* consiste nell'esecuzione del numero di uno o più step. La calibrazione procede uno step alla volta e al termine di ciascuno *step* i parametri calibrati vengono passati allo step successivo. Questo avviene fino a quando non viene completato il numero di step all'interno di un round.

2.3.2 La funzione obiettivo

La funzione obiettivo che guida il processo di calibrazione e valuta l'aderenza tra la serie generata dalla simulazione e la serie delle osservazioni è il Kling-Gupta efficiency (KGE) (Gupta et al., 2009 [41]).

L'equazione utilizzata per la definizione del KGE è:

$$KGE = 1 - ED \tag{2.13}$$

dove

$$ED = \sqrt{(R-1)^2 + (A-1)^2 + (B-1)^2} \tag{2.14}$$

- R rappresenta il coefficiente di correlazione lineare tra i valori della serie simulata (S) e i valori della serie osservata (O);
- A è il rapporto tra la deviazione standard della serie misurata σ_0 e la deviazione standard della serie simulata σ_s

$$A = \frac{\sigma_0}{\sigma_s} \tag{2.15}$$

- B, definite le medie delle serie μ_0 e μ_S, è il coefficiente che tiene conto dell'errore sistematico

$$B = \frac{\mu_S - \mu_0}{\sigma_0} \tag{2.16}$$

L'aderenza tra le serie è tanto più alta quanto il valore di KGE è prossimo ad 1. La caratteristica che distingue il KGE da altre funzioni obiettivo presenti in letteratura, come il Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), è quella di riuscire a fornire dei parametri di ottimo che, come visto, contemporaneamente riescono a prendere in considerazione il problema dell'errore sistematico, la correlazione lineare tra le serie e i loro indici di dispersione (Gupta et al., 2009 [41]).

Capitolo 3

3 APPLICAZIONE AL BACINO DEL TORRENTE CERVO

Il capitolo illustra il set up e l'applicazione di un modello idrologico a serie di invasi, realizzato con l'assemblamento degli strumenti che costituiscono il sistema *GEOframe-NewAGE*, al caso reale di stima delle portate idriche nella sezione non strumentata del T. Cervo a Castelletto Cervo (BI) al fine di determinare gli elementi per lo studio delle caratteristiche della risorsa idrica nella sezione di interesse. Lo scopo del modello è, inoltre, di riuscire a simulare il più fedelmente possibile il comportamento pedemontano del bacino, contraddistinto da piene tardo primaverili dovute allo scioglimento delle nevi, piogge abbondanti nei mesi autunnali e periodi siccitosi dovuti a prelievi per gli sfruttamenti ad uso agricolo ed idroelettrico.

Questa sezione dell'elaborato si divide in tre parti: la prima introduce il bacino del T. Cervo, inquadra la sezione di interesse, riepiloga i dati a disposizione e fa uso di alcuni strumenti per il delineamento delle caratteristiche topografiche e geomorfologiche del bacino idrografico. La seconda illustra passo dopo passo le sequenze per l'assemblamento e il set up delle componenti che simulando i diversi processi idrologici compongono il modello. La terza ed ultima parte spiega le procedure di calibrazione e validazione che sono state impiegate.

3.1 Il bacino del Torrente Cervo

Il T. Cervo (Figura 3.1) è un torrente del Piemonte conosciuto per essere un tributario principale del fiume Sesia e il principale corso d'acqua che attraversa le provincie di Biella e Vercelli.

Figura 3.1: Foto del T.Cervo a Quinto Vercellese.

Il torrente ha origine a circa 1600 m.s.l.m, sulle Alpi biellesi, ovvero il gruppo montuoso situato nella zona sud orientale delle Alpi Pennine le quali costituiscono un importante complesso glaciale della catena delle Alpi. Il torrente percorre la Valle Cervo, cui dà il nome, per poi scorrere nelle piane dei comuni di Biella e di Vercelli dove è fonte di sostentamento per le coltivazioni agricole; la produzione di attività tessili ed infine la produzione di energia elettrica. Il torrente conclude il suo percorso, lungo 65 km, sulla confluenza del Sesia a circa 132 m.s.l.m.

Il suo bacino chiuso alla confluenza con il fiume Sesia sottende un'area di 1024 kmq (Tabella 3.1), di principale orientamento Nord-Ovest Sud-Est, la quale comprende i sottobacini idrografici del T.Elvo, suo principale tributario, del T.Ostola, del T.Strona di Valdemosso e del T.Oropa.

Bacino del T. Cervo alla confl. fiume Sesia						
Superficie totale [kmq]	Perimetro [km]	Orientamento prevalente	Quota max [m.s.l.m.]	Quota min [m.s.l.m.]	Quota media [m.s.l.m.]	Pendenza media [%]
1024	152	SE	2536	126	500	14,5

Tabella 3.1: Anagrafica del Bacino del T.Cervo chiuso alla confl. con il fiume Sesia (Regione Piemonte, [42]).

Il bacino presenta caratteristiche di tipo pedemontano tra cui fenomeni di scioglimento delle nevi sulle Alpi e Prealpi biellesi, precipitazioni più intense nel periodo autunnale e tardo primaverile, una temperatura media annua di 11°C e infine, nelle piane, periodi di secca a causa dello sfruttamento delle acque.

3.1.1 Inquadramento

La sezione non strumentata di interesse, individuata sulla carta della BDTRE con un cerchio blu (Figura 3.2**),** è collocata nel comune di Castelletto Cervo (BI).

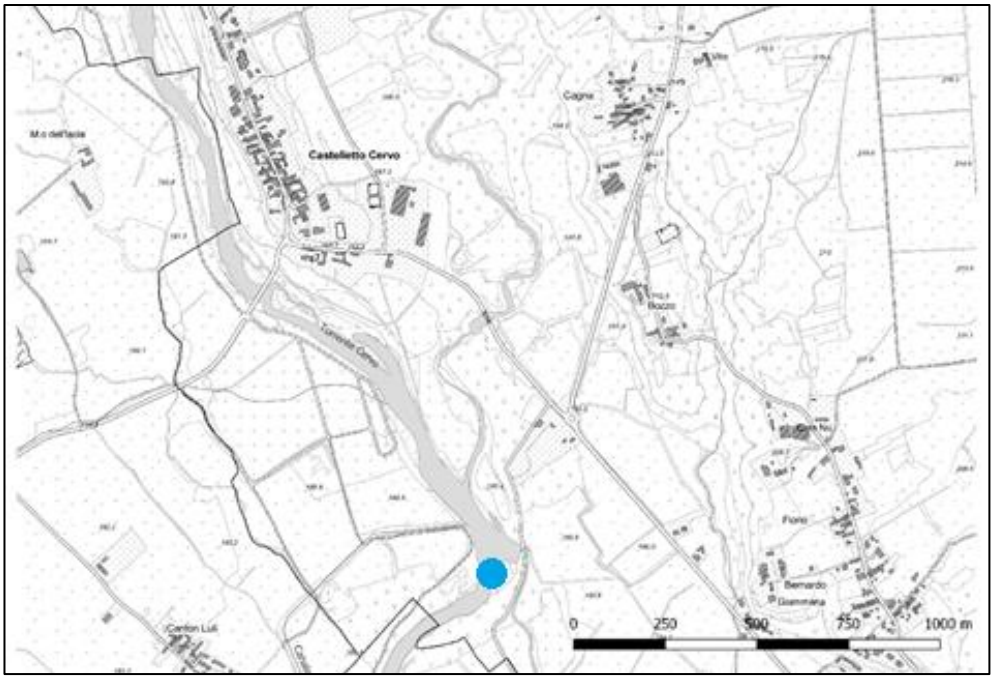


Figura 3.2: Estratto dall'Allestimento Cartografico di Riferimento BDTRE 2018 B/N 1:10000 (GEOPortale Piemonte, [43]).

Posta alla quota e secondo le coordinate di (Tabella 3.2) questa individua un bacino direttamente sotteso di circa 325 kmq.

UTMX [m]	UTMY[m]	Quota [m.s.l.m.]
440198	5039586	186

Tabella 3.2: Coordinate della sezione di chiusura del bacino del T.Cervo a Castelletto Cervo (BI).

In questa sezione il T.Cervo supera una traversa di sbarramento in massi di cava per la regolamentazione delle derivazioni irrigue esistenti (Figura 3.3).

Figura 3.3: Foto della traversa di sbarramento esistente.

La posizione della sezione, e il contesto in cui è collocata, ne fa dunque un punto strategico per lo sviluppo agricolo e idroelettrico del territorio e sottolinea l'importanza di uno studio e di un'analisi della risorsa a disposizione ai fini della sua distribuzione, regolamentazione e impiego.

3.1.2 Topografia e morfologia

Tre aspetti principali contraddistinguono l'analisi topografica e morfologica di un bacino idrografico: la distribuzione delle quote; la distribuzione delle pendenze e infine la distribuzione dell'esposizione dei versanti. Gli strumenti di visualizzazione GIS consentono l'estrazione di queste informazioni a partire dai DTM del bacino idrografico di studio.

L'analisi condotta in ambiente QGIS ha restituito, per il DTM del bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI), un range di quote che va dai 184 m della sezione di chiusura ai 2547 m del punto più alto. Come ben visibile dalla mappa dall'istogramma di (Figura 3.4) l'andamento delle quote si distribuisce sulla superficie del bacino idrografico nelle modalità tipiche dell'ambiente pedemontano con le porzioni più concentrate con quote sopra i 1000 e i 2000 m rispetto ad un'area di estensione maggiore sotto i 500 m**.** La quota media estratta dal visualizzatore GIS sul bacino idrografico è di 737 m.

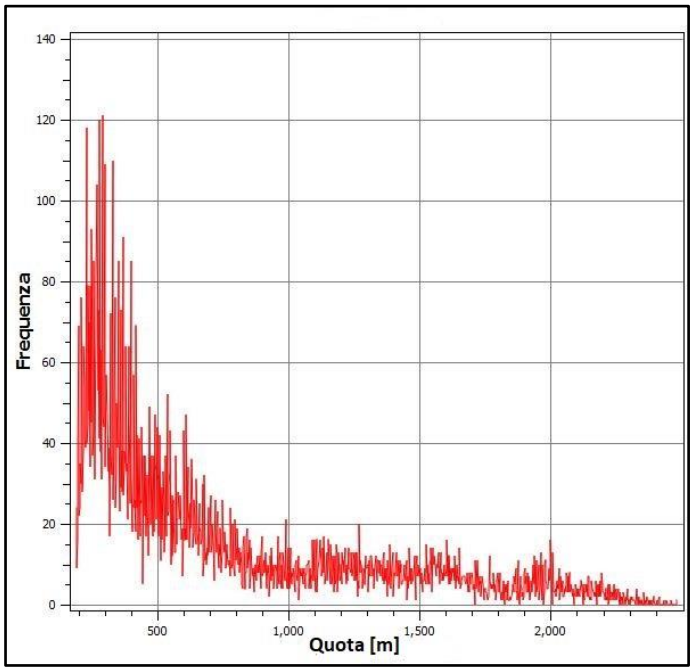


Figura 3.4: Distribuzione delle quote sul bacino idrografico chiuso alla sezione a Castelletto Cervo (BI).

La pendenza segue la morfologia del bacino dalle caratteristiche pedemontane caratterizzata da una minore superficie con pendenze maggiori del 70 e 80% rispetto alle aeree pianeggianti **(**Figura 3.5**)**.

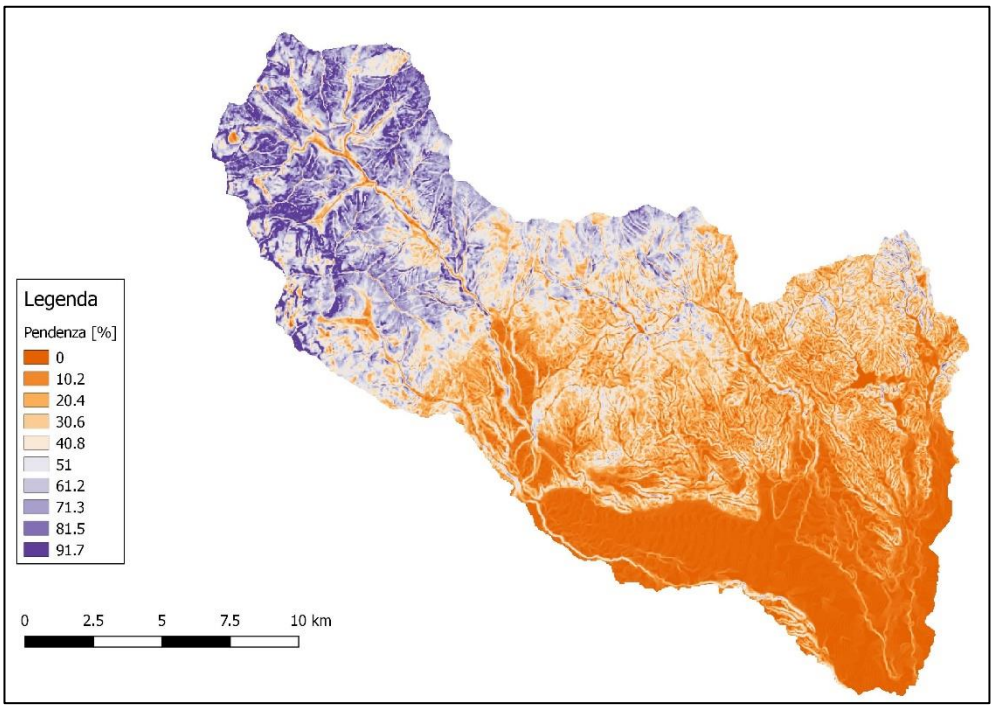


Figura 3.5: Distribuzione delle pendenze sul bacino idrografico chiuso alla sezione a Castelletto Cervo (BI).

La mappa della distribuzione dell'esposizione dei versanti sottolinea una prevalenza nelle direzioni Nord Est e Sud Ovest (Figura 3.6). Denominata *aspect*, questa mappa rappresenta l'esposizione dei versanti rispetto alla direzione Sud, per questo i punti di questo raster vengono espressi in gradi.

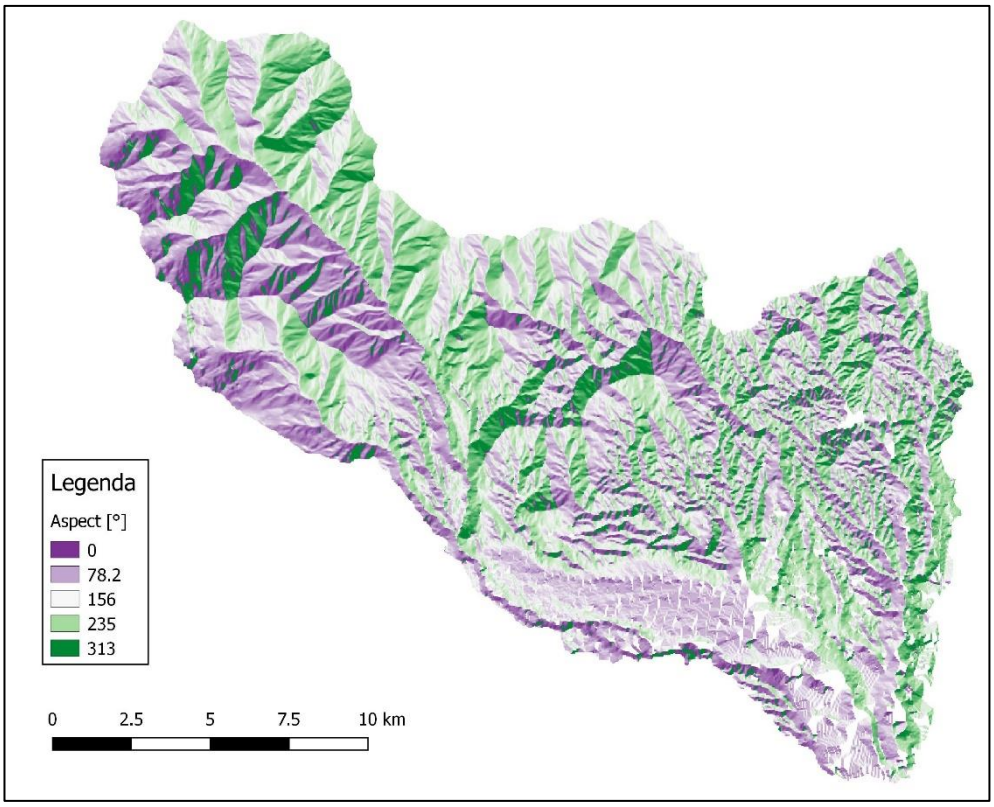


Figura 3.6: Distribuzione della direzione di esposizione dei versanti per il bacino chiuso a Castelletto Cervo (BI).

3.1.3 Analisi geomorfologica

In accordo con le direzioni prevalenti di esposizione dei versanti, le direzioni di drenaggio del bacino idrografico (individuate tra le otto possibili direzioni cardinali, dove 1 sta per la direzione Est) possiedono un orientamento marcato nelle direzioni Nord Est e Sud Ovest.

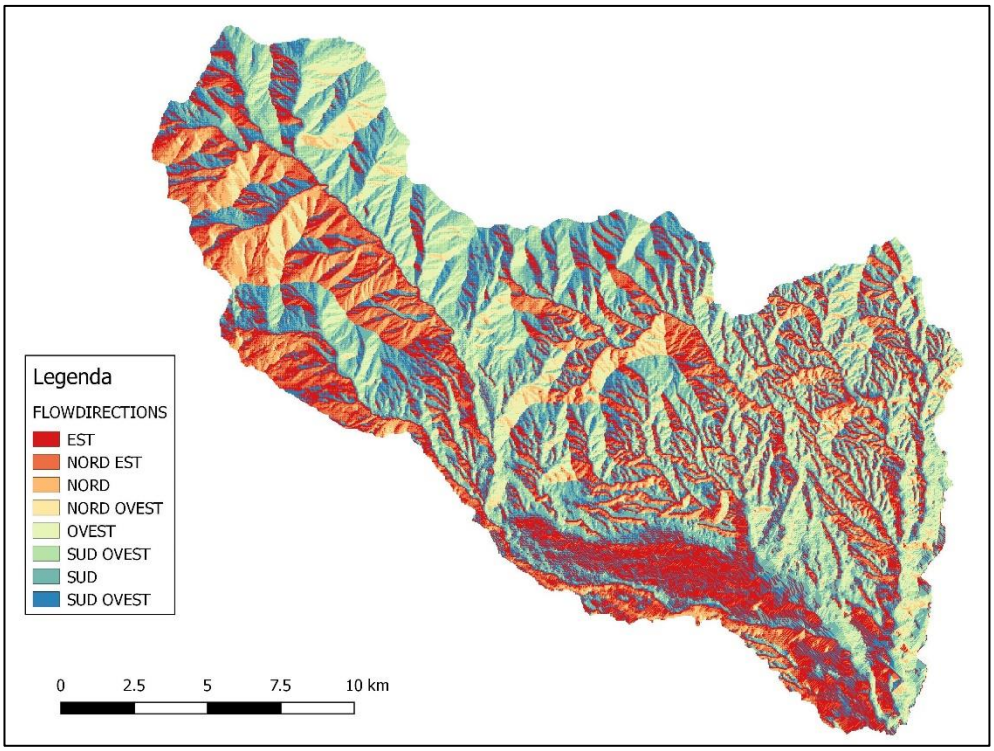


Figura 3.7: Mappa per le direzioni di drenaggio per il bacino chiuso a Castelletto Cervo (BI).

La funzione di *NetAttributesbuilder* dei *Jgrasstools* fornisce un criterio per la classificazione dell'ordine dei canali. Se applicato al caso di studio, la classificazione denominato *Psfasetter semplificata* individua le aste principali del T.Cervo procedendo con una sequenza di numeri dispari crescenti (1,3,5 etc.) dalla sezione di chiusura sino all'ultimo tratto del torrente a monte (Figura 3.8). Tutte le altre confluenze di ordine inferiore che si immettono nel canale principale vengono enumerate con un numero pari (2,4,6 etc.). In questo modo si identificano i principali tributari del T.Cervo. Questo sono: il T.Ostola (2); il T.Strona (4) ed il T.Oropa (6). Successivamente l'ordine di classificazione include i rami appartenenti al singolo sottobacino: questi vengono identificati dal codice del sottobacino seguito da un numero dispari (es. 2.1); al progredire di ramificazioni di ordine ancora inferiore il codice attribuisce un numero del tipo 2.2 etc.

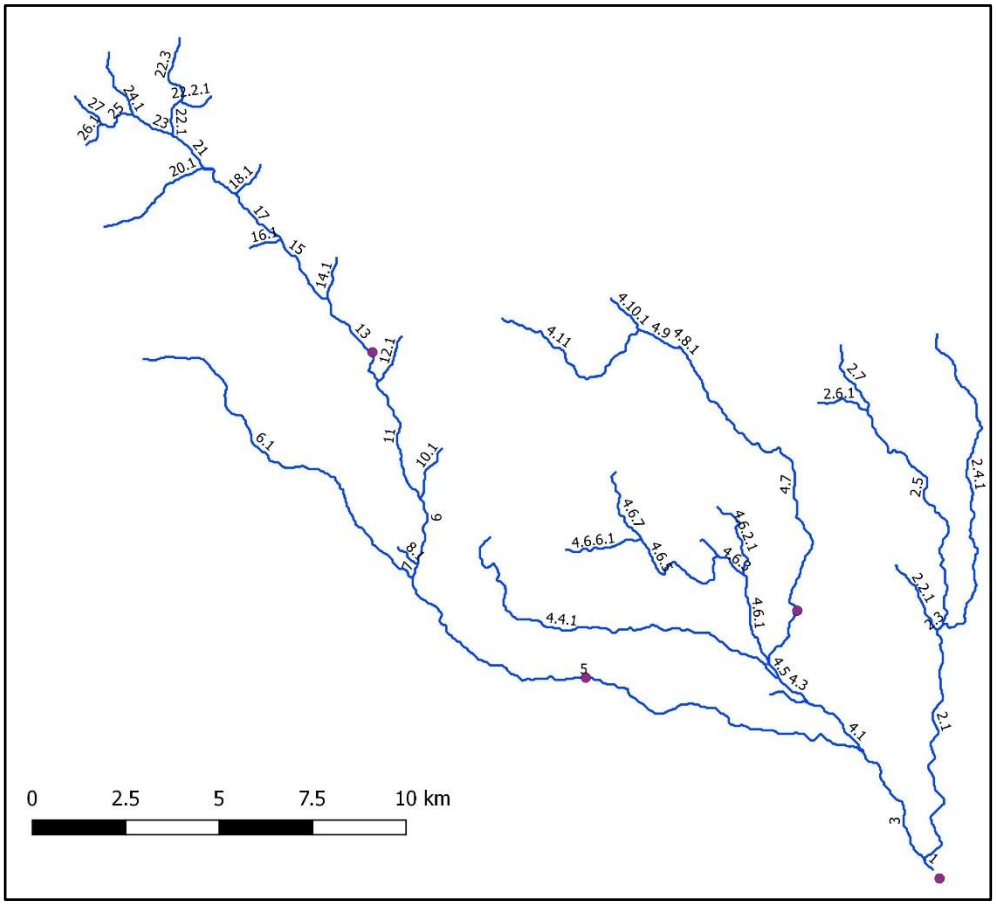


Figura 3.8: Classificazione dell'ordine della rete per il bacino chiuso a Castelletto Cervo (BI).

3.1.4 Dati di misura metereologici e idrometrici

I dati scaricati comprendono le misure orarie di precipitazione, temperatura e livelli idrometrici registrati dalle stazioni dell'Arpa Piemonte [44], nonché le relazioni intercorrenti tra portata e altezza idrometrica [45], per un totale di 6 anni consecutivi che coprono il periodo che intercorre tra il 1 Ottobre 2010 al 30 Settembre 2016.

Nella tabella riportata di seguito (Tabella 3.3) sono organizzate le anagrafiche delle 5 stazioni idrometriche che insistono sul bacino idrografico di studio ovvero le stazioni di Passobreve Cervo, Cervo Vigliano e Strona Cossato

collocate a monte della sezione di interesse di Castelletto Cervo (BI) e le stazioni di Elvo Carisio e Quinto Vercellese collocate a valle. Le stazioni di Passobreve, Vigliano e Quinto Vercellese misurano i valori di altezza idrometrica sul T.Cervo mentre le stazioni di Strona Cossato e Quinto Vercellese rilevano in corrispondenza di due tributari che immettono nel Cervo, questi sono rispettivamente il T.Strona e il T.Elvo.

Nome Stazione	**ID Stazione**	**Regione**	**Tipo**	**UTMX [m]**	**UTMY [m]**	**Zero idrometrico [m.s.l.m.]**
Cervo Passobreve	235	Piemonte	Idrometro	425025	5053441	573,88
Cervo Vigliano	3223	Piemonte	Idrometro	430619	5044911	295,99
Strona Cossato	3224	Piemonte	Idrometro	436246	5046480	247,42
Elvo Carisio	377	Piemonte	Idrometro	437994	5029760	176,21
Quinto Vercellese Cervo	2985	Piemonte	Idrometro	451011	5025503	132,81

Tabella 3.3: Elenco delle stazioni idrometriche.

La tabella successiva riepiloga le anagrafiche delle 19 stazioni metereologiche utilizzate come base geo spaziale per le interpolazioni, sul bacino idrografico di studio, delle grandezze di temperatura e precipitazione. Alle 16 stazioni che insistono sulla Regione Piemonte si sono aggiunte tre stazioni metereologiche della Valle D'Aosta limitrofe e posizionate su versanti che rovesciano sul bacino idrografico di interesse per una migliore chiusura del reticolo attorno allo stesso bacino. I dati orari delle 3 stazioni

metereologiche della Valle D'Aosta sono stati invece scaricati dal sito della Rete del Centro Funzionale della Regione Autonoma della Valle D'Aosta [46].

Nome Stazione	ID Stazione	Regione	Tipo	UTMX [m]	UTMY [m]	Quota [m.s.l.m.]
Oropa	123	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	420585	5053083	1186
Trivero	185	Piemonte	Pluviometro	433612	5058290	1108
Pray Sassera	188	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	439375	5058122	409
Piedicavallo	191	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	418730	5060065	1040
Masserano	201	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	441866	5045200	243
Biella	256	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	426362	5045454	405
Massazza	272	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	435110	5035822	226
Bielmonte	288	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	428000	5056825	1480
Graglia	321	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	418065	5046715	1005
Camparient	344	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	430019	5064689	1515
Pettinengo	345	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	410983	5050892	725

Albano Vercellese	112	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	452158	5031790	155
Lozzolo	2579	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	448052	5054548	533
Vercelli	198	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	452154	5019188	132
Andrate Pinalba	346	Piemonte	Termometro/Pluviometro	413549	5045873	1580
Piverone	234	Piemonte	Termometro/ Pluviometro	424396	5031228	230
Lilianes – Granges	(401)	Valle D'Aosta	Termometro/ Pluviometro	408692	5053584	1256
Gressoney – Bieltshocke	(402)	Valle D'Aosta	Termometro/ Pluviometro	409345	5069066	1370
Issime	(403)	Valle D'Aosta	Termometro/ Pluviometro	411019	5060138	960

Tabella 3.4: Elenco delle stazioni metereologiche.

3.2 Set up del modello

I prossimi paragrafi illustrano come, assemblati insieme, gli strumenti del sistema *GEOframe-NewAGE* (Capitolo 2) convergano alla costruzione del modello idrologico di questo elaborato a partire dai dati di misura a disposizione (paragrafo 3.1.2).

Come illustrato nel Capitolo 1, l'Embedded Reservoir Model fonda su tre principali premesse: la partizione del bacino idrografico di studio in sotto unità; la schematizzazione di queste sotto unità in un sistema di invasi; infine la connessione tra queste unità allo scopo di determinare la risposta idrologica

del bacino idrografico che rappresentano quando sollecitate da input di attivazione metereologici. Gli elementi indispensabili per il raggiungimento di questi obiettivi sono: l'ottenimento di punti geo riferiti che identifichino le sotto unità con cui si scompone il bacino, detti *centroidi*, e una serie di dati metereologici di attivazione in corrispondenza di queste posizioni.

La Figura 3.9 di seguito illustra come si attiva la risposta idrologica della singola unità, scomposta in una serie di invasi, nel momento in cui questa venga attivata dalle forzanti metereologiche dunque le serie di input necessarie ai centroidi per descrivere la formazione del deflusso superficiale, sotto superficiale e profondo. Queste sono: una serie di temperatura dell'aria; una serie di precipitazioni; una di radiazione solare ad onda corta; una di evapotraspirazione potenziale ed infine una di LAI index.

Per questo motivo, in base ai dati a disposizione, è possibile suddividere la costruzione del modello idrologico nelle seguenti fasi principali:

- una procedura GIS per la scomposizione del bacino in sotto unità e la determinazione dei corrispettivi centroidi i quali fanno da base per l'interpolazione spaziale dei dati di precipitazione e di temperatura;
- l'interpolazione spaziale dei dati di precipitazione e temperatura;
- la simulazione nei centroidi delle serie di radiazione solare ad onda corta e di evapotraspirazione potenziale;
- una procedura di lettura di dati di rilevamento satellitare per la raccolta dell'andamento dell'indice di LAI;
- la definizione di come si distribuisca sul bacino idrografico l'ordine di connessione che sussiste tra i centroidi;
- la schematizzazione del centroide in un sistema di invasi;
- la fase di calibrazione ovvero la determinazione, a partire dai dati di misura delle stazioni idrometriche, dei valori da attribuire ai parametri della schematizzazione in sistema di invasi (e al sistema di connessioni) per descrivere la risposta idrologica del bacino nella sezione di interesse;

- la fase di validazione per quantificare la capacità di predizione del modello.

I paragrafi successivi illustrano dunque come sono stati composti e settati gli strumenti a disposizione al fine del raggiungimento degli obiettivi di ciascuna di queste fasi che compongono il modello idrologico di questo elaborato. Il capitolo successivo illustra, invece, i risultati ottenuti con queste elaborazioni.

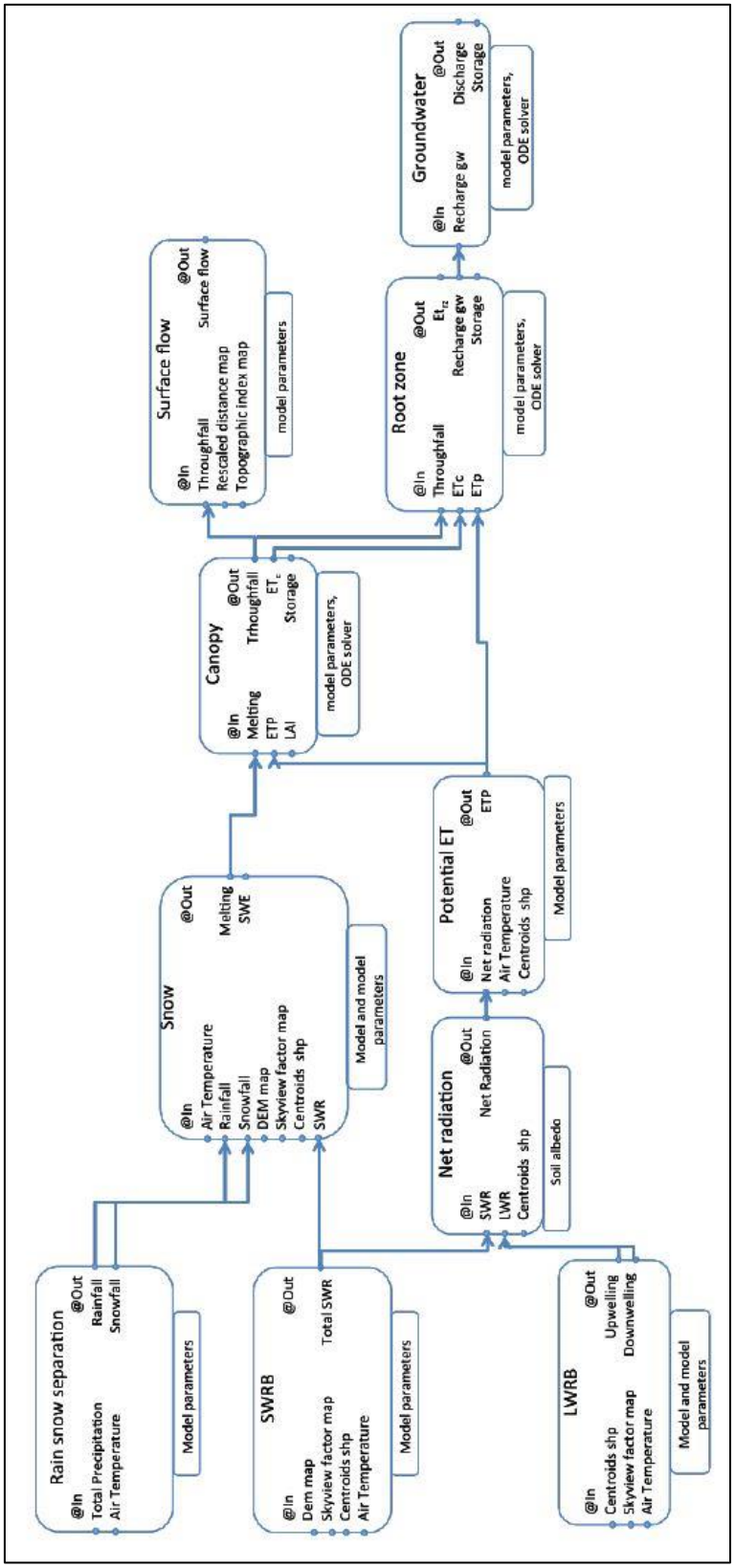


Figura 3.9: Sequenza di assemblaggio delle componenti di GEOframe-NewAGE per la realizzazione del modello (Bancheri, [8]).

3.2.1 Procedura GIS

La procedura consiste nel contemporaneo uso di strumenti di rasterizzazione e proiezione (come QGIS [47] e dei *JGrasstools* contenuti in uDig) per l'analisi geomorfologica e la definizione di mappe raster e vettoriali al fine di individuare tutte le informazioni topologiche, idrologiche e spaziali da predisporre per essere date in input al modello idrologico.

Il modello digitale del terreno della regione di interesse consiste nell'unico dato di input della procedura in quanto tutte le altre mappe che verranno date in ingresso al modello derivano da questo unico elemento.

Allo scopo si è recuperata la 'RIPRESA AEREA ICE 2009-2011 – DTM 25)' scaricabile dal Geoportale della Regione Piemonte [48]; il DTM copre tutto il territorio regionale del Piemonte ed è stato acquisito con metodologia uniforme (LIDAR) generalizzato per interpolazione su una griglia di 25 m.

La sequenza di manipolazione del DTM può essere scomposta in due parti nel rispetto dei due flowchart successivi dove ciascun box prende il nome della feature utilizzata in UDIG. La prima fase opera sull'intero DTM allo scopo di verificare che le coordinate della sezione di chiusura del bacino idrografico ricadano su una cella della rete idrografica estratta e di estrarre la maschera del bacino. La seconda parte della procedura fa uso della maschera del bacino estratta per ritagliare su di essa le mappe precedentemente prodotte poi ricavare le mappe vettoriali del reticolo idrografico definitivo; dei sottobacini e dei centroidi con cui si sceglie di scomporre il bacino.

Prima del processo, l'intero DTM della Regione Piemonte, è stato ridotto in dimensioni e risoluzione in ambiente QGIS allo scopo di adeguarlo alle proporzioni dell'area di interesse e ai tempi di calcolo e processamento in ambiente uDIG. Dopodiché si è passati alle sequenze di manipolazione.

