



*Autorità di Bacino  
dei Fiumi Liri - Garigliano e Volturno*

**PROGETTAZIONE PRELIMINARE DELLE OPERE PRIORITARIE DA REALIZZARE PER LA RISOLUZIONE DELLE CRITICITÀ LEGATE ALL'USO E ALLA DISPONIBILITÀ DELLA RISORSA IDRICA NELLA PIANA DEL FUCINO – REGIONE ABRUZZO**

CIG 4469094D06

CUP F84I10000170002



# 2.4.1

## Modellazione idrologica-idraulica Relazione idrologica e idraulica

Scala

Raggruppamento Temporaneo di Imprese

Il progettista

Il responsabile del progetto

Capogruppo Mandataria

Mandanti



WATER AND NATURAL  
RESOURCES  
CONSULTANTS



**HR Wallingford Ltd**  
Ing. Alessandro GALLINA

**BETA Studio srl**  
Ing. Massimo COCCATO



Via Guido Rossa, 29/A  
35020 Ponte S. Nicolò  
Padova - Italia  
info@betastudio.it  
www.betastudio.it  
tel +390498961120  
fax +390498961090

rev.	motivo	data	redatto	verificato	approvato
1	Aggiornamento	16.04.2014	ing. M. BALDACCI - L. COSTA	dott.ssa M. SEGATO	ing. M. COCCATO
0	Prima emissione	17.12.2013	ing. M. BALDACCI - L. COSTA	dott.ssa M. SEGATO	ing. M. COCCATO

cod. el. 0760ST020401

file 0760ST020401\_01.docm



# Indice

	Pag.
Indice .....	I
Introduzione .....	V
1. Area oggetto d'indagine .....	1
1.1 Inquadramento generale .....	1
1.2 Aspetti idrologici e idraulici .....	2
1.3 Aspetti geologici ed idrogeologici .....	3
2. Inquadramento dell'attività di modellazione del reticolo idrografico, approccio metodologico e obiettivi dell'attività. ....	5
2.1 Introduzione .....	5
2.2 I dati a disposizione .....	5
2.2.1 Cartografia di base .....	5
2.2.2 Ortofoto .....	6
2.2.3 Dati geologici, idrogeologici e d'uso del suolo .....	6
2.2.4 Modello digitale del terreno – LIDAR .....	7
2.3 Rete idrografica .....	8
2.4 Opere idrauliche esistenti .....	9
2.5 Campagne di misura integrative – rilievi topografici .....	11
3. Costruzione del modello idrologico-idraulico .....	13
3.1 Introduzione .....	13
3.2 Rappresentazione nel modello del reticolo di bonifica .....	13
3.3 Bacino di competenza al nodo .....	14
3.3.1 Modalità di tracciamento dei sottobacini .....	16
3.3.2 Scopo del tracciamento dei sottobacini .....	17
4. Studio idraulico di dettaglio .....	19
4.1 Introduzione .....	19
4.2 Eventi storici di allagamento .....	19
4.2.1 Evento del 16 dicembre 1999 .....	21
4.2.2 Evento del 4 dicembre 2010 .....	23
4.2.3 Evento del 18 marzo 2011 .....	26
4.3 Le curve di possibilità pluviometrica e gli ietogrammi di progetto adottati .....	29
4.4 Modello Idrologico utilizzato .....	35
4.5 Calibrazione e verifica del modello .....	35
4.6 Simulazioni con evento critico .....	42
4.7 Simulazione della rete nello stato di fatto per sollecitazioni pluviometriche ad alto tempo di ritorno .....	44
4.8 Influenza dei cambiamenti climatici .....	47
5. Analisi delle criticità .....	49
5.1 Premessa .....	49
5.2 Funzionalità di drenaggio e bonifica del reticolo .....	49
Riferimenti bibliografici .....	51
App. A Descrizione del modello InfoWorks ICM .....	A.1
A.1 Campi di applicazione .....	A.1
A.2 Punti di forza dell'applicativo software .....	A.1
A.3 Modelli idrologici disponibili .....	A.1
A.4 Approccio numerico della componente 1D .....	A.1
A.5 Approccio numerico della componente 2D .....	A.3
A.6 Produzione della magliatura 2D .....	A.3
A.7 Collegamento 1D-2D .....	A.4
A.8 Tempi di calcolo e dimensioni del modello .....	A.4
App. B Descrizione della misura all'Incile .....	B.1
App. C Cambiamento climatico .....	C.1
C.1 Introduzione .....	C.1
C.2 Revisione della letteratura e modelli disponibili .....	C.1
C.2.1 Impatti climatici medi stagionali .....	C.1

C.2.2	Modifiche di precipitazione medie stagionali .....	C.3
C.2.3	Modifica di temperature medie stagionali .....	C.4
C.3	Impatto sulle piogge intense nell'area del Mediterraneo .....	C.4
C.4	Scenari di Cambiamento Climatico.....	C.5
C.4.1	Fattori Stagionali.....	C.5
C.4.2	Correzione delle piogge intense .....	C.6
C.5	Utilizzo dei risultati dello studio.....	C.6

## Figure

Pag.

Figura 1.1 – Inquadramento dell'area d'indagine. ....	1
Figura 1.2 – Inquadramento della Piana del Fucino e del reticolo di canali drenanti.....	3
Figura 2.1 - Stralcio della Carta Tecnica Regionale a colori in scala 1:25.000 (i colori utilizzati sono: azzurro per l'idrografia, bistro per il rilievo e nero per l'antropico e la toponomastica).....	6
Figura 2.2: Visualizzazione in InfoWorks del DTM con risoluzione 0,25 m ricavato dal rilievo Lidar della zona di Borgo Ottomila, è possibile osservare il reticolo dei canali e alcune opere speciali come vasche e idrovore.....	7
Figura 2.3: Visualizzazione tridimensionale in InfoWorks del DTM con risoluzione 0,25 m ricavato dal rilievo Lidar di alcuni canali della Piana del Fucino, dettaglio di alcuni canali. ....	8
Figura 2.4: Rappresentazione delle Acque alte (blu), Medie (marrone) e Basse (rosa) nella Piana del Fucino.....	9
Figura 2.5: Schema idraulico dell'Incile.....	10
Figura 2.6: Rappresentazione della stazione di sollevamento di Borgo Ottomila in InfoWorks ICM con evidenziati nella finestra i livelli di funzionamento della prima idrovora.....	10
Figura 2.7: La fotografia a destra rappresenta una paratoia e quella di sinistra uno dei canali rilevati.....	12
Figura 3.1: Profilo longitudinale del Fosso 8 e successiva immissione nel Canale Separatore Settentrionale, si possono notare i livelli di fondo canale (marrone) e i livelli delle sponde (verde e rosso). ....	14
Figura 3.2: Reticolo idrografico, rappresentazione a colori dei diversi coefficienti di scabrezza secondo Manning in $m^{-1/3}$ s. ....	15
Figura 3.3: Reticolo idrografico, rappresentazione a colori dei diversi coefficienti di scabrezza secondo Manning in $m^{-1/3}$ s. ....	15
Figura 3.4: Caratterizzazione dei sottobacini presenti nel Fucino, in magenta sono evidenziati i sottobacini esterni ed in azzurro i sottobacini interni alla Piana. ....	16
Figura 4.1 – Pluviometri della Banca Dati Meteorologica Corrente ricadenti all'interno del bacino del Fucino. ....	20
Figura 4.2 – Estratto di carta CTR con indicazione della posizione del misuratore idrometrico situato presso "Case Incile" a monte degli emissari del Fucino. ....	21
Figura 4.3 - Rilievo fotografico degli allagamenti del 16-12-1999 nella piana del Fucino, vista in direzione Nord, Borgo 8000 è al centro della fotografia. ....	22
Figura 4.4: Regione Abruzzo, ARSSA, rappresentazione della situazione del 16-12-1999; si possono notare gli allagamenti parziali su tutta la Piana e gli allagamenti totali presso Borgo Ottomila. Inoltre i cerchi rossi rappresentano i punti di esondazione delle canalizzazioni principali ed il punto rosso di rottura dell'argine del fiume Giovenco. ....	22
Figura 4.5: Evento di pioggia del 16 dicembre 1999, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino.....	23
Figura 4.6: Immagine radar del satellite COSMOS-SkyMed acquisita il 4 dicembre 2010 alle ore 04:53:48 UTC con sovrapposizione di un dato vettoriale che mostra l'estensione delle aree alluvionate (generato dal software e-Flood di e-GEOS). ....	23
Figura 4.7: Evento di pioggia del 4 dicembre 2010, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino e livello idrometrico misurato all'Incile.....	24
Figura 4.8: Posizione dei pluviometri utilizzati per ricostruire l'evento di dicembre 2010. ....	25
Figura 4.9: Evento di pioggia del 4 dicembre 2010, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino (Celano, Collelongo, Ovindoli, Roccavivi) e livello idrico misurato all'Incile. ....	25
Figura 4.10: Suddivisione in sottobacini del territorio ed esempio di distribuzione delle piogge.....	26
Figura 4.11: Immagine radar del satellite COSMOS-SkyMed acquisita il 18 marzo 2011 alle ore 09:10:50 UTC con sovrapposizione di un dato vettoriale che mostra l'estensione delle aree alluvionate (generato dal software e-Flood di e-GEOS). ....	27
Figura 4.12: Evento di pioggia del 18 marzo 2011, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino e livello idrometrico misurato all'Incile.....	27
Figura 4.13: Collocazione dei pluviometri utilizzati nello Studio Idrologico ed Idrodinamico del Bacino del Fucino redatto dalla Protezione Civile del centro funzionale d'Abruzzo. ....	28
Figura 4.14: Evento di pioggia del 18 marzo 2011, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino come riportata dalle informazioni contenute nello Studio Idrologico ed Idrodinamico del Bacino del Fucino redatto dalla Protezione Civile del centro funzionale d'Abruzzo. ....	28
Figura 4.15: Posizione dei pluviometri della banca dati metereologica serie storica (piogge giornaliere). ....	30
Figura 4.16 - Curve di possibilità pluviometrica per diversi Tempi di Ritorno (Tr) ricavate dalle serie dei massimi di pioggia misurate dal pluviografo di Avezzano.....	31
Figura 4.17 – Valori di ARF (fattore di riduzione areale) per le diverse durate di pioggia in funzione della superficie del bacino. ....	33

Figura 4.18 – Ietogrammi rettangolari per un evento con $T_r = 100$ anni e durata 72 ore riferiti al pluviometro di Avezzano e di Villavallelonga.	34
Figura 4.19 – Identificazione tramite diversa colorazione dei bacini idrografici e dei rispettivi pluviometri di riferimento per l'attribuzione delle piogge di progetto.	34
Figura 4.20: Rilievo topografico della sezione in cui è posto l'idrometro presso Casa Incile.	36
Figura 4.21: Schema idraulico di funzionamento della centrale di Canistro.	37
Figura 4.22 - Portate in uscita dagli emissari: in verde il Primo Emissario, in blu il Nuovo Emissario.	38
Figura 4.23 – Migliori calibrazioni ottenute con il metodo FIXED e il metodo del CN.	39
Figura 4.24: Confronto tra i livelli misurati dall'idrometro all'Incile (rosso) e quelli calcolati dal modello (verde).	39
Figura 4.25 - Sovrapposizione dei risultati del modello idraulico alla foto aerea con aree allagate datata 18 marzo 2011, ore 9:10.	40
Figura 4.26: Confronto dei risultati del modello idraulico (in alto) alla foto aerea (in basso) con aree allagate del 18 marzo 2011.	41
Figura 4.27: Sensitività del parametro di deflusso sul processo di calibrazione (Linea rossa = serie misurata presso l'idrometro all'incile; Linea blu = curva di calibrazione, scelta come definitiva. Denominata calibr...6! (versione 121); Linea verde = Utilizzando coeff di deflusso - 20% rispetto a calibrazione; Linea gialla = Utilizzando coeff di deflusso +20% rispetto a calibrazione).	41
Figura 4.28 – Calibrazione effettuata sulla base dell'evento del novembre 2010.)	42
Figura 4.29: Ricerca della durata critica per vari tempi di ritorno.	43
Figura 4.30: Esempio di ietogramma di pioggia utilizzato per le simulazioni, il presente ha T.R. 30 anni.	44
Figura 4.31: Simulazione degli allagamenti massimi per un evento di TR 30 anni, paratoie all'Incile completamente chiuse per l'intera durata dell'evento.	45
Figura 4.32: Simulazione degli allagamenti massimi per un evento di TR 30 anni, paratoie all'Incile completamente aperte per l'intera durata dell'evento.	46
Figura 4.33: Simulazione degli allagamenti massimi per un evento di TR 30 anni, paratoie all'Incile semi-aperte per l'intera durata dell'evento.	46

## Tabelle

	Pag.
Tabella 2.I – Informazioni raccolte a seguito di campagne di misura e verifiche in sito.	11
Tabella 4.I: Valori delle altezze di pioggia per dati $T_r$ (tempi di ritorno) in funzione della durata di pioggia in ore per il pluviometro di Avezzano.	31
Tabella 4.II: Valori dei coefficienti $a$ e $n$ di ogni pluviometro per durate inferiori e superiori alle 24 ore e per i vari tempi di ritorno considerati.	32
Tabella 4.III: Valori dei coefficienti di riduzione areale (ARF) ricavati per il Bacino del Fucino.	33
Tabella 4.IV - Volume esondato in Milioni di $m^3$ a seguito di sollecitazioni di diverso Tempo di Ritorno e con le paratoie dell'Incile in posizione aperta.	47



# Introduzione

Premesso che con Nota prot./int. N. 450 in data 12.06.2013 il Responsabile del Procedimento ha autorizzato a procedere all'esecuzione anticipata del contratto, in data 19.06.2013 l'Autorità di Bacino Liri-Garigliano Volturno ha consegnato formalmente al Raggruppamento Temporaneo di Imprese BETA Studio s.r.l. – HR Wallingford Ltd le attività di servizi relative alla *“Progettazione preliminare delle opere prioritarie da realizzare per la risoluzione delle criticità legate all'uso e alla disponibilità della risorsa idrica nella piana del Fucino – Regione Abruzzo”*.

In data 1.10.2013 l'Autorità sopraccitata ha stipulato in forma pubblico/amministrativa il contratto rep.1033 con il Raggruppamento Temporaneo di Imprese BETA Studio s.r.l. – HR Wallingford Ltd per l'espletamento delle attività di servizio sopraccitate.

In particolare le attività che compongono il progetto sono suddivise nelle seguenti fasi principali:

- progettazione e implementazione di un percorso partecipato;
- studio idraulico di dettaglio della Piana del Fucino, che prevede la raccolta, l'analisi e l'elaborazione dei dati esistenti nonché l'acquisizione di nuovi dati anche per mezzo di rilievi in campo al fine di ricostruire le caratteristiche plano-altimetriche dei corsi d'acqua e dei manufatti presenti e l'implementazione di un modello di simulazione idraulica;
- aggiornamento dello Studio *“Piana del Fucino, Regione Abruzzo - programma di azioni strutturali e non strutturali connesse alla salvaguardia, uso e governo della risorsa idrica superficiale e sotterranea”*, realizzato nel 2007 dall'Autorità di Bacino Liri-Garigliano e Volturno, relativamente alle componenti *“irrigazione”*, *“depurazione e collettamento”* e *“captazione e distribuzione idropotabile”*;
- progettazione preliminare degli interventi prioritari nel settore irriguo, nel settore della depurazione ed collettamento e nel settore della captazione e distribuzione potabile.

La presente relazione descrive le modalità di realizzazione dell'applicazione modellistica effettuata nell'ambito dello studio idraulico di dettaglio.





# 1. Area oggetto d'indagine

## 1.1 Inquadramento generale

Il territorio oggetto dello studio è quello della Piana endoreica del Fucino e dei rilievi montuosi che le fanno da coronamento. Il bacino idrografico del Fucino appartiene al bacino del Liri-Garigliano, mentre da un punto di vista amministrativo il territorio ricade interamente nella provincia dell'Aquila. Il bacino si presenta suddiviso in un'area pianeggiante compresa fra le quote 648 e i 700 m s.m.m. per una superficie che copre il 30% del totale del bacino ed in una zona montuosa perimetrale con picchi fino ai 2 500 m s.m.m. (Figura 1.1).

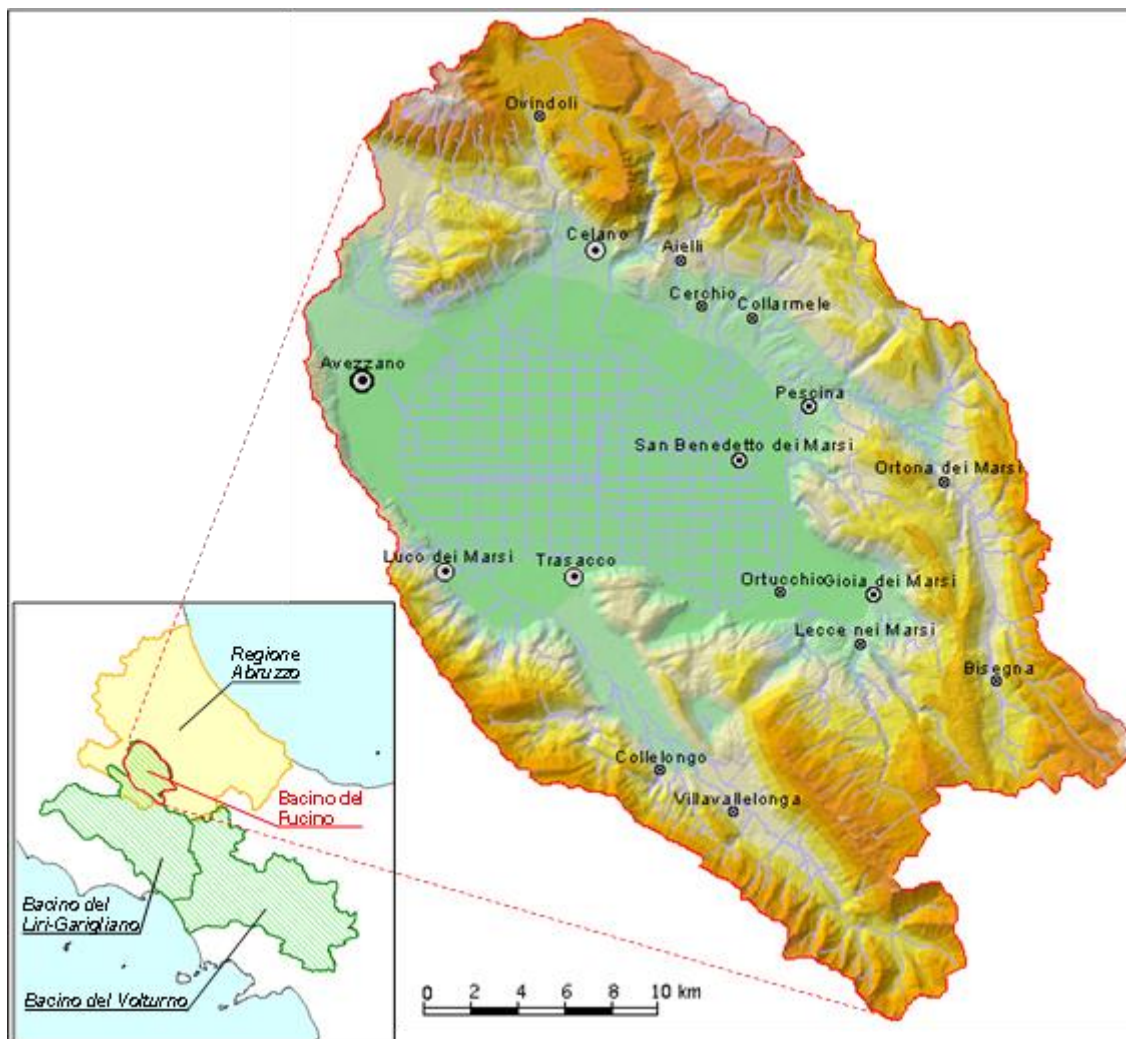


Figura 1.1 – Inquadramento dell'area d'indagine.

La Piana del Fucino è un'ampia depressione tettonica, che si apre all'interno dell'area abruzzese, tra il gruppo del Velino-Sirente a nord-ovest ed i monti del Parco Nazionale d'Abruzzo a sud-est, determinata da un complesso sistema di faglie, seguenti direttrici diverse, probabilmente non contemporanee l'una all'altra.

La Conca, nella quale affluiscono il Fiume Giovenco ed altri corsi d'acqua minori con caratteristiche torrentizie, è priva di emissari naturali, ed in passato era sede di un lago con superficie di circa 160 km<sup>2</sup>. Negli anni compresi tra il 41 ed il 52 d.C. l'imperatore Claudio, al fine di recuperare i terreni del bacino lacustre all'agricoltura, fece realizzare una galleria lunga 5 647 m per scaricare le acque del lago nel limitrofo bacino del Fiume Liri. Dopo alcuni

secoli, almeno sino al VI sec. d.C., il funzionamento della galleria decrebbe progressivamente tanto che a poco a poco si ripristinò l'antica superficie lacustre.

Soltanto nella metà del XIX sec., per opera di Alessandro Torlonia, venne realizzato un nuovo collettore artificiale lungo circa 6 300 m e posto ad una quota più bassa del precedente; tale collettore, in grado di far evacuare portate di circa 40 m<sup>3</sup>/s, rese possibile la bonifica integrale del lago Fucino. Nel 1942 fu realizzato un terzo emissario, avente percorso diverso dai primi due, con lunghezza pari a 6 250 m e portata di circa 20 m<sup>3</sup>/s.

Gli impianti colturali della Piana, inizialmente diretti essenzialmente verso mais, grano e barbabietole, videro progressivamente ridurre, soprattutto dopo la riforma ed il riordino fondiario del 1954, le quote di superficie loro destinate a vantaggio di altri impianti decisamente più redditizi, di tipo orticolo. Questa nuova tendenza, notevolmente accentuata negli ultimi anni, comporta un notevole fabbisogno idrico, visto l'idroesigenza di tali colture soprattutto se si considera che, in virtù del clima favorevole presente nella piana, è possibile ottenere due/tre raccolti annui. Per garantire le disponibilità idriche necessarie sono stati realizzati, essenzialmente dall'allora ARSSA (Agenzia Regionale per lo Sviluppo dei Servizi Agricoli, Ente soppresso con L.R. n. 29 del 11.08.2011), numerosi pozzi, generalmente perforati nelle strutture carbonatiche circostanti la Piana, ricche di acque sotterranee. I pozzi più importanti vengono attualmente utilizzati direttamente dal Consorzio di Bonifica Ovest, che è subentrato all'ARSSA nella gestione (L.R. n. 42 del 10.08.2012), con lo scopo di mantenere attivo il deflusso idrico nei canali dai quali attingono direttamente gli agricoltori per le esigenze irrigue.

Oltre al prelievo idrico per attività agricole, (circa 14 milioni di m<sup>3</sup>, periodo da maggio a settembre) vengono prelevati dagli acquiferi che coronano la Piana cospicui volumi d'acqua anche a scopo idropotabile (11 milioni di m<sup>3</sup>/anno) e industriale (6 milioni di m<sup>3</sup>/anno).

## 1.2 Aspetti idrologici e idraulici

Il bacino del Fucino è situato in un'area dell'Appennino Centrale, equidistante dal Tirreno e dall'Adriatico, e viene interessato da un clima che si può classificare come sublitoraneo-appenninico. Tale clima è caratterizzato da una piovosità intensa durante tutto l'inverno, con massimi di precipitazione nei mesi di novembre e dicembre a carattere nevoso in genere sopra i 1500 m; durante l'estate si ha una quasi completa mancanza di precipitazioni in pianura e rari e brevi fenomeni temporaleschi sulle pendici montane. La piovosità maggiore si registra nelle zone montane ed in prevalenza su quelle a Sud del bacino stesso. I valori minimi si registrano nella Piana (50% del valore medio). Tale distribuzione delle precipitazioni è la conseguenza di una circolazione delle perturbazioni che è prevalentemente in senso orario: in generale la propagazione della perturbazione segue il bacino del Liri fin sopra Avezzano, devia verso Est incontrando i massicci dei monti Velino, Magnola e Sirente, si espande successivamente sulla Piana per raddensarsi sui monti a sud del bacino, ove definitivamente si estingue con la massima intensità.

La temperatura media annua nel bacino si aggira sui 12°C; le temperature minime sono mediamente intorno ai -3°C, le massime intorno ai 27°C.

I corsi d'acqua drenanti i rilievi posti a corona della Piana del Fucino confluiscono nei due Canali Allacciati (settentrionale e meridionale) e costituiscono le "Acque Alte". Queste a loro volta si immettono nel Canale Collettore (Canale Torlonia). A tale collettore giungono anche le "acque medie", ossia quelle circolanti nei fossi della Piana, all'interno della cintura costituita dai Canali Allacciati. Le "acque basse" si raccolgono nel Bacinetto, da cui vengono sollevate tramite un impianto idrovoro e convogliate nel Canale Collettore. Il Canale Collettore, che convoglia tutte le acque all'Incile dove hanno origine i due emissari in galleria, è formato da tre canali paralleli, di cui i due estremi raccolgono le acque provenienti da nord e da sud (Figura 1.2).

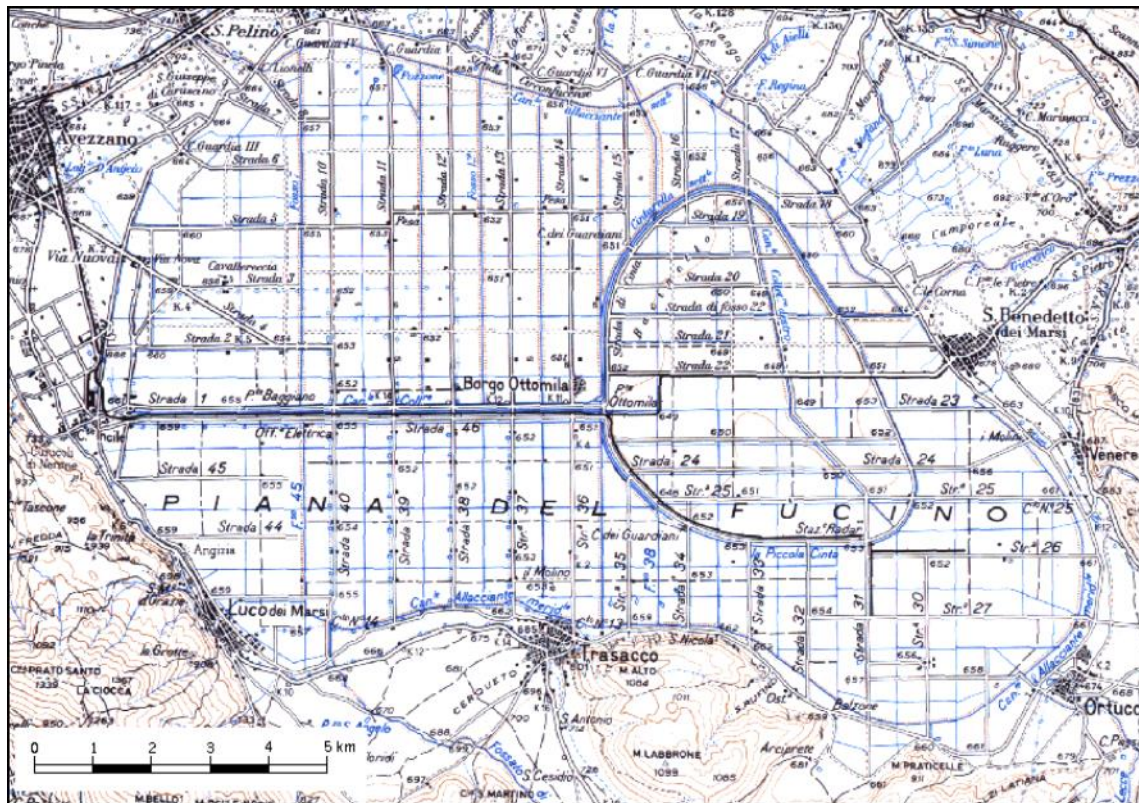


Figura 1.2 – Inquadramento della Piana del Fucino e del reticolo di canali drenanti.

Dei corsi d'acqua naturali che si immettono nella Piana del Fucino solamente il fiume Giovenco risulta avere portate estive non nulle. Tali corsi d'acqua sono (in senso orario, a partire da nord): il Rio S. Potito, il Torrente La Foce, il Rio di Aielli, il fiume Giovenco, il Rio di Lecce, il Fossato di Rosa.

Come già accennato al paragrafo precedente la portata dei canali della Piana Fucino è fornita non solo dai contributi dei corsi d'acqua immissari ma dai copiosi apporti di acque sorgentizie erogate dalle emergenze poste in diversi settori della Piana e al bordo della stessa, nonché dalle portate prelevate dai pozzi ad uso irriguo e sversate nei canali stessi.

### 1.3 Aspetti geologici ed idrogeologici

Il bacino del Fucino si estende per circa 900 km<sup>2</sup> nell'Appennino laziale-abruzzese ed è morfologicamente dominato dalla omonima vasta Piana alluvionale, ampia oltre 200 km<sup>2</sup>. Questa depressione, la cui origine è connessa agli intensi fenomeni tettonici sin- e post-orogenetici, è circondata da rilievi carbonatici meso-cenozoici, fratturati e carsificati anche molto intensamente, delimitati da linee tettoniche compressive e disgiuntive, che determinano il ribassamento dei carbonati circostanti sotto i depositi recenti della Piana (Burri et al., 2002).

La Piana nei corso dei millenni ha subito un rapido riempimento da parte di sedimenti alluvionali detritici e lacustri, il cui spessore risulta attualmente di diverse centinaia di metri e tale da superare in alcuni settori i 1000 m (Giraudi, 1994). Ai margini della Piana, il contatto tra i depositi carbonatici e quelli alluvionali recenti è reso complesso dall'interdigitazione dei sedimenti detritici di versante con i depositi fluvio-lacustri.

La situazione idrogeologica è altrettanto complessa: gli acquiferi regionali carbonatici vengono drenati alla loro base da sorgenti di portata elevata, ma interagiscono anche con le falde alluvionali e con il sistema idrografico superficiale (Boni et al., 1986; Celico, 1983).

Come conseguenza, la portata dei canali artificiali è costituita non solo da acque superficiali, ma anche e soprattutto dai copiosi apporti di acque sorgive erogate da emergenze poste in prevalenza sul bordo della Piana,

con portate abbastanza regolari anche in periodo arido. Le principali sorgenti sono alimentate dalle dorsali carbonatiche circostanti e sono ubicate in prevalenza sul bordo sud-orientale del Fucino (gruppo Trasacco, gruppo Ortucchio; gruppo Venere, di portata media complessiva indicata in letteratura pari a  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  circa) e nel settore settentrionale (paludi di Celano, zona Tre Monti, ciascuna con portate variabili da  $0.1$  a  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Parte delle acque sotterranee ricevute dalla Piana vengono drenate direttamente nell'alveo dei diversi canali artificiali (sorgenti lineari), con portate stimate in passato nell'ordine di qualche  $\text{m}^3/\text{s}$ . La disponibilità idrica totale relativa alle acque sorgive negli anni '70 corrispondeva a circa  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . La Piana costituirebbe, dunque, un'unità idrogeologica a se stante, caratterizzata da alternanze di sedimenti detritico-alluvionali (ghiaie, sabbie, ed argille, la cui permeabilità risulta estremamente variabile in funzione della granulometria).

Infine, le acque effettivamente affluite sul territorio della Piana vanno ad alimentare in prevalenza il reticolo idrografico e solo in minima parte penetrano nel suolo, con possibilità di raggiungere la falda idrica alluvionale, a causa della limitata permeabilità dei sedimenti presenti sulla superficie. È ipotizzabile quindi che la falda idrica della Piana venga alimentata prevalentemente da travasi sotterranei provenienti dagli acquiferi carsici circostanti.

## 2. Inquadramento dell'attività di modellazione del reticolo idrografico, approccio metodologico e obiettivi dell'attività.

### 2.1 Introduzione

La presente relazione descrive l'analisi idraulica del reticolo di bonifica presente nella piana e del suo principale affluente, il fiume Giovenco. Tale studio ha lo scopo di verificare il funzionamento attuale del sistema di drenaggio della Piana, determinarne le criticità e individuare gli interventi più consoni per la messa in sicurezza del territorio in occasione degli eventi di piena determinati da eventi pluviometrici di tempo di ritorno dato.

