



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

Valutazione dell'interazione delle opere
idrauliche con la dinamica dei sedimenti sui
bacini del Rio Cucco e del Rio degli Uccelli

Relatore

Prof. Lorenzo Picco

Co-Relatore

Dr. Lorenzo Martini

Laureando

Michele Missoni

Matricola n. 1221747

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE

RIASSUNTO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUZIONE	11
1.1 BACINO IDROGRAFICO.....	11
1.2 I BACINI MONTANI E IL TRASPORTO SOLIDO	13
1.3 LE SISTEMAZIONI IDRAULICO FORESTALI	15
1.4 I BACINI MONTANI DELLA REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA	16
1.5 L'EVENTO ALLUVIONALE DEL 2003 IN VALCANALE-CANAL DEL FERRO	16
2. OBIETTIVI	20
3. MATERIALI E METODI	22
3.1 AREE DI STUDIO	22
3.1.1 IL SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO	22
3.1.2 IL SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI	25
3.2 METODI DI INDAGINE	28
3.2.1 RILIEVO DELLE OPERE	28
3.2.2 ANALISI GRANULOMETRICA	29
3.2.3 ANALISI TOPOGRAFICA	30
4. RISULTATI	33
4.1 RILIEVO DELLE OPERE	33
4.1.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO	33
4.1.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI	37
4.2 ANALISI GRANULOMETRICA	40
4.2.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO	40
4.2.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI	42

4.3 RILIEVO TOPOGRAFICO.....	44
4.3.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO	44
4.3.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI	46
4.3.2.1 OPERE ANTE 2009.....	46
4.3.2.2 OPERE POST 2009	48
4. DISCUSSIONI.....	50
4.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO	50
4.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI	51
5. CONCLUSIONI	54
6. BIBLIOGRAFIA.....	56

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Schema di un bacino idrografico (Ferro, 2002)	12
Figura 2. Ugovizza (UD), alluvione del 29 agosto 2003 (Protezione Civile FVG, 2003)	17
Figura 3. Inquadramento generale delle aree di studio (tratto da Carulli, 2006a)	22
Figura 4. Sottobacino del Rio Cucco (scala 1:15000)	23
Figura 5. Sottobacino del Rio degli Uccelli (scala 1:50000).....	25
Figura 6. Soglia danneggiata "Cucco_11"	34
Figura 7. Cunettone in calcestruzzo (Cucco_2)	35
Figura 8. Confluenza dei due rami principali nella vasca di accumulo.....	35
Figura 9. Ubicazione delle opere inventariate Rio Cucco (scala 1:5000)	36
Figura 10. Briglia in massi (Uccelli_1) danneggiata dall'azione erosiva della corrente.....	38
Figura 11. Briglia filtrante (Uccelli_8) in buono stato con presenza di tronchi nei filtri.	39
Figura 12. Ubicazione delle opere inventariate sul Rio degli Uccelli (scala 1:10000)	39
Figura 13. Distribuzione granulometrica da valle a monte delle opere del Rio Cucco per D_{50} (mm) e D_{84} (mm)	40
Figura 14. Deviazione standard granulometrica da valle a monte delle opere del Rio Cucco....	41
Figura 15. Confronto tra le curve di frequenza cumulata della prima opera a monte e dell'ultima a valle del Rio Cucco.....	41
Figura 16. Distribuzione granulometrica da valle a monte delle opere del Rio degli Uccelli per D_{50} (mm) e D_{84} (mm)	42
Figura 17. Deviazione standard granulometrica da valle a monte delle opere del Rio degli Uccelli	43
Figura 18. Confronto tra le curve di frequenza cumulata della prima opera a monte e dell'ultima a valle del Rio degli Uccelli	43
Figura 19. Variazione del profilo altimetrico per l'opera "Cucco_6"- monte	45
Figura 20. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Cucco_4"- valle	45
Figura 21. Variazione del profilo altimetrico per l'opera "Uccelli_4"- monte	47
Figura 22. Variazione del profilo altimetrico per l'opera "Uccelli_1"- valle.....	47
Figura 23. Variazione del profilo altimetrico per l'opera "Uccelli_6"- monte	48
Figura 24. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Uccelli_5"- valle	48

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Parametri morfometrici Rio Cucco	22
Tabella 2. Parametri morfometrici Rio degli Uccelli	25
Tabella 3. Caratteristiche principali delle Ortofoto per il Rio Cucco e per il Rio degli Uccelli.....	31
Tabella 4. Caratteristiche principali dei DEM per il Rio Cucco e Rio degli Uccelli	31
Tabella 5. Confronto tra opere accatastate e opere inventariate Rio Cucco.....	33
Tabella 6. Inventario delle opere del Rio Cucco.....	34
Tabella 7. Confronto tra opere accatastate e opere inventariate Rio degli Uccelli.....	37
Tabella 8. Inventario delle opere del Rio degli Uccelli	37
Tabella 9. Analisi delle sezioni trasversali delle opere del Rio Cucco	44
Tabella 10. Analisi delle sezioni trasversali delle opere ante 2009 del Rio degli Uccelli	46

RIASSUNTO

Il settore nord-orientale della Regione Friuli Venezia Giulia ed in particolare il bacino del Fiume Fella è stato interessato da due importanti eventi alluvionali nel 1996 e nel 2003 che hanno causato ingenti danni su tutto il territorio. L'avvio di un'attenta attività pianificatoria e sistematoria ha permesso la realizzazione di diverse opere di sistemazione sulle aree maggiormente colpite come nel caso dei sottobacini del Rio Cucco e del Rio degli Uccelli che sono stati ampiamente rimaneggiati dopo tali eventi. Attraverso un dettagliato rilievo di campo associato anche ad un'analisi delle sezioni trasversali estrapolate, da due DEM di anni successivi, a monte e a valle di ogni opera è stato possibile verificare come le singole strutture influenzino la dinamica dei sedimenti. Si è visto che per entrambi i bacini, le opere situate a monte sono generalmente in buono stato ed efficienti, con una buona capacità di agevolare la deposizione dei sedimenti di maggiori dimensioni. Nella porzione di valle del bacino invece la situazione è generalmente più variabile con opere che tendenzialmente sono danneggiate e compromesse dal punto di vista della funzionalità idraulica a causa della prevalente deposizione sia a monte che a valle (Rio Cucco) o per la prevalenza di fenomeni erosivi in prossimità delle strutture stesse (Rio degli Uccelli).

ABSTRACT

The North East of the Friuli Venezia Giulia and in particular the Fella River basin was affected by two extreme flood events in 1996 and 2003 which produced serious damage throughout the territory. The following planning and restoring activities has allowed the realization of various hydraulic works in the most affected areas as in the case of the Rio Cucco and Rio degli Uccelli sub-basins which have been extensively reshaped after these events. Through a detailed field surveys and with an analysis of the cross sections extrapolated from two subsequent DEMs, upstream and downstream of each work, it was possible to verify how sediment transport impact on these structures. It has been seen that for both basins, the hydraulic works located in the upstream part are generally in good condition and efficient, with a good storage capacity, especially of the larger sediments. On the other hand, in the downstream part of the basin, the situation is generally more variable with works that tend to be damaged and compromised for functionality due to the prevalent deposition both upstream and downstream (Rio Cucco) or due to the prevalence of erosive processes (Rio degli Uccelli) close to the structures.

1. INTRODUZIONE

L'impatto degli eventi meteorici estremi, i processi idrologici e il trasporto solido sui piccoli bacini alpini suscitano da sempre particolare interesse per lo studio della morfologia dei corsi d'acqua nonché per la valutazione ed il monitoraggio del rischio idraulico ed idrogeologico.

In particolare, gli intensi temporali estivi di natura improvvisa possono andare a generare deflussi molto rapidi capaci di mobilitare grandi quantità di volume sia liquido che solido (Borga et al., 2009; Rainato et al., 2021)

Per questo motivo gli eventi di piena e le colate detritiche meritano una particolare attenzione in quanto spesso all'origine dei gravi ed ingenti danni che si verificano a carico dei centri urbani, degli insediamenti produttivi, delle infrastrutture e delle popolazioni (Marchi et al., 2007).

È dunque di prioritaria importanza, tenendo conto della tendenza all'aumento di questi fenomeni a causa dei cambiamenti climatici in atto, controllare e verificare periodicamente la funzionalità delle opere di sistemazioni idraulico-forestali (Cucchiari et al., 2019; Stefanini, 1980), ossia la capacità di queste strutture nel gestire il flusso solido liquido in condizioni di elevata criticità.

1.1 BACINO IDROGRAFICO

Per bacino idrografico si intende una superficie dalla quale le acque meteoriche o di fusione delle nevi e dei ghiacciai, defluendo in superficie o infiltrandosi nel terreno, si raccolgono in un uno stesso corso d'acqua direttamente o per mezzo di affluenti (Regione FVG, 2019; Benini, 1990). In altri termini si può intendere come il luogo dei punti di una superficie che drenano verso uno stesso punto che è chiamato anche sezione di chiusura.

A seconda di dove viene individuata la sezione di chiusura è possibile effettuare una distinzione tra bacino idrografico principale e bacino idrografico secondario o sottobacino. Il bacino idrografico principale ha come sezione di chiusura la foce di un corso d'acqua e pertanto comprende un'area molto ampia che va solitamente dai territori più montuosi fino alla confluenza con il mare. Il sottobacino invece comprende

un'area meno ampia e ha come sezione di chiusura un qualsiasi punto posto a monte della foce (Ferro, 2002).

All'interno di un bacino idrografico si distinguono la rete idrografica, che raggruppa tutti i canali o collettori, i cui deflussi solido-liquidi convergono verso un unico punto, coincidente con la sezione di chiusura.

Ogni collettore inoltre è delimitato lateralmente dai versanti che raccolgono tutte le acque meteoriche di cui una frazione verrà trasformata in deflusso andando ad alimentare la rete idrografica, mentre un'altra evaporerà.

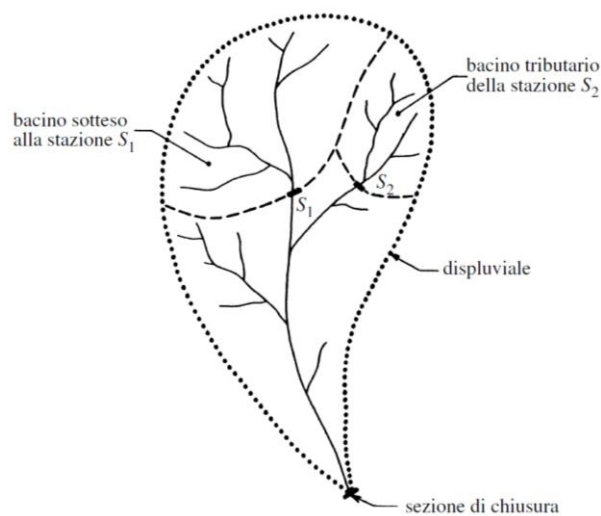


Figura 1. Schema di un bacino idrografico (Ferro, 2002)

In relazione alla dimensione, alla localizzazione e alla pendenza i corsi d'acqua si possono considerare *fiumi*, i corsi d'acqua con bacino esteso, pendenza contenuta (inferiore all'1%), che si trovano in una condizione prevalente di trasporto e deposizione di materiale a granulometria fine e *torrenti*, i corsi d'acqua con bacino di modesta estensione, con notevole pendenza (solitamente superiore al 5% e mai inferiore al 2%) e che presentano rilevanti processi erosivi e di trasporto solido per le elevate portate che si generano in seguito a eventi di precipitazione di elevata intensità ma di breve durata (Gortani, 1980; Ferro, 2002).

1.2 I BACINI MONTANI E IL TRASPORTO SOLIDO

I bacini montani sono bacini idrografici generalmente caratterizzati da un'estensione relativamente ridotta e da una pendenza elevata sia dei versanti che dei corsi d'acqua. (Fugazza, 2011) Le forme e le caratteristiche sono molto variabili, tuttavia convenzionalmente si assume che siano costituiti da 3 unità fondamentali che si succedono da monte a valle: il *bacino di alimentazione*, l'*alveo principale* e il *cono di deiezione*. Il bacino di alimentazione corrisponde alla zona sorgente di sedimento ove si accumulano i materiali erosi provenienti dai versanti che poi verranno trasportati verso valle attraverso l'alveo principale fino ad uno sbocco in un piano o in una valle collettrice, in cui il materiale depositato va a formare il cono di deiezione. In realtà, anche durante la fase di trasporto dei materiali dal bacino di alimentazione al cono di deiezione possono verificarsi sia fenomeni di escavazione del fondo, nei tratti a maggiore pendenza, con aggiunta di ulteriore sedimento alla corrente, sia situazioni di deposito, nei tratti a minore pendenza in cui si ha un allargamento della sezione dell'alveo o un rallentamento della corrente idrica.

I corsi d'acqua che caratterizzano i bacini montani sono prevalentemente a carattere torrentizio e possono essere classificati, così come proposto da De Horatiis (1930), sulla base della provenienza del materiale solido trasportato dalla corrente, in *torrenti di scavo* e *torrenti di trasporto*. I *torrenti di scavo* sono quelli in cui l'energia della corrente è tale da generare trasporto solido ed incisione del letto per cui oltre al materiale eroso dai versanti viene trasportato anche materiale prelevato dal fondo e dalle sponde dell'alveo. I *torrenti di trasporto* sono quelli per cui tutta l'energia viene utilizzata per il trasporto del materiale proveniente dai versanti senza provocare incisioni del letto dell'alveo. In questo caso il letto non si abbassa ma può alzarsi, con conseguente diminuzione della pendenza.