Il diagramma di Figura 3.10 illustra, in un flowchart, le sequenze di input e di output della fase preliminare svolte con i tools di uDIG adoperate sull'intero DTM preparato in QGIS:

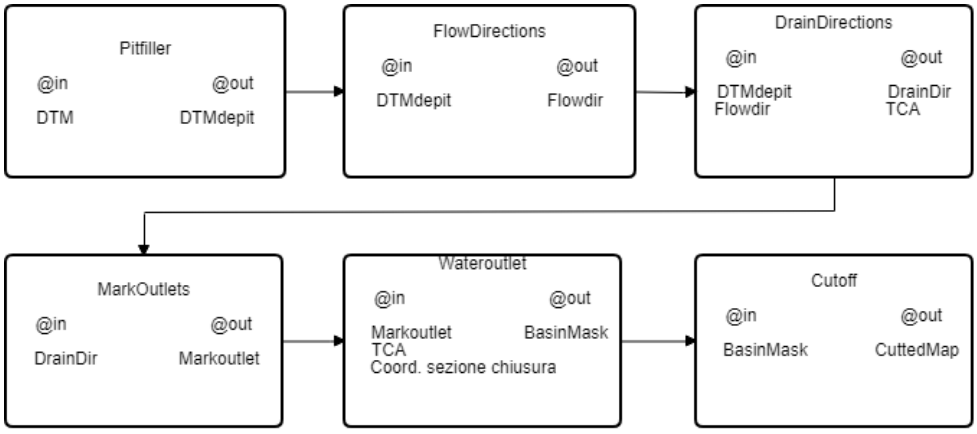


Figura 3.10: Flowchart della procedura GIS per il ritaglio del bacino idrografico.

Il *pitfiller* elimina le depressioni del DTM; il *flowdirections* determina per direzioni di drenaggio per ogni cella del raster depittato; il *draindirections* ricalcola le direzioni allo scopo di minimizzare la deviazione dal flusso reale e di restituire la mappa delle aree contribuenti; il *markoulets* marca le celle che drenano all'esterno infine, date le coordinate della sezione di chiusura, si individua la maschera del bacino con il comando *wateroutlet* e la si usa per ritagliare con il comando *Cutoff* il DTM originale al fine di adeguarlo alla forma del bacino idrografico estratto. La mappa delle aree contribuenti è indispensabile per visualizzare la rete idrografica e controllare che la sezione di chiusura scelta ricada all'interno dei canali che la compongono.

A questo punto si ripete da capo la procedura fino al box dei *markoutlets* del flowchart allo scopo di verificare che la sezione di chiusura dreni all'esterno del bacino e che tutto il reticolo idrografico, visualizzato con la mappa delle aree contribuenti, sia contenuto all'interno della nuova forma del DTM senza essere stato ritagliato.

La mappa delle aree contribuenti adeguata alla forma del bacino estratto è il dato di input del secondo flowchart riportato di seguito (Figura 3.11) che conclude la procedura GIS:

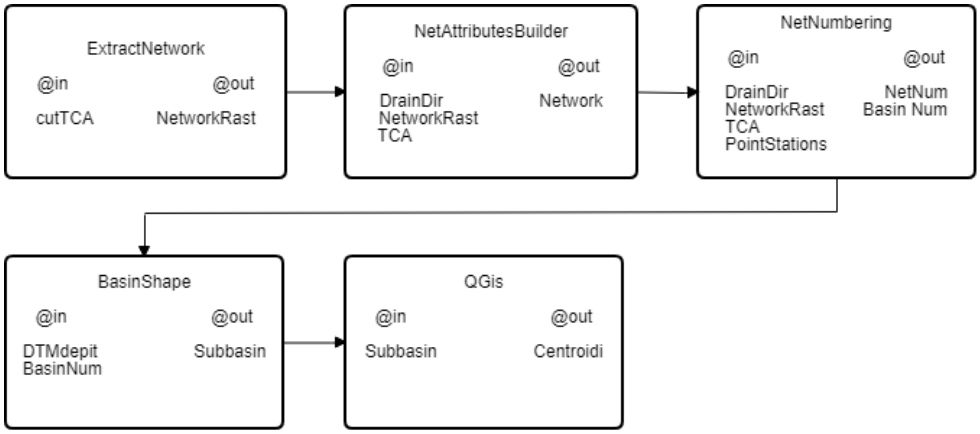


Figura 3.11: Flowchart della procedura GIS per la scomposizione in sottobacini.

Il tool *extractnetwork* estrae la rete idrografica definitiva imponendo una soglia sull'area contribuente; solo i punti con area contribuente maggiore della soglia danno luogo alla formazione dei canali e ciò influisce sullo sviluppo dei rami della rete estratta e sul numero di unità con cui si parzializza il bacino di interesse. Perciò, di norma, dalla scelta del valore soglia dipenderà quanto sarà fitta la rete e quindi quanti rami e sottobacini si otterranno. Successivamente, il *netattributesbuilder* vettorializza la rete estratta e la correda di tutti gli attributi con cui riordinarla e definirla geometricamente. Il *netnumbering* estrae finalmente la mappa raster dei sottobacini che il *basinshape* vettorializza e correda di tutte le proprietà geometriche come il numero identificativo e la quota minima e la quota massima di ogni porzione.

L'output di questo ultimo tool viene trasferito in QGIS dove a ciascuna porzione viene associato il rispettivo centroide che con la sua posizione identifica ed eredita tutte le proprietà e le informazioni dell'HRU che rappresenta precedentemente estratte.

L'applicazione della procedura GIS alla sezione di interesse di Castelletto Cervo (BI) non strumentata ha prodotto l'estrazione del bacino idrografico di (Figura 3.12) che sottende una superficie di 325 kmq.

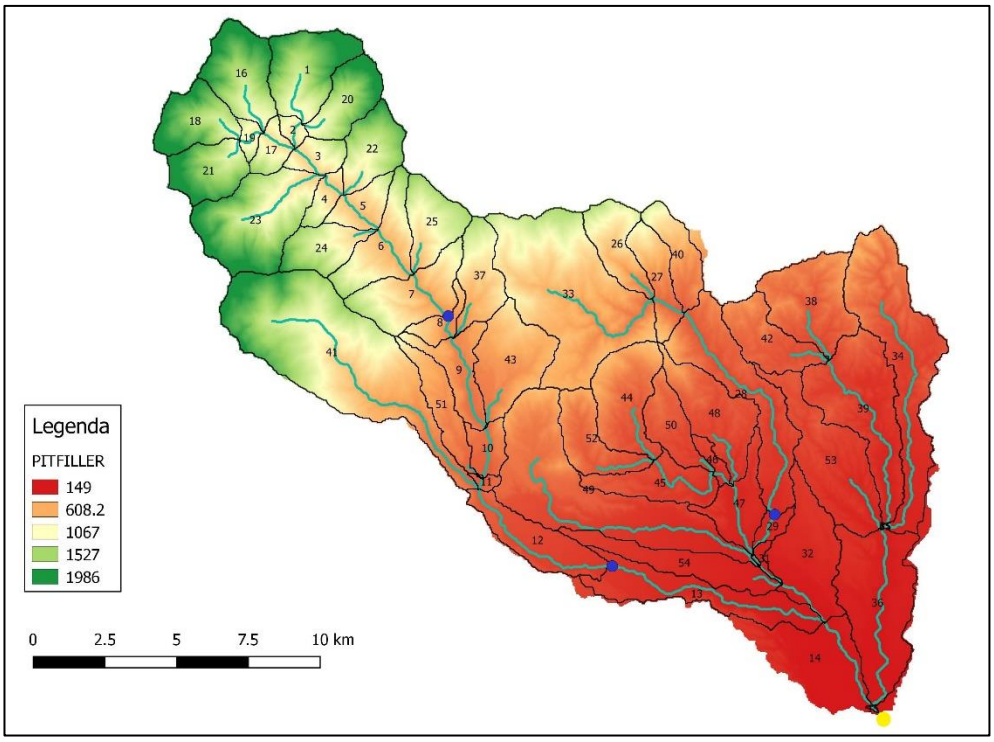


Figura 3.12: Bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI).

Il valore soglia sull'aree contribuenti con cui si è parametrizzata l'estrazione del reticolo idrografico è di 4000 pixel; di norma il valore soglia che si attribuisce all'estrazione della rete con applicativi GRASS è di 1000 pixel ma, con un grado di dettaglio così elevato, questo comando rischia di dimostrare alcuni problemi in corrispondenza delle congiunzioni tra due HRU dove vengono erroneamente creati sottobacini di pochi pixel di estensione che in realtà non sono presenti [22]. Tale errore spesso si manifesta con un output con compenetrazione dei poligoni che delimitano i sottobacini. Allo stesso tempo però è necessario non ricorrere a un valore soglia di scarso dettaglio allo scopo di non estrarre una rete con una ramificazione poco fitta che perda un numero troppo elevato di informazioni topografiche e che contribuisca alla generazione di una partizione troppo sommaria la quale non consista in una buona base per l'interpolazione spaziale delle precipitazioni, delle temperature e della radiazione solare. Il valore scelto, dopo diversi tentativi, si è dunque rivelato essere un valore di ottimo compreso tra i due limiti allo scopo di caratterizzare con un buon grado di dettaglio le porzioni di bacino a monte della sezione di interesse e determinare una robusta base per

l'interpolazione spaziale. L'esito di questa scelta ha determinato una scomposizione del bacino di 54 HRU.

Ciò nonostante una partizione di questo tipo non si rivela essere una soluzione ottimale per lo studio del contributo degli HRU compresi tra le stazioni idrometriche (in blu) e la sezione non strumentata (in giallo) di Figura 3.12 perché non è possibile assegnare loro dei parametri che siano il risultato di una calibrazione. Per questo motivo si è aggregato a questa suddivisione la parte mancante di bacino che sottende la stazione idrometrica collocata immediatamente più a valle ovvero la stazione di Quinto Vercellese. Ciò determina un bacino idrografico di 1018 kmq complessivi di estensione (Figura 3.13).

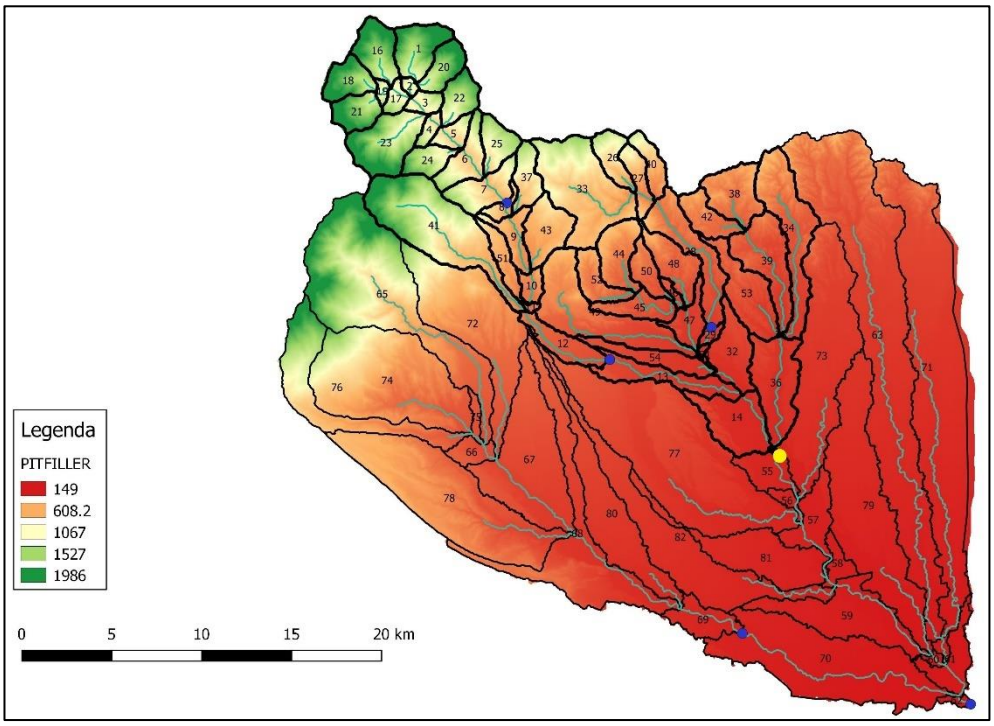


Figura 3.13: Bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese.

L'estensione è stata generata con un valore soglia di 18000 pixel la quale è riuscita a delineare nei suoi aspetti essenziali le differenze topologiche della parte aggiunta, ha determinato una buona base per le interpolazioni lineari e soprattutto si è rivelata la migliore soluzione di costo computazionale per le procedure di calibrazione.

Il modello è il risultato della partizione del bacino idrografico in 82 sottobacini come illustrato chiuso in corrispondenza della stazione idrometrica che insiste sul T. Cervo a Quinto Vercellese. L'esito della procedura GIS ha quindi restituito al modello i centroidi geo riferiti su cui interpolare le grandezze spaziali di temperatura e precipitazione determinati in corrispondenza delle stazioni metereologiche e pluviometriche.

3.2.2 Spazializzazione dei dati di temperatura e precipitazione

L'assortimento di stazioni metereologiche scelto (Tabella 3.4), per il database di dati di precipitazione e temperatura, si distribuisce nei punti, all'interno e intorno al bacino idrografico di studio, riepilogati in (Figura 3.14) tale da comporre un reticolo ben distribuito sull'area di interesse per l'interpolazione spaziale di queste grandezze sui centroidi in cui questa è stata scomposta.

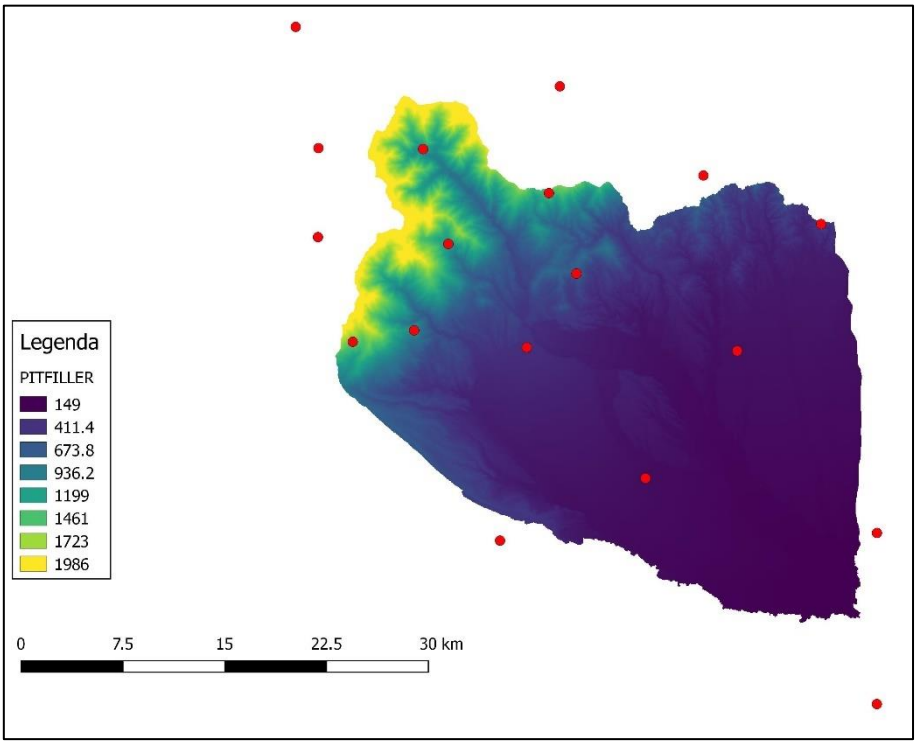


Figura 3.14: Distribuzione delle stazioni metereologiche (in rosso) sul bacino idrografico di studio.

I dati orari a disposizione sono stati ordinati in appositi '.csv' che, insieme alle mappe vettoriali geo riferite con le coordinate delle stazioni di misura e dei centroidi del bacino, sono i dati di input da predisporre per l'utilizzo della componente di interpolazione spaziale del sistema di *GEOframe-NewAGE*.

L'interpolazione spaziale delle grandezze di temperatura e precipitazione è stata realizzata con il metodo del Kriging, a partire dall'interpretazione dei semivariogrammi sperimentali delle misure. Le grandezze sono state interpolate con due tipi di kriging, differenza necessaria per tenere conto della dipendenza della temperatura con la quota:

Grandezza	**Kriging**
Temperatura	Detrend Kriging
Precipitazione	Ordinary Kriging

Tabella 3.5: Tipo di kriging adottato.

Il primo passo della sequenza di calcolo svolta, si può riassumere, per entrambe le grandezze, nella suddivisione per mese dei record orari di tutti i sei anni di dati a disposizione e, fissato un intervallo di distanza, nella generazione dei rispettivi semivariogrammi sperimentali, ottenuti mediando i valori di semivarianza e di distanza dei record orari di ciascun mese.

La caratteristica di questi diagrammi è quella di essere compresi tra un limite superiore di semivarianza e di distanza e di poter essere interpolati da modelli di funzione che operano sugli stessi intervalli. Lo scopo dell'analisi dello studio dei semivariogrammi delle osservazioni è quello di andare a determinare, per ciascun mese, i semivariogrammi teorici generati con un metodo di riferimento (ad esempio lineare o Bessel) tali da individuare i numeri di range, sill e nugget che massimizzano l'aderenza tra il semivariogramma teorico e quello sperimentale. La componente a disposizione, in *GEOframe-NewAGE*, è munita di diversi tipi di modello di semivariogramma teorico e di un calibratore per l'individuazione dei numeri

di range, sill e nugget a partire dal confronto con il semivariogramma delle osservazioni.

Nello specifico, lo *sim* file di calibrazione non differisce di molto per struttura da quello di Figura 2.14 ma si distingue per l'algoritmo di ricerca differente, il *Particle Swarm* (Figura 3.15). Questo infatti è un algoritmo che ottimizza i valori di range, sill e nugget a partire da soluzioni candidate, chiamate particelle, che si spostano sullo spazio di ricerca in base a formule, ricavate dallo studio del movimento degli uccelli in stormo, che tengono in considerazione la velocità di spostamento, la migliore soluzione esplorata dalla singola particella e quella condivisa dall'insieme di particelle

```
3_PS_EV_TV.sim
75      // kmax : optional, default 1000
76       kmax    500
77       // numPart optional default 10
78       numPart 10
79       // all check variables optional, values
80       // below show the defaults.
81       check_after 175
82       check_last  50
83       check_min   30
84       check_delta 1e-8
85       verbose 1
86
87       // parameter to optimize
88       parameter {
89
90               "TV_range"       (lower:"${lower_range}", upper:"${upper_range}",calib_strategy:MEAN)
91               "TV_nugget"      (lower:"${lower_nugget}", upper:"${upper_nugget}",calib_strategy:MEAN)
92               "TV_sill"        (lower:"${lower_sill}", upper:"${upper_sill}",calib_strategy:MEAN)
93
94
95       }
96       // objective function
97       objfunc(method:RMSE,invalidDataValue:-9999) {
98           sim(data:"TV.result")
99           obs(data:"TV.observation")
100      }
```

Figura 3.15: *sim* file per il Particle Swarm.

Dall'analisi è emersa la scelta dell'uso di un metodo lineare per la generazione dei semivariogrammi teorici delle temperature e del metodo di Bessel per le precipitazioni.

In questo modo di sono determinati mese per mese i numeri di range, sill e nugget delle serie di misura delle due grandezze. Successivamente, si sono utilizzati i valori di ottimo trovati non prima di una procedura di crossvalidazione, detta *leave one out* [49], in cui si è verificata, nelle stazioni di misura, l'aderenza tra i dati e i valori simulati con i numeri di range, sill e nugget identificati. Il *leave one out* è, infatti, un metodo di ricampionamento, per il test dei risultati di ottimo trovati, che consiste nel rimuovere una stazione di misura alla volta e di generare una serie simulata nel suo punto a partire dalla rete composta dalle stazioni di misura rimaste. La procedura viene ripetuta fino a quanto, a turno, non sono state rimosse tutte le stazioni. In (Figura 3.16) è raccolto un esempio di *leave one out* per una serie oraria di un mese di precipitazioni testata per il pluviometro di Bielmonte.

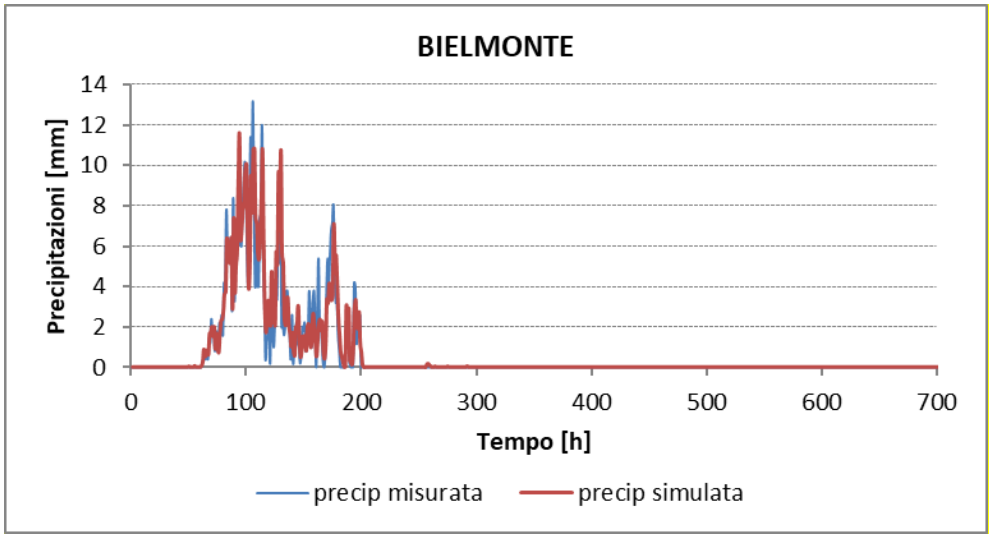


Figura 3.16: Esempio di leave one out.

Lo *scatterplot* di (Figura 3.17) è un altro modo per visualizzare l'aderenza tra le due serie osservando come le coppie di punti composte dal record misurato

e dal record generato si adagiano sulla bisettrice del grafico a doppia scala logaritmica.

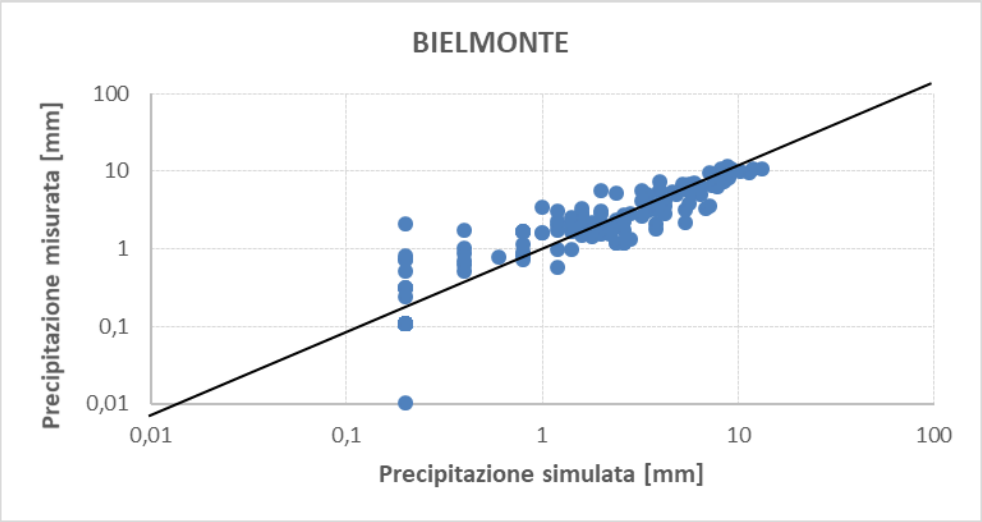


Figura 3.17: Scatterplot per la valutazione del *leave one out.*

Tale aderenza non si è raggiunta eseguendo gli stessi passaggi ma riordinando i record del database per una analisi suddivisa per anni di dati; per questo si è scelto di utilizzare una suddivisione mensile con la quale si è ottenuto un risultato più in grado di elaborare le serie di dati orarie a disposizione.

Chiude la procedura di calcolo l'uso dei valori di ottimo trovati, che hanno superato anche la fase di crossvalidazione, per il kriging vero e proprio sui centroidi del bacino. L'output di questa parte di modellazione restituisce, dunque, le serie orarie di precipitazione e temperatura per tutti gli HRU in cui è stato scomposto il bacino che consisteranno in dati di input per altre fasi della catena modellistica.

La (Figura 3.18) rende una idea di quanto sia importante, per i bacini innevati, la correlazione tra le temperature e l'andamento della quota. Il grafico mostra il risultato di interpolazione spaziale in seguito all'applicazione del detrend kriging ottenuto per quattro differenti HRU collocati a quote diverse: "HRU 18" per 1560 m; "HRU 40" per 682 m; "HRU 50" per 401 m; "HRU 56" per

180 m. Il diagramma mostra una serie di un anno (Ott 2011-Set 2012) di record orari.

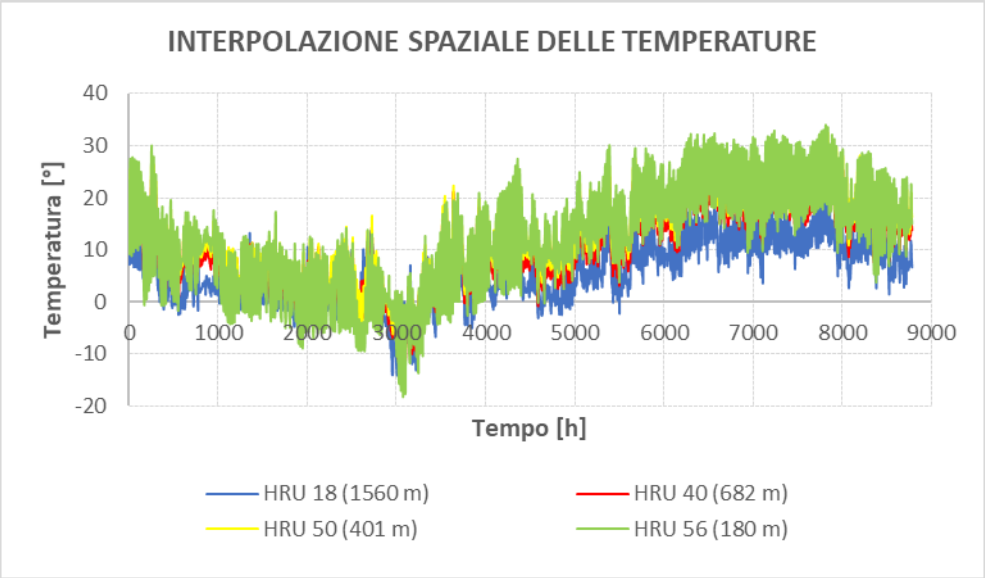


Figura 3.18: Interpolazione spaziale: confronto fra serie di Temperatura ottenute per HRU posti a quote diverse per l'anno Ott 2011- Sett 2012.

Gli HRU collocati ad una quota altimetrica maggiore mostrano tendenzialmente valori di temperatura più bassi.

3.2.3 Calcolo della radiazione solare netta

La radiazione solare netta è il bilancio tra la radiazione solare ad onda corta e la radiazione solare ad onda lunga. All'interno della catena della soluzione modellistica (Figura 3.9) rappresentano le serie da fornire in ingresso alla componente per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale. Le serie di radiazione solare ad onda corta sono, inoltre, dati di input necessari successivamente per la modellazione del contributo ai deflussi dovuto allo scioglimento nivale.

Lo scopo della prima fase, di questa parte di procedura, è la determinazione dei due termini da sottoporre a bilancio.

In assenza di serie orarie di misura di radiazione solare, la soluzione è quella di utilizzare le componenti del sistema *GEOframe-NewAGE*, denominate *SWRB* (paragrafo 2.2.2) e *LWRB* (paragrafo 2.2.3), per la generazione di una serie temporale di radiazione solare ad onda corta e radiazione solare ad onda lunga, nei centroidi del bacino, a partire dalle serie di temperatura interpolate con il kriging. Gli altri elementi di input da predisporre sono: il vettore con le coordinate dei punti e la mappa raster dello skyview con gli indici del grado di visibilità per suddividere il bacino zone d'ombra e zone più esposte alla radiazione solare incidente (Figura 2.7).

Lo *sim* file di simulazione della componente SWRB richiede la compilazione di tre stringhe per l'assegnazione di tre valori per i parametri di **(**Tabella 3.6**)** con i quali la componente esegue la simulazione per il calcolo della serie di radiazione ad onda corta. Il primo valore viene assegnato allo strato di ozono; il secondo all'albedo mentre il terzo è una misura dei km liberi a disposizione per la visibilità. In assenza di misure reali, e per il costo computazionale di processamento della componente molto alto, non si sono calibrati questi parametri e si è eseguita la componente con i seguenti valori di default del fornitore riportati di seguito:

Parametro	**Nome stringa**	**Valore**
Strato di Ozono [cm]	pCmO3	0,6
Albedo [-]	pAlphag	0,9
Visibilità [km]	pVisibility	80

Tabella 3.6: Parametri per la componente SWRB.

La (Figura 3.19) di seguito illustra le serie di radiazione solare ad onda corta per una settimana del mese di Aprile del 2012 per due differenti HRU,

appartenenti a due versanti opposti e all'insieme di unità chiuso alla sezione non strumentata di Castelletto Cervo (BI) al fine di osservare l'andamento delle stesse serie nel corso dell'arco temporale di più giornate e il loro adattamento alla topografia del bacino. L'HRU 23 è collocato sul versante Ovest del bacino idrografico a ridosso delle Alpi Biellesi, ha una quota media di 1630 m e risulta essere nell'arco dell'anno meno esposto dei punti che più a valle cadono all'interno dell'HRU 14 che chiude una porzione di bacino che possiede una quota media di 213 m. L'HRU 14 si trova in piana poco a monte della sezione di Castelletto Cervo (BI).

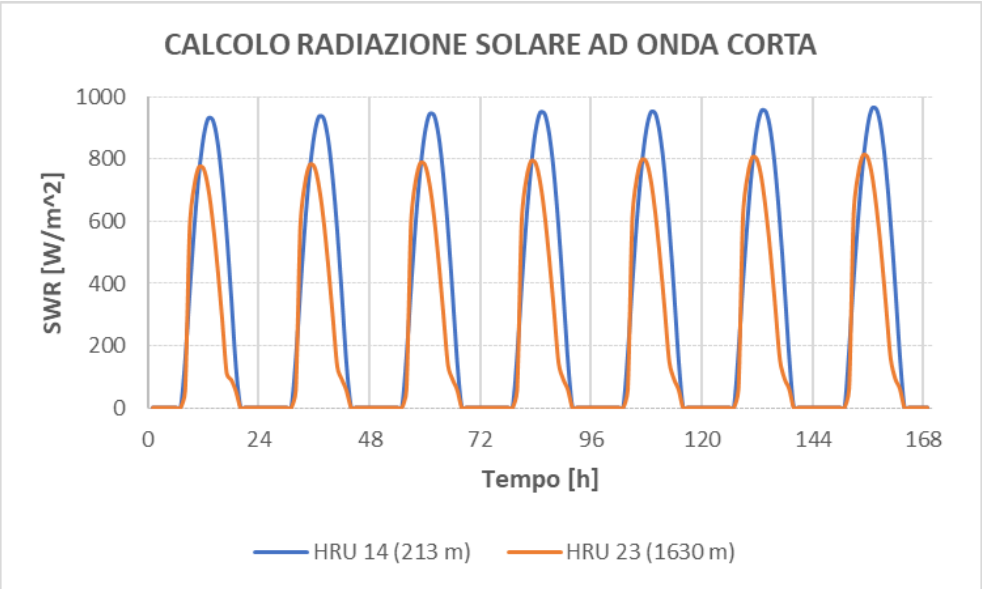


Figura 3.19: Confronto fra serie orarie di radiazione solare ad onda corta per una settimana di Aprile 2012; in blu la serie dell'HRU 14 (213 m) e in arancione la serie dell'HRU 23 (1630 m).

All'interno della stessa settimana si può osservare l'andamento delle due serie temporali nel corso del singolo giorno; la radiazione ad onda corta ha infatti potenza radiativa nulla dopo il tramonto (e per le ore notturne) e cresce nelle ore diurne con potenza radiativa massima in corrispondenza delle ore diurne più calde. Nell'arco dell'anno, il massimo apporto radiativo giunge al bacino nei mesi estivi infine sono i punti più esposti a ricevere maggiore potere

radiante rispetto alle porzioni di bacino che risultano essere più in ombra. Un esempio della distribuzione della radiazione ad onda corta per quattro differenti giorni dell'anno di due diversi anni del periodo di studio è contenuto all'interno dell'Allegato A e dell'Allegato B.

L'altro termine di bilancio è il risultato dell'esecuzione della componente *LWRB*, anche in questo caso lo *sim* file di simulazione richiede la compilazione di stringhe per l'assegnazione dei valori da attribuire ai parametri per le emissività del suolo e dell'atmosfera nelle condizioni di cielo sgombro o nuvolo. In assenza di dati per la determinazione e l'interpolazione del clearness index e per il costo computazionale del processamento, come per la componente *SWRB* si sono attribuiti i valori di default da fornitore riepilogati in tabella (Tabella 3.7).

Parametro	**Nome stringa**	**Valore**
Coeff ε cielo sgombro	X	0,70
Coeff ε cielo sgombro	Y	5,95
Modello ε atm	model	"6"
ε suolo	epsilon_S	0,98
Coeff ε cielo nuvoloso	A_Cloud	0,5
Coeff ε cielo nuvoloso	B_Cloud	0,1

Tabella 3.7: Parametri per la componente LWRB.

In questo modo si è ottenuta l'altra quota parte da sottoporre a bilancio composta da serie downwelling e serie di upwelling. Tutte le parti, determinate come illustrato in questo paragrafo, diventano dunque dati di input per la componente *Net Radiation Balance* (paragrafo 2.2.4) la cui

esecuzione ha restituito, per i centroidi del bacino, le serie orarie di radiazione solare netta.

3.2.4 Calcolo dell'evapotraspirazione potenziale

Il passaggio che segue il calcolo del bilancio della radiazione solare netta consiste nella stima dell'evapotraspirazione potenziale nei centroidi del bacino. Il modello di risoluzione, illustrato nel paragrafo (2.2.4) propone l'impiego della formula di Prietsley-Taylor; un metodo di stima eseguibile con la componente *ETP* del sistema di *GEOframe-NewAGE* in seguito alla compilazione dello specifico *sim* file il quale richiede l'assegnazione dei valori da attribuire ai parametri riportati di seguito **(**Tabella 3.8**)**. Anche in questo caso si sono utilizzati i valori di default forniti dalla componente e tratti dalla letteratura.

Parametro	**Nome stringa**	**Valore**
Pressione atm [kPa]	defaultPressure	101,3
α [-]	pAlpha	1,26
Coeff flusso calore ore diurne [MJm^2gg^{-1}]	pGmorn	0,35
Coeff flusso calore ore notturne [MJm^2gg^{-1}]	pGnight	0,75

Tabella 3.8: Parametri per la componente ETP.

Quello di Prietsley-Taylor è un metodo che dipende dalla radiazione solare e in quanto tale anche in questo caso le serie di output fluttuano nel corso del singolo giorno tra valori nulli dopo il tramonto e per le ore notturne e valori di picco nelle ore più calde del giorno. L'andamento stagionale, nel corso

dell'anno, si scompone in un decorso con valori più bassi nei mesi invernali e in picchi di massimo nella stagione estiva.

In particolare, nel confronto tra porzioni di bacino emerge un comportamento differente in relazione alla quota e all'esposizione alla radiazione solare. Il grafico (Figura 3.20) mostra per gli HRU 21 e 36 l'andamento delle serie temporali di evapotraspirazione potenziale ricavate per una settimana di Agosto dell'anno 2012. Le due porzioni hanno diverso grado di esposizione, l'HRU 21 si trova a ridosso delle Alpi Biellesi sul versante Nord Ovest del bacino idrografico chiuso alla sezione di Passobreve Cervo, il secondo possiede invece più visibilità perché collocato in piana poco a monte della sezione non strumentata. Il primo è dunque ad una quota media di 1794 m mentre il secondo giace a una quota media di 230 m. Dal confronto si osserva una tendenza di minor potere traspirante all'aumentare della quota e al diminuire dell'esposizione alla radiazione solare.

