

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento: Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea magistrale in  
Scienze Forestali e Ambientali

“Modellazione GIS del trasporto di legname in alveo  
durante eventi di piena nel T. Cordevole (BL)”

“GIS modeling of in-channel wood transport during floods in  
Cordevole River”

**Relatore**

Ch.mo Prof. Mario Aristide Lenzi

**Laureando**

Diego Francesco Malacarne

**Matricola n.**

1081965

ANNO ACCADEMICO 2014/2015



# INDICE

Riassunto / <i>Abstract</i>	5
1) Introduzione	7
2) Il legname in alveo	9
2.1) Il legname in alveo	
2.2) Origine	
2.3) Trasporto	
2.4) Deposizione	
2.5) Effetti	
3) Gestione del legname e della vegetazione	27
3.1) La vegetazione riparia	
3.2) La gestione della vegetazione	
3.3) La gestione del legname	
3.4) La quantificazione del legname	
4) Modellazione LW	43
4.1) I modelli implementati fino ad oggi	
4.2) La modellazione di LW nelle Alpi	
5) Descrizione dell'area di studio	53
5.1) Idrografia e parametri morfometrici	
5.1.1) Quote	
5.1.2) Pendenze	
5.1.3) Esposizione	
5.2) Clima	
5.3) Vegetazione	
5.4) Geologia e dissesti	
5.5) Cenni storici	

6) Materiali e metodi	69
6.1) Modello previsionale del legname in alveo	
6.2) Materiale	
6.3) Metodologie di lavoro	
6.3.1) Elaborazione DEM e analisi idrologiche e morfometriche	
6.3.2) Opere in alveo	
6.3.3) Sottomodello 1: Reclutamento	
6.3.4) Sottomodello 2: Trasferimento versante	
6.3.5) Sottomodello 3: Trasferimento rete idrografica	
7) Risultati	85
7.1) Estrazione area drenata T. Cordevole a livello sovra-regionale	
7.2) Analisi idrologiche	
7.3) Opere SIF e grado di bloccaggio LW	
7.4) Modellazione trasferimento LW in alveo	
7.4.1) Raster finale di trasferimento LW in alveo	
7.4.2) Quantificazione del legname depositato nei sottobacini	
8) Discussione	107
9) Conclusioni	111
10) Bibliografia	113
11) Allegati	119

## Riassunto

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di implementare un modello concettuale su base GIS in grado di simulare il trasporto e la deposizione del legname lungo il torrente Cordevole (BI) durante eventi di piena. Il presente progetto si basa su un modello ideato e sviluppato in precedenza per l'alto Cordevole (Rigon, 2009; Rigo et al. 2012). Nel presente lavoro è stata estesa l'area di applicazione all'intero bacino del Cordevole ed è stata affinata la modellazione del trasferimento di legname lungo la rete idrica, in particolare considerando la presenza delle opere in alveo come possibili zone di "blocco" della fluitazione. Il lavoro è stato interamente svolto mediante l'utilizzo dei software ArcGIS®, Google Earth® e dei fogli di calcolo Excel®. La prima fase è consistita nell'elaborazione del DTM dell'area d'interesse e nello svolgimento delle analisi idrologiche e morfometriche. Successivamente è stato creato un database delle opere di sistemazione idraulico forestale da foto interpretazione, corredato di informazioni riguardo la tipologia delle opere e il grado di bloccaggio del legname in modo da poter essere integrate nel modello. La fase di modellazione ha prodotto diversi risultati intermedi, fra cui la mappa delle aree sorgente di legname e la mappa del trasferimento lungo i versanti. Il risultato finale di questo lavoro è stata la localizzazione della quantità di legname potenzialmente accumulabile nel reticolo idrografico durante eventi di piena eccezionali. La calibrazione e validazione del modello è stata fatta con rilievi in campo eseguiti in tredici diversi sottobacini dell'alto Cordevole.

## Abstract

The present work aims to implement a conceptual GIS model able to simulate the transport and deposition of the wood along the Cordevole River (BI) during floods. This purpose present an applicational side because the model can represent an useful tool at the decisional support for the agencies that are concerned with the management of the hydrogeologic hazard in mountain environment. The present project is based on a model thinked and developed previously for the high Cordevole (Rigon, 2009; Rigon et al., 2012). In the present work the application area was extended at the whole Cordevole basin and it was refined the modeling of the wood transferring through the water net, especially considering the presence of the hydraulic structures in channel as possible areas of fluitation locking. The work was developed entirely through the use of the softwares ArcGIS®, Google Earth® and the spreadsheets Excel®. The first phase consisted in the processing of the DTM of the interested area and the performance of the hydrological and morphometric analysis. Subsequently was developed a database of the hydraulic structures by photointerpretation, accompanied by informations regarding the type of structures and the degree of locking of the wood so that it can be integrated in the model. The modelling phase has produced several intermediate results, including the map of the wood source areas and the map of the transfer along the hillslopes. The final result of this work was the localization of the potentially accumulable wood in the water net during exceptional flood events. The calibration and validation of the model was made with field survey performed in thirteen different sub basins of the high Cordevole.

# 1) INTRODUZIONE

Il tema del legname in alveo tocca numerosi aspetti dell'ambiente fluviale e torrentizio, esso influisce nei processi idrologici, ecologici e morfologici, apportando miglioramenti di vario genere ma costituendo anche un fattore di rischio e ciò ne implica un'attenta gestione. A tale scopo risulta molto importante la quantificazione e la localizzazione del detrito legnoso, stimabili mediante diverse metodologie, fra le quali vi sono rilievi in campo, formule empiriche e modelli previsionali. Lo sviluppo delle tecnologie su base GIS ha permesso la creazione di modelli sempre più precisi, in grado di integrare grandi quantità di dati e fornire risultati cartografici facilmente interpretabili. Un modello presenta certamente un grado d'incertezza, trattandosi di una rappresentazione semplificata di un sistema reale, ma costituisce comunque uno strumento in grado di fornire delle preziose indicazioni ai fini della gestione territoriale. Il presente progetto di tesi si pone l'obiettivo di implementare un modello concettuale su base GIS per valutare la possibilità di trasporto e deposizione del legname lungo la rete idrografica del T. Cordevole (Bl). Tale scopo ha un risvolto applicativo, infatti gli enti che si occupano della gestione del rischio idrogeologico in ambiente montano, consultando il modello, potrebbero trarre utili indicazioni per indirizzare le operazioni di manutenzione dell'alveo e di gestione della vegetazione riparia. L'area studio e di applicazione del modello è appunto il bacino del torrente Cordevole, principale affluente del fiume Piave, situato nella provincia di Belluno. Prima di sviluppare il modello sono state svolte delle elaborazioni preliminari (sempre con l'ausilio di software GIS) che hanno permesso di ottenere un DTM completo dell'intero bacino in esame e di estrarne i principali parametri idrologici e morfometrici, indispensabili per analizzare i fenomeni che condizionano il trasporto del legname. I fattori che condizionano la movimentazione del detrito legnoso sono innumerevoli, in questo modello è stata posta particolare attenzione al ruolo delle opere in alveo e pertanto è stato creato un database di tali opere, dove sono state inserite le principali informazioni, dalla localizzazione al "grado di

bloccaggio”, ovvero la capacità di trattenere il legname fluitato. Il rilievo delle opere è avvenuto mediante fotointerpretazione di immagini aeree e di immagini da terra. Tale censimento e la successiva valutazione delle caratteristiche delle opere ha permesso di produrre un elenco classificato in base alla tipologia e in base all’influenza esercitata sul legname fluitato. Il sotto-modello di trasporto lungo la rete idrica fa parte ed è il tassello finale di un modello concettuale più ampio ideato e sviluppato in precedenza da Rigon (2009); (Rigon et al. 2012). Questo modello, a partire da dati territoriali georiferiti, reperibili gratuitamente dal geoportale Nazionale o da quello della Regione Veneto, è in grado di identificare le aree sorgenti di legname in dissesto, simularne l’entrata in alveo e quindi la sua movimentazione lungo la rete idrica. Il prodotto finale del presente lavoro è una mappa *raster* che quantifica e localizza gli accumuli di materiale legnoso fluitabile in condizioni di piena eccezionale, dalla quale è possibile trarre importanti considerazioni ai fini gestionali. A partire da tale raster è stato infine calcolato il volume di legname depositabile nei principali sottobacini, il quale può fornire ulteriori utili indicazioni. Nei seguenti capitoli sarà esposto un richiamo generale sulle caratteristiche del legname in alveo e come viene attualmente affrontato il problema idrogeologico connesso alla presenza della vegetazione riparia, una panoramica sui modelli previsionali esistenti e l’inquadramento dell’area di studio. Saranno in seguito descritte le metodologie che hanno permesso lo sviluppo del presente elaborato e si analizzeranno i risultati prodotti. Il volume di legname depositabile nei vari sottobacini sarà infine confrontato con i risultati prodotti nella prima applicazione del modello per l’Alto Cordevole e con i relativi dati di campo.

## 2) IL LEGNAME IN ALVEO

### 2.1) Il legname in alveo

Il legname presente lungo i corsi d'acqua può avere diverse origini, può essere soggetto a diverse dinamiche di trasporto e di accumulo ed è caratterizzato da dimensioni, forme e caratteristiche intrinseche del legno molto variabili. Sulla base di questi parametri, il legname in alveo è stato catalogato in vari sistemi di classificazione. In terminologia anglosassone con il nome *Large Wood* (LW) si identifica il materiale legnoso di dimensioni superiori ad un certo valore soglia. Vari autori hanno proposto nel passato differenti valori, ma quello a cui si fa generalmente riferimento considera LW i tronchi con diametro minimo di 0,1 m e lunghezza minima di 1 m (Gurnell et al, 2002). L' LW costituisce la componente legnosa che incide maggiormente sulle dinamiche fluviali, sia con effetti positivi che negativi. Il *Fine Wood* (FW) è la componente più piccola che transita in alveo, la quale ha un'importanza minore nell'ambito della fluviomorfologia ma che svolge comunque un importante ruolo ecologico e quando viene intercettata dagli ammassi di legname può fungere da legante consolidandoli. In ogni caso la soglia che discrimina fra LW e FW è principalmente una convenzione, dato che l'influenza del legname in alveo è determinata dalle sue dimensioni relative alle dimensioni del canale in cui si trova (Hassan et al, 2005).

### 2.2) Origine

I fattori che causano l'ingresso del legname in alveo sono di vario genere ed interessano la vegetazione ripariale, ma non solo. Si possono distinguere cause biologiche, quali mortalità naturale, insetti e malattie fungine, ma anche processi non biologici, come frane, erosioni spondali, schianti da vento e da neve, colate detritiche e l'impatto antropico. Si può inoltre distinguere fra reclutamento attivo dei corsi d'acqua, ovvero dato dalle erosioni che il

fiume stesso genera lungo le sponde, nella superfici interne dell'alveo e nella piana alluvionale, e meccanismi passivi dal punto di vista del sistema fluviale, in cui i fattori scatenanti sono esterni e possono quindi coinvolgere anche porzioni di bosco più distanti dall'asta fluviale (Trentini e Fossi, 2015). Quando le condizioni del versante lo permettono, in particolare in relazione alla pendenza, possono infatti giungere in alveo tronchi provenienti da aree dissestate molto al di fuori della zona d'influenza del corso d'acqua. La natura delle superfici boscate comprese nel bacino idrografico permette di determinare le principali caratteristiche del legname in alveo, quali diametro e lunghezza massimi, peso specifico e geometria. In particolare età, densità e stato fitosanitario sono le proprietà del soprassuolo che maggiormente influenzano le caratteristiche del legname. Altre peculiarità del LW possono essere dedotte dalla composizione specifica dei popolamenti, in particolare:

- **boschi di conifere** favoriranno l'immissione in alveo di tronchi molto lunghi e senza ramificazioni, con peso specifico basso, quindi facilmente fluitabili a valle;
- **boschi di latifoglie** favoriranno l'immissione in alveo di tronchi più corti, di peso maggiore e con molte più ramificazioni, dei quali è favorita la ritenzione.