Ciò che quindi caratterizza maggiormente un torrente è il trasporto solido, che può diventare significativo durante gli eventi di piena conseguenti a precipitazioni intense, fusione nivale o nivo-glaciale, o cause artificiali. In funzione della velocità e della turbolenza delle correnti che si generano, è possibile stimare sia il volume di sedimento che può essere trasportato sia prevedere la forma di trasporto solido atteso ai fini della progettazione degli interventi di sistemazione idraulico-forestale (Dalla Fontana, 2013).

In particolare, secondo Aulitzky (1973, 1982) si possono classificare quattro tipologie di trasporto solido torrentizio:

- Trasporto solido in sospensione (*suspended load*): processo per cui si ha una prevalenza del trasporto in sospensione per effetto della turbolenza rispetto al trasporto di fondo con mobilitazione di sedimento fine (sabbia, limo, argilla). La pericolosità è trascurabile per questo tipo di eventi (Dalla Fontana, 2013).
- Trasporto solido di fondo (*bedload*): fenomeno per cui il materiale a granulometria più grossolana può essere trasportato verso valle dalla corrente idrica per rotolamento, saltazione o strisciamento. Per quei corsi d'acqua che presentano un fondo mobile, con questa tipologia di trasporto, possono essere mobilizzati volumi significativi di sedimento (Dalla Fontana, 2013).
- Correnti iperconcentrate (*debris flood*): fenomeni di trasporto solido molto rapido costituito principalmente da acqua e sedimento di piccole-medie dimensioni (Church et al., 2020). Generalmente la concentrazione volumetrica dei sedimenti è compresa tra il 20% e il 30%.
- Colate detritiche (*debris flow*): fenomeni di flusso viscoso nel quale l'azione della forza di gravità trascina verso il basso una massa di media-elevata densità costituita da acqua, frammenti e blocchi di svariate dimensioni, senza selezione (Venturini, 2010). Si caratterizzano per la loro localizzazione su aree ristrette (bacini inferiori ai 30 km²) e per la notevole potenza distruttiva dovuta sia all'elevata velocità di propagazione della corrente (fino a 20 m/s) sia alle dimensioni e alla quantità di materiale trasportato (Paronuzzi et al. 1998; Boccali, 2013).

L'origine delle colate è da attribuirsi anche alla disponibilità di grandi quantità di materiale detritico a granulometria eterogenea (frane superficiali, falde detritiche), pendenza dell'alveo elevata e forti concentrazioni idriche (Dalla Fontana, 2013).

1.3 LE SISTEMAZIONI IDRAULICO FORESTALI

Si definiscono sistemazioni idraulico forestali, *“gli interventi e le opere che si attuano nel territorio montano finalizzati alla conservazione e alla difesa dei terreni soggetti a processi erosivi, mediante il consolidamento dei versanti instabili, l'esecuzione di opere paravalanghe e paramassi, il ripristino e la regolazione delle normali sezioni di deflusso, nonché la riqualificazione ambientale”* (art. 54, Legge regionale 23 aprile 2007, n. 9, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia).

Da tale definizione è evidente che questo ambito è in realtà molto complesso in quanto oltre tutti gli interventi volti alla sistemazione idraulica vera e propria, si aggiungono anche quelli di miglioramento della stabilità e aumento della resilienza dei sistemi naturali dei quali i corsi d'acqua sono elemento integrante (Gortani, 1980; Dalla Fontana, 2013).

Per quanto riguarda gli interventi sistematori lungo un corso d'acqua, si distinguono due categorie di opere: le opere estensive, effettuate lungo i versanti e necessarie per arrestare all'origine le aree sorgenti di sedimento e le opere intensive, localizzate in alveo con lo scopo di regolare la portata e il trasporto solido. La prima categoria comprende sostanzialmente gli interventi di manutenzione forestale e di ingegneria naturalistica (rimboschimenti, inerbimenti, gradonate-terrazzamenti, drenaggi, ecc)

La seconda categoria raggruppa l'insieme delle opere longitudinali e delle opere trasversali che vengono realizzate sulla base del tipo di torrente che consideriamo.

Relativamente ai torrenti di scavo solitamente si procede con la costruzione di opere di protezione spondale (longitudinali), nel caso in cui il corso d'acqua eroda lateralmente le sponde, e di briglie e/o soglie di consolidamento (trasversali), nel caso in cui si voglia ridurre la pendenza dell'alveo e quindi ridurre l'erosione sul fondo.

Nei torrenti di trasporto invece vengono realizzate delle opere trasversali localizzate, con lo scopo di ridurre il trasporto solido verso valle, trattenendo il materiale trasportato dalla corrente. Le opere consistono in briglie di trattenuta (aperte o chiuse) lungo il torrente e in vasche di deposito nella zona di accumulo del cono di deiezione.

Inoltre per evitare l'erosione del fondo e per smaltire il più velocemente il flusso solido liquido si costruiscono delle opere di canalizzazione, i cunettoni, che consistono nel rivestimento totale o parziale dell'alveo con materiale resistente all'azione erosiva della corrente (Dalla Fontana, 2013; Fugazza, 2011).

1.4 I BACINI MONTANI DELLA REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA

I bacini montani della Regione Friuli Venezia Giulia risultano essere particolarmente vulnerabili agli eventi estremi di precipitazione ed è per questo motivo che da diversi anni i settori delle Alpi Carniche e quelli delle Alpi Giulie sono oggetto di numerosi studi che hanno evidenziato come piogge di breve durata (< 24 ore) ma di elevata intensità (con intensità superiori a 40-50 mm/h) risultano favorevoli all'innescio di processi di colata (Paronuzzi et al., 1998; Boccali, 2013) e altri fenomeni di trasporto solido. In particolare, l'elevata frequenza di colate detritiche, è da associarsi non solo al singolare andamento delle precipitazioni ma anche all'elevata instabilità dei versanti e degli alvei, ai diffusi depositi detritici e alla franosità dovuta all'elevato grado di sismicità della Regione (Paronuzzi et al., 1998).

Negli ultimi 40 anni, sull'intero territorio regionale se ne sono registrate oltre un centinaio e uno dei bacini idrografici maggiormente colpiti risulta essere quello del Fiume Fella, situato nel settore più orientale della Regione Friuli Venezia Giulia che è stato colpito da diversi eventi alluvionali eccezionali (Boccali, 2013), dei quali, gli ultimi, accaduti nelle estati del 1996 e del 2003.

1.5 L'EVENTO ALLUVIONALE DEL 2003 IN VALCANALE-CANAL DEL FERRO

Il 29 agosto 2003, il settore nord-orientale della regione Friuli Venezia Giulia è stato interessato da un sistema convettivo alla mesoscala (Borga et al., 2007) che ha portato violente ed intense precipitazioni (circa 350 mm in sei ore), causando l'esondazione di molti corsi d'acqua, circa un migliaio di frane delle quali molte di prima generazione, numerose colate detritiche e diversi fenomeni erosivi (Potleca et al., 2004; Calligaris et al., 2012). I gravi danni alle popolazioni locali (oltre 300 sfollati e 2 morti) e alle infrastrutture hanno comportato l'interruzione delle attività economiche e sociali per diversi giorni, nonché hanno visto un dispiegamento importante di uomini e mezzi che fin da subito si sono attivati per la messa in sicurezza dei territori colpiti (Potleca et al., 2004; Tropeano et al., 2006).



Figura 2. Ugovizza (UD), alluvione del 29 agosto 2003 (Protezione Civile FVG, 2003)

I fenomeni di maggiore intensità si sono concentrati su un'areale dell'ordine dei 50 km², interessando numerosi corsi d'acqua afferenti al bacino del Fiume Fella, nei comuni di Malborghetto-Valbruna, Pontebba, Dogna e Moggio Udinese (Tropeano et al., 2006).

Lo studio dei dati di precipitazioni ottenuti dalle immagini radar e dalle diverse stazioni pluviometriche presenti sul territorio hanno evidenziato come la singolarità di tale evento fosse dovuta, oltre che dagli accumuli di precipitazione molto elevati, anche dalla stazionarietà delle bande convettive (rilevate con radar) che sono persistite nelle stesse aree per tutta la durata della precipitazione (Borga et al., 2007).

Oltre a ciò, l'estate del 2003 è stata una delle più calde di sempre in Europa con precipitazioni sotto la media già dall'inizio dell'anno (Borga et al., 2007). La conseguente siccità, che non ha risparmiato i territori del Friuli Venezia Giulia, ha determinato un mutamento delle condizioni di struttura, permeabilità e capacità di ritenuta del suolo. Come risultato, le elevate precipitazioni cadute durante l'evento dell'agosto 2003 hanno fatto sì che venissero subito meno le capacità di infiltrazione e trattenuta del suolo e si verificassero fenomeni di ruscellamento sui versanti, *“di franamento superficiale di tipo misto colamento-scivolamento (soil slip), ma anche altri dissesti di variegata tipologia, quali nuove incisioni (gully), erosioni concentrate e diffuse”*, debris flow e debris flood (Stefanelli, 2007).

Altro aspetto che ha accentuato la distruttività e la severità del fenomeno è stata la notevole quantità di vegetazione arborea asportata dalle sponde e dai versanti e convogliata in alveo, con conseguente occlusione delle sezioni critiche (ponti, briglie) e deviazione della corrente di piena (Stefanelli, 2007).

Complessivamente, dopo l'alluvione del 2003 in tutta la Valcanale e il Canal del Ferro sono stati investiti complessivamente oltre 300 milioni di euro per la messa in sicurezza, il ripristino delle opere di sistemazione idraulica esistenti oltre per la costruzione di nuove strutture sui bacini maggiormente colpiti (Regione FVG, 2007). A tale fase è seguita anche la realizzazione del Catasto regionale delle opere di difesa, ossia di un database informatizzato che raccoglie le informazioni sulla tipologia, sulle caratteristiche strutturali, sulla funzionalità e sulla localizzazione delle opere di sistemazione idraulica presenti su territorio regionale che ha poi permesso di dare avvio ad un'attenta programmazione dell'attività sistematoria e manutentoria delle opere esistenti.

Ancor più importante, la Regione Friuli Venezia Giulia, per mezzo della Protezione Civile regionale, ha messo a punto una serie di studi, coinvolgendo anche numerosi team di esperti e tecnici del settore, al fine di individuare, valutare e perimetrare le aree di maggiore pericolosità e dare avvio alla progettazione delle opere di sistemazione sulle aree maggiormente colpite (Potleca et al., 2004; Stefanelli, 2007; Boccali, 2013). Un esempio è fornito dal progetto Interreg IIIB – Spazioalpino “Catchrisk”, finanziato nel 2002 e concluso nel 2005 ha avuto come obiettivo principale quello di trovare una metodologia comune per la prevenzione del rischio idrogeologico sui piccoli bacini montani delle Alpi. Il progetto ha previsto lo sviluppo di un sistema informativo comune per la definizione dei possibili scenari di rischio che possono interessare un bacino, l'elaborazione di modelli per l'analisi della franosità superficiale, del trasporto solido nonché dei movimenti detritici durante eventi di precipitazione straordinari. La Regione Friuli Venezia Giulia ha individuato nell'ambito del suddetto progetto sei bacini campione che presentassero una propensione al dissesto medio-alta, fossero interessati da fenomeni di *debris flood* o *debris flow*, avessero diversa esposizione e diversa conformazione dal punto di vista geologico e che fossero situati in prossimità di centri abitati e infrastrutture (Dini e Salleroni, 2007). Tale progetto risultò di fondamentale importanza per la generazione di modelli digitali dell'elevazione (DEMs), a partire da Carte Tecniche Regionali Numeriche (CTRN), che costituiscono una prima informazione topografica essenziale per l'elaborazione dei modelli e delle analisi geomorfometriche in GIS (Cazorzi e Dalla Fontana, 1992).

2. OBIETTIVI

Il presente lavoro si pone come obiettivo principale quello di valutare come la dinamica dei sedimenti interagisca con le opere di sistemazione idraulico-forestale realizzate su due bacini montani della Valcanale, nel settore nord orientale della Regione Friuli Venezia Giulia, in seguito agli eventi alluvionali del 1996 e del 2003. In particolare attraverso il confronto tra le informazioni del Catasto Regionale delle opere di difesa, le osservazioni di campo, le analisi granulometriche e lo studio dell'evoluzione morfologica di sezioni trasversali attraverso l'utilizzo di DEM di anni successivi sarà possibile verificare se gli interventi sistematori realizzati sono stati e sono tutt'ora efficaci nel gestire correttamente il flusso solido-liquido.

3. MATERIALI E METODI

3.1 AREE DI STUDIO

Per il presente lavoro di tesi sono stati scelti due sottobacini del Fiume Fella: il Rio Cucco e il Rio degli Uccelli. Entrambi sono situati in Valcanale, vallata situata nel settore nord-orientale della Regione Friuli Venezia Giulia che si contraddistingue per essere impostata sul retroscorrimento Est-Ovest della Linea Fella – Sava, che separa le Alpi Carniche a Nord e le Alpi Giulie a Sud.