Questa componente dello studio è stata condotta con l'ausilio di uno strumento software di simulazione, InfoWorks ICM, e ha permesso di condurre verifiche di dettaglio e di individuare e valutare l'efficacia di diverse opzioni d'intervento. Il software di simulazione utilizzato permette di simulare l'idrologia e l'idraulica a moto vario del reticolo dei canali di bonifica della Piana, delle strutture particolari come paratoie, salti, sifoni e idrovore. Il sistema informatico permette di simulare il comportamento del reticolo sollecitato da eventi meteorici particolarmente intensi sia all'interno dei canali stessi con un approccio computazionale monodimensionale, che l'allagamento della piana con un approccio bidimensionale.

In appendice A è riportata la descrizione del background matematico dell'applicativo software utilizzato.

### 2.2 I dati a disposizione

#### 2.2.1 Cartografia di base

I dati utilizzati per la costruzione del modello idraulico col software di simulazione InfoWorks ICM sono quelli raccolti dalle precedenti fasi di studio.

Il programma può utilizzare cartografia, ortofoto e modelli digitali del terreno (DTM) di diverso formato sia come sfondo per la rappresentazione della rete idraulica di fiumi e canali che per il calcolo numerico. Nella fase iniziale di digitalizzazione è di fondamentale importanza la disponibilità di una cartografia adeguata.

Si riporta di seguito una breve descrizione della cartografia utilizzata per l'implementazione del modello:

#### Cartografia IGM 1:100.000

La base cartografica IGM, in scala 1:100.000, è tratta dal geodatabase del Piano di Tutela delle Acque (Regione Abruzzo, 2005): i file in formato TIF sono il risultato della scansione degli originali cartacei appartenenti alla serie 100/V in scala 1:100.000 dell'Istituto Geografico Militare.

La carta è derivata dai rilievi alla scala 1:25000 ed è georiferita in coordinate UTM fuso 33.

#### Carta Tecnica Regionale 1:25.000

La base cartografica in scala 1:25.000 è costituita dalla carta Tecnica Regionale in B/N.

Questa carta è stata derivata dai file raster della carta topografica regionale alla scala 1:25.000 (edizione 2000).

I raster in formato TIF in B/N sono georeferenziati in coordinate UTM fuso 33 e sono quindi dotati di relativo file TFW di georeferenzazione. Essi derivano dalla scansione degli originali cartacei: la risoluzione a terra è di 3.18 metri.

La carta Tecnica Regionale riprende direttamente la serie 25/V in scala 1:25.000 dell'Istituto Geografico Militare ed è aggiornata, per quel che concerne la viabilità, dalla Regione Abruzzo.

I fogli che coprono l'area d'indagine sono 14: 359e, 359o, 360e, 360o, 368e, 368o, 369e, 369o, 377e, 377o, 378e, 378o, 390e, 391o.

È inoltre stata fornita dal Consorzio di Bonifica "Ovest" una porzione, limitata alla Piana del Fucino della carta Tecnica Regionale a colori in scala 1:25.000. Valgono qui le stesse considerazioni fatte precedentemente, con l'unica differenza che i TIF conservano i colori originali della serie 25/V dell'Istituto Geografico Militare (nero, bistro e azzurro) e presentano una risoluzione a terra migliore (2.12 metri) (Figura 2.1).

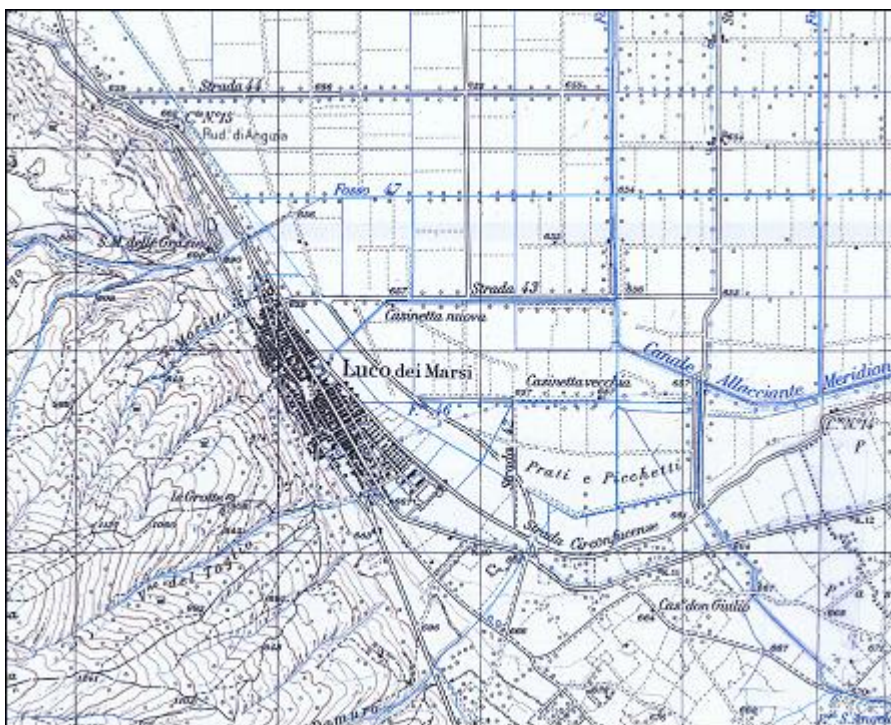


Figura 2.1 - Stralcio della Carta Tecnica Regionale a colori in scala 1:25.000 (i colori utilizzati sono: azzurro per l'idrografia, bistro per il rilievo e nero per l'antropico e la toponomastica)

## 2.2.2 Ortofoto

Nell'ambito del precedente studio l'Autorità di Bacino ha fornito le ortofoto del Volo ITALIA 2000 realizzate dalla Compagnia Generale Riprese Aeree S.p.A. di Parma, in formato digitale raster.

Si tratta di fotografie aeree a colori ortoriferite nel sistema di coordinate chilometriche UTM33 con una risoluzione a terra pari a 1 metro. Il taglio delle ortofoto corrisponde a quello dei fogli della Carta Tecnica 1:10.000 (a sua volta basato su quello della nuova serie delle Carte IGM 1:50.000).

Il notevole dettaglio e la qualità dei colori le rendono particolarmente adatte per l'analisi e la possibilità di discriminare fra le diverse forme d'uso del suolo. Per un'analisi più approfondita è necessaria una certa esperienza di fotointerpretazione e soprattutto delle verifiche in campo per le aree meno leggibili (aree in ombra).

## 2.2.3 Dati geologici, idrogeologici e d'uso del suolo

Per una completa definizione dei dati che hanno portato all'individuazione e caratterizzazione delle unità idrologiche dell'area di studio si è fatto riferimento alle elaborazioni svolte nell'ambito delle altre fasi di questo progetto (Caratterizzazione idrologica, geologica e idrogeologica).

I dati necessari per la definizione dell'uso del suolo, del tipo di suolo e delle caratteristiche idrogeologiche d'ogni sottobacino dell'area d'indagine sono stati reperiti dal *Piano di Tutela delle Acque* della Regione Abruzzo (2005).

Nel Piano di Tutela delle Acque è stato possibile reperire ed analizzare la "Carta Geolitologica" in scala 1:250.000 e la "Carta d'uso del suolo" in scala 1:25000, anno 2000. Questa carta è stata realizzata partendo dalle ortoimmagini digitali dell'AIMA del 1997 (scala 1:10000) e dalle immagini del satellite Landsat TM5 (pixel di 30x30 metri), acquisite in tre passaggi corrispondenti alla tarda primavera, all'estate e all'inverno per coprire fasi fenologiche significative della vegetazione naturale e delle principali colture agricole. La legenda deriva direttamente da quella Corine Land Cover. La legenda si articola su 3 livelli, il primo dei quali comprende 5 voci generali che abbracciano le maggiori categorie di copertura sul pianeta, il secondo 15, e il terzo 44, con voci più dettagliate.

La classificazione del primo livello è la seguente:

- superfici Artificiali (Ambiente urbanizzato);
- superfici agricole utilizzate (Ambiente coltivato);
- superfici boscate e ambiente semi-naturale;
- ambiente umido;
- ambiente delle acque.

#### 2.2.4 Modello digitale del terreno – LIDAR

Il modello digitale del terreno (DTM) è stato utilizzato come base per ricavare le quote di tutti i canali implementati nel modello. Il DTM può essere inoltre utile a visualizzare il territorio in 3D, rendendo molto chiara la disposizione spaziale della rete.

Il modello digitale del terreno utilizzato per l'area di studio è stato ricostruito dal volo Lidar (Light Detection and Ranging) appositamente effettuato. Il rilievo ha coperto una superficie di 365 km<sup>2</sup> con un elevato grado di dettaglio (densità delle misure pari a 4 punti/m<sup>2</sup>). Tali dati sono poi stati appositamente rielaborati al fine di ottenere diversi livelli informativi, in particolare ai fini della modellazione si è utilizzato il modello del terreno con risoluzione 0.25 m del solo terreno, ad esclusione cioè di tutti i punti rappresentativi di elementi sopra terra, come ad esempio vegetazione, ponti, edifici.

Di seguito si riportano due immagini della visualizzazione in Info Works del DTM ricavato dal rilievo Lidar della zona di Borgo 8000 e di alcuni canali della Piana.



Figura 2.2: Visualizzazione in InfoWorks del DTM con risoluzione 0,25 m ricavato dal rilievo Lidar della zona di Borgo Ottomila, è possibile osservare il reticolo dei canali e alcune opere speciali come vasche e idrovore.

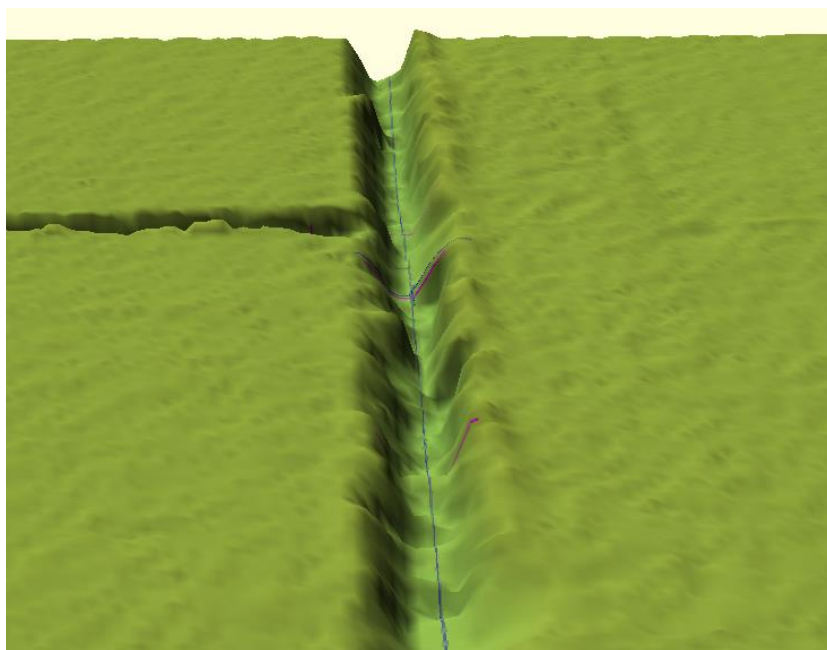


Figura 2.3: Visualizzazione tridimensionale in InfoWorks del DTM con risoluzione 0,25 m ricavato dal rilievo Lidar di alcuni canali della Piana del Fucino, dettaglio di alcuni canali.

Per la completa descrizione dei dati topografici rilevati si faccia riferimento all'Elaborato 2.3.1 "Rilievi topografici – Relazione illustrativa delle indagini topografiche realizzate".

### 2.3 Rete idrografica

Il modello digitale del terreno ricostruito dai dati Lidar ha permesso di implementare nel modello idrologico-idraulico le informazioni tridimensionali inerenti il piano campagna, gli argini e le sponde dei canali. Data la presenza d'acqua all'interno del reticolo idrografico per alcuni canali non è stato possibile, dai dati Lidar, ricostruire le quote di fondo e quindi le sezioni.

Le caratteristiche geometriche e topografiche dei corsi d'acqua (aste montane e canali di bonifica) sono state quindi ricavate analizzando diverse fonti tra le quali si citano le principali:

- Autorità di Bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno (2005a): Piano Stralcio vincoli ambientali sull'utilizzo della risorsa idrica superficiale bacini dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno;
- Regione Abruzzo (2005): Piano di Tutela delle Acque;
- Ente Regionale Sviluppo Agricolo (1981): Piano Generale di regimazione delle acque confluenti nel Bacino del Fucino, I.T.S. S.p.A., Roma;
- Petitta M., Cappelli G., (1994): Inquadramento idrologico del bacino del Fucino. In: "Il lago Fucino e il suo emissario". Carsa, Pescara; pp. 46-61;
- Mazzella E. (2005): Miglioramento della rete di drenaggio delle acque della Piana del Fucino e possibilità di sfruttamento idroelettrico. Tesi di Master Universitario, Politecnico di Milano - Sede territoriale di Cremona. Documento utile per un inquadramento generale del funzionamento idraulico del sistema di canali della Piana del Fucino.
- Abaco delle sezioni e profili del reticolo di bonifica della Piana del Fucino: il documento non riporta ne autori ne data ma si riferisce allo schema di progetto originale del sistema di bonifica della Piana (probabilmente risalente agli anni 50). Questo documento è stato quello da cui si sono desunte la maggior parte delle informazioni di base plano-altimetriche e di geometria del reticolo di bonifica, aggiornandole successivamente sulla base di documenti o progetti più recenti e specifici sopralluoghi.



Le fonti analizzate hanno permesso innanzitutto di ricostruire l'andamento planimetrico ed altimetrico dei corsi d'acqua, l'implementazione del modello Idraulico ha permesso di verificare ed approfondire il complesso funzionamento dei canali della rete di bonifica così come descritto in sintesi di seguito.

I corsi d'acqua drenanti i rilievi posti a corona della Piana del Fucino confluiscono nei due Canali Allacciati (settentrionale e meridionale) e costituiscono le "Acque Alte" (si veda la Figura 2.4).

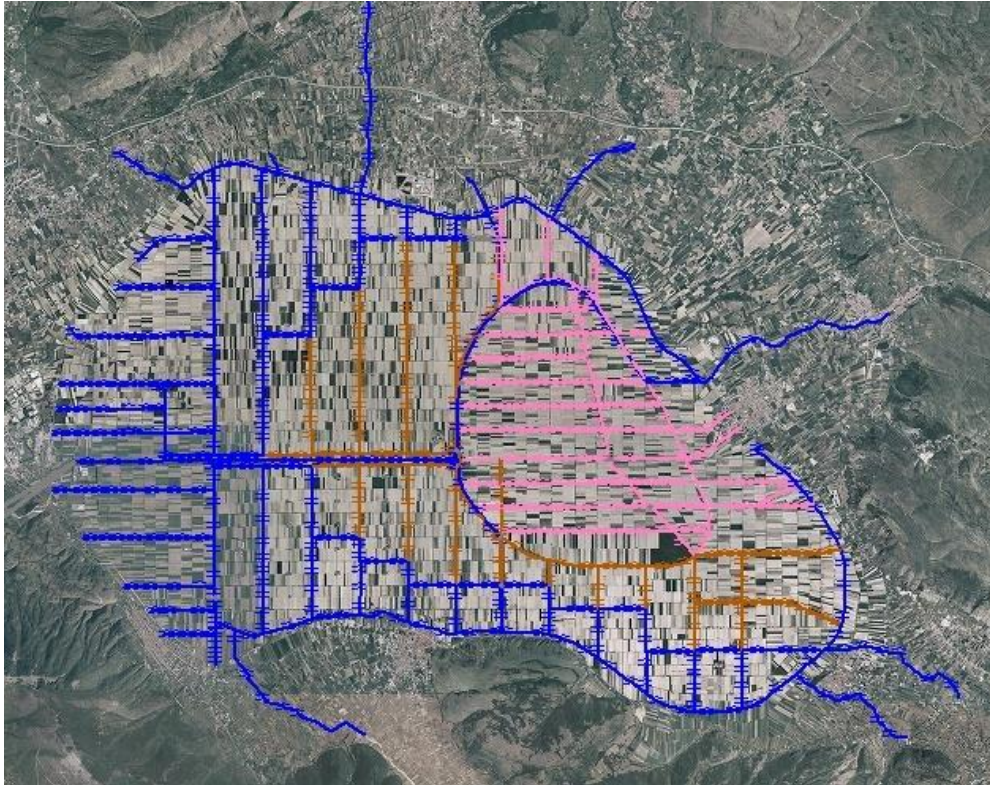


Figura 2.4: Rappresentazione delle Acque alte (blu), Medie (marrone) e Basse (rosa) nella Piana del Fucino.

Queste a loro volta si immettono nel Canale Collettore (Canale Torlonia). A tale collettore giungono anche le "acque medie", ossia quelle circolanti nei fossi della Piana, all'interno della cintura costituita dai Canali Allacciati. Le "acque basse" si raccolgono nel Bacinetto, da cui sono sollevate tramite un impianto idrovoro e convogliate nel Canale Collettore. Il Canale Collettore, che convoglia tutte le acque all'Incile dove hanno origine i due emissari in galleria, è formato da tre canali paralleli, di cui i due estremi raccolgono le acque provenienti da nord e da sud. Dei corsi d'acqua naturali che s'immettono nella Piana del Fucino solamente il fiume Giovenco possiede portate estive non nulle. Tali corsi d'acqua sono (in senso orario, a partire da nord): il Rio S. Potito, il Torrente La Foce, il Rio d'Aielli, il fiume Giovenco, il Rio di Lecce, il Fossato di Rosa.

Come già accennato nei paragrafi precedenti la portata dei canali della Piana Fucino è fornita non solo dai contributi dei corsi d'acqua immissari, ma dai copiosi apporti d'acque sorgentizie erogate dalle emergenze poste in diversi settori della Piana e al bordo della stessa, nonché dalle portate prelevate dai pozzi ad uso irriguo e versate nei canali stessi.

## 2.4 Opere idrauliche esistenti

Le principali opere idrauliche esistenti nella Piana sono:

1. opere poste all'Incile: si è eseguito un sopralluogo dell'opera di sbarramento e si sono ricavate le caratteristiche principali dei due tunnel (emissari) che costituiscono gli unici due punti di evacuazione delle portate della Piana dalla Figura 2.5 (documento cartaceo messo a disposizione dall'ARSSA).

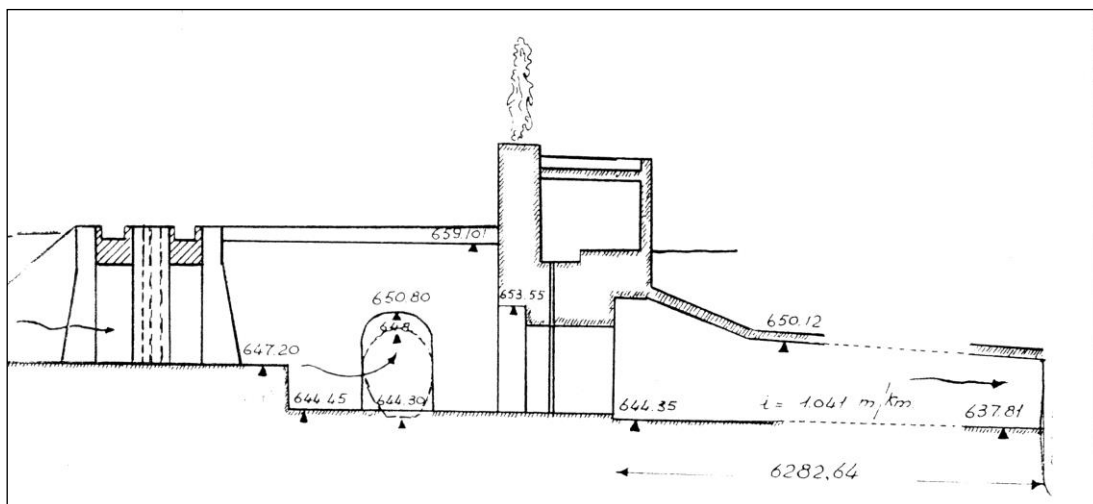


Figura 2.5: Schema idraulico dell'Incile

2. Stazione di sollevamento di Borgo Ottomila: si sono ottenuti i dati di interesse ai fini della modellazione idraulica da sopralluogo e da riscontri degli operatori ARSSA. In particolare si sono rappresentate le 5 idrovore presenti nella stazione di sollevamento con una portata massima sollevabile pari a  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  ciascuna. Si sono utilizzati livelli di avviamento progressivi equidistanti di 10 cm l'uno dall'altro, la prima idrovora viene avviata quando il livello raggiunge a monte delle pompe il valore di 647.8 m s.l.m.m. mentre i livelli di spegnimento progressivi sono di 20 cm inferiori al livello di avviamento (Figura 2.6).



Figura 2.6: Rappresentazione della stazione di sollevamento di Borgo Ottomila in InfoWorks ICM con evidenziati nella finestra i livelli di funzionamento della prima idrovora.

3. Paratoie: non esistendo un vero e proprio catasto delle opere si è reso necessario ispezionare le paratoie presenti nella Piana e creare un apposito database delle opere esistenti (si veda paragrafo successivo). Vi sono alcune paratoie che sono ancora funzionali e operative come per esempio quella importante posta nel punto di intersezione tra fiume Giovenco e il Canale Allacciante Settentrionale lato est. Vi sono poi una gran

moltitudine di paratoie di piccole e medie dimensioni che realizzano la divisione tra i canali separatori (canali che separano le acque alte dalle medie) e tra gli allacciamenti esterni e i fossi numerati. Durante il sopralluogo effettuato si è però constatato che queste paratoie sono spesso state rimosse o divelte oppure, pur essendo ancora in essere, sono usurate o non mantenute tali cioè da non essere praticamente più efficaci.

## 2.5 Campagne di misura integrative – rilievi topografici

Il rilievo Lidar e la documentazione disponibile hanno permesso di modellare il reticolo idrografico e le opere idrauliche principali. Le informazioni disponibili non erano sufficienti per implementare nel modello anche le restanti numerose opere presenti nella Piana come ponti, paratoie, sifoni, vasche ecc. Tali opere sono importanti ai fini di una perfetta rappresentazione della geometria idraulica.

Sono state quindi utilizzate in parte le informazioni acquisite con i rilievi svolti nell'ambito del precedente studio (2006). Le informazioni sono state verificate ed integrate per mezzo di ulteriori indagini e rilievi. La descrizione completa dei dati topografici rilevati è riportata nell'Elaborato 2.3.1 *"Rilievi topografici – Relazione illustrativa delle indagini topografiche realizzate"*.

Le informazioni acquisite nelle campagne di campagne di misura ed implementate nel modello sono schematizzate in Tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Informazioni raccolte a seguito di campagne di misura e verifiche in sito.

<b>PONTI</b>	
Rilievo geometrico dei ponti che costituiscono un apprezzabile restringimento dei canali o per i quali la volta sia più bassa delle sponde. In caso contrario non si è rilevato nulla	
<b>PARATOIE</b>	
1	Numero Paratoie
2	Altezza paratoia (altezza dello schermo), se vi sono più paratoie con diverse H rilevarle tutte in più campi distinti
3	Larghezza paratoia se vi sono più paratoie con diverse H rilevarle tutte in più campi distinti
4	Luce libera di passaggio
5	Scalino, se c'è uno scalino a valle della paratoia tale per cui lo scorrimento del canale di valle è più basso della soglia della paratoia
6	Data rilievo
7	Foto
<b>IDROVORE</b>	
1	Livello fondo aspirazione
2	Livello attacco pompe
3	Livello stacco pompe
4	Curva caratteristica
5	Data rilievo
6	Foto
<b>SIFONI</b>	
1	Forma sezione
2	Larghezza
3	Altezza
4	Livello monte
5	Livello valle
6	Data rilievo
7	Foto
<b>VASCHE</b>	

1	Quota fondo
2	Altezza (distanza fondo piano campagna circostante)
3	Superficie in pianta
4	Data rilievo
5	Foto

#### CANALI

1	Forma sezione trasversale
2	Larghezza max
3	Altezza max
4	Materiale
5	Note se necessarie
6	Data
7	Foto

Rispetto ai dati riportati nella documentazione raccolta e in particolare nell'abaco "Canalizzazione del Fucino" si sono rilevate consistenti differenze soprattutto per quanto riguarda i canali secondari, in particolare sono stati individuati canali non presenti in abaco e canali non più esistenti. Sono state riscontrate importanti differenze in connessioni e deviazioni rispetto ad i dati in possesso. Queste discrepanze sono ovviamente derivate dalla realizzazione di opere successive a quelle del progetto di riferimento e a piccole sistemazioni/modifiche fatte negli anni durante manutenzioni delle canalizzazioni.

Le misure eseguite hanno portato a determinare che numerosi corsi d'acqua sono stati scavati/risagomati nel corso degli anni per una profondità di scavo che varia da 1 m a 1,5 m; di conseguenza anche le sezioni trasversali di questi hanno subito le relative modifiche.

I sopralluoghi realizzati in diversi periodi dell'anno hanno inoltre permesso di constatare il grado di mantenimento di canali e opere idrauliche permettendo così di valutare i parametri che rappresentano il loro stato, come la scabrezza.

Bisogna in ogni modo sottolineare che, data la vastità della rete e delle numerose informazioni, non è stato possibile eseguire un rilievo in campo di dettaglio approfondito poiché ciò esulava dalle competenze del seguente progetto. Molti dati sono quindi stati desunti e assunti dalle considerazioni fatte in sito (Figura 2.7).

I dati raccolti sono stati direttamente implementati nel modello InfoWorks ICM: foto ed informazioni sono consultabili direttamente dall'interfaccia del software.



Figura 2.7: La fotografia a destra rappresenta una paratoia e quella di sinistra uno dei canali rilevati.

## 3. Costruzione del modello idrologico-idraulico

### 3.1 Introduzione

Il modello matematico utilizzato per la simulazione del reticolo di canali presente nella Piana del Fucino è stato implementato utilizzando il software InfoWorks ICM, un prodotto dell'azienda internazionale Innowyze, che utilizza una descrizione del tipo "rami-nodi" del sistema di scolo delle acque, facilitando così la rappresentazione discreta del modello fisico e la soluzione matematica delle equazioni di moto vario (De Saint Venant) che costituiscono le basi matematiche del modello. InfoWorks permette anche di simulare la trasformazione afflussi/deflussi in modo completamente integrato con quella idraulica a moto vario. Questo permette di ottenere previsioni delle onde di piena (portate/tiranti/volumi/allagati ecc) sollecitando il sistema con una pioggia di riferimento. Il modello permette altresì di simulare periodi di magra con immissioni da sorgenti e altri influssi e estrazioni ad uso irriguo. In Appendice A "Descrizione del software InfoWorks ICM" vi sono informazioni dettagliate sui principi di simulazione adottati.

### 3.2 Rappresentazione nel modello del reticolo di bonifica

La rappresentazione del reticolo di bonifica corrisponde alla digitalizzazione dei dati raccolti e descritti nel Capitolo 2 di questa relazione. InfoWorks ICM discretizza il modello con elementi lineari "rami" ed elementi puntuali "nodi".

**I rami:** gli elementi lineari rappresentabili possono essere fossi, canali, fiumi, torrenti ma anche pompe, paratoie, sifoni ecc. Le proprietà associate ai rami sono il tipo/forma della sezione, la lunghezza, la pendenza (o meglio il livello assoluto di scorrimento nelle sezioni di monte e valle da cui il software ricava la pendenza) inoltre è possibile inserire caratteristiche non geometriche come la scabrezza.

La rete è stata digitalizzata nel software InfoWorks direttamente usando gli strumenti del programma, le informazioni necessarie per la definizione delle caratteristiche idrauliche, livelli di scorrimento e sezioni trasversali dei canali sono state reperite dall'abaco "*Canalizzazione del Fucino*": tale abaco contiene, per ognuno dei tratti in cui è suddivisa la rete di canalizzazioni della Piana, la sezione trasversale, le quote di monte e di valle, la scabrezza idraulica, ed altri dati caratteristici. Come precedentemente accennato, l'abaco è stato fornito dagli Enti Gestori (ARSSA e Consorzio di Bonifica) ed è un documento certamente datato (si riferisce all'impianto progettuale delle canalizzazioni della Piana ai tempi della Bonifica avvenuta nei primi anni 50). Tali informazioni, come descritto ai capitoli precedenti, sono quindi state aggiornate per rappresentare lo stato attuale dei canali. In particolare, la forma attuale dei canali e le quote sono state aggiornate sulla base del rilievo Lidar effettuato.

In totale sono stati modellati fiumi, canali e fossi per circa 320 km di lunghezza con tecnica monodimensionale; tale rete si collega ad un dominio di calcolo bidimensionale di oltre 14,000 ettari, corrispondente alla piana; il calcolo idrologico (trasformazione afflussi-deflussi) è stato realizzato su un bacino totale di circa 86,000 ettari, suddiviso in 35 sottobacini oltre alla piana.

Nel processo di schematizzazione della rete idraulica, sono stati rappresentati tutti i canali presenti nella piana attraverso la definizione di un numero adeguato di sezioni trasversali per ogni canale, derivate da rilievo lidar oppure rilevate topograficamente, la sezione di calcolo idraulico del canale, così come la sua pendenza, risulta dall'interpolazione tridimensionale delle sezioni descritte. In corrispondenza delle intersezioni tra canali, immissioni, manufatti o altri punti notevoli sono stati inseriti dei nodi

**I nodi:** rappresentano la confluenza dei canali superficiali oppure anche altri punti di interruzione definiti per una più dettagliata discretizzazione del reticolo. Inoltre, per mezzo dell'elemento "nodo", è possibile rappresentare

anche elementi di immagazzinamento idraulico (vasche) con le rispettive caratteristiche di quota e capacità di invaso.

L'unica caratteristica geometrica dei nodi standard è la quota del piano campagna, ricavata dal DTM Lidar.

Alcuni nodi, insieme ad alcuni rami, ricoprono un ruolo importante nella rappresentazione schematica della rete che si compie in InfoWorks ICM, rappresentano, infatti, il luogo d'immissione dei deflussi superficiali; tutto il deflusso di ciascun sottobacino di calcolo è schematizzato dal software in modo tale da convergere in un unico punto (nodo) oppure in maniera distribuita lungo un ramo; generalmente si è utilizzata la tecnica dell'attribuzione al nodo per i bacini esterni alla piana e l'attribuzione distribuita sui rami per i sottobacini interni alla piana.

I nodi sono trattati sulla base dell'equazione di continuità tenendo conto del volume proprio del nodo e della congruenza dei livelli.

La Figura 3.1 mostra come esempio il profilo longitudinale del Fosso 8, Canale separatore settentrionale.

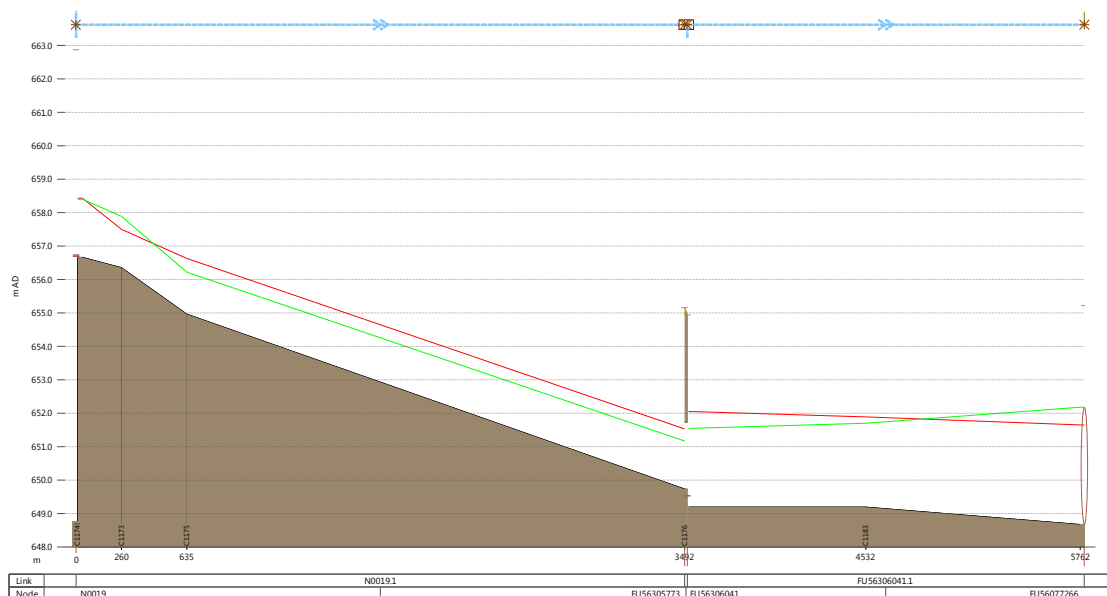


Figura 3.1: Profilo longitudinale del Fosso 8 e successiva immissione nel Canale Separatore Settentrionale, si possono notare i livelli di fondo canale (marrone) e i livelli delle sponde (verde e rosso).