(Trentini e Fossi, 2015).

Altrettanto importante è la geomorfologia dell'area e l'individuazione delle zone in dissesto. Osservando le dinamiche di reclutamento del legname lungo i corsi d'acqua si può affermare che esse variano in relazione all'ordine del collettore. I torrenti di primo e di secondo ordine sono in genere caratterizzati da pendenze elevate e percentuale di superficie boscata maggiore rispetto agli altri tratti. In questa zona i numerosi dislivelli generano frequenti fenomeni di frana e di innesco di colate detritiche, risultando i principali processi di immissione di legname in alveo dell'area montana. In collettori di ordine superiore diventa invece predominante il fenomeno di erosione spondale, in particolare per i corsi meandriiformi della zona pedemontana. Infine, per quanto riguarda i corsi d'acqua a canali intrecciati e quelli a meandri di pianura, si hanno ancora fenomeni di

erosione, ma a scapito della piana alluvionale con ricambio di specie arboree più rapido. (Trentini e Fossi, 2015). I fattori descritti fin ora sono prevalentemente di origine naturale, ma si può ben intuire l'influenza esercitata dall'uomo mediante le tecniche selvicolturali e le sistemazioni idraulico-forestali, che possono largamente condizionare i fenomeni citati.

## 2.3) Trasporto

Lo studio delle modalità di trasporto e della dinamica di trasferimento del LW risultano molto importanti ai fini della gestione del detrito legnoso, essi danno la possibilità di determinare la quantità di legname mobilitabile e le condizioni di deposizione. Il moto incipiente del legname è determinato dal bilanciamento delle seguenti forze in gioco:

- **Forza idrodinamica della corrente**
- **Forza di resistenza del tronco**
- **Spinta di galleggiamento**
- **Forza peso del tronco**

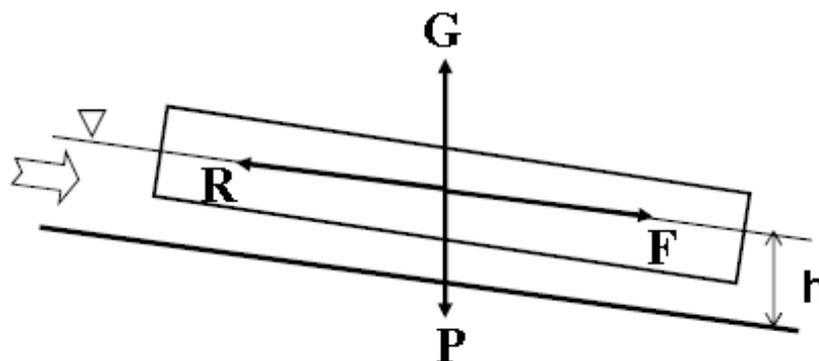


Figura 1 - Forze in gioco nel moto incipiente del legname. F = forza idrodinamica della corrente, R = forza di resistenza del tronco, G = spinta di galleggiamento, P = forza peso del tronco. Fonte: D'Agostino (2015).

Si ha quindi inizio del movimento quando la forza idrodinamica agente sul tronco prevale sulla forza di resistenza del tronco stesso, generata dall'effetto del suo peso specifico e degli attriti causati dalla sua forma; inoltre la spinta di galleggiamento deve essere superiore alla forza peso del tronco. Queste forze sono influenzate dalle caratteristiche del tronco e del corso d'acqua, in particolare dalla densità del legno, dal suo coefficiente di forma, dalla velocità della corrente e dalla pendenza dell'alveo. Fondamentali sono anche il tirante idrico e il diametro del tronco, il cui rapporto deve essere maggiore di 1 - 1,2, oppure 1,5 in presenza di rami o 1,7 se vi sono radici, per garantirne la fluitazione (Abbe e Montgomery, 2003).

Il trasporto del legname può avvenire con diverse modalità, ciò è determinato fondamentalmente da due rapporti: la *densità relativa* e la *sommergenza relativa*. Il primo è dato dalla densità del tronco in rapporto alla densità dell'acqua, il secondo è il rapporto fra il diametro del tronco e il tirante idrico. Le tre modalità di trasporto che ne derivano sono:

- **trascinamento e rotolamento sul fondo:** avviene quando il tronco presenta una densità superiore a quella dell'acqua o quando il tirante idrico è insufficiente a permetterne il sollevamento dal fondo. In questa condizione il tronco è sempre a contatto con il letto del fiume e le forze di attrito ne rallentano considerevolmente il movimento.
- **sospensione:** questa modalità si ha nel caso in cui il peso specifico del tronco sia molto simile a quello dell'acqua e il tirante idrico sia superiore al suo diametro. Il trasporto avviene all'interno del flusso, senza emergere sul pelo libero, ne toccare il fondo.
- **fluitazione:** le condizioni che permettono la fluitazione del legname sono la sua densità inferiore a quella dell'acqua e il tirante idrico maggiore rispetto al suo diametro. In questo caso il tronco viene trasportato per galleggiamento, con parziale emersione sul pelo libero.

Il peso specifico del tronco è determinato dalle caratteristiche intrinseche della specie, ma viene influenzato anche dal suo grado di deterioramento. Il

processo di imbibizione infatti ne determina un aumento del peso specifico che lo può rendere non più fluitabile. I processi di degradazione non interessano solamente la densità del legname ma anche la sua forma e dimensione. Durante il trasferimento verso valle i tronchi sono soggetti a rottura e perdita delle ramificazioni per rotolamento, abrasione da parte dei sedimenti, degradazione biologica, rottura per impatto contro grossi massi o contro le pareti rocciose, imbibizione e marcescenza. (Trentini e Fossi, 2015). Un altro parametro che influenza notevolmente la dinamica del trasporto è la lunghezza del tronco, essa infatti è strettamente correlata alla distanza percorsa in fase di trasporto. In particolare la lunghezza del legname va considerata in relazione alla larghezza del canale e alla sinuosità del tratto in esame. La capacità di deposito (DR) viene quindi sintetizzata da Braudrick e Grant (2001) mediante la seguente relazione:

$$(1) \quad DR \propto \left( \alpha_1 \frac{L_{\log}}{W_{av}} + \alpha_2 \frac{L_{\log}}{R_c} + \alpha_3 \frac{d_b}{d_{av}} \right)$$

dove  $L_{\log}$  è la lunghezza del tronco,  $W_{av}$  è la larghezza del canale,  $R_c$  è il raggio di curvatura medio del canale,  $d_b$  è la profondità di galleggiamento e  $d_{av}$  è il tirante medio, mentre  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , e  $\alpha_3$  sono dei coefficienti che variano a seconda del caso di studio. Le dinamiche del trasporto risultano quindi direttamente influenzate dalle dimensioni relative del legname rispetto a quelle dell'alveo. In relazione al rapporto fra lunghezza media del legname e larghezza del collettore si possono suddividere pertanto i corsi d'acqua in tre categorie (Gurnell et al. 2002), caratterizzate dal diverso peso relativo dei vari meccanismi di ritenzione:

- **small rivers:** la larghezza del collettore è minore della lunghezza media dei pezzi di legname. In questi tratti la lunghezza del legname in rapporto all'ampiezza dell'alveo è fondamentale nel determinare la capacità di ritenzione, che è comunque mediamente molto alta. I LW sono infatti poco mobili e formano strutture caotiche

indipendentemente dalle caratteristiche idrauliche del tratto e dalla forma dei tronchi.

- **medium rivers:** la larghezza del collettore è di poco superiore alla lunghezza media dei tronchi. In questa tipologia di corsi d'acqua ogni caratteristica del legname e del canale può influenzarne la ritenzione. Il regime delle portate e del trasporto solido, il diametro e il peso specifico dei pezzi sono fattori generalmente insufficienti a mobilitare il legname negli small rivers ed insufficienti a bloccarlo nei large rivers, nei medium rivers possono invece giocare un ruolo importante. Oltre a ciò, anche forma e lunghezza del legname sono da considerarsi fattori chiave nella capacità di ritenzione in questo tratto.
- **large rivers:** la larghezza del collettore è nettamente superiori alla lunghezza del materiale fluitato. La lunghezza del legname diventa di importanza secondaria, molto più influenti risultano invece la sua complessità geometrica (forme contorte, presenza di ramificazioni) e la morfologia dell'alveo, dove barre e canali sinuosi sono i principali ostacoli alla fluitazione verso valle. Anche la distribuzione della corrente svolge un ruolo importante in questi tratti.

Infine, per quanto riguarda la lunghezza dei LW, va precisato che non sempre essa rappresenta un fattore negativo per la capacità di trasporto. A parità di diametro i tronchi più lunghi possiedono massa maggiore e quindi una maggior inerzia, questo permette loro di superare più agevolmente le zone di secca. L'inerzia può essere considerata un fattore dominante del trasporto quando vi sono alte percentuali di aree di canale con profondità dell'acqua superiore alla profondità di galleggiamento del legname. Questo perché l'inerzia viene dissipata ogni volta che il tronco incontra il letto del fiume, pertanto profondità costanti permettono di mantenere una velocità costante e un inerzia tale da avvantaggiare i pezzi di massa maggiore nei tratti a tirante ridotto (Braudrick e Grant, 2001).

Un'ultima classificazione che può essere fatta sulle modalità di trasporto del legname è quella che considera il suo grado di congestione, se ne distinguono tre categorie (Braudrick et al, 1997):

- **non congestionato**: i tronchi si muovono senza interagire fra di loro e in presenza di ostacoli e gradienti di velocità rispondono con movimenti e rotazioni indipendenti.

- **congestionato**: il legname occupa più del 33% dell'area unitaria del canale e si muove come un'unica massa, le interazioni sono frequenti. Questa forma di trasporto è caratterizzata da un moto tendenzialmente impulsivo.

- **semi-congestionato**: si tratta di un comportamento intermedio fra i precedenti, sono presenti sia tronchi isolati che tronchi raggruppati in piccole masse.

Questa distinzione è importante perché le tre tipologie di movimento condizionano in modo differente l'idrodinamica del legname. I moti congestionati in particolare sono più propensi a formare ostruzioni della sezione di deflusso (soprattutto nei torrenti di ordine inferiore) e tendono a creare jams che determinano profonde modificazioni morfologiche dell'alveo. Il moto congestionato risulta quindi quello più problematico e pericoloso.

## 2.4) Deposizione

Il legname fluitato, durante il trasporto, tende a disporsi parallelamente alla direzione della corrente con le radici orientate verso valle. Queste costituiscono generalmente il punto di maggior ingombro e sono quindi le prime a venir in contatto con gli ostacoli o con il letto del fiume. Quando ciò avviene il tronco comincia a ruotare attorno al punto d'ancoraggio fino a riportarsi in posizione parallela alla corrente con le radici verso monte. Nel caso in cui altri ostacoli blocchino anche l'altra estremità del tronco esso si può stabilizzare, anche in posizione obliqua o trasversale alla corrente.