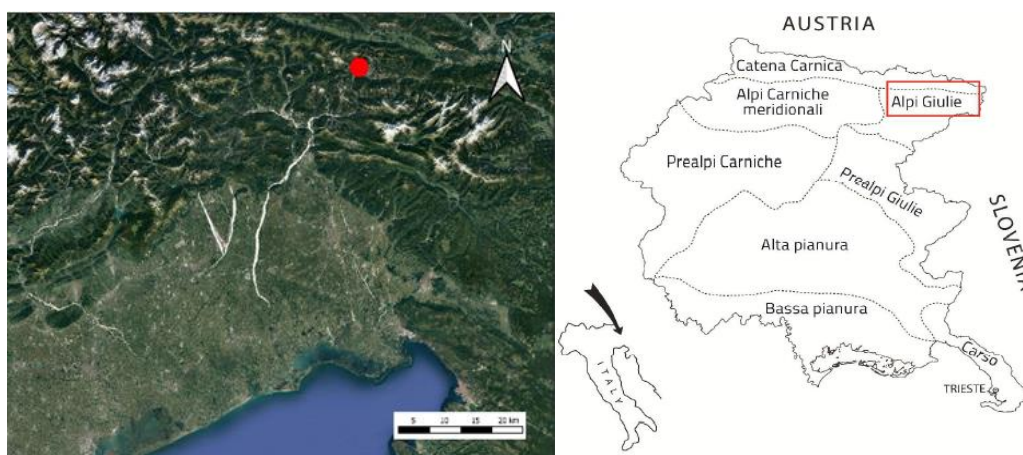


Figura 3. Inquadramento generale delle aree di studio (tratto da Carulli, 2006a)

3.1.1 IL SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO

Il Rio Cucco è un sistema torrentizio nel territorio del comune di Malborghetto-Valbruna (UD), affluente di destra del fiume Fella. Il bacino idrografico si articola in due sottobacini, costituiti da alcuni canali e due rami principali (ramo di destra e ramo di sinistra) che confluiscono in un conoide alluvionale all'altezza dell'abitato di Cucco.

Di seguito, in *Tabella 1*, si riportano i parametri morfometrici del bacino.

Tabella 1 Parametri morfometrici Rio Cucco

Area (km ²)	0,65
Quota minima (m s.l.m.)	724
Quota media (m s.l.m.)	1118
Quota massima (m s.l.m.)	1481
Pendenza media (°)	41,1
Lunghezza asta principale (km)	1,6

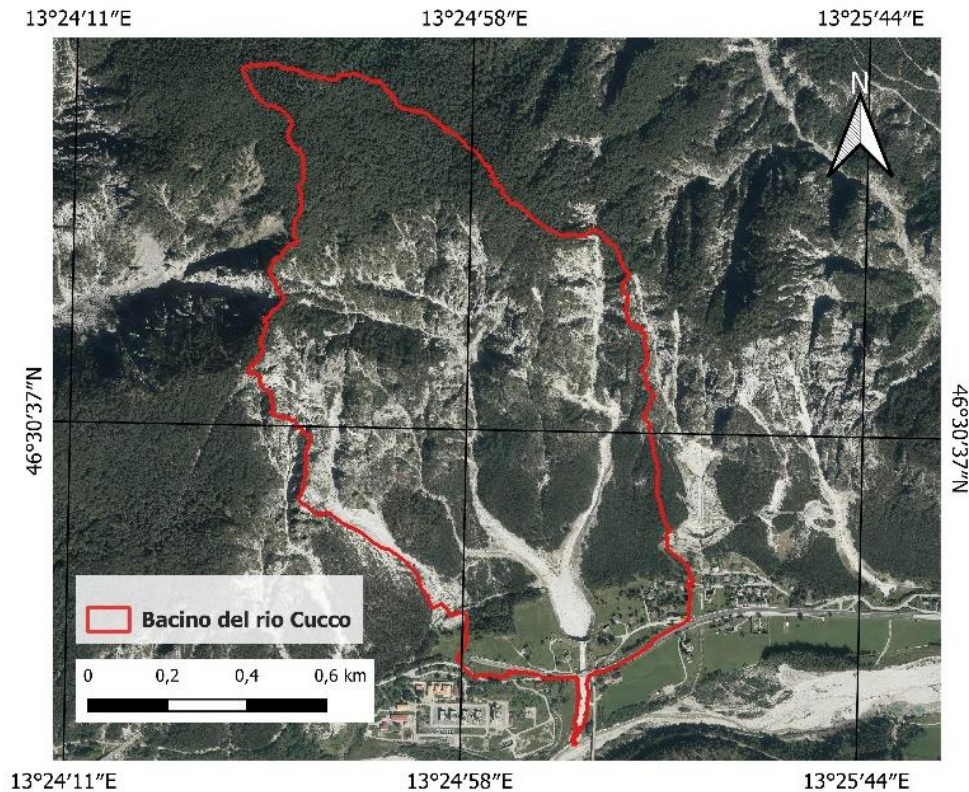


Figura 4. Sottobacino del Rio Cucco (scala 1:15000)

Il bacino è impostato su dolomie e calcari dolomitici anisiano landiani (Dolomia dello Sciliar) mentre nella parte alta compaiono dei calcari e dolomie nodulari con intercalazioni di calcari marnosi e marne (Calcarea del Predil) e calcareniti e calciruditi alternate a peliti marnose (Formazione di S. Cassiano) (Dini e Selloroni, 2007; Stefanini, 1980).

La parte alta del bacino, che coincide con il versante meridionale del Monte Cucco, è caratterizzata da pareti rocciose verticali in cui compaiono dei piccoli salti ricoperti da sottili strati di suolo. Da queste si verificano con regolare frequenza numerosi crolli che alimentano detrito di falda di spessori considerevoli, nella parte medio-inferiore del bacino. Questi accumuli hanno massimo sviluppo soprattutto in quelle zone dove prevalgono rocce calcaree, dolomitiche e calcarea dolomitiche che si disgregano molto facilmente a causa del termoclastismo, del crioclastismo oltre che dei movimenti tettonici.

Il conoide alluvionale, avente estensione di circa 0,2 km² è ricoperto nella parte apicale da una pineta naturale di pino nero e pino silvestre mentre la parte inferiore è costituita da alcuni prati, dalle abitazioni di Cucco e dal ponte sulla Strada Statale 13 che rappresenta anche il limite inferiore del bacino (Cavalli et al., 2007).

L'esposizione prevalente a Sud che genera forti escursioni giornaliere, lo sbarramento alle perturbazioni indotto dal margine inferiore del m.te Alpe Piccola, il continuo apporto di materiale e l'elevata permeabilità del substrato determinano una marcata condizione di aridità per tutta l'area che rende l'evoluzione pedogenetica difficoltosa soprattutto per i versanti più acclivi.

Le precipitazioni medie ammontano a circa 1500 mm annui con picchi in estate e in autunno che corrispondono anche ai periodi in cui si registra una maggiore frequenza dei fenomeni da colata e dei processi di trasporto a minor concentrazione solida. In tali occasioni il materiale accumulatosi a monte del bacino viene trasportato dalle acque superficiali e depositato in prossimità della zona di accumulo a valle del conoide (Boccali, 2013).

Durante gli eventi alluvionali del giugno 1996 e dell'agosto 2003 il bacino è stato interessato da intense precipitazioni che hanno innescato fenomeni di *debris flow*. In particolare durante l'evento del 2003 sono caduti sul bacino 325 mm di pioggia in 12 ore e sono stati mobilizzati volumi importati di sedimento (sempre nel 2003, sono stati stimati volumi pari a circa 80000 m³). Tale evento ha comportato il completo sovralluvionamento delle opere di sistemazione esistenti, il danneggiamento di alcune abitazioni e dei prati circostanti in sinistra orografica e l'accumulo di notevoli quantità di deposito nella zona a valle del conoide (Cavalli et al., 2007).

Il Rio Cucco merita particolare attenzione in quanto posto nelle immediate vicinanze della Riserva Naturale Statale "Cucco" istituita nel 1975 per la tutela e la salvaguardia della ricca fauna presente e soprattutto della pineta naturale di pino nero d'Austria di provenienza illirica, ricoprente una superficie di circa 21 ha e avente età media superiore ai 120 anni. Inoltre in sinistra orografica rispetto all'ultimo tratto di canalizzazione del Rio Cucco, poco prima della confluenza con il fiume Fella si trova l'impianto di compressione *SNAM*, in cui transita uno dei più importanti metanodotti per l'Italia.

Le opere di sistemazione idraulica presenti nel bacino del Rio Cucco sono state tutte ricostruite dopo l'evento del 2003.

I due rami del bacino sono stati ampiamente rimaneggiati con la costruzione di opere trasversali e cunettoni, che convergono verso una vasca di deposito a valle. Quest'ultima, in particolare, è stata dimensionata per contenere un volume solido pari a 100000 m³ (Boccali, 2013) ed è protetta da due arginature in massi ciclopici, uniti da una briglia

filtrante, che convoglia il materiale solido-liquido verso un cunettone in cemento armato nei pressi dell'attraversamento della Strada Statale, cui segue un'altra opera di canalizzazione in massi cementati fino al punto di immissione nel fiume Fella.

3.1.2 IL SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI

Il Rio degli Uccelli è un affluente di destra del fiume Fella ed è ubicato nel comune di Pontebba (UD), nelle Alpi Carniche, fra i monti Brizzia, Bruca, Cerchio, Cit e Scinauz. Di seguito, in *Tabella 2*, si riportano i parametri morfometrici del bacino.

Tabella 2. Parametri morfometrici Rio degli Uccelli

Area (km ²)	10,08
Quota minima (m s.l.m.)	628
Quota media (m s.l.m.)	1413
Quota massima (m s.l.m.)	1993
Pendenza media (°)	37,2
Lunghezza asta principale (km)	6,1

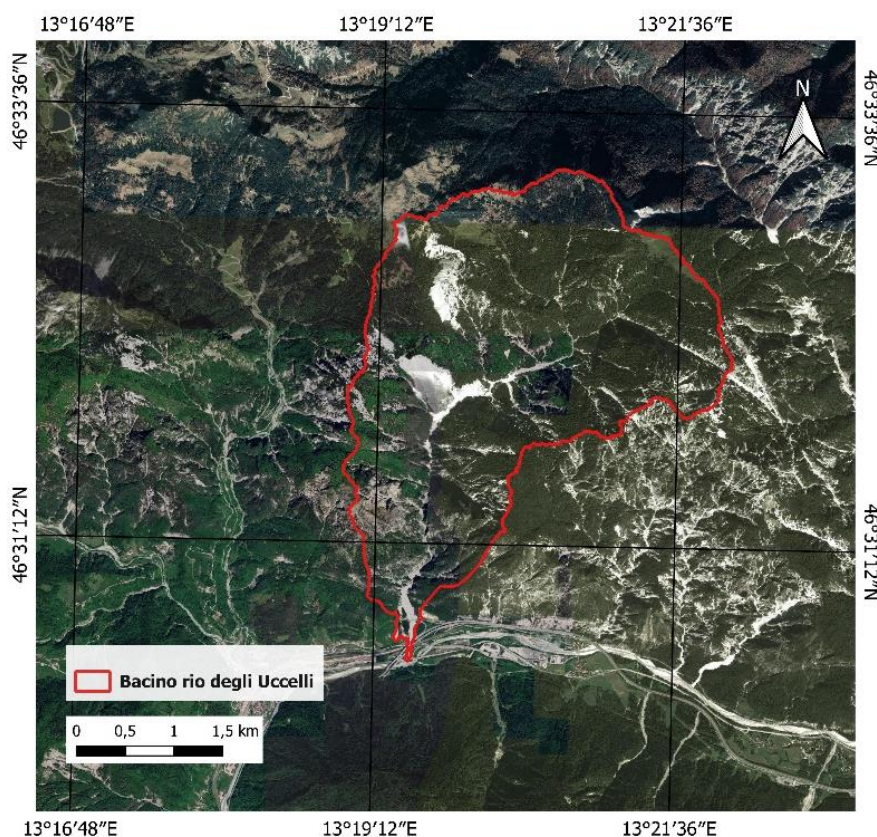


Figura 5. Sottobacino del Rio degli Uccelli (scala 1:50000)

Il bacino è costituito per la quasi totalità da dolomie e calcari dolomitici anisiano-landiani (Dolomia dello Sciliar) con presenza, solamente nella parte nord occidentale di areniti

quarzoso micacee, argilliti e siltiti risalenti al Carbonico superiore. Inoltre sono presenti rari affioramenti della Formazione di Buchenstein ai piedi dei versanti in dolomia del Monte Brizzia, di arenarie, conglomerati e marne del Permiano superiore (evaporiti della Formazione a Bellerophon, Formazioni di Meledis e del Pizzul, conglomerati ascrivibili alla Breccia di Tarvisio) e del Permiano inferiore (calcari del Gruppo del Trogkofel, biocalcareni alternate a peliti marnose della Formazione a Pseudoschwagerina) (Dini e Selloroni, 2007; Stefanini, 1980).