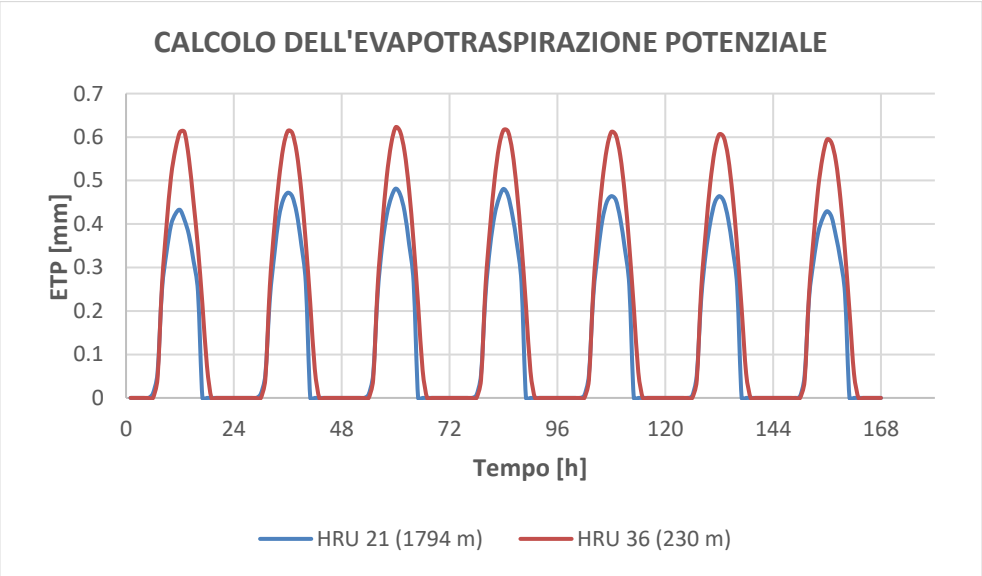


Figura 3.20: Confronto fra serie orarie di evapotraspirazione potenziale per una settimana di Agosto 2012; in blu la serie dell'HRU 21 (1794 m) e in rosso la serie dell'HRU 36 (230 m).

3.2.5 Calcolo del LAI index

L'ultimo valore di input da attribuire ad ogni porzione in cui è stato scomposto il bacino idrografico di studio sono le serie temporali di evoluzione del Leaf Area Index, misura della superficie fogliare per unità di superficie del suolo; un parametro che rappresenta la distribuzione delle coperture forestali agrarie. Inoltre, più è alto il valore dell'indice maggiore è la radiazione solare intercettata dalla copertura fogliare.

I dati di LAI utilizzati nella elaborazione, per il periodo di interesse, sono stati ricavati da immagini satellitari (paragrafo 1.2.3) riconvertite e riproiettate con l'apposito *sim* file di simulazione del sistema *GEOframe-NewAGE*. Queste sono foto che variano dal colore scuro, quando il manto verde è scarso o inesistente, al colore chiaro dove la copertura delle foglie e delle foreste è invece più denso.

L'applicativo legge le informazioni ricavate dalle immagini satellitari riproiettate e ricostruisce la serie temporale oraria in seguito all'impiego di una funzione lineare; la (Figura 3.21) di seguito mostra un esempio di serie ricavata per il 2012.

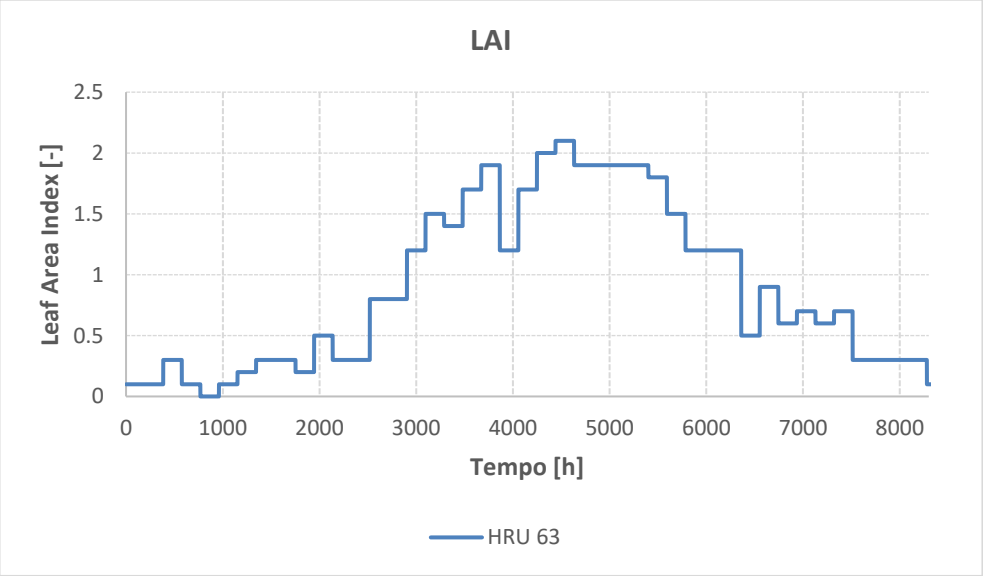


Figura 3.21: Serie di Leaf Area Index per l'HRU 63 (Anno 2012).

3.2.6 Building del grafo

Il risultato delle interpolazioni spaziali dei dati di precipitazione e temperatura e del calcolo nei centroidi della radiazione solare, della evapotraspirazione potenziale e del LAI index, consegna una lista di input differenti per ciascun HRU che l'utente riorganizza all'interno del *progetto* in sottocartelle specifiche, una per ciascuna unità.

Oltre a queste serie esito di quanto illustrato nei paragrafi precedenti, l'utente raccoglie all'interno di ciascuna sottocartella le mappe raster del terreno e dello skyview di ciascun HRU, ritagliando le mappe originali del bacino originale di Figura 2.4 e Figura 2.7 usando le maschere generate con la funzione *Basinshape* dei *Jgrasstools* dei contorni delle singole unità.

Le sottocartelle all'interno del *progetto* contengono dunque le serie di input di ogni porzione in cui è stato suddiviso il bacino idrografico durante la procedura GIS e rappresentano ciascun HRU. Per ciascun HRU si compila uno specifico *sim* file del tipo di Figura 2.8 compilato con lo script che riproduce lo schema operativo di risoluzione di Figura 1.5 tale da modellare la singola unità nel sistema di serbatoi illustrato nel primo capitolo di questo elaborato. L'esito della procedura è un insieme di *sim* file compilati come è stato spiegato nel paragrafo 2.2.8 degli Strumenti di questo elaborato e riprodotto come in Allegato A in numero uguale alla quantità di unità in cui è stato scomposto il bacino idrografico. Lo scopo sta nell'allestire tutto quello che occorre per la realizzazione del *grafo* ad albero, oggetto di questo paragrafo, necessario per l'esecuzione del modello e la generazione dei deflussi simulati nelle sezioni di interesse.

La predisposizione del *grafo* ad albero (con cui schematizzare la suddivisione in HRU, i punti di misura e la sezione non strumentata del bacino idrografico) è la procedura che precorre la calibrazione del modello.

Lo scopo di questa fase è quella di trasformare la suddivisione in HRU del bacino idrografico in uno schema composto di una lista di nodi connessi tra loro identificati da un proprio ID il quale coincide all'identificativo assegnato

alla singola unità. La schematizzazione è tale da riprodurre la naturale topologia del bacino e il percorso a cascata che l'acqua compie da monte verso valle sino alla sezione di chiusura.

La figura di seguito (Figura 3.22) illustra la schematizzazione degli 82 HRU in una rete di nodi connessi tra loro. Ciascun cerchio definisce un nodo della rete il quale rappresenta il singolo HRU: le stazioni di misura sono collocate in corrispondenza delle uscite dei nodi di colore blu mentre la sezione di interesse non strumentata è collocata in corrispondenza dell'uscita del nodo di colore giallo.

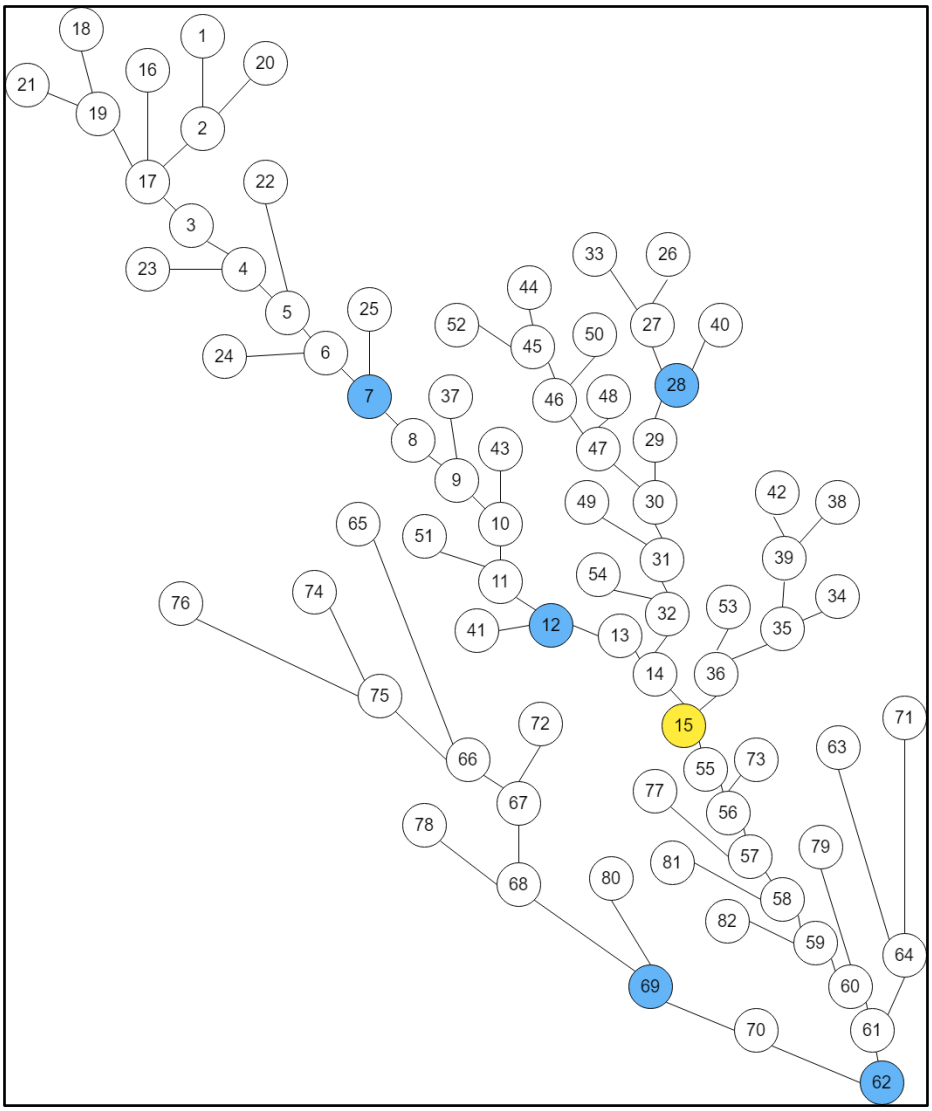


Figura 3.22: Schematizzazione delle porzioni del bacino in una lista di nodi connessi tra di loro sino alla sezione di chiusura del bacino idrografico in corrispondenza del T.Cervo a Quinto Vercellese.

Ciascun nodo può avere uno o due nodi da connettere con sé a monte o a valle della posizione che occupa all'interno del grafo ad albero.

L'ordine delle posizioni occupate dalla lista dei nodi, seguendo il grafo da monte verso valle, si riporta all'interno di un file ".csv" da collocarsi all'interno del *progetto*; questo consiste nel file di input da fornire allo *sim* file del grafo denominato *graph*.

Il *graph* è il file di simulazione all'interno del sistema *GEOframe-NewAGE* che consente, nello stesso istante, l'esecuzione dei processi che si simulano all'interno del singolo nodo (compilati e collocati nei file di simulazione individuali) ed è in grado di connetterli spazialmente verso la sezione di chiusura della rete nel rispetto della sequenza di nodi a cascata fornita nella lista. A titolo di esempio, si considerano i nodi 33, 26 e 40 del grafo di (Figura 3.22): questi HRU possono essere processati in parallelo. Poiché il nodo 27 si colloca nella sequenza dopo gli HRU 33 e 26, solo quando la loro simulazione viene completata si avviano l'esecuzione dei processi che appartengono al nodo 27 e dopo combinati con i risultati ottenuti nel nodo 40 e così via sino alla sezione di chiusura del bacino o sino al nodo di uscita desiderato come compilato nella lista fornita in ingresso. In questo modo il modello genera il deflusso in uscita dal nodo del grafo scelto seguendo la sequenza a cascata e aggregando i risultati dei nodi che lo procedono.

Lo *sim* file del grafo è corredato anche da un link al file 'csv' dei parametri: l'utente, infatti, compila in un apposito spazio i valori da attribuire ai parametri del modello; questi possono essere valori di tentativo o, nello specifico, l'output che di volta in volta viene restituito dalla la procedura di calibrazione. In questo modo il *graph* legge i valori dei parametri ottenuti e sovrascrive le stringhe dei sim file dei singoli HRU collegati al grafo e genera l'output con la serie di deflussi che può essere finalmente visualizzata dall'utente. La Figura 3.23 in calce fornisce un modello di *sim* file del grafo, all'interno della figura si possono distinguere i campi appena illustrati e quello dei *flags*, dove si connettono i *sim* file dei singoli HRU da aggiornare. Prima della procedura di calibrazione è sempre necessario generare una serie

di primo tentativo, questa infatti costituisce la serie simulata di base che il calibratore aggiornerà ad ogni passaggio.

```
26.sim  27.sim  28.sim  33.sim  40.sim  stronagraph.sim*

7
8   OMS3.graph(path: "./data/topostrona.csv",
9             simpath: "./simulation_Noce/simulation_calibrazione/") {
10
11      build()
12
13      graph(traverser: "downstream.all") {
14
15          components {
16          }
17
18          parameter(file: "$oms_prj/data/70STRONA.csv") {
19
20          }
21      }
22
23              flags {
24
25          "26" "{overwrite}"
26          "27" "{overwrite}"
27          "28" "{overwrite}"
28          "33" "{overwrite}"
29          "40" "{overwrite}"
30
31
32      }
```

Figura 3.23: *sim* file del grafo per la generazione dei deflussi per il bacino idrografico chiuso nel T.Strona a Strona Cossato.

L'ordine di connessione che sussiste tra un nodo e l'altro deve essere anche compilato, coerentemente con quanto ordinato nel ".csv" del grafo, nella scheda dei *sim* file di ogni HRU. Come si vede in **Allegato A** ogni script è chiuso dallo spazio degli *influxes* e degli *outfluxes* dove specificare gli HRU da connettersi al nodo di cui si sta compilando il codice.

Il vantaggio di una discretizzazione di questo tipo, al netto di una procedura di pre processamento strutturata come spiegato, è la possibilità di suddividere le singole unità del bacino idrografico di studio in porzioni che confluiscono alle sezioni delle stazioni di misura. In questo modo è possibile alleggerire il processamento in fase di calibrazione eseguendo con grafi ad hoc solo la

porzione di interesse, o più porzioni in parallelo, invece dell'intera infrastruttura.

3.2.7 Muskingum-Cunge

Il modello di generazione di deflusso lungo i versanti fornisce una portata idrica alla rete dei canali la quale, come detto in precedenza, è schematizzata con un grafo ad albero orientato. Il flusso viene propagato cinematicamente a valle, nei nodi degli altri HRU, attraverso la formulazione di Muskingum-Cunge [50] di cui si calibrano la velocità u_c e il coefficiente di peso x.

Il modello di propagazione di Muskingum-Cunge fonda sull'ipotesi che il volume d'acqua in ingresso invasato nel tronco dell'alveo sia il risultato della somma di una parte compresa in un invaso di forma prismatica e una parte compresa in un invaso a cuneo (Figura 3.24).

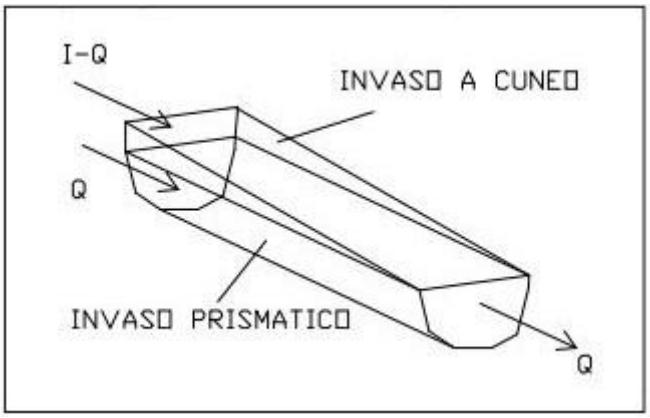


Figura 3.24: Modello di Muskingum-Cunge.

Il volume invasato dalla prima parte viene definito come il prodotto di un coefficiente k per la portata in uscita Q, mentre il volume invasato dalla seconda parte viene definito come $k \cdot x(I - Q)$ dove I è la portata in ingresso. Il volume totale invasato all'istante temporale t sarà dunque la somma di questi due termini.

Definito k il rapporto tra la lunghezza Δl e la velocità u_c, Muskingum-Cunge definisce l'incremento di volume dell'invaso nell'intervallo di tempo come:

$$\Delta S = S(t + \Delta t) - S(t) = \frac{I(t+\Delta t)+I(t)}{2}\Delta t - \frac{Q(t+\Delta t)+Q(t)}{2}\Delta t \quad (3.1)$$

e per l'introduzione di coefficienti $C_i = f(k, x)$ [50] si ottiene la portata in uscita all'istante temporale successivo:

$$Q(t + \Delta t) = C_1 I(t + \Delta t) + C_2 I(t) + C_2 Q(t) \quad (3.2)$$

Il deflusso generato dal singolo HRU viene sommato al musk in arrivo dal nodo di monte e passato così al nodo successivo. La componente, Allegato A, richiede in stringa la lunghezza del canale l che attraversa l'HRU e i parametri da ottimizzare x e u_c.

3.3 Procedura di calibrazione e validazione

La procedura di *calibrazione* consiste nell'identificare i valori dell'insieme dei parametri (associati alle equazioni costitutive e ai legami funzionali del modello) che massimizzano l'aderenza tra i risultati generati dall'elaborazione e le serie di misura a disposizione.

La fase immediatamente successiva prende il nome di fase di *validazione.* In questo contesto si mantengono inalterati i valori determinati nella fase di calibrazione e si genera un nuovo insieme di simulazioni allo scopo di dimostrare le capacità di predizione del modello e il comportamento del bacino idrologico.

I dati orari del periodo a disposizione, composto di 6 anni, si sono divisi in 3 anni di calibrazione e 3 anni di validazione. Il primo set del database a disposizione, che copre il periodo che va dall'Ottobre del 2010 al Settembre del 2013, è stato utilizzato per ricavare i valori dei parametri del modello. Il secondo set, ovvero l'altra metà del database che copre il resto del periodo in esame sino al Settembre del 2016, è stato utilizzato come ambiente dove generare la serie di validazione.

I paragrafi successivi riepilogano i parametri del modello sottoposti a calibrazione per il primo set del database a disposizione; il range di generazione individuato per ciascun parametro e l'ordine che si è seguito nelle sequenze di calibrazione e di validazione. L'esempio di compilazione di un *sim* file di calibrazione è contenuto all'interno dell'Allegato B dell'elaborato.

3.3.1 Lista dei parametri di calibrazione

I parametri associati alle equazioni costitutive e ai legami funzionali del modello idrologico di questa elaborazione sono stati introdotti all'interno del primo capitolo di questo scritto come, gli ultimi due parametri della lista riportata di seguito, sono stati formulati all'interno di questo capitolo nel paragrafo sulla propagazione cinematica del flusso con il metodo di Muskingum-Cunge.

Il modello, dunque, calibra i parametri del sistema di serbatoi più i due del routing, per un totale di 20 parametri. Di seguito si riepiloga la lista dei parametri da calibrare (Tabella 3.9) organizzati per layer di appartenenza; simbolo; nome e infine range di generazione determinato durante la fase di calibrazione.

Layer	Simbolo	Parametro	Range
Neve	T_s	Temperatura di scioglimento	[0,0 - 3,0]
Neve	α_r	Coefficiente di regolazione	[0,60 - 1.80]
Neve	α_s	Coefficiente di regolazione	[0.01 - 0.8]
Neve	α_m	Fattore di scioglimento	[0,01 - 1,0]
Neve	α_f	Fattore di congelamento	[1,0E-4 - 0,1]
Neve	α_e	Fattore di radiazione	[1,0E-5 – 1,0E-4]
Neve	α_l	Coefficiente capacità di ritenzione idrica	[0,3 - 0,9]
Canopy	k_c	Coefficiente LAI	[0,1 – 2,0]
Root zone	$S_{rz,max}$	Volume di accumulo limite	[400 – 600]
Root zone	a	Coefficiente del modello non lineare	[0,1 – 10]
Root zone	b	Esponente del modello non lineare	[3,0 – 40]
Root zone	α	Coeff. di partizione tra root zone e direct run off	[0,1 – 0,8]
Direct Run off	c	Coeff. del modello non lineare	[0,001 – 10]
Direct Run off	d	Esponente del modello non lineare	[3,0 – 80]
Direct Run off	$S_{ro,max}$	Volume di accumulo limite	[70 – 150]
Groundwater	e	Coeff. del modello non lineare	[0,001 – 10]
Groundwater	f	Esponente del modello non lineare	[3,0 – 40]
Groundwater	$S_{GW,max}$	Volume di accumulo limite	[900 – 1800]
Routing	u_c	Celerità	[0,7 – 2,1]
Routing	x	Coeff. di peso	[0,1 – 0,5]

Tabella 3.9: Lista dei parametri da calibrare.

3.3.2 Sequenze di calibrazione e validazione

Lo scopo dell'elaborato è quello di generare la simulazione di una serie di deflussi a partire dalla calibrazione di un database di misure di stazioni idrometriche, collocate nel bacino idrografico di studio, individuate a monte della sezione di interesse collocata a Castelletto Cervo (BI) come le due individuate immediatamente a valle di Elvo Carisio e Quinto Vercellese in modo da assegnare anche agli HRU compresi tra la sezione di interesse e le stazioni idrometriche di Vigliano Cervo e di Strona Cossato dei parametri che siano il risultato di un confronto con delle misure.

L'ordine con cui si è calibrato il modello idrologico segue, dunque, questa prerogativa e la discretizzazione in nodi, organizzati secondo una sequenza che procede da monte verso valle, ha concesso la modellazione di porzioni di bacino chiuse in corrispondenza delle stazioni di misura da calibrare progressivamente guadagnando sui tempi di processamento (Figura 3.25).

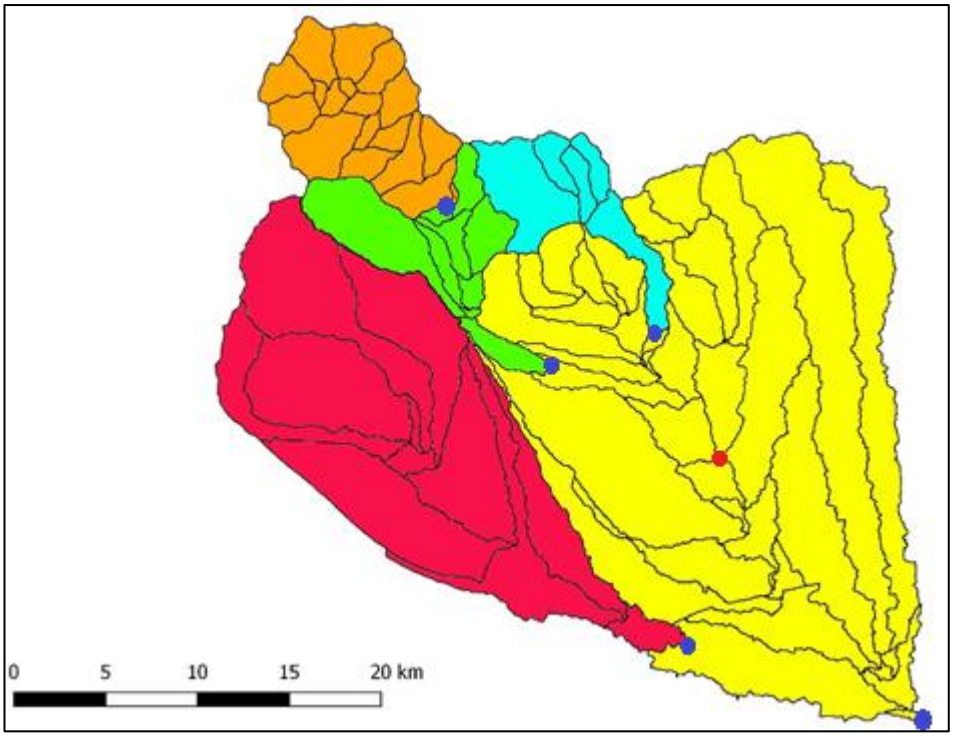


Figura 3.25: Organizzazione degli HRU per le sequenze di calibrazione. In cerchi blu le stazioni di misura, in cerchio rosso la sezione non strumentata.

Calibrata la prima stazione di monte, si passa alla calibrazione in corrispondenza della stazione successiva mantenendo gli HRU a monte della stazione già calibrata con i parametri di ottimo trovati e ricercando, con la nuova sequenza, i parametri di ottimo per gli HRU così compresi tra la stazione già calibrata e la nuova stazione da calibrare. All'interno del file di simulazione di ciascun HRU è infatti presente una stringa booleana che, con un sistema *true/false* consente di bloccare le schede delle unità già calibrate compilate con i valori dei parametri ottenuti nella sequenza precedente. In questo modo genereranno il loro contributo, nella sequenza nuova, con i valori di ottimo già trovati che l'algoritmo aggregherà ai contributi di quelli nuovi, compresi tra la stazione già calibrata e la stazione non calibrata, dovuti ai nuovi valori che il calibratore cercherà di ottimizzare di volta in volta.

Ne consegue una sequenza così organizzata:

- Calibrazione per il T.Cervo a Passobreve Cervo;
- Calibrazione per il T.Cervo a Cervo Vigliano;
- Calibrazione per il T.Strona a Strona Cossato;
- Calibrazione per il T.Elvo a Elvo Carisio;
- Calibrazione per il T.Cervo a Quinto Vercellese.

Prese singolarmente, le calibrazioni sono state eseguite lavorando progressivamente la prima parte del database di dati anno per anno, livellando i parametri di ottimo e i range di generazione sino ad ottenere la configurazione ottimale con sessioni di *trial and error* allo scopo di ottenere il valore di funzione obiettivo più alto possibile. Ciascuna sessione è stata eseguita con l'impostazione di un numero di 2 *round* e 200 *step* in maniera tale da fornire al calibratore un numero di esecuzioni sufficiente a plasmare più generazioni possibili all'interno dei range forniti nel file di simulazione.

I parametri restituiti in output sono stati utilizzati per la successiva generazione delle serie di validazione, compilando le schede di ogni unità con

i valori di ottimo ottenuti ed eseguendo i grafi chiusi alle stazioni strumentate e, finalmente, quello chiuso alla sezione non strumentata dove è stata generata una serie simulata che comprendesse tutto il dataset.

Quello di questo elaborato è il set up che con il minimo costo computazionale ha prodotto i risultati di questa trattazione riepilogati nel prossimo capitolo. Si riportano di seguito (Tabella 3.10) i tempi di processamento che sono stati necessari per la realizzazione delle sequenze di calibrazione che hanno prodotto la massimizzazione delle funzioni obiettivo per le cinque stazioni idrometriche.

Stazione di misura	**Tempo [h]**
Torrente Cervo a Passobreve Cervo	9
Torrente Cervo a Vigliano Cervo	5
Torrente Strona a Strona Cossato	2
Torrente Elvo a Elvo Carisio	12
Torrente Cervo a Quinto Vercellese	18

Tabella 3.10: Tempi di processamento.

Capitolo 4

4 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

I dati orari del periodo a disposizione composto di 6 anni si sono divisi, per ciascuna sezione, in 3 anni di calibrazione e 3 anni di validazione. Ciò si traduce, rispettivamente, in una serie calibrata da 26304 ore e in una serie validata composta dallo stesso numero di record per un totale di 52608 ore.

Il capitolo illustra i risultati ottenuti in corrispondenza delle stazioni idrometriche in seguito alla procedura di calibrazione e validazione nonché la serie di deflussi generata dal modello in corrispondenza della sezione non strumentata per gli stessi periodi di interesse. La costruzione delle curve di durata delle portate per i punti di studio conclude il capitolo.

L'aderenza tra le serie misurate e le serie simulate generate con il modello è stata valutata sia in termini di indice di fit, ovvero con i valori di KGE ottenuti, sia dal confronto degli idrogrammi e dei volumi generati in corrispondenza dei punti di interesse e per entrambi i periodi.

La tabella di seguito illustra i valori di KGE ricavati in corrispondenza dei punti di interesse per i parametri ottimizzati di Tabella 4.1.

Stazione di misura	**KGE (calibrazione)**	**KGE (validazione)**
Torrente Cervo a Passobreve Cervo	0,81	0,76
Torrente Cervo a Vigliano Cervo	0,90	0,83
Torrente Strona a Strona Cossato	0,73	0,59
Torrente Elvo a Elvo Carisio	0,71	0,67
Torrente Cervo a Quinto Vercellese	0,94	0,87

Tabella 4.1: Valori della funzione obiettivo in corrispondenza delle cinque stazioni idrometriche di misura per il periodo di calibrazione e per il periodo di validazione.

	Parametro	T. Cervo a Passobreve Cervo	T.Cervo a Vigliano Cervo	T.Strona a Strona Cossato	T.Elvo a Elvo Carisio	T.Cervo a Quinto Vercellese
Neve	T_s	2,59	2,10	1,64	1,82	2,08
Neve	α_r	1,31	1,34	0,82	1,08	1,19
Neve	α_s	0,72	0,56	0,62	0,96	0,14
Neve	α_m	0,12	0,81	0,14	0,82	0,75
Neve	α_f	0,01	0,05	0,05	0,03	0,05
Neve	α_e	5,84E-05	8,72E-05	4,49E-05	1,53E-05	5,55E-05
Neve	α_l	0,66	0,73	0,72	0,69	0,36
Canopy	k_c	1,23	1,31	1,03	1,89	1,06
Root zone	$S_{rz,max}$	487,87	422,85	442,39	448,82	482,53
Root zone	a	4,11	1,46	29,75	7,93	9,88
Root zone	b	14,28	25,90	11,04	33,58	13,05
Root zone	α	0,77	0,80	0,26	0,47	0,41
Direct Run off	c	4,64	1,86	2,92	13,46	3,45
Direct Run off	d	4,20	12,79	38,28	67,88	23,08
Direct Run off	$S_{ro,max}$	95,90	99,79	120,15	196,50	77,11
Groundwater	e	9,67	2,17	7,56	7,63	2,69
Groundwater	f	33,44	43,07	10,56	39,57	11,47
Groundwater	$S_{GW,max}$	1756,14	1154,60	1569,6	1644,9	943,1
Routing	u_c	2,07	1,64	1,91	2,90	1,59
Routing	x	0,30	0,32	0,10	0,13	0,23

Tabella 4.2: Lista dei valori ottimizzati per i parametri del modello ottenuti in corrispondenza delle cinque stazioni idrometriche.

Dai risultati di Tabella 4.1 emerge come il modello abbia ottenuto, per il periodo di calibrazione, delle performance migliori in corrispondenza delle stazioni idrometriche che seguono l'asta principale del T.Cervo con valori di KGE compresi tra lo 0.80 e lo 0.90 dimostrando una certa continuità di risultato. Sono invece di qualità poco inferiore i risultati ottenuti per i due principali tributari, il T.Strona e il T.Elvo, con valori di KGE compresi tra lo 0.70 e lo 0.75. Per un indice che esprime nel valore 1 il match perfetto tra serie osservata e serie simulata si possono dunque ritenere soddisfacenti i risultati ottenuti dal modello. La valutazione per il periodo di validazione, effettuata con lo stesso indice, restituisce per tutte e cinque le stazioni dei risultati consimili a quelli ottenuti per il periodo di calibrazione e di poco inferiori. Ciò sotto intende una peggiore, ma attesa, aderenza tra le serie misurate e le serie simulate rispetto al periodo di calibrazione conseguente ad un impiego di parametri che sono stati ottimizzati per solo il primo dei due periodi di studio.

4.1 Deflussi e volumi

Un confronto fra gli *idrogrammi* ottenuti fornisce una ulteriore impressione in merito all'aderenza fra la serie simulata e la serie misurata. Si rappresentano in blu i valori di deflusso appartenenti al periodo di calibrazione mentre in rosso quelli che appartengono al periodo di calibrazione. Entrambi vengono messi a confronto con la serie misurata delle stazioni rappresentata in nero.

Un ulteriore strumento utile a confrontare quanto i valori simulati siano prossimi a quelli delle serie misurate viene fornito dagli *scatterplot.* Questi sono grafici in doppia scala logaritmica in cui si osserva come le coppie composte da portata misurata in ascissa e portata simulata in ordinata si dispongano lungo la bisettrice del quadrante che prende il nome di *linea di identità*. In tutti i casi si può osservare come i risultati risultino essere più performanti, perché più vicini alla linea bisettrice del quadrante, nel periodo

di calibrazione in blu piuttosto che in quello di validazione in rosso. Quest'ultimo infatti è contraddistinto da risultati che si dispongono con nuvole di punti più ampie attorno alla linea di identità. Ciò è semplicemente dovuto al fatto che i set di parametri sono stati ricavati con i dati misurati che appartengono al primo periodo. Lo scatterplot è, inoltre, uno strumento che esalta tutte le differenze puntuali tra i valori simulati e i valori misurati; per questo nei grafici dei paragrafi successivi, in certi casi, appaiono punti che si distribuiscono in modo anomalo sulla coda o sulla punta della nuvola divergendo dalla linea di identità. Ciò è dovuto al fatto che molti punti di deflusso generati all'inizio della serie siano valori di warm up del modello, e dunque molto distanti dalla controparte collocata nella serie misurata, come, in altri casi, la migliore capacità del modello di simulare le oscillazioni che appartengono al deflusso base a discapito di una inferiore aderenza nei punti di massimo, e tra oscillazioni orarie di picco consecutive, restituisce le altre anomalie che si leggono negli scatterplot contenuti nei paragrafi successivi di riepilogo.

Il modo in cui sono stati discretizzati i sottobacini e il reticolo idrografico all'interno del modello è tale da restituire una serie temporale di stima dei deflussi anche in corrispondenza della sezione non strumentata per tutti i 6 anni del periodo di simulazione. La serie ottenuta in questa sezione risulta dunque essere la base con cui costruire la curva di durata delle portate per la valutazione della risorsa idrica in questo punto di interesse.

4.1.1 Deflussi e volumi nelle sezioni strumentate

Deflussi alla stazione del T.Cervo a Passobreve Cervo

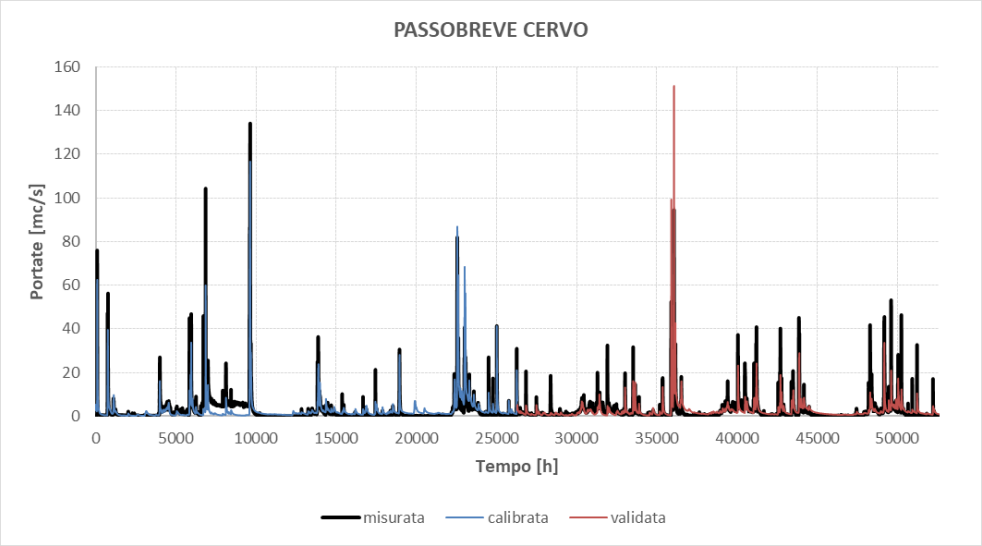


Figura 4.1: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Passobreve Cervo.