Per quanto riguarda le scabrezze delle sezioni si sono adottati i seguenti valori secondo Manning; tali valori sono stati desunti da sopralluoghi in campo:

1. per gli emissari: coefficiente di Manning pari a:  $n = 0,016 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  per il Nuovo Emissario,  $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  per il Vecchio Emissario (tratto rivestito) e  $n = 0,033 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  per il tratto a parete di scavo del Vecchio Emissario;
2. per i canali principali:  $0,050 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ;
3. letto e sponde dei canali secondari:  $0,090 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ;
4. per i fiumi e torrenti in ingresso nella Piana:  $0,100$  e  $0,105 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ .

La Figura 3.2 mostra lo stato manutentivo di diversi canali dalla cui analisi si sono ottenute informazioni utili per la determinazione dei valori di scabrezza utilizzati nel calcolo mentre la Figura 3.3 mostra una mappa tematica che individua le quattro classi di scabrezza adottate nel modello InfoWorks ICM.

### 3.3 Bacino di competenza al nodo

Il bacino di competenza ad ogni nodo è stato attribuito con varie modalità e per vari propositi.



Figura 3.2: Reticolo idrografico, rappresentazione a colori dei diversi coefficienti di scabrezza secondo Manning in  $m^{-1/3}$  s.

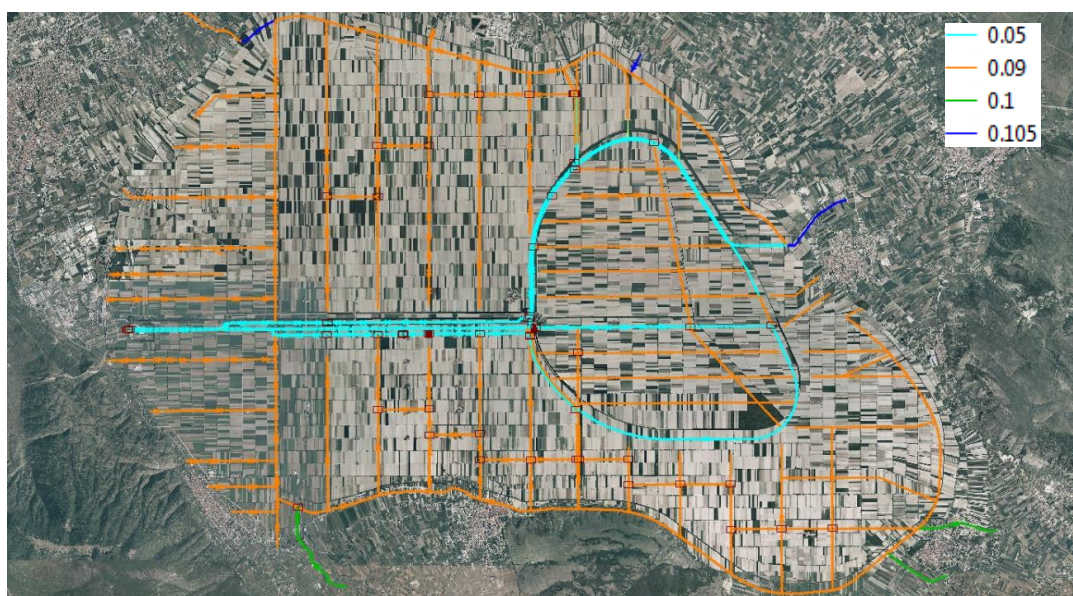


Figura 3.3: Reticolo idrografico, rappresentazione a colori dei diversi coefficienti di scabrezza secondo Manning in  $m^{-1/3}$  s.

### 3.3.1 Modalità di tracciamento dei sottobacini

I bacini esterni alla Piana sono di dimensioni importanti (centinaia o migliaia di ettari) e sono stati tracciati seguendo i confini naturali del territorio determinati dagli spartiacque. A questi grandi bacini è associabile un fiume/torrente competente al reticolo esterno della Piana che poi più a valle interessa il reticolo di canali interni. Questi bacini hanno una pendenza media considerevole. L'esatta delimitazione dei sottobacini coincide ovviamente con lo stesso territorio considerato dal precedente studio che si proponeva di calcolare i deflussi a scala mensile.

I bacini interni alla Piana sono invece di dimensioni ben più limitate e sono tendenzialmente molto pianeggianti. Questi sono stati tracciati con una metodologia geometrica facendo sì che ad ogni canale della rete fosse attribuita un'area di competenza appropriata. Tale suddivisione è stata operata con dei criteri geometrici (poligoni di Thiessen) tenendo in ogni caso conto degli spartiacque presenti dalla giacitura del terreno. L'attribuzione di un'area corretta ad ogni singolo sottobacino interno al nodo non è fondamentale ai fini di ottenere un buon modello mentre è piuttosto importante che l'attribuzione sia corretta per i grandi sottobacini esterni che competono alle varie aste fluviali.

Il risultato di tale suddivisione tra bacini interni e bacini esterni è mostrato nella Figura 3.4 dove, evidenziati in azzurro, sono presentati i sottobacini interni e in magenta i bacini esterni.

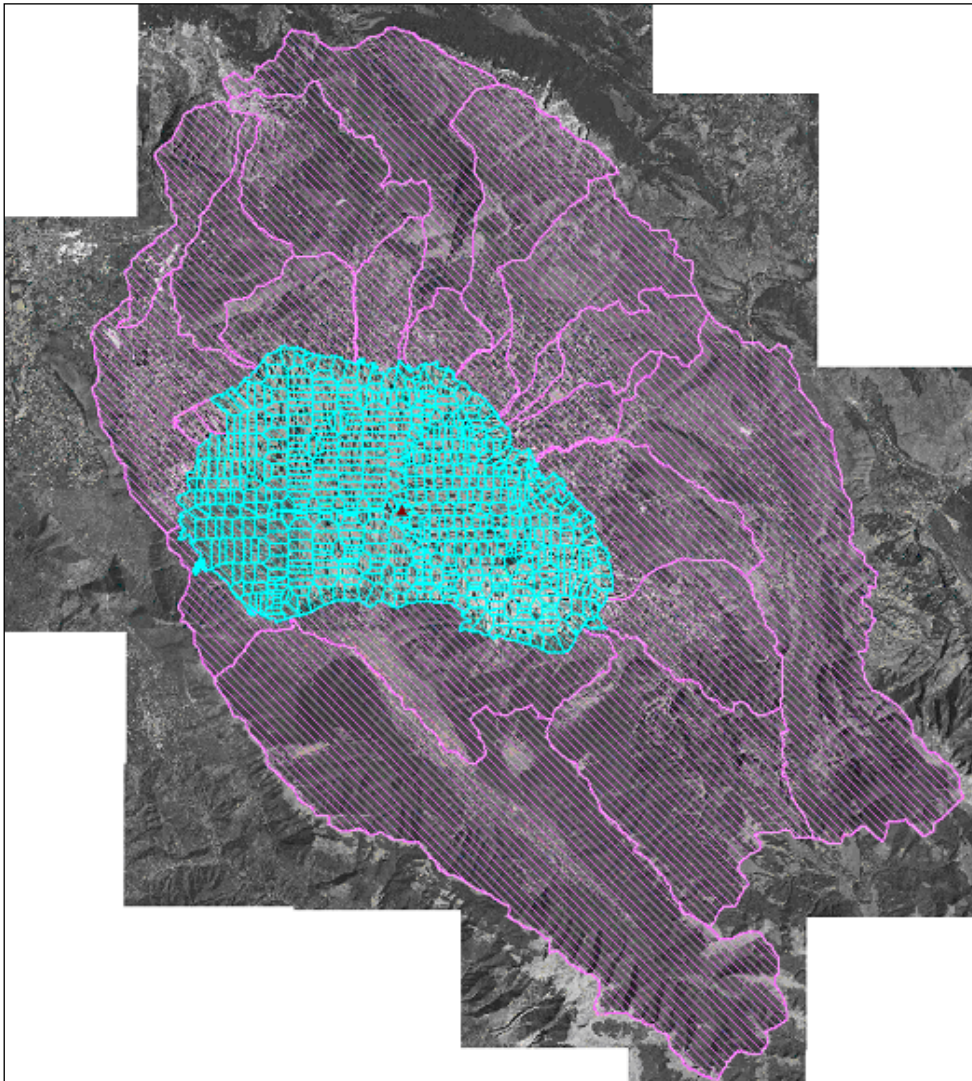


Figura 3.4: Caratterizzazione dei sottobacini presenti nel Fucino, in magenta sono evidenziati i sottobacini esterni ed in azzurro i sottobacini interni alla Piana.



### 3.3.2 Scopo del tracciamento dei sottobacini

I sottobacini costituiscono l'unità idrologica del calcolo idraulico, sono infatti le caratteristiche geometriche (area e pendenza) e idrologiche del sottobacino a determinare la trasformazione afflussi deflussi, fornendo le portate in ingresso al reticolo idraulico in funzione degli idetogrammi utilizzati per ogni simulazione. Da queste considerazioni risulta chiaro come il contributo principale di deflusso deriva dai bacini estesi esterni sia perché di ampie dimensioni ma anche perché sono di pendenza superiore.



## 4. Studio idraulico di dettaglio

### 4.1 Introduzione

Le prime analisi sono state condotte con il modello InfoWorks ICM e sono relative alla taratura e la validazione del modello. A tal fine sono state ricostruite le caratteristiche di un adeguato numero di eventi storici di esondazione (realmente accaduti) nell'area di indagine, attraverso l'analisi critica dei dati relativi a:

- registrazioni di pluviometri e idrometri presenti nell'area di indagine in occasione di eventi estremi;
- foto o altre evidenze storiche dell'estensione dell'esondazione;
- informazioni sullo stato delle paratoie dell'incile durante il particolare evento alluvionale (aperte-chiuse-grado di parzializzazione).

Obiettivo della taratura è stato quello di determinare i parametri del modello più consoni per ottenere una simulazione il più possibile fedele degli eventi effettivamente accaduti. I parametri principali che sono stati determinati attraverso la fase di calibrazione sono i parametri idrologici dei sottobacini afferenti alla piana e le scabrezze dei corsi d'acqua.

Gli ietogrammi di progetto (per i diversi tempi di ritorno) per il Bacino del Fucino, sono stati ricavati nell'ambito del presente studio partendo dalle serie storiche delle altezze di pioggia. Inoltre per tener conto, secondo quanto previsto dalla Direttiva 2007/60/CE e dal DL.vo 49/2010, delle conseguenze dei cambiamenti climatici sul verificarsi delle alluvioni, è stato implementato un modello per la determinazione degli scenari idrologici di cambiamento climatico.

Come modello idrologico per la simulazione del processo afflusso-deflusso occorsi durante gli eventi storici è stato utilizzato il metodo Fixed, che consente la definizione, per ogni superficie, di percentuale costante di pioggia che concorre alla formazione del deflusso.

Le simulazioni idrauliche sono state condotte simulando diversi scenari in funzione dei possibili rischi di esondazione sul fiume Liri che determinano la regolazione delle paratoie all'incile.

I risultati principali forniti dal modello idrologico-idraulico sono costituiti dalle mappe di esondazione (tiranti, velocità) per tutta l'area simulata (Piana e asta del fiume Giovenco da monte di Pescina alla Piana) per ciascuno dei tempi di ritorno indagati. I risultati della mappatura delle aree a rischio sono riportati negli Elaborati 2.5.\* *"Mappatura delle aree a rischio"*.

In questo capitolo vengono descritte le metodologie adottate per le simulazioni eseguite per eventi di pioggia intensi e capaci di mettere in crisi il sistema di bonifica nella sua attuale configurazione creando allagamenti sul piano campagna. Nei paragrafi seguenti si discute quindi sia l'impostazione modellistica adottata che i risultati ottenuti nelle simulazioni.

### 4.2 Eventi storici di allagamento

Al fine di individuare gli eventi storici idonei per la validazione del modello idrologico-idraulico sono stati analizzati i dati reperiti nell'ambito della fase di raccolta (Figura 4.1).

I dati pluviometrici utilizzati per lo studio degli eventi di allagamento sono principalmente quelli forniti dal CAR (Centro Agrometeorologico Regionale):

- Banca Dati Meteorologica Corrente: dati di pioggia orari dal 1999 a novembre 2011

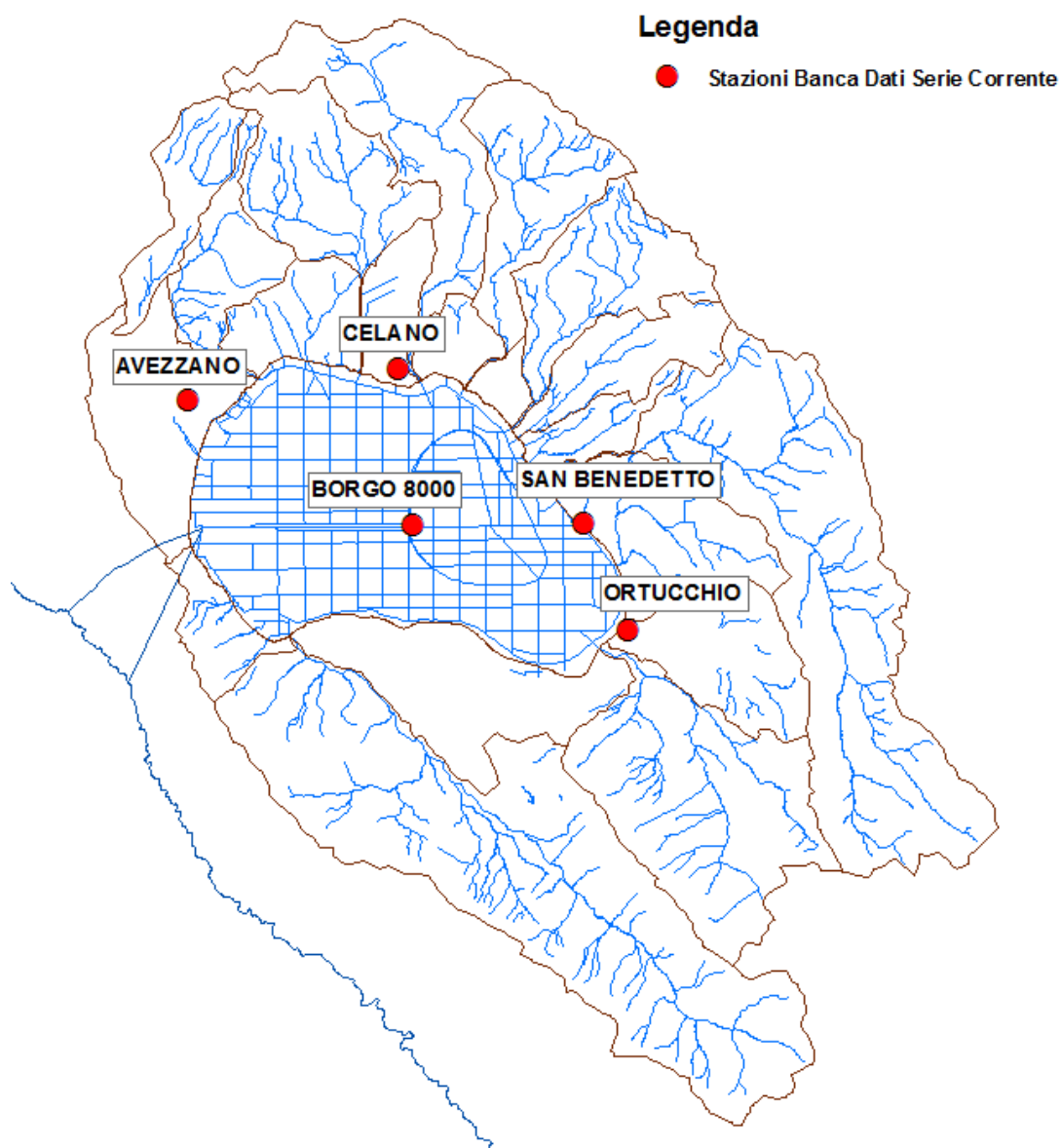


Figura 4.1 – Pluviometri della Banca Dati Meteorologica Corrente ricadenti all'interno del bacino del Fucino.

Da una prima analisi dei dati si è deciso di escludere l'utilizzo dei dati rilevati dal pluviometro di Borgo 8000 perché troppo incongruenti e fuori scala rispetto agli altri. La ricostruzione del dato è risultata non possibile.

Sono state inoltre utilizzate le informazioni contenute nei seguenti documenti:

- Studio Idrologico ed Idrodinamico del bacino del Fucino - Direzione Protezione Civile e Ambiente – Centro Funzionale d'Abruzzo – Settore Idro – 18/10/2011
- Rapporto di evento del 16-18 Marzo 2011 – Centro Funzionale Regione Lazio

Sono stati individuati 3 eventi di tipo estremo che hanno comportato allagamenti nella piana del Fucino. Gli eventi sono avvenuti nelle date di seguito riportate:

- 16 dicembre 1999,
- 4 dicembre 2010,
- 17 marzo 2011.

Per la calibrazione del modello idrologico-idraulico sono stati utilizzati i dati a scansione 15' delle altezze



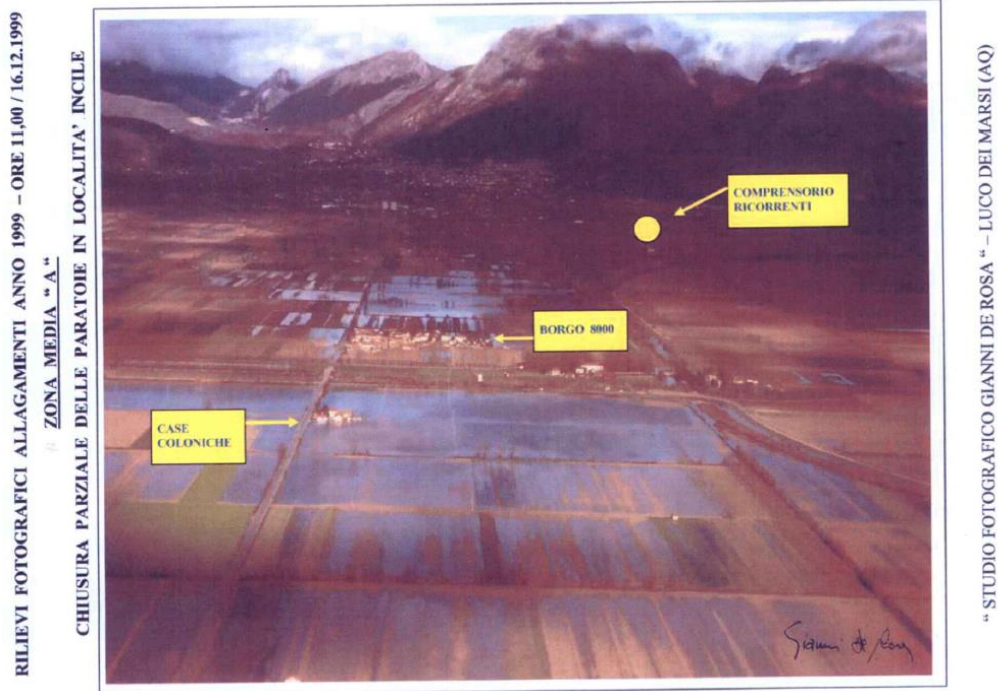


Figura 4.3 - Rilievo fotografico degli allagamenti del 16-12-1999 nella piana del Fucino, vista in direzione Nord, Borgo 8000 è al centro della fotografia.

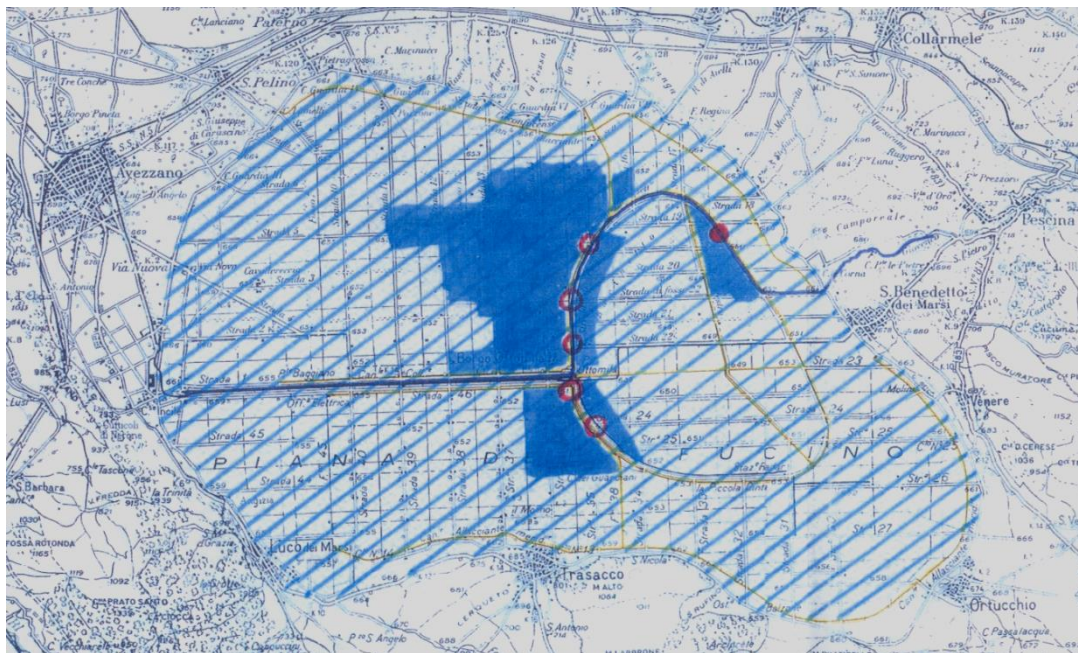


Figura 4.4: Regione Abruzzo, ARSSA, rappresentazione della situazione del 16-12-1999; si possono notare gli allagamenti parziali su tutta la Piana e gli allagamenti totali presso Borgo Ottomila. Inoltre i cerchi rossi rappresentano i punti di esondazione delle canalizzazioni principali ed il punto rosso di rottura dell'argine del fiume Gioenco.

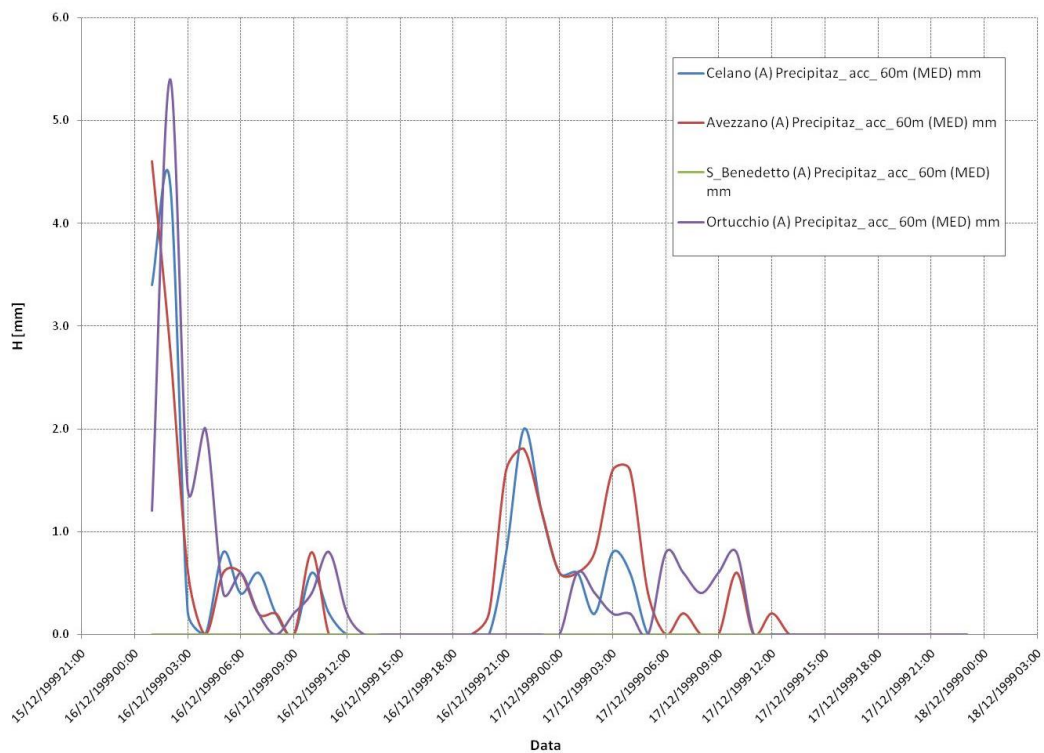


Figura 4.5: Evento di pioggia del 16 dicembre 1999, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino.

#### 4.2.2 Evento del 4 dicembre 2010

L'evento di dicembre 2010 ha comportato allagamenti nella piana del Fucino. Gli allagamenti sono stati registrati da satellite, alcune immagini satellitari elaborate al fine di mappare le zone allagate sono state fornite ai fini del presente studio dall'Autorità di Bacini del Liri Garigliano e Volturno (Figura 4.6).

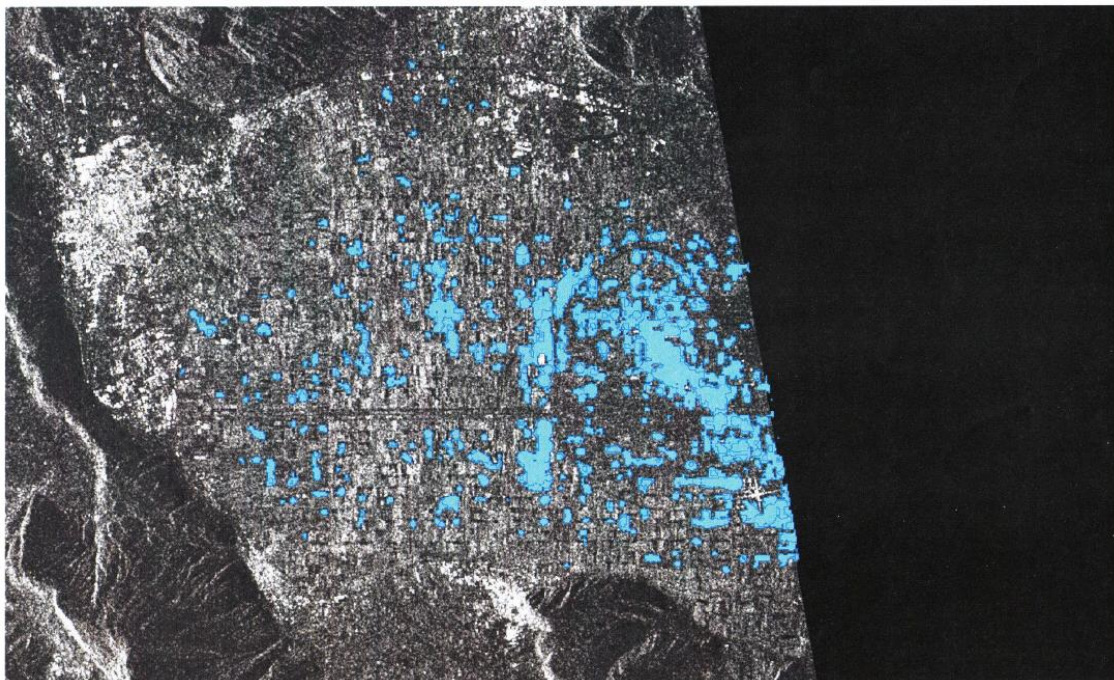


Figura 4.6: Immagine radar del satellite COSMOS-SkyMed acquisita il 4 dicembre 2010 alle ore 04:53:48 UTC con sovrapposizione di un dato vettoriale che mostra l'estensione delle aree alluvionate (generato dal software e-Flood di e-GEOS).

L'analisi delle serie orarie dei dati pluviometrici ha permesso ricostruire l'evento di pioggia.

Si veda il grafico seguente in cui è riportata l'altezza di pioggia misurata ogni ora dei pluviometri presenti nel Fucino e il livello idrometrico misurato all'Incile (Figura 4.7).

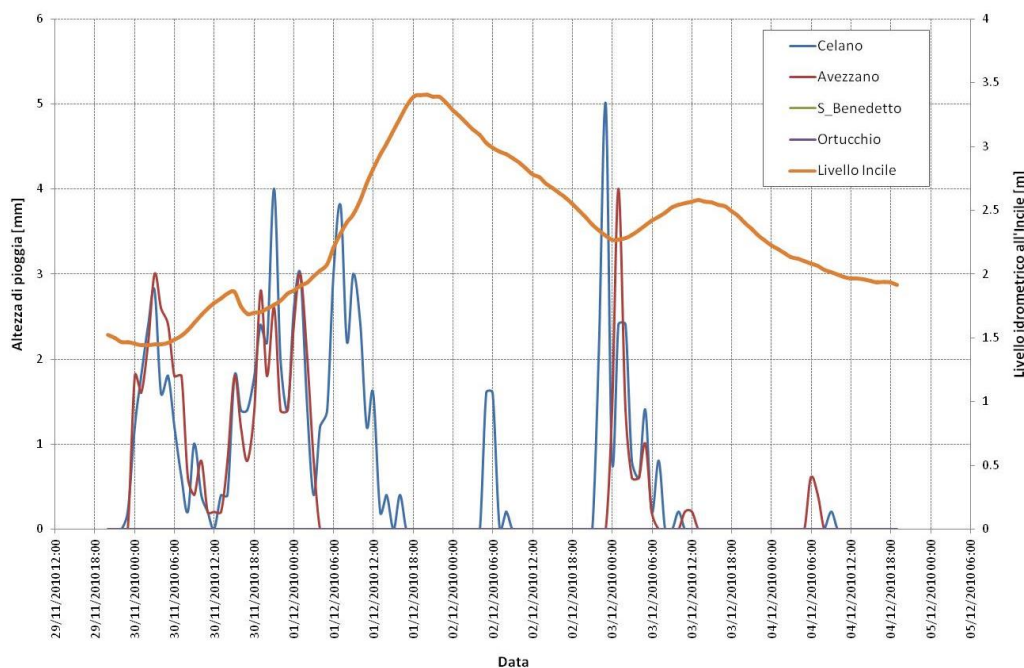


Figura 4.7: Evento di pioggia del 4 dicembre 2010, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino e livello idrometrico misurato all'Incile.

Come si evince dal grafico alcuni pluviometri non hanno registrato eventi piovosi (Ortucchio e San Benedetto), inoltre i pluviometri di Celano e Avezzano pur essendo non molto distanti spazialmente riportano registrazioni non coerenti per alcune ore dell'evento piovoso.

L'analisi dei dati storici ha permesso di appurare che i pluviometri prossimi alla piana rispetto a quelli nella parte di bacino più montuosa registrano mediamente un livello di pioggia inferiore sia come massimi che cumulata giornaliera o annuale. Risulterebbe quindi non del tutto appropriato ricostruire l'evento di pioggia basandosi sulle informazioni dei soli pluviometri di Avezzano e Celano.

Ai fini quindi di una più corretta rappresentazione dell'evento sono stati acquisiti anche i dati inerenti ad altri pluviometri nella zona del Fucino. Le altezze di pioggia sono state fornite in forma non validata dal Centro Funzionale d'Abruzzo – Settore Idro – Direzione Protezione Civile e riguardano seguenti pluviometri:

- Ovindoli - Campo Porcaro,
- Collelongo - Le Caserine,
- Roccapivi.

Nella Figura 4.11 è riportato un estratto di immagine aerea con l'indicazione della posizione dei pluviometri.

Le altezze di pioggia misurate dai pluviometri succitati sono state utilizzate per ricostruire l'evento di pioggia di dicembre 2010 rappresentato nella Figura 4.12.

Dal grafico è possibile rilevare che l'evento è iniziato alle 20:00 del 29/11/2010 ed è durato complessivamente 5 giorni con le maggiori intensità registrate nei primi 3 giorni. L'evento di pioggia è stato spazialmente uniforme su tutto il bacino ma con intensità diverse, minori nella Piana (Celano) e maggiori sui rilievi (Ovindoli, Collelongo). Il pluviometro di Roccapivi (situato sul corso del Liri tra Civitella Roveto e Sora) ha registro altezze di pioggia molto elevate.