La morfologia della valle attraversata dal Rio degli Uccelli è molto variabile: in un primo tratto a monte presenta un'ampia estensione con versanti poco acclivi ricoperti da piceo-faggete e pinete di pino silvestre; in un secondo tratto corrispondente alla parte mediana del bacino si osserva un restringimento che dà origine ad una profonda forra; nella parte inferiore il rio si allarga a formare un ampio cono di deiezione che si sviluppa fino alla confluenza con il fiume Fella.

Ad una quota compresa tra i 1000 e i 1400 m s.l.m., sul versante in destra orografica compreso tra il monte Bruca e il monte Cerchio il rio incide una paleofrana di notevoli dimensioni (volumi stimati in 15-18 milioni di m³) che rappresenta la principale sorgente di sedimento per il trasporto solido del rio, soprattutto durante gli eventi di precipitazione intensa. Questo deposito detritico poggia su un substrato argilloso impermeabile su cui si sta muovendo una frana secondaria (dimensioni 4-5 milioni di m³) che incombe sul rio e sulla quale risultano evidenti diverse fratture e fronti di distacco. Oltre a ciò l'impostazione prevalente su rocce calcareo-dolomitiche, che si caratterizzano per un elevato grado di fratturazione, costituisce ulteriore elemento per l'alimentazione delle falde detritiche sui versanti (Snidar, 2007).

I processi che si verificano con maggiore frequenza sono sia colate detritiche che interessano unicamente la parte alta del bacino sia fenomeni di trasporto solido iperconcentrato (*debris flood*) che coinvolgono il tratto medio-basso del rio.

Con le alluvioni del 1996 e del 2003 sono state mobilizzate grandi masse detritiche (circa 400000 m³), attraverso processi di *debris flood*, che hanno causato il completo sovralluvionamento della briglia filtrante posta internamente alla forra e alcuni danni alle importanti infrastrutture che sono interessate dal passaggio del rio (sottopasso della ferrovia Pontebbana, viadotti dell'autostrada A23, ponte della Strada Statale 13).

Le opere di sistemazione presenti riguardano unicamente la parte bassa del bacino in corrispondenza della zona di accumulo del conoide alluvionale. Si tratta di alcune opere trasversali, opere di canalizzazione e opere di difesa spondale, tutte ricostruite in seguito ai due eventi alluvionali.

3.2 METODI DI INDAGINE

3.2.1 RILIEVO DELLE OPERE

In questa fase si è provveduto a realizzare un inventario delle opere presenti in entrambi i bacini partendo dal Catasto delle Opere di Sistemazione Idraulico-Forestali della Regione Friuli Venezia Giulia (IRDAT, 2018) ed effettuando anche alcune indagini di campo volte a verificare ed aggiornare il database esistente.

Per il rilievo di campo è stato impiegato un dispositivo *GNSS SPECTRA (MOBILE MAPPER 50)* mediante il quale, oltre ad eseguire i rilievi GNSS, è stato possibile compilare una scheda informativa per ogni opera di sistemazione utilizzando l'applicazione *MM Field*.

L'analisi ha previsto i seguenti passaggi operativi:

- Individuazione della tipologia di struttura (briglia, soglia, cunettone, opera di difesa spondale)
- Georeferenziazione delle opere rilevate, nel sistema di coordinate *RDN2008/UTM 33N*.
- Identificazione delle opere con un ID specifico composto dal nome del bacino e da un numero, definito progressivamente da valle a monte. Inoltre è stato assegnato un codice, corrispondente al "*codice opera*" dell'opera stessa ma con riferimento al precedente catasto, in modo da avere un riscontro univoco. Nel caso in cui non fosse stata presente nel catasto, l'opera è stata codificata a partire dalla struttura posta più a valle, aggiungendo un suffisso nel formato -bis, -tris etc.
- Valutazione per ogni singola struttura dello stato di conservazione e della funzionalità. Si è provveduto alla definizione di tre classi per lo stato (buono, danneggiato, distrutto) e altrettante per la funzionalità (operativa, compromessa, nulla).

L'indagine di campo si è basata unicamente su un esame visivo delle strutture ed i criteri per l'assegnazione di una determinata classe si sono basati su considerazioni qualitative rispetto alle effettive condizioni dei manufatti (stato) ed alla loro capacità nella gestione del materiale trasportato (funzionalità). In fase di valutazione è quindi stata verificata, su tutte le parti che compongono l'opera, l'eventuale presenza di danni strutturali, sovralluvionamenti,

aggiramenti, sotto escavazioni, deposizione di materiale sulle opere, rigurgiti, occlusioni delle sezioni, vegetazione.

- Inserimento dei valori dimensionali (altezza e larghezza) delle strutture, rilevati con *Trupulse 200* e prisma circolare. Per le briglie sono state misurate sia l'altezza (dalla base alla gaveta) che la larghezza, mentre per le soglie unicamente la larghezza.
- Realizzazione di un dataset contenente le fotografie georeferenziate a monte e a valle di ogni singola opera.

Attraverso il software *MobileMapper Office* è stato possibile effettuare la correzione differenziale in post processing dei dati del rilievo GNSS. Sono stati quindi scaricati sia i dati grezzi del rilevatore (*MOBILE MAPPER 50*) sia, dal sito della Regione FVG, i dati grezzi Rinex (*Receiver Independent Exchange Format*) della stazione di riferimento più vicina al sito del rilievo (Tarvisio). L'elaborazione del software ha quindi permesso di ottenere le posizioni GIS dei punti con precisioni sub-metriche (<1 m).

Per ogni bacino è stato creato uno *shapefile*, caricato poi sul software open source *QGIS 3.22.1.*, contenente tutte le informazioni raccolte in campo oltre a quelle elaborate nel post-processing. Queste infine sono state esportate su un file *Excel* per il successivo confronto e aggiornamento di quanto riportato nel catasto regionale.

3.2.2 ANALISI GRANULOMETRICA

Il rilievo granulometrico è stato eseguito con metodo numerale in linea, andando a misurare il diametro medio b (in mm) dei grani ricadenti lungo una linea retta, ad intervalli fissi pari a due volte la dimensione dell'elemento avente diametro maggiore nell'area circostante. La misurazione è stata eseguita con la cordella metrica e con il calibro, con precisione pari ad 1 mm, su trenta campioni a monte e a valle di ogni opera. I valori dei diametri d (in mm) così misurati, sono stati ordinati e raggruppati in classi all'interno di un foglio di calcolo *Excel* e sono stati convertiti in indice ϕ attraverso l'equazione (1), che permette di normalizzare la distribuzione dei diametri.

$$\phi = -\log_2 d_{(mm)} \quad (1)$$

Gli indici ottenuti sono stati ordinati sulla base della classificazione dell'*American Geophysical Union*, adottando la scala di *Udden-Wentworth*, secondo la quale ad ogni intervallo di ϕ , corrisponde una specifica classe granulometrica.

Si è quindi proceduto con il calcolo della numerosità n per classi di indice ϕ con passo di 0.5, della numerosità totale N e con la rappresentazione della curva di frequenza relativa e cumulata.

Il calcolo della frequenza relativa, è stato dato dal rapporto percentuale fra la numerosità n per classe di indice ϕ e il valore della numerosità totale N , mentre la frequenza cumulata è stata ottenuta sommando la frequenza relativa di ciascuna classe diametrica con il valore di frequenza cumulata di classe inferiore.

Sulla base dei valori di frequenza cumulata sono stati determinati i diametri percentili caratteristici (D_{16} , D_{50} , D_{84} , D_{90}), che rappresentano la percentuale di sedimento che è inferiore rispetto ad un percentile considerato (espresso sempre in percentuale).

Infine, dai diametri percentili D_{16} e D_{84} è stato possibile determinare la deviazione standard granulometrica σ (2) per ognuna delle distribuzioni ottenute.

$$\sigma = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (2)$$

Attraverso questo parametro è stato possibile definire se la distribuzione dei sedimenti fosse omogenea ($\sigma < 1,35$) oppure eterogenea ($\sigma > 1,35$).

3.2.3 ANALISI TOPOGRAFICA

L'analisi topografica si è basata sull'utilizzo di due tipologie di dati (DEM e Ortofoto), che sono stati scaricati dal catalogo dei dati ambientali e territoriali del Friuli Venezia Giulia (IRDAT, 2018).

I (DEM) permettono di rappresentare la continuità della superficie topografica attraverso una finita quantità di punti, memorizzati sotto forma di triplette di coordinate (X, Y, Z). In particolare il termine DEM viene utilizzato quando l'elevazione della superficie terrestre viene eseguita tramite *raster GRID*, ossia secondo una griglia regolare suddivisa in celle di uguale dimensione, a ciascuna delle quali è associato un determinato valore di quota (*Guarnieri e Pirotti, 2022*).

Per quanto riguarda il presente lavoro, con il software *QGIS 3.22.1* e nello specifico con il plugin *Profile tool*, è stato possibile estrarre il profilo altimetrico delle sezioni trasversali di ciascuna opera (briglie e soglie) utilizzando due modelli di DEM, realizzati in due anni differenti. Per sezioni trasversali si intendono delle polilinee tracciate a monte e a valle di ogni opera in direzione perpendicolare al flusso. Queste sono state definite partendo da due punti fissi, cioè punti la cui posizione fosse rimasta invariata nel tempo (ad esempio strade, prati, versanti rocciosi) e la cui individuazione è stata resa possibile confrontando due Ortofoto, anche queste riferite ai due anni presi in considerazione. Per ogni struttura, a monte e a valle, sono stati quindi ricavati due diversi profili altimetrici, uno per ogni modello digitale, e i dati così ottenuti sono stati esportati su un file *Excel* dove è stato possibile creare un unico grafico di confronto fra i due differenti profili.

L'analisi ha permesso di evidenziare le variazioni temporali delle aree in deposizione e delle aree in erosione e di conseguenza è stato possibile valutare la capacità di trattenuta del sedimento di ogni singola opera.

Nelle seguenti tabelle si riportano le principali caratteristiche delle Ortofoto (*Tabella 3*) e dei DEM utilizzati (*Tabella 4*), aventi tutti lo stesso sistema di riferimento (EPSG:6708 - RDN2008 / UTM zone 33N).

Tabella 3. Caratteristiche principali delle Ortofoto per il Rio Cucco e per il Rio degli Uccelli

Ortofoto Rio Cucco	
ANNO DI REALIZZAZIONE	RISOLUZIONE CELLA (m)
2009	0.20
2018	0.10
Ortofoto Rio degli Uccelli	
ANNO DI REALIZZAZIONE	RISOLUZIONE CELLA (m)
2009	0.20
2018	0.10

Tabella 4. Caratteristiche principali dei DEM per il Rio Cucco e Rio degli Uccelli

DEM Rio Cucco	
ANNO DI REALIZZAZIONE	RISOLUZIONE CELLA (m)
2009	1
2018	0.5
DEM Rio degli Uccelli	
ANNO DI REALIZZAZIONE	RISOLUZIONE CELLA (m)
2009	1
2018	0.5

4. RISULTATI

4.1 RILIEVO DELLE OPERE

Dal rilievo di campo è emerso che non tutte le opere presenti sono accatastate e per tale motivo si è ritenuto opportuno, per ciascun bacino, riportare una tabella di confronto (*Tabella 5 e Tabella 7*) tra le opere del Catasto Regionale e le opere che invece sono state inventariate in campo.

4.1.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO

Il Rio Cucco presenta in totale 11 opere di sistemazione così ripartite: 7 soglie di fondo, 2 briglie e 2 opere di canalizzazione. Rispetto al Catasto non sono state incluse le opere spondali del tratto terminale del rio in quanto sono da ritenersi parte integrante delle opere di canalizzazione mentre sono state aggiunte 6 soglie di fondo.

Tabella 5. Confronto tra opere accatastate e opere inventariate Rio Cucco

CODICE	TIPOLOGIA	CATASTO	INVENTARIO
0302049600D02	briglia	✓	✓
0300541900D03	soglia	✓	✓
0300543100D02	briglia filtrante	✓	✓
F-11435-1-1	opera spondale	✓	✗
F-11435-1-2	opera spondale	✓	✗
F-11435-1-3	opera spondale	✓	✗
F-11435-1-5	opera di canalizzazione	✓	✓
F-11435-1-4	opera di canalizzazione	✓	✓
Cucco_4	soglia	✗	✓
Cucco_5	soglia	✗	✓
Cucco_6	soglia	✗	✓
Cucco_7	soglia	✗	✓
Cucco_8	soglia	✗	✓
Cucco_11	soglia	✗	✓

In *Tabella 6* si riportano le principali informazioni raccolte per l'inventario delle opere del Rio Cucco.

Tabella 6. Inventario delle opere del Rio Cucco

ID	CODICE OPERA	TIPOLOGIA	STATO	FUNZIONALITA'	Altezza (m)	Larghezza (m)
Cucco_1	F-11435-1-4	cunettone	buono	compromessa	-	-
Cucco_2	F-11435-1-5	cunettone	buono	compromessa	-	-
Cucco_3	0300543100D02	briglia filtrante	buono	operativa	8	13
Cucco_4	-	soglia	buono	nulla	-	62
Cucco_5	-	soglia	buono	nulla	-	21
Cucco_6	-	soglia	buono	compromessa	-	6
Cucco_7	-	soglia	buono	compromessa	-	7
Cucco_8	-	soglia	buono	compromessa	-	6
Cucco_9	0300541900D03	soglia	buono	operativa	-	6
Cucco_10	0302049600D02	briglia	buono	operativa	2	26
Cucco_11	-	soglia	danneggiata	nulla	-	23

Il bacino presenta opere in buono stato con l'eccezione di una soglia (Cucco_11), che risulta essere seriamente danneggiata a causa di un crollo che interessa il fondo e le sponde dell'opera di canalizzazione in cui è stata costruita (Figura 6).