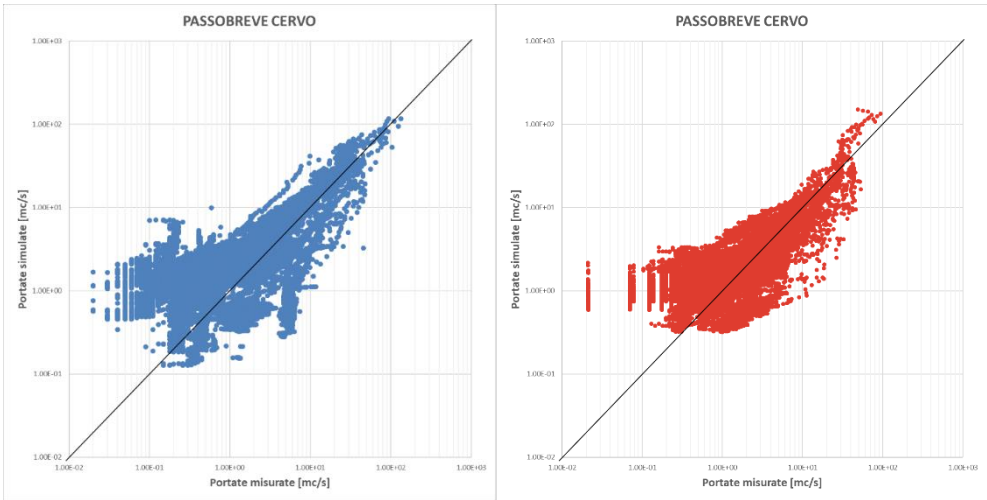


Figura 4.2: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Passobreve Cervo.

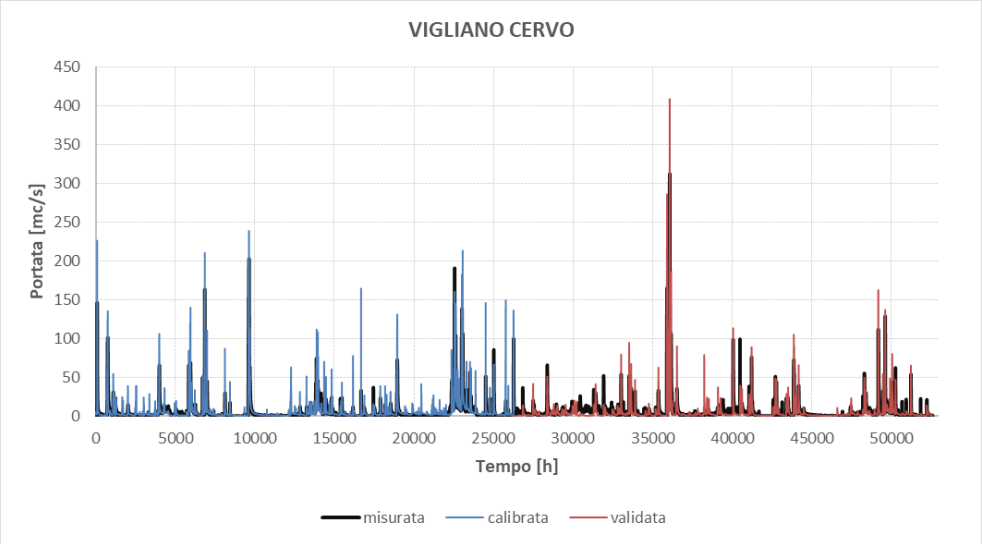


Figura 4.3: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Vigliano Cervo.

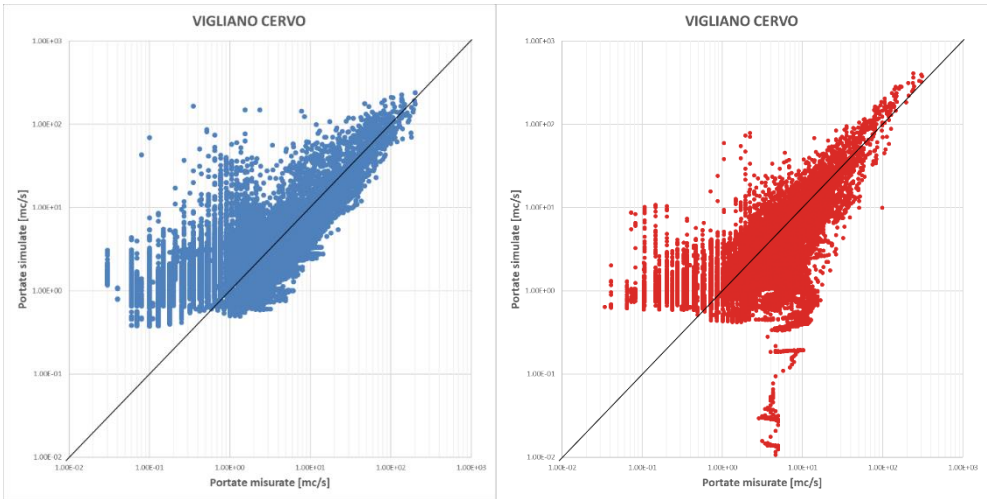


Figura 4.4: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Vigliano Cervo.

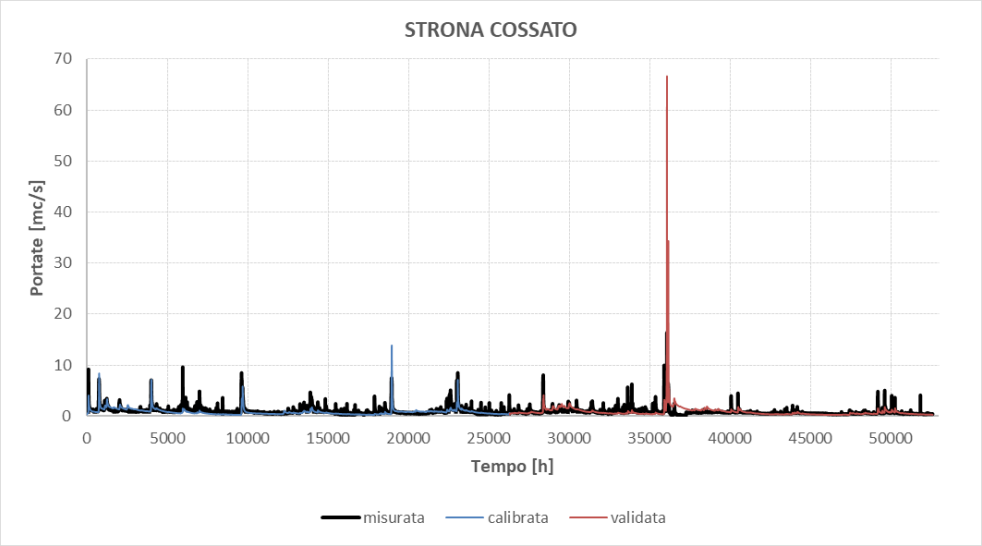


Figura 4.5: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Strona Cossato.

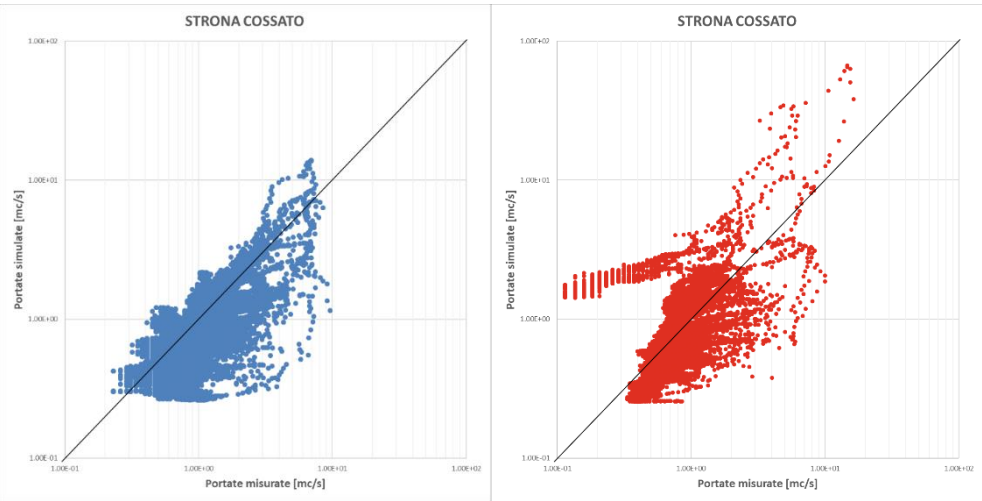


Figura 4.6: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Strona Cossato.

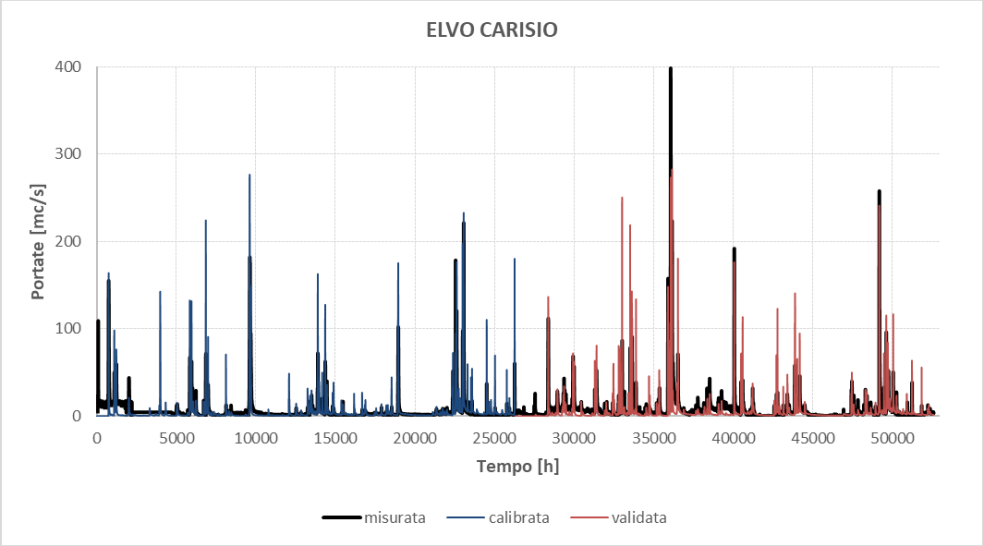


Figura 4.7: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Elvo Carisio.

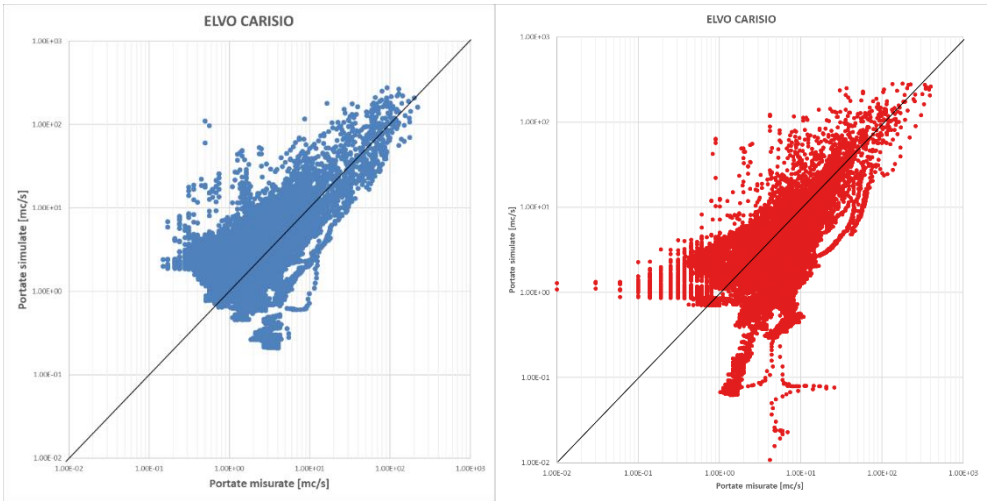


Figura 4.8: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Elvo Carisio.

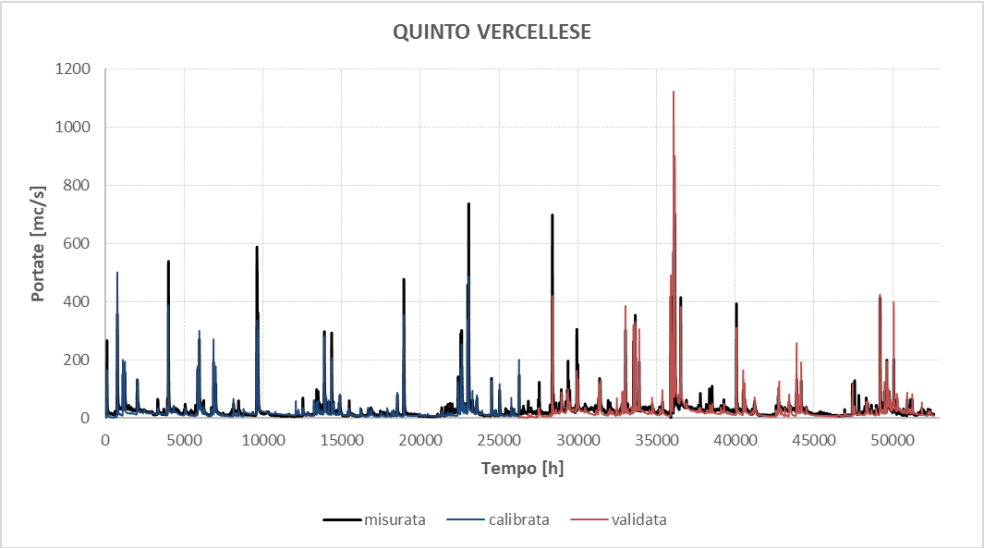


Figura 4.9: Confronto tra portate misurate e simulate per la stazione di Quinto Vercellese.

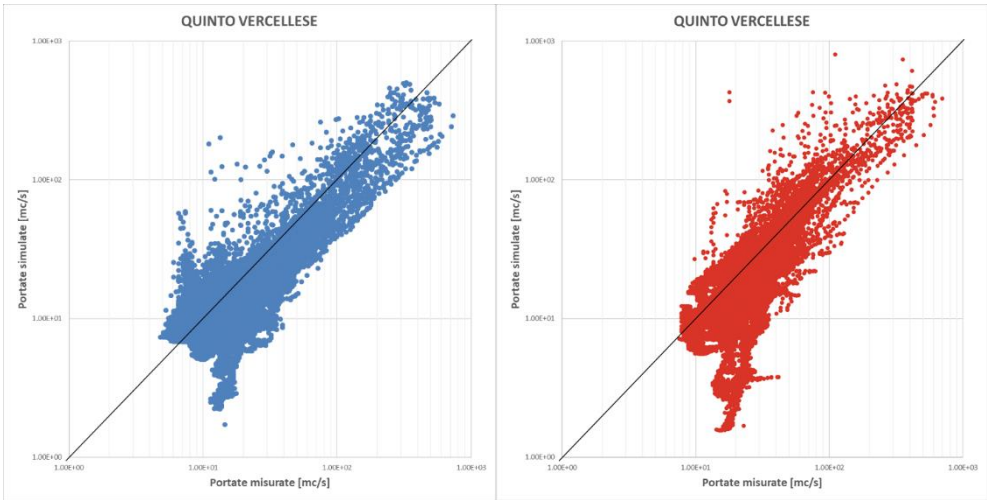


Figura 4.10: Scatterplot delle serie calibrate (in blu) e delle serie validate (in rosso) per la stazione di Quinto Vercellese.

Volumi nelle sezioni strumentate

L'*idrogramma* è definito come la rappresentazione grafica delle portate nel tempo, ne consegue che si definisce il *volume* del deflusso come l'area sottesa dallo stesso idrogramma. Poiché le portate si esprimono in [mc/s], il volume di deflusso così calcolato risulta essere in [mc] tuttavia dividendolo per la superficie del bacino A viene normalmente espresso in [mm].

$$V\ [mm] = \frac{V\ [mc]}{A\ [kmq]} \cdot 10^{-3} \tag{4.1}$$

Nel momento in cui, come in questa elaborazione, tutto il bacino idrografico di studio è stato suddiviso in porzioni chiuse in corrispondenza delle sezioni strumentate, sono note le superfici dei sottobacini sottesi dalle stazioni di misura (Tabella 4.3).

Stazione	**A [kmq]**
Torrente Cervo a Passobreve Cervo	75
Torrente Cervo a Vigliano Cervo	131
Torrente Strona a Strona Cossato	44
Torrente Elvo a Elvo Carisio	263
Torrente Cervo a Quinto Vercellese	1018

Tabella 4.3: Superfici sottese dalle stazioni di misura.

Allora è possibile fare un ulteriore raffronto tra i risultati ottenuti e i valori di misura confrontando i volumi determinati dalle serie osservate con i volumi ottenuti dalle serie di deflussi generate in questi stessi punti.

Gli istogrammi successivi confrontano i volumi determinati dalle serie simulate con i volumi ottenuti dalle serie osservate per tutte le sezioni delle stazioni strumentate. Si rappresentano in blu i volumi cumulati delle serie misurate mentre in rosso i volumi cumulati delle serie osservate.

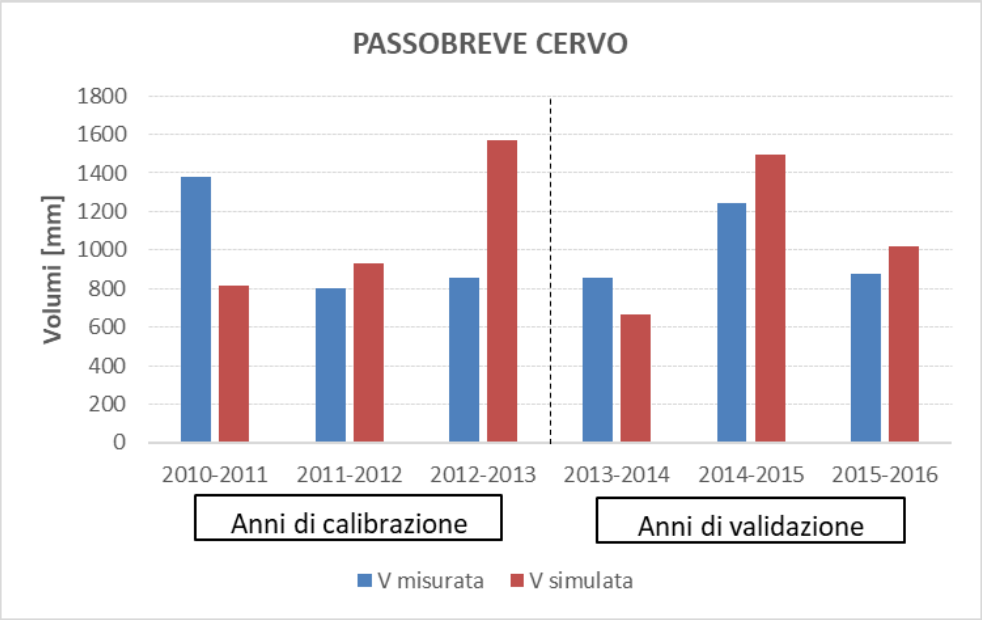


Figura 4.11: Confronto dei volumi cumulati a Passobreve Cervo.

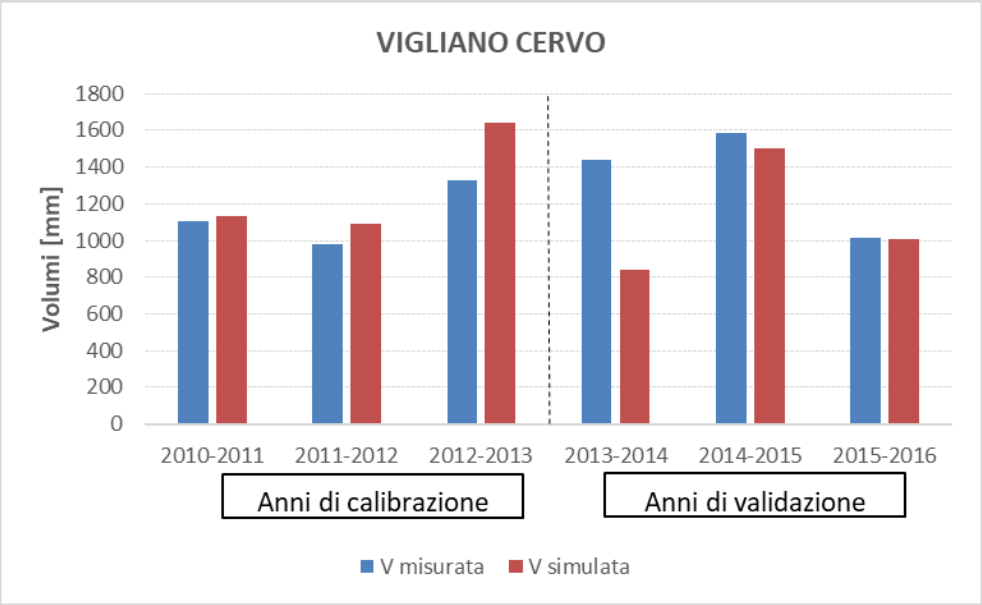


Figura 4.12: Confronto dei volumi cumulati a Vigliano Cervo.

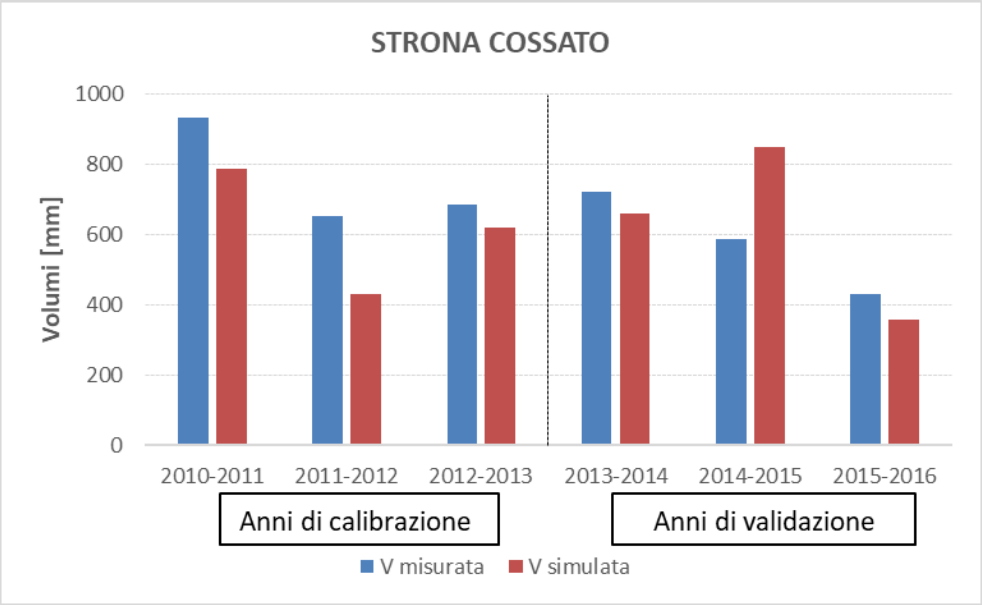


Figura 4.13: Confronto dei volumi cumulati a Strona Cossato.

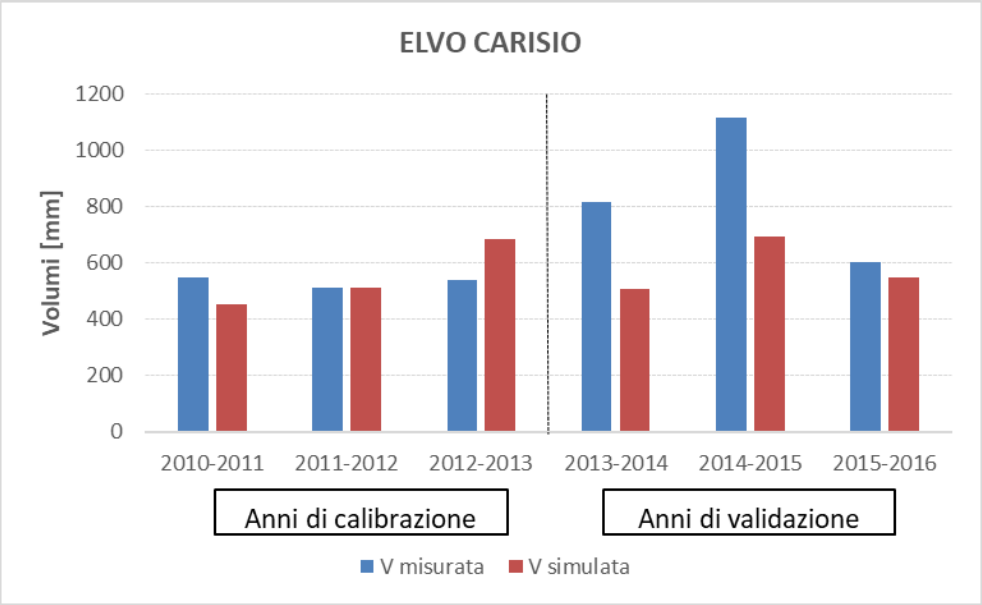


Figura 4.14: Confronto dei volumi cumulati a Elvo Carisio.

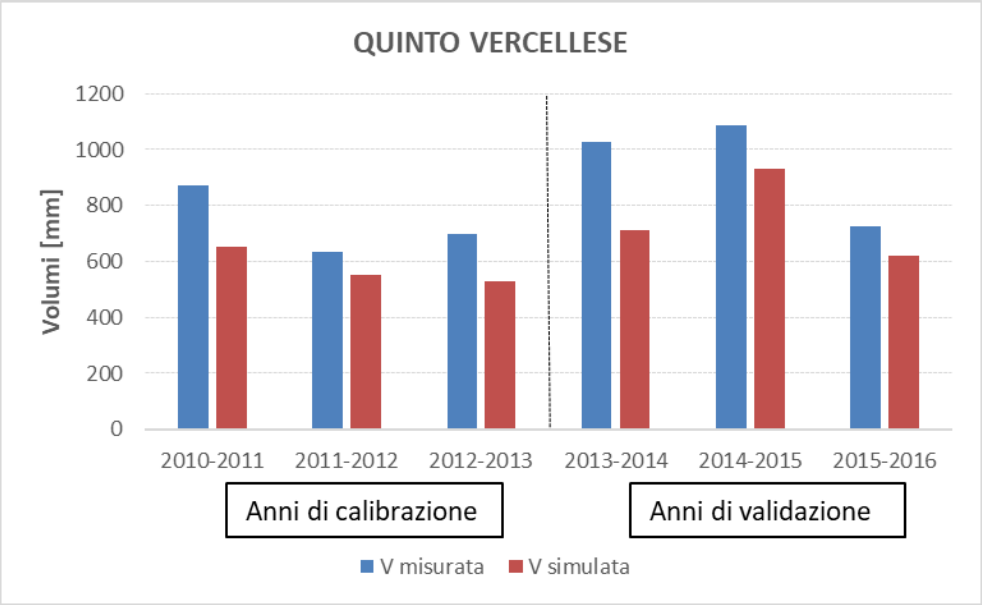


Figura 4.15: Confronto dei volumi cumulati a Quinto Vercellese.

Come emerge da una lettura degli istogrammi, anche in questo caso i risultati dipendono dalla bontà delle valutazioni della funzione obiettivo ottenute in corrispondenza delle diverse sezioni per i due diversi periodi di studio i quali sono stati suddivisi in tre anni di calibrazione e tre anni di validazione.

Nel dettaglio si nota, per tutti i 6 anni rispetto all'analisi fatta sui soli deflussi, una differenza tra serie simulata e serie osservata più marcata nel momento in cui si confronta anno per anno l'ammontare finale che si è cumulato nelle due serie in corrispondenza di tutte stazioni. Ciò è dovuto al fatto che una costruzione di questo tipo esalta, come dimostrato dai diagrammi successivi allegati in calce, tutte le differenze puntuali tra i valori di deflusso generati e quelli osservati. Succede che molti punti di deflusso generati all'inizio della serie siano valori di warm up del modello, e dunque molto distanti dal valore di confronto della serie misurata, come, in altri casi, alcuni massimi risultino sottostimati (o per alcuni anni di validazione sovrastimati). Ciò è dovuto a una migliore capacità del modello di simulare le oscillazioni che appartengono al deflusso base che si misura in corrispondenza della sezione strumentata a discapito di una inferiore aderenza nei punti di massimo e tra oscillazioni orarie di picco consecutive.

Emerge, ancora di più, come i set di parametri siano stati ricavati con i dati misurati che appartengono solo ai primi tre anni del periodo di studio mentre i rimanenti sono da considerarsi come anni di validazione. Infine, all'interno degli stessi anni di calibrazione, si evidenzia come il valore della funzione obiettivo, che giudica l'aderenza fra la serie simulata e la serie misurata, sia da intendersi come un risultato che valuta i tre anni nel suo complesso dove dunque vi è la possibilità che vi sia un anno simulato più virtuoso di un altro ad influenzare il risultato complessivo (o un anno meno virtuoso nel caso di KGE più bassi). Per apprezzare questa ultima differenza seguono due grafici esplicativi che appartengono a due anni consecutivi del periodo di calibrazione della stazione di Vigliano Cervo (KGE=0,90).

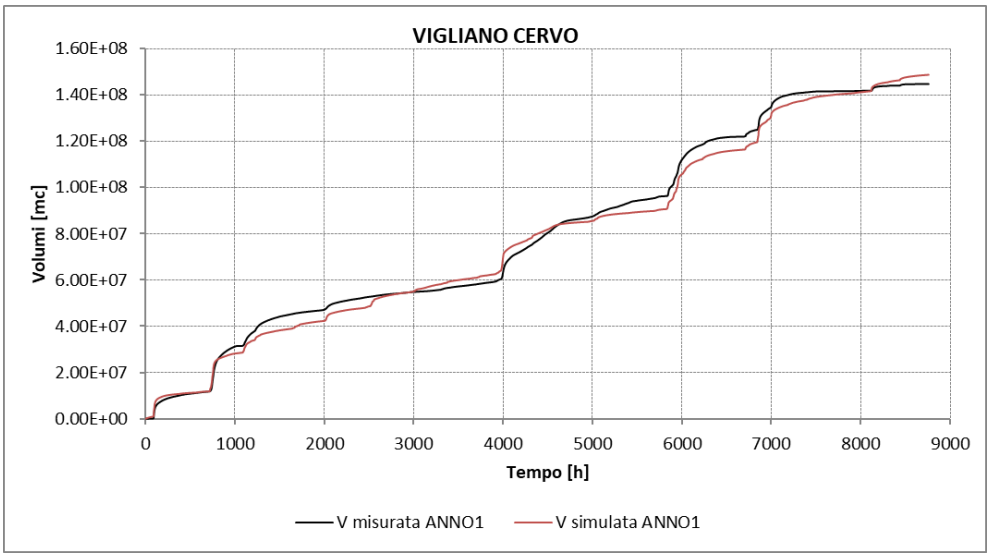


Figura 4.16: Confronto dei volumi cumulati a Vigliano cervo per il primo anno del periodo di calibrazione (KGE=0,90).

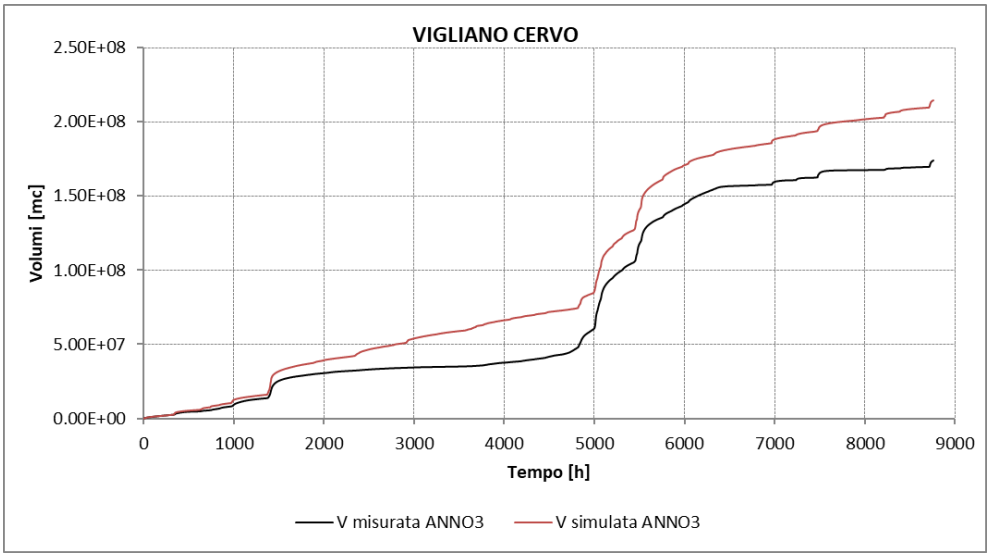


Figura 4.17: Confronto dei volumi cumulati a Vigliano cervo per il terzo anno del periodo di calibrazione (KGE=0,90).

Si vede come ad una buona valutazione complessiva dei tre anni di calibrazione (KGE=0,90 per la calibrazione fatta a Vigliano Cervo) possa corrispondere una situazione nella quale un anno aderisca meglio alla serie misurata rispetto ad un altro successivo.

4.1.2 Deflussi e volumi nella sezione non strumentata

In questa elaborazione, tutto il bacino idrografico di studio è stato suddiviso in porzioni chiuse non solo in corrispondenza delle sezioni strumentate ma anche nella sezione di interesse non strumentata di Castelletto Cervo (BI). Ciò consente al modello di generare una serie di deflussi anche in corrispondenza della sezione di interesse. Completata la calibrazione del modello, si assegna a ciascun insieme di HRU il proprio valore di ottimo di Tabella 4.2 trovato per i parametri e si avvia una simulazione che propaga il flusso sino alla sezione di Castelletto Cervo (BI).

Il paragrafo illustra i risultati ottenuti per tutti i 6 anni presi in esame.

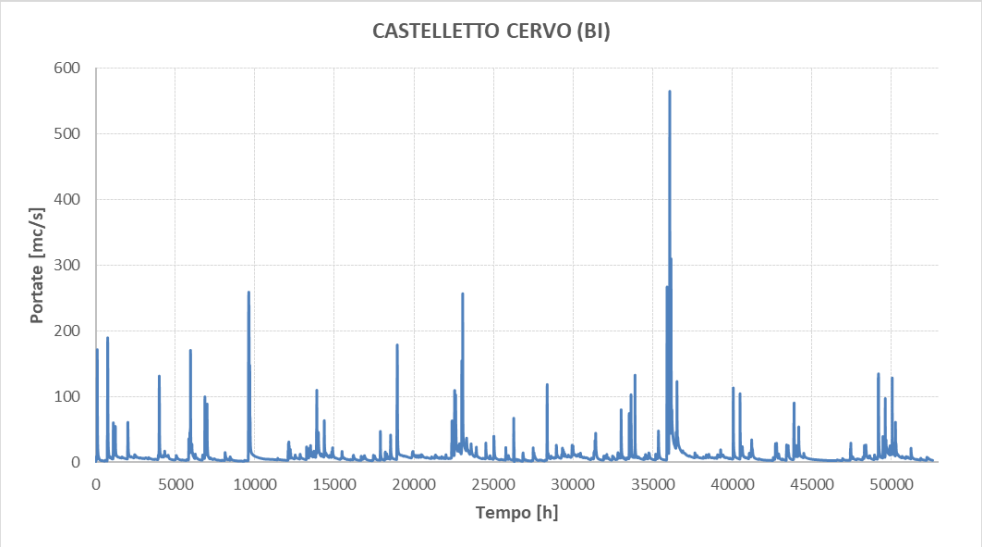


Figura 4.18: Idrogramma generato dal modello per la sezione di Castelletto Cervo.

Il modello ha generato, per la sezione di Castelletto Cervo (BI), l'idrogramma di Figura 4.18 che si distingue per un deflusso medio di circa 9 [mc/s]. In assenza di misure con cui confrontare la serie si può ad ogni modo affermare che il modello è riuscito a generare una serie con un deflusso base senza evidenti anomalie di oscillazione; emergono eventi di massimo isolati compresi tra i 100 e 200 [mc/s]. Questi risultano essere i limiti entro cui si esplicano i picchi della serie fatta eccezione per un singolo evento di circa 600 [mc/s] che rimane pur sempre generato con parametri di ottimo che sono stati determinati a partire da serie di misura del periodo di calibrazione mentre l'evento in questione si colloca negli anni del periodo di validazione.