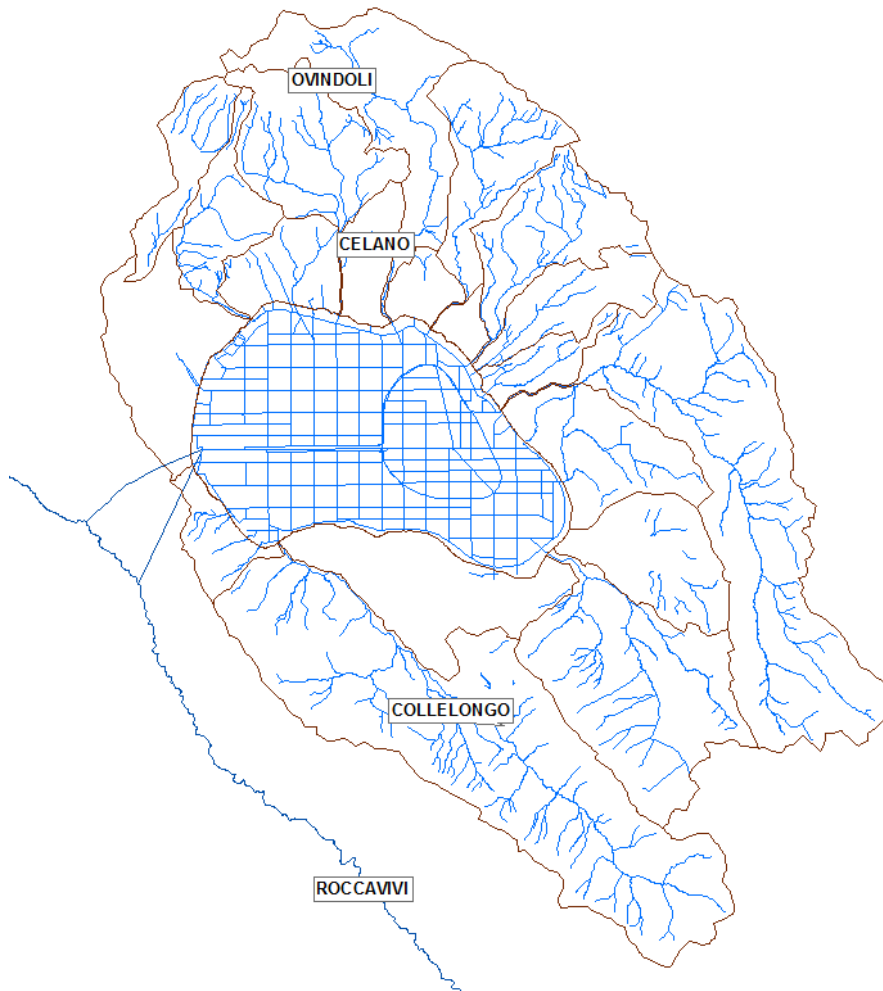


Figura 4.8: Posizione dei pluviometri utilizzati per ricostruire l'evento di dicembre 2010.

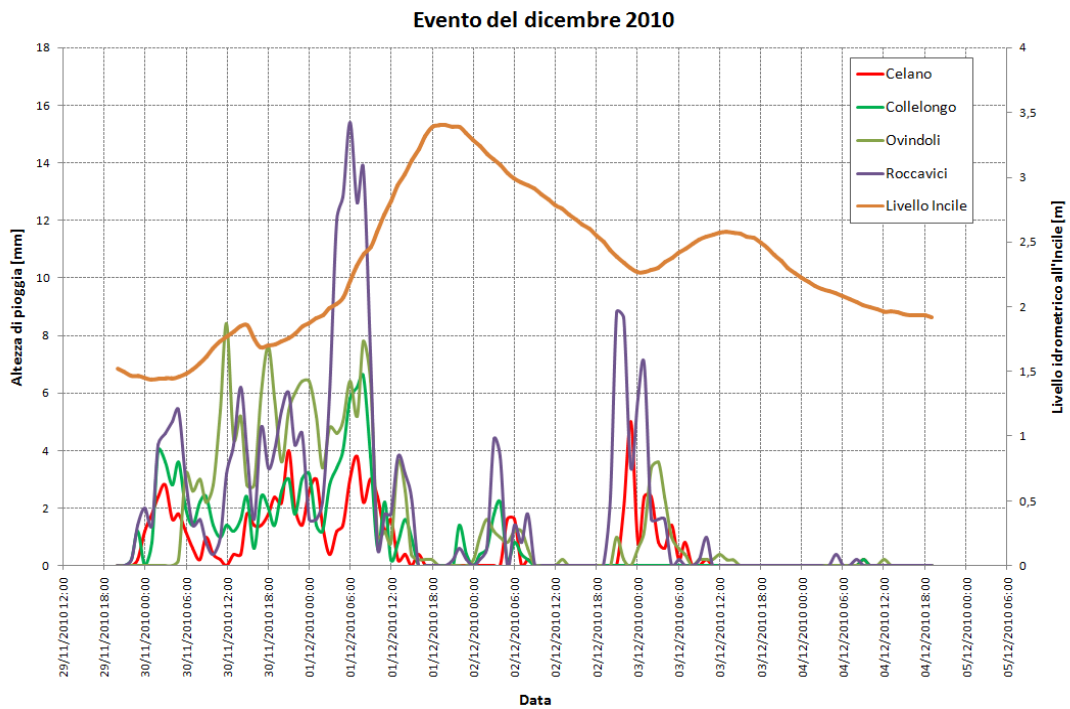


Figura 4.9: Evento di pioggia del 4 dicembre 2010, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino (Celano, Collelongo, Ovindoli, Roccaavivi) e livello idrico misurato all'Incile.

Mediamente sul bacino sono piovuti 120 mm d'acqua in 5 giorni corrispondenti ad un evento con un Tempo di ritorno ( $T_r$ ) stimabile in circa 20 anni.

Tale evento è stato utilizzato per la calibrazione del modello idrologico-idraulico.

I dati di pioggia misurati dai pluviometri sono stati inseriti nel software di calcolo (IW ICM) dopo essere stati interpolati col metodo "Dell'inverso del quadrato della distanza". In tal modo è stato possibile attribuire ad ogni sottobacino del modello il valore dell'altezza di pioggia al variare del tempo ricavandolo da un'interpolazione rispetto ai dati puntuali registrati dai pluviometri.

Nella Figura 4.10 è riportata la suddivisione in sottobacini attuata nel modello per il calcolo idrologico.

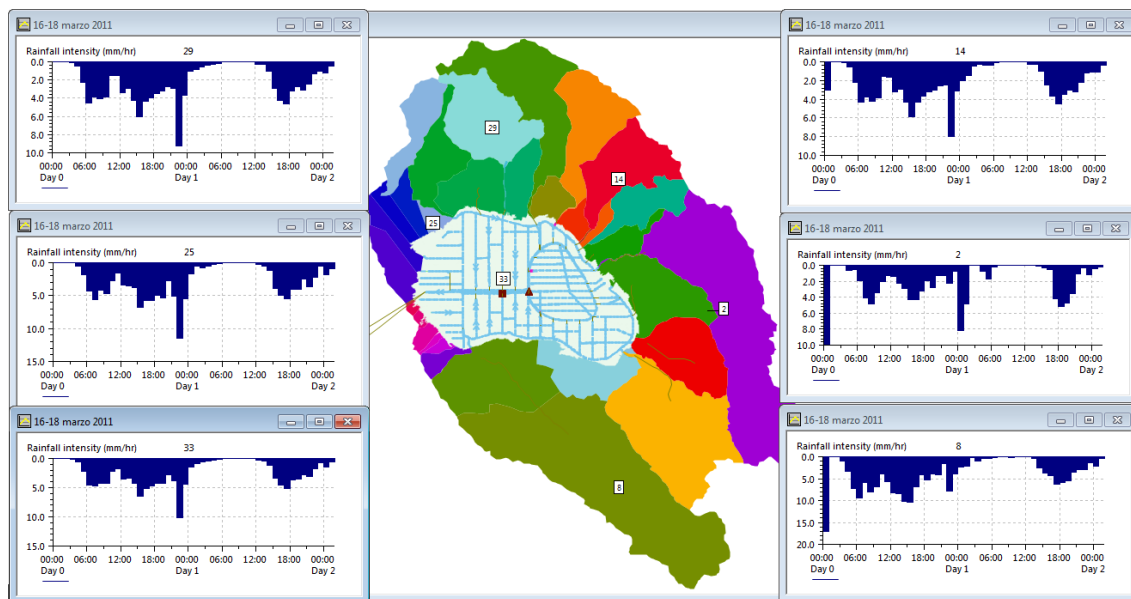


Figura 4.10: Suddivisione in sottobacini del territorio ed esempio di distribuzione delle piogge

#### 4.2.3 Evento del 18 marzo 2011

L'evento di marzo 2011 ha comportato allagamenti nella piana del Fucino. Gli allagamenti sono stati registrati da satellite, alcune immagini satellitari elaborate al fine di mappare le zone allagate sono state fornite ai fini del presente studio dall'Autorità di Bacini del Liri Garigliano e Volturno (Figura 4.14).

L'analisi delle serie orarie dei dati pluviometrici ha permesso ricostruire l'evento di pioggia. Si veda il grafico seguente in cui è riportata l'altezza di pioggia misurata ogni ora dei pluviometri presenti nel Fucino e il livello idrometrico misurato all'Incile (Figura 4.12).

Anche in per questo evento, come si evince dal grafico, alcuni pluviometri non hanno registrato eventi piovosi (Ortucchio e San Benedetto), inoltre i pluviometri di Celano e Avezzano pur essendo non molto distanti spazialmente riportano registrazioni non coerenti per alcune ore dell'evento piovoso.

Valgono inoltre le considerazioni fatte in precedenza, poiché l'analisi dei dati storici ha permesso di appurare che i pluviometri prossimi alla piana rispetto a quelli nella parte di bacino più montuosa registrano mediamente un livello di pioggia inferiore risulterebbe non del tutto appropriato ricostruire l'evento di pioggia basandosi sulle informazioni dei soli pluviometri di Avezzano e Celano.

Tale evento è stato studiato anche dal Centro Funzionale d'Abruzzo – Settore Idro – Direzione Protezione Civile e Ambiente nello *Studio Idrologico ed Idrodinamico del Bacino del Fucino* del 18/10/2011.

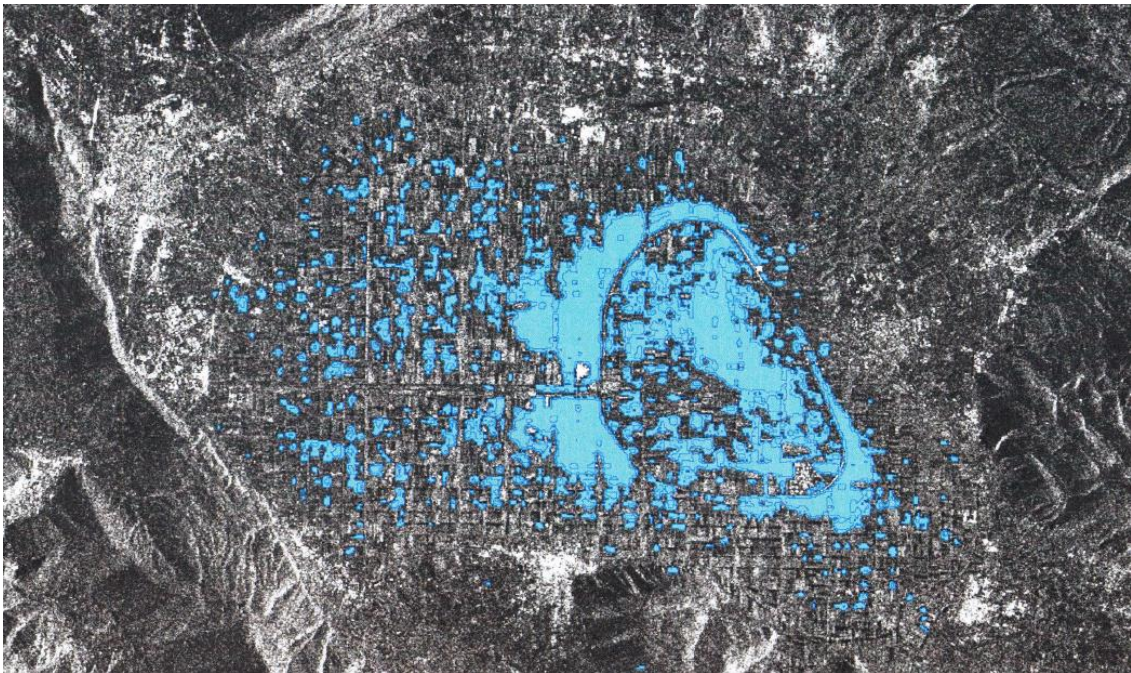


Figura 4.11: Immagine radar del satellite COSMOS-SkyMed acquisita il 18 marzo 2011 alle ore 09:10:50 UTC con sovrapposizione di un dato vettoriale che mostra l'estensione delle aree alluvionate (generato dal software e-Flood di e-GEOS).

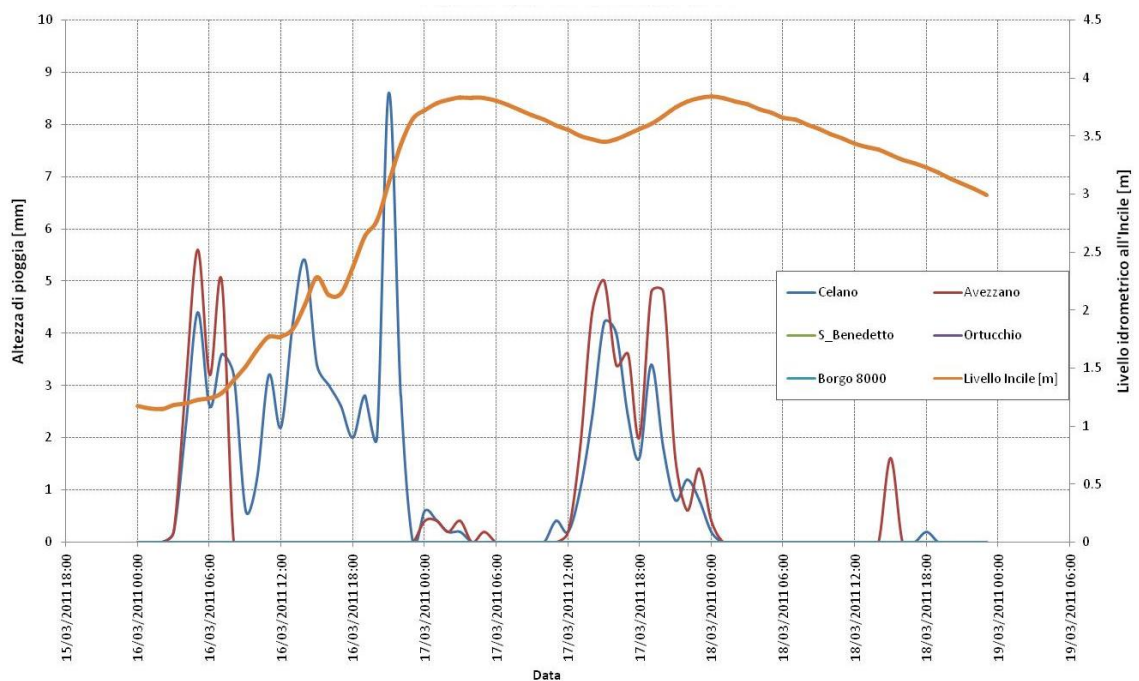


Figura 4.12: Evento di pioggia del 18 marzo 2011, altezza d'acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino e livello idrometrico misurato all'Incile.

Nello studio sono riportati i dati di pioggia oraria di 5 pluviometri presenti nella zona anche al di fuori della piana (Celano, Borgo 8000, Asci Alto, Roccavivi ed Incile). Nella Figura 4.13 è riportato un estratto di immagine aerea con l'indicazione della posizione dei pluviometri.

Le altezze di pioggia misurate dai pluviometri succitati sono state utilizzate per ricostruire l'evento di pioggia di marzo 2011 (anche in questo caso i dati misurati dal pluviometro di Borgo 8000 sono risultati non congrui) come mostrato in Figura 4.14.

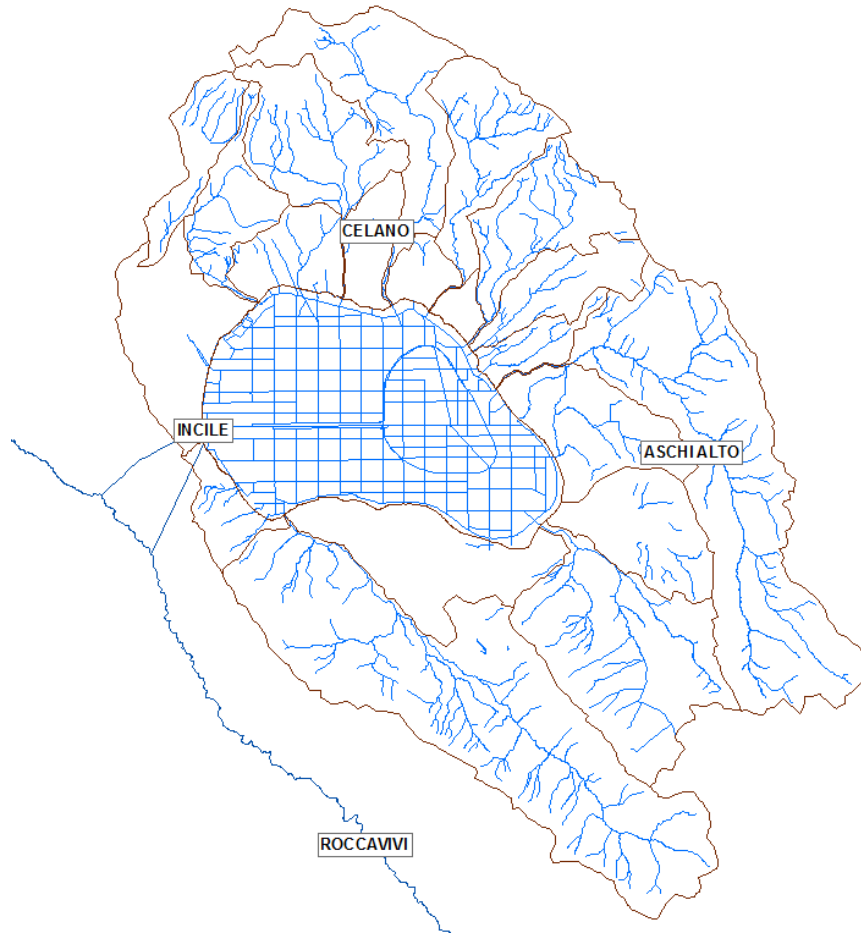


Figura 4.13: Collocazione dei pluviometri utilizzati nello Studio Idrologico ed Idrodinamico del Bacino del Fucino redatto dalla Protezione Civile del centro funzionale d’Abruzzo.

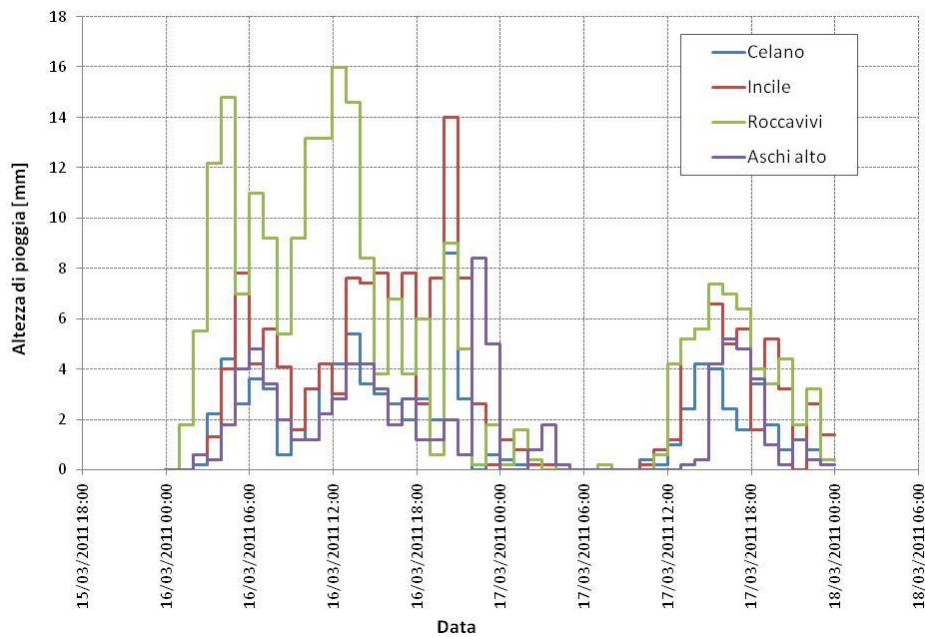


Figura 4.14: Evento di pioggia del 18 marzo 2011, altezza d’acqua misurata dai pluviometri presenti nel Fucino come riportata dalle informazioni contenute nello Studio Idrologico ed Idrodinamico del Bacino del Fucino redatto dalla Protezione Civile del centro funzionale d’Abruzzo.

Dal grafico è possibile rilevare che l'evento è iniziato alle 2:00 del 16/03/2011 nella zona del pluviometro di Roccavivi (situato sul corso del Liri tra Civitella Roveto e Sora) ha registrato altezze di pioggia elevate per molte ore. L'evento di pioggia si è spostato come intensità verso la Piana del Fucino, il pluviometro dell'Incile ha registrato altezze elevate nella serata del giorno 16. L'evento si è poi spostato verso Est (Aschi alto) per poi attenuarsi nella notte e ricominciare il giorno 17 alle 12:00 in misura uniforme sul bacino ma con minore intensità.

Come riportato dal *Rapporto di evento del 16-18 Marzo 2011* del Centro Funzionale Regione Lazio, i quantitativi precipitati rientrano nell'ordinarietà per le durate inferiori, mentre i tempi di ritorno per le durate da 12 fino a 48 ore hanno valori molto elevati. Il pluviometro di Roccavivi ha registrato ben 234,6 mm di pioggia in 48 ore, 170 anni di Tempo di ritorno.

Mediamente sul bacino del Fucino sono caduti 126 mm di pioggia in 48 ore, corrisponde ad un Tempo di ritorno di circa 50 anni. Tale evento è stato utilizzato per la calibrazione del modello idrologico-idraulico.

I dati di pioggia misurati dai pluviometri sono stati inseriti nel software di calcolo dopo essere stati interpolati col metodo "Dell'inverso del quadrato della distanza". In tal modo è stato possibile attribuire, ad ogni sottobacino del modello, il valore dell'altezza di pioggia al variare del tempo. Nella Figura 4.10 è riportata la suddivisione in sottobacini attuata nel modello per il calcolo idrologico.

#### 4.3 Le curve di possibilità pluviometrica e gli ietogrammi di progetto adottati

Il modello idrologico-idraulico è stato sollecitato con eventi estremi derivanti dall'analisi statistica dei dati misurati nella rete di pluviometri presenti all'interno e all'esterno del bacino, per i quali esistono serie storiche osservate sufficientemente estese. L'analisi statistica permette di ottenere i parametri  $a$  e  $n$  della curva di possibilità pluviometrica da cui sono stati ottenuti gli ietogrammi di progetto per i diversi tempi di ritorno richiesti dallo studio (30, 50, 100, 300 e 500 anni).

I dati di pioggia utilizzati sono quelli forniti dal CAR (Centro Agrometeorologico Regionale):

- database dei dati metereologici serie corrente – piogge orarie dal 1999 al 2011;
- database dei dati metereologici serie storica – piogge giornaliere dal 1951 al 2010.

Inoltre sono stati utilizzati i dati contenuti negli Annali Idrologici dell'Ufficio Compartimentale di Napoli del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale dove sono riportati i massimi di pioggia per diverse durate del pluviometro di Avezzano (708 m s.m.).

I dati di pioggia contenuti nel database corrente (piogge orarie) e riportati negli annali sono un campione sufficientemente grande per poter ricavare, tramite trattamento statistico per il solo pluviometro di Avezzano, le curve di possibilità pluviometrica per piogge di durata inferiore a 24 ore.

Per le piogge di durata superiore alle 24 ore sono stati trattati statisticamente i dati del database storico che riporta le piogge giornaliere. I pluviometri di cui si hanno registrazioni storiche sono riportati geograficamente nella Figura 4.15.

Un insieme di osservazioni (o misure) indipendenti di una qualunque grandezza (nella fattispecie l'altezza massima di precipitazione di assegnata durata rilevata in una stazione pluviometrica) costituisce un campione di dati da cui risulta impossibile estrapolare una previsione di realizzazioni future, a meno di non considerare tale campione come estratto da una popolazione di una variabile casuale e quindi suscettibile di essere interpretato per mezzo di un modello probabilistico. Tale modello, nella sua forma analitica, corrisponde, in generale, a quella di opportune funzioni di distribuzione di probabilità, attraverso le quali è possibile associare ad ogni realizzazione della variabile casuale una probabilità calcolata.

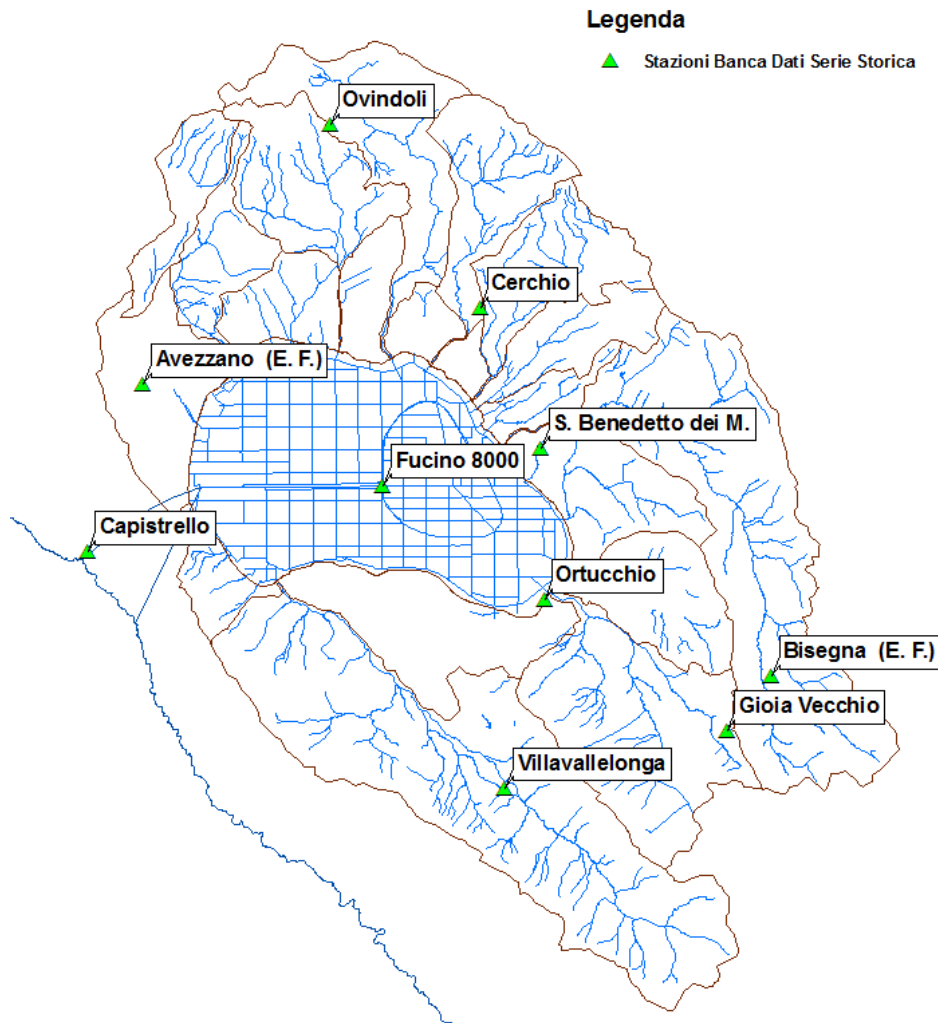


Figura 4.15: Posizione dei pluviometri della banca dati meteorologica serie storica (piogge giornaliere).

L'interpretazione della serie delle altezze massime di pioggia di assegnata durata del Fucino è stata fatta considerando come distribuzione di probabilità l'utilizzo delle distribuzioni *normale*, *log-normale* e di *Gumbel*.

Per verificare l'adattamento delle distribuzioni di probabilità ad un campione di dati osservati sono stati utilizzati dei test statistici: il *Test di Pearson* e il *Test di Kolmogorov*.

Il risultato dell'analisi ha permesso di determinare che la distribuzione di probabilità che più rappresenta il campione dei dati è quella di *Gumbel*.

Attraverso alcuni passaggi matematici è possibile ricavare per ogni pluviometro le altezze di pioggia di ogni durata per assegnati tempi di ritorno ( $Tr$ ) e ricavare i parametri  $a$  ed  $n$  della nota espressione della curva di possibilità pluviometrica.

$$h(\theta, Tr) = a(Tr) \cdot \theta^{n(Tr)}$$

dove:

- $h$  è l'altezza di pioggia in mm
- $\theta$  è la durata di pioggia in ore
- $Tr$  è il tempo di ritorno in anni
- $a$  e  $n$  sono i parametri caratteristici di ogni curva di possibilità pluviometrica

I valori dei parametri della curva di possibilità climatica sono stati ricavati col metodo vincolato, ipotizzando cioè che il coefficiente di variazione calcolato dalle osservazioni sia costante e, dunque, indipendente dalla durata considerata e sia pari al valore medio quadratico dei coefficienti di variazione relativi alle singole durate.

Come illustrato in precedenza si hanno a disposizione un numero sufficiente di anni di misure (40-50 anni) per i pluviometri della banca dati storica con misurazione temporale oraria. Tali dati hanno permesso di ricostruire le curve di possibilità climatica dei pluviometri storici per le durate superiori a 24 ore.

Per le durate inferiori a 24 ore si sono invece utilizzati i dati disponibili per il pluviometro di Avezzano. Determinata la curva pluviometrica di Avezzano è stata utilizzata, opportunamente scalata, per ricostruire le curve pluviometriche con durata inferiore a 24 ore anche per gli altri pluviometri del Bacino del Fucino.

A titolo d'esempio di seguito si riporta il risultato dell'analisi statistica per il pluviometro di Avezzano, le altezze di pioggia per ogni durata e dato Tr (Tempo di ritorno) sono riportate in Tabella 4.1 mentre le curve di possibilità climatica con le equazioni caratteristiche sono riportate in Figura 4.16.

Tabella 4.1: Valori delle altezze di pioggia per dati Tr (tempi di ritorno) in funzione della durata di pioggia in ore per il pluviometro di Avezzano.

Altezza di pioggia [mm] per ogni durata [ore]								
Tr [anni]	1	3	6	12	24	48	72	120
20	29.7	36.5	49.2	63.0	87.3	109.4	129.0	140.9
30	32.0	38.9	52.4	67.0	93.3	117.8	138.9	150.9
50	34.8	41.8	56.4	71.9	100.6	128.2	151.2	163.5
100	38.7	45.8	61.9	78.7	110.6	142.3	167.9	180.4
200	42.5	49.8	67.3	85.4	120.5	156.3	184.5	197.3
300	44.7	52.1	70.5	89.3	126.3	164.5	194.2	207.1
500	47.5	55.1	74.4	94.2	133.6	174.8	206.5	219.5

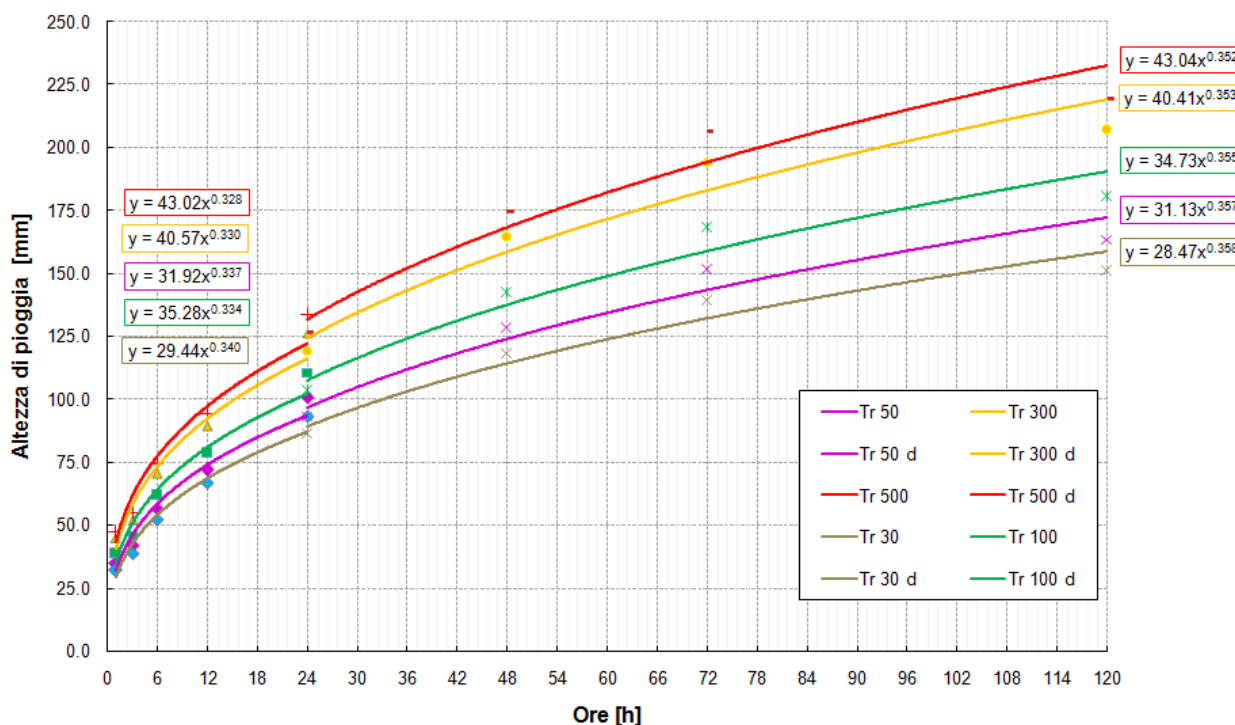


Figura 4.16 - Curve di possibilità pluviometrica per diversi Tempi di Ritorno (Tr) ricavate dalle serie dei massimi di pioggia misurate dal pluviografo di Avezzano.