Figura 6. Soglia danneggiata "Cucco_11" in cui è evidente il cedimento strutturale della canalizzazione su cui è costruita la stessa.

Relativamente alla funzionalità sono state censite rispettivamente:

- Tre traverse operative di cui una soglia e una briglia situate a monte del ramo di sinistra (Cucco_9 e Cucco_10); una briglia filtrante in corrispondenza della vasca di deposito (Cucco_3). In tutti i casi le opere non presentavano deposito di materiale o segni di erosione.
- Cinque opere compromesse di cui tre soglie, situate lungo l'opera di canalizzazione del ramo di sinistra che presentano deposizione di sedimenti nella parte centrale; un cunettone in calcestruzzo (Cucco_2, Fig. 6) situato nel tratto

terminale del bacino caratterizzato da fenomeni di rigurgito nella zona di monte dovuti alla ridotta pendenza dell'alveo (*Figura 7*); un cunettone rivestito in massi (Cucco_1), posto in corrispondenza della sezione di chiusura, con abbondante deposito di materiale fine (ghiaia), anche in questo caso dovuto alla ridotta pendenza.



Figura 7. Cunettone in calcestruzzo (Cucco_2) in cui è possibile apprezzare il rigurgito a monte ed il deposito di materiale (ghiaia) in corrispondenza del ponte. La struttura è in buono stato, tuttavia la funzionalità è compromessa.

- Tre soglie con funzionalità nulla in quanto caratterizzate da notevoli quantità di materiale detritico depositate (*Figura 8*)



Figura 8. Confluenza dei due rami principali nella vasca di accumulo. Sono presenti tre soglie completamente sovralluvionate. (foto Martini L.)

In *Figura 9* è possibile osservare la distribuzione delle opere inventariate, secondo il corrispettivo ID.

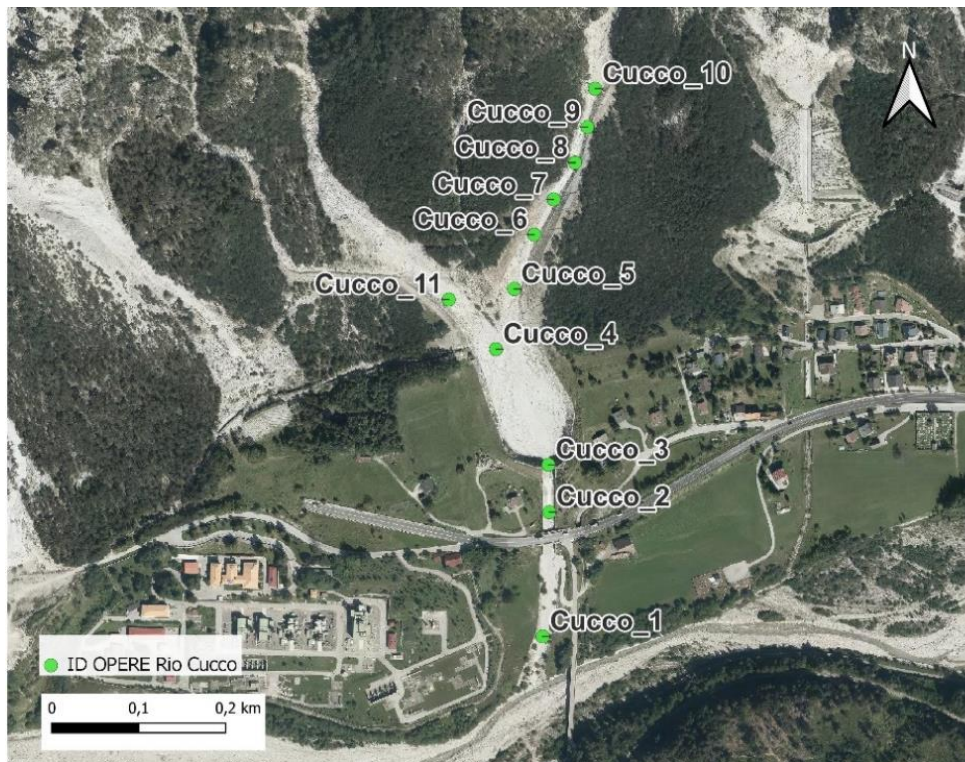


Figura 9. Ubicazione delle opere inventariate Rio Cucco (scala 1:5000)

4.1.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI

Nel Rio degli Uccelli sono state rilevate 8 opere di sistemazione e più precisamente 6 briglie e 2 soglie. A differenza del Catasto Regionale non sono state inventariate le opere spondali e l'opera di canalizzazione anche se presenti, mentre sono state aggiunte rispettivamente una briglia filtrante e due soglie di fondo.

Tabella 7. Confronto tra opere accatastate e opere inventariate Rio degli Uccelli

CODICE	TIPOLOGIA	CATASTO	INVENTARIO
F-11457-1-19	opera spondale	✓	✗
F-11457-1-18	opera spondale	✓	✗
F-11457-1-17	briglia filtrante	✓	✓
F-11457-1-15	opera spondale	✓	✗
F-11457-1-12	briglia	✓	✓
F-11457-1-10	opera di canalizzazione	✓	✗
F-11457-1-9	opera spondale	✓	✗
F-11457-1-8	briglia	✓	✓
F-11457-1-5	briglia	✓	✓
F-11457-1-3	opera spondale	✓	✗
F-11457-1-2	briglia	✓	✓
Uccelli 5	soglia	✗	✓
Uccelli 6	briglia filtrante	✗	✓
Uccelli 7	soglia	✗	✓

Di seguito, in *Tabella 8* si riportano le informazioni principali inserite nell'inventario del Rio degli Uccelli.

Tabella 8. Inventario delle opere del Rio degli Uccelli

ID	CODICE OPERA	TIPOLOGIA	STATO	FUNZIONALITA'	Altezza (m)	Larghezza (m)
Uccelli 1	F-11457-1-2	briglia/salto di fondo	distrutta	compromessa	-	22
Uccelli 2	F-11457-1-5	briglia in massi	danneggiata	compromessa	2	26
Uccelli 3	F-11457-1-8	briglia in massi	distrutta	nulla	-	30
Uccelli 4	F-11457-1-12	briglia	distrutta	nulla	-	35
Uccelli 5	-	soglia	danneggiata	compromessa	-	45
Uccelli 6	-	briglia filtrante	buono	compromessa	5	98
Uccelli 7	-	soglia	buono	operativa	-	14
Uccelli 8	F-11457-1-17	briglia filtrante	buono	compromessa	13	26

Sono state censite tre strutture in buono stato; due opere danneggiate (una soglia che è leggermente collassata nella parte centrale ed una briglia in massi con alcuni cedimenti al corpo); tre traverse distrutte di cui una (Uccelli_1) con il corpo briglia e la fondazione totalmente prive del rivestimento in massi (*Figura 10*), un'altra (Uccelli_3) che presenta

uno scalzamento alla base della fondazione, mentre un'ultima (Uccelli_4) con fondo della gaveta in calcestruzzo completamente eroso.



Figura 10. Briglia in massi (Uccelli_1) danneggiata dall'azione erosiva della corrente.

Per quanto riguarda invece la funzionalità sono state rilevate:

- Una soglia operativa (Uccelli_7) costruita a valle di una briglia filtrante, che risulta essere libera da materiale sia a valle che a monte.
- Cinque opere compromesse o parzialmente compromesse di cui una briglia filtrante (Uccelli_8) posta al termine della forra con deposizione di materiale sul fondo e ostruzione parziale dei filtri con tronchi (*Figura 11*); una seconda briglia filtrante (Uccelli_6) con filtri ostruiti da massi e tronchi; una soglia (Uccelli_5) parzialmente interrata a monte; due briglie (Uccelli_2 e Uccelli_1) con presenza di deposito sia a monte che a valle.
- Due briglie totalmente inefficienti a causa del completo interrimento (Uccelli_4) e dell'eccessiva presenza di sedimenti sulla gaveta (Uccelli_3).



Figura 11. Briglia filtrante (Uccelli_8) in buono stato con presenza di tronchi nei filtri.

In Figura 12 si riporta la mappa con l'ubicazione delle opere di sistemazione del Rio degli Uccelli.

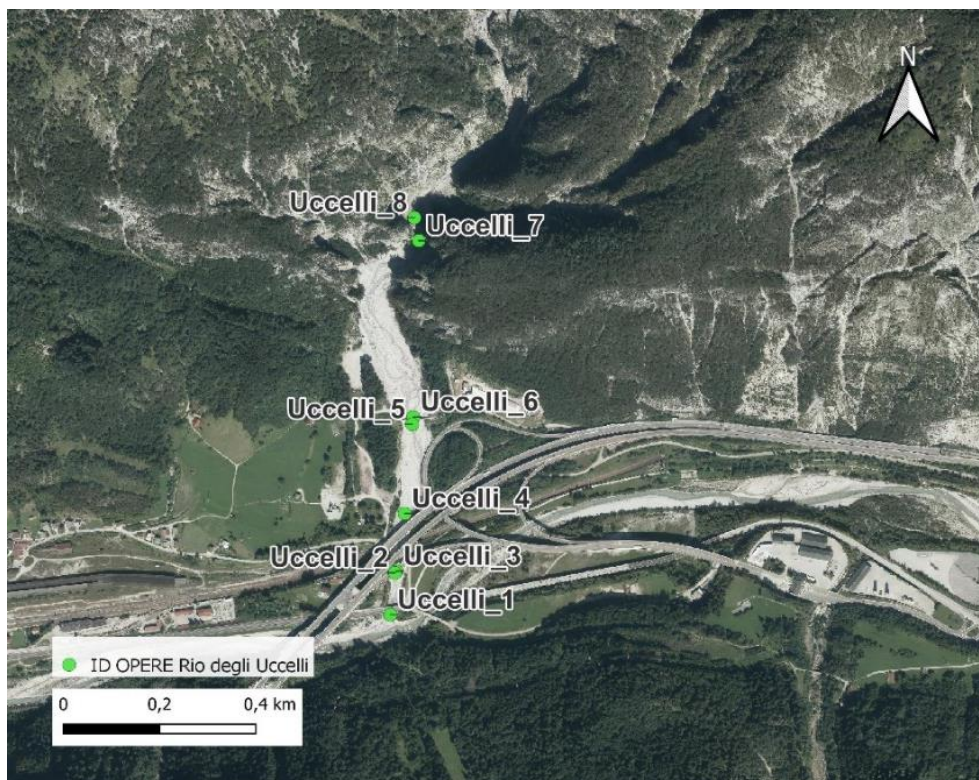


Figura 12. Ubicazione delle opere inventariate sul Rio degli Uccelli (scala 1:10000)

4.2 ANALISI GRANULOMETRICA

4.2.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO

Per il Rio Cucco si nota un aumento significativo sia del D_{50} che del D_{84} procedendo da valle verso monte del bacino (Figura 13). I diametri maggiori si trovano a monte della briglia (Cucco_10) situata nella parte alta del ramo di sinistra, ma anche in corrispondenza della soglia (Cucco_4) collocata sul ramo di destra. Le variazioni tra monte e valle di ogni singola opera non sono eccessivamente marcate con l'unica eccezione della briglia Cucco_10 dove si registra un decremento monte-valle del D_{50} pari all'82% e del D_{84} pari al 90%.

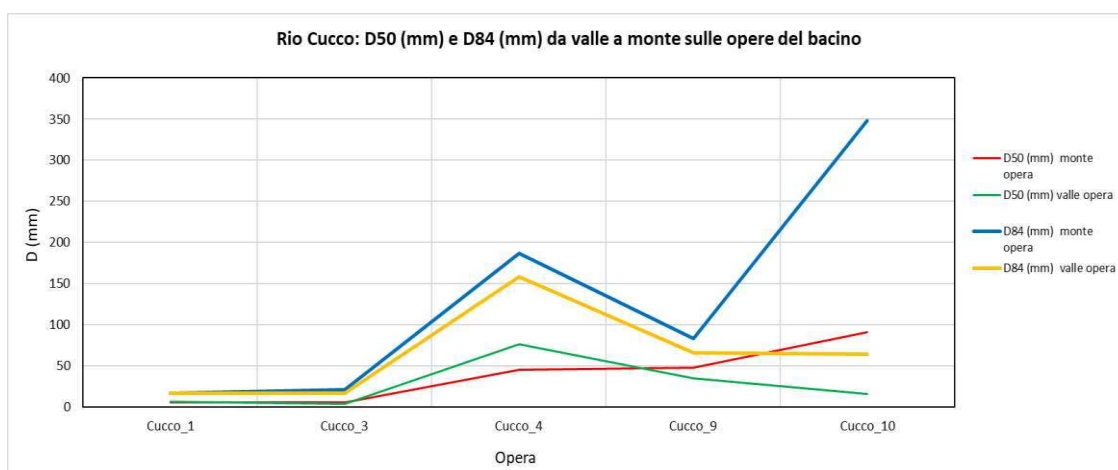


Figura 13. Distribuzione granulometrica da valle a monte delle opere del Rio Cucco per D_{50} (mm) e D_{84} (mm)

La distribuzione granulometrica è eterogenea per tutte le opere sia a valle che a monte delle stesse. Si può osservare una maggiore eterogeneità soprattutto per le opere situate a monte del bacino mentre la distribuzione tende ad essere più omogenea per le opere poste più a valle. Le variazioni risultano più significative se si considerano i valori di σ a monte dell'opera mentre a valle delle opere l'andamento è più lineare (Figura 14).