Per sottolineare le differenze tra i deflussi generati con il modello per il periodo di calibrazione con quelli generati per il periodo di validazione, la (Figura 4.19) raccoglie i risultati dell'analisi dei deflussi medi mensili della serie completa generata per la sezione di Castelletto Cervo (BI) in due istogrammi sovrapposti.

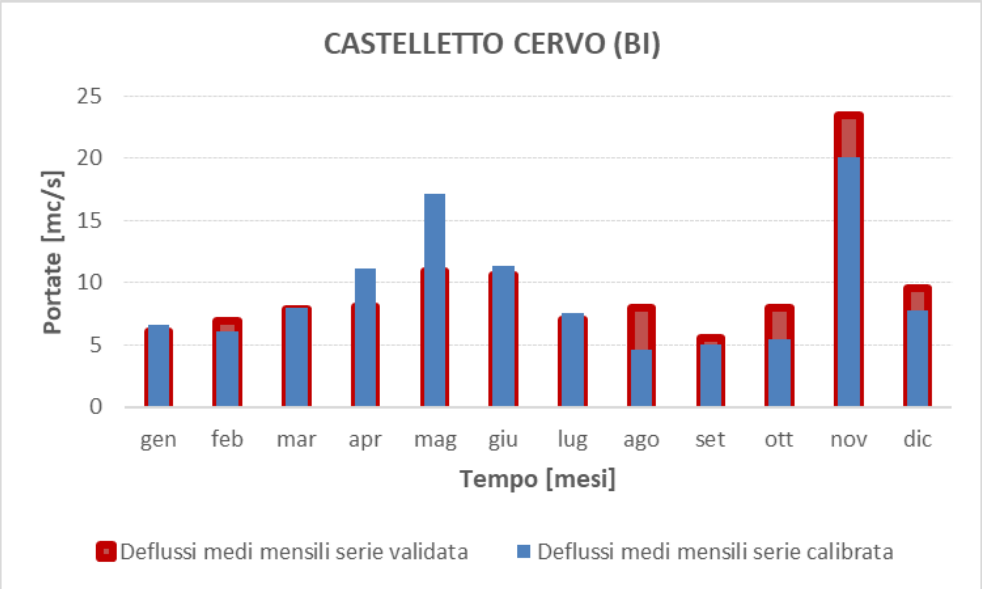


Figura 4.19: Deflussi medi mensili del periodo di calibrazione (in blu) e del periodo di validazione (in rosso) per la serie simulata generata dal modello per la sezione di Castelletto Cervo (BI).

Le due serie non possono definirsi completamente sovrapponibili per via di una diversa distribuzione all'interno dei singoli mesi delle intensità degli agenti atmosferici per i due diversi periodi. Tuttavia, le stesse riescono a simulare adeguatamente lo stesso andamento stagionale di deflussi con picchi più alti nei mesi di Maggio e Novembre, dovuti il primo a un maggiore contributo di scioglimento nivale e il secondo ad una maggiore intensità delle precipitazioni, e di mancanza nei mesi di Gennaio e Agosto. Un altro elemento che non contribuisce ad una perfetta sovrapposizione, o comunque svaluta leggermente la serie validata, è una inferiore aderenza che i valori di ottimo dei parametri del modello hanno ottenuto per il periodo di valutazione nel confronto tra le serie misurate e le serie generate nelle stazioni idrometriche rispetto all'aderenza più forte che si è ottenuta nel periodo di calibrazione. Tuttavia tutto ciò non impatta notevolmente nell'analisi di deflussi medi mensili dei due periodi nella sezione non strumentata in quanto questi si differenziano considerevolmente solo nel mese di Maggio (con una differenza di 7 mc/s), e dunque attribuibile a una maggiore intensità delle precipitazioni nel periodo di calibrazione (Figura 4.20), rispetto alle

differenze nei casi dei mesi di Agosto, Ottobre, Novembre e Dicembre contenute nel peggiore dei casi entro i 3 mc/s.

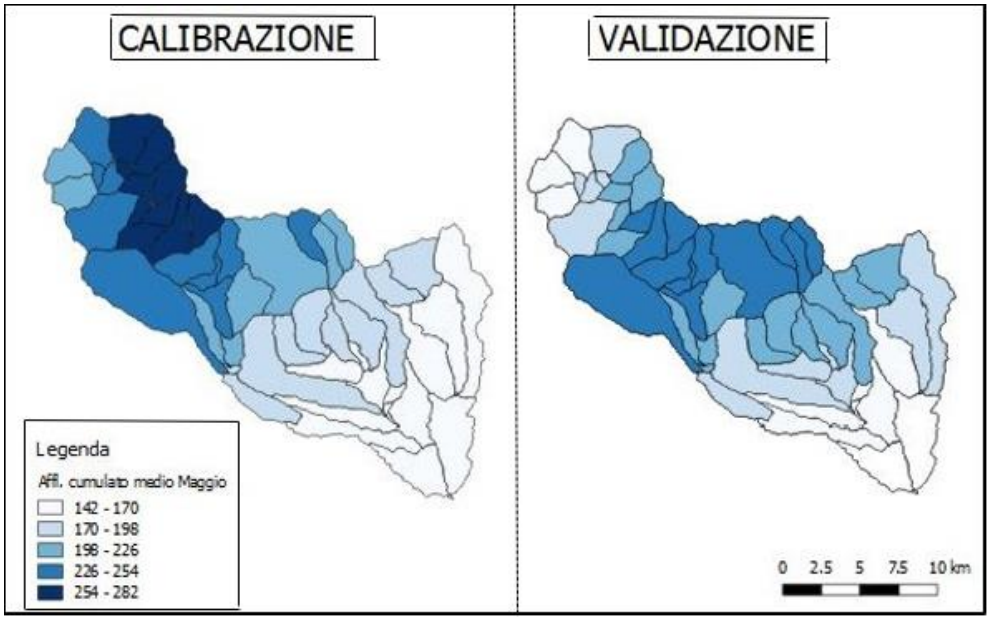


Figura 4.20: Volumi cumulati di precipitazione nei mesi di Maggio per gli anni di calibrazione e di validazione per il bacino chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI).

Preso atto di queste differenze, rimane favorevole per gli esiti delle elaborazioni il confronto fra i deflussi medi annui della serie generata dal modello per i due periodi nella sezione non strumentata. Questi sono di 9,23 mc/s per il periodo di calibrazione e di 9,33 mc/s per il periodo di validazione, dunque possiedono poco margine di differenza.

Specificato ciò, si prosegue con l'analisi dei deflussi medi mensili; dei volumi cumulati e della curva di durata delle portate per la serie generata nella sezione di Castelletto Cervo (BI) che comprende tutti i 6 anni di riferimento a disposizione.

La tabella dell'analisi dei deflussi medi per l'intero database a disposizione **(**Tabella 4.4**)** certifica come il modello sia riuscito a replicare una certa stagionalità, con periodi abbondanti nei mesi di Maggio e Novembre e periodi con disponibilità inferiore nella stagione estiva e nei mesi più freddi tuttavia

l'elaborazione è stata compiuta senza una modellazione delle opere di presa ad uso agricolo e idroelettrico disposte sul T. Cervo che prelevano a monte della sezione di interesse quindi i risultati non sono da intendersi come la parte rimanente da questi prelievi.

Mese	Portata media mensile [mc/s]
gen	6,31
feb	6,51
mar	7,92
apr	9,62
mag	14,03
giu	10,94
lug	7,32
ago	6,30
set	5,30
ott	6,74
nov	21,75
dic	8,65
	Media annua 9,28

Tabella 4.4: Deflussi medi mensili per la serie simulata a Castelletto Cervo (BI).

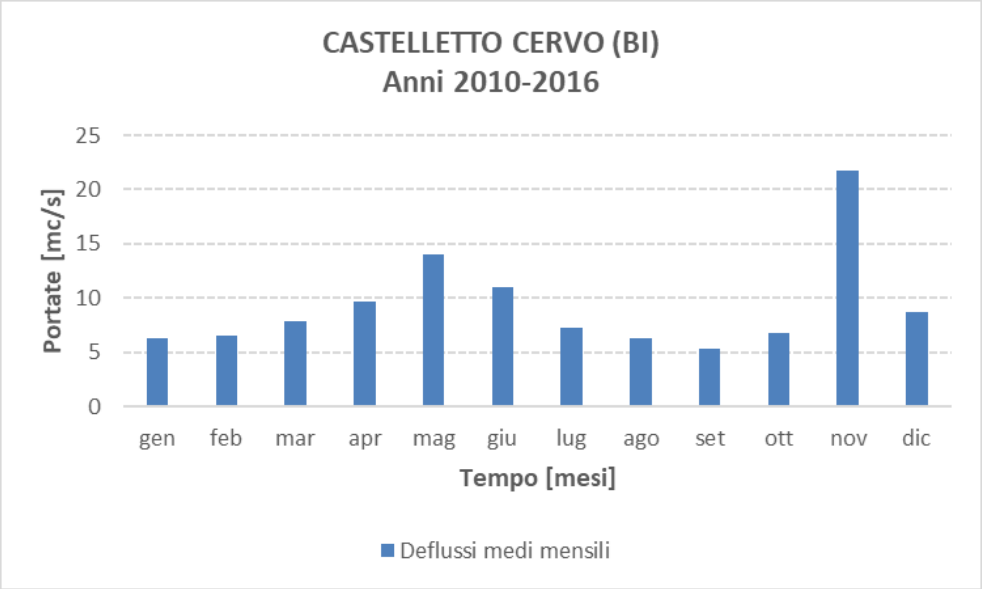


Figura 4.21: Deflussi medi mensili per la serie simulata a Castelletto Cervo (BI).

Data la superficie che la sezione di Castelletto Cervo (BI) sottende, segue un diagramma che illustra i volumi cumulati dalla serie di simulazione per ogni singolo anno del database di dati a disposizione.

Stazione	A [kmq]
Torrente Cervo a Castelletto Cervo (BI)	325

Tabella 4.5: Superficie sottesa dalla sezione di Castelletto Cervo (BI).

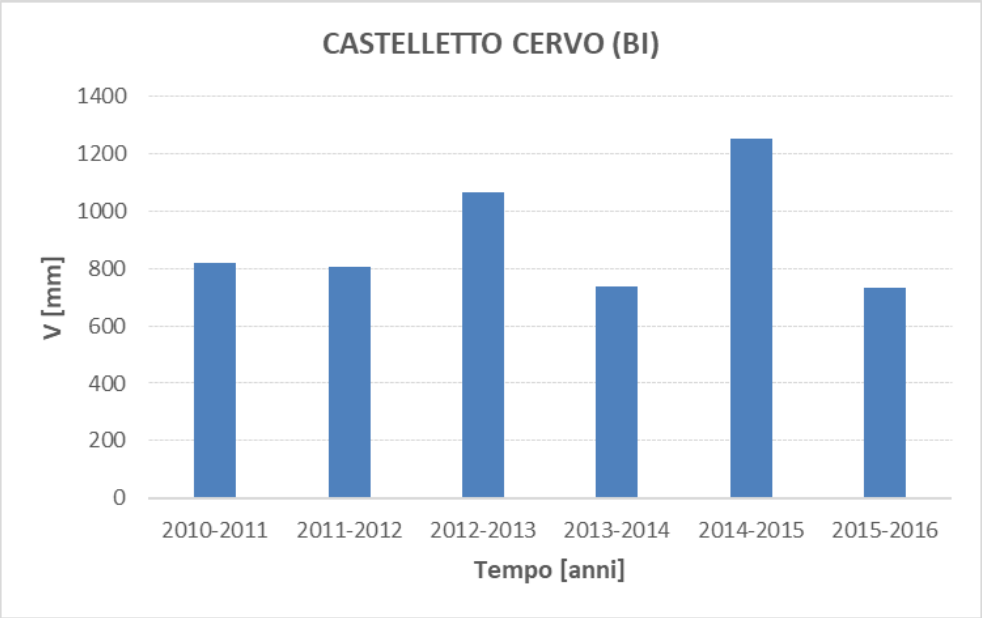


Figura 4.22: Volumi cumulati a Castelletto Cervo (BI).

4.2 Curve di durata delle portate

La Curva di Durata delle Portate, *CDP*, è lo strumento con il quale è possibile conseguire un'analisi delle caratteristiche del deflusso d'acqua nelle sezioni di interesse. Essa consiste in quella funzione che indica il tempo per cui un determinato valore di portata viene uguagliato o superato. Le CDP occupano un ruolo di rilievo nella determinazione dei volumi di acqua disponibili in

alveo e di conseguenza nella determinazione dei volumi derivabili per uso irriguo e per la produzione di energia elettrica.

Le CDP si riferiscono ad un periodo di misura uguale ad un anno con sequenza giornaliera. Per questo motivo si sono riorganizzati i 6 anni di serie oraria di portate misurate e simulate nelle corrispettive serie di portata media giornaliera.

Successivamente, anno per anno, si sono ordinati i dati in senso decrescente in modo tale da ricavare, per ogni singolo anno, un campione di 365 valori di portata disposti dal più grande al piccolo che sono stati dunque riorganizzati, rispetto alle durate d espresse in giorni, nella *curva di durata delle portate media annuale*.

Infine, per ogni i-esimo giorno si calcola il valore medio di portata, mediata sui 6 anni, in modo tale da tracciare la curva media di durata delle portate la quale media i valori ottenuti anno per anno nelle curve di durata delle portate annuali. Questa prende il nome di *curva delle portate totale*.

In questo modo si ottengono i grafici, in scala lineare, allegati nei paragrafi successivi. Questi rappresentano per ciascuna sezione, strumentata e non, la determinazione della curva delle portate media annua e il confronto delle curve di durata totali tra le serie misurate e le serie simulate.

4.2.1 Curve di durata delle portate nelle sezioni strumentate

CDP alla stazione del T.Cervo a Passobreve Cervo

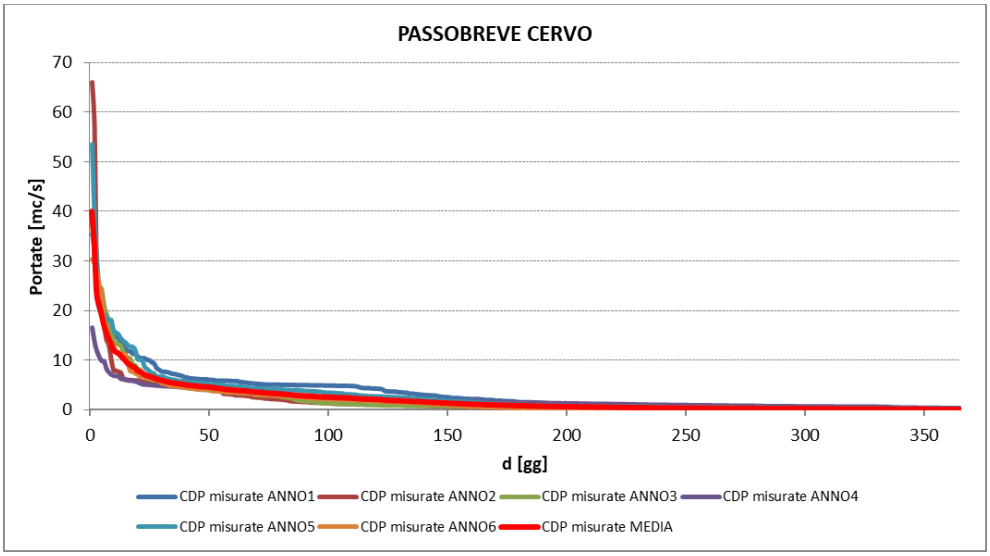


Figura 4.23: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Passobreve Cervo.

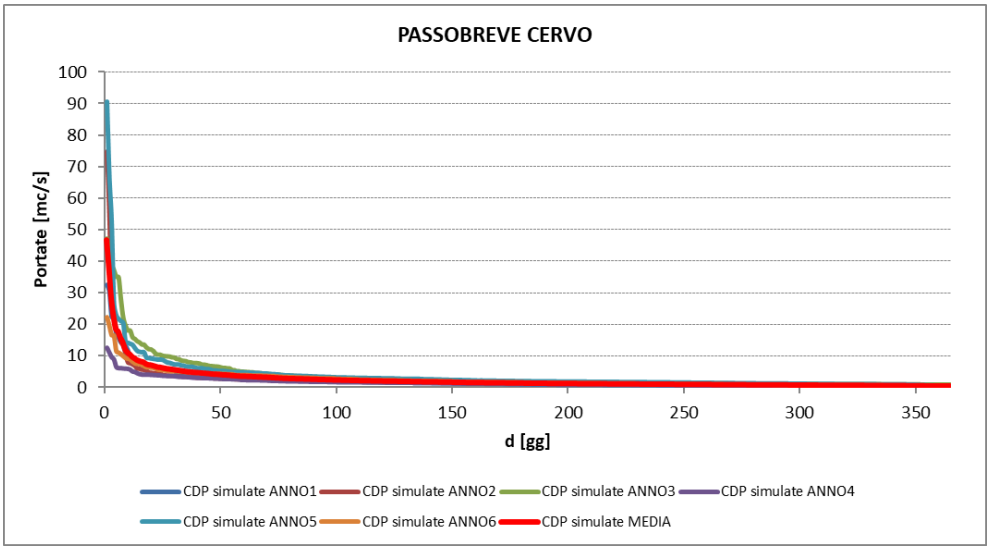


Figura 4.24: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Passobreve.Cervo.

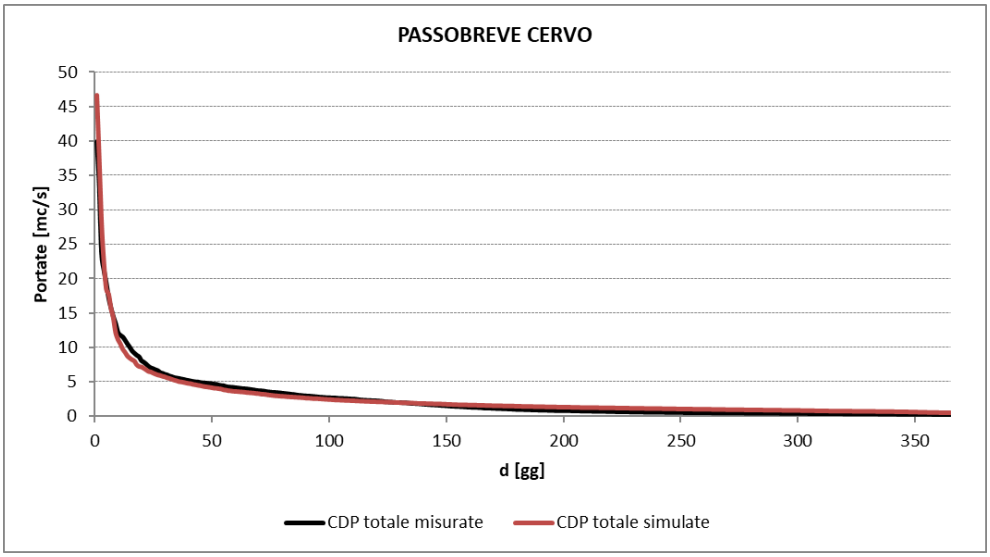


Figura 4.25: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Passobreve Cervo.

CDP alla stazione del T.Cervo a Vigliano Cervo

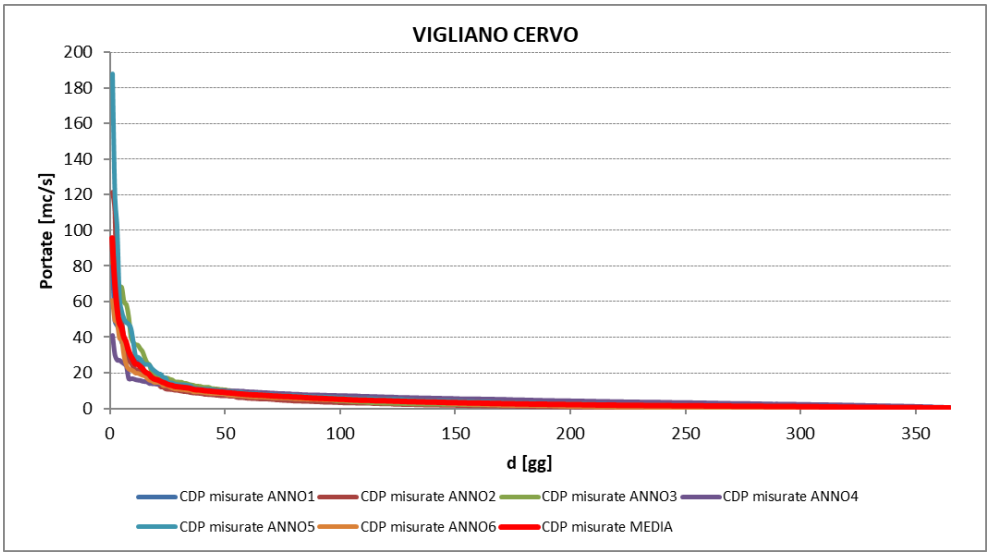


Figura 4.26: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Vigliano Cervo.

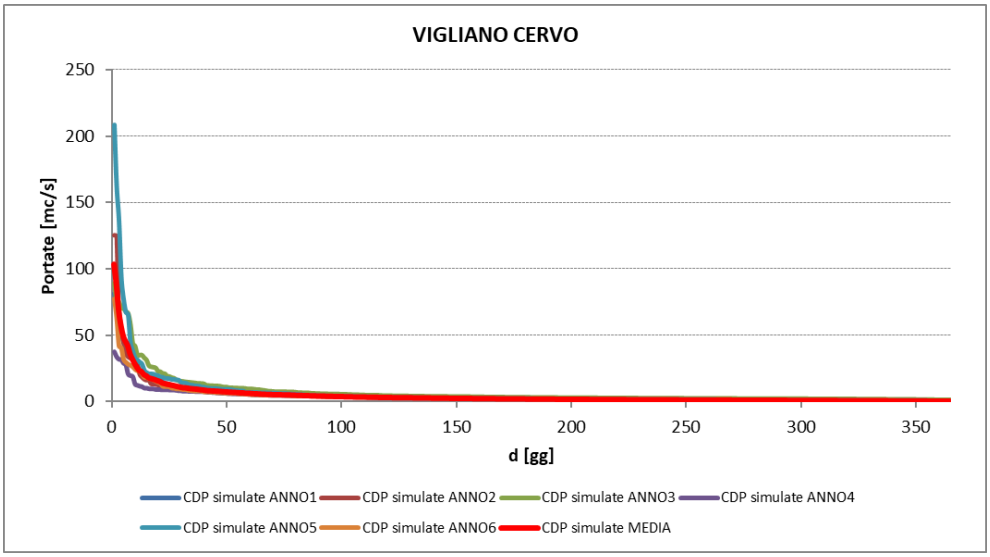


Figura 4.27: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Vigliano Cervo.

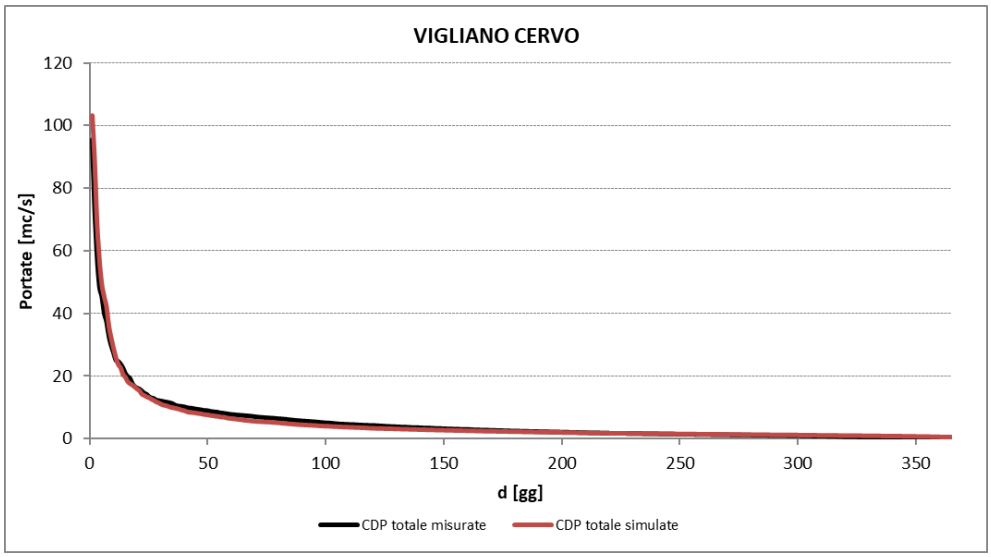


Figura 4.28: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Vigliano Cervo.

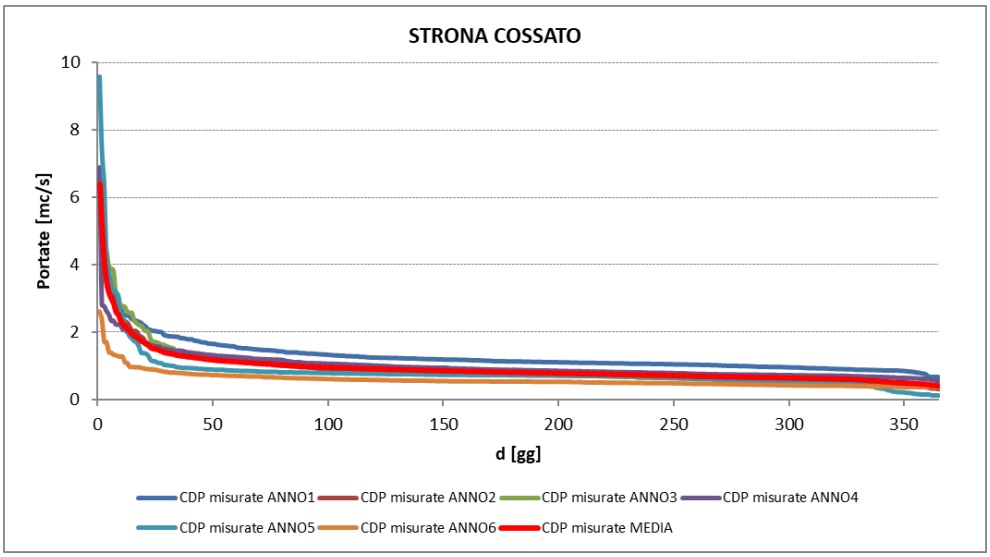


Figura 4.29: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Strona Cossato.

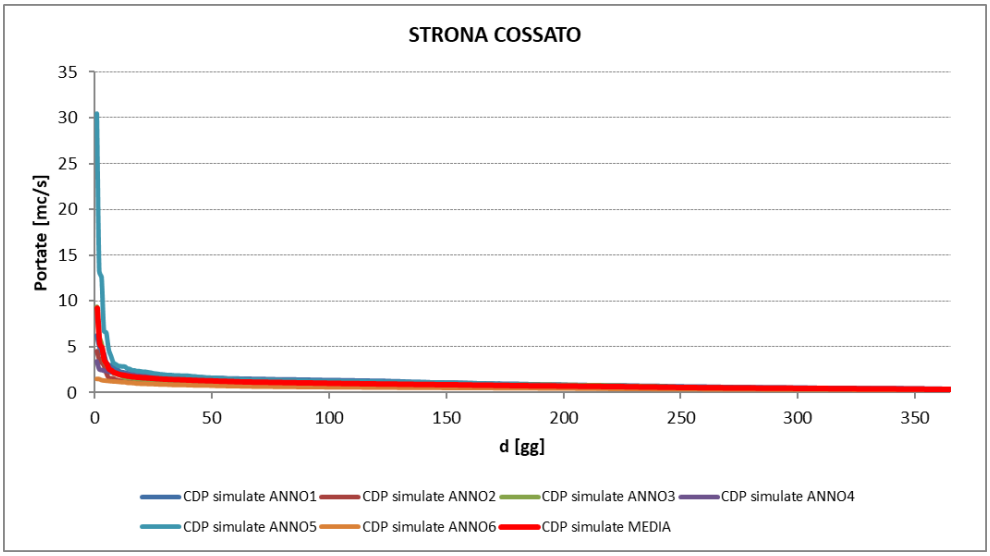


Figura 4.30: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Strona Cossato.

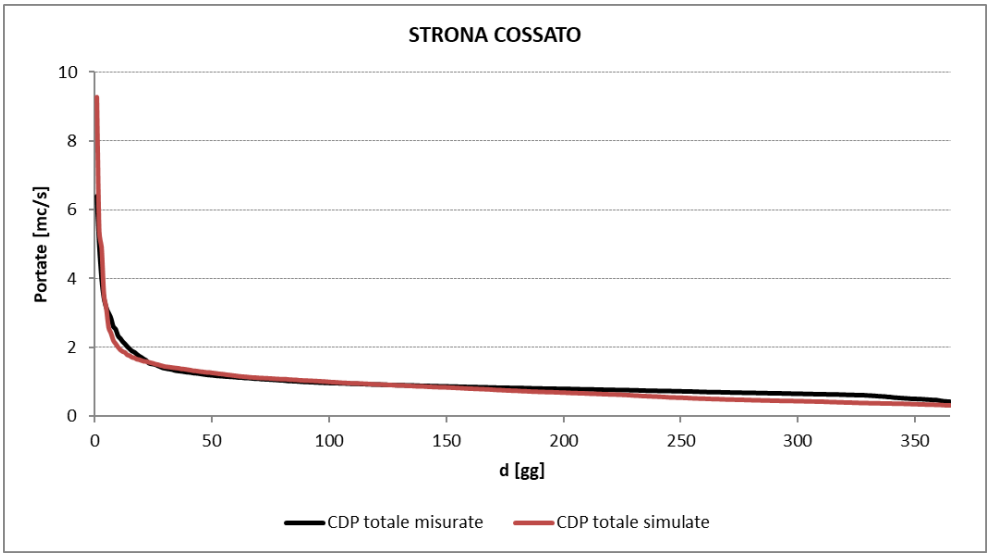


Figura 4.31: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Vigliano Cervo.

CDP alla stazione del T.Elvo a Elvo Carisio

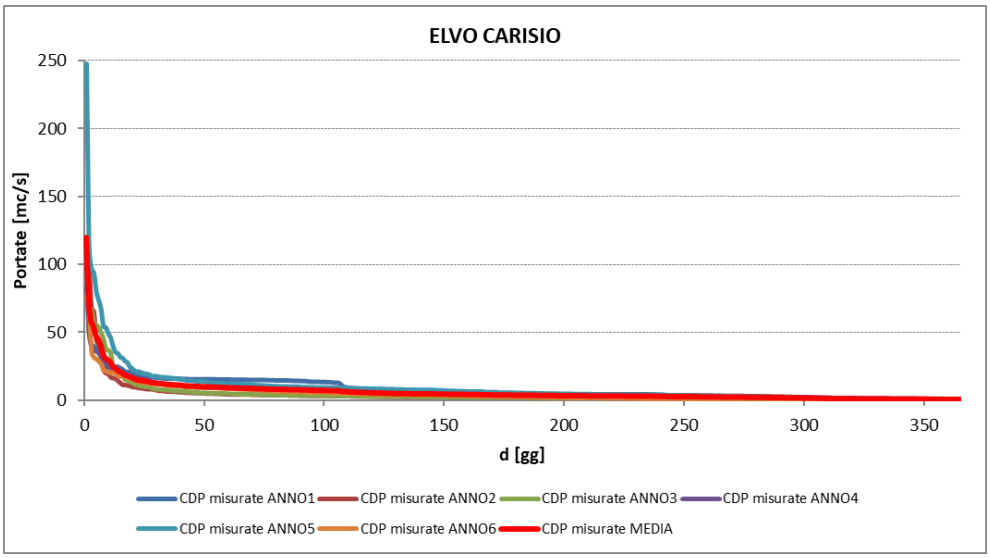


Figura 4.32: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Elvo Carisio.

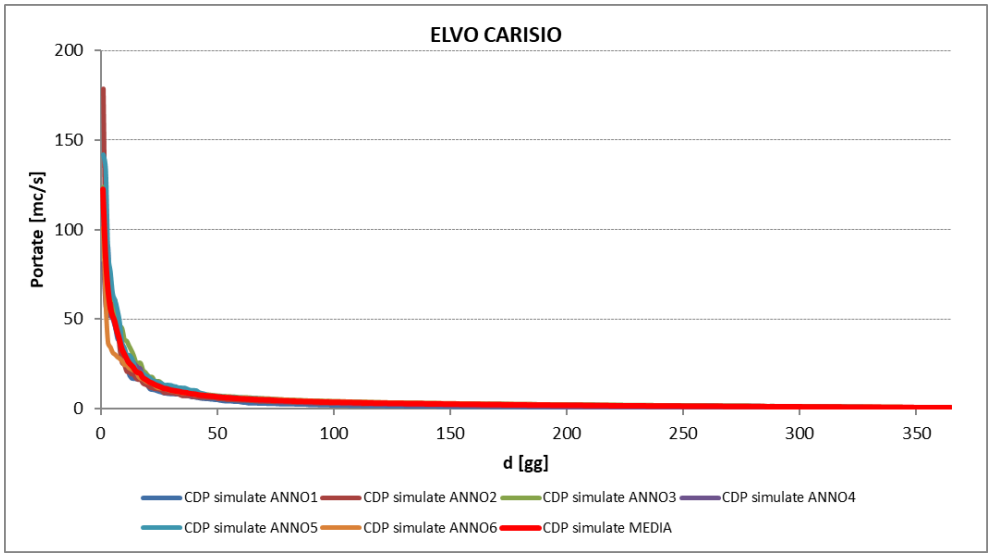


Figura 4.33: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Elvo Carisio.

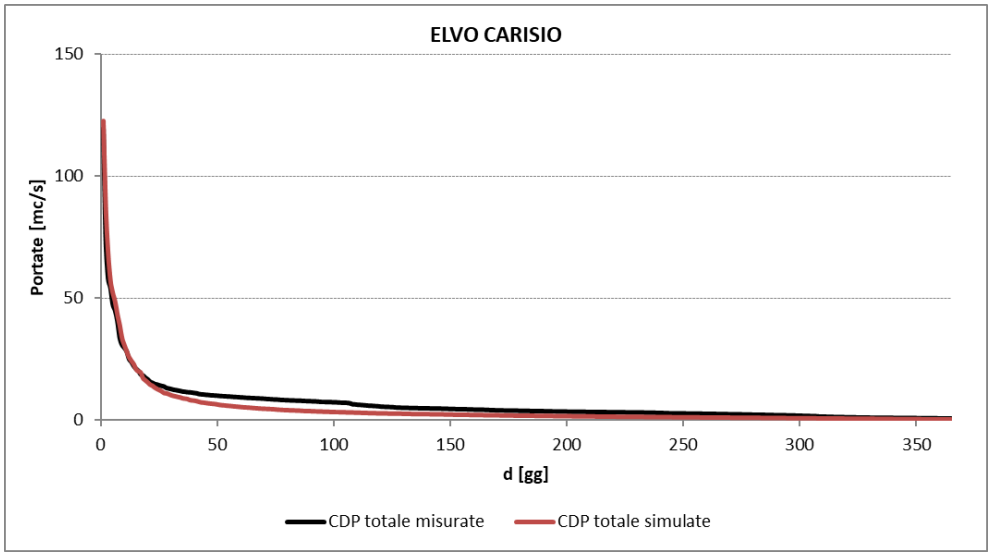


Figura 4.34: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Elvo Carisio.

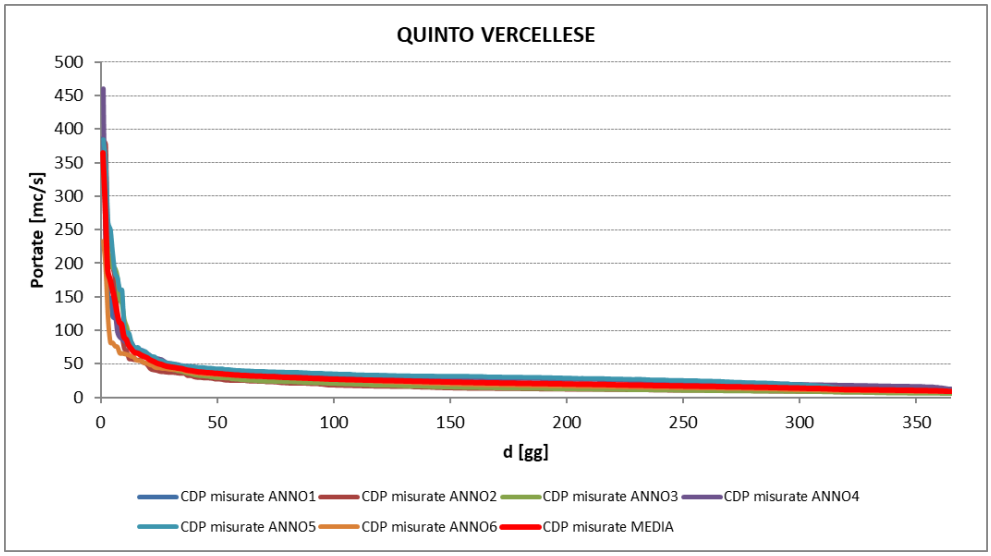


Figura 4.35: Curva di durata totale delle serie misurate per la stazione di Quinto Vercellese.