Il trattamento statistico sopra descritto è stato realizzato per i 10 pluviografi del database storico (Figura 4.15) ricavando quindi le altezze o intensità di pioggia puntuali per ogni durata e tempo di ritorno. Nella Tabella 4.II sono riportati i valori dei coefficienti  $a$  e  $n$  di ogni pluviometro per durate inferiori e superiori alle 24 ore e per i vari tempi di ritorno considerati.

Tabella 4.II: Valori dei coefficienti  $a$  e  $n$  di ogni pluviometro per durate inferiori e superiori alle 24 ore e per i vari tempi di ritorno considerati.

		Durate inferiori o uguali alle 24 ore					Durate maggiori di 24 ore				
		Tr 30	Tr 50	Tr 100	Tr 300	Tr 500	Tr 30	Tr 50	Tr 100	Tr 300	Tr 500
Avezzano	$a$	29.44	35.28	31.92	40.57	43.02	28.47	31.13	34.73	40.41	43.04
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.358	0.357	0.355	0.353	0.352
Bisegna	$a$	44.73	55.14	49.16	64.59	68.97	57.05	62.95	70.91	83.49	89.34
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.289	0.286	0.283	0.28	0.278
Borgo 8000	$a$	22.61	26.97	24.47	30.93	32.76	18.3	19.57	21.28	23.98	25.24
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.434	0.436	0.439	0.442	0.444
Capistrello	$a$	45.74	56.3	50.24	65.89	70.34	57.21	63.88	72.94	87.35	94.07
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.296	0.289	0.282	0.272	0.269
Cerchio	$a$	24.68	30	26.94	34.83	37.07	27.53	30.32	34.09	40.06	42.84
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.333	0.328	0.324	0.318	0.316
Gioia Vecchia	$a$	31.77	38.02	34.43	43.67	46.3	27.8	29.69	32.26	36.31	38.2
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.413	0.416	0.42	0.425	0.427
Ovindoli	$a$	33.39	39.95	36.18	45.89	48.64	38.3	42.22	47.55	56.04	60.01
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.319	0.311	0.303	0.292	0.288
San Benedetto	$a$	26.64	34.04	29.79	40.74	43.86	46.76	52.72	60.81	73.71	79.72
	$n$	0.387	0.379	0.383	0.375	0.373	0.238	0.23	0.222	0.211	0.207
Ortucchio	$a$	33.1	41.48	36.67	49.09	52.62	37.63	41.68	47.15	55.82	59.85
	$n$	0.381	0.376	0.379	0.373	0.372	0.314	0.31	0.305	0.299	0.297
Villavallelonga	$a$	54.53	66.96	59.82	78.25	83.49	55.84	61.48	69.09	81.12	86.71
	$n$	0.34	0.334	0.337	0.33	0.328	0.361	0.358	0.355	0.352	0.35

Per mezzo delle suddette curve, si è generato uno ietogramma (intensità nel tempo) che teoricamente potrebbe avere varie forme. Nel nostro caso si è adottata la forma rettangolare, poiché solitamente, in mancanza di una valida ipotesi alternativa, si ammette che la precipitazione avvenga con intensità costante (Natale, 2003).

Per tenere conto delle modificazioni che intervengono nel fenomeno di precipitazione in rapporto alla sua scala spaziale va considerato che con l'aumentare dell'area del bacino aumenta la probabilità di non contemporaneità dell'evento di pioggia sulla sua superficie. Di questo aspetto si tiene conto introducendo un fattore di riduzione (fattore di riduzione areale – ARF) direttamente dipendente dall'area  $A$  e che rappresenta il rapporto tra il valore dell'intensità di pioggia areale, per assegnata durata e fissato tempo di ritorno, ed il corrispondente valore dell'intensità di pioggia puntuale.

Da alcune analisi svolte sull'argomento (v. es. U.S. Weather Bureau, 1957-60; Penta, 1974), risulta che la dipendenza, valida in generale, tra il fattore di riduzione areale (ARF) ed il periodo di ritorno ( $Tr$ ) non è particolarmente evidente, per cui nella pratica progettuale può essere trascurata.

Il coefficiente ARF è stato valutato con la seguente formula (Eagleson, 1972):



$$ARF(A, \theta) = 1 - (1 - e^{-c_1 A}) \cdot e^{-c_2 \theta^{c_3}}$$

dove:

- A è l'area del Bacino in km<sup>2</sup>
- $\theta$  è la durata di pioggia in ore
- $c_1, c_2, c_3$  sono i coefficienti caratteristici del bacino

I valori dei coefficienti sono stati ricavati dalla documentazione VAPI (Valutazione delle portate in Italia) della Campania e valgono rispettivamente  $c_1 = 0,0021$ ;  $c_2 = 0,522$ ;  $c_3 = 0,25$ . Di seguito si riporta il grafico (Figura 4.17) con i valori assunti da ARF in funzione della durata di pioggia e della superficie del bacino mentre in Tabella 4.III sono riportati i valori del coefficiente di riduzione areale nota la superficie del Fucino pari a 860 km<sup>2</sup>.

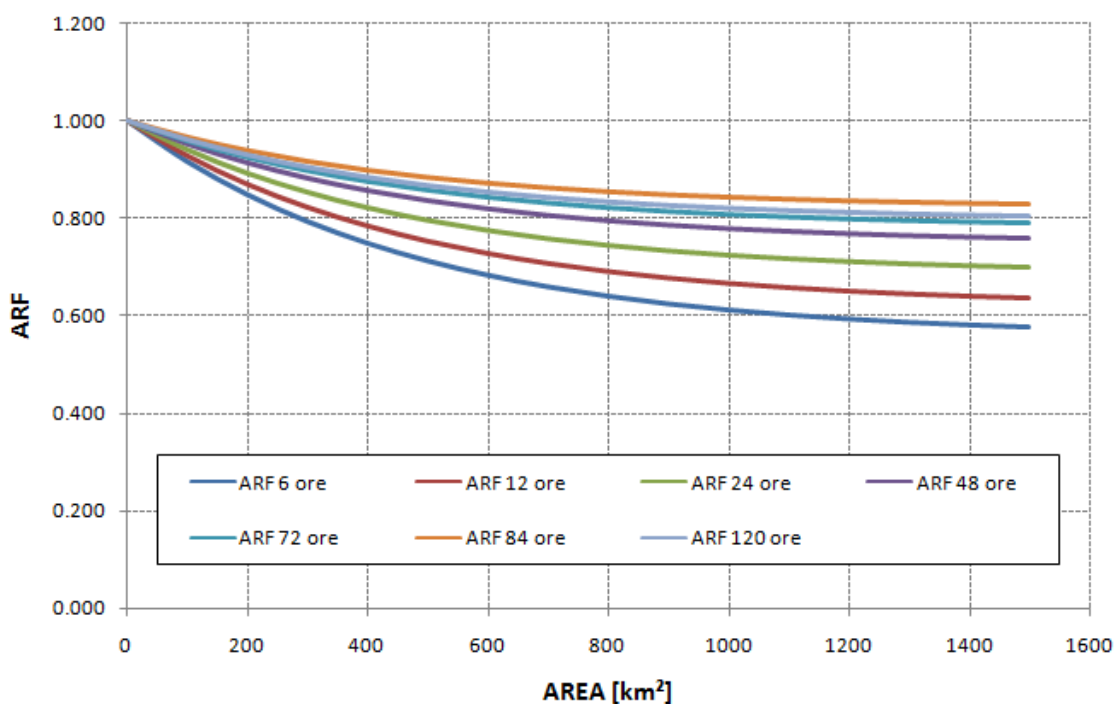


Figura 4.17 – Valori di ARF (fattore di riduzione areale) per le diverse durate di pioggia in funzione della superficie del bacino.

Tabella 4.III: Valori dei coefficienti di riduzione areale (ARF) ricavati per il Bacino del Fucino.

Valori del coefficiente ARF in funzione della durata in ore						
6	12	24	48	72	84	120
0.6305	0.6834	0.7366	0.7883	0.8172	0.8278	0.8514

Il software InfoWorks ICM è in grado di utilizzare, come condizione di sollecitazione, ietogrammi di pioggia (senza restrizione nel tipo di ietogramma e sue variazioni spaziali). Come riportato in precedenza nel caso in esame si è optato per la forma rettangolare.

Nel seguito (Figura 4.18) a titolo di esempio sono riportati due ietogrammi di pioggia dei pluviometri di Avezzano e Villavallelonga, come si può notare l'intensità di pioggia riferita al pluviometro di avezzano è molto inferiore rispetto a quella riferita al pluviometro di Villavallelonga. Il modello idrologico-idraulico è stato implementato attribuendo ad ogni bacino idrografico il rispettivo pluviometro e quindi il rispettivo ietogramma di progetto con rappresentato nella planimetria seguente (Figura 4.19).

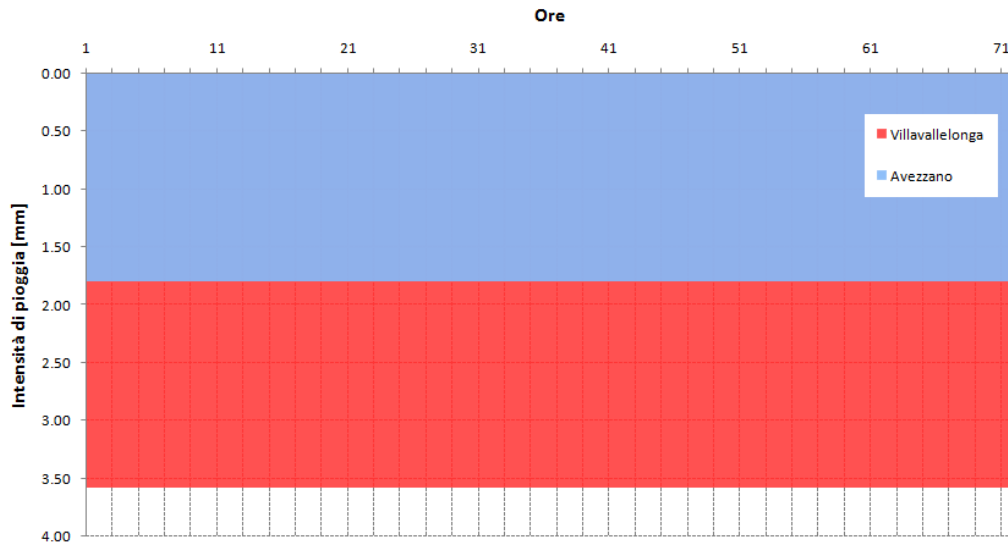


Figura 4.18 – Ietogrammi rettangolari per un evento con  $T_r = 100$  anni e durata 72 ore riferiti al pluviometro di Avezzano e di Villavallelonga.

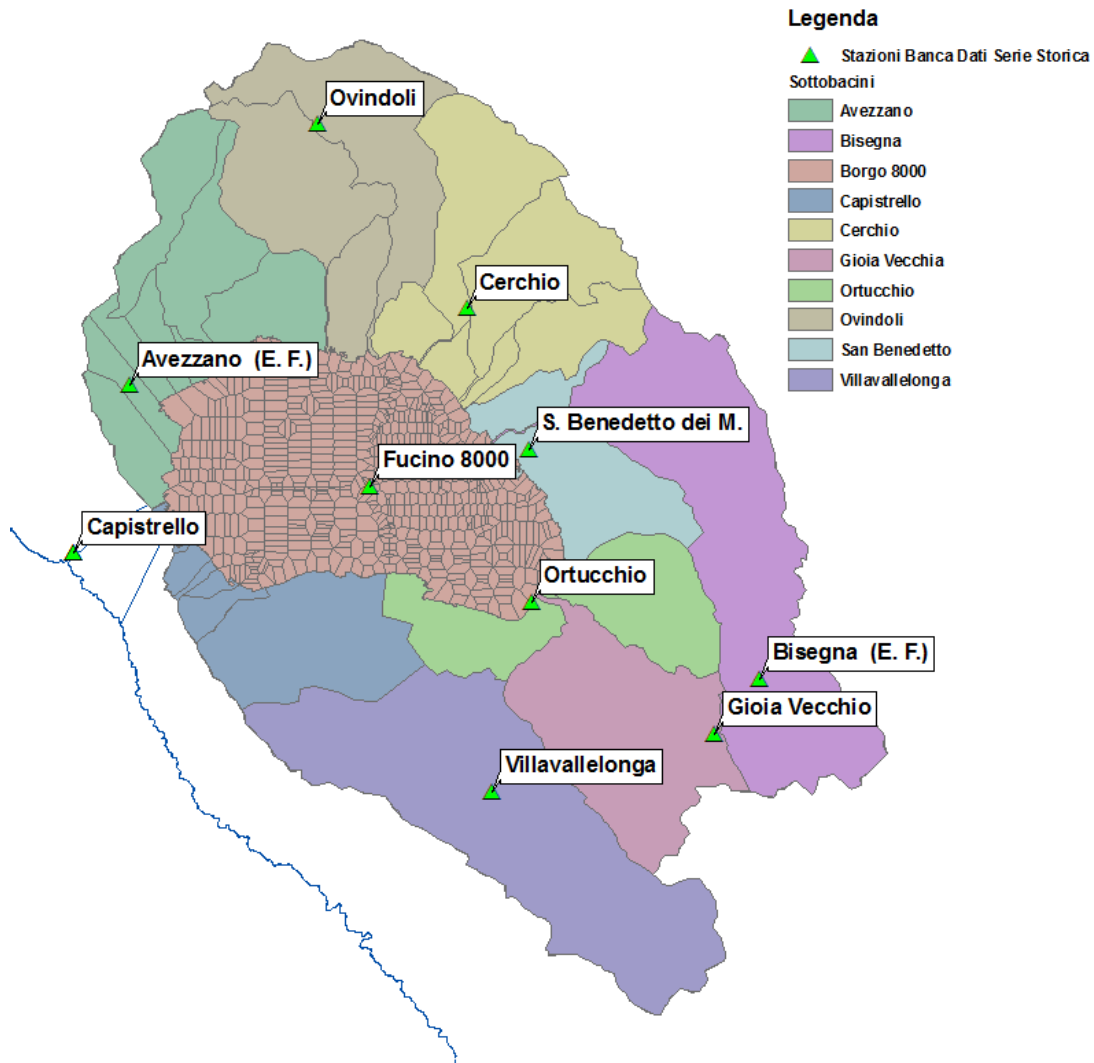


Figura 4.19 – Identificazione tramite diversa colorazione dei bacini idrografici e dei rispettivi pluviometri di riferimento per l'attribuzione delle piogge di progetto.

#### 4.4 Modello Idrologico utilizzato

Il processo di trasformazione afflussi - deflussi utilizzato determina il comportamento idraulico del modello, definendo l'andamento e l'entità della sollecitazione applicata alla rete.

Innanzitutto, per ogni tipologia di superficie occorre definire l'entità e la metodologia di calcolo della pioggia "persa", ossia quella quantità di pioggia che non contribuisce a generare un deflusso in quanto partecipa a fenomeni di infiltrazione, imbibimento e riempimento di conchette locali, tipici delle aree permeabili.

Occorre poi definire il metodo di ruscellamento ed i relativi parametri per computare il ritardo temporale tra il deflusso calcolato e la sua effettiva immissione al nodo di recapito del sottobacino.

In InfoWorks ICM sono predefinite numerose tipologie di modello idrologico, a cui applicare gli specifici parametri per ogni sottobacino o superficie. Sono state definite 4 tipologie di superficie, corrispondenti alle aree di maggiore interesse: Piana, Bacino del Giovenco, Bacino del Rio delle Rose, altre superfici. Innanzitutto si è definita una perdita iniziale (riempimento delle superfici depresse), poi il procedimento utilizzato per la modellazione delle piogge, di tipo Fixed, attraverso il quale si indica direttamente la percentuale di pioggia che contribuisce alla formazione del deflusso per ogni tipologia di superficie. Per ogni sottobacino viene definito l'idrogramma unitario ed i relativi parametri, per la modellazione si è scelta la formula di Pasini, tipicamente utilizzata per ambiti rurali. Nel paragrafo successivo si approfondiscono le motivazioni alla base scelta della metodo di calcolo idrologico adottata.

#### 4.5 Calibrazione e verifica del modello

L'attività fondamentale per poter procedere all'utilizzo di un modello a fini progettuali consiste nella sua calibrazione e successiva validazione. Calibrare un modello significa affinare i parametri idrologici ed idraulici, che sono stati stimati nella rappresentazione del sistema, fino ad ottenere la migliore rispondenza di alcune delle variabili calcolate dal modello in determinati punti significativi con serie storiche derivate da misure in campo negli stessi punti.

La validazione del modello consiste poi nel verificare la risposta del modello precedentemente calibrato a una diversa sollecitazione (quindi un diverso evento), sempre confrontando i risultati ottenuti dal calcolo con misure di campo effettuate contestualmente o nelle stesse condizioni rispetto alla sollecitazione applicata.

Questo consente, in sostanza, di selezionare per i parametri caratteristici di tutti gli elementi del modello i valori che consentono di riprodurre al meglio il comportamento reale del bacino.

Nel caso specifico il modello idrologico-idraulico adottato per lo studio del reticolo di bonifica della piana del Fucino è stato calibrato con l'evento meteorico registrato tra il 16 e il 18 Marzo del 2011 e verificato con il secondo evento di inizio Dicembre 2010. Per entrambi questi eventi infatti è disponibile sia la pioggia registrata da alcuni pluviometri significativi della zona che la registrazione dell'idrometro disponibile all'Incile come dettagliato nel paragrafo 4.2. La scelta di usare il primo evento come calibrazione e il secondo come verifica nasce semplicemente dal fatto che il primo risultava più oneroso del secondo avendo provocato esondazioni più estese e quindi risulta più logico andare alla ricerca dei migliori parametri di calibrazione per questo evento.

Per questi due eventi il processo di calibrazione e verifica ha quindi utilizzato i dati di pioggia rilevata come dato di input del modello e le osservazioni sia sull'andamento del livello dell'idrometro esistente all'incile che l'estensione degli allagamenti (documentata da foto aeree) come parametro di confronto con il modello.

I parametri oggetto di calibrazione sono stati:

- il tipo di modello di afflussi-deflussi adottato

- i parametri idrologici più adeguati per il succitato modello idrologico adottato
- la scabrezza dei canali di bonifica della piana
- la portata che può essere smaltita dagli emissari in condizioni di alluvione

Dai primi tentativi di calibrazione si era notata un evidente traslazione costante tra i valori restituiti dal modello rispetto a quelli misurati, questo ha sollecitato la necessità di effettuare una verifica di campo. Si è quindi rilevato il punto in cui è collocato lo strumento per la misura del livello presso l'Incile per valutare la quota assoluta dello zero idrometrico, al fine di poter correttamente interpretare ed utilizzare i valori registrati dall'idrometro Case Incile. Il livello idrico topograficamente rilevato il 18/10/2013 alle ore 10.10 risultava essere pari a 647.78 m slm (vedi Figura 4.20); il livello restituito dalla registrazione dell'idrometro nello stesso istante risulta essere 1.06 m rispetto allo zero locale dello strumento; si pone dunque il livello di riferimento (zero idrometrico) alla quota di 646.72 m slm. Questo ha permesso di uniformare perfettamente le quote al nostro datum, posto da progetto originale a quota 647.20 m slm (vedi ), traslando tutti i valori idrometrici registrati di 48 cm.

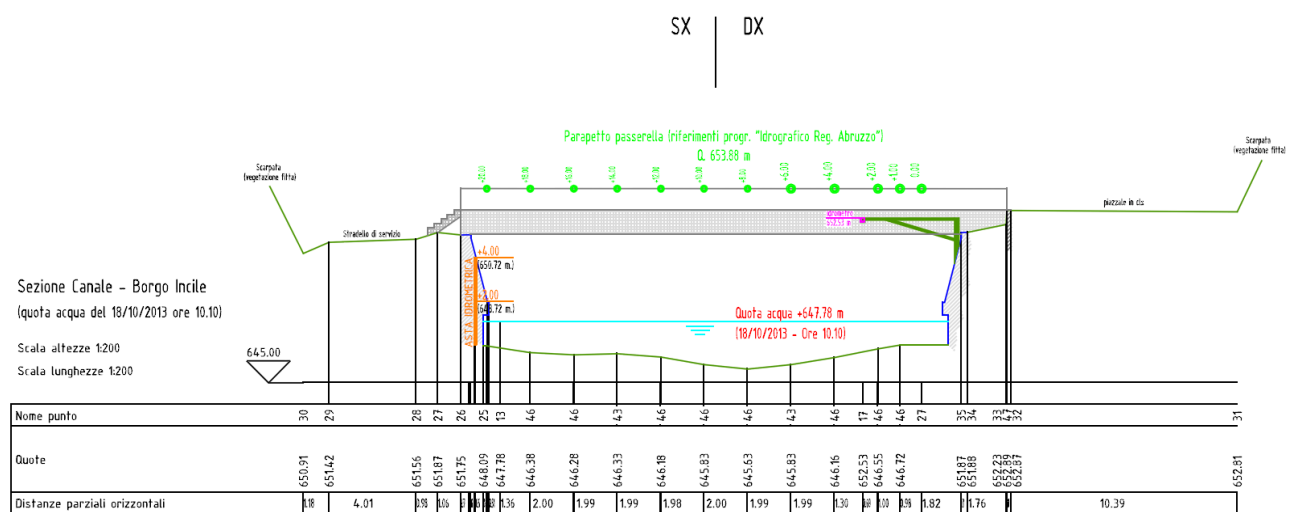


Figura 4.20: Rilievo topografico della sezione in cui è posto l'idrometro presso Casa Incile.

La misura del livello idrico presso l'incile risulta essere l'unico parametro idrico misurato con continuità per il reticolo di bonifica e dunque è fondamentale ricercare la massima precisione di questa serie di valori, in quanto il riscontro del livello calcolato dal modello all'idrometro costituisce il riferimento principale il processo di calibrazione.

Per quanto riguarda la portata in uscita dagli emissari si è cercato di trovare un valore il più possibile reale della massima portata che questi possono smaltire durante la piena, questo per togliere soggettività al processo di calibrazione e ridurre i gradi di libertà del processo di calibrazione. A tal fine si è proceduto ad un'attenta descrizione degli emissari nei modelli di calcolo, sulla base degli schemi costruttivi precedentemente mostrati, ponendo attenzione alla quota di sbocco del nuovo emissario in una vasca, come mostrato dallo schema idraulico di funzionamento della centrale di Canistro in Figura 4.21. I valori di scabrezza per gli emissari utilizzati, con riferimento al valore *n* di Manning sono:

- Nuovo Emissario = 0.016
- Vecchio Emissario = 0.020
- Vecchio Emissario, tratto in galleria non rivestita (1 600m) = 0.033

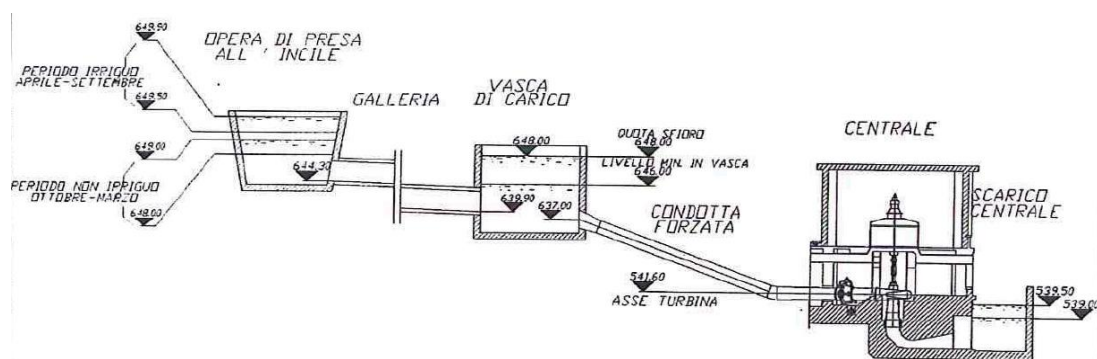


Figura 4.21: Schema idraulico di funzionamento della centrale di Canistro.

Riconoscendo l'importanza della corretta valutazione della portata degli emissari si è voluto effettuare una operazione di misura per verificare gli effettivi valori. Nonostante le difficoltà tecniche incontrate durante la misura il riscontro di queste operazioni ha restituito portate massime in uscita di circa  $32 \text{ m}^3/\text{s}$  nel vecchio emissario e  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  nel nuovo emissario. Per approfondimenti sull'operazione di misura di portata all'incile si veda l'appendice B.

I riscontri della misura confermano quanto previsto dal modello nella sua configurazione di calibrazione, la quale restituisce valori pressoché identici a quelli stimati dall'operazione di misura. Si veda a tal fine l'andamento delle portate e i relativi valori massimi nel grafico di calibrazione di Figura 4.22. In questo grafico viene riportato l'andamento delle portate uscenti dai due emissari nell'evoluzione dell'evento di calibrazione. I valori massimi coincidono appunto con le stime derivate dalle misure di campo. Si può osservare inoltre che questi valori sono ulteriormente confermati dalla rispondenza della curva di discesa del modello e dalla misura di campo descritta nella figura 4.2.2.

La pendenza della fase discendente della misura idrometrica dipende fortemente da quanta portata viene allontanata dalla piana alla fine dell'evento alluvionale quando i contributi in ingresso sono sostanzialmente diminuiti. È evidente che se non ci fosse corrispondenza tra le portate effettivamente fuoriuscite dal sistema a seguito degli eventi e quelle rappresentate dal modello le due curve, misurate e simulate, tenderebbero a divergere.

Si conclude quindi che i valori rappresentati nel modello per quanto riguarda la portata massima degli emissari sia stata valutata in modo corretto e che sia inferiore rispetto ai valori ipotetici del progetto originale, pari a circa  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  per il Primo Emissario e  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  per il Nuovo Emissario (Figura 4.22).

La seconda variabile oggetto di calibrazione è stata quella la scabrezza dei canali. Come base di valutazione si è partiti dai dati utilizzati nel precedente studio e stimata da osservazioni dirette e rilievi, attraverso l'indagine sullo stato manutentivo dei canali, così come descritto al capitolo 2.2. Si sono confermate scabrezze elevate dovute alla presenza di numerose piante, specialmente nei canali secondari (valori specifici sono già riportati nel paragrafo 3.2).

È interessante rilevare la modesta sensibilità del modello alle variazioni di scabrezza sia sui risultati del confronto tra misure idrometriche che sull'estensione degli allagamenti. È evidente che questo derivi dalla particolare configurazione fisica del reticolo di bonifica del Fucino il cui comportamento è dominato da un forte rigurgito del canale centrale innescato dall'Incile.

La variazione di scabrezza non cambia quindi apprezzabilmente la bontà del processo di calibrazione (si modifica solo il comportamento delle aste minori non rigurgitate da valle che mostrano esondazioni crescenti al crescere della scabrezza).

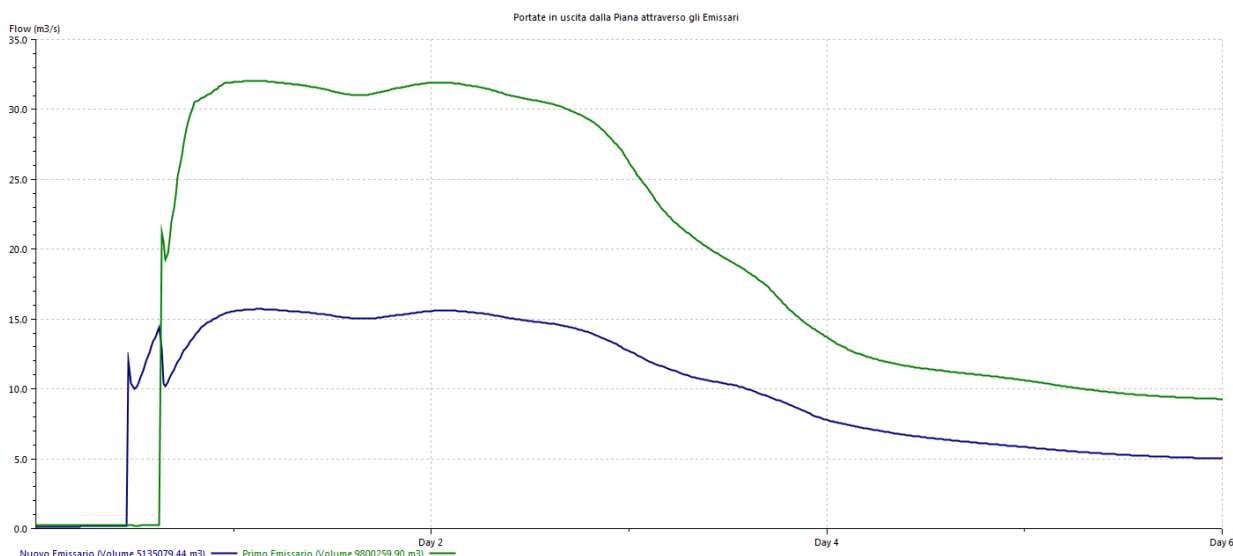


Figura 4.22 - Portate in uscita dagli emissari: in verde il Primo Emissario, in blu il Nuovo Emissario.

Si sono quindi confermati i valori indicati nel paragrafo 3.2.

Per quanto riguarda la scelta del metodologia afflussi-deflussi si sono valutate due opzioni. Il metodo Fixed che produce un deflusso fisso come proporzione costante della pioggia netta (netta nel senso che è stata depurata dalle perdite iniziali) o il metodo CN (Curve Number secondo il metodo SCS, sviluppato negli Stati Uniti e largamente utilizzato a livello internazionale per il calcolo dei volumi derivanti da bacini rurali). Il metodo CN avrebbe teoricamente il vantaggio di restituire un più realistico aumento proporzionale della percentuale di deflusso durante l'evoluzione dell'evento che progressivamente va a saturare i terreni. Il metodo fisso invece non tiene conto di questo fenomeno. Per entrambe le metodologie si è cercato di arrivare ai migliori parametri di calibrazione (come sarà illustrato successivamente) ma alla fine del processo si è deciso di preferire il metodo FIXED per due ragioni:

1. Il metodo CN descriveva meno correttamente le rampe di discesa degli idrogrammi misurati come si evidenzia nella figura Figura 4.23). In tal grafico, che rappresenta le migliori calibrazioni ottenute per entrambi i metodi iterando sui relativi parametri idrologici, si osserva infatti che rispetto al grafico dell'idrogramma osservato (curva rossa) la curva relativa al metodo fixed (curva blu) aderisce meglio al reale comportamento nella fase di svaso del sistema rispetto a quella ottenuta con il metodo CN (curva verde). Il motivo è ovviamente intrinseco nel fatto che la crescita del deflusso con il progressivo imbibimento del terreno del metodo CN sia particolarmente sopravvalutata nella coda degli eventi.
2. Il principale problema che avrebbe comportato l'adozione del metodo CN emergeva nell'utilizzo di piogge sintetiche di progetto che, nella fase successiva di valutazione del rischio e delle opere di progetto, richiedeva la ricerca di una durata critica che mentre per il metodo FIXED risulta di 84 ore (si veda il paragrafo 4.6) per il metodo CN risultava essere 240 ore. Questo portava ad avere un volume di esondazione sovrastimato per una durata critica che non era rispondente a quello che era l'effettiva esperienza reale del territorio e che si manifestava per intensità di pioggia molto modeste. Tutto questo di nuovo deriva dal modo in cui il metodo CN fa evolvere in senso crescente i coefficienti di deflusso che evidentemente non sono adeguati al bacino in esame.