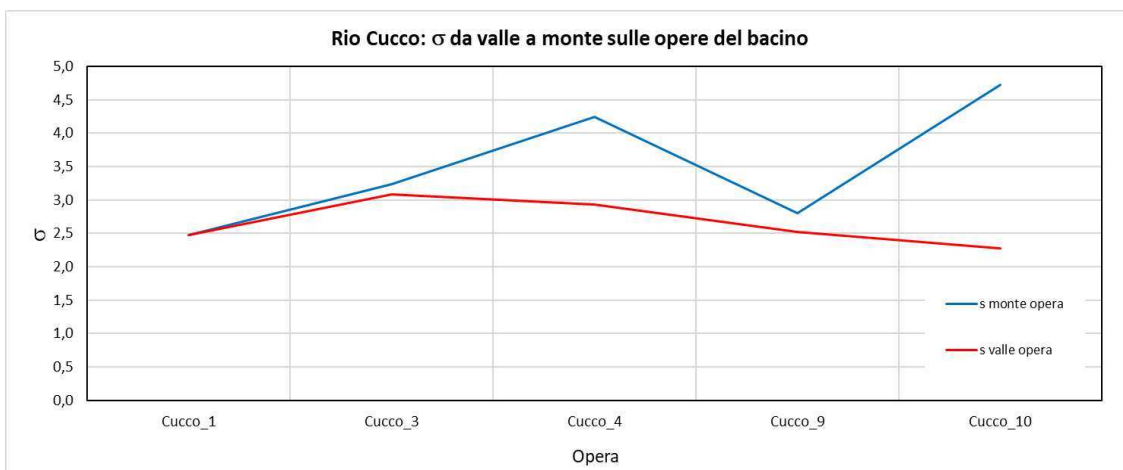


Figura 14. Deviazione standard granulometrica da valle a monte delle opere del Rio Cucco

Il seguente grafico (Figura 15) mette a confronto le curve di frequenza cumulata delle due opere situate a monte dei due rami con l'ultima opera a valle del bacino. Per la briglia Cucco_10 la curva di monte culmina con la classe per $\phi = -9.5$, per la soglia Cucco_4 con la classe per $\phi = -9.0$ mentre per l'opera Cucco_1 non viene superata la classe del $\phi = -6.5$. I diametri maggiori quindi si trovano nelle opere situate nella zona alta del bacino e diminuiscono procedendo verso valle. Inoltre si evidenzia come per la briglia Cucco_10 le due curve monte-valle presentano due andamenti piuttosto discordanti.

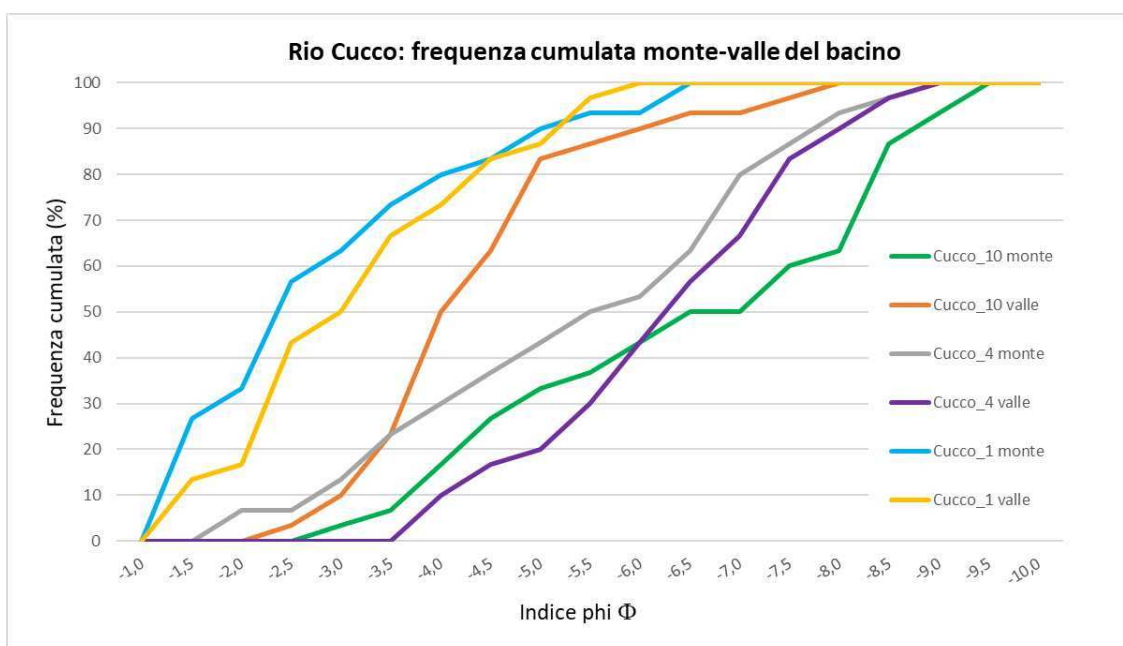


Figura 15. Confronto tra le curve di frequenza cumulata della prima opera a monte e dell'ultima a valle del Rio Cucco.

4.2.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI

La distribuzione granulometrica mostra un incremento sia per il D_{50} che per il D_{84} da valle a monte del bacino con l'eccezione della briglia Uccelli_4 in cui si osserva una riduzione dei valori (Figura 16). I diametri maggiori si trovano a monte delle opere anche se nel caso della briglia Uccelli_3 è evidente come i risultati siano in controtendenza, con variazioni importati tra valle e monte (pari al 60% per il D_{50} e al 37,8% per il D_{84}).

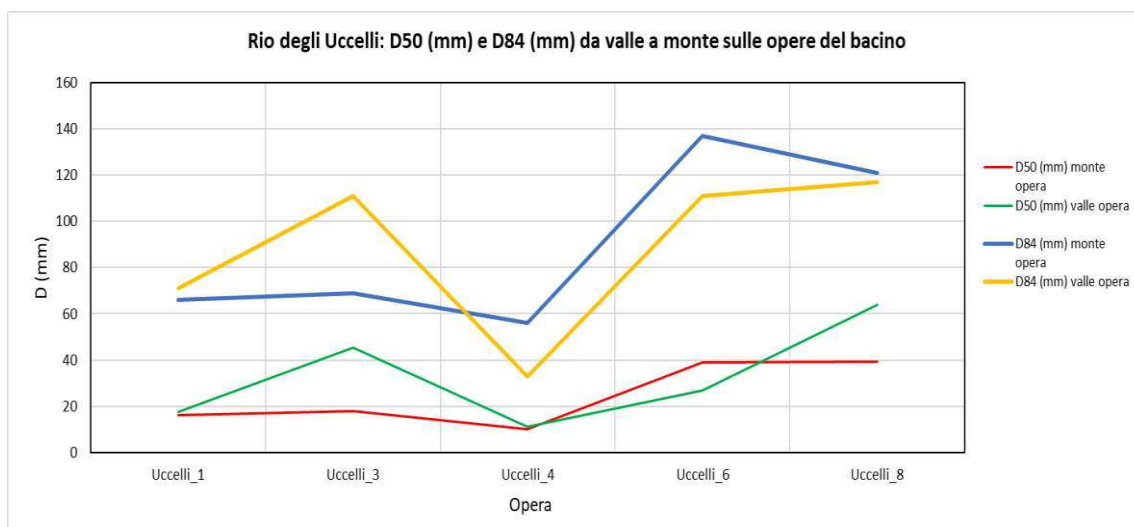


Figura 16. Distribuzione granulometrica da valle a monte delle opere del Rio degli Uccelli per D_{50} (mm) e D_{84} (mm)

Il Rio degli Uccelli presenta una granulometria eterogenea per tutte le opere sia a valle che a monte delle stesse (Figura 17). Complessivamente si nota una maggiore omogeneità per i campioni a monte del bacino mentre a valle questi risultano più eterogenei. L'andamento delle due linee evidenzia inoltre come la distribuzione sia molto variabile tra monte e valle di ogni opera e di conseguenza in alcune è presente una distribuzione più eterogenea a monte rispetto che a valle mentre in altri casi si nota il contrario.

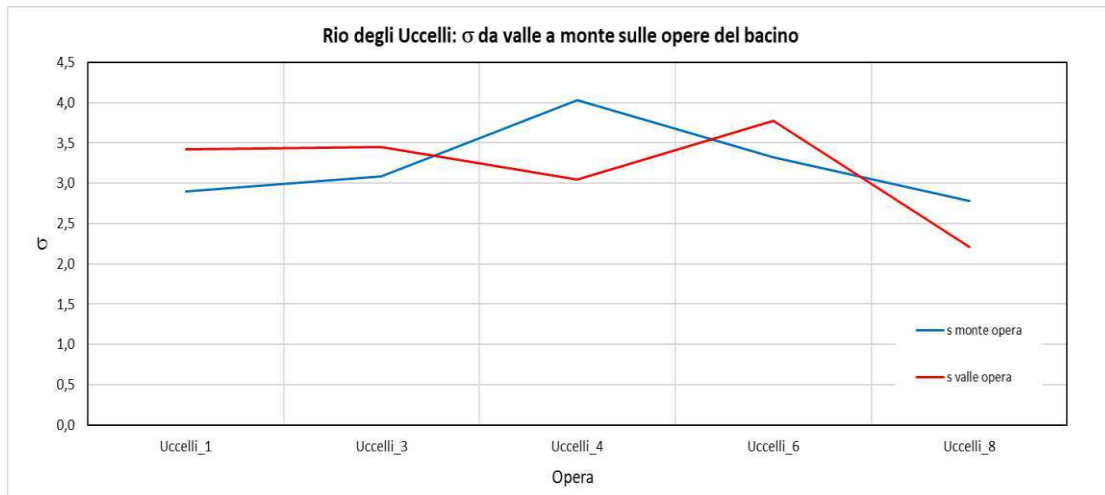


Figura 17. Deviazione standard granulometrica da valle a monte delle opere del Rio degli Uccelli

Per la briglia Uccelli_8 le curve di frequenza cumulata coprono tutte le classi ($\phi = -9.0$) a differenza delle curve per la briglia Uccelli_1 che invece culminano prima ($\phi = -7.0$). Tra monte e valle delle singole opere non si osservano variazioni significative anche se risulta evidente come tra la prima opera a monte e l'ultima a valle del bacino le classi rappresentate variano considerevolmente (Figura 18)

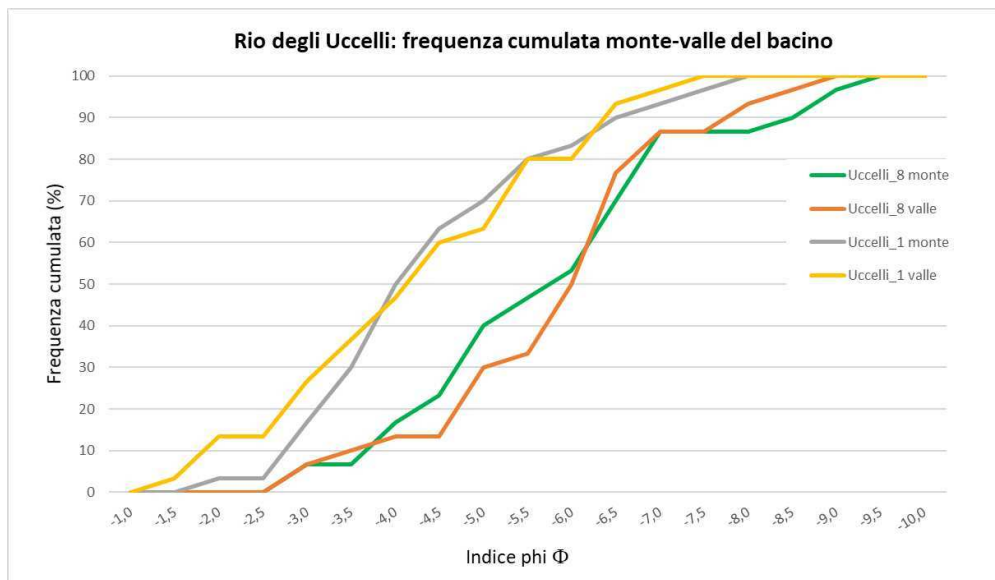


Figura 18. Confronto tra le curve di frequenza cumulata della prima opera a monte e dell'ultima a valle del Rio degli Uccelli

4.3 RILIEVO TOPOGRAFICO

I risultati dell'analisi delle sezioni trasversali delle opere, estrapolati dai DEM del 2009 e del 2018, riportano l'evoluzione temporale della morfologia dell'alveo a monte e a valle di ogni singola opera. Dall'interpretazione delle sezioni ottenute è possibile comprendere se nell'intervallo di tempo considerato è prevalsa erosione o deposizione (se la linea del 2009 sovrasta quella del 2018 allora l'opera presenta erosione, al contrario deposizione). Inoltre, nel caso in cui non sia prevalsa né erosione né deposizione allora l'opera presenta una situazione mista.