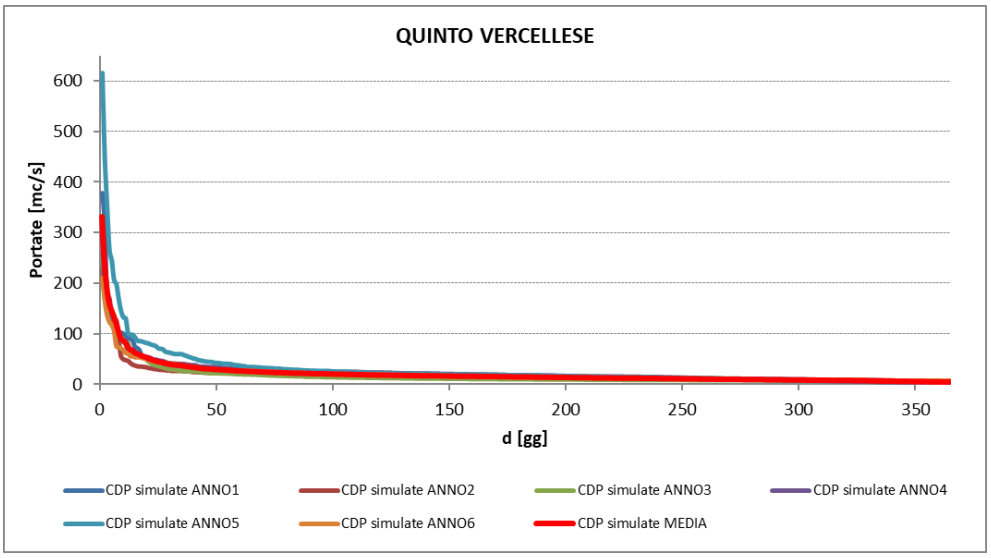


Figura 4.36: Curva di durata totale delle serie simulate per la stazione di Quinto Vercellese.

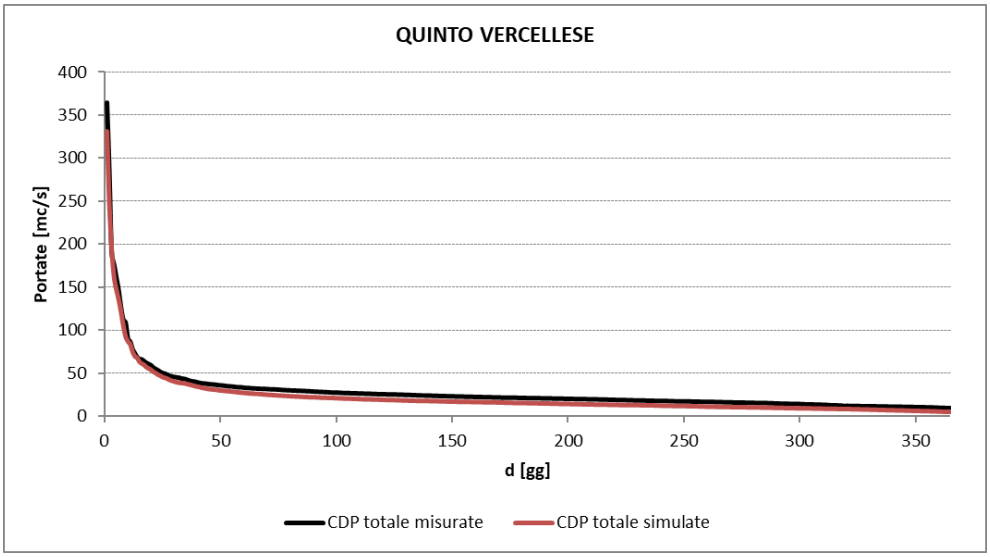


Figura 4.37: Confronto fra le curve di durata totali per la stazione di Quinto Vercellese.

4.2.2 Curve di durata delle portate nella sezione non strumentata

Aver assegnato a ciascun insieme di HRU il proprio valore di ottimo di Tabella 4.2, conferisce, alla curva di durata delle portate costruita nella sezione non strumentata di Castelletto Cervo (BI), il pregio di una correlazione con le altre curve di durata calibrate in corrispondenza delle sezioni strumentate. Questa correlazione è ben supportata dalla scelta di calibrare tutte le stazioni idrometriche a monte della sezione di interesse come anche quella immediatamente a valle in modo da assegnare agli HRU compresi tra la sezione di interesse e le stazioni idrometriche di Vigliano Cervo e di Strona Cossato dei parametri che siano stati il risultato di una calibrazione. Tuttavia l'assenza di una modellazione dei prelievi a scopo irriguo ed idroelettrico presenti a monte della sezione di interesse comporta che i risultati siano da considerarsi al lordo di queste detrazioni.

Lo studio della serie generata in corrispondenza della sezione di Castelletto Cervo (Figura 4.18) ha così determinato la curva di durata delle portate media annua di Tabella 4.6 e Figura 4.38.

d [gg]	CDP [mc/s]
1	156,06
5	63,66
10	38,17
20	22,51
30	17,94
40	15,15
50	13,26
75	10,36
91	9,09
100	8,68
125	7,78
150	6,86
175	6,22
182	6,03
200	5,63
225	5,11
250	4,63
274	4,13
275	4,12
300	3,54
325	2,99
350	2,38
355	2,25
365	1,90

Tabella 4.6: Curva di durata delle portate per la sezione di Castelletto Cervo (BI).

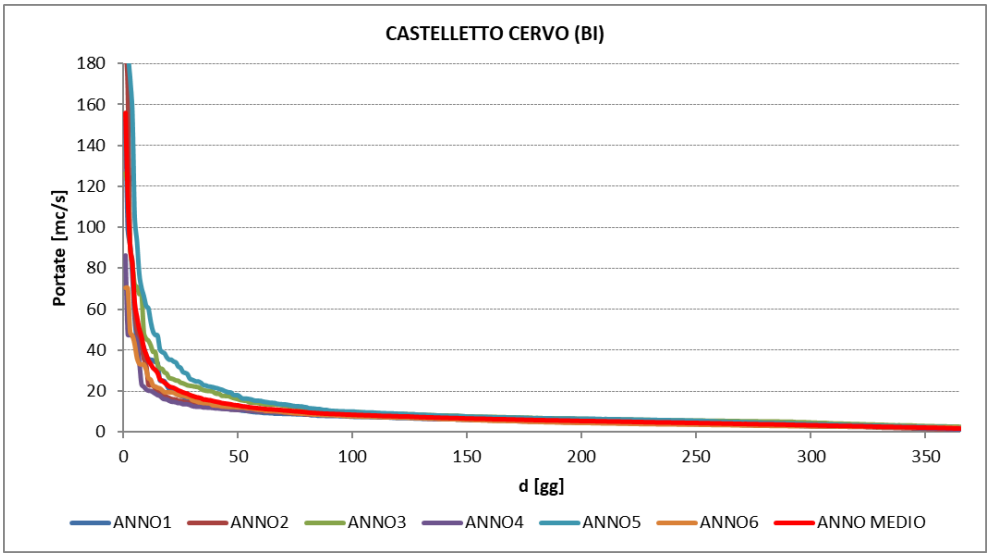


Figura 4.38: Curva di durata totale delle serie simulate per la sezione di Castelletto Cervo (BI).

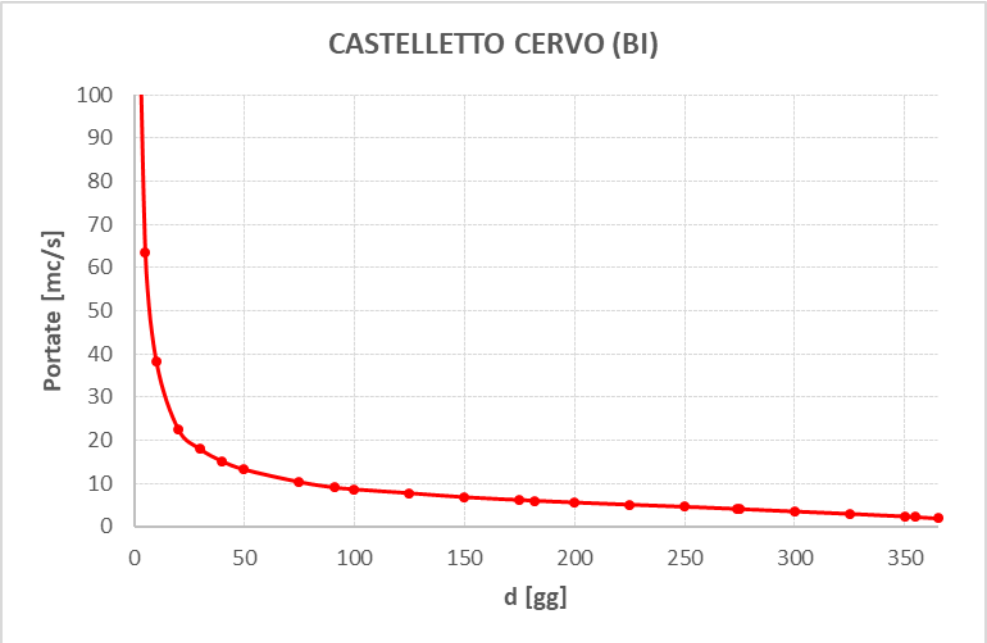


Figura 4.39: Curva di durata totale delle serie simulate per la sezione di Castelletto Cervo (BI).

4.3 Confronto con i deflussi valutati in base al PTA Regione Piemonte nella sezione non strumentata

Il PTA Regione Piemonte propone una procedura per la valutazione dei deflussi medi annuali, mensili e la stima della curva delle portate per qualsiasi sezione della rete idrografica dei bacini piemontesi a partire dai dati fisici e climatici di base mediante le cosiddette formule SIMPO, queste derivano dall'applicazione modelli statistici a regressione multipla sviluppate per l'intero bacino del Po e parzialmente ricalibrate sui bacini di interesse [51].

Le formule SIMPO sono state sviluppate differenziando il bacino padano in tre zone; il bacino idrografico di interesse, chiuso a Castelletto Cervo (BI) rientra nella cosiddetta Zona A, zona "alpina", comprendente tutti i bacini idrografici in sinistra e destra Po dal sistema Sarca-Mincio fino al sistema Tanaro-Bormida-Orba compreso [51]

Il primo elemento che è possibile dedurre dall'applicazione del PTA è il deflusso medio annuo. Ciò che occorre sono i valori di:

- S [kmq], la superficie del bacino;
- A [mm], afflusso medio annuo;
- H [m.s.l.m], altitudine media del bacino;
- q_{media} [l·(s·kmq)$^{-1}$], la portata media specifica (detta anche DS, deflusso medio annuo specifico)

La portata media specifica è ottenuta come:

$$(4.2)\ q_{meda} = 0{,}0086 \cdot H + 0{,}03416 \cdot A - 24{,}5694$$

La valutazione delle caratteristiche fisiche e climatiche del bacino idrografico in esame è stata fatta a partire dal DTM ritagliato intorno al bacino idrografico chiuso alla sezione del T. Cervo a Castelletto Cervo (BI) e a partire dalle serie

interpolate di precipitazione di ciascun HRU con cui è stata scomposta la stessa superficie di bacino.

Il primo è servito per la determinazione dell'altitudine media. Le seconde sono state manipolate allo scopo di determinare l'afflusso medio annuo per il periodo dei 6 anni di dati a disposizione su cui si è applicato il modello idrologico. Nel dettaglio ogni serie è stata cumulata anno per anno e, note le aree di ogni singolo HRU, si è fatta una media pesata. Il valore di afflusso medio annuo è il risultato del valor medio di queste medie pesate.

La tabella successiva **(**Tabella 4.7**)** raccoglie i dati fisico climatici estrapolati per la sezione dal PTA e gli altri dati a disposizione.

Superficie [kmq]	**Afflusso medio annuo [mm]**	**Altitudine media [m.s.l.m.]**	**Portata media specifica [l/(s·kmq)]**	**Portata media specifica [mc/s)]**
325	1554,66	767	35,13	11,42

Tabella 4.7: Valutazione della portata media specifica in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte.

I valori dei deflussi medi mensili sono determinabili una volta noti dal punto precedente l'altitudine media del bacino H [m.s.l.m.] ed il suo deflusso medio annuo specifico DS [l·(s·kmq)$^{-1}$]. Si riportano di seguito le relazioni (4.3), raccolte dall'estratto del PTA della Regione Piemonte [51], con le indicazioni valide per la zona A per la valutazione per il bacino idrografico chiuso alla sezione non strumentata di Castelletto Cervo (BI) dei deflussi medi mensili, q_i [l·(s·kmq)$^{-1}$]:

- $q_{gen} = 14{,}16232 - 0{,}00683 \cdot H + 0{,}36918 \cdot DS$
- $q_{feb} = 16{,}49263 - 0{,}00824 \cdot H + 0{,}37478 \cdot DS$
- $q_{mar} = 22{,}74646 - 0{,}01111 \cdot H + 0{,}46902 \cdot DS$
- $q_{apr} = 13{,}85406 - 0{,}01101 \cdot H + 1{,}15662 \cdot DS$
- $q_{mag} = -9{,}83665 + 0{,}00797 \cdot H + 1{,}63288 \cdot DS$

- $q_{giu} = -34{,}9228 + 0{,}02826 \cdot H + 1{,}62190 \cdot DS$
- $q_{lug} = -24{,}4942 + 0{,}02066 \cdot H + 1{,}04446 \cdot DS$
- $q_{ago} = -16{,}0687 + 0{,}00955 \cdot H + 0{,}95881 \cdot DS$
- $q_{set} = -13{,}0179 + 0{,}00232 \cdot H + 1{,}21272 \cdot DS$
- $q_{ott} = -4.54832 - 0{,}00479 \cdot H + 1{,}33784 \cdot DS$
- $q_{nov} = 16{,}50714 - 0{,}01604 \cdot H + 1{,}25843 \cdot DS$
- $q_{dic} = 18{,}06197 - 0{,}01030 \cdot H + 0{,}56036 \cdot DS$

Con i dati di Tabella 4.7 queste formule (4.3) sono state applicate al bacino di studio e hanno prodotto i risultati riepilogati di seguito (Tabella 4.8):

Codice	**Mese**	**Deflusso medio mensile PTA [l·(s·kmq)$^{-1}$]**	**Deflusso medio mensile PTA [mc/s]**
q_{gen}	Gennaio	21,89	7,12
q_{feb}	Febbraio	23,34	7,59
q_{mar}	Marzo	30,70	9,98
q_{apr}	Aprile	46,05	14,96
q_{mag}	Maggio	53,65	17,43
q_{giu}	Giugno	43,74	14,21
q_{lug}	Luglio	28,05	9,12
q_{ago}	Agosto	24,94	8,11
q_{set}	Settembre	31,37	10,20
q_{ott}	Ottobre	38,78	12,60
q_{nov}	Novembre	48,42	15,74
q_{dic}	Dicembre	29.85	9.70

Tabella 4.8: Valutazione dei deflussi medi mensili in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte.

La (Figura 4.40) traduce i risultati delle elaborazioni di (Tabella 4.8) nel diagramma dei deflussi medi mensili per il bacino idrografico oggetto di studio chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) valutati con le indicazioni del PTA della Regione Piemonte.

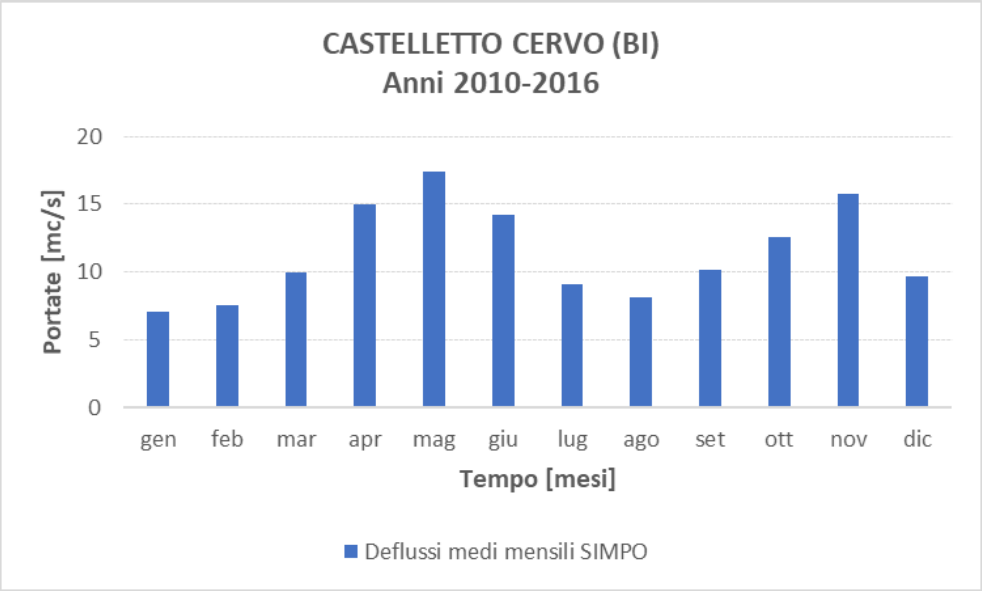


Figura 4.40: Deflussi medi mensili in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte.

In base ai risultati ottenuti dall'applicazione delle indicazioni del PTA della Regione Piemonte al bacino idrografico oggetto di studio il deflusso medio annuo è pari a 9,10 [mc/s].

La Figura 4.41, riportata in calce, raccoglie i risultati delle elaborazioni del modello idrologico realizzato con l'applicazione del sistema *GEOframe-NewAGE* (Figura 4.18) e li confronta con i risultati di Figura 4.41. In blu sono i deflussi medi mensili prodotti dal modello mentre in rosso sono i deflussi ottenuti applicando le indicazioni contenute all'interno del PTA della Regione Piemonte:

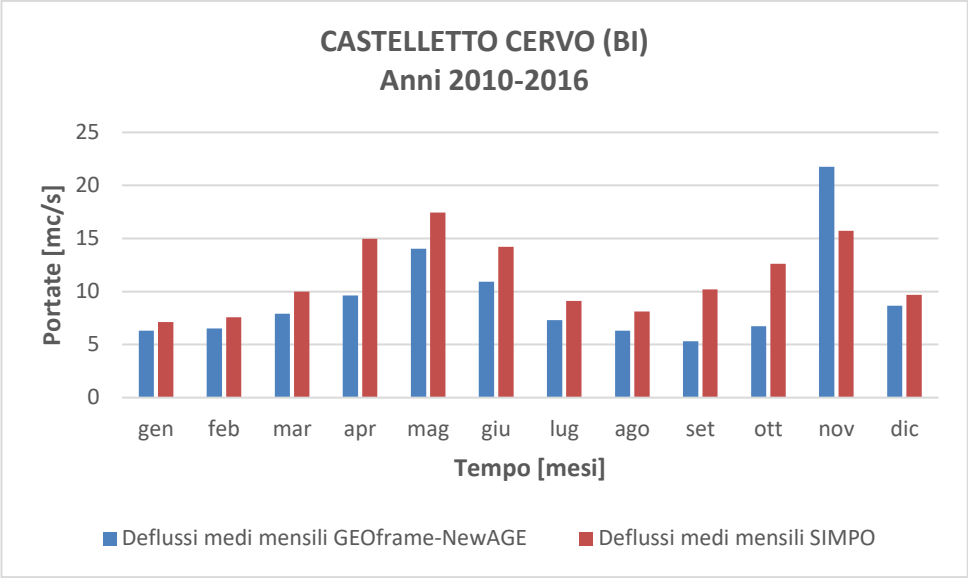


Figura 4.41: Confronto tra i deflussi medi mensili generati dal modello realizzato con il sistema *GEOframe-NewAGE* (in blu) e quelli ricavati con l'applicazione delle indicazioni del PTA della regione Piemonte (in rosso) per la sezione di Castelletto Cervo (BI).

I due metodi riproducono allo stesso modo l'andamento dei deflussi medi mensili con i mesi dell'anno; i mesi di picco e i mesi di minimo infatti coincidono. Prendendo singolarmente i valori di deflusso medio mensile individuati da tutte e due i metodi si osserva che il metodo di regionalizzazione tende ad una sovrastima fatta eccezione per il mese di Novembre dove si registra la differenza più marcata con i deflussi valutati con l'applicazione del modello idrologico; solo in questo caso il modello idrologico sovrastima il risultato ottenuto per lo stesso mese con il metodo del PTA. Queste differenze si notano anche nel momento in cui si confrontano i valori di deflusso medio annuale: il modello idrologico converge a un valore di deflusso medio annuo di circa 9,20 mc/s, mentre le formule SIMPO hanno prodotto un risultato più alto pari a 11,20 mc/s. In questo modo risulta evidente come il modello idrologico sia riuscito a differenziare con una maggiore sensibilità la distribuzione dei deflussi medi mensili per i 6 anni di periodo di studio, mentre il risultato ottenuto con le formule di regionalizzazione risulta essere più omogeneo.

C'è da sottolineare, infatti, come le due metodologie siano differenti: l'applicazione del metodo contenuto all'interno del PTA della Regione Piemonte parte da elementi di caratterizzazione climatica e idrologica fondati su dati raccolti presso le stazioni del SIMN nel periodo 1951-1991 e utilizza formule di regionalizzazione, testate su una simulazione idrologica calcolata per il periodo 1999-2002, per una rappresentazione delle caratteristiche dei deflussi che sia il più omogenea possibile e sviluppata su ambiti predefiniti [51]. Mentre i risultati ottenuti dal modello idrologico impiegato in questa trattazione provengono invece dalla elaborazione di serie storiche di misura per il periodo specifico delle stazioni Arpa Piemonte incidenti e limitrofe (nel caso delle stazioni metereologiche e pluviometriche tali da comporre un reticolo chiuso) il bacino del T. Cervo; tutto ciò, anche se potrebbe risentire del grado di affidabilità delle scale di deflusso impiegate sui livelli misurati per la valutazione del valore di portata che passa per la sezione strumentata, parte comunque da una modellazione dei contributi nivologici e delle caratteristiche fisico climatiche del bacino le quali restituiscono dei risultati che meglio aderiscono alle sue caratteristiche pedemontane. In entrambi i casi non c'è una modellazione delle opere di prelievo e restituzione presenti lungo il corso del T. Cervo ma i dati appartenenti alle serie storiche di misura impiegati nel modello di questo elaborato, a differenza dei pochi parametri fisico-climatici necessari per l'applicazione del PTA sullo stesso periodo, risentono inevitabilmente della presenza delle stesse.

Lo stesso estratto dal PTA [51] riporta le relazioni, valide per la zona A, per il calcolo della curva di durata delle portate. I valori caratteristici della CDP sono quindi determinabili una volta noti dai punti precedenti la superficie S [kmq] del bacino ed il suo deflusso medio annuo specifico DS [l·(s·kmq)$^{-1}$]. Con i dati di Tabella 4.7 queste formule, riepilogate di seguito (4.4), sono state applicate al bacino di studio chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI):

- Q_{10} [l·(s·kmq)$^{-1}$], portata corrispondente ad una durata di 10 gg

$$Q_{10} = 5{,}06749 \cdot S^{-0{,}057871} \cdot DS^{0{,}965037}$$

- Q_{91} [l·(s·kmq)$^{-1}$], portata corrispondente ad una durata di 91 gg

$$Q_{91} = 1{,}29772 \cdot S^{0{,}009539} \cdot DS^{0{,}976926}$$

- Q_{182} [l·(s·kmq)$^{-1}$], portata corrispondente ad una durata di 182 gg

$$Q_{182} = 0{,}54425 \cdot S^{0{,}049132} \cdot DS^{0{,}980315}$$

- Q_{274} [l·(s·kmq)$^{-1}$], portata corrispondente ad una durata di 274 gg

$$Q_{274} = 0{,}18670 \cdot S^{0{,}069105} \cdot DS^{1{,}108675}$$

- Q_{355} [l·(s·kmq)$^{-1}$], portata corrispondente ad una durata di 355 gg

$$Q_{355} = 0{,}07560 \cdot S^{0{,}068232} \cdot DS^{1{,}234733}$$

La Tabella 4.9 contiene l'esito dell'applicazione delle formule del PTA al bacino oggetto di studio per il calcolo della curva di durata delle portate.

Codice	Durata [gg]	Portata PTA [l·(s·kmq)$^{-1}$]	Portata PTA [mc/s]
Q_{10}	10	112,49	36,56
Q_{91}	91	44,38	14,42
Q_{182}	182	23,69	7,70
Q_{274}	274	14,40	4,68
Q_{355}	355	9,09	2,95

Tabella 4.9: Valutazione della curva di durata delle portate in base alle indicazioni del PTA Regione Piemonte.

La Figura 4.42 traduce i risultati delle elaborazioni di Tabella 4.9 nel diagramma di punti della curva di durata delle portate per il bacino idrografico oggetto di studio chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) valutata con le indicazioni del PTA della Regione Piemonte. La figura contiene anche l'equazione della loro retta interpolante.

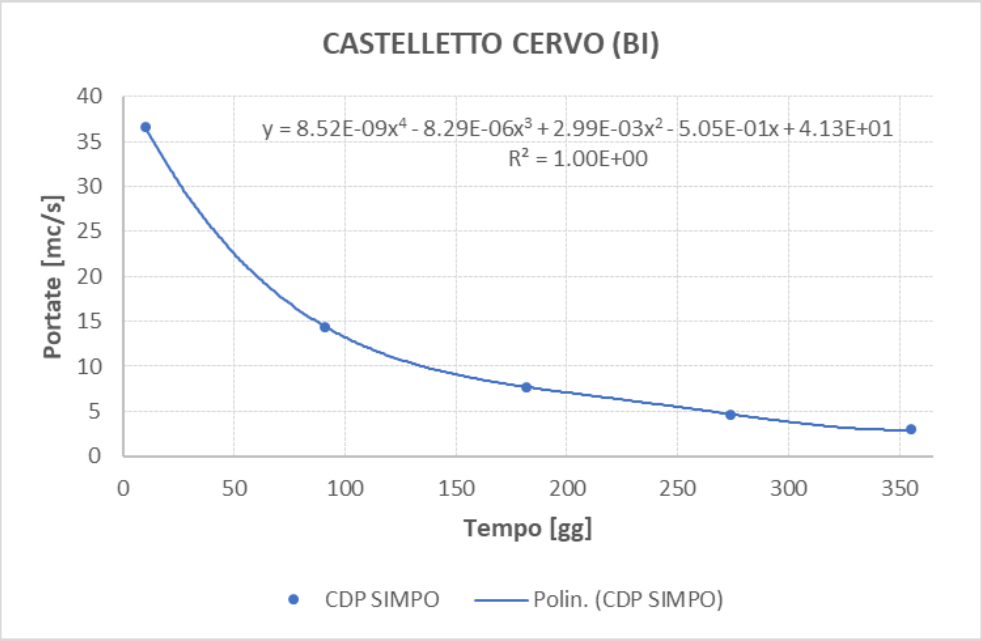


Figura 4.42: CDP per il bacino chiuso a Castelletto Cervo valutata con le indicazioni contenute all'interno del PTA della Regione Piemonte.

La retta interpolante consente la determinazione dei valori di CDP anche per gli altri gg e il confronto con i risultati del modello idrologico di questo elaborato ottenuto con l'applicazione del sistema *GEOframe-NewAGE*.

La Tabella 4.10 e la Figura 4.43 contengono tutti gli elementi per il confronto delle curve di durata delle portate ottenute con l'applicazione dei due metodi differenti.

d [gg]	CDP *GEOframe-NewAGE* [mc/s]	CDP *PTA Regione Piemonte* [mc/s]
1	156,06	40,82
5	63,66	38,87
10	38,17	36,56
20	22,51	32,35
30	17,94	28,64
40	15,15	25,39
50	13,26	22,55
75	10,36	17,01
91	9,09	14,42
100	8,68	13,23
125	7,78	10,73
150	6,86	9,08
175	6,22	7,94
182	6,03	7,67
200	5,63	7,05
225	5,11	6,24
250	4,63	5,41
274	4,13	4,56
275	4,12	4,52
300	3,54	3,66
325	2,99	2,95
350	2,38	2,71
355	2,25	2,61
365	1,9	2,60

Tabella 4.10: Confonto tra le curve di durata delle portate ottenute con i due metodi per la sezione di Castelletto Cervo (BI).

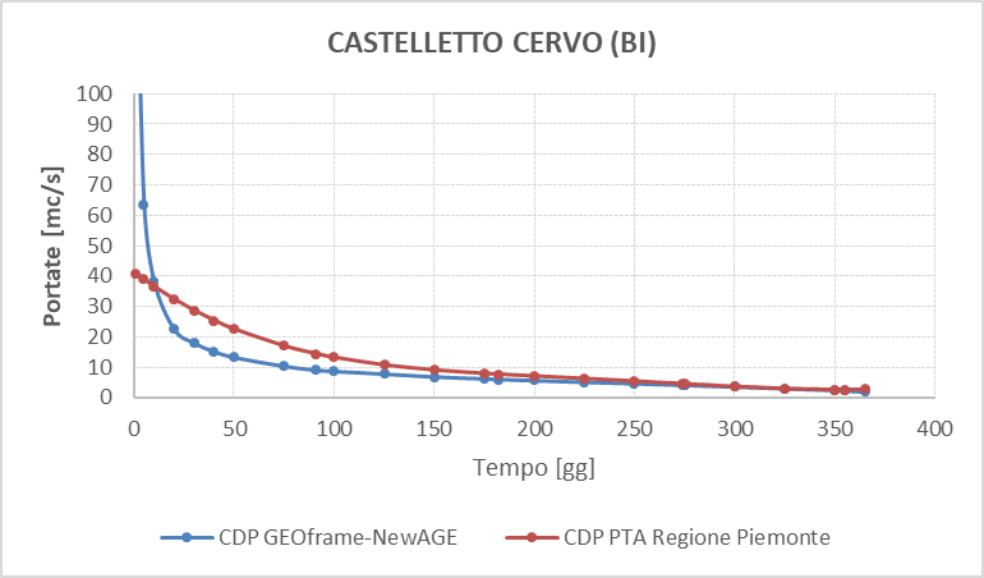


Figura 4.43: Confonto tra le curve di durata delle portate ottenute con i due metodi per la sezione di Castelletto Cervo (BI). In blu la CDP ottenuta con il modello *GEOframe-NewAGE*, in rosso la CDP ottenuta con l'applicazione delle indicazioni contenute nel PTA della Regione Piemonte.

Anche in questo caso valgono le considerazioni fatte in precedenza per i due metodi nel momento in cui si sono confrontati i deflussi medi mensili che possono essere riassunte nella diversa tipologia di modello impiegato. Il diagramma di confronto esalta l'uniformità di risultato ottenuto dall'applicazione delle indicazioni contenute all'interno PTA e le mette in contrasto con l'andamento più sensibile della curva di durata ottenuta dalla serie generata dal modello. La principale differenza è che la prima è il risultato di un metodo di regionalizzazione applicato alla sola superficie di bacino chiusa alla sezione di Castelletto Cervo (BI) mentre la seconda deriva da una elaborazione più complessa, ovvero la generazione di una serie di deflussi nella stessa sezione ma a partire da valori di ottimo che tengono conto della calibrazione fatta tra le serie generate dal modello e le serie di misura nelle sezioni delle cinque stazioni idrometriche che incidono su tutto il bacino del T. Cervo e tiene dunque conto di una loro correlazione. Se la curva di durata delle portate originata con il modello riesce ad esaltare queste differenze per i valori di portata più alti allo stesso tempo, come il risultato

dovuto all'applicazione del PTA, non riesce a cogliere con lo stesso grado di sensibilità i deflussi dei mesi di magra i quali subiscono in questi periodi le fluttuazioni dovute alla presenza delle opere di presa e di restituzione che incidono sull'asta del T. Cervo.

CONCLUSIONI

La trattazione ha affrontato il problema della determinazione di una serie di deflussi del T. Cervo nella sezione non strumentata di Castelletto Cervo (BI), con la quale costruire la curva di durata delle portate da impiegarsi per la valutazione della disponibilità della risorsa idrica, attraverso l'impiego e l'assemblaggio di componenti del sistema *GEOframe-NewAGE* per la costruzione di un modello idrologico di tipo concettuale a parametri semi distribuiti.

Il bacino idrografico di studio è stato suddiviso in singole unità, schematizzate a loro volta in un sistema di invasi, connesse dal modello il quale ha risolto il bilancio dei livelli in cui sono state scomposte dopo aver ottimizzato i parametri in corrispondenza di stazioni idrometriche strumentate.

Questa organizzazione della singola unità in cinque livelli (uno per lo strato nevoso; uno per la copertura della vegetazione; uno per il livello sotto superficiale; uno per il livello profondo e uno per il ruscellamento superficiale) ha consentito la riproduzione di una risposta idrologica che tenesse conto dei contributi di apporto dovuti allo scioglimento della neve, tipiche dei bacini a ridosso delle catene montuose, e quelli dovuti al flusso profondo, ma ha anche messo in conto le naturali perdite dovute alle fronde della vegetazione e le richieste da parte del suolo.

In un primo momento si è fatta coincidere l'area di studio con quella sottesa dal bacino idrografico chiuso in corrispondenza della sezione non strumentata di Castelletto Cervo (BI), successivamente si è estesa più a valle sino a comprendere la sezione strumentata di Quinto Vercellese collocata quasi in prossimità della confluenza del T. Cervo con il fiume Sesia. La scelta di estendere la superficie di studio si è rivelata quella ottimale per lo studio del contributo degli HRU compresi tra la sezione non strumentata e le stazioni idrometriche di Passobreve, Vigliano e Strona Cossato perché è stato

possibile assegnare loro dei parametri che siano stati il risultato di una calibrazione.

Gli strumenti a disposizione del sistema *GEOframe-NewAGE* hanno consentito l'implementazione dell'estensione della superficie di studio ed i risultati qui proposti presentano il set up della soluzione che con il minimo costo computazionale ha prodotto gli esiti contenuti in questa trattazione.

Questi sono il risultato della elaborazione, all'interno del modello, di un totale di 6 anni consecutivi di dati orari che comprendono le misure di precipitazione, temperatura e livello idrometrico registrate dalle stazioni Arpa Piemonte che rilevano direttamente sopra o intorno il bacino del T. Cervo. Il database a disposizione, che copre il periodo di dati che intercorre tra il 1 Ottobre 2010 e il 30 Settembre 2016, si è diviso in 3 anni di calibrazione e 3 anni di validazione. Il primo set, che copre il periodo che va dall'Ottobre del 2010 al Settembre del 2013, è stato utilizzato per ricavare i valori dei parametri del modello mentre l'altra metà del database è stata impiegata come ambiente dove generare le serie di deflusso per la validazione. In entrambi i casi l'aderenza tra le serie di deflusso generate dal modello e le serie misurate dalle stazioni idrometriche è stata valutata con la funzione obiettivo KGE.

Il modello, sia per la fase di calibrazione che per quella di validazione, ha ottenuto delle performance migliori in corrispondenza delle stazioni idrometriche che seguono l'asta principale del T. Cervo ovvero le stazioni di Passobreve, Vigliano e Quinto Vercellese. Per il periodo di calibrazione, il modello ha restituito un valore di 0,8 della funzione obiettivo KGE per la stazione di Passobreve e dei valori compresi tra 0,9 e 0,95 per le stazioni di Vigliano e Quinto Vercellese. I risultati, che migliorano seguendo il percorso del T. Cervo da monte verso valle, dimostrano come sia stata ottimale la scelta di calibrare i bacini in sequenza fissando sempre i parametri di ottimo ottenuti nella calibrazione della stazione idrometrica di monte prima di passare a quella successiva di valle. Infine, la disposizione delle stesse stazioni idrometriche lungo l'asta e, per quel che riguarda il set up del modello, la scomposizione del bacino idrografico in un numero ottimale di HRU che

riescono ad aderire all'andamento delle caratteristiche topografiche del bacino, hanno contribuito al risultato ottenuto.