I test di fluitazione condotti da Bertoldi et al (2013) su di un tratto del Cordevole hanno permesso di evidenziare cinque tipologie di arresto o intrappolamento del legname:

- **Vortici ad asse orizzontale:** Si verificano a valle del salto delle briglie, dove il tronco rimane in movimento ma bloccato tra briglia e getto d'acqua.
- **Vortici ad asse verticale:** Si verificano spesso nelle pozze all'uscita delle curve, anche in questo caso il tronco resta in movimento ma sempre all'interno della stessa area.
- **Pool:** In questo caso il tronco entra in una pozza e si arena fino a che le condizioni della corrente (forza e tirante) non ne permettono nuovamente il moto verso valle.
- **Bassa sommergenza centrale:** Il tronco resta bloccato nella zona centrale del flusso a causa delle macroscabrezze di fondo, il moto può riprendere solamente quando la forza della corrente o il livello idrico sono sufficienti.
- **Bassa sommergenza laterale:** Il tronco rimane bloccato nella zona laterale di sponda o di barra a causa delle condizioni di bassa sommergenza (macroscabrezza) fino a quando la corrente non ha la forza di metterlo in moto o non vi è un livello idrico adeguato.



Figura 2 - Esempi di meccanismi d'intrappolamento del legname: a) vortice ad asse orizzontale, b) vortice ad asse verticale, c) pool, d) bassa sommergenza centrale, e) bassa sommergenza laterale. Fonte: Bertoldi et al (2013).

L'esperimento ha mostrato che la tipologia di arresto è fortemente condizionata dalla morfologia e dalla portata liquida, risultano invece poco influenzata dalla lunghezza del legname. Nella prova condotta con la portata più bassa sono stati chiaramente più importanti i fenomeni di intrappolamento per bassa sommergenza, mentre nella prova svolta con tirante più elevato si sono formate pozze di maggiori dimensioni e numerosi campioni sono rimasti intrappolati nei vortici sulle curve. In questa seconda prova è stata però notata anche una maggior dispersione trasversale dei campioni fluitati causata dalla maggior velocità della corrente, ciò ha determinato un alto numero di intrappolamenti per bassa sommergenza relativa nelle zone di sponda dei tratti in rapida. Da tale indagine risulta quindi che l'interazione tra morfologia e portata, determinando le condizioni di sommergenza e di direzione delle linee di corrente superficiale, costituisce il principale condizionamento dei meccanismi di arresto e intrappolamento del detrito legnoso (Bertoldi et al, 2013).

Analogamente a quanto detto per il grado di congestione del legname in movimento, si può distinguere il legname depositato in tre categorie (D'Agostino, 2015):

- **DISPERSO:** Il legname è depositato in maniera distribuita, non vi sono cumuli ed ogni tronco o ramo forma un'entità a se stante.
- **CONCENTRATO:** Legname depositato formante un unico ammasso di dimensioni superiori ad 1m<sup>3</sup>.
- **A GRUPPI:** Legname depositato a piccoli gruppi di dimensioni inferiori ad 1m<sup>3</sup>.

Le forme di deposito rispecchiano generalmente le forme di movimento che le hanno generate, bisogna quindi fare particolare attenzione alle problematiche che possono derivare dal legname depositatosi in forma concentrata.

Gli accumuli di legname possono dare origine a diverse strutture, le quali sono particolarmente caotiche nei torrenti di ordine inferiore e più ordinate e classificabili in specifiche categorie nei corsi d'acqua di dimensioni maggiori. La classificazione proposta da Abbe e Montgomery (2003) suddivide gli accumuli in tre categorie in relazione alla dinamica di formazione:

### 1) IN SITU DEBRIS AND JAMS

Accumulo costituito da materiale rimasto nella posizione di immissione in alveo. Questo tipo di materiale ha una resistenza ed una forza peso tali da contrastare le spinte idrodinamiche della corrente durante eventi di piena ordinaria. Questi accumuli interferiscono attivamente con la morfologia e l'ecologia del canale. Possono essere distinte due sottocategorie:

**Log step:** Si tratta di depositi situati in alveo e disposti trasversalmente al flusso. Sono tipicamente costituiti da singoli o pochi elementi con le estremità incastrate alle sponde o a grandi massi e appoggiati all'alveo o incassati in esso, formando una sorta di gradino.

**Bank input:** Simile al precedente, ma in questo caso le piante si trovano esattamente nel punto d'immissione, in alcuni casi con l'apparato radicale parzialmente ancorato alla sponda. Non interessa mai l'intera larghezza dell'alveo e la sua interazione con la morfologia è solamente parziale.

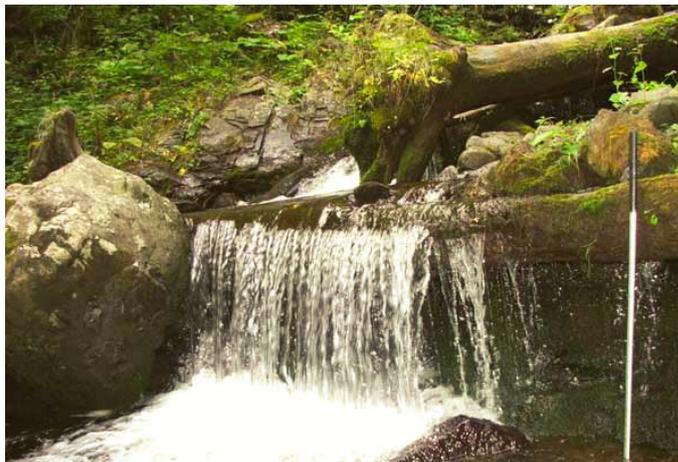


Figura 3 - Log step lungo il Rio Davedino. Fonte: Rigon (2009).

## 2) TRANSPORT JAMS

Accumuli formati da materiale trasportato dalla corrente e depositato durante la fase calante della piena attorno ad ostacoli, isole e barre o lungo la sponda. Può essere distinto nelle seguenti sottocategorie:

**Debris flow/flood jams:** Residui legnosi depositati da colate detritiche in grossi accumuli caotici che possono essere mobilitati durante gli eventi di piena causando congestioni.

**Bench jams:** Accumuli posti ai margini del canale con elementi disposti parallelamente o obliquamente rispetto al flusso della corrente. Causano deviazione della corrente e tendono ad inglobare altro materiale legnoso transitante.

**Bar apex jams:** In questo caso i depositi si trovano sulle barre mediane e costituiscono strutture molto stabili che alterano notevolmente la morfologia dell'alveo, riducendo la sezione di deflusso ed inducendo erosione e sedimentazione localizzate. Queste strutture possono essere la causa di formazione di barre mediane e isole, a volte a partire da un unico elemento chiave di grosse dimensioni che si deposita al centro del canale e cattura altri elementi trasportati, quindi induce alla sedimentazione e stabilizzazione della nuova morfologia.

**Meander jams:** Questi ammassi si formano sulla parte concava della sponda interna dei meandri per sbandamento del flusso. Come nel caso precedente, si tratta di depositi molto stabili che riducono la sezione di deflusso.

**Log rafts jams:** Oggi meno frequente perché tipico di zone non alterate dall'uomo. Deriva dal trasporto congestionato di grosse quantità di legname che creano strutture molto stabili di notevoli dimensioni in grado di ostruire anche grandi canali e formare accumuli d'acqua a monte.

**Bar top jams:** Sono accumuli casuali lungo la sponda, su barre spondali, piane alluvionali o golene, deposti durante la fase calante della piena. Queste strutture sono instabili e facilmente rimovibili.

**Bank edge jams:** Sono elementi depositati lungo la sponda disposti parallelamente al flusso e facilmente mobilitabili dalle piene successive.

**Bank revetment jams:** Simili ai meander jams ma meno stabili e con minor capacità di intercettare altro materiale.

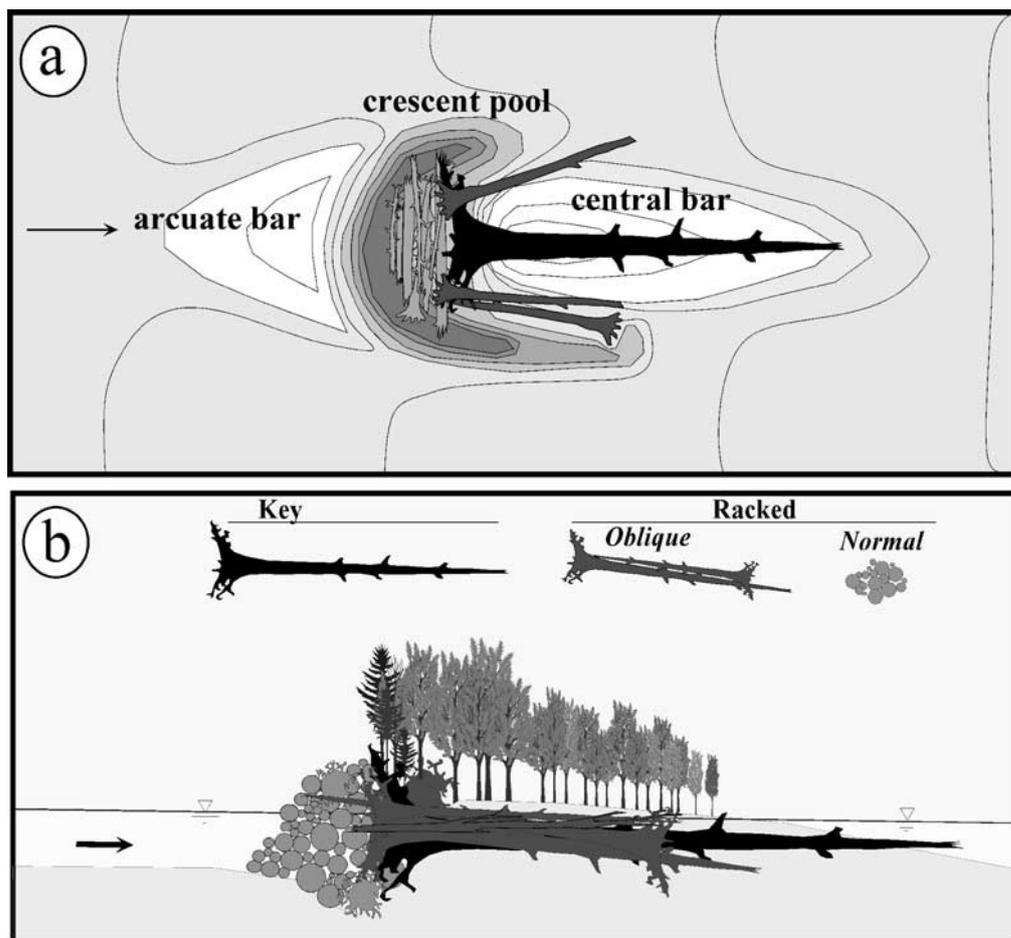


Figura 4 - Rappresentazione di un *bar-apex jam*. Fonte: Abbe et Montgomery (2003).

### 3) COMBINATED JAMS

Si tratta di accumuli composti da elementi fluitati ammassati su elementi preesistenti in alveo. Se ne distinguono due sottocategorie a seconda della dimensione degli accumuli:

**Valley jams:** Formati da piante schiantate in alveo che intercettano altro materiale fluitato. Sono accumuli di grandi dimensioni che spesso formano importanti ostruzioni. Sono caratterizzati dalla presenza di elementi chiave di lunghezza superiore alla larghezza del canale.

**Flow-deflection jams:** Accumulo costituito da elementi chiave che si trovano nel luogo di prima immissione e che ne hanno intercettati molti altri di trasportati. La caratteristica che li distingue dai valley jams è il fatto che siano ancorati alla sponda e possono ruotare attorno a questo punto fisso, tendendo ad allinearsi al flusso della corrente, la quale risulta comunque deviata dalla loro presenza in alveo.