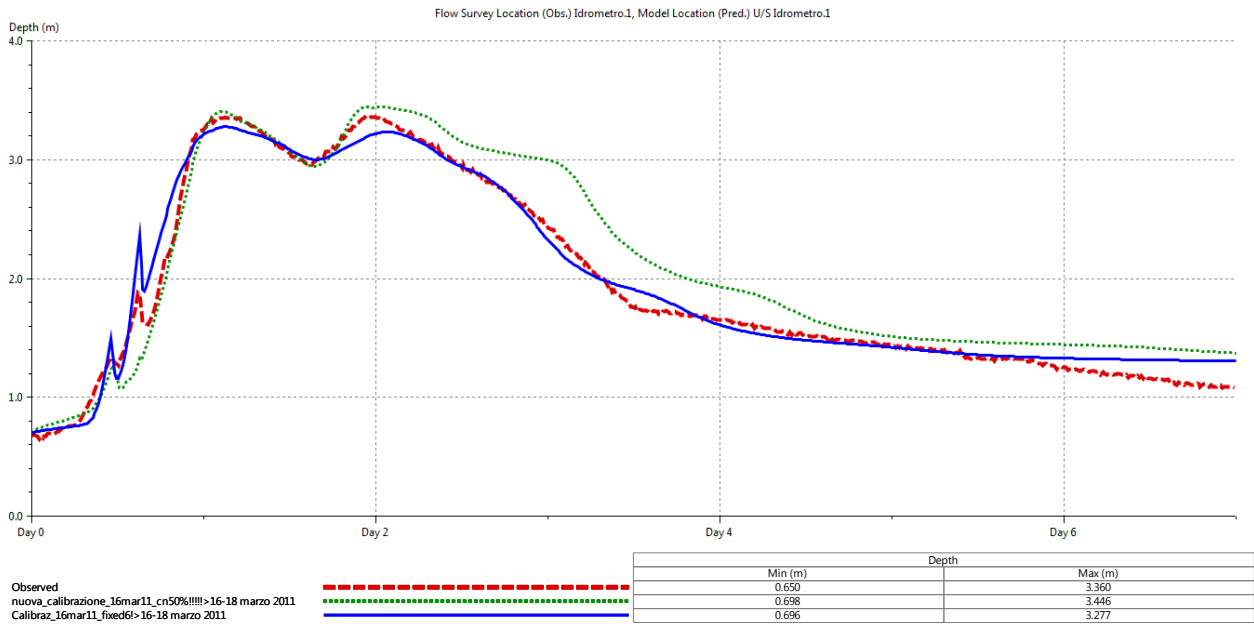


Figura 4.23 – Migliori calibrazioni ottenute con il metodo FIXED (curva blu) e il metodo del CN (curva verde) rispetto al dato osservato (curva rossa tratteggiata)..

Come ultima considerazione sul processo di calibrazione si descrive qual è stato il processo iterativo di ricerca dei coefficienti di deflusso ottimali. Il processo è stato condotto con iterazioni successive sui coefficienti di deflusso ricercando la miglior aderenza tra curva idrometrica osservata e simulata. Si è ritenuto calibrato il modello una volta ottenuto il risultato mostrato in Figura 4.24, ottimizzando i parametri idrologici ed idraulici per iterazioni successive; la linea rossa corrisponde alla serie storica misurata durante l’evento pluviometrico di riferimento (16-18 marzo 2011) dall’idrometro all’Incile, la linea verde rappresenta il livello nello stesso punto risultante dal calcolo matematico della simulazione sul modello.

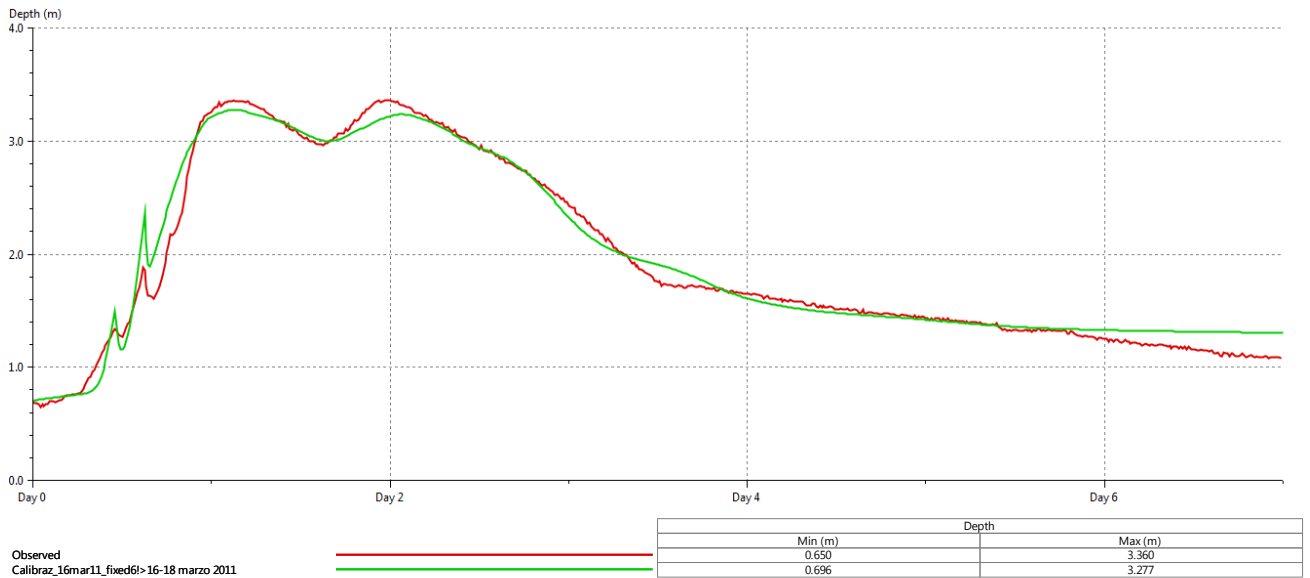


Figura 4.24: Confronto tra i livelli misurati dall’idrometro all’Incile (rosso) e quelli calcolati dal modello (verde).

Tale calibrazione si è ottenuta utilizzando i seguenti coefficienti di deflusso: 0.39 per il sottobacino riferito al Fiume Giovenco, 0.19 per tutti gli altri sottobacini esterni alla Piana e 0.17 per tutti i sottobacini appartenenti alla Piana (interni alle allaccianti). Si è deciso di differenziare questi coefficienti di deflusso piuttosto che utilizzarne uno omogeneo per tutti i bacini in quanto è noto che sia il bacino del fiume Giovenco (11 050 ha circa) costituisce il

principale immissario della piana mentre si ritiene che il deflusso delle zone interne alla piana sia ritenere sia relativamente inferiore per la natura estremamente pianeggiante dei terreni. Nel bacino del Giovenco è anche stato inserito un flusso di base (quindi una portata fissa e indipendente dagli eventi meteorici pari a 0.5 m<sup>3</sup>/s), questo in base a delle valutazioni riportate nella analisi idrologica su scala mensile mentre su tutto gli altri immissari si è introdotto un valore di 0.75 m<sup>3</sup>/s complessivi a rappresentare le diverse sorgenti.

Si fa anche notare che nella rampa di salita iniziale dell'idrometro (curva rossa) si evidenziano due modesti picchi di livello che sono stati interpretati come aperture del primo e poi secondo emissario. La curva verde del modello riproduce queste oscillazioni in quanto anche nello stesso si è fatto in modo che le due paratoie si aprissero con la medesima tempistica.

Al fine di confermare ulteriormente la rispondenza del processo di calibrazione si è utilizzata la foto aerea con evidenza dell'allagamento conseguente all'evento utilizzato in calibrazione, grazie alla sua georeferenziazione si è potuto qualitativamente comparare la superficie allagata risultante dal calcolo su modello con la restituzione fotografica. In Figura 4.25 e Figura 4.26 si nota l'ottima sovrapposizione degli allagamenti calcolati (in azzurro) con gli allagamenti reali (in grigio). Si tenga presente che l'immagine aerea riporta delle piccole macchie isolate di allagamento che rappresentano probabilmente dei modesti ristagni d'acqua sui terreni agricoli piuttosto che una vera e propria esondazione dei canali. Quindi appare abbastanza ragionevole che non si sia riprodotta la totalità delle aree che la foto aerea mostrava come riflettenti.

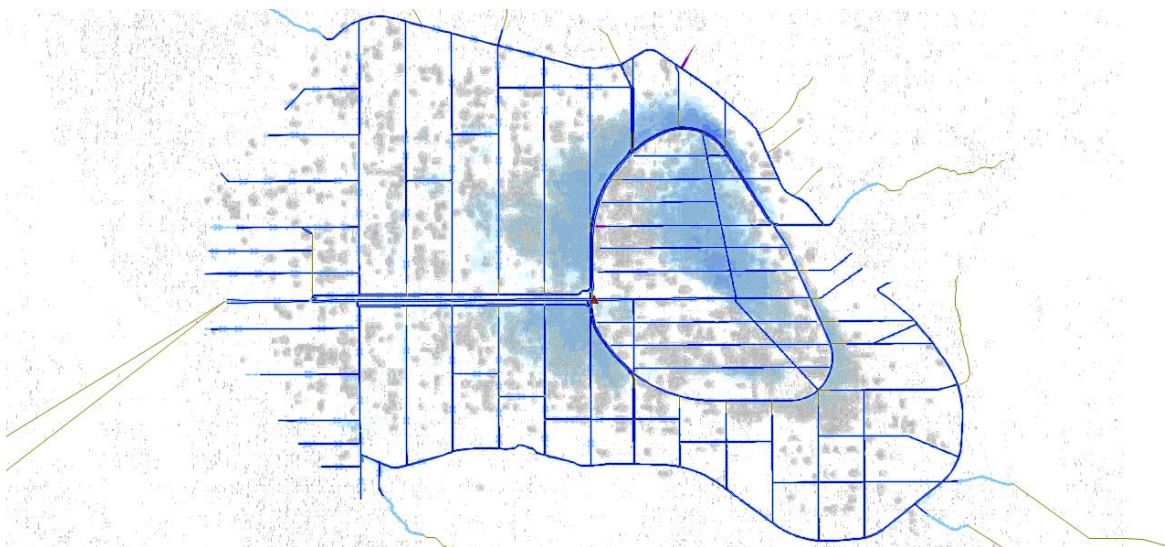


Figura 4.25 - Sovrapposizione dei risultati del modello idraulico alla foto aerea con aree allagate datata 18 marzo 2011, ore 9:10.

In Figura 4.27 si mostrano i risultati di due iterazioni sui valori del deflusso con valori del 20% superiori e 20% inferiori rispetto a quelli finali di calibrazione. Il grafico mostra quindi la sensibilità del parametro di deflusso sul processo di calibrazione.

Il modello così calibrato è stato validato sulla base di un altro evento reale (dal 30 Novembre 2010 all' 8 Dicembre 2010) per controllare l'affidabilità. Anche questo evento ha restituito una buona corrispondenza dei livelli all'idrometro risultanti dal calcolo di simulazione con i valori registrati dall'idrometro, confermando che il modello appare calibrato ed affidabile.

Osservando il grafico di calibrazione riportato in Figura 4.28 si nota una buona rappresentazione dell'evento e una generale sovrastima del modello rispetto al raggiungimento del massimo livello idrometrico. Non si è opportuno ritoccare ulteriormente al ribasso i parametri di deflusso per migliorare la calibrazione del secondo evento preferendo che il modello piuttosto sovrastimi i deflussi.



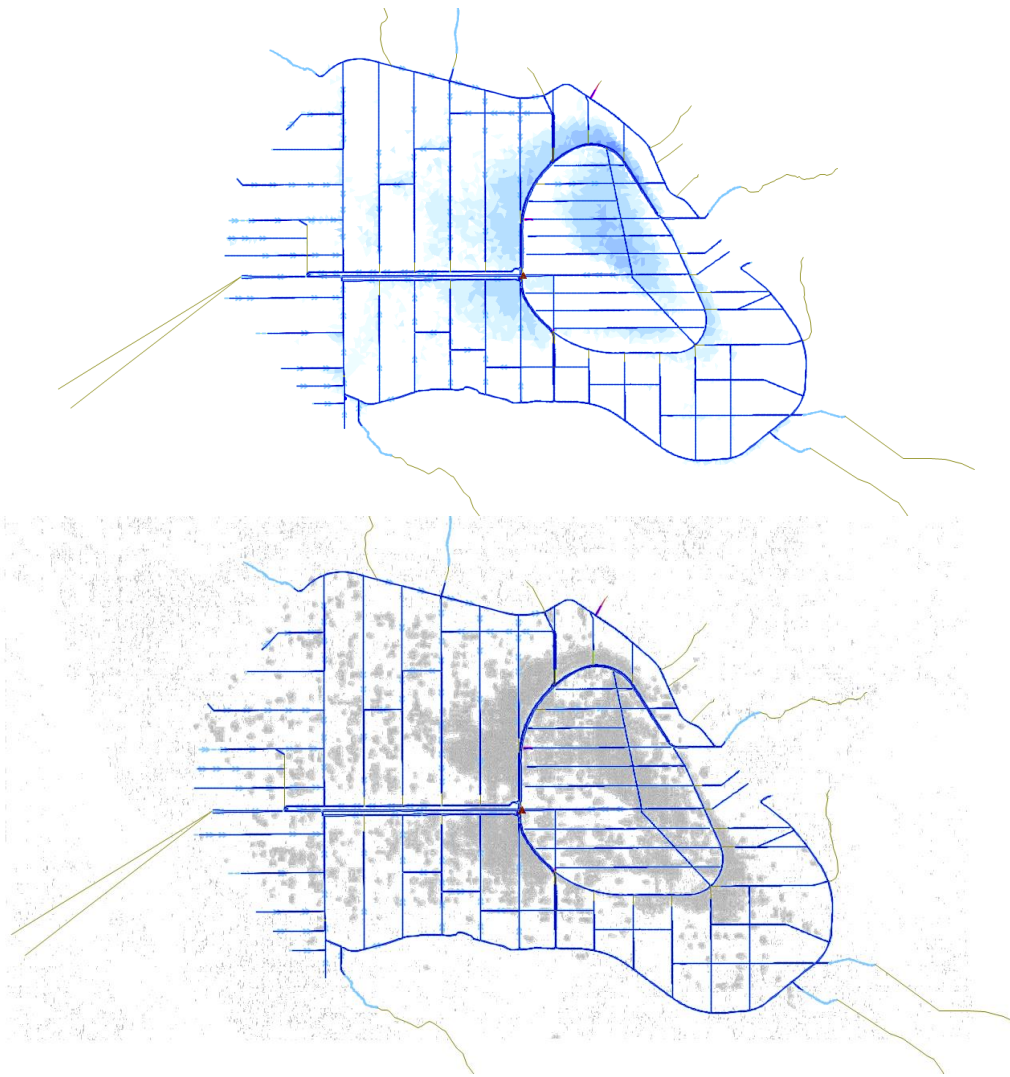
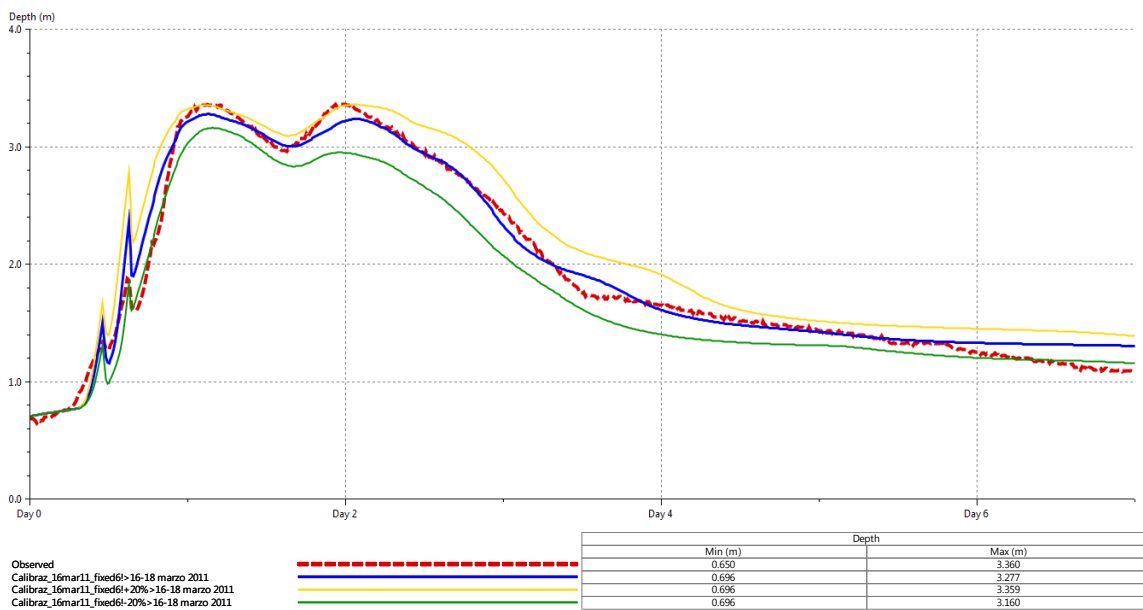


Figura 4.26: Confronto dei risultati del modello idraulico (in alto) alla foto aerea (in basso) con aree allagate del 18 marzo 2011.



Observed  
 Calibraz\_16mar11\_floed60-16-18 marzo 2011  
 Calibraz\_16mar11\_floed60+20%-16-18 marzo 2011  
 Calibraz\_16mar11\_floed60-20%-16-18 marzo 2011

Figura 4.27: Sensitività del parametro di deflusso sul processo di calibrazione (Linea rossa = serie misurata presso l'idrometro all'incile; Linea blu = curva di calibrazione, scelta come definitiva. Denominata calibraz...6! (versione 121); Linea verde = Utilizzando coeff di deflusso -20% rispetto a calibrazione; Linea gialla = Utilizzando coeff di deflusso +20% rispetto a calibrazione).

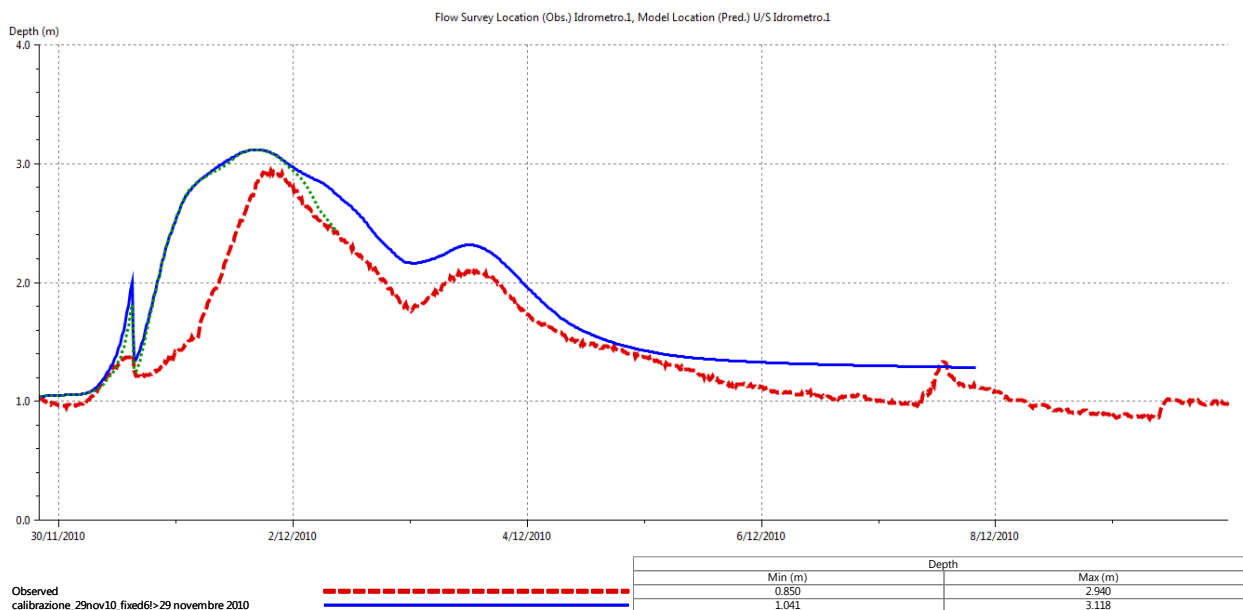


Figura 4.28 – Calibrazione effettuata sulla base dell’evento del novembre 2010 – curva rossa = dato osservato, curva blu = risultati della calibrazione.

È evidente che il processo di calibrazione e verifica è affetto dall’incertezza sulla ricostruzione dell’andamento spazio-temporale dell’andamento dell’evento che ha colpito il territorio in esame e sull’effettiva complessità dei fenomeni idrologici.

È possibile notare come i valori di deflusso ricavati dal processo di iterazione siano effettivamente bassi, come d’altronde erano bassi anche i valori di CN che si sono utilizzati nel primo tentativo di calibrazione. Utilizzando il metodo CN, infatti, la miglior calibrazione era stata ottenute utilizzando dei valori di CN pari al 55% di quelli inizialmente stimati dalle tabelle di uso del suolo e tipologia di suolo. Si ritiene, quindi, che questi valori di deflusso modesti derivino in parte dalla natura carsica delle valli circostanti la piana del Fucino.

Terminata la fase di calibrazione e validazione del modello, esso è stato ritenuto rappresentativo del sistema reale di canali e strutture ed è stato quindi utilizzato come base per tutte le successive valutazioni sullo stato di fatto e di progetto.

#### 4.6 Simulazioni con evento critico

Una rete di drenaggio deve smaltire le portate generate dagli eventi piovosi caduti sul suo bacino, precipitazioni molto brevi e intense mandano in crisi idraulica sistemi di drenaggio poco estesi (per esempio i sistemi di drenaggio di piccoli bacini urbani) ma non provocano conseguenze su grandi bacini fluviali. Ovviamente vale anche il viceversa. Fissato un criterio di valutazione relativo alla gravità dell’evento, che nel nostro caso si è scelto essere il volume totale allagato nella Piana, si ottiene che soltanto per una precisa durata dell’evento si hanno le condizioni più gravi per la rete, tale evento prende il nome di evento critico e durata critica l’arco di tempo in cui questo fenomeno si esplica.

Nel particolare caso del Bacino del Fucino il criterio adottato per determinare la durata critica è stato quello del massimo volume di allagamento perché, essendo un bacino chiuso o comunque con un vincolo di deflusso finale imposto dagli emissari, non è possibile verificare l’evento critico attraverso un confronto delle portate massime degli idrogrammi di uscita nella sezione finale. Questo criterio viene comunemente utilizzato per questo tipo di valutazioni; del resto il parametro di valutazione “volume allagato” è ovviamente un ottimo indicatore dei danni e del disagio provocati dal fenomeno meteorico.

Per ricercare la durata critica relativa al sistema di drenaggio complessivo della Piana del Fucino si sono condotte una serie di simulazioni complete della rete. Si è proceduto per tentativi nella scelta della durata di pioggia, calcolata la relativa intensità così come desunta dalla curva di possibilità pluviometrica (applicando poi anche il coefficiente di riduzione areale discusso precedentemente), fino al raggiungimento della durata di precipitazione che, per l'attuale scenario idrologico e tempo di ritorno, provoca la condizione più onerosa per il bacino ovvero il volume massimo di esondazione complessiva.

È stata altresì studiata la variazione della durata critica con l'aumentare del tempo di ritorno degli eventi pluviometrici in esame, data la complessità e l'estensione del bacino; si è notato un aumento della durata critica con l'aumento del tempo di ritorno.

In seguito all'introduzione degli ietogrammi di diversa durata nel bacino è risultato che la condizione più gravosa si ha per piogge di durata 84 ore per un evento di tempo di ritorno di 30 anni; la durata critica è di 108 ore per tempo di ritorno 100 anni e 132 ore per tempo di ritorno 300 anni. La Figura 4.29 mostra i volumi di allagamento calcolati per gli eventi di diversa durata studiati per ogni tempo di ritorno.

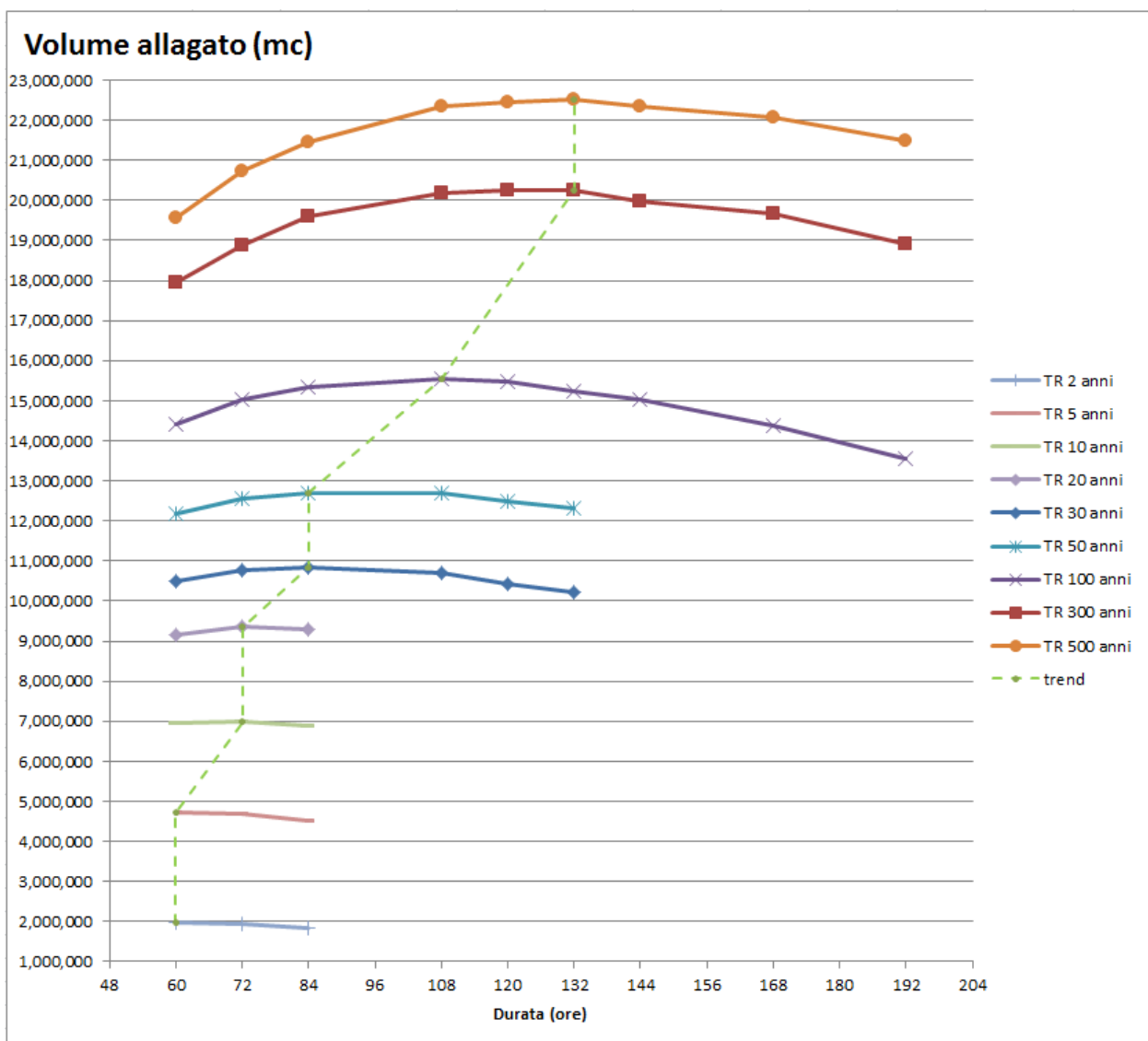


Figura 4.29: Ricerca della durata critica per vari tempi di ritorno.

In seguito a questa valutazione, sono stati adottati come sollecitazione alla rete ietogrammi ad intensità costante della durata critica corrispondente al tempo di ritorno di interesse.

A titolo di esempio, si riporta qui di seguito il grafico di una pioggia di progetto utilizzata in questo studio con tempo di ritorno pari a 30 anni e durata 84 ore. (Figura 4.30)

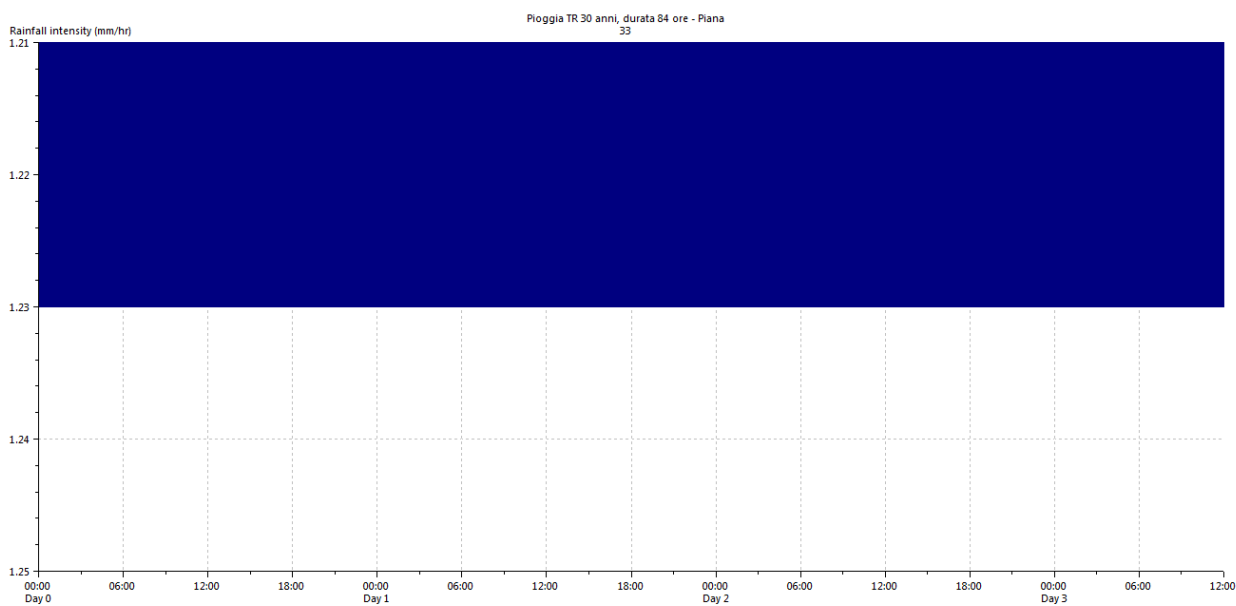


Figura 4.30: Esempio di ietogramma di pioggia utilizzato per le simulazioni, il presente ha T.R. 30 anni.

Si mostrerà poi in Tabella 4.IV il volume esondato per ogni tempo di ritorno.

#### 4.7 Simulazione della rete nello stato di fatto per sollecitazioni pluviometriche ad alto tempo di ritorno

Le caratteristiche del sistema di bonifica su cui sono state effettuate le simulazioni corrispondono a quelle rilevate in campo nelle diverse visite in sito effettuate tra il 2006 ed il 2013; questo comporta:

- scabrezza dei canali particolarmente elevata a causa della vegetazione presente e, in particolare per i canali secondari, dello scarso livello di manutenzione;
- paratoie di separazione acque Alte/Medie/Basse parzialmente inefficaci tali cioè da non costituire vincolo idraulico e non sempre in condizioni di mobilità;
- sifoni di collegamento tra la Cintarella Settentrionale e Meridionale e il Bacinetto a Borgo 8000 prima delle idrovore chiusi.

Il comportamento del fenomeno di esondazione nella Piana dipende fortemente dal collo di bottiglia costituito dalle gallerie presenti all'incile. Infatti questi manufatti hanno un limite di portata in uscita che varia pochissimo in funzione dell'innalzamento del livello dei canali, quindi quando l'insieme complessivo dei contributi di deflusso dei bacini limitrofi alla piana e della piana stessa superano la portata in uscita dai due emissari il volume in esubero fa crescere il livello nei canali e allaga la piana che si comporta come una cassa di espansione naturale. Nell'analisi del comportamento della piana durante eventi meteorici con alto tempo di Ritorno le paratoie dell'Incile sono state considerate in modo differente in tre successive simulazioni: in un primo caso completamente aperte (ipotizzando la loro apertura in caso di eventi di piena), in un secondo caso completamente chiuse e in ultima analisi è stata richiesta la verifica del comportamento del bacino in caso di paratoie semi-aperte (l'apertura considerata è stata il 50% dell'altezza di massima apertura). Nella Figura 4.31 si possono notare le superfici di allagamento rappresentate dal modello per un evento di sollecitazione pari a 30 anni di TR e paratoie all'Incile chiuse. Occorre sottolineare che per il calcolo delle aree allagate InfoWorks ICM utilizza un motore di calcolo a moto vario bidimensionale.