Per ogni sottobacino si riporta una tabella con i dettagli riscontrati per ogni singola opera (prevalente erosione, prevalente deposizione o situazione mista) e alcuni grafici che mostrano le diverse situazioni riscontrate.

4.3.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO

Le opere di sistemazione del Rio Cucco sono state ultimate negli anni 2009/2010 e pertanto le variazioni topografiche evidenziano i cambiamenti che si sono verificati conseguentemente alla loro costruzione.

Procedendo da monte a valle, per entrambi i rami si è potuto osservare che dall'anno 2009 all'anno 2018, a monte si sono verificate sia situazioni miste (3 opere) sia condizione di prevalente deposizione (8 opere) mentre a valle delle stesse sono state riscontrate situazioni miste (5 opere), di prevalente deposizione (5 opere) e una sola di prevalente erosione. Di seguito, in *Tabella 9* si riportano le diverse situazioni a monte e a valle delle opere.

Tabella 9. Analisi delle sezioni trasversali delle opere del Rio Cucco

ID	MONTE	VALLE
Cucco_1	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE DEPOSIZIONE
Cucco_2	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE DEPOSIZIONE
Cucco_3	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE EROSIONE
Cucco_4	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE DEPOSIZIONE
Cucco_5	PREVALENTE DEPOSIZIONE	SITUAZIONE MISTA
Cucco_6	SITUAZIONE MISTA	SITUAZIONE MISTA
Cucco_7	SITUAZIONE MISTA	SITUAZIONE MISTA
Cucco_8	SITUAZIONE MISTA	SITUAZIONE MISTA
Cucco_9	PREVALENTE DEPOSIZIONE	SITUAZIONE MISTA
Cucco_10	PREVALENTE DEPOSIZIONE	SITUAZIONE MISTA
Cucco_11	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE DEPOSIZIONE

A titolo esemplificativo si riportano due grafici che illustrano due delle situazioni analizzate. Nel primo caso (*Figura 19*) è possibile osservare come, per la soglia *Cucco_6*, le variazioni altimetriche dall'anno 2009 all'anno 2018 non siano state eccessivamente marcate. Pertanto si tratta di una situazione mista in cui non prevale né erosione né deposizione.

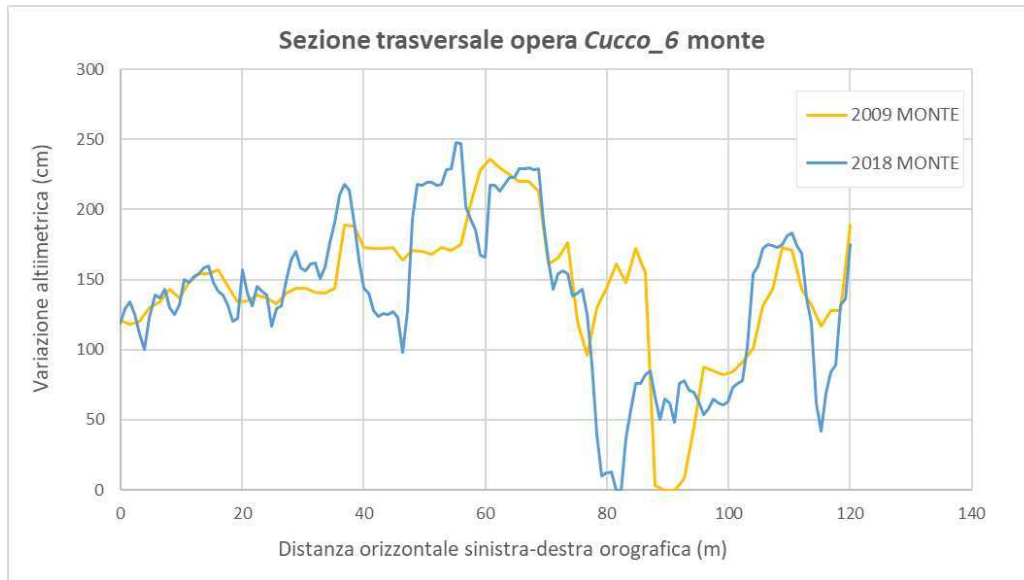


Figura 19. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Cucco_6"- monte

Dalla *Figura 20* risulta evidente come per la soglia *Cucco_4* si sia riscontrato un aumento della deposizione a valle. I notevoli incrementi registrati fanno sì che l'opera presenti prevalente deposizione.



Figura 20. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Cucco_4"- valle

4.3.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI

Le opere presenti lungo il Rio degli Uccelli sono state realizzate prima del 2009 ad eccezione di due di esse che sono state completate successivamente. Per tale motivo si è ritenuto opportuno effettuare una distinzione nella presentazione dei risultati (ante/post 2009) considerato che laddove le opere erano già presenti prima del 2009, i profili riportano le variazioni conseguenti ai naturali processi di trasporto del rio, mentre nell'altro caso (opere realizzate dopo il 2009) i profili riportano le variazioni influenzate dalla realizzazione dell'opera.

4.3.2.1 OPERE ANTE 2009

Procedendo da monte a valle si è visto che la maggior parte delle opere presenta un aumento del deposito a monte rispetto al 2009 (5 opere) mentre a valle prevale erosione (5 opere). Solamente in un caso è stata riscontrata erosione a monte e in un altro caso deposizione a valle. In *Tabella 10* si riportano i dettagli dell'analisi delle sezioni trasversali delle opere.

Tabella 10. Analisi delle sezioni trasversali delle opere ante 2009 del Rio degli Uccelli

ID	MONTE	VALLE
Uccelli_1	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE DEPOSIZIONE
Uccelli_2	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE EROSIONE
Uccelli_3	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE EROSIONE
Uccelli_4	PREVALENTE EROSIONE	PREVALENTE EROSIONE
Uccelli_7	PREVALENTE DEPOSIZIONE	PREVALENTE EROSIONE
Uccelli_8	PREVALENTE DEPOSIZIONE	SITUAZIONE MISTA

I seguenti esempi mostrano due situazioni: una di prevalente erosione e un'altra di prevalente deposizione.

La briglia Uccelli_4 fra tutte quelle rilevate è l'unica opera che presenta una condizione di erosione sia a monte (*Figura 21*) che a valle con variazioni altimetriche che hanno registrato variazioni consistenti. Pertanto si può considerare la stessa in prevalente erosione.

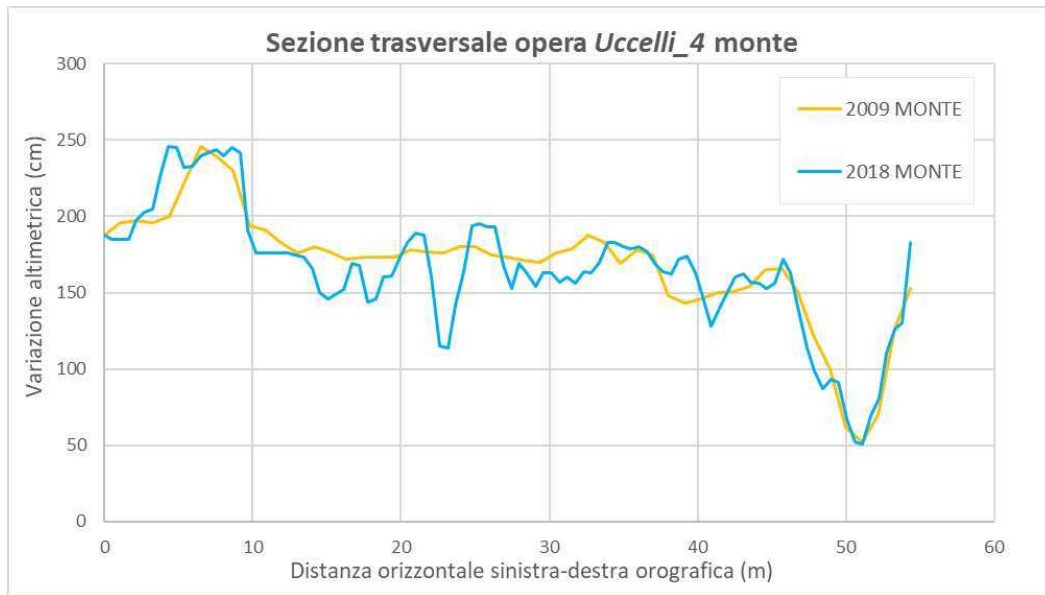


Figura 21. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Uccelli_4"- monte

La Figura 22 invece mostra la condizione di prevalente deposizione riscontrata a valle della briglia Uccelli_1 dove è stata registrata una moderata variazione altimetrica .

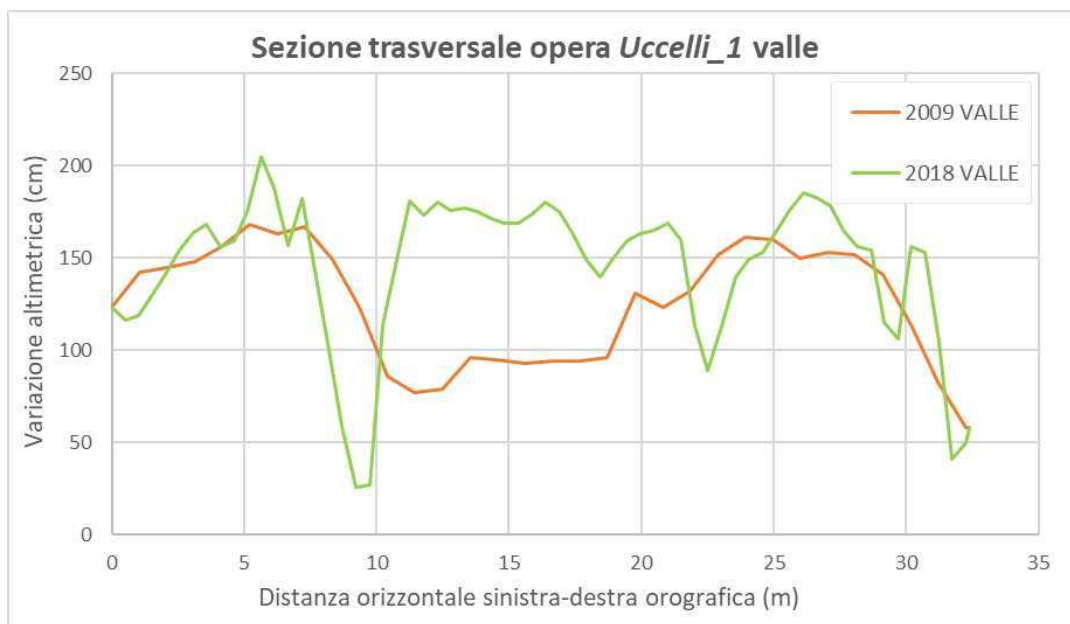


Figura 22. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Uccelli_1"- valle

4.3.2.2 OPERE POST 2009

Le opere realizzate dopo l'anno 2009 mostrano nel complesso sia a monte che a valle una situazione mista in cui si è potuto osservare un andamento fluttuante delle linee con alternanza di fasi in erosione e fasi in deposizione. Di seguito si riporta la situazione a monte per la briglia Uccelli_6 (Figura 23) e quella a valle per la soglia Uccelli_5 (Figura 24).

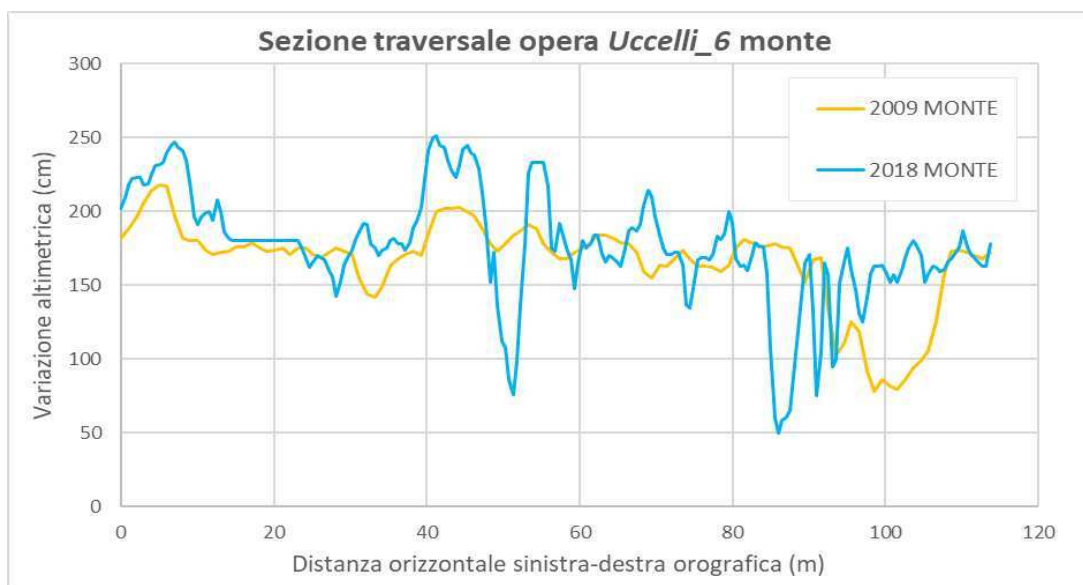


Figura 23. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Uccelli_6"- monte



Figura 24. Variazione del profilo altimetrico dall'anno 2009 all'anno 2018 per l'opera "Uccelli_5"- valle

4. DISCUSSIONI

La disponibilità dei DEM realizzati in anni successivi, di numerose analisi relative ai due bacini oggetto di studio nonché i rilievi effettuati sul campo hanno consentito di valutare efficacemente la situazione delle opere di sistemazione del Rio Cucco e del Rio degli Uccelli.