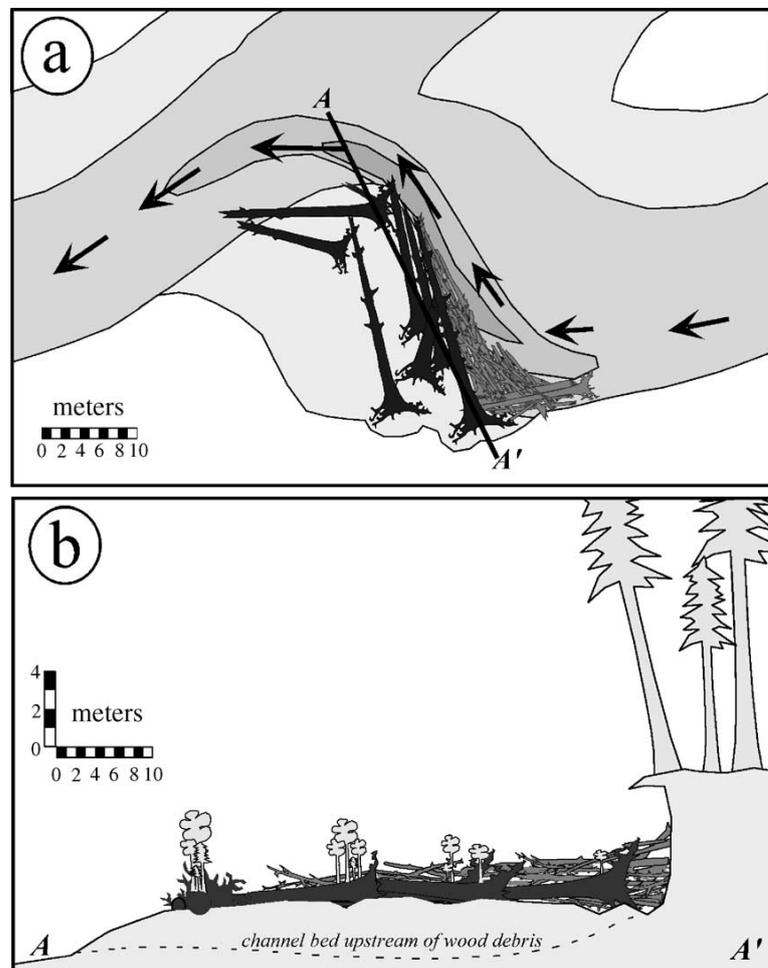


Figura 5 - Rappresentazione di un flow-deflection jam. Fonte: Abbe et Montgomery (2003).

## 2.5) Effetti

Il legname presente in alveo è in grado di influenzare notevolmente il sistema fluviale agendo su diversi aspetti, con conseguenze sia positive che negative. L'ostruzione delle sezioni critiche, quali luci dei ponti e tombotti, possono causare l'esondazione del corso d'acqua. Inoltre i tronchi possono creare problemi alla navigazione (anche se ormai in Italia i canali navigabili sono veramente pochi), rafforzare le colate detritiche e creare sbarramenti temporanei in alveo con rischio dam-break (evento potenzialmente disastroso che genera ondate di piena e rilascio di grossi quantitativi di sedimenti). La presenza del legname è però molto importante per il sistema fluviale e ne apporta numerosi benefici, soprattutto a livello ecologico e morfologico. Esaminando con maggior dettaglio gli effetti, essi possono essere raggruppati nelle seguenti tipologie:

### **EFFETTI IDRAULICI**

La presenza di LW e le diverse strutture che si possono formare hanno grande influenza sui processi idraulici. Questi effetti sono molto variabili a seconda delle caratteristiche del corso d'acqua e del legname. La presenza di un tronco immerso in una corrente libera crea una turbolenza, della quale se ne può definire il tipo e la zona d'influenza mediante il numero di Reynolds:

$$(2) \quad Re = U \cdot D / \nu$$

dove  $U$  è la velocità del flusso libero,  $D$  è il diametro dell'ostacolo e  $\nu$  è la viscosità cinematica del fluido. Con  $Re \approx 10$  si generano dei vortici circolari simmetrici, con  $Re \approx 10^2$  si creano dei vortici alternati e con  $Re \approx 10^4$  si ha turbolenza più regolare in regime subcritico. Il regime diviene critico con numero di Reynolds prossimo a  $10^5$  e risulta supercritico per valori superiori (Mutz, 2003). La morfologia del tratto e il livello idrometrico influiscono molto sull'efficacia che ha il legname nel modificare i flussi d'acqua, nei torrenti di ordine inferiore ad esempio la presenza di LW risulta più impattante. Le caratteristiche dei LW che determinano tipologia ed intensità

degli effetti idraulici sono la dimensione, l'orientamento, l'aggregazione e la quantità di detrito legnoso. I LW influenzano in particolare la scabrezza idraulica, la velocità del deflusso, la portata, l'intensità del trasporto di fondo e la sua granulometria. Le ostruzioni create dai tronchi possono essere distinte in quattro categorie a seconda della posizione, ognuna con differenti effetti idraulici. I LW possono essere disposti in maniera verticale, orizzontale, obliqua o a gradino. Le strutture verticali creano vortici e mulinelli turbolenti con effetti erosivi sul letto del canale (Melville, 1992), le ostruzioni oblique generano effetti simili ma complicati da accelerazioni della corrente sopra, sotto e attorno all'elemento. Gli sbarramenti orizzontali vanno distinti in quelli che non sono appoggiati in alveo, in questo caso la corrente viene deviata verso il fondo con effetti erosivi, e le ostruzioni a gradino (*log steps*), dalle quali si generano getti liberi e pozze sottostanti. In questo secondo caso si avrà la formazione di vortici circolari davanti e dietro all'ostacolo, una diminuzione della velocità idrica e un conseguente aumento del tirante. I *log step* sono strutture tipiche di molti torrenti di montagna e sono molto efficaci nel dissipare l'energia della corrente, per questo motivo viene adottato in molte sistemazioni idraulico-forestali lo stesso principio, le briglie di consolidamento ad esempio riducono la pendenza del tratto e ne favoriscono la stabilizzazione del fondo e delle sponde, oltre ad intrappolare il sedimento a monte analogamente a quanto avviene con le formazioni naturali (D'Agostino, 2001). Negli ultimi decenni molte opere in ambiente montano vengono fatte proprio in legname, un esempio sono le briglie a palificata e le briglie a cassone, permettendo una miglior integrazione della costruzione con l'ambiente naturale. I *log step* influiscono positivamente sulla risposta ad eventi di piena non eccezionali ma con eventi di intensità maggiore, quando il tirante è di molto superiore al salto, questo effetto è meno significativo (Faustini e Jones, 2003). Fra le problematiche causate dai LW si possono menzionare la perdita di efficienza delle opere idroelettriche e di derivazione dei canali (Ishikawa, 1990), l'intasamento delle luci dei ponti con conseguente aumento della spinta idrostatica sulle pile fino a causare possibili cedimenti strutturali, la riduzione della funzionalità idraulica delle opere di trattenuta nei collettori montani ed il rallentamento dei meccanismi

di auto pulizia delle opere durante gli eventi ordinari (Mazzalai et al, 2006). Un duplice effetto si ha infine considerando che i LW aumentano la complessità dei deflussi e la ritenzione idrica, quindi diminuiscono la portata delle piene di piccolo e medio ordine, ma possono anche incrementare la resistenza al flusso e parzializzare la sezione del canale, causando un aumento locale del tirante e del picco di portata massima (Abbe e Montgomery, 1996).

### **EFFETTI EROSIVI-SEDIMENTOLOGICI**

Il trasporto di sedimenti e di detrito legnoso, pur avendo dinamiche molto differenti, sono strettamente correlati. Gli effetti dipendono sostanzialmente dalle caratteristiche del corso d'acqua, in particolare dimensioni, pendenza, condizioni al fondo e morfologia. La posizione e l'orientamento dei LW sono altri fattori determinanti nel definire le dinamiche erosive e sedimentologiche. Come accennato precedentemente per gli effetti idraulici si distinguono quattro posizioni in cui i LW si possono disporre. Tali ostruzioni generano anche differenti effetti erosivi, le strutture verticali ad esempio creano delle zone di erosione localizzate con forme caratteristiche denominate *scour pools*, *eddy pools* e *diammer pools* (Robison e Beschta, 1990). Il flusso di corrente che passa sotto agli sbarramenti orizzontali non appoggiati in alveo sottrae sedimenti alla base d'appoggio del legname e le fosse che si generano sono dette *underscour*. Altri fenomeni erosivi possono essere quelli spondali causati dalla deviazione del flusso indotto da cumuli di legname. Molto spesso il legname è anche implicato nei processi sedimentologici, come nel caso dei *log step* e altre strutture simili. Una maggior interazione si può notare nei torrenti montani, caratterizzati dalle dimensioni ridotte dell'alveo ed elevata pendenza, abbondanza di LW di grosse dimensioni e granulometria dei sedimenti nettamente superiore. In particolare i grossi massi possono creare delle sezioni critiche in cui il legname tende ad incastrarsi e a bloccare altro sedimento sempre più fino. La presenza di legname può quindi contribuire alla trattenuta di sedimento e all'aumento della variabilità granulometrica.

## **EFFETTI MORFOLOGICI**

Inducendo alla deposizione o all'erosione, ostruendo e deviando la corrente e modificandone il profilo longitudinale, il legname è in grado di modificare profondamente la morfologia di un corso d'acqua. I singoli elementi possono avere un'influenza locale ma i grossi accumuli modificano sostanzialmente la conformazione del canale, a volte creando morfologie imposte (Montgomery e Buffington, 1997). Gli ammassi di legname possono far divergere il flusso della corrente creando canali multipli di larghezza minore, ma può anche causare erosioni spondali che provocano l'aumento della sezione del collettore o la migrazione laterale dello stesso. Gli accumuli in alveo di grosse dimensioni e molto stabili come i *valley jams* possono creare delle vere e proprie dighe con salti idraulici anche di notevole altezza. I log step, come discusso in precedenza, possono creare delle strutture a gradino con sequenze simili agli step-pool, con i conseguenti vantaggi in termini di stabilizzazione del letto del torrente. In modo simile il legname può indurre la formazione di riffle-pool anche in tratti caratterizzati da un letto piano o un alveo in roccia (Montgomery et al., 1996). La presenza di LW può infine stabilizzare le sponde e permettere la formazione di barre e isole.

## **EFFETTI ECOLOGICI**

I Large Wood, ma anche la componente più minuta denominata Fine Wood, apportano una serie di benefici all'ecosistema fluviale. Innanzitutto, grazie alla loro decomposizione, forniscono sostanza organica e nutrienti alla rete trofica, in particolare a microorganismi ed alghe che stanno alla base della catena alimentare. In secondo luogo, *log step* e altre barriere formate dal legname sono in grado di intrappolare i residui e i detriti organici contribuendo nella regolazione e nella trasformazione delle sostanze nutrienti (Sedell et al., 1988). Queste strutture costituiscono inoltre importanti habitat per numerose specie animali e vegetali. I LW infatti possono fornire rifugio dalle correnti veloci, da possibili predatori e da effetti climatici dannosi. Le unità morfologiche create dal legname, ad esempio le pozze profonde, sono indispensabili per molte specie ittiche in alcune fasi del

loro sviluppo. Infine il materiale legnoso aumenta l'eterogeneità vegetazionale delle foreste riparie grazie a processi morfologici (deposizione del sedimento) e biologici (radicamento di porzioni vegetali trasportate).