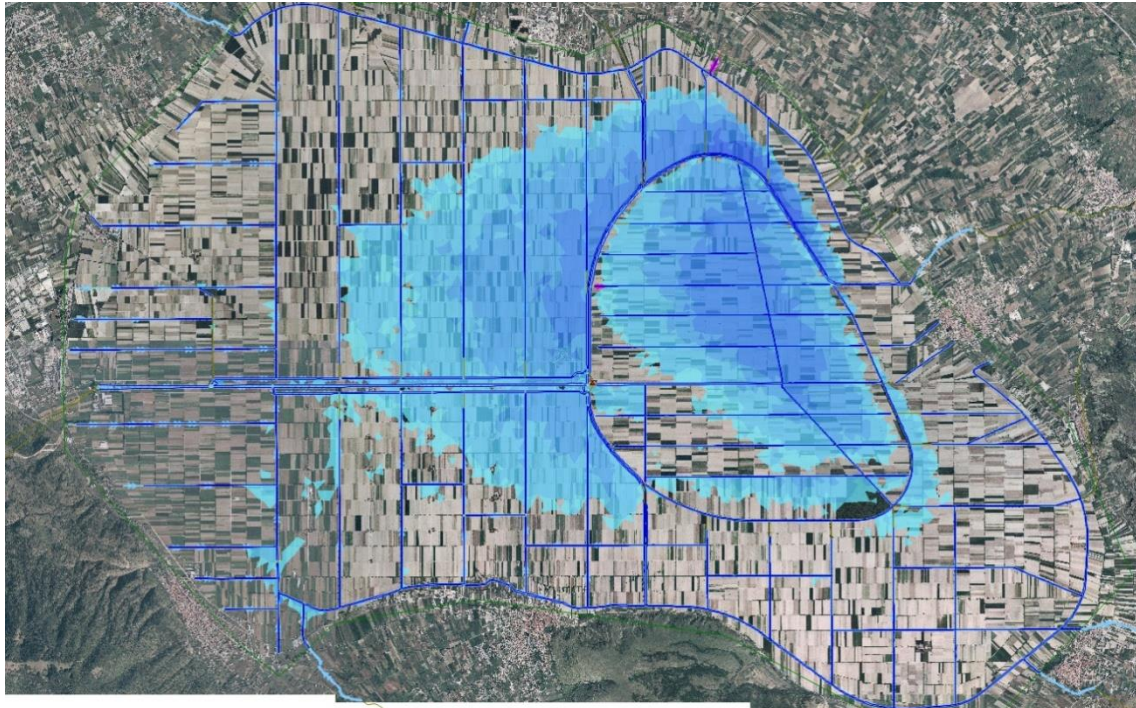


Figura 4.31: Simulazione degli allagamenti massimi per un evento di TR 30 anni, paratoie all'Incile completamente chiuse per l'intera durata dell'evento.

Come descritto in precedenza, infatti, il reticolo dei canali, rappresentato con calcolo 1D, è in continuità con un dominio 2D attraverso connessioni spondali tridimensionali; tale dominio 2D è suddiviso in unità di calcolo triangolari di dimensione a piacere (in questo caso ogni maglia ha dimensione minima di  $5.000 \text{ m}^2$  e massima di  $20.000 \text{ m}^2$ ).

Si noti che le figure che seguono rappresentano l'involuppo di tutti i massimi allagamenti verificatisi durante il tempo della simulazione e dunque non sono rappresentativi di un determinato istante temporale ma danno la visione contemporanea della peggiore condizione di ogni maglia triangolare.

La Figura 4.32 mostra l'estensione dell'allagamento per un TR pari a 30 anni e paratoie dell'Incile completamente aperte. La Figura 4.33 mostra l'estensione dell'allagamento per TR = 30 anni e paratoie dell'Incile parzialmente aperte.

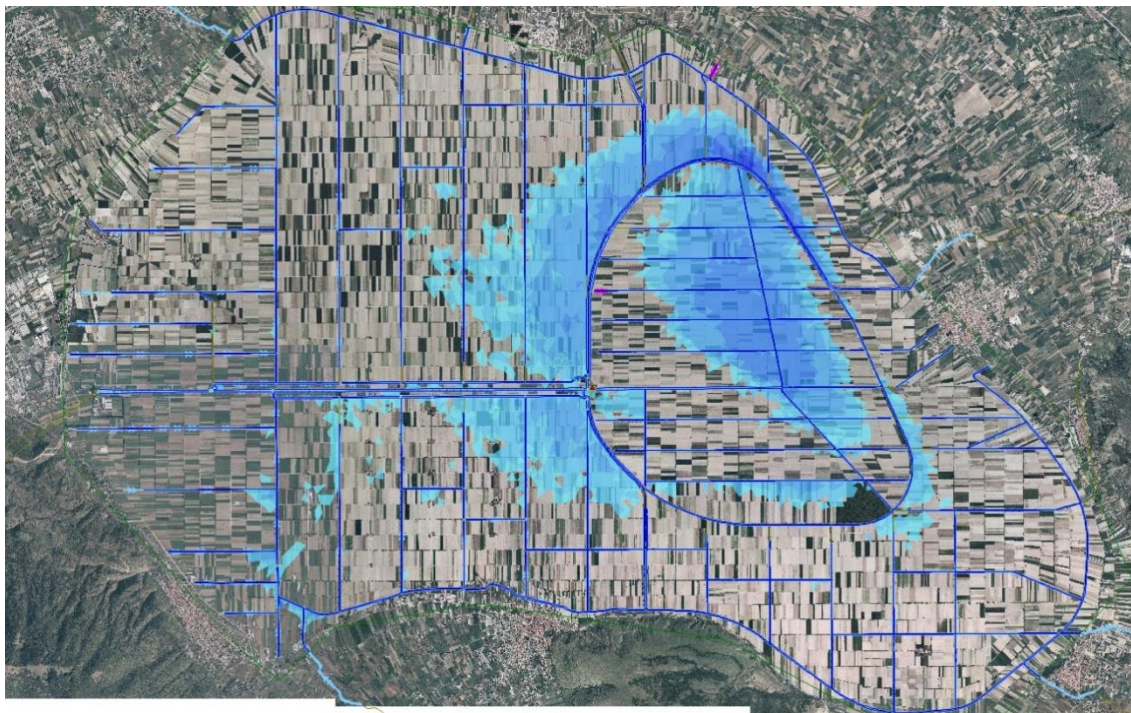


Figura 4.32: Simulazione degli allagamenti massimi per un evento di TR 30 anni, paratoie all'incile completamente aperte per l'intera durata dell'evento.

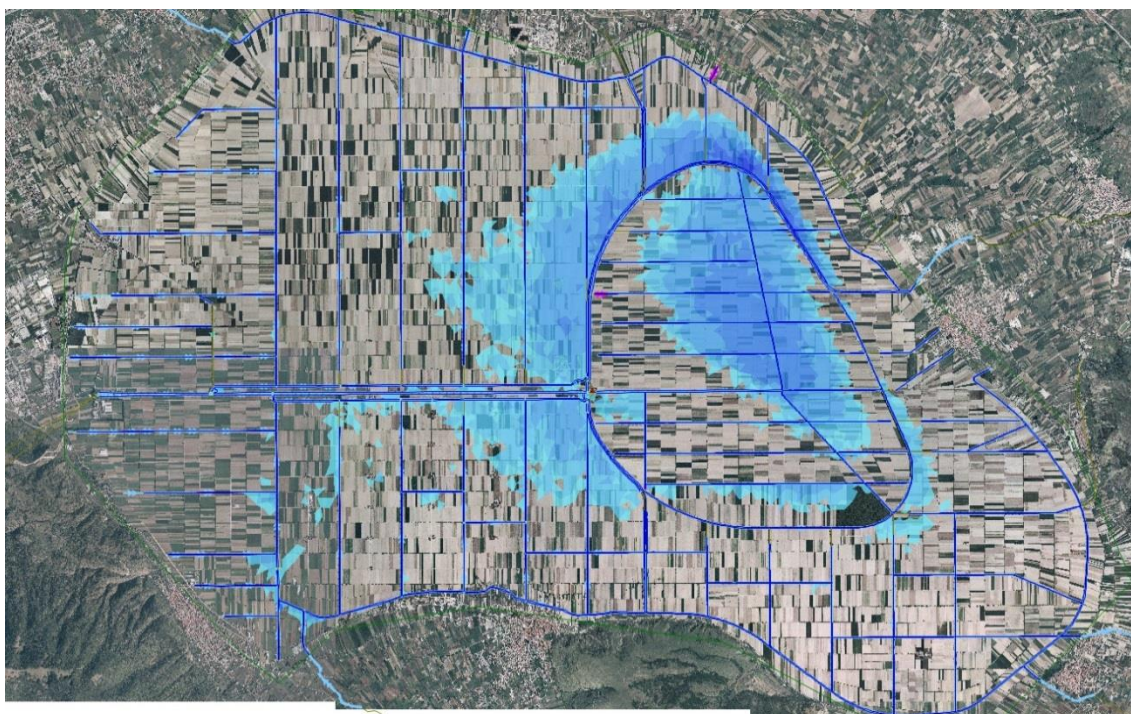


Figura 4.33: Simulazione degli allagamenti massimi per un evento di TR 30 anni, paratoie all'incile semi-aperte per l'intera durata dell'evento.

La Tabella 4.IV riporta i valori di volume esondato, con paratoie all'incile aperte quando il livello dell'emissario supera quota 649 m slm, per TR pari 30, 100, 300 anni e relative durate critiche (84 ore, 108 ore, 132 ore). Per completezza si inseriscono nella medesima tabella anche i volumi esondati per simulazioni con diversi TR (e relative durate critiche), che sono stati calcolati con specifiche simulazioni. Il volume esondato è un buon indicatore del disagio/danno complessivo causato dall'episodio di allagamento stesso.

Tabella 4.IV - Volume esondato in Milioni di m<sup>3</sup> a seguito di sollecitazioni di diverso Tempo di Ritorno e con le paratoie dell'Incile in posizione aperta.

TR	Volume esondato (Mm <sup>3</sup> )	Durata critica studiata
2	1 961 732	60
5	4 712 851	60
10	6 986 349	72
20	9 357 538	72
30	10 855 664	84
50	12 701 822	84
100	15 535 951	108
300	20 253 716	132
500	22 504 840	132

#### 4.8 Influenza dei cambiamenti climatici

Il cambiamento climatico sta interessando tutte le regioni d'Europa, causando una vasta serie di ripercussioni sulla società e sull'ambiente. La relazione "*Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012en*" (Cambiamento climatico, impatti e vulnerabilità in Europa al 2012), pubblicata dall'Agenzia europea per l'ambiente (AEA), rileva che in tutta Europa sono state osservate temperature medie più elevate, nonché precipitazioni in diminuzione nelle regioni meridionali e precipitazioni in aumento in Europa settentrionale. La crosta ghiacciata della Groenlandia, i ghiacci nell'Artico e numerosi ghiacciai in Europa si stanno sciogliendo, le superfici innevate sono diminuite e il permafrost si è riscaldato.

Gli eventi climatici estremi degli ultimi anni, quali ondate di caldo, alluvioni e siccità, hanno causato in Europa un aumento dei costi legati ai danni subiti. Se da un lato sono necessari maggiori elementi per capire il ruolo svolto dal cambiamento climatico nel delinearsi di questo scenario, dall'altro la crescita dell'attività umana nelle aree a rischio si è rivelata un fattore decisivo. Si prevede che gli eventi climatici estremi diventeranno sempre più intensi e frequenti e i futuri cambiamenti climatici contribuiranno ad accentuare la vulnerabilità di tale situazione. Secondo la relazione, se le società europee non adotteranno misure di adattamento, si prevede che i costi legati ai danni continueranno ad aumentare.

In questo contesto, per dare allo studio un respiro di lungo termine, è stato analizzato anche il comportamento del sistema di bonifica, sia nello stato attuale che nelle configurazioni di progetto, in uno scenario influenzato dai cambiamenti climatici.

In particolare, noti studi climatici permettono di determinare una stima dell'entità degli eventi pluviometrici futuri; secondo tali studi, nonostante ci si attenda in futuro una diminuzione delle medie stagionali, è probabile che gli eventi più intensi si amplifichino in magnitudo. In questo studio si è valutato, quindi, l'impatto di diversi scenari peggiorativi utilizzando un aumento di intensità delle piogge brevi ed intense del 20% per testare la vulnerabilità della piana del Fucino a questo tipo di intensificazione degli eventi. Tale valore è stato ricavato come sintesi dello studio completo sui cambiamenti climatici riportato in Appendice C.

Sono stati dunque definiti nuovi eventi pluviometrici, incrementando del 20% gli eventi determinati dallo studio delle piogge storiche per i vari tempi di ritorno (qui denominate piogge di riferimento) e si è poi sollecitato il modello, nello scenario dello stato di fatto e poi negli scenari di progetto, con i nuovi eventi di pioggia maggiorati, mantenendo invariati tutti gli altri parametri.

I risultati in termini di volume esondato nella configurazione attuale della rete (stato di fatto) sono riportati in Tabella 4.V per diversi Tempi di Ritorno degli eventi piovosi.

*Tabella 4.V - Volume esondato in Milioni di m<sup>3</sup> a seguito di sollecitazioni di diverso Tempo di Ritorno e con le paratoie dell'Incile in posizione aperta, con influenza dei cambiamenti climatici.*

<b>TR pioggia di riferimento</b>	<b>Durata critica studiata [h]</b>	<b>Incremento rispetto alla pioggia di riferimento</b>	<b>Volume esondato scenario CC (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume esondato (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Incremento volume esondato</b>
30	84	20%	15 692 316	10 855 664	44.6%
50	84	20%	17 786 500	12 701 822	40.0%
100	108	20%	21 689 714	15 535 951	39.6%
300	132	20%	29 078 956	20 253 716	43.6%
500	132	20%	30 828 808	22 504 840	37.0%

Risulta immediato il significativo incremento del volume esondato a fronte di questo aumento di pioggia, aumento di volume che si attesta intorno al 40% del volume esondato con la pioggia di riferimento.

Gli interventi di mitigazione del rischio idraulico dovranno quindi essere progettati sulla base anche dell'adattabilità ai futuri cambiamenti climatici in considerazione di un aumento del volume accumulabile del 40%.



## 5. Analisi delle criticità

### 5.1 Premessa

In questa relazione è stata illustrata la metodologia ed i risultati ottenuti per la valutazione delle criticità evidenziate a seguito dello studio di dettaglio eseguito nel reticolo di bonifica e irrigazione presente nella Piana del Fucino. È stato utilizzato un modello idrologico e idraulico (InfoWorks ICM) in grado di rappresentare, con un buon grado di affidabilità, la funzionalità della rete sia in diversi regimi di funzionamento.

### 5.2 Funzionalità di drenaggio e bonifica del reticolo

A seguito dell'analisi della funzionalità di bonifica si è arrivati a concludere che il reticolo, nella sua condizione attuale, pare complessivamente adeguato allo smaltimento delle acque – a meno di particolari situazioni locali – per eventi pluviometrici di bassa entità, mentre sussistono fenomeni di esondazione in corrispondenza di eventi significativi.

Essendo il bacino del Fucino, di fatto, un sistema chiuso e regolato dalla limitazione della massima portata in uscita dagli emissari, l'acqua in eccesso nel sistema, una volta convogliata nel punto più basso della rete, non può fare altro che invasare in attesa di essere poi smaltita attraverso la sezione di chiusura.

La chiusura di questi emissari, imposta talvolta per motivi di protezione idraulica del centro abitato di Sora posto lungo il fiume Liri, non può fare altro che causare un immediato innalzamento dei profili di rigurgito e una esondazione nelle zone più depresse della Piana, ossia in prossimità dell'abitato di Borgo Ottomila ed all'interno del bacinetto.

L'unico possibile rimedio a questa criticità è lo studio della possibilità di immagazzinare l'eccesso d'acqua in opportuni bacini di accumulo, che consentano una laminazione ed attenuazione delle curve di piena.

I bacini di accumulo dovranno inoltre essere progettati in considerazione dell'influenza dei cambiamenti climatici sugli eventi pluviometrici. I progetti dovranno quindi avere la possibilità di adattarsi ai possibili incrementi di volume di allagamento causati dall'effetto del cambiamento climatico.

Le possibili soluzioni a queste criticità vengono approfondite nelle successive fase descrittive di questo studio.



## Riferimenti bibliografici

- ARSSA (1996): *Progetto per la ricerca e utilizzazione del patrimonio idrico superficiale e sotterraneo del bacino del Fucino e zone limitrofe*.
- BACCHI B. (1997): *Un approccio metodologico agli studi idrologici e idraulici per la difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati*, in *La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati*, U. Maione e A. Brath, Editoriale Bios.
- BINDI, M. AND OLESEN, J.E. (2011): *The response of agriculture in Europe to climate change*. Regional Environmental Change, **11**, S151-S158
- BONI C., BONO P., CAPELLI G. (1986): *Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale*. Mem. Soc. Geol. It., 36, pp.991-1012.
- BRATH A. (2003): *Effetti dell'Antropizzazione e dei Cambiamenti Climatici sul Rischio Alluvionale*, in a cura di Ferrucci E. Primo forum Nazionale, Rischio Idraulico e assetto della rete Idrografica nella Pianificazione di Bacino. Ed. Maggioli.
- BURRI E., PETITTA M. (2002): *Esubero e carenza idrica: antico e recente problema ambientale nel Fucino (Avezzano)*. Atti della Conferenza Internazionale "Acqua e Irrigazione", Cremona. settembre 2001, 492-500
- BURRI E., PETITTA M., DEL BON A. (2002): *Studio idrologico ed idrogeologico delle utilizzazioni idriche nella Piana del Fucino*. ARSSA, Sede di Avezzano.
- CELICO P. (1983): *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale: Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno*. Quad. Cassa Mezzogiorno, 4/2, Roma.
- CENTRO FUNZIONALE DELLA REGIONE LAZIO,(2011): *Rapporto di evento del 16-18 Marzo 2011*
- COMPARTIMENTO DI NAPOLI DEL SERVIZIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO NAZIONALE (2001): *Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia del Compartimento di Napoli del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN)*
- COPPOLA, E. AND GIORGI, F. (2010). *An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy from recent global and regional climate model simulations*. International Journal of Climatology. **30**, 11-32
- DIREZIONE PROTEZIONE CIVILE E AMBIENTE – CENTRO FUNZIONALE D'ABRUZZO – SETTORE IDRO (2011): *Studio Idrologico ed Idrodinamico del Bacino del Fucino*.
- FAGGIAN, P. AND GIORGI, F. (2009). *An analysis of global model projection over Italy with particular attention to the Italian Greater Alpine Region (GAR)*. Climatic Change. **96**, 239-258
- FRANCHINI M. (1996): *Calibrazione e verifica dei modelli concettuali piogge deflussi*, in Maione U. Brath A., Atti del Corso di Aggiornamento, La difesa idraulica del territorio, Politecnico di Milano, Ed. Bios.
- GAO, X., PAL, J., AND GIORGI, F. (2006): *Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from the high resolution double nested RCM simulation*. Geophysical Research Letters.**33**, 1-4.

- GIORGI, F. AND LIONELLA, P. (2008): *Climate change projections for the Mediterranean region*. Global Planetary Change. **63**. 90-104
- GIRAUDI C., (1994): *Origine ed evoluzione geologica recente del bacino del Fucino* in Burri, E. (ed). Il Lago del Fucino e il suo emissario. CARSA Ed., pp. 14-34.
- GOUBANOVA, K., AND LI, L., (2007): *Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations*. Global and Planetary Change. **57**. 27-42
- HERTIG, E., SEUBERT, S., PAXIAN, A., VOGT, G., PAETH, H., AND JACOBET, J. (2013): *Statistical modelling of extreme precipitation indices for the Mediterranean area under future climate change*. International Journal of Climatology. DOI: 10.1002/joc.3751.
- KYSELY, J., BEGUERIA, S., BERANOVA, R., GAAL, L. AND LOPEZ-MORENO, L.G. (2012): *Different patterns of climate change scenarios for the short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean*. Global Planetary Change. **98-99**. 63-72.
- LA LOGGIA G., OLIVIERI E., (1997): *Modelli di formazione delle piene nelle reti di fognatura*, in Maione U. Brath A., Atti del Corso di Aggiornamento, La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati, Politecnico di Milano, Ed. Bios.
- LAMBERTI P., LEONI G., (1997): *Problematiche delle reti di bonifica in aree fortemente antropizzate: il caso della bonifica renana nel territorio della Bassa bolognese*, in Maione U. Brath A., Atti del Corso di Aggiornamento, La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati, Politecnico di Milano, Ed. Bios.
- MAIDMENT D.R. (ed.) (1993): *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill Inc., USA.
- MAIONE U. (1995): *Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, Pavia.
- MAIONE U. (2003): *Le casse di espansione*, in a cura di Ferrucci E. Primo forum Nazionale, Rischio Idraulico e assetto della rete Idrografica nella Pianificazione di Bacino. Ed. Maggioli.
- MOISELLO U. (1999): *Idrologia tecnica*, La goliardica Pavese. Padova.
- NATALE L. (2003): *Idrologia Tecnica*, Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale, Zanichelli
- PAOLETTI A. (1996): *Sistemi di Fognatura, Manuale di Progettazione, Modelli matematici di drenaggio urbano*. CSDU, Milano, Hoepli.
- PARIS E. (2004): *Rischio idraulico: interventi per la protezione del territorio le casse di espansione*. Cism, Udine.
- PETITTA M., BURRI E., DEL BON A., MARCHETTI A., (2005): *Carta idrogeologica del Fucino, foglio 1. Atlante tematico del Fucino*, ARSSA Abruzzo, SELCA. (in stampa)
- PIZZIGALLI, C., PALATELLA, L., ZAMPIERI, M., LIONELLO, P., MIGLIETTA, M.M, AND PARADISI, P. (2012): *Dynamical and statistical downscaling of precipitation and temperature in a Mediterranean area*. Italian Journal of Agronomy. 7:e2, 3-12
- VAN DER LINDEN P., AND MITCHELL, J.F.B. (2009): *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp

# App. A Descrizione del modello InfoWorks ICM

## A.1 Campi di applicazione

InfoWorks ICM è il più recente e completo applicativo di simulazione idraulica sviluppato dalla software house internazionale Innowyze. Il software nasce per consentire la modellazione numerica integrata di alvei fluviali, reticoli di bonifica e fognature urbane. La sua flessibilità di applicazione consente quindi di rappresentare in modo completo e accurato tutte le situazioni reali dei corsi d'acqua anche quando sono presenti complesse interferenze con reticoli fognari e/o di bonifica.

All'interno di un'unica interfaccia utente si possono quindi rappresentare sezioni fluviali aperte con approccio monodimensionale, domini bidimensionali, reti di drenaggio chiuse e tutti i manufatti speciali presenti in ambito fluviale o fognario (ponti, soglie, sollevamenti, scaricatori di piena ecc).

Le aste fluviali possono quindi essere liberamente rappresentate, secondo le preferenze dell'utente, o con un dominio interamente 2D (comprendente sia l'alveo inciso che le golene) che con modellazione mista (generalmente 1D per l'alveo inciso e 2D per le zone di espansione golenali). È ovviamente anche possibile modellare le aste fluviali con tradizionali rappresentazioni 1D.

Per quanto riguarda invece la rappresentazione di reti di drenaggio urbano la tecnica oramai consolidata è quella di rappresentare il reticolo interrato con elementi 1D e l'eventuale esondazione con domini 2D.

## A.2 Punti di forza dell'applicativo software

I punti di forza principali dell'applicativo derivano dalla sua ampissima gamma di applicazione che ne consente l'utilizzo di qualsiasi situazione reale senza bisogno di artifici o semplificazioni. L'interfaccia utente semplice e completo, la velocità di calcolo e la robustezza dell'approccio numerico completano il prodotto rendendolo facilmente fruibile a tecnici del settore.

## A.3 Modelli idrologici disponibili

In InfoWorks ICM sono disponibili una serie di modelli di trasformazione afflusso-deflussi. È quindi possibile sollecitare il modello geometrico con diverse condizioni al contorno tra cui anche degli opportuni ietogrammi di pioggia incidenti in diversi sottobacini. A scelta l'utente potrà scegliere tra questi modelli idrologici:

- Formula Razionale
- Modello CN (SCS)
- Modello Green-Ampt
- Modello Horton
- Modello New UK
- Modello dell'Infiltrazione costante
- Modello di Horner

Si possono anche inserire diversi modelli di corrivazione e di computazione delle perdite iniziali.

## A.4 Approccio numerico della componente 1D

Il moto idraulico all'interno degli elementi monodimensionali che lavorano a pelo libero (sia le tratte fluviali aperte o tubazioni) vengono risolte con l'integrazione delle equazioni di De Saint Venant (conservazione del momento e della massa).

Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

ove:

- A area bagnata del condotto;
- Q portata;
- x distanza lungo l'asse del condotto;
- t tempo;
- g costante gravitazionale;
- H carico idraulico totale dato da z+h;
- z quota dello scorrimento;
- h livello idrico;
- Sf cadente piezometrica.

In particolare, la (1) è l'equazione di continuità in moto vario in assenza di afflussi e deflussi laterali, la (2) è l'equazione del momento della quantità di moto; quest'ultima può essere scritta in più forme, in funzione della scelta delle variabili dipendenti. La cadente piezometrica viene computata con varie possibili metodologie (a scelta dell'utente): in InfoWorks sono infatti disponibili le equazioni di Colebrook-White, Manning e Strickler.

Per poter essere integrate queste equazioni devono essere opportunamente semplificate e linearizzate in modo tale che il sistema di equazioni possa essere risolto con la teoria delle matrici. Lo schema di linearizzazione usato da InfoWorks CS è quello dei 4 punti di Priessmann mentre il risolutore adottato è quello di Newton-Raphson.

Le equazioni di cui sopra sono valide fino a quando il condotto non entra in pressione, per permettere a InfoWorks di simulare anche situazioni di condotte in pressione (senza problemi nella transizione da uno stato all'altro) il motore di calcolo adotta la tecnica dello slot per il quale si ipotizza la presenza di una piccola fessura alla sommità della condotta e fino al piano campagna. Così facendo il motore di calcolo non incontra nessuna discontinuità nella transizione da moto da gravità a quello in pressione (per tubi in cui invece permane costantemente il moto in pressione, come le condotte di mandate presenti nel modello, è possibile utilizzare un sistema di equazioni più appropriato che elimina l'artificio dello slot).

L'applicabilità di questo metodo di soluzione è stato testato in centinaia di studi e applicazioni anche con riscontri di misure idrometriche ottenuti su dei bacini sperimentali.

Ci sono alcune limitazioni sull'utilizzo di questo approccio sono:

- I risultati sono semplificati per elementi molto pendenti e per le quali comunque InfoWorks produce dei risultati comunque vicini alla realtà
- Il risalto idraulico (ovvero quella discontinuità che si nota nei profili di rigurgito dove un tubo molto pendente incontra un tubo a bassa pendenza per cui l'acqua forma un vero e proprio sovrizzo improvviso) non viene rappresentato in modo preciso ma il passaggio da corrente veloce a lenta viene computato su una certa distanza (qualche metro a seconda della geometria della situazione reale)

Si noti che la metodologia di calcolo a moto vario è in grado di tener conto anche dei volumi in gioco e quindi di tener conto delle attenuazioni dell'onda di piena quando questa riempie dei volumi disponibili in alveo o in vere e proprie vasche di espansione opportunamente rappresentate nel modello.

## A.5 Approccio numerico della componente 2D

Il modello usato per la rappresentazione matematica del flusso 2D è basato sull'equazione dell'acqua superficiale, relativa cioè all'altezza media che si ricava dalle equazioni di Navier – Stokes:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{1D} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + gh^2/2) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1D} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + gh^2/2) \\ = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1D} \end{aligned} \quad (3)$$

dove:

- $h$  è l'altezza dell'acqua;
- $u$  e  $v$  sono rispettivamente le velocità nelle direzioni  $x$  e  $y$ ;
- $S_{0,x}$  e  $S_{0,y}$  sono rispettivamente le pendenze dell'alveo nelle direzioni  $x$  e  $y$ ;
- $S_{f,x}$  e  $S_{f,y}$  sono rispettivamente gli attriti nelle direzioni  $x$  e  $y$ ;
- $q_{1D}$  è la portata per unità di area;
- $u_{1D}$  e  $v_{1D}$  sono rispettivamente le componenti di velocità della portata  $q_{1D}$  nelle direzioni  $x$  e  $y$ .

Questa formulazione conservativa dell'equazione dell'acqua superficiale è discretizzata utilizzando un sistema di primo ordine esplicito del volume finito.

La tecnica di frazionamento del flusso assicura la proprietà del buon equilibrio bilanciando la pendenza con la pressione, termini a riposo.

La gestione della cella bagnata ed asciutta è eseguita utilizzando come criterio una profondità di soglia per considerare che una cella è bagnata, e la velocità è impostata a zero se la profondità è sotto il valore di soglia. Questo evita la creazione di elevate velocità artificiali in aree bagnate/asciutte. Il valore di default per questa profondità di soglia è 1mm.

Questo algoritmo può essere utilizzato teoricamente sia con maglie strutturate (rettangolari) che non strutturate (triangolari) ed è adatto per rappresentare flussi rapidamente variabili, nonché correnti veloci e lente. In InfoWorks si utilizzano le maglie non strutturate perché sono molto più flessibile e di facile utilizzo quando si vogliono rappresentare forme e ostacoli complessi presenti nel dominio.

## A.6 Produzione della magliatura 2D

All'interno del software sono presenti tutti gli strumenti necessari per costruire la magliature dei domini 2D da simulare. Si possono prevedere diversi gradi di dettaglio per varie zone con opportuni raffinamenti del dominio, impostare diverse zone di scabrezza, fissare delle breakline, definire ostacoli poligonali e lineari (edifici, muri ecc). Il processo di magliatura tiene conto di questi vincoli e, se lo si desidera, è in grado di produrre una magliatura dipendente dalla conformazione morfologica del terreno. Laddove il terreno risulta più pendente viene infittita la maglia per assicurarsi che i triangoli non abbiano i vertici con differenze di quota superiori ad un termine fissato dall'utente.

## A.7 Collegamento 1D-2D

Il modello di simulazione consente un immediato collegamento di diverse componenti di modello modo e bidimensionale. Si possono utilizzare per esempi:

- linee spondali,: rappresentano un confine ideale tra l'alveo inciso modellato con elementi 1D e la golena rappresentata da un dominio 2D, le linee spondali vengono rappresentate con delle polilinee per le quali viene definita una quota Z variabile sul suo percorso. Le linee spondali sono utilizzate essenzialmente come sfiori laterali tra alveo inciso e zona di golena 2D
- sfiori frontali: si utilizzano quando si desidera interrompere un modello 1D di un fiume e trasferire tutto l'idrogramma di portata sul dominio 2D (o viceversa)
- nodi: sono degli elementi puntiformi dove può avvenire lo scambio di portata tra 1D e 2D, per esempio questa tecnica è appropriata quando di rappresentano le esondazioni provenienti dai pozzetti di fognatura su un dominio bidimensionale.

## A.8 Tempi di calcolo e dimensioni del modello

Il software consente di eseguire calcoli e ottenere risultati in tempi rapidi. Mentre la componente 1D sui moderni processori consente dei tempi di simulazione irrisori (pochi secondi per modellare una rete di 1,000 nodi per un vento di 4 ore di durata) la componente bidimensionale può necessitare di tempi d'attesa più lunghi in funzione del numero di triangoli e dalle condizioni di moto del dominio. Su dei processori Core i7 ci si può attendere che una simulazione di 10,000 triangoli di un evento reale di 60 minuti possa necessitare qualche minuto per essere computata. Il motore di calcolo 2D è stato testato su domini di calcolo con oltre 5 milioni di triangoli ma per queste ampiezze di dominio si consiglia di dotarsi di specifica GPU (hardware non sempre presente in classici Desktop e molto raramente in Laptop) che accelerano i tempi di calcolo di 30-50 volte rispetto ai normali processori consentendo quindi tempi computazionali molto ridotti (ordine di decine di minuti) per domini 2D di centinaia di migliaia di triangoli.