I risultati ottenuti dalle analisi delle sezioni trasversali nel complesso sono in accordo con quanto osservato durante i rilievi in campo. Confrontando le informazioni relative allo stato e alla funzionalità con quelle ricavate dal rilievo topografico si è notato che, generalmente, le opere di sistemazione idraulico-forestali si trovano in buono stato manutentivo e sono operative dal punto di vista della funzionalità idraulica, tendendo a generare prevalentemente una condizione di deposizione a monte, mentre a valle una situazione mista o di prevalente erosione. Le opere in buono stato ma con funzionalità compromessa o nulla presentano, invece, una situazione mista sia a monte che a valle. Le opere fortemente danneggiate con funzionalità compromessa o nulla, presentano prevalente deposizione o prevalente erosione sia a monte che a valle.

Si è inoltre riscontrato che entrambi i bacini presentano una distribuzione granulometrica eterogenea con diametri che progressivamente diminuiscono da monte a valle.

4.1 SOTTOBACINO DEL RIO CUCCO

Il Rio Cucco essendo stato sistemato in tempi relativamente recenti (2009), presenta opere in buono stato di conservazione anche se molte di queste risultano inefficienti o compromesse per eccessiva deposizione di materiale sulle stesse. Infatti, come evidenziato da Cavalli et al. (2007), nonostante l'elevata pendenza dell'alveo, il bacino del Rio Cucco presenta bassi valori di erosione a fronte però di maggiori depositi soprattutto nell'area del conoide. Questo è stato confermato anche dalle analisi delle sezioni trasversali in quanto sia per la soglia Cucco_5 che per la soglia Cucco_4 (*Figura 20*), ubicate prima dell'innesto con la vasca di accumulo, è stata riscontrata una condizione di prevalente deposizione sia a monte che a valle. I fenomeni di deposito si estendono anche alla vasca di accumulo e alle due opere di canalizzazione a valle di esso. A causa della ridotta energia cinetica con cui i materiali raggiungono la vasca di accumulo

(Marchi e Cavalli, 2007), nel cunettone si deposita unicamente sedimento fine (linea Cucco_1, *Figura 15*) che tuttavia non viene smaltito verso il Fiume Fella, vista la ridotta pendenza del tratto, andando a determinare dei fenomeni di rigurgito verso monte.

Di particolare interesse è quanto osservato nel grafico della distribuzione granulometrica (*Figura 13*) relativamente alla briglia Cucco_10 in cui si vede una riduzione considerevole del D_{84} tra monte e valle dell'opera a dimostrazione dell'operatività della stessa ed in particolare della buona capacità di trattenuta del materiale più grossolano.

La bassa frequenza con cui si verificano i fenomeni di trasporto sul Rio Cucco non ha forse permesso di verificare appieno l'adeguatezza delle opere che da un primo impatto visivo sembrano essere quasi sovradimensionate in relazione alle esigue quantità di materiale che attualmente gestiscono. I numerosi studi che sono stati condotti giustificano però quanto appena affermato e dimostrano come i volumi mobilizzati durante gli eventi eccezionali possano arrivare a quasi 100000 m³ (Cavalli et al., 2007; Boccali, 2013).

4.2 SOTTOBACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI

Il Rio degli Uccelli è caratterizzato da fenomeni di trasporto solido che avvengono con maggiore frequenza e che vanno in alcuni casi ad alterare la funzionalità delle opere di sistemazioni presenti. In generale si è visto che le opere situate nella zona a monte del cono di deiezione presentano una buona capacità di trattenuta e gestione della portata solido liquida come nel caso della briglia Uccelli_6, che sebbene non evidenzia significative variazioni altimetriche in sezione trasversale (*Figura 16*) presenta invece una riduzione significativa per quanto riguarda le dimensioni dei sedimenti (D_{84} e D_{50}) da monte a valle.

La parte bassa del conoide presenta le criticità maggiori in quanto le opere di sistemazione sono per lo più inefficienti e danneggiate. La briglia Uccelli_3, ad esempio, è caratterizzata da un aumento dei percentili D_{84} e D_{50} (*Figura 19*) dovuto principalmente alla pressoché nulla capacità di trattenuta dei sedimenti dell'opera situata a monte (Uccelli_4). Infatti quest'ultima, oltre ad essere gravemente danneggiata ed inefficiente, presenta una condizione di prevalente erosione sia a monte che a valle (*Figura 22*) che

favorisce il passaggio dei sedimenti più grossolani soprattutto durante eventi di piena. Da notare infine come le opere di quest'ultimo tratto sono sì danneggiate e con funzionalità scarsa o nulla, ma bisogna considerare che fino al 2009 gestivano anche tutto il materiale proveniente da monte e che attualmente viene trattenuto dalla briglia Uccelli_6. Ne consegue che la costruzione di quest'ultima abbia alleggerito il carico sulle strutture più a valle, generando un miglioramento complessivo dell'impianto sistematorio.

Viste le ingenti quantità che il torrente è in grado di trasportare durante gli eccezionali eventi di piena (ca. 400000 m³ nel 2003) e considerata la frana del versante orientale del Monte Bruca e del Monte Cerchio che continua ad alimentare significativamente il trasporto solido del torrente (Dini e Salleroni, 2007; Snidar, 2007) si può affermare che ad oggi le opere esistenti, sono adeguate con l'unico appunto che quelle del tratto terminale necessiterebbero di alcuni interventi di consolidamento o ripristino.

5. CONCLUSIONI

Gli eccezionali eventi alluvionali verificatisi in Valcanale-Canal del Ferro nel 1996 e nel 2003 ed i conseguenti ingenti danni hanno di fatto consentito l'avvio di un'attenta e costante attività di monitoraggio e di pianificazione territoriale.

La realizzazione di importanti interventi di sistemazione idraulico forestale come quelli eseguiti sul Rio Cucco e sul Rio degli Uccelli hanno permesso di ridurre in maniera significativa la pericolosità dovuta agli elevati volumi di sedimenti che possono essere reclutati e trasportati durante gli eventi di piena. Tuttavia è di prioritaria importanza effettuare periodiche operazioni di controllo, manutenzione e ripristino delle strutture in quanto condizione necessaria per garantirne l'efficacia al fine di assicurare un elevato livello di sicurezza soprattutto per le infrastrutture e per gli insediamenti produttivi e abitativi. In tal senso, nei bacini oggetto di studio, nelle settimane successive al rilievo di campo, sono stati effettuati lavori di sghiaimento sia per una briglia filtrante sul Rio degli Uccelli sia per un'opera di canalizzazione sul Rio Cucco, dimostrando quindi una continua azione di monitoraggio e manutenzione che permette il mantenimento dell'efficacia delle opere stesse.

Il presente elaborato ha permesso quindi non solo di valutare l'efficienza delle singole opere nell'interazione con la dinamica dei sedimenti che nel complesso è risultata soddisfacente, ma anche di effettuare alcune considerazioni circa il ruolo fondamentale che rivestono le sistemazioni idraulico forestali in ambiente montano.

6. BIBLIOGRAFIA

- Benini, G., 1990, Sistemazioni idraulico-forestali. UTET, Torino pp.106-107
- Boccali C., 2013 *Caratterizzazione e modellazione di colate detriche*, Università degli Studi di Trieste, Facoltà di Geoscienze, tesi di dottorato, A.A. 2012-2013, pp. 1-11, 79-110
- Borga M., Boscolo P., Zanon F., Marchi L., 2007; *Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps*, DOI: 10.1175/JHM593.1
- Borga M. et al., 2009; *A compilation of data on European flash flood*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- Calligaris C., Zini L., 2012; *Delimitazione delle aree a rischio da colate detritiche in Friuli Venezia Giulia*, <https://hdl.handle.net/11368/2694603>
- Cavalli M., Marchi L., Sangati M., Zanon F., Borga M., *EROSIONE E TRASPORTO DEI SEDIMENTI DURANTE UNA PIENA IMPROVVISA: L'EVENTO DEL RIO CUCCO, 29 AGOSTO 2003*;
- Cazorzi F., Dalla Fontana G., 1992; *L'utilizzo dei sistemi informativi geografici nello studio idrologico di bacino. Quaderni di Idronomia Montana, n. 12.*
- Church, M., Jakob, M., 2020; *What is a debris flood? Water Resources Research*, 56, e2020WR027144. <https://doi.org/10.1029/2020WR027144> Received 19 JAN 2020 Accepted 14 JUL 2020 Accepted article online 16 JUL 2020 CHURCH AND JAKOB 1 of 17
- Cucchiario S., Cazorzi F., Marchi L., Crema S., Beinat A., Cavalli M. 2019; *Geomorphology* 345 106844, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106844>
- Dalla Fontana G., 2013; *Materiale didattico del corso di Sistemazione Idraulico-Forestali, Corso di Laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali, Dipartimento Territorio Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova*
- Dini M., Salleroni J., 2007; *La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CATCHRISK*, pp.19-21

- Fugazza M., 2011; Materiale didattico del corso di Sistemazione dei Bacini Idrografici, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria ed Idraulica, Università degli Studi di Pavia
- Ferro V., 2002, *La sistemazione dei bacini idrografici*. Milano: McGraw-Hill, 2 edizione, pp. 2-35
- Gortani M., 1980; *Compendio di Geologia*, 2 edizione pp 89-135
- Guarnieri A., Pirotti F. 2022; *Materiale didattico del corso di Fondamenti di Gis, Corso di Laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali, Dipartimento Territorio Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova*
- Marchi L., Cavalli M., 2007; *La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CATCHRISK*, pp.113-114. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105600>
- Paronuzzi P., Coccolo A., Garlatti G. (1998); *Eventi meteorici critici e debris flows nei bacini montani del Friuli, L'ACQUA, Sezione I/Memorie Idrogeologia*, pp. 39-50
- Potleca M., Garlatti C., Massari G., 2004 *Moderne tecnologie per la gestione delle emergenze idrogeologiche*
- Potleca M., Massari G., 2004; *Alluvione 29 agosto 2003: GIS e tecnologie per il supporto decisionale*, pp. 2-6
- Puglisi S., 1977; *Caratteri degli interventi di sistemazione idraulico-fore-stale,in: U. Bagnaresi, A. Suggelli, S. Puglisi,La sistemazione del suolonei territori montani,Edagricole,pp. 29-45.*
- Rainato R., Martini L., Picco L., Pellegrini G., 2021; *Hydrological, geomorphic and sedimentological responses of an alpine basin to a severe weather event (Vaia storm)*, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105600>
- Snidar L., 2007; *INTERVENTO DI MESSA IN SICUREZZA DEL BACINO DEL RIO DEGLI UCCELLI MEDIANTE REALIZZAZIONE DI UN BACINO DI TRATTENUTA DI MATERIALI SOLIDI IN COMUNE DI PONTEBBA (CD/R07/011)*, slide Protezione Civile FVG
- Stefanini S., 1980; *Le opere di sistemazione idraulico-forestale nei bacini imbriferi del F.Fella e del T. Slizza*, pp. 7-37

- Stefanelli P., 2007; *La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CATCHRISK*, pp. 9-18
- Tropeano D., Luino F., Turconi L., 2006; *Eventi di piena e frana in Italia settentrionale nel periodo 2002-2004*, pp. 88-91
- Venturini C.; 2010 *SI FORMA SI DEFORMA SI MODELLA-Come il territorio si modifica attraverso il tempo geologico, Comunità Montana della Carnia-Museo Geologico della Carnia* pp. 64-66

SITOGRAFIA

- Regione Friuli Venezia Giulia, 2019; *tutela dell'ambiente, sostenibilità e gestione delle risorse naturali, sezione "risorse idriche- bacini idrografici"*
<https://www.regione.fvg.it/rafvfg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/tutela-ambiente-gestione-risorse-naturali/FOGLIA202/FOGLIA3/> [Accesso avvenuto il 6 settembre 2022].
- Regione Friuli Venezia Giulia, 2007; Comunicato stampa: *PROTEZIONE CIVILE: INAUGURATO PONTE SUL FIUME FELLA A DOGNA*
<https://www.regione.fvg.it/rafvfg/comunicati/comunicato.act;jsessionid=3ACCOF887FF22F748D6F8C99A1DA9C8C?dir=/rafvfg/cms/RAFVG/notiziedallagiunta/&nm=20070602115216003>> [Accesso avvenuto il 6 settembre 2022].