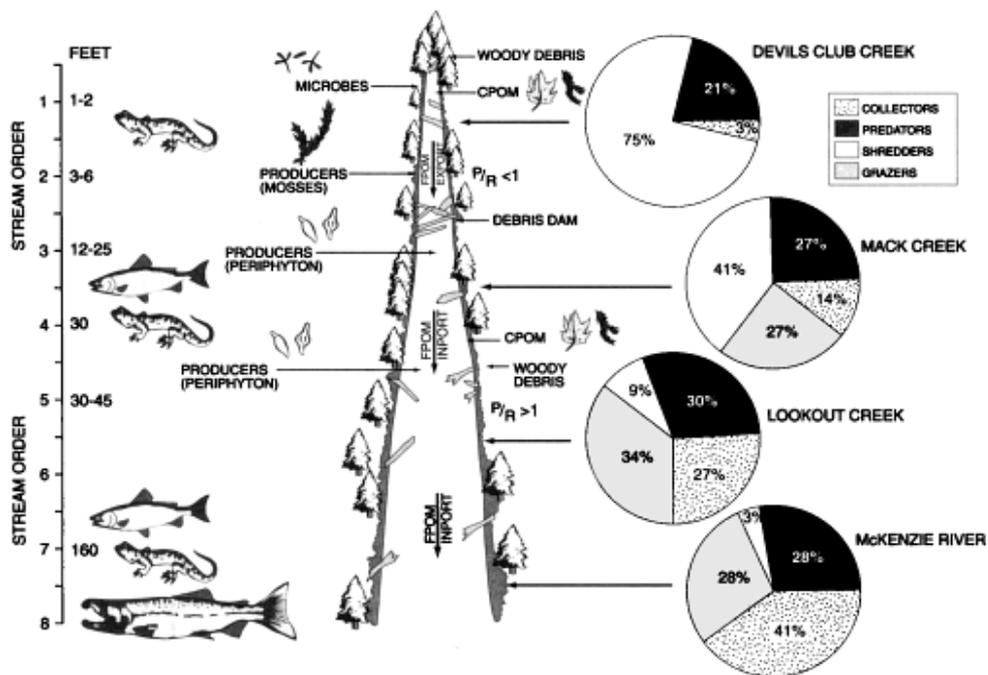


Figura 6 - Composizione, struttura e funzionalità degli ecosistemi acquatici, interrelazione con la zona ripariale ed importanza del legname. Fonte: Sedell et al. 1988.

## 3) GESTIONE DEL LEGNAME E DELLA VEGETAZIONE

### 3.1) La vegetazione riparia

La vegetazione riparia costituisce un ambiente di transizione fra quello acquatico e quello terrestre. La flora che si sviluppa in questa fascia è fortemente condizionata dalle dinamiche fluviali, si tratta di specie in grado di tollerare inondazioni, periodi di siccità e frequenti fenomeni di disturbo come erosione e deposizione di sedimenti. Questa fascia si presenta in genere con delle differenze in struttura e composizione a seconda della distanza dal corso d'acqua. Le formazioni ripariali possono essere suddivise in tre zone, ovvero quella in alveo, quella in golenia e la fascia di transizione, le quali presentano caratteristiche peculiari e vanno gestite in maniera differenziata. Per la regione euro-siberiana si può identificare una successione di tre ordini di vegetazione, distribuiti principalmente in relazione al gradiente negativo di umidità edafica. Si tratta di:

- *Salicetalia purpureae*
- *Populetalia albae*
- *Fagetalia sylvaticae*

Le principali specie arbustive ed arboree che popolano questi ambienti sono *Salix eleagnos*, *Salix alba*, *Populus nigra*, *Populus alba*, *Alnus incana*, *Alnus glutinosa* e molte altre ancora. Alcune piante che un tempo caratterizzavano questi luoghi risultano oggi quasi completamente scomparse a causa delle alterazioni indotte dall'uomo. Un esempio è la *Myricaria germanica*, la cui presenza è indice di naturalità del corso d'acqua. Le stazioni in cui essa è presente sono ormai rare e andrebbero preservate. La vegetazione riparia ha uno spiccato carattere pioniero, essa tende ad evolvere spontaneamente verso sistemi più maturi ma tale evoluzione è contrastata dall'azione di rimodellamento del corso d'acqua, infatti il periodico rimaneggiamento dei

sedimenti e la mobilità planimetrica dell'alveo portano alla continua demolizione per erosione dei soprassuoli più maturi, creando le condizioni per il nuovo insediamento delle specie pioniere. Questa dinamica è molto evidente nei corsi d'acqua alluvionali di fondovalle, semiconfinati e non confinati, dove si genera una successione trasversale delle associazioni che si presentano via via più mature allontanandosi dalla zona d'influenza del corso d'acqua. Nei torrenti montani, a differenza dei corsi d'acqua alluvionali, la variabilità temporale è bassa, in quanto solo eventi di una certa intensità sono in grado di mobilitare il materiale in alveo e delle fasce limitrofe. Inoltre questi torrenti sono generalmente caratterizzati da un alto grado di confinamento che limita significativamente la loro fascia di pertinenza, ne risulta favorita l'evoluzione delle formazioni ripariali verso altre forme più mature di carattere forestale, tipicamente con ingresso di abete rosso.

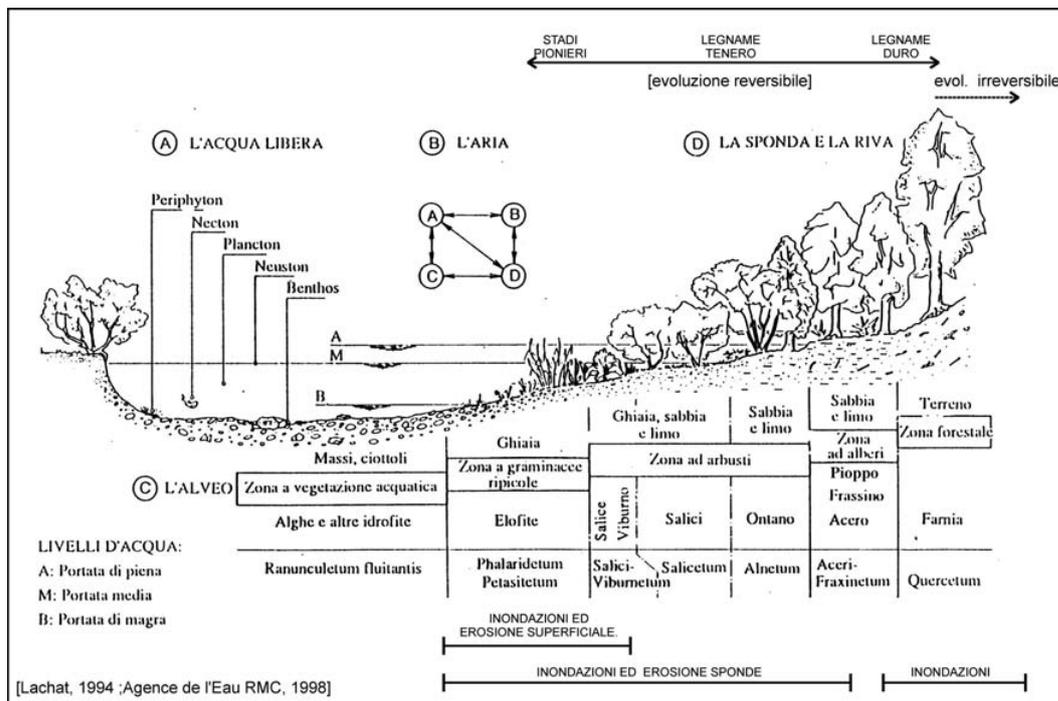


Figura 7 - Esempio di successioni vegetazionali in relazione all'ambiente fluviale. Fonte: Alzate (2000).

La vegetazione riparia può influenzare le dinamiche del corso d'acqua in diversi modi, in particolare mediante processi erosivi e sedimentativi e variando la velocità e la direzione del deflusso. Le caratteristiche che maggiormente influiscono su tali processi sono tipologia, densità, età e dimensione della vegetazione. A sua volta anche la vegetazione riparia è influenzata dalle dinamiche fluviali, la sua estensione, la composizione e la configurazione degli habitat vegetali dipendono dalle variazioni dei flussi liquidi e solidi e dall'intensità delle piene. Gli effetti della presenza della vegetazione nei corsi d'acqua sono molteplici, soprattutto ecologici ed idraulici. Riguardo al primo ambito va ricordata l'importanza di queste fasce sia come sede di significativi habitat che ospitano specie animali e vegetali di grande valore, sia come parte integrante della rete ecologica territoriale. Inoltre la vegetazione fluviale svolge un ruolo di protezione dei corpi idrici e depurazione delle acque. Riguardo gli effetti idraulici vanno considerati quelli agenti sul deflusso e quelli che influenzano la stabilità delle sponde e del fondo. La presenza della vegetazione in alveo genera un aumento della scabrezza che riduce la velocità della corrente, con conseguente aumento dei tempi di corrivazione, aumento dei livelli idrici e deposito di materiale. Un tirante maggiore, dato anche dalla riduzione della sezione utile, porta ad un incremento del rischio di esondazione. La vegetazione però può agire anche stabilizzando le sponde, grazie all'azione di rinforzo meccanico, di trattenuta di sedimento e riduzione dell'erosione. La deposizione di sedimenti fini e di materiale legnoso possono inoltre creare le condizioni per la formazione di isole pioniere. Ovviamente la tipologia e l'abbondanza di vegetazione in alveo hanno anche un'influenza diretta sulla quantità e le caratteristiche dei LW che producono, con le conseguenze positive e negative già descritte nel capitolo precedente. (Trentini e Fossi, 2015).

### 3.2) La gestione della vegetazione

Nel corso del tempo l'uomo ha modificato profondamente la morfologia dei fiumi e la struttura della vegetazione fluviale. Le attività antropiche hanno occupato sempre di più gli spazi naturalmente destinati allo sviluppo di queste formazioni, con la conseguente semplificazione e artificializzazione dei sistemi fluviali. In particolare l'espansione dei terreni agrari e delle zone urbane nei fondovalle ha interessato ampie porzioni della piana inondabile con la conseguente necessità di proteggere tali attività dalle inondazioni e dall'erosione causata dalla divagazione degli alvei. Le formazioni boscate presenti in queste zone sono talmente alterate e ridotte che è lecito domandarsi in quale misura conservino effettivamente le caratteristiche di habitat ripario. Anche le modalità di gestione sono cambiate con il passare del tempo, una volta la vegetazione riparia e il legname morto in alveo costituivano una fonte di legna da ardere facilmente accessibile che veniva prontamente utilizzata, invece oggi i tagli vengono eseguiti quasi esclusivamente per prevenire il rischio idrologico. (Trentini e Fossi, 2015).

Se la vegetazione riparia ha un'influenza diretta nel determinare il volume del legname in alveo, la gestione del territorio più in generale può comunque condizionare indirettamente tale fenomeno. Le attività selvicolturali, se eseguite razionalmente, migliorano l'efficacia antierosiva e regimante del bosco, ma se i tagli sono eseguiti senza criterio e su ampie superfici possono portare ad una diminuzione della stabilità del terreno. Le tecniche selvicolturali possono inoltre modificare alcuni parametri dei popolamenti forestali diminuendone gli schianti, ad esempio mediante dei diradamenti selettivi in boschi fitti è possibile ridurre la snellezza delle piante aumentandone la stabilità. È opportuno infine considerare che la quantità di legname che perviene all'alveo a seguito di operazioni selvicolturali è notevolmente incrementata a causa dei residui del taglio.