## App. B Descrizione della misura all'Incile

A supporto di questo studio idrologico idraulico del reticolo Piana si è tentato di effettuare una misura di portata in uscita all'Incile in data 21-11-2013 in modo tale da determinare in modo preciso il valore complessivo massimo di portata che può uscire dall'emissario (anche alla luce di una differenza non del tutto trascurabile tra i valori di progetto e quelli che si sono ottenuti dal modello di simulazione). Il periodo precedente alla data del 21-11-2013 è stato piuttosto piovoso ed era stato possibile invasare artificialmente acqua nel collettore principale. Il proposito era quello di aprire bruscamente, una alla volta, i due emissari approfittando dell'alto livello all'incile e misurando le portate in uscita in queste condizioni su ciascuno dei due emissari. La misura è stata tentata con opportuno mulinello calibrato che consente di misurare la velocità della corrente in vari punti della sezione idraulica in corrispondenza di una passerella a servizio dello sgrigliatore posto a 100 metri circa a monte degli emissari. La misura purtroppo è stata inficiata dai due seguenti problemi:

- La lentezza dell'apertura delle paratoie dell'emissario principale (circa 1 ora e mezza), in tale lasso di tempo il canale ha avuto un abbassamento di livello notevole e quindi non era più possibile verificare la portata in uscita con livelli di riempimento prossimi a quelli di allagamento.
- La notevole sporcizia che si accumula sulla griglia quando si instaurano velocità notevoli nel canale principale, che crea notevole turbolenza a valle rendendo impossibile una misura corretta della velocità dalla passerella.

La misura diretta è quindi purtroppo fallita ma si vuole suggerire al consorzio di Bonifica di organizzare tempestivamente, durante un futuro evento alluvionale, questo tipo di misura (da effettuare in un altro punto per evitare il problema della turbolenza).

Nonostante le difficoltà incontrare si è potuto comunque misurare, in modo indiretto, la portata massima che si è mobilizzata durante la manovra di apertura delle paratoie dell'emissario principale. La corrente in arrivo dal collettore principale entra in un'area rettangolare, delimitata dalle pareti del manufatto all'incile degli emissari, che funge da vasca di carico degli emissari stessi, attraversando n.3 luci rettangolari di larghezza  $B = 4.00$  m ciascuna. I setti che delimitano le luci si presentano ben raccordati a monte, con profilo circolare tipico delle correnti lente in grado di annullare l'effetto della contrazione laterale della vena liquida. La misurazione speditiva del fondo delle luci ha consentito di ritenere orizzontali le soglie di sfioro delle luci.

Ciascuna luce realizza quindi una configurazione geometrica corrispondente ad uno stramazzo rettangolare senza contrazione laterale (detto anche stramazzo Poleni o stramazzo Bazin) considerato uno dei migliori dispositivi per la misurazione della portata in funzione del carico idraulico.

Per quanto riguarda l'altezza della soglia, anche se non visibile, è lecito attendersi una situazione prossima all'equilibrio tra quota sfiorante e quota del fondo canale (stramazzo in soglia piana, detto anche stramazzo Bélanger).

Al momento della misura si poteva osservare l'andamento del profilo idrometrico che nel collettore subito a monte del manufatto presentava una velocità molto bassa (foto n.4.2 del Report attività del 21 novembre 2013) mentre, nel passaggio attraverso le sezioni ristrette delle luci, presentava un profilo di richiamo con passaggio a corrente rapida, evidenziata dalla tipica conformazione delle perturbazioni di moto supercritico che si staccano dalle pareti laterali in prossimità delle irregolarità dovute ai gargami (foto n. 4.3 del Report). Tale situazione dimostra il comportamento "libero" dello stramazzo, che non veniva influenzato dalla quota idrometrica instauratasi all'interno della vasca di carico.

La relazione che esprime la portata Q in funzione del carico a monte  $h_0$  è la seguente:

$$Q = B C_Q (2g)^{0.5} h_0^{1.5}$$

Al momento della misura (ore 14.51) il carico  $h_0$  a monte è stato misurato in 0.98 m, avendo avuto cura di misurare la quota idrometrica in un punto a monte del profilo di richiamo.

Per quanto riguarda il coefficiente di portata  $C_Q$ , nel caso di soglia piana è stato dimostrato da Bélanger il valore teorico di 0.385.

La portata complessiva defluita dalle tre luci assume valore di 19.85 m<sup>3</sup>/s.

Terminata la prova si è chiuso l'emissario e, entrando al suo interno con scala a chiocciola interna all'edificio dell'emissario si è potuto misurare l'altezza idrica massima pari a 3.43 metri (tale misura deriva dal conteggio dei gradini della scala a chiocciola che si sono immersi durante la misura e che si sono ritrovati "bagnati", nella successiva ispezione visiva della stessa scala a chiocciola).

Quindi si può dedurre che l'emissario principale mobilita una portata di circa 20 m<sup>3</sup>/s con un'altezza idrica nella sua sezione iniziale pari a 3.43 metri circa.

Nel modello numerico utilizzato per l'analisi idraulica (e per il quale la portata massima durante eventi alluvionali dell'emissario principale è pari a 32 m<sup>3</sup>/s) un valore di 20 m<sup>3</sup>/s di portata realizza un tirante pari a 3.3 metri, quindi un valore assai simile a quello osservato. Si tenga presente che la misura indiretta è stata fatta 50 minuti di ritardo rispetto all'apertura totale delle paratoie dell'emissario, quindi sicuramente la portata massima mobilitata durante la manovra di apertura era superiore del valore di 20 m<sup>3</sup>/s osservati.

La conclusione di queste prove è che si è avuta un'ulteriore conferma che la portata dell'emissario principale rappresentata nel modello sia ben allineata con le reali prestazioni del manufatto e che quindi il modello di simulazione sia attendibile.

## App. C Cambiamento climatico

### C.1 Introduzione

Questa appendice fornisce i risultati di un'analisi degli scenari di cambiamento climatico per la zona della Piana del Fucino nella regione Abruzzo ottenuti da modelli previsionali disponibili dagli studi e ricerche attualmente disponibili in materia.

Le informazioni sul cambiamento climatico attualmente disponibili derivano da modelli previsionali a scala europea o mondiale. In generale gli scenari a lungo termine prevedono un aumento di temperature apprezzabili soprattutto nei mesi estivi a cui si prevede andrà a sovrapporsi una diminuzione delle precipitazioni.

Tali informazioni sono state utilizzate per determinare una sintesi applicabile alla zona della Piana del Fucino; in particolare sono stati sviluppati tre scenari di cambiamento climatico da utilizzare come test di sensitività nelle modellazioni idrauliche e di bilancio idrologico per verificare come queste modifiche nei pattern climatici possano impattare sull'efficacia delle infrastrutture oggetto di studio e progettazione. Gli scenari identificati sono di bassa, media e alta sensitività dei cambiamenti climatici al 2080.

Questi tre scenari rappresentano, quindi, una sintesi e semplificazione di quello che le analisi di lungo termine prevedono e vengono descritti come fattori di incremento per temperatura e precipitazione medie rispetto ad analisi basate su banche dati storiche. Si sono anche forniti dei valori di incremento da applicare ad eventi di precipitazione estremi utilizzati per la rappresentazione dei fenomeni di esondazioni.

Gli scenari ricavati possono essere utilizzati per analizzare il possibile impatto di queste proiezioni sulle scelte strategiche nella gestione delle acque della Piana del Fucino.

### C.2 Revisione della letteratura e modelli disponibili

Si sono analizzati gli studi e ricerche attualmente disponibili soprattutto per quanto riguarda gli scostamenti stagionali di temperatura e precipitazione complessiva previsti al 2080. La più rilevante fonte di dati per il territorio Italiano deriva dal progetto denominato *Coupled Model Intercomparison Project "CMIP3"* e dal progetto *ENSEMBLES* il cui obiettivo era di fornire una simulazione di cambiamento climatico per il territorio Europeo con scala spaziale di 25 km. Attualmente sono in fase di pubblicazione nuove ricerche come quella denominata *CMIP5* di cui non sono ancora disponibili i relativi risultati.

#### C.2.1 Impatti climatici medi stagionali

Nella Tabella C.I si riportano gli articoli e ricerche su cui si basa questo studio.

Tabella C.I - Sintesi delle fonte di dati utilizzati dalla letteratura

ID	Source	Title	Description
1	<a href="http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1867/abstract">http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1867/abstract</a>	An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy from recent global and regional climate model simulations	Prudence RCMs 2080s A2 - From plots on P24 and CMIP3
2	<a href="http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-009-9584-4#">http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-009-9584-4#</a>	An analysis of global model projections over Italy, with particular attention to the Italian Greater Alpine Region (GAR)	CMIP3 2080s A1B
3	<a href="http://agronomy.it/index.php/agro/article/view/ija.2012.e2">http://agronomy.it/index.php/agro/article/view/ija.2012.e2</a>	Dynamical and statistical downscaling of precipitation and temperature in a Mediterranean area	REGCM3 2080s A2
4	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818107001750">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818107001750</a>	Climate change projections for the Mediterranean region	CMIP3 2080s A1B

ID	Source	Title	Description
5	ENSEMBLES Project	ENSEMBLES: Climate change and it's impacts.	ENSEMBLES 2080s A1B
6	<a href="http://link.springer.com/article/10.1007/s10113-010-0173-x#page-1">http://link.springer.com/article/10.1007/s10113-010-0173-x#page-1</a>	The responses of agriculture in Europe to climate change	IPCC AR4 - CMIP3

È importante notare che tutta la letteratura si basa sulla stessa base di dati e quindi non si può considerare l'una indipendente dall'altra. I grafici con le previsioni di variazione di temperature e precipitazione a scala stagionale applicata alla zona della Piana del Fucino sono visibili dalla Figura C.1 fino alla Figura C.4.

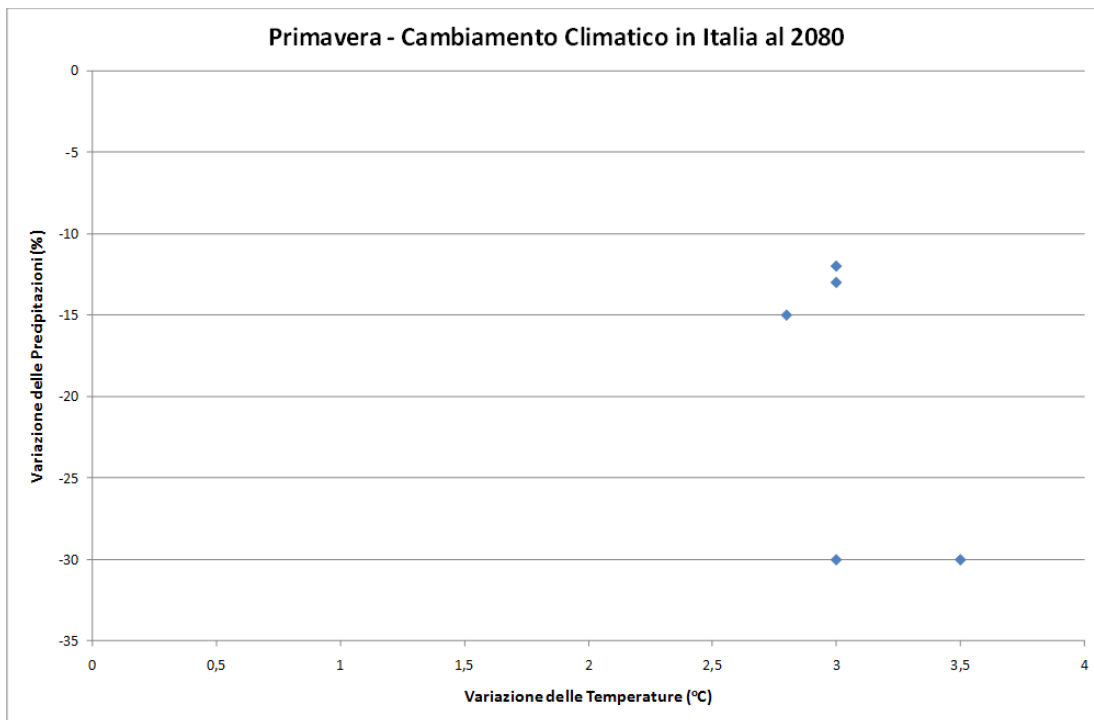


Figura C.1 - Variazioni delle Precipitazioni e delle Temperature in Primavera al 2080

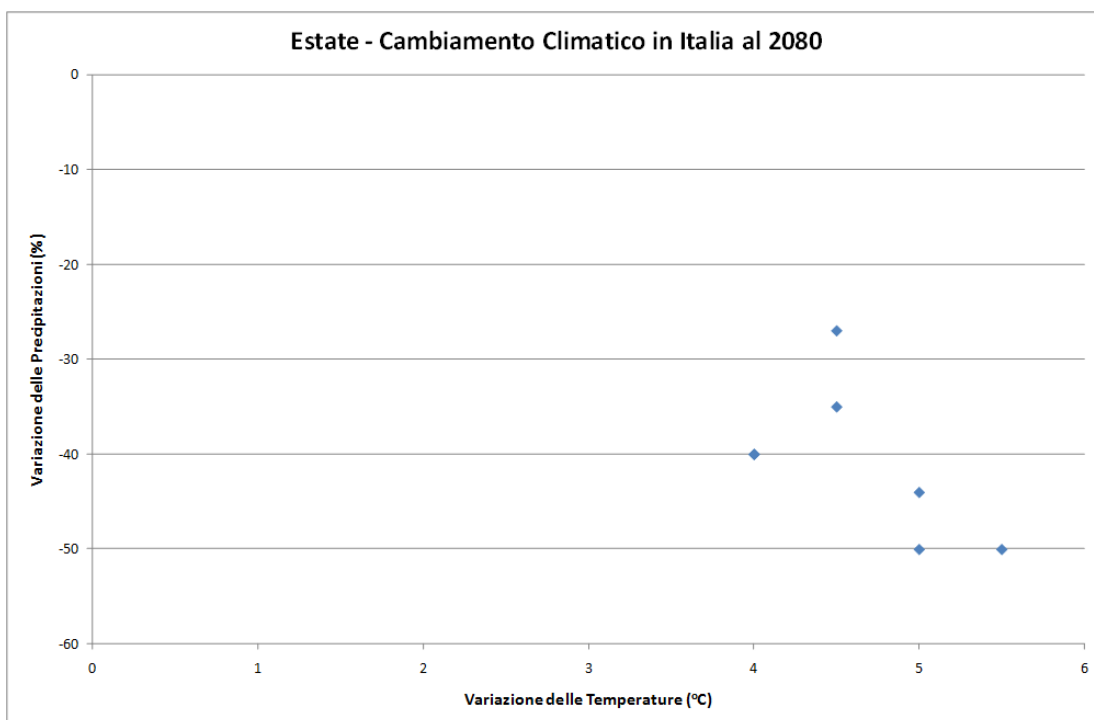


Figura C.2 - Variazioni delle Precipitazioni e delle Temperature in Estate al 2080

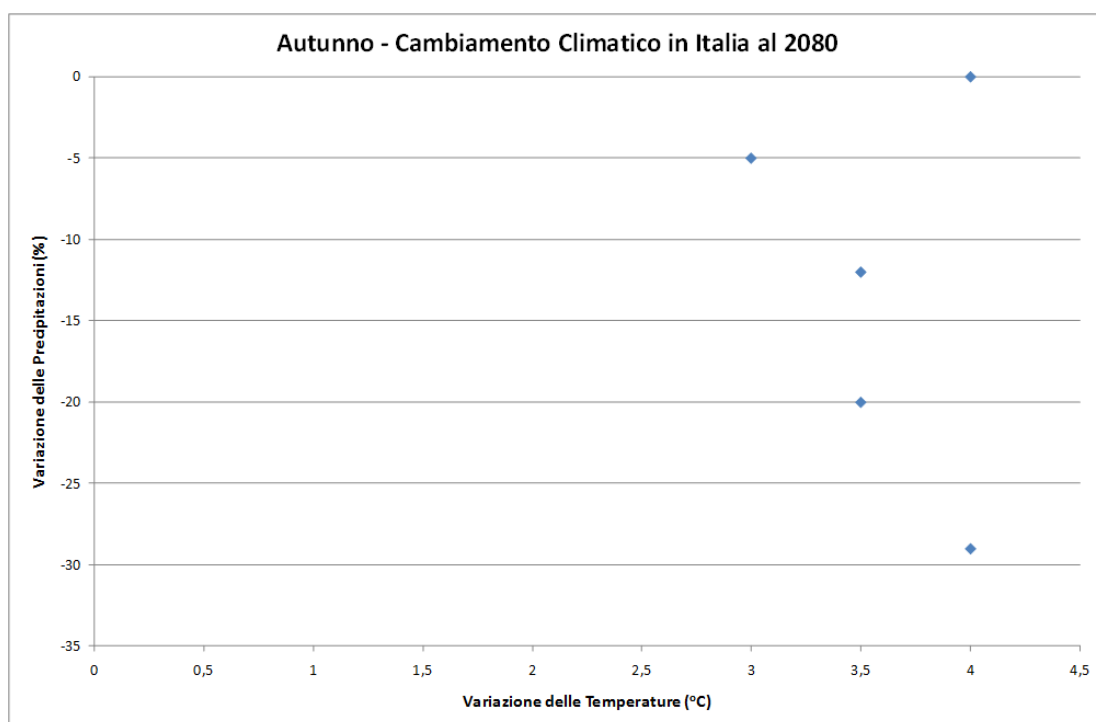


Figura C.3 - Variazioni delle Precipitazioni e delle Temperature in Autunno al 2080

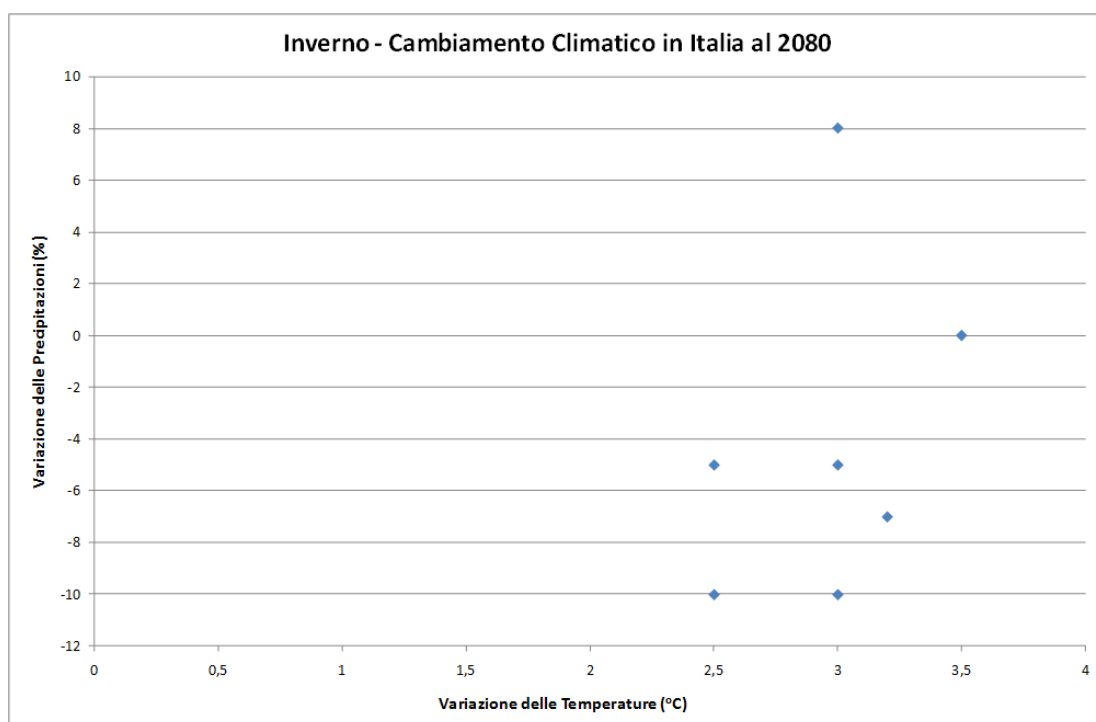


Figura C.4 - Variazioni delle Precipitazioni e delle Temperature in Inverno al 2080

### C.2.2 Modifiche di precipitazione medie stagionali

Entro la fine del 21<sup>o</sup> secolo i modelli di cambiamento climatico prevedono un trend di diminuzione di precipitazione complessiva per tutte e quattro le stagioni. In Inverno ci si aspetta un decremento modesto tra lo 0 e il 10% mentre in Estate il decremento previsto è tra il 20% e il 50%. Per la Primavera e l'Autunno ci si aspetta un decremento tra lo 0 e il 30% (Tabella C.II).

Tabella C.II - Variazioni di pioggia stagionale da letteratura

ID	Primavera	Estate	Autunno	Inverno
1	-30%	-50%	0%	0%
1	-	-40%	-	-5%
2	-30%	-50%	-20%	-10%
3	-13%	-44%	-29%	8%
4	-12%	-27%	-12%	-7%
5	-15%	-35%	-5%	-10%
6	-	-40%	-	-5%

### C.2.3 Modifica di temperature medie stagionali

Si prevedono incrementi di temperatura in tutte e 4 le stagioni con un massimo di incremento per le Estati fino a 5.5°C. Per gli Inverni e le Primavere si prevede un aumento tra 2.5°C e 3.5°C mentre in Autunno l'incremento previsto è tra i 3°C e 4°C (Tabella C.III).

Tabella C.III - Variazioni di temperatura in °C da letteratura

ID	Primavera	Estate	Autunno	Inverno
1	3.0	5.0	4.0	3.5
1	-	4.0	-	3.0
2	3.5	5.5	3.5	2.5
3	3.0	5.0	4.0	3.0
4	3.0	4.5	3.5	3.2
5	2.8	4.5	3.0	3.0
6	-	4.0	-	2.5

### C.3 Impatto sulle piogge intense nell'area del Mediterraneo

Kysely et al (2012) hanno utilizzato le previsioni di cambiamento climatico sviluppate da *ENSEMBLES* per derivare previsioni su eventi estremi nell'area del Mediterraneo e sono giunti alla conclusione che gli eventi brevi ed intensi possano avere incrementi significativi in futuro. Kysely et al (2012) hanno poi notato che, nonostante ci si aspetti una diminuzione complessiva di precipitazione complessiva stagionale, gli eventi estremi saranno probabilmente più intensi.

Hertig et al (2013) hanno combinato un approccio statistico con i risultati del *CMIP3* per definire degli scenari di precipitazioni estreme nell'area del Mediterraneo. Questo lavoro mostra come, nelle regioni del Centro Italia, i numeri di giorni per cui ci si aspetta l'accadimento di eventi estremi si riduce in tutte le stagioni con esclusione dell'inverno che mostra un aumento della probabilità. Si noti comunque che secondo questi autori la regione del Fucino è classificata come zona di incertezza.

Gao et al (2006) concludono che i cambiamenti climatici porteranno ad un aumento della probabilità di avere precipitazioni intense in tutto il Mediterraneo. In particolare la loro previsione porta ad attendersi estati particolarmente estreme con prolungati periodi siccitosi intervallati da eventi piovosi intensi che porterebbero, di conseguenza, ad un aumento di frequenza di allagamento e a crisi idriche.

Goubanova (2007) ha studiato le possibili manifestazioni estreme di temperatura e precipitazione piovosa e ha concluso che ci si può aspettare un calo nelle precipitazioni complessive in Inverno e in Primavera ma che, allo stesso tempo, gli eventi estremi tenderanno a crescere in magnitudo.

## C.4 Scenari di Cambiamento Climatico

### C.4.1 Fattori Stagionali

La più recente letteratura ha fornito una serie di proiezioni sui possibili impatti dei cambiamenti climatici stagionali in Italia. Queste proiezioni sono state utilizzate per derivare tre scenari semplificati da utilizzare come test di sensitività nella modellazione idrologica e idraulica applicata alla Piana del Fucino. I tre scenari si riferiscono a prospettive di basso, medio e alto impatto (o sensitività) e rappresentano un involucro delle condizioni di minimo, medio e massimo scarto che si attende nei valori di temperatura e precipitazione medie per ognuna delle quattro stagioni. Questi risultati sono evidentemente delle semplificazioni che però consentono l'immediata applicazione a modelli di simulazione fisicamente basati.

Si fa notare che gli scenari prevedono che le modifiche di temperatura (Figura C.5 e Tabella C.IV) e precipitazioni (Figura C.6 e Tabella C.V) si manifestino contemporaneamente anche se è probabile che queste non siano necessariamente correlate (ovvero un anno particolarmente siccitoso non è detto che sia anche un particolarmente caldo). È quindi probabile che assumendo la contestualità delle due manifestazioni di cambiamento si amplifichino gli effetti previsti dalle stesse.

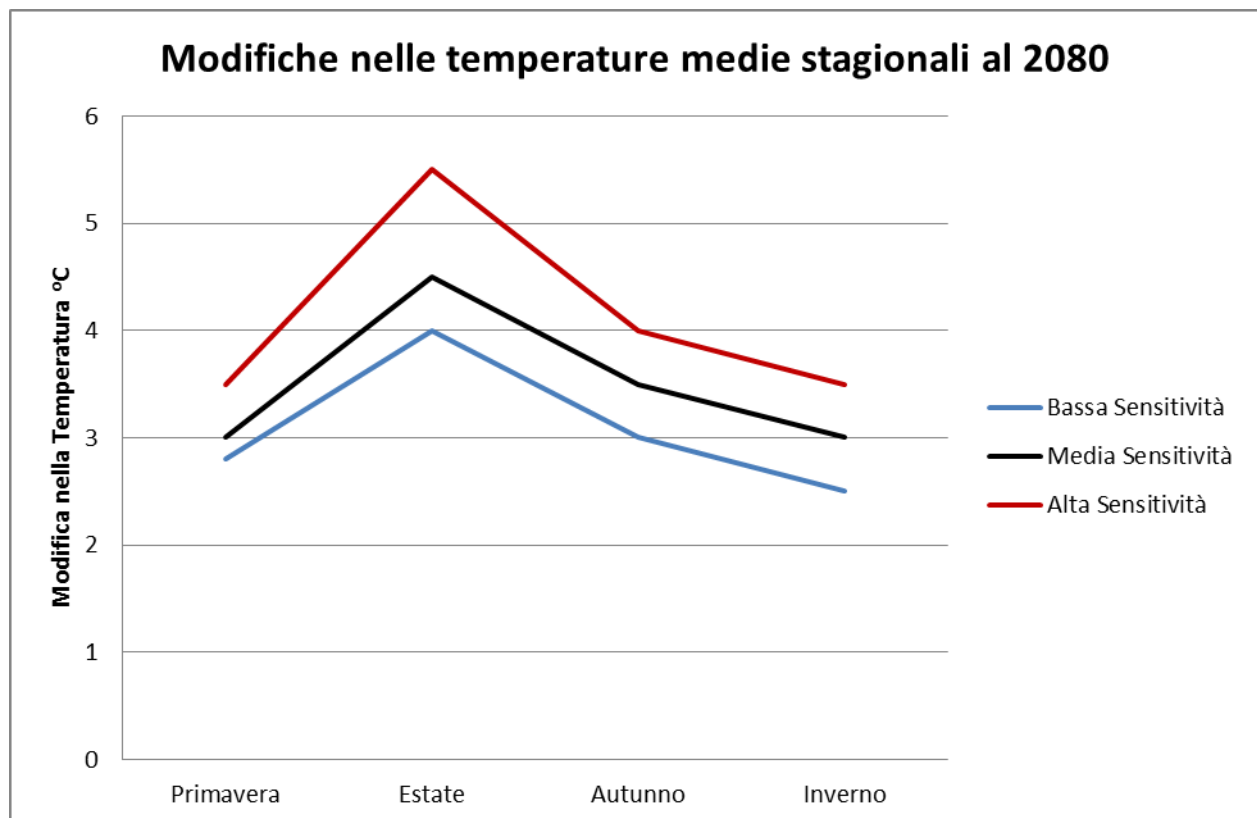


Figura C.5- Scenari di sensibilità della temperatura media per ogni stagione al 2080 (variazioni in gradi Celsius).

Tabella C.IV - Scenari di sensibilità relativa a cambiamenti di temperatura medi stagionali al 2080 (variazioni in gradi Celsius).

	Primavera	Estate	Autunno	Inverno
Bassa Sensibilità	2.8	4.0	3.0	2.5
Media Sensibilità	3.0	4.5	3.5	3.0
Alta Sensibilità	3.5	5.5	4.0	3.5

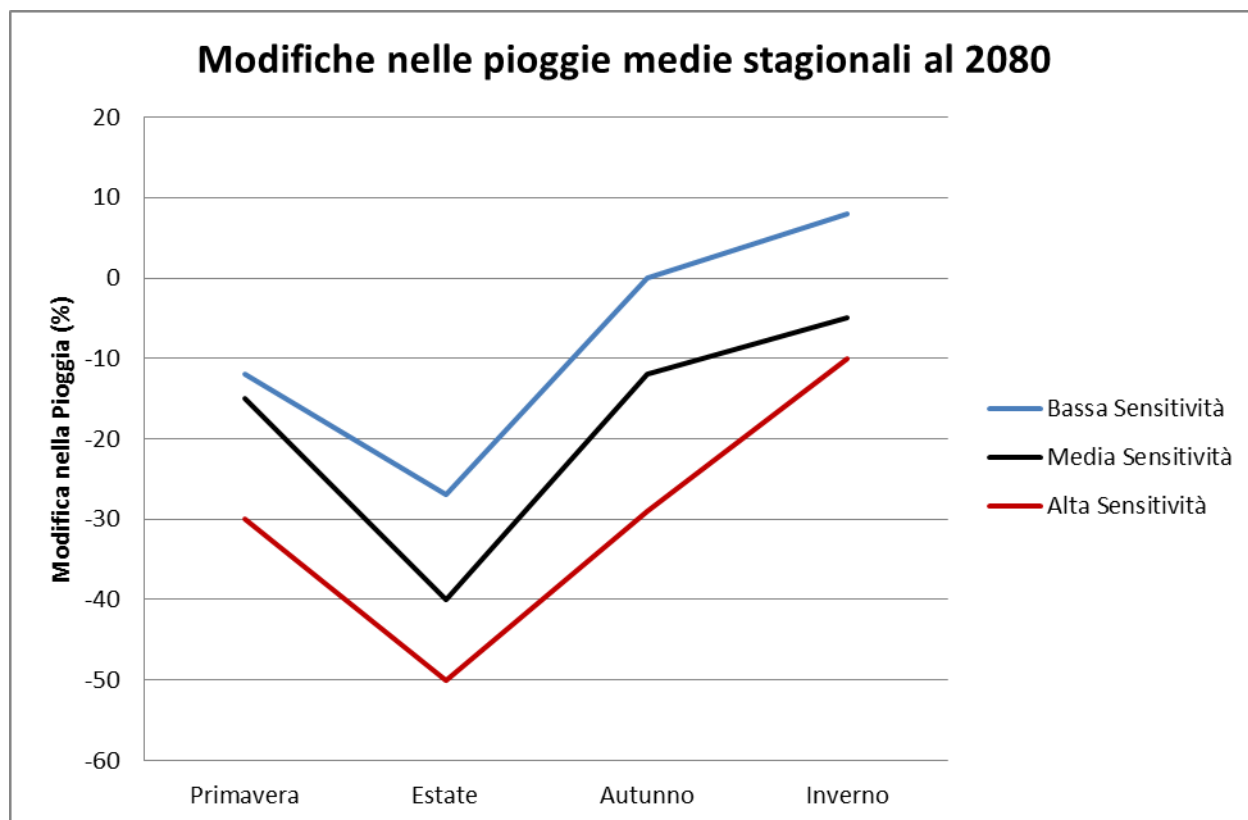


Figura C.6 - Scenari di sensibilità della pioggia medie per ogni stagione al 2080 (variazioni in gradi Celsius).

Tabella C.V - Scenari di sensibilità % relativa a cambiamenti in piogge medie stagionali al 2080.

	Primavera	Estate	Autunno	Inverno
Bassa Sensibilità	-12	-27	0	8
Media Sensibilità	-15	-40	-12	-5
Alta Sensibilità	-30	-50	-29	-10

#### C.4.2 Correzione delle piogge intense

La letteratura sulle previsioni di cambiamenti climatico in materia di piogge intense suggerisce che nonostante ci si attenda una diminuzione delle medie stagionali è probabile che gli eventi più intensi si amplifichino in magnitudo. Si sottolinea che le conclusioni a cui arrivano le diverse ricerche in materia sono piuttosto variegata in termine di quale % di aumento ci si possa aspettare. Si raccomanda quindi di valutare l'impatto di diversi scenari peggiorativi utilizzando un aumento di intensità delle piogge brevi ed intense del 5%, 10% e 20% per testare la vulnerabilità della piana del Fucino a questo tipo di intensificazione degli eventi.

#### C.5 Utilizzo dei risultati dello studio

I risultati del presente studio sui cambiamenti climatici sono stati utilizzati:

- negli scenari di cambiamento climatico come perturbazione alle serie storiche nel modello di bilancio idrico a scala mensile per capirne la sensibilità;
- nell'applicazione del modello idraulico della Piana del Fucino attraverso l'utilizzo dei fattori di crescita delle piogge intense del 5%, 10% e 20% per verificarne la sensibilità.