Sono invece di qualità poco inferiore i risultati ottenuti per i due principali tributari del T. Cervo, il T. Strona e il T. Elvo. Questi hanno ottenuto per il periodo di calibrazione dei valori di funzione obiettivo KGE dell'ordine di 0,7. Ciò è dovuto alla presenza di una sola stazione idrometrica per ciascuna asta e ad una scomposizione dei due sottobacini in un numero sufficiente di unità ma non così fitto da seguire l'andamento delle caratteristiche topografiche dei loro sotto bacini con lo stesso grado di dettaglio che si è ottenuto per il T. Cervo. Tale scomposizione è stata l'unica a conciliare l'esigenza di estendere la superficie di studio con i costi computazionali di processamento della piattaforma con cui si è realizzato il modello idrologico tuttavia, la calibrazione delle porzioni del T. Strona e del T. Elvo in sequenza con le altre più numerose del T. Cervo ha contribuito al risultato ottenuto a Quinto Vercellese. Collocata più a valle di tutte le stazioni presenti sull'intero bacino idrografico del T. Cervo, la stazione idrometrica di Quinto Vercellese raccoglie infatti gli esiti delle parametrizzazioni ottenute in corrispondenza di tutte le altre quattro stazioni quindi si può ritenere buona anche la modellazione dei sotto bacini del T. Strona e del T. Elvo.

La valutazione per il periodo di validazione ha restituito per tutte e cinque le stazioni dei risultati simili o poco inferiori a quelli ottenuti per il periodo di calibrazione. Ciò sotto intende una inferiore, ma attesa, aderenza tra le serie misurate e le serie simulate rispetto al periodo di calibrazione conseguente ad un impiego di parametri che sono stati ottimizzati per solo il periodo di calibrazione.

Infine, in generale, alcune incertezze nei risultati ottenuti per entrambi i periodi potrebbero risentire delle scale di deflusso delle stazioni strumentate necessarie per il passaggio dal dato di altezza idrometrica a quello di portata.

Il modello è riuscito a replicare il decorso stagionale tipico dei bacini idrografici dalle caratteristiche pedemontane come quello del T. Cervo

ovvero le portate più alte dei mesi di Maggio e Novembre e i periodi siccitosi nella stagione estiva e nei mesi invernali.

L'elaborazione è stata compiuta senza una modellazione diretta delle opere di presa antropiche ad uso agricolo e idroelettrico disposte sul T. Cervo che prelevano a monte della sezione di Castelletto Cervo (BI); anche se i dati appartenenti alle serie idrometriche di misura impiegati nel modello di questa trattazione risentono inevitabilmente della presenza delle stesse, i risultati ottenuti nella sezione non strumentata non sono quindi da intendersi come la parte residuale di questi prelievi, i quali incidono notevolmente sul regime del corso d'acqua nel periodo estivo ma, sicuramente, consistono in una base di partenza in grado di riprodurre i deflussi naturali del torrente e di fornire gli strumenti per la valutazione della risorsa idrica disponibile.

I risultati ottenuti dal modello di questa trattazione realizzato con il sistema *GEOframe-NewAGE* sono infine stati confrontati con i risultati ottenuti dall'applicazione, per lo stesso bacino idrografico chiuso a Castelletto Cervo (BI) e per lo stesso periodo, del metodo di regionalizzazione che impiega le formule SIMPO contenuto all'interno del PTA della Regione Piemonte. Se l'applicazione del primo fonda su una elaborata modellazione dei processi climatici ed idrologici e sulla generazione di una serie di deflussi nella stessa sezione a partire da valori di ottimo che tengono conto della calibrazione fatta tra le serie generate dal modello e le serie di misura delle cinque stazioni idrometriche che incidono su tutto il bacino del T. Cervo, tenendo dunque conto di una correlazione tra le stazioni idrometriche, l'applicazione delle formule SIMPO si basa invece su elementi di caratterizzazione fisica, climatica ed idrologica più speditivi per una rappresentazione delle caratteristiche dei deflussi che sia il più omogenea possibile e sviluppata su ambiti predefiniti. Tutto ciò ha inciso sui due risultati; dal confronto è emersa una distribuzione più omogenea dei deflussi nel corso dei mesi dell'anno e una tendenza alla sovrastima nel caso dell'applicazione delle formule SIMPO mentre l'applicazione del modello idrologico, per lo stesso periodo, ha determinato un valore di deflusso medio annuo pari a 9,20 mc/s, minore dei 11,20 mc/s ottenuti con il metodo di regionalizzazione, ed una oscillazione

dei deflussi medi mensili più sensibile alle variazioni stagionali tipiche del bacino di caratteristiche pedemontane.

Dal confronto è inoltre emerso che per entrambe le metodologie si è rivelata problematica una riproduzione dei deflussi nei periodi di magra estivi tale da tenere conto degli effetti delle opere di presa irrigue esistenti lungo il corso d'acqua prima della sezione di interesse di Castelletto Cervo (BI). Per questo motivo rientra negli sviluppi meritevoli di prossimo approfondimento l'implementazione delle opere di presa e di derivazione che incidono sul T. Cervo all'interno del modello idrologico realizzato con *GEOframe-NewAGE* di questa trattazione e il confronto con altri modelli che tengano in conto queste caratteristiche.

BIBLIOGRAFIA

[1] U. G. Survey, «USGS: Il ciclo dell'acqua,» [Online]. Available: https://water.usgs.gov/edu/watercycleitalian.html.

[2] R. Grayson e B. Gunther, «Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modelling,» *Cambridge University Press,* 2000.

[3] R. Rigon, «OMSGeoframe,» [Online]. Available: http://geoframe.blogspot.com/.

[4] R. Rigon, «JGrass New Age system essentials,» 2017. [Online]. Available: https://www.slideshare.net/GEOFRAMEcafe/3-j-grassnewage?qid=8b222c55-93a5-40f6-ac73-3476da321a6c&v=&b=&from_search=51.

[5] A. Antonello e S. Franceschi, «HydroloGIS Enviromental Engeneering,» 2018. [Online]. Available: https://www.hydrologis.com/home.

[6] G. Formetta, A. Antonello, S. Franceschi, O. David e R. Rigon, «Hydrological modelling with components: A GIS-based open-source framework.,» *Enviromental Modelling & Software,* n. 55, pp. 190-200, 2014.

[7] G. Formetta, R. Mantilla, A. Antonello, S. Franceschi e R. Rigon, «The JGrass-NewAge system for precasting and managing the hydrological budgets at the basin scale: model of flow generation and propagation/routing,» *Geoscientific Model Development,* vol. 4, n. 4, pp. 943-955, 2011.

[8] M. L. Bancheri, *A flexible approach to the extimation of water budgets and its connection to the travel time theory,* Trento: Università di Trento, 2017.

[9] M. Clark, B. Nijssen, J. Lundquist, D. Kavetski e e. al, «A unified approach for process-based hydrologic modeling:1. Modeling concept,» *Water Resources Research,* n. 51, pp. 2498-2514, 2015.

[10] R. Hock, «A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation,» *Journal of Glaciology,* n. 45, pp. 101-111, 1999.

[11] D. Kavetski e F. Fenicia, «Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modelling: 2. Application and experimental insights,» *Water Resources Resarch,* n. 47, 2011.

[12] N. Earth Observation System, «MODIS Moderate Resolution Imaging Spectoradiometer,» [Online]. Available: https://modis.gsfc.nasa.gov/about/.

[13] A. Rutter, K. Kershawn, P. Robins e A. Morton, «A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine,» *Agricultural Meteorology,* n. 9, pp. 367-384, 1971.

[14] F. Valente, J. David e J. Gash, «Modelling Interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models,» *Journal of Hydrology,* n. 190, pp. 141-162, 1997.

[15] R. Dickinson, «Modelling evapotraspiration for three-dimensional global climate models,» *Climate processes and climate sensitivity,* pp. 58-72, 1984.

[16] R. Moore, «The probability-distrbuited principle and run off production at point and basin scales,» *Hydrological Science Journal,* n. 30, pp. 273-297, 1985.

[17] D. Boyle, «Multicriteria calibration of hydrologic models,» *Calibration of watershed models,* vol. 6, n. 10, 2003.

[18] u. Developers, «uDig (user-friendly Desktop Internet GIS),» [Online]. Available: http://udig.refractions.net/.

[19] O. David, «A software engeneering perspective on enviromental modeling framework design: The Object Modeling System,» *Enviromental Modelling & Software,* n. 39, pp. 201-213, 2013.

[20] M. Bancheri, M. Bottazzi, D. Della Torre, F. Serafin e N. Tubini, «GEOframe Components OMS Projects,» GitHub, 2018. [Online]. Available: https://github.com/GEOframeOMSProjects.

[21] R. Rigon, E. Ghesla, C. Tiso e C. A, «The HORTON machine: a system for DEM analysis. The Reference manual,» [Online]. Available: http://www.ing.unitn.it/dica/tools/download/Quaderni/Horton%20manual.pdf.

[22] S. Franceschi, L. Perathoner, T. M e G. Formetta, «Analisi Idro-Geomorfologica con i JGrasstools e le Horton Machine,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/SlidesIdrologia/p-horton-machine-46482173.

[23] O. O. M. System, «OMS3 Download,» 2016. [Online]. Available: https://alm.engr.colostate.edu/cb/proj/doc.do?page=2&doc_id=17899.

[24] Groovy, «A multi-faceted language for the Java platform,» 2018. [Online]. Available: http://groovy-lang.org/.

[25] R. Rigon e M. L. Bancheri, «Introduzione all'uso della Console di OMS e di QGis,» 2017. [Online]. Available: https://www.slideshare.net/SlidesIdrologia/introduzione-alluso-della-console-di-oms-e-di-qgis-per-le-analisi-del-corso-di-idrologia-universit-di-trento-2017.

[26] M. Bancheri, M. Bottazzi, D. Della Torre, F. Serafin e N. Tubini, «GEOframe: Components Development,» GitHub, 2018. [Online]. Available: https://github.com/geoframecomponents.

[27] M. L. Bancheri e G. Formetta, «JGrass-New Age: Krigings component,» 2017. [Online]. Available: https://osf.io/k8aw7/.

[28] M. L. Bancheri e G. Formetta, «JGrass-NewAge: SWRB component,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-swrb.

[29] J. G. Corripio, «Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modelling in mountainous terrain,» *International Journal of Geographical Information Science,* vol. 1, n. 17, pp. 1-23, 2003.

[30] M. L. Bancheri e G. Formetta, «JGrass-New Age: LWRB component,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-longwave-radiation-balance.

[31] G. Formetta, M. Bancheri, O. David e R. Rigon, «Site Specific parameterizations of longwave radiation,» *Hydrology and Earth System Sciences Discussions,* pp. 1-22, 2016.

[32] F. G. Bancheri Maria Laura, «JGrass-NewAge: NetRadiation component,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-longwave-radiation-balance.

[33] M. L. Bancheri, «JGrass-New Age: ET Component,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-et-component.

[34] C. &. T. Prietsley, «On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters,» *Monthly Weather Review,* vol. 2, n. 100, pp. 81-92, 1972.

[35] M. L. Bancheri e G. Formetta, «JGrass-NewAge: Rain Snow Separation,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-rainsnow-separation.

[36] M. L. Bancheri e G. Formetta, «JGrass-NewAge: Snow Component,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-snow-component.

[37] M. L. Bancheri, «JGrass-New Age: Water Budget,» 2016. [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-water-budget.

[38] U. Geological Survay Home Page, «Multiple-Objective Stepwise Calibration Using Luca,» [Online]. Available: https://pubs.usgs.gov/of/2006/1323/pdf/OF06-1323_508.pdf.

[39] G. Formetta, D. Olaf e R. Rigon, «Model Calibration Algorith in the NewAge-JGrass System,» 2016. [Online]. Available: https://alm.engr.colostate.edu/cb/displayDocument/Formetta_OMS_SummerSchool_2016.pdf?doc_id=24493.

[40] Duan, Gupta e al., «Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization,» *Journal of optimization theory and applications,* vol. 3, n. 76, pp. 501-521, 1993.

[41] H. Gupta, H. Kling, K. Yilmaz e G. Martinez, «Decomposition of the mean squared error and NSE performed criteria,» *Journal of Hydrology,* n. 377, pp. 80-91, 2009.

[42] R. Piemonte, «Regione Piemonte: Area Idrografica 18-Torrente Cervo,» [Online]. Available: http://www.regione.piemonte.it/ambiente/acqua/dwd/PTA/b_monografie/b1_aree_idrogr/AI18_cervo.pdf.

[43] G. P. Piemonte, «ALLESTIMENTO CARTOGRAFICO DI RIFERIMENTO BDTRE 2018 B/N 1:10.000,» [Online]. Available: http://www.geoportale.piemonte.it/cms/bdtre/16-bdtre.

[44] A. Piemonte, «ARPA Piemonte Accesso Richiesta Dati,» [Online]. Available: http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/Richieste-dati-formato-standard/richiesta-dati/Richiesta-automatica/Dati-giornalieri-richiesta-automatica.html.

[45] A. Piemonte, «Annali Metereologici ed idrologico: Banca Dati Idrologica,» Arpa Piemonte, [Online]. Available: https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html.

[46] C. F. d. V. d'Aosta, «Centro Funzionale della Valle d'Aosta Richiesta Dati,» [Online]. Available: http://cf.regione.vda.it/richiesta_dati.php.

[47] QGIS, «QGIS: Un Sistema di Informazione Geografica Libero e Open Source,» [Online]. Available: https://www.qgis.org/it/site/.

[48] R. Piemonte, «GEOPortale Regione Piemonte,» [Online]. Available: http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/.

[49] B. Efron, The jackknife, the bootstrap and other resampling plans. vol.3, SIAM, 1982.

[50] G. McCartthy, «The unit hydrograph and flood routing,» in *Conf. North Atlantic Div., US Army Corps Eng.*, New London, 1938.

[51] R. P. D. R. Idriche, «Piano di Tutela delle Acque Elaborato I.c/1,» [Online]. Available: http://www.regione.piemonte.it/ambiente/acqua/dwd/PTA/e_allegati_tecnici/I/Ic01.pdf.

[52] G. Formetta, R. Rigon, J. Chàvez e O. David, «Modelling shortwave radiation using the JGrass-NewAge system,» *Geoscientific Model Development Discussion,* vol. 4, n. 6, pp. 915-928, 2013.

[53] M. L. Bancheri e G. Formetta, «JGrass-NewAge: LWRB component,» [Online]. Available: https://www.slideshare.net/marialaurabancheri/jgrassnewage-longwave-radiation-balance.

[54] A. W. Wuletawu, *Modelling water budget at a basin scale using JGrass-NewAge system.*

[55] S. Tasin, *Modellazione di portate idriche nei bacini alpini con JGrass-NewAge,* Trento, 2015-2016.

[56] A. Antonello e F. S, «HydroloGIS Enviromental Engeneering,» 2018. [Online]. Available: https://www.hydrologis.com/home.

[57] Wikipedia, «Torrente Cervo,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Cervo_(torrente).

A. ALLEGATI: TAVOLE PER UN ANNO DI CALIBRAZIONE

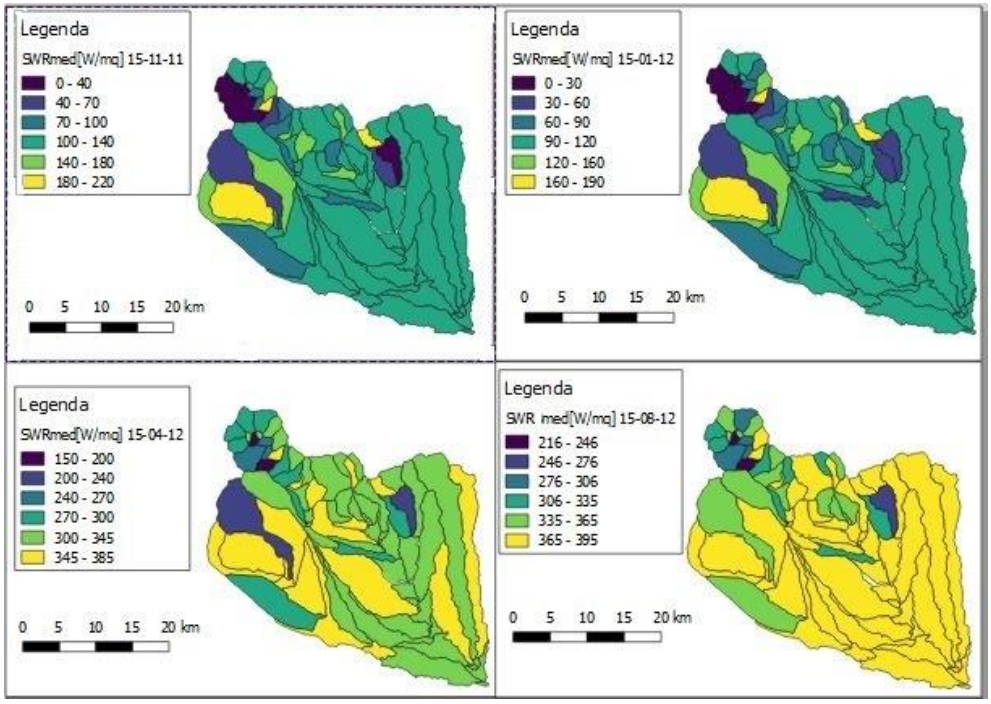
L'allegato contiene alcune tavole di distribuzione di alcuni parametri fisico-climatici risultato dell'applicazione del modello idrologico sulle porzioni in cui è stato scomposto il bacino del T. Cervo chiuso alla sezione di Quinto Vercellese. Le grandezze rappresentate in 4 giorni campione appartenenti all'anno idrologico di calibrazione che va dal 01/10/2011 al 30/09/2012 sono: la radiazione solare ad onda corta media giornaliera [W/m^2]; l'evapotraspirazione reale (ottenuta sommando l'evaporazione dalla canopy e l'evapotraspirazione dalla root zone) [mm/d] e una tavola di dettaglio per il contributo di Snow Water Equivalent [mm] individuato per il bacino chiuso in corrispondenza della sezione di Castelletto Cervo (BI). Completano l'allegato gli idrogrammi ottenuti in corrispondenza delle cinque sezioni di interesse e due monografiche sugli afflussi medi annui e sui deflussi medi annuali individuati per i sotto bacini chiusi in corrispondenza delle stazioni idrometriche e della sezione non strumentata.

La tabella di seguito riepiloga per l'anno idrologico scelto i valori di afflusso medio annuo individuati per i sotto bacini chiusi nelle sezioni di interesse:

Anno idrologico 2011-2012	
Afflusso medio annuo [mm]	
T. Cervo a Passobreve Cervo	1505,44
T. Cervo a Vigliano Cervo	1450,10
T.Cervo a Castelletto Cervo (BI)	1333,24
T. Cervo a Quinto Vercellese	1105,80
T. Strona a Strona Cossato	1458,28
T. Elvo a Elvo Carisio	1196,6

Allegato A.1: Afflusso medio annuo

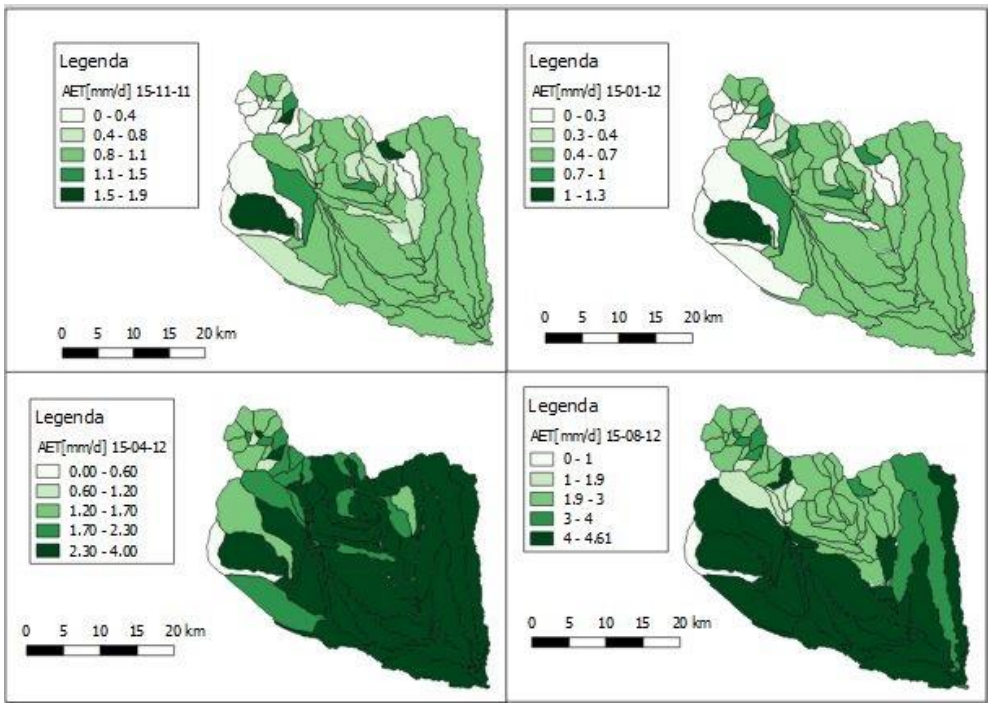
La prossima figura rappresenta l'andamento della radiazione solare ad onda corta in quattro giorni differenti; questa raggiunge il suo picco nei mesi estivi e si distribuisce nei punti del bacino idrografico a seconda della esposizione e della visibilità disponibile, i punti più esposti in piana raccolgono i valori più alti nel corso dell'anno rispetto a quelli che si collocano nei versanti che raccolgono più o meno radiazione solare a seconda della loro orientazione. La distribuzione in figura è comunque condizionata dall'ordine di dettaglio con cui sono state scomposte le parti del bacino per la loro implementazione all'interno del modello.



Allegato A.2: Distribuzione della radiazione solare giornaliera sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012.

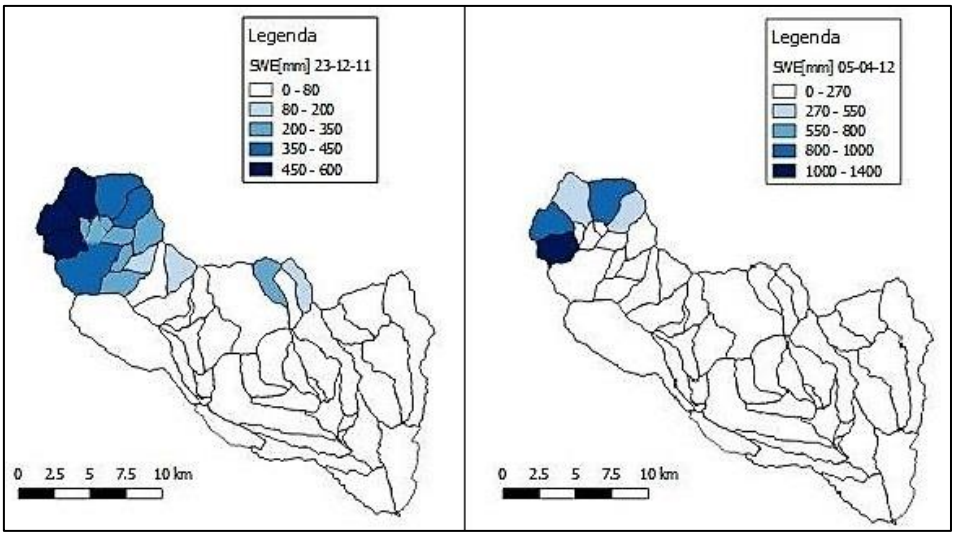
Il modello idrologico non solo simula la generazione dei deflussi dai versanti per la stima delle portate in corrispondenza dei punti di interesse ma utilizza la distribuzione della radiazione solare per la stima dell'evapotraspirazione potenziale e sfrutta l'organizzazione in più layer per la determinazione delle

quote parti di perdita dovute alla reale evapotraspirazione. La figura di seguito campiona i risultati di evapotraspirazione reale per le porzioni in cui è stato scomposto il bacino per l'implementazione all'interno del modello, Come per la radiazione solare l'evapotraspirazione raggiunge i suoi picchi in corrispondenza della stagione estiva.



Allegato A.3: Distribuzione della evapotraspirazione reale sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012.

L'organizzazione in cinque livelli differenti ha concesso l'implementazione all'interno del modello del contributo dovuto allo scioglimento nivale. La prossima tavola di dettaglio per il bacino di studio chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) fotografa due momenti differenti, il primo rappresenta la fase di accumulo in pieno Febbraio e l'altro coinvolge la fase di fusione in Aprile.



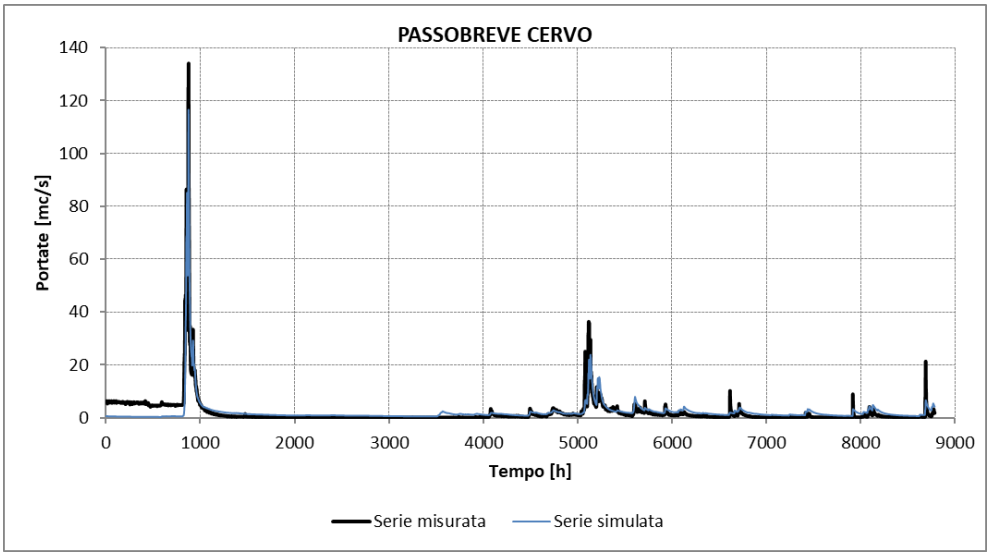
Allegato A.4: Tavola di dettaglio di distribuzione dello SWE sul bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) per due giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012.

La tabella in calce rileva i valori di deflusso medio annuo individuati nelle sezioni di interesse per l'anno idrologico scelto e confronta i risultati ricavati dall'applicazione del modello con i valori che si possono estrapolare dalle serie di misura.

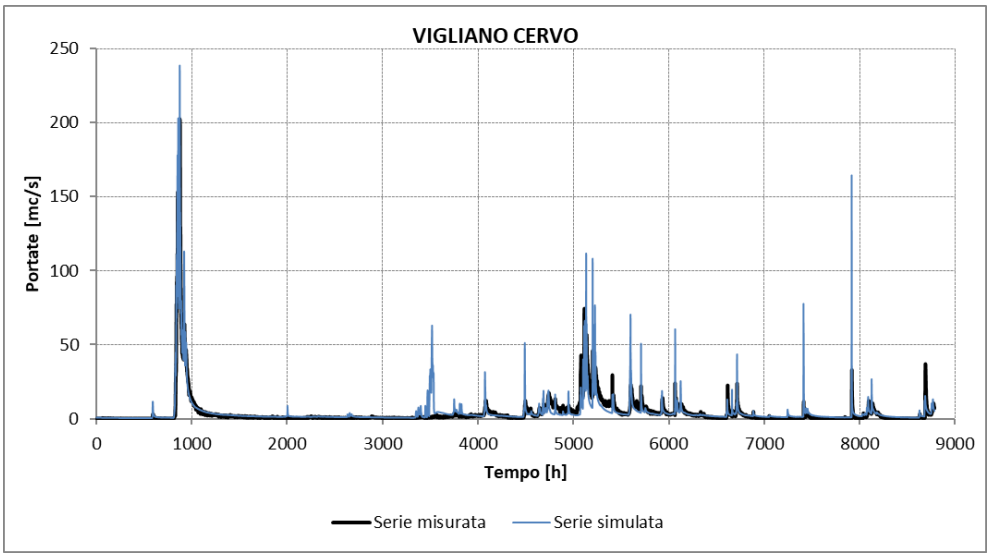
Anno idrologico (2011-2012)		
Deflusso medio annuo [mc/s]		
Sezione	**Misurata**	**Simulata**
T. Cervo a Passobreve Cervo	1,90	2,21
T. Cervo a Vigliano Cervo	4,04	4,52
T. Cervo a Castelletto Cervo (BI)	-	8,26
T. Cervo a Quinto Vercellese	25,55	19,85
T. Strona a Strona Cossato	0,90	0,60
T. Elvo a Elvo Carisio	1,03	3,60

Allegato A.5: Deflussi medi annui.

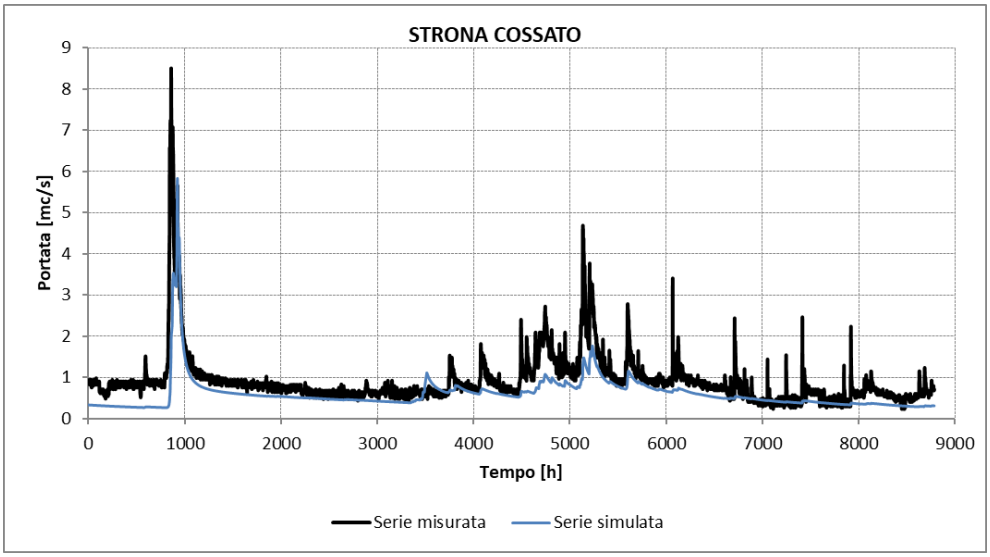
Le elaborazioni hanno restituito i seguenti idrogrammi in corrispondenza delle sezioni strumentate:



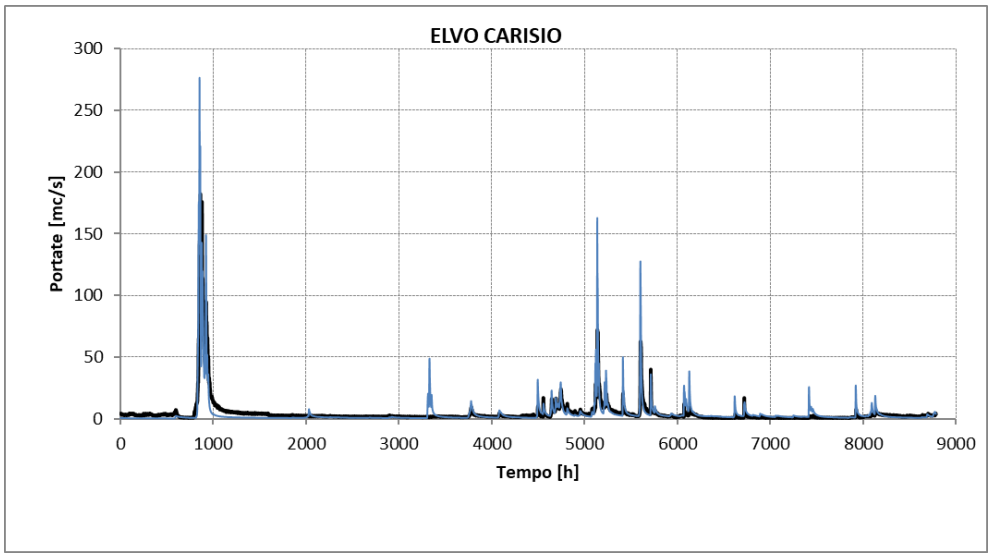
Allegato A.6: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Passobreve Cervo per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012.



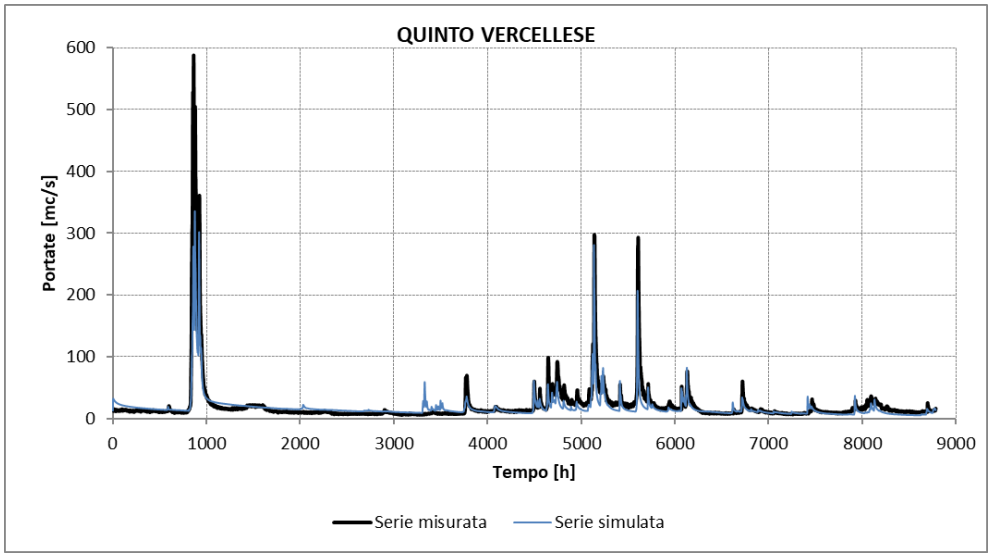
Allegato A.7: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Vigliano Cervo per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012.



Allegato A.8: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Strona Cossato per l'anno di calibrazione 2011-2012.



Allegato A.9: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Elvo Carisio per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012.



Allegato A.10: Confronto tra le serie simulata (in blu) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Quinto Vercellese per l'anno idrologico di calibrazione 2011-2012.

B. ALLEGATI: TAVOLE PER UN ANNO DI VALIDAZIONE

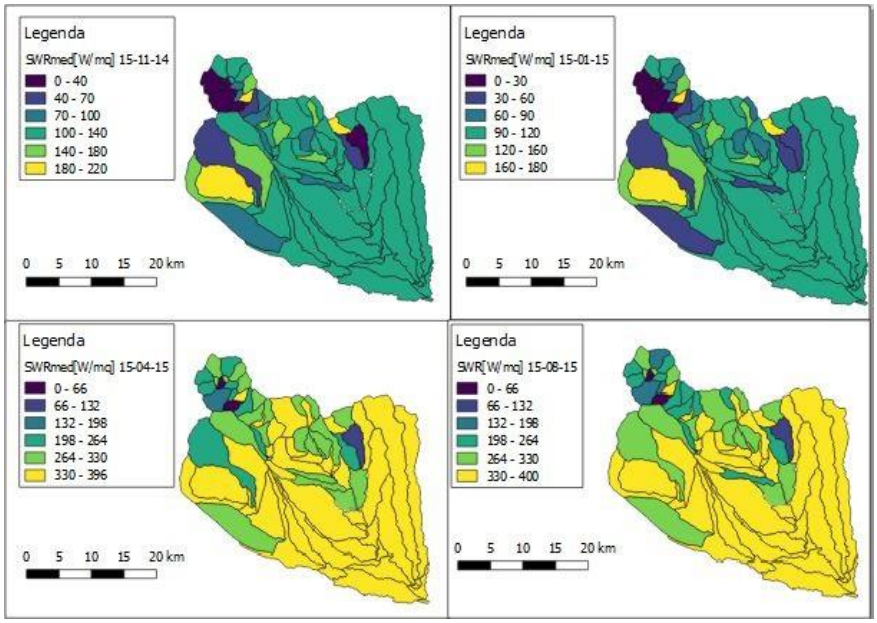
L'allegato raccoglie per 4 giorni campione appartenenti all'anno idrologico di validazione che va dal 01/10/2014 al 30/09/2015 le tavole di distribuzione degli stessi parametri fisico-climatici illustrati precedentemente nell'esempio per l'anno idrologico di calibrazione

La distribuzione degli afflussi medi annui per l'anno idrologico scelto viene riepilogata nella tabella di seguito. Rispetto all'anno idrologico di calibrazione 2011-2012 il bacino idrografico ha subito maggiori precipitazioni.