Una corretta gestione della vegetazione deve tenere in considerazione i diversi effetti precedentemente discussi, cercando di limitare i problemi legati al rischio idrogeologico, ma conservando ed incrementando dove possibile i benefici ecologici. Un obiettivo è ad esempio il raggiungimento di

un buon stato ecologico, come espresso nella Direttiva Quadro sulle Acque (2000/60/CE), requisito necessario per rendere i corsi d'acqua capaci di svolgere un ampio ventaglio di servizi ecosistemici. La vegetazione lungo i corsi d'acqua però può anche costituire un aggravio delle condizioni di rischio idraulico, ed è questa la ragione fondamentale che porta a dover intervenire con i tagli. Allo scopo di perseguire tali fini, gli interventi selvicolturali a cui sottoporre la vegetazione riparia vanno eseguiti tenendo in considerazione alcuni accorgimenti:

- Costituire e mantenere formazioni a struttura complessa e composizione specifica diversificata, salvaguardando le specie di maggior pregio e contrastando le specie alloctone invasive;
- A monte dei centri abitati e delle infrastrutture sono prioritari gli interventi volti all'eliminazione del pericolo;
- Prevedere modalità di gestione differenziate per ogni unità morfologica del corso d'acqua, con tagli selettivi basati soprattutto sugli elementi da eliminare, considerando le sollecitazioni idromorfologiche, la struttura e la vigoria del popolamento e le condizioni di rischio locale e indotto a valle;
- Pianificazione degli interventi su turni regolari. In caso di popolamenti a bassa vigoria, di elevato pregio naturalistico o caratterizzati da difficoltà di accesso è preferibile un monitoraggio periodico per individuare i singoli elementi di criticità che richiedono un intervento gestionale;
- Operare gli interventi su tratti discontinui al fine di minimizzare il disturbo all'ecosistema;
- Esecuzione degli interventi nel periodo più appropriato, generalmente quello di riposo vegetativo.

(Trentini e Fossi, 2015).

### 3.3) LA GESTIONE DEL LEGNAME

Come per la vegetazione, anche per quanto riguarda la gestione del legname in alveo va fatta una valutazione sui suoi effetti. Pro e contro della sua presenza sono stati descritti nel capitolo precedente, riassumendo brevemente si può dire che i motivi che spingono a rimuovere i LW dall'alveo riguardano la sicurezza idraulica, mentre i motivi per cui il legname andrebbe mantenuto riguardano i benefici ecologici e morfologici apportati. Sulla base di ciò si può affermare che i vantaggi apportati dal legname sono diffusi lungo tutto il reticolo idrografico e durante buona parte dell'anno, invece gli svantaggi sono localizzati in punti precisi del reticolo e per un tempo molto breve. Quest'affermazione suggerisce una gestione di tipo puntuale anziché sistematica. Dati i suoi numerosi benefici è opportuno mantenere lungo i corsi d'acqua la maggior quantità possibile di legname morto, per limitarne la pericolosità idraulica associata alla sua fluitazione attraverso sezioni critiche vanno presi però alcuni accorgimenti (Trentini e Fossi, 2015):

- Favorire ed incrementare la capacità di ritenzione del legname nei tratti a monte delle sezioni critiche, quando questo non determina un incremento locale del rischio;
- Contrastare l'ingresso in alveo di legname nei tratti più prossimi (a monte) alle sezioni critiche;

Per il legname in alveo possono essere considerate diverse alternative di trattamento, da valutare in base alle caratteristiche dei LW e del tratto in questione (Trentini e Fossi, 2015):

- **Rilasciare il materiale intero**  
Gli elementi che presentano una conformazione in relazione alle caratteristiche dell'alveo che ne facilita la ritenzione e i quali si trovano in aree distanti da sezioni critiche e in cui non determinano un fattore di rischio locale possono essere mantenuti in alveo interi.
- **Depezzare il materiale**  
Gli elementi che possono facilmente essere trasportati a valle è conveniente deprezzarli in modo da evitare fenomeni di congestione e

ridurre la capacità di accumulo sulle pile dei ponti ed occlusione delle sezioni ristrette.

- **Asportare il materiale**

In presenza di grandi quantità di LW, ad esempio in seguito ad eventi di trasporto di massa, di slavine nei canali, a seguito dell'erosione di estese superfici boscate, e in tutti gli altri casi in cui si valuta un aggravio della situazione è opportuno intervenire asportando il materiale legnoso.

In alcuni casi, oltre all'adozione delle pratiche gestionali appena discusse, può essere necessaria la presenza di opere di trattenuta del legname a monte delle infrastrutture più vulnerabili. Esistono diverse tipologie di opere appositamente pensate per la trattenuta dei LW e la scelta va fatta in base alla disponibilità di legname e alla portata unitaria, come mostrato in figura n°8.

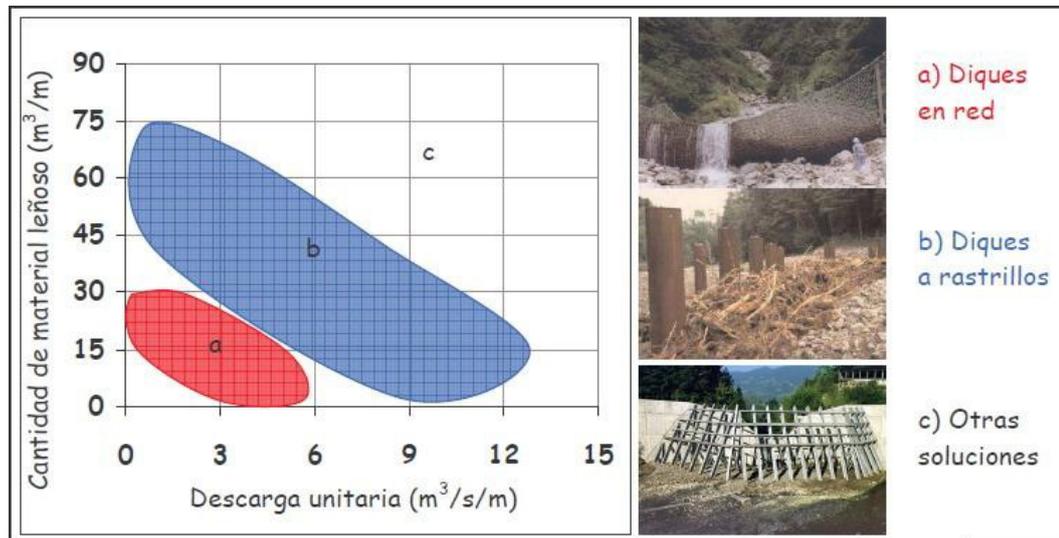


Figura 8 - Grafico delle opere in funzione di portata unitaria e volume di LW. Fonte: Rimböck, (2004) modificato.

a) Con portata unitaria e quantità di legname ridotte la soluzione migliore sono le briglie a rete, le quali presentano un minor impatto sul paesaggio, oppure l'adozione di grigliati per evitare l'ingresso del legname nei tombotti.

- b) Con portate unitarie e/o quantità di legname intermedie una soluzione costruttiva possono essere le briglie a rastrello, facendo attenzione ai fenomeni di erosione localizzata che possono generare ed eventualmente accompagnandole con muri laterali e soglie. La disposizione dei pali a formare una V con il vertice a monte oppure in senso diagonale può agevolare il recupero del legname indirizzandolo verso riva.
- c) Quando si hanno portate unitarie elevate e disponibilità di ingenti quantità di legname è preferibile adottare altre soluzioni, quali le briglie miste. Si tratta di opere in grado di separare le componenti trasportate dalla corrente mediante un pre-filtro per il legname ed una fessura che agisce sul trasporto di fondo.

(D'Agostino, 2015); (Lenzi, 2014).

Le opere che sono state costruite in passato senza considerare la componente legnosa possono risultare inefficienti nel momento in cui si verifica un accumulo di tronchi, essi infatti possono essere trattenuti da molte briglie selettive ma vi è un'alta probabilità che ostruiscano il filtro compromettendone l'efficacia. Le opere più recenti che tengono conto anche del detrito legnoso sono costituite da un filtro inclinato (circa 45°) che permette di trattenere il legname mantenendolo sollevato dal fondo, mentre la parte inferiore della briglia resta libera e permette la selezione del trasporto di fondo. Altri tipi di opere appositamente pensate per i LW sono le reti galleggianti e le briglie a cavo, le quali non influiscono sul trasporto dei sedimenti. Infine riguardo le opere di trattenuta si possono menzionare i vantaggi delle briglie a fessura a presidio delle aree antropizzate, le quali generano un risalto idraulico a monte con effetto decongestionante sul legname. Inoltre esse hanno il vantaggio di trattenere i sedimenti trasportati in massa rimanendo però trasparenti ai flussi ordinari di sedimenti, questo permette al corso d'acqua di preservare le sue dinamiche naturali favorendo la conservazione della vegetazione riparia, anziché l'evoluzione verso formazioni di tipo forestale, ben più problematiche dal punto di vista della produzione di LW. (D'Agostino, 2015); (Trentini e Fossi, 2015).

Se in Italia la priorità d'intervento è quasi esclusivamente volta a limitare il rischio idrogeologico rimuovendo il legname pericoloso, nel Nord America viene data molta importanza anche al problema ecologico e a tal fine non sono rari gli interventi di reintroduzione del legname in alveo. Queste operazioni sono finalizzate alla riqualificazione morfologica ed ecologica dei corsi d'acqua, creando ad esempio barre laterali e mediane, log step e pozze. Nel caso in cui la presenza di legname non rappresenti un fattore di rischio e vi sia la necessità di migliorare le condizioni di naturalità del corso d'acqua può essere valutata la reintroduzione del legname, tenendo però presente alcuni accorgimenti: evitare l'ostruzione della sezione trasversale per più del 10%, analizzare i siti limitrofi per valutarne lo stato naturale e per il recupero del materiale, monitorare gli interventi nel tempo. Anche se in Europa lo sviluppo di progetti simili è molto limitato recentemente stanno diventando sempre più frequenti gli interventi di riqualificazione fluviale che utilizzano il materiale legnoso come parte integrante delle strutture, alcuni esempi ne prevedono l'utilizzo assieme ai massi in opere quali rampe, soglie e piccole briglie. (Lenzi, 2014).

### 3.4) LA QUANTIFICAZIONE DEL LEGNAME

Ai fini di una corretta gestione del LW è molto importante quantificarne il volume e ciò è attuabile con varie metodologie che presentano differenti gradi di precisione, costi ed impegno. Il volume del legname movimentabile può essere stimato mediante misure dirette o indirette, tramite delle formule empiriche, oppure con l'ausilio di modelli previsionali i quali verranno approfonditi nel capitolo 4. Fra le misure dirette si può distinguere il rilevamento a campione, eseguito su dei tratti rappresentativi o lungo sezioni trasversali, il quale risulta meno preciso ma speditivo, oppure il rilievo effettuato sull'intero collettore, più preciso ma lungo ed impegnativo. La quantità di legname può anche essere stimata mediante misure indirette (*remote sensing*), ad esempio con l'utilizzo di *laser scanner*, tramite immagini satellitari o per interpretazione fotogrammetrica. Queste tecniche possono

ridurre notevolmente i tempi necessari al rilievo e sono in grado di fornire dati ad alta precisione che si prestano ad ulteriori elaborazioni.

Se oltre alla quantificazione e distribuzione spaziale del legname si vogliono indagare le dinamiche temporali possono essere prese in considerazione altre tecniche. MacVicar et al. (2009) a tale scopo hanno messo a confronto 5 metodologie d'indagine testate in campo in fiumi del Nord America e dell'Europa. Le cinque tecniche indagate sono le seguenti: rilevamenti aerei ripetuti ad alta risoluzione, misura delle caratteristiche fisiche del legname come alternativa alla datazione al carbonio 14 ( $^{14}\text{C}$ ), contrassegni identificativi a radiofrequenza (RFID) attivi e passivi, trasmettitori radio, e registrazioni video. Le immagini aeree sono state ottenute utilizzando un drone equipaggiato con GPS, un processore in grado di registrare quota di volo, velocità e traiettoria, ed una fotocamera digitale puntata verso il suolo. Le immagini sono state inviate in tempo reale ad un operatore a terra e la risoluzione spaziale ottenuta, compresa fra 1 e 10 cm, è stata sufficiente ad identificare i *Large Wood* presenti. Il rilevamento dei tronchi è stato eseguito mediante un'analisi sistematica del mosaico d'immagini. Allo stesso modo sono stati misurati lunghezza e diametro, rilevata la presenza di rami e ceppaie con radici e calcolati l'orientamento rispetto alla linea di thalweg e la posizione relativamente agli altri LW. Quest'indagine può essere ripetuta periodicamente oppure dopo eventi di piena. I principali vantaggi di questa tecnica sono l'alta risoluzione delle immagini, l'adattabilità della piattaforma e i costi contenuti. Gli svantaggi comprendono le distorsioni generate dalle lenti delle fotocamere commerciali e le variazioni di luminosità generate dalle zone in ombra e dai riflessi. Nel secondo metodo sono state valutate alcune caratteristiche fisiche del legname, quali segni visibili di decomposizione, resistenza alla penetrazione e densità. Si tratta di tecniche veloci ed economiche che possono fornire indicazioni sul tempo di residenza del legname. I segni visibili di decomposizione sono stati valutati sulla base delle condizioni della porzione centrale e della superficie dei tronchi classificandoli in otto classi. La resistenza alla penetrazione è stata valutata in campo mediante un penetrometro dinamico a cono, infine la densità è stata calcolata in laboratorio come differenza fra il peso ed il volume del campione.

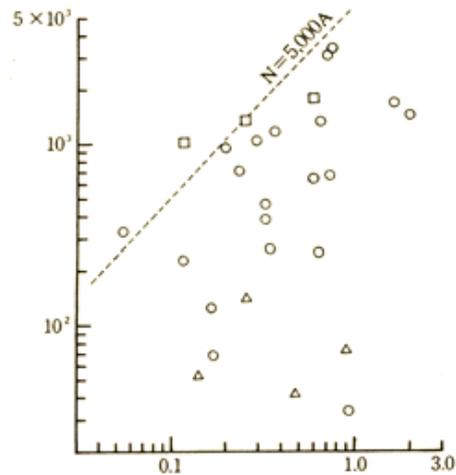
Le tecniche che prevedono l'utilizzo di *radio tags* sono tre, distinte in base al tipo di onde radio emesse. I *tags* a radiofrequenze (RFID) trasmettono un codice identificativo (unico per ogni *tag*) e possono essere attivi o passivi. Gli RFID passivi emettono un segnale in risposta ad un segnale in ingresso, l'energia utilizzata per trasmetterlo è presa dallo stesso segnale ricevuto e pertanto non necessitano di batterie. I *tags* vengono rilevati mediante un'unità di controllo portatile provvista di antenna. I vantaggi di questa tecnica sono la programmabilità dei *tags* con un codice identificativo univoco il quale permette una precisa analisi spaziale del legname mobilizzato e depositato, inoltre la durata dei *tags* nell'ambiente e l'assenza di batterie permettono il loro utilizzo per studi di lungo termine. Una significativa limitazione è data dal raggio molto ridotto di rilevamento del *tag* (circa 30 cm). I *tags* RFID attivi sono simili a quelli passivi, ma essi emettono indipendentemente un segnale ad una data frequenza, sono pertanto dotati di batterie. Il vantaggio è dato dal raggio di rilevamento molto più ampio (circa 300 m) che permette l'utilizzo di una stazione fissa in grado di monitorare il transito dei tronchi uscenti dal tratto d'indagine. La presenza delle batterie ne limita però la durata. Il terzo tipo di *tags* utilizzabili sono i trasmettitori radio, i quali possono essere impostati con differenti frequenze in modo da identificare i singoli contrassegni. Essi contengono una batteria interna al litio di durata superiore ai 25 anni e il raggio di rilevamento arriva a 2-4 km, si tratta però di un sistema molto più costoso rispetto ai precedenti. L'ultima tecnica presa in considerazione è il monitoraggio video, mediante videocamera fissa con modalità di visione ad infrarosso. I filmati vengono quindi trasferiti ad un server remoto e le parti d'interesse possono essere salvate per successive analisi. Un algoritmo semi-manuale è stato utilizzato per determinare posizione, velocità, dimensioni e altri dettagli riguardanti i tronchi rilevati nel video. La principale limitazione è data dalla risoluzione non sempre ottimale e non costante per tutta l'ampiezza del canale a causa dell'angolazione della videocamera. (MacVicar, 2009).

In alternativa alle misure in campo si possono trovare in letteratura diverse formule empiriche che sulla base di alcuni parametri noti permettono di stimare la quantità di legname reclutabile.

Studiando alcune aree in Giappone caratterizzate da abbondante presenza di legname nei collettori, Ishikawa (1990) formulò alcune relazioni in grado di collegare la quantità di legname ad alcuni parametri del bacino in esame. La prima equazione permette di determinare l'inviluppo superiore nella relazione che mette a confronto il numero di tronchi trasportati in un evento di piena con la superficie del bacino:

$$(3) \quad N_{\log} = 5000 * A_b$$

dove  $N_{\log}$  è il numero di tronchi e  $A_b$  è l'area del bacino idrografico in  $\text{km}^2$ .

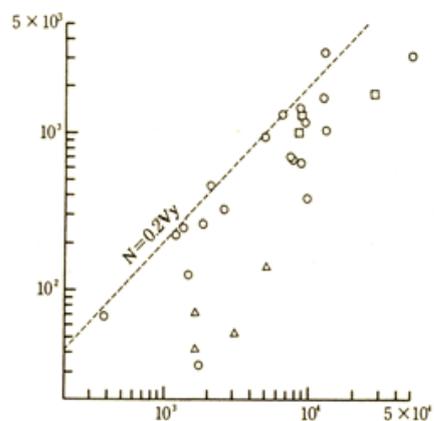


**Figura 9 - Relazione tra il numero di tronchi prodotti e l'area drenata. Fonte: Ishikawa (1990).**

Molto simile alla precedente è la relazione tra il numero di tronchi e il volume di sedimento prodotto, il cui inviluppo superiore è dato dalla seguente espressione:

$$(4) \quad N_{\log} = 0,2 * V_y$$

dove  $V_y$  è il volume di sedimento prodotto in  $\text{m}^3$



**Figura 10 - Relazione tra il numero di tronchi e il volume di sedimento. Fonte: Ishikawa (1990).**

Secondo Ishikawa tale relazione è possibile perché sia i tronchi trasportati che il sedimento prodotto sono di norma proporzionali alle aree con movimenti franosi o con erosione spondale. (Degetto, 2000). A partire dall'area del bacino e dal volume dei

sedimenti Ishikawa ha prodotto anche delle relazioni che considerano il volume in m<sup>3</sup> del legname trasportato ( $V_g$ ) e che presentano i seguenti involuppi superiori:

$$(5) \quad V_g = 0,02 * V_y$$

$$(6) \quad V_g = 500 * A$$

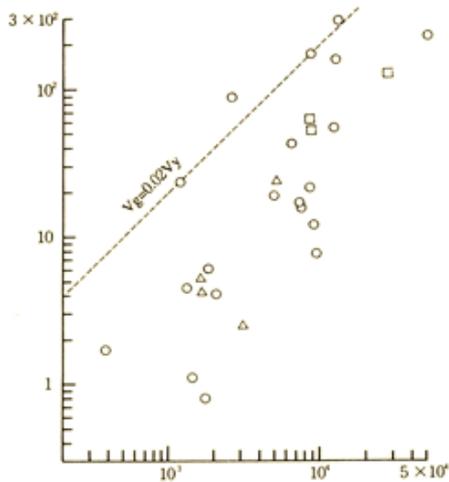


Figura 12 - Relazione tra il volume di legname e il trasporto solido (da Ishikawa, 1990)

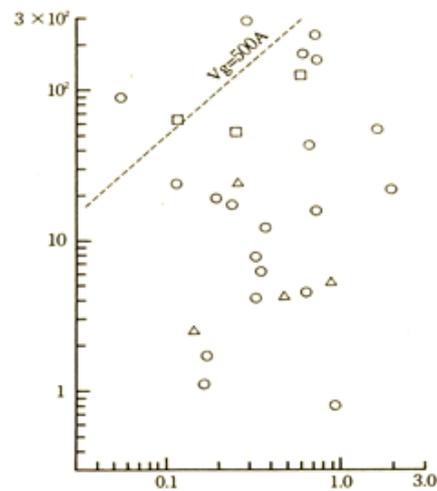


Figura 11 - Relazione tra il volume di legname trasportato e l'area drenata.  
Fonte: Ishikawa (1990).

Un'altra formula empirica è stata determinata da Uchiogi et al (1996):

$$(7) \quad V_{log} = K_s * A_w$$

con  $V_{log}$  volume del legname in m<sup>3</sup> e  $A_w$  area boscata del bacino idrografico in km<sup>2</sup>. Il parametro  $K_s$  viene generalmente stimato da valori di eventi precedenti per ogni collettore ed assume un valore da 10 a 1000 per le foreste di conifere e da 10 a 100 per le foreste di latifoglie. Il volume del legname defluibile è calcolabile moltiplicando il volume dato dalla precedente formula per un rapporto di deflusso determinabile dall'analisi di eventi storici. Queste formule sono largamente utilizzate in Giappone ma presentano forti limitazioni e vanno usate con cautela. La costante empirica  $K_s$  va tarata per ogni ambiente, viene definita in modo arbitrario facendo variare i volumi di legname di tre ordini di grandezza e può risultare poco attendibile.

Fra i primi studi realizzati in Europa vi è quello di Rickenmann (1997), il quale ha ricavato diverse relazioni per la determinazione del volume ( $m^3$ ) di legname movimentabile ( $V_{log}$ ):

$$(8) \quad V_{log} = 45 * A_b^{2/3}$$

dove  $A_b$  è la superficie del bacino idrografico in  $km^2$ . Questa relazione, secondo quanto affermato dallo stesso autore, presenta però una distribuzione dei dati abbastanza dispersa, sia per i grandi che per i piccoli bacini, pertanto la correlazione del legname con il bacino risulta molto bassa.

L'equazione (9) considera invece l'area boscata del bacino ( $A_w$ ) e permette di ottenere risultati più attendibili per superfici boscate superiori a  $100 km^2$ , per superfici più ridotte si ha invece una notevole dispersione dei dati e la relazione perde di linearità.

$$(9) \quad V_{log} = 90 * A_w$$

Nella formula (10)  $L_w$  rappresenta la lunghezza degli alvei boscati e per tratti inferiori ai  $20 km$  risulta una dipendenza di tipo quadratico come espresso nella relazione:

$$(10) \quad V_{log} = 40 * L_w^2$$

La (11) riporta la relazione che lega i volumi di materiale solido trasportato durante un evento con il massimo volume d'acqua transitato durante l'evento ( $V_w$ ), anche se tali valori sono spesso calcolati in modo approssimato:

$$(11) \quad V_{log} = 4 * V_w^{2/5}$$

Infine Rickenmann considera la relazione fra il volume del legname trasportato ed il volume del trasporto solido, secondo il quale le sperimentazioni svolte in area alpina sembrano rispecchiare il comportamento rilevato nei bacini giapponesi con estensione inferiore ai  $2 km^2$ . Le sperimentazioni svolte sono comunque molto poche e le relazioni riportate sono da considerarsi del tutto indicative.