Anno idrologico 2014-2015	
Afflusso medio annuo [mm]	
T. Cervo a Passobreve Cervo	2153,89
T. Cervo a Vigliano Cervo	2096,87
T.Cervo a Castelletto Cervo (BI)	1867,23
T. Cervo a Quinto Vercellese	1403,30
T. Strona a Strona Cossato	2080,88
T. Elvo a Elvo Carisio	1438,76

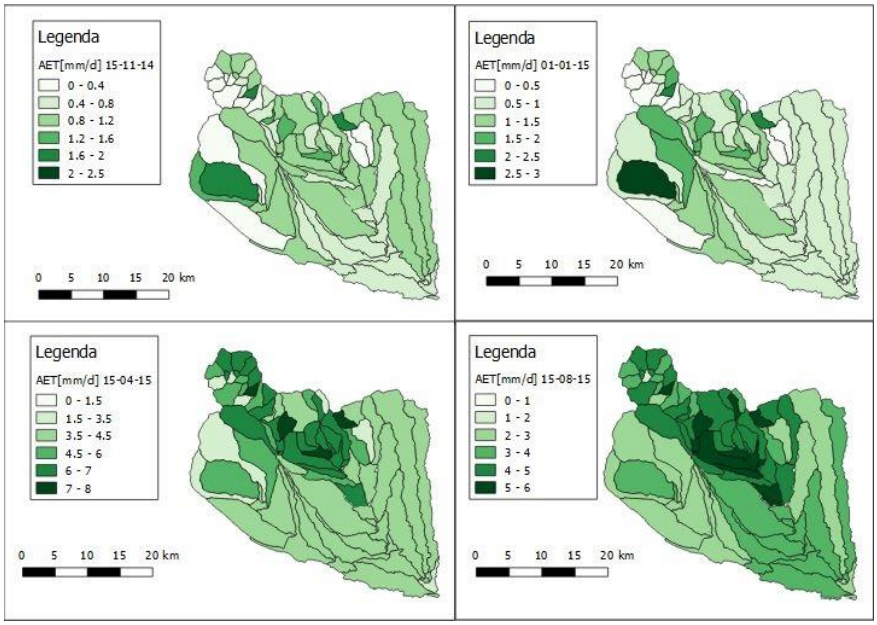
Allegato B.1: Afflusso medio annuo

La distribuzione spaziale della radiazione solare ad onda corta per i quattro giorni campione viene riepilogata dalla figura allegata in calce.



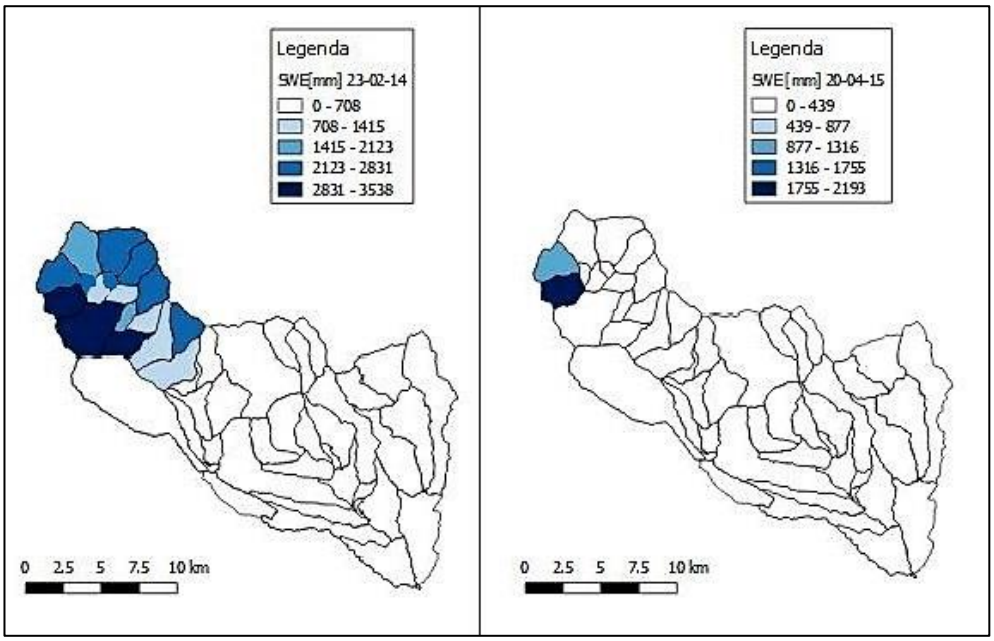
Allegato B.2: Distribuzione della radiazione solare giornaliera sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012.

La figura di seguito illustra per gli stessi giorni campione la distribuzione spaziale dell'evapotraspirazione reale ricavata dall'applicazione del modello idrologico.



Allegato B.3: Distribuzione della evapotraspirazione reale sul bacino idrografico chiuso alla stazione idrometrica di Quinto Vercellese per quattro giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012.

La tavola di dettaglio allegata in calce per il bacino idrografico chiuso alla sezione non strumentata di Castelletto Cervo (BI) illustra la distribuzione dello SWE per due giorni differenti dell'anno idrologico scelto, il primo appartenente alla fase di accumulo mentre il secondo appartenente alla fase di fusione e rilascio.

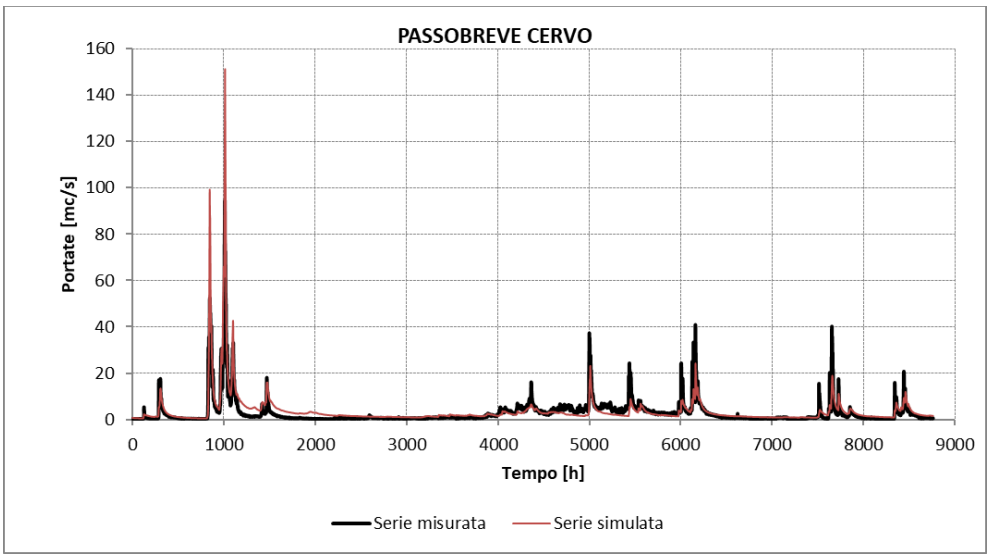


Allegato B.4: Tavola di dettaglio di distribuzione dello SWE sul bacino idrografico chiuso alla sezione di Castelletto Cervo (BI) per due giorni campione dell'anno idrologico 2011-2012.

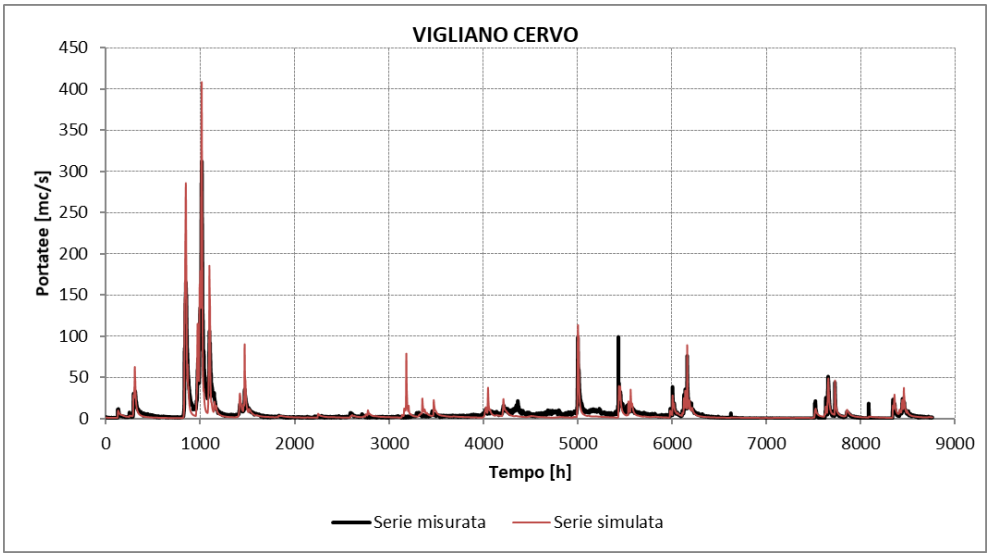
Chiudono l'allegato un riepilogo del deflusso medio annuo nelle 6 sezioni di interesse e il confronto degli idrogrammi ottenuti dalla simulazione con le serie di misura registrate dalle stazioni idrometriche per lo stesso anno di validazione. I deflussi osservati rispondono al maggior contributo di afflussi osservato per l'anno idrologico scelto.

Anno idrologico (2014-2015)		
Deflusso medio annuo [mc/s]		
Sezione	**Misurata**	**Simulata**
T. Cervo a Passobreve Cervo	2,95	3,54
T. Cervo a Vigliano Cervo	6,59	6,54
T.Cervo a Castelletto Cervo (BI)	-	12,91
T. Cervo a Quinto Vercellese	35,03	30,13
T. Strona a Strona Cossato	0,82	1,18
T. Elvo a Elvo Carisio	9,29	5,79

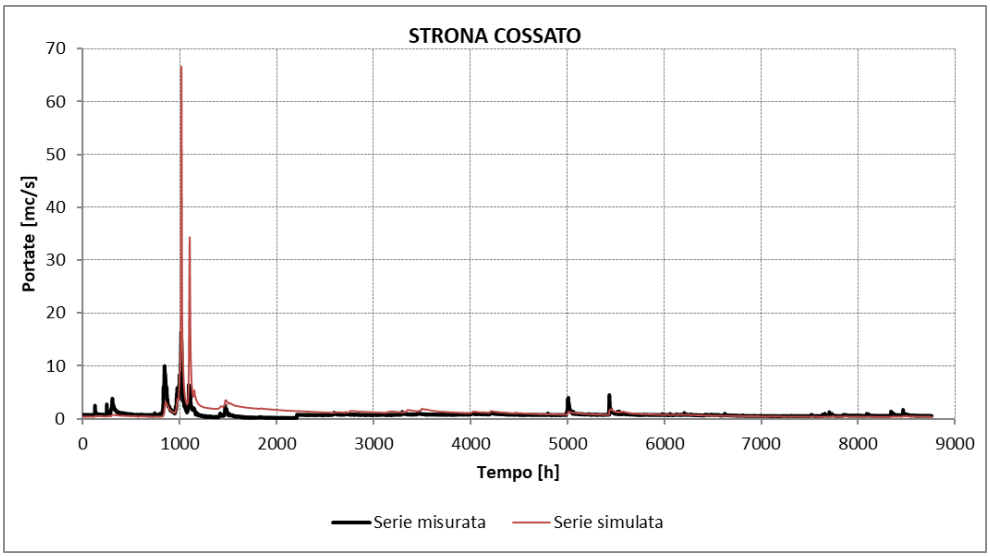
Allegato B.5: Deflusso medio annuo



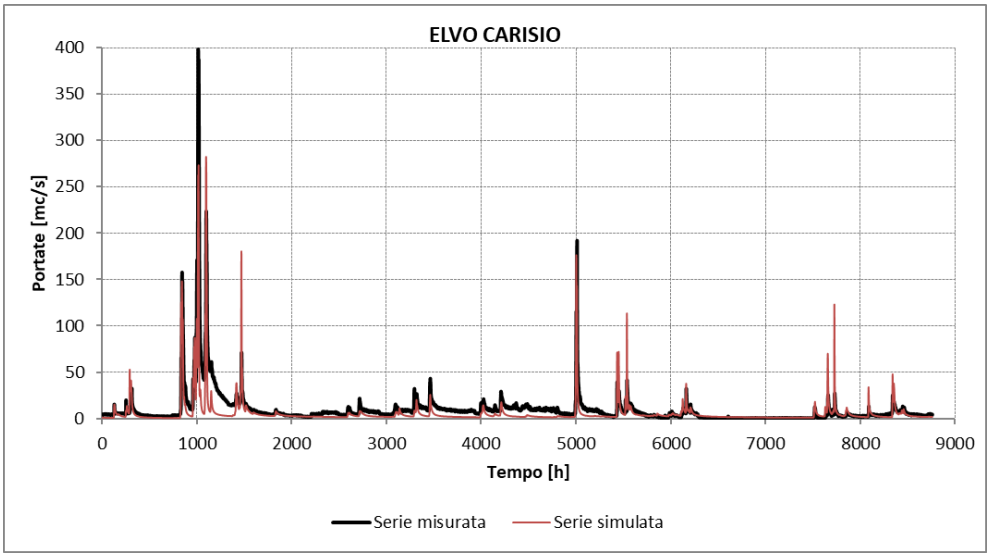
Allegato B.6: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Passobreve Cervo per l'anno idrologico di validazione 2014-2015.



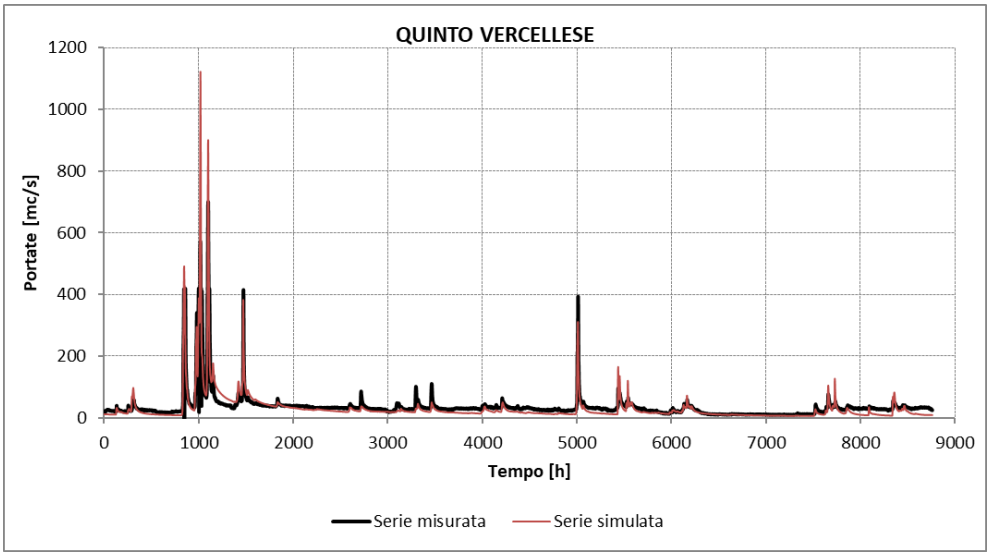
Allegato B.7: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Vigliano Cervo per l'anno idrologico di validazione 2014-2015.



Allegato B.8: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Strona Cossato per l'anno idrologico di validazione 2014-2015.



Allegato B.9: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Elvo Carisio per l'anno idrologico di validazione 2014-2015.



Allegato B.10: Confronto tra le serie simulata (in rosso) e la serie misurata (in nero) per la stazione idrometrica di Quinto Vercellese per l'anno idrologico di validazione 2014-2015.

C. ALLEGATI: ESEMPIO DI *SIM* FILE PER IL SINGOLO HRU

L'allegato include il codice di compilazione per il file di simulazione del singolo HRU. La scheda di simulazione si divide in tre parti: *components* per l'attivazione delle componenti da libreria; *parameter* per la lettura dei dati, le stampe e i valori da attribuire ai parametri delle componenti attivate; *connect* per la direzione dei movimenti di input e di output tra le componenti attivate in sequenza. Chiude lo *sim* file la definizione dei nodi in ingresso e in uscita dal nodo in esame nello spazio degli *influxes* e degli *outfluxes*.

Le righe di commento guidano la lettura delle parti che compongono il codice. L'esempio riguarda l'HRU numero 7 chiuso in corrispondenza della stazione idrometrica di Passobreve Cervo.

```
// header del codice con le generalità dell'HRU
import static oms3.SimBuilder.instance as OMS3
def home = oms_prj
def startDate = "2010-10-01 00:00" //data inizio simulazione
def endDate = "2013-09-30 23:00" //data fine simulazione
def ID = 7 //ID dell'HRU
def area= 6.621
def timestep = 60
def basin = "Passobreve Cervo" //bacino di appartenenza

//il nodo 7 riceve in input dai nodi 6 e 25 e rilascia in 8
//il nodo 7 riceve in input dai nodi 6 e 25 e rilascia in 0 se stampa la serie o se calibra la
stazione di Passobreve Cervo.

//condizione booleana: TRUE calibra i parametri del modello per l'HRU, FALSE mantiene i
parametri attribuiti nel codice ed esegue senza calibrare
OMS3.sim (name: "${ID}",
                                calibrate: "FALSE") {
resource "$oms_prj/lib"

//inizio del ciclo while, per ogni record di precipitazione esegue le seguenti attività
 model(while:"reader_data_precip.doProcess") {
 //model() {

//attivazione delle componenti di GEOframe-NewAGE
  components {
```

```
//attivazione dei reader dei dati
"reader_data_ET" "org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorReader"
"reader_data_LAI”
"org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorReader"
"reader_data_precip"
"org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorReader"
"reader_data_SWRB"
"org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorReader"
"reader_data_temp"
"org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorReader"

//attivazione dei reader delle mappe raster e delle mappe vettoriali
"reader_dem"          "org.jgrasstools.gears.io.rasterreader.OmsRasterReader"
"reader_sky"          "org.jgrasstools.gears.io.rasterreader.OmsRasterReader"
"vreader_centroids"   "org.jgrasstools.gears.io.shapefile.OmsShapefileFeatureReader"

//attivazione delle componenti di simulazione
"rainSnowSep"                "rainSnowSperataion.RainSnowSeparationPointCase"
"snow"                       "snowMeltingPointCase.SnowMeltingPointCase"
"waterBudgetRZ"              "rootZone.WaterBudgetRootZone"
"waterBudgetCanopyOUT"       "canopyOUT.WaterBudgetCanopyOUT"
"waterBudgetRunoffLinear"...."simpleBucket.WaterBudget"
"waterBudgetGW"              "groundWater.WaterBudgetGroundWater"

//attivazione delle componenti per il routing
"musk"                       "muskingumCunge.MuskingumCunge1”
"sum"                        "sumSeries.SumSeries"
"simpleSum2"                 "ex0.SimpleHashMapSum2"

//attivazione dei nodi in entrata e delle uscite dal nodo
    "inNode2"          "ex0.In1"
    "inNode1"          "ex0.In1"
    "inNode3"          "ex0.In1storage"
    "inNode4"          "ex0.In1storage"
    "outNodeMusk"          "ex0.Out1musk"
    "outNodeStorage"       "ex0.Out1storage"
    "dataProcess"          "ex0.DataMerge"

//printer (decommentare per stampare la serie in uscita
//"writer_Qtot"   "org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorWriter"
//"writer_Stot"   "org.jgrasstools.gears.io.timedependent.OmsTimeSeriesIteratorWriter"
}

//parametri, contiene i csv da leggere, i csv da stampare e i valori da attribuire ai parametri
delle componenti del modello
  parameter{
```

```
"reader_data_precip.file"          "${home}/data/${ID}/precip_${year}_${ID}.csv"
"reader_data_precip.idfield"       "ID"
"reader_data_precip.tStart"        "${startDate}"
"reader_data_precip.tEnd"          "${endDate}"
"reader_data_precip.tTimestep"     "${timestep}"
"reader_data_precip.fileNovalue"   "-9999"

"rainSnowSep.alfa_r"               1.3052938830525687
"rainSnowSep.alfa_s"               0.7203461573046113
"rainSnowSep.meltingTemperature"   2.594051302541338

"reader_data_SWRB.file"            "${home}/data/${ID}/swrb_${year}_${ID}.csv"
"reader_data_SWRB.idfield"         "ID"
"reader_data_SWRB.tStart"          "${startDate}"
"reader_data_SWRB.tEnd"            "${endDate}"
"reader_data_SWRB.tTimestep"       "${timestep}"
"reader_data_SWRB.fileNovalue"     "-9999"

"reader_data_temp.file"            "${home}/data/${ID}/airT_${year}_${ID}.csv"
"reader_data_temp.idfield"         "ID"
"reader_data_temp.tStart"          "${startDate}"
"reader_data_temp.tEnd"            "${endDate}"
"reader_data_temp.tTimestep"       "${timestep}"
"reader_data_temp.fileNovalue"     "-9999"

"reader_dem.file"                  "${home}/data/${ID}/dem_${ID}.asc"
"reader_sky.file"                  "${home}/data/${ID}/sky_${ID}.asc"
"vreader_centroids.file"           "${home}/data/${ID}/centroidi_netnum_${ID}.shp"

"snow.fStationsid"                 "netnum"
"snow.model"                       "Hock"
"snow.tStartDate"                  "${startDate}"
"snow.combinedMeltingFactor"       0.1156143952414368
"snow.freezingFactor"              0.012280294672612158
"snow.alfa_l"                      0.6672121696398925
"snow.radiationFactor"             5.839759394099531E-5

"reader_data_ET.file"              "${home}/data/${ID}/ETP_${year}_${ID}.csv"
"reader_data_ET.idfield"           "ID"
"reader_data_ET.tStart"            "${startDate}"
"reader_data_ET.tEnd"              "${endDate}"
"reader_data_ET.tTimestep"         "${timestep}"
"reader_data_ET.fileNovalue"       "-9999"

"reader_data_LAI.file"             "${home}/data/${ID}/LAI_${year}_${ID}.csv"
"reader_data_LAI.idfield"          "ID"
```

```
    "reader_data_LAI.tStart"        "${startDate}"
    "reader_data_LAI.tEnd"          "${endDate}"
    "reader_data_LAI.tTimestep"  "${timestep}"
    "reader_data_LAI.fileNovalue" "-9999"

//tipo di risolutore da attribuire alla equazione diff: Dormand Prince
"waterBudgetCanopyOUT.solver_model"     "dp853"
"waterBudgetCanopyOUT.kc_canopy_out"   1.226914260179493 //kc della canopy
"waterBudgetCanopyOUT.p"                0.65 //p della canopy

//tipo di risolutore da attribuire alla equazione diff: Dormand Prince
"waterBudgetRZ.solver_model"        "dp853"
"waterBudgetRZ.s_RootZoneMax"     487.87213306500894 //storage max nella root zone
"waterBudgetRZ.pB"        0.7672726453875214  //alfa che separa flux profondo da flux sup
"waterBudgetRZ.Pmax"    4.113146450719563 //coeff. serbatoio non lineare
"waterBudgetRZ.b_rz"      14.283542826171228 //coeff. serbatoio non lineare"
“waterBudgetRZ.A"         "${area}"
"waterBudgetRZ.inTimestep"    "${timestep}"

"waterBudgetGW.solver_model"   "dp853" //tipo di risolutore dell'equazione differenziale
"waterBudgetGW.a"                9.669290036062494 //coeff. serbatoio non lineare
"waterBudgetGW.b"                33.43636010247343 //coeff.serbatoio non lineare
"waterBudgetGW.A"                "${area}"
"waterBudgetGW.timeStep"         "${timestep}"
"waterBudgetGW.Smax"             1756.139238558701 //storage max in groundwater

"waterBudgetRunoffLinear.solver_model"   "dp853" //risolutore equazione differenziale
"waterBudgetRunoffLinear.a_ro"             4.639943776200573 //coeff serb non lin
"waterBudgetRunoffLinear.b_ro"             4.200405978164632 //ceoff serb non lin
"waterBudgetRunoffLinear.A"                "${area}"
"waterBudgetRunoffLinear.timeStep"         "${timestep}"
"waterBudgetRunoffLinear.Smax_ro"          95.89715366937025 //storage max in runoff

// l'HRU prende in entrata due ingressi
"inNode1.to_key"            "${ID}"
"inNode2.to_key"            "${ID}"

//parametri per mukingum cunge
"musk.l"            2.121 //lunghezza dell’asta in km
"musk.uc"           2.067469263545643 //celerità
"musk.x"            0.29936497070524304     //parametro di forma

//stampa della serie in uscita per avere il file da confrontare con la serie misurata
//decommenta se voglio printare in uscita per calibrare Passobreve Cervo
/*"writer_Qtot.file"          "${home}/output/${basin}/mIdrogramma_${ID}_1013.csv"
   "writer_Qtot.tStart"       "${startDate}"
   "writer_Qtot.tTimestep" "${timestep}"
```

```
   "writer_Qtot.fileNovalue" "-9999"

      "writer_Stot.file"       "${home}/output/${basin}/mStorage_${ID}_1013.csv"
      "writer_Stot.tStart"   "${startDate}"
      "writer_Stot.tTimestep"          "${timestep}"
      "writer_Stot.fileNovalue"        "-9999"  */
  }

//le connessioni dirigono gli input e gli output tra le componenti
  connect {

"reader_data_precip.outData"            "rainSnowSep.inPrecipitationValues"
"reader_data_temp.outData"              "rainSnowSep.inTemperatureValues"
"rainSnowSep.meltingTemperature"     "snow.meltingTemperature"
"rainSnowSep.outRainfallHM"            "snow.inRainfallValues"
"rainSnowSep.outSnowfallHM"           "snow.inSnowfallValues"
"reader_data_temp.outData"              "snow.inTemperatureValues"
"reader_data_SWRB.outData"             "snow.inShortwaveRadiationValues"
"reader_dem.outRaster"                  "snow.inDem"
"reader_sky.outRaster"                  "snow.inSkyview"
"vreader_centroids.geodata"             "snow.inStations"

"snow.outMeltingDischargeHM"       "waterBudgetCanopyOUT.inHMRain"
"reader_data_ET.outData"               "waterBudgetCanopyOUT.inHMETp"
"reader_data_LAI.outData"              "waterBudgetCanopyOUT.inHMLAI"

"waterBudgetCanopyOUT.outHMThroughfall"     "waterBudgetRZ.inHMRain"
"reader_data_ET.outData"                              "waterBudgetRZ.inHMETp"
"waterBudgetCanopyOUT.outHMAET"                "waterBudgetRZ.inHMEwc"

"waterBudgetRZ.outHMR"              "waterBudgetGW.inHMRechargeValues"
"waterBudgetRZ.outHMquick_mm" "waterBudgetRunoffLinear.inHMRechargeValues"

//somma tra la Qgw e la Qro per determinare la Qtot
"waterBudgetRunoffLinear.outHMDischarge"   "sum.inHMDischarge"
"waterBudgetGW.outHMDischarge"               "sum.inHMDischarge2"

// somma con i musk che provengono dai nodi in ingresso e definizione del flux  in uscita
      "sum.outHMQtot"                "simpleSum2.inComputation"
      "inNode1.outval"               "simpleSum2.inFromAboveVert1"
      "inNode2.outval"               "simpleSum2.inFromAboveVert2"
      "simpleSum2.outSum"            "musk.inComputation"

//decommentare se voglio stampare il flux in uscita
//"musk.outMusk"    "writer_Qtot.inData"
"musk.outMusk"       "outNodeMusk.invalMusk" //voglio passare il flux al nodo successivo
```

```
//musk e stampa del volume del layer della root zone
"waterBudgetRZ.outHMStorage"   "dataProcess.inHMStorage"
"inNode3.outval"               "dataProcess.inHMStorageFromAboveVert1"
"inNode4.outval"               "dataProcess.inHMStorageFromAboveVert2"
//"dataProcess.inHMStorage"    "writer_Stot.inData" //voglio stampare in uscita
"dataProcess.inHMStorage"   "outNodeStorage.invalStorage"  //voglio  passare  al  nodo
successivo
  }
  //sistema di influxes e di outfluxes per dirigere i flussi in ingresso e in uscita dal nodo
  //se voglio stampare in uscita il nodo non deve avere outfluxes
  //gli outfluxes passano i flussi in uscita al nodo successivo

//il nodo 6 prende in ingresso i flussi in uscita dal nodo e dal nodo 25
  inFluxes {
     "6.outval1musk"      "inNode1.inval1"
     "25.outval1musk"     "inNode2.inval1"

     "6.outval1storage"     "inNode3.inval1"
     "25.outval1storage"     "inNode4.inval1"
  }

  outFluxes {
   "outNodeMusk.outval1musk" ""
   "outNodeStorage.outval1storage" ""
}
 }
}
```

D. ALLEGATI: ESEMPIO DI *SIM* FILE PER LA CALIBRAZIONE

L'allegato contiene lo script del *sim* file con cui si è calibrato il modello in corrispondenza della stazione idrometrica di Quinto Vercellese. Il file delle calibrazioni è suddiviso in quattro parti, le prime due legano le schede dei sim file dei singoli HRU; l'ordine tra i nodi e il file dei parametri al calibratore nonché contengono lo spazio per il set del periodo di calibrazione e il numero dei round. La terza parte serve per la compilazione dei limiti inferiori e superiori di generazione casuale dei parametri. L'ultimo segmento compara la serie misurata con la serie simulata.

Lo script allegato è accompagnato da righe di commento.

```
//sim file di calibrazione
import static oms3.SimBuilder.instance as OMS3

//nome della simulazione di calibrazione
//percorso al csv del grafo
//percorso alle schede del modello
//percorso alla cartella di output all'interno del progetto
//percorso al csv dei parametri
OMS3.luca(name: "EFC-luca_QUINTO1013",
                    path: "./data/topoquinto.csv",
        simpath: "./simulation_Noce/simulation_calibrazione/") {
          build()

          graph(traverser: "downstream.all"){

                    parameter(file: "$oms_prj/data/90QUINTO.csv") {
                    }
          }
//impostazione dei parametri della calibrazione
//periodo da calibrare e numero di round
```

```
  run_start                "2010-10-01"
  calibration_start        "2010-10-01"
  run_end                  "2013-09-30"
  rounds                   1            // calibration rounds, default 1

// step definitions
//definizione dei parametri da calibrare e dei valori dei loro limiti inferiori e superiori di generazione
  step {
    parameter {
        //parametri della componente RainSnow separation
        alfa_r     (lower:0.6, upper:1.8,calib_strategy:MEAN)
        alfa_s     (lower:0.01, upper:0.8,calib_strategy:MEAN)
        //parametri della componente Snow
        meltingTemperature       (lower:0.0, upper:3.0,calib_strategy:MEAN)
        freezingFactor       (lower:0.0001, upper:0.1,calib_strategy:MEAN)
        radiationFactor      (lower:1.0E-5, upper:1.0E-4,calib_strategy:MEAN)
        alfa_l             (lower:0.2, upper:0.9,calib_strategy:MEAN)
        //parametro del layer della canopy
        //range ok ma puoi cambiarli
        kc_canopy_out    (lower:0.1, upper:2,calib_strategy:MEAN)
        //ROOT ZONE
        //Pmax*((S_RootZoneMax)^b_rz)  : serbatoio non lineare
        //b_rz esponenziale della legge non lineare
        //pB coefficiente di umidità - è l'alfa che discrimina flux profondo da flux sup
        s_RootZoneMax      (lower:400, upper:600,calib_strategy:MEAN)
        Pmax               (lower:0.1, upper:40,calib_strategy:MEAN)
        b_rz               (lower:3, upper:50,calib_strategy:MEAN)
        pB                 (lower:0.1, upper:0.6,calib_strategy:MEAN)
        //DIRECT RUN OFF
        //a_ro*((Smax_ro)^bro): serbatoio non lineare
        a_ro      (lower:0.001, upper:10,calib_strategy:MEAN)
        b_ro      (lower:2, upper:80,calib_strategy:MEAN)
        Smax_ro (lower:90, upper:200,calib_strategy:MEAN)
        //muskingum
        x         (lower:0.1, upper:0.6,calib_strategy:MEAN)
        uc        (lower:0.5, upper:2.5,calib_strategy:MEAN)
```

```
        //GROUNDWATER
        //a*(Smax^b)
        A          (lower:0.001, upper:10,calib_strategy:MEAN)
        b          (lower:3, upper:50,calib_strategy:MEAN) //originali 3-80
        Smax       (lower:1200, upper:1800,calib_strategy:MEAN)
    }
//sim dove stampare il file simulato obs dove è inserito il file delle misure
//ID dell'HRU che in uscita ha la stazione di misura da calibrare
//scelta della funzione obiettivo
//impostazione del numero di esecuzioni
objfunc(method:KGE, timestep:RAW,invalidDataValue:-9999) {
        sim(file:"$oms_prj/output/strona/Idrogramma_QUINTO1013.csv",      table:"table",
column:"value_62")
        obs(file:"$oms_prj/data/idro/idro1316.csv", table:"table", column:"value_2985")
    }
    max_exec  200
```

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Claps e la prof.ssa Tamea per il tema proposto, i contatti, la loro disponibilità e il loro contributo di supervisione; l'ing. Andrea Zamperone per aver messo a disposizione le sue proposte, le sue competenze e la sua esperienza professionale e per avermi dato la possibilità di svolgere nel suo studio tecnico il mio primo percorso di tirocinio e la tesi di laurea magistrale. Ringrazio tutte le persone dello studio con cui ho condiviso questi giorni di lavoro e stesura in un ambiente sempre stimolante e professionale, che mi hanno accolto e che non mi hanno mai fatto mancare il loro esempio, il loro contributo e il loro supporto: ringrazio Davide per avermi introdotto e guidato nell'uso dei sistemi GIS, Alfio, Pasquale, Alessandro e tutti gli altri membri dello studio. Ringrazio gli ing. Michele Bottazzi e Maria Laura Bancheri dell'Università di Trento per la loro supervisione e la loro disponibilità, per avermi ospitato nel loro dipartimento, condiviso, introdotto e guidato nell'uso di *GEOframe-NewAGE* e infine ringrazio l'ing. Marco Canu per i suoi consigli e spunti sull'organizzazione e sulla gestione dei database.

Dedico questo lavoro a mio padre, a mia madre e a mio fratello. Cui vanno i miei più grandi ringraziamenti. Al loro amore, la loro pazienza e il loro supporto nei momenti più duri e più belli di questo percorso.

Il mio pensiero va a tutti gli amici di sempre e che sono orgoglioso di conoscere e di avere al mio fianco da così tanto tempo: ad Antonio ad Andrea; ad Eugenio, Pierluigi e infine Davide. Un grazie a Lucia e un grazie a Paola, per la spinta e il sostegno che mi ha dato la prima in questo rush finale e la seconda per avermi introdotto nel gruppo con cui ho condiviso tanti momenti delle mie vacanze. Un grazie ad Anna per la forza e allo stesso tempo la spensieratezza con cui abbiamo condiviso e vinto gli ultimi insormontabili ostacoli di questo percorso di studi.

Ringrazio tutte le persone che ho potuto conoscere in questi ultimi anni di studio con cui ho condiviso gruppi, esami e soprattutto uscite: un grazie a Francesco, a Roberto e alla banda dei "Martedì idraulici", Andrea, Pietro, gli

“inCivili” e le “oscillazioni libere” che hanno reso leggero questo percorso e indimenticabili questi quattro anni.

Infine ringrazio tutte le persone che mi hanno sostenuto, chi stando sempre con me, chi passando solo un attimo, chi anche solo con una parola d’affetto e d’incoraggiamento.