Anche le formule proposte da Rickenman quindi risultano non completamente affidabili, alcune presentano una significativa dispersione dei

dati e, come le formule precedenti, si basano su di un singolo parametro, tendendo a semplificare il fenomeno ben più complesso di reclutamento del legname, il quale dipende da più parametri contemporaneamente. Fino ad oggi le relazioni multiparametriche in grado di collegare le caratteristiche del bacino e del collettore con la quantità di legname trasportabile non sono molte. Degetto (1999) ne propone una basandosi su dati omogenei di letteratura (raccolti da Rickenmann e altri studiosi):

$$(12) \quad V_{\text{wood}} = 0,016 * L_{\text{wood}}^{0,6} * S^{0,11} * Q^{1,56}$$

con  $V_{\text{wood}}$  = volume ( $\text{m}^3$ ) di legname potenzialmente movimentabile per un dato evento di piena,  $L_{\text{wood}}$  = lunghezza boscata del collettore (m),  $S$  = pendenza media del collettore (m/m),  $Q$  = portata liquida ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) per un dato tempo di ritorno (50 – 100 anni). Questa relazione considera bacini con superficie minore di  $100 \text{ km}^2$  ed ipotizza una proporzionalità diretta tra portata liquida e volume di legname mobilitato. Si tratta anche in questo caso di una formula empirica a carattere indicativo ma che tiene conto contemporaneamente di più parametri ed è legata al tempo di ritorno dell'evento. La correlazione che ne risulta è  $R^2 = 0,92$ . (Degetto, 1999).

Un'altra utile relazione empirica (ad esempio per il dimensionamento dei filtri di briglie di trattenuta) presentata da Degetto (1999) è quella che lega la lunghezza massima del legname ( $L_{\text{wood max}}$ ) alla bankfull di larghezza minima o sezione più critica ( $B_{\text{min}}$ ):

$$(13) \quad L_{\text{wood max}} = 1,295 * B_{\text{min}}$$



## 4) MODELLAZIONE LW

Un modello è una rappresentazione semplificata di un sistema reale che ha lo scopo di effettuare delle previsioni sullo stato in cui potrebbe trovarsi il sistema in futuro. Il modello, essendo una versione semplificata della realtà, comprende solamente gli aspetti del fenomeno che si intende analizzare.

I modelli possono essere distinti in fisici (o iconici) e formali (o matematici). Nel primo caso si tratta di studi sperimentali svolti su riproduzioni materiali, spesso in scala, che simulano il comportamento del prototipo, nel secondo caso si tratta di un sistema di proposizioni (relazioni, equazioni, ...) a cui vengono forniti in input dei dati rilevati sul campo o provenienti da altre elaborazioni e da cui si ottengono dei risultati previsionali. Ulteriori distinzioni possono essere fatte nell'ambito dei modelli formali considerando la struttura del modello, il quale può essere fisicamente basato se utilizza leggi fisiche per descrivere i vari processi oppure concettuale quando è composto da elementi concettuali che possono essere anche di natura molto diversa da quella reale ma in grado di produrre risultati assimilabili a quelli reali. Quando si parla di modelli concentrati viene espresso un comportamento medio del bacino, mentre nei modelli distribuiti viene considerata la variabilità spaziale e temporale. Inoltre può essere distinta nei modelli una componente deterministica, la quale esprime tutta la conoscenza a priori su un fenomeno, e la componente stocastica che rappresenta i fenomeni in termini statistici. A partire dagli anni '90 la sempre maggiore diffusione dei software GIS ha portato notevoli cambiamenti nella modellazione idrologica. In particolare è stata facilitata la realizzazione di modelli a parametri concentrati o semi-distribuiti e si è vista la possibilità di implementare modelli distribuiti (prima difficilmente realizzabili) che utilizzano tabelle o mappe in input e da cui si possono ottenere anche elaborati cartografici in output.

## 4.1) I modelli implementati fino ad oggi

I modelli che meglio si prestano alla rappresentazione della dinamica del legname sono quelli matematici ed in generale sono utilizzati per determinare la quantità di legname lungo la rete idrografica o per predirne la variazione nel tempo in seguito alle diverse gestioni territoriali attuate nel bacino. La quasi totalità di questi modelli sono stati sviluppati nel continente americano, mentre risultano molto rari nelle altre parti del mondo. Fra i primi modelli sviluppati si possono citare quelli di Rainville et al (1986), Van Sickle e Gregory (1990), Melanson e Kupfer (1993) e Minor (1997), i quali simulano un tasso d'ingresso di legname in alveo costante proveniente dall'adiacente zona riparia. In seguito sono stati sviluppati altri modelli che integrano gli input di legname con modelli di crescita delle superfici forestali su più larga scala spaziale e temporale, come quelli proposti da Bragg (2002), Kennard et al (1999), Beechie et al (2000), Downs e Simons (2001), Meleason et al (2002), Welty et al (2002) e Benda e Sias (2003). I processi di reclutamento del legname in alveo sono rappresentati principalmente da morte naturale, schianti da vento e taglio della vegetazione riparia, solamente tre modelli simulano altri tipi di processi quali avulsione dei canali, erosione spondale, frane e movimenti di massa. (Gregory et al, 2003).

Di seguito vengono brevemente descritti i modelli appena citati:

### **Rainville model (1986)**

Costituisce il primo modello incentrato sulle dinamiche d'immissione di LW in un corso d'acqua. Si tratta di un modello deterministico che prende in considerazione la porzione di foresta ripariale compresa in 30 m di distanza dal fiume. Questo modello prevede l'ingresso del legname in alveo in seguito a morte della singola pianta o per erosione spondale, basandosi su di una tabella di probabilità in funzione della dimensione degli alberi e della loro distanza dall'acqua. Viene considerata una direzione di caduta della pianta casuale e ipotizzato che essa non si rompa durante l'impatto. Il modello non include la densità del popolamento, la decomposizione dei tronchi ed il loro movimento lungo il fiume, rappresenta comunque il primo tentativo di simulare l'immissione di legname in un corso d'acqua.

### **Murphy and Koski model (1989)**

Un semplice modello che elabora l'ingresso di legname in alveo, la sua decomposizione e il suo trasporto è quello sviluppato da Murphy e Koski (1989) nel sud-est dell'Alaska. Esso è in parte basato su informazioni empiriche ed in parte su assunzioni. Il volume dei tronchi è stato misurato lungo i fiumi dell'Alaska e l'età delle piante in alveo stimata. Sono state eseguite delle misurazioni sui tronchi presenti in diversi fiumi dell'Alaska ed è stata stimata la loro età. Basandosi sull'assunzione che il volume di legname sia costante (inputs = outputs) il tasso di esaurimento (smaltimento) può essere stimato dividendo la quantità di legname caduto per l'età media del legname in alveo. Questo modello è stato il primo a stimare la densità del popolamento di LW in alveo e ad incorporare una funzione riguardante il tasso di esaurimento per decomposizione, rottura e trasporto.

### **Van Sickle and Gregory model (1990)**

Van Sickle e Gregory pubblicarono nel 1990 un modello sul rilascio di legname in alveo da parte dell'adiacente foresta ripariale. Si tratta di un modello deterministico basato sulla probabilità di caduta delle piante e sulle caratteristiche geometriche che ne determinano l'intersezione con il canale in funzione dell'altezza dell'albero, della sua distanza dal torrente e della direzione di caduta. Il modello è stato valutato confrontando le simulazioni con i dati sulle caratteristiche del legname in alveo di una foresta primaria. I risultati mostrano una simulazione relativamente coerente con le osservazioni in campo per quanto riguarda il volume di LW, ma il modello tende a sottostimare il numero di parti di tronco presenti nel canale se non viene considerata la rottura per caduta della pianta. Da questo studio è emersa l'importanza di includere la direzione di caduta nei modelli, i quali risultano tre volte più accurati rispetto a quelli che considerano una direzione di caduta casuale.

### **McDade Model (1990)**

McDade et al misurarono la distanza lungo il versante che separa il canale del punto d'origine dei tronchi. Queste misure furono integrate con il modello proposto da Van Sickle e Gregory per creare un semplice modello in grado di combinare la quantità di legname immesso in alveo con la distanza dal punto sorgente. Fu il primo modello capace di stimare la larghezza di foresta ripariale necessaria a liberare una data percentuale di legname rispetto al totale rinvenibile in alveo (ad esempio l'85% del materiale legnoso immesso in un torrente da parte di una foresta primaria di conifere è generato dalla porzione di fascia boscata compresa entro 30 m dalla sponda) e di distinguere il comportamento delle foreste decidue rispetto a quelle di conifere (ad esempio il 90% del legname immesso in alveo proviene da una fascia di 25 m per le foreste decidue mature, 48 m nel caso di foreste di conifere mature e 55 m per foreste primarie di conifere).

### **Malanson and Kupfer model (1993)**

Modello stocastico sviluppato per i *large rivers* degli Stati Uniti Medio-occidentali, è il primo ad incorporare i fenomeni di erosione spondale ed avulsione del canale, i quali sono processi fisici che avevano fino ad allora ricevuto poche attenzioni nel campo della ricerca e della modellazione. Sono stati quindi incorporati in un'unica applicazione i processi di erosione spondale, di avulsione e le dinamiche di rigenerazione della foresta nella piana inondabile (FORFLO). Il modello rappresenta anche il movimento del legname che dalla foresta ripariale giunge al fiume, non considera però il suo stato di decomposizione.

### **Minor model (1997)**

Modello in grado di stimare l'ingresso in alveo degli elementi chiave (diametro superiore a 61 cm) provenienti da una fascia riparia dello spessore di circa 18 m. Mediante tavole di cubatura e informazioni riguardo composizione, dimensione e localizzazione sono state determinate le dimensioni e la distribuzione delle piante. Fondamentalmente il modello

mette in relazione il numero di piante immesse in alveo con il tasso di mortalità totale del popolamento, la direzione di caduta e la pendenza. Da questo studio emerge la potenziale influenza della direzione e della pendenza sulla movimentazione del legname.

### **Riparian-in-a-Box model (2000)**

Modello deterministico sviluppato da ricercatori dell'università di Washington in collaborazione con scienziati della Weyerhaeuser Corporation (Kennard et al. 1999 e Beechie et al. 2000). Esso riguarda gli elementi chiave liberati da una particella riparia gestita da oltre 150 anni con turni decennali, considerando anche i diradamenti e le utilizzazioni forestali di questa fascia boscata. Lo scopo è quello di predire gli effetti delle utilizzazioni forestali sull'ingresso di legname in alveo. La lunghezza dei LW prodotti viene rappresentata nel modello in funzione alla larghezza della bankfull e vengono considerati elementi chiave i tronchi con dimensioni pari 2,5 volte tale larghezza. Questo modello simula anche la formazione di *pool* nel torrente basandosi sulla relazione fra le dimensioni relative del legname e le dimensioni del canale.

### **Bragg model (2000)**

Modello stocastico realizzato per foreste di conifere nel Wyoming. Esso simula l'ingresso, l'accumulo e lo smaltimento di LW provenienti da foreste di pini e abeti della regione delle Rocky Mountain, espressi come media e varianza della loro quantità e del loro volume. Il modello ha la capacità di rappresentare sia i tagli programmati che gli eventi catastrofici di mortalità con tempi di ritorno di oltre 300 anni. Il legname in alveo viene smaltito per decomposizione, trasporto e perdita delle caratteristiche meccaniche. Questa è una delle più complete rappresentazioni per i processi ecologici di foreste ripariali e delle dinamiche del legname in alveo. Il modello di Bragg è stato il primo ad integrare le dinamiche del popolamento, l'ingresso di legname nel corso d'acqua e i processi in alveo.

### **Downs and Simons model (2001)**

Si tratta del secondo modello, dopo quello di Malanson and Kupfer, ad includere i fenomeni di erosione spondale e avulsione del corso d'acqua. In questo caso però il soggetto di riferimento è stato uno *small river* del Mississippi centrale. Il modello d'immissione di legname in alveo è stato basato sulla stima di numero, dimensione e volume degli alberi della foresta riparia integrandolo con un modello d'ingegneria civile relativo alla stabilità delle sponde e alla migrazione dei *knick-point* (punto di un corso d'acqua in cui avviene una netta variazione di pendenza, ad esempio una cascata o un lago). Questo modello deterministico è in grado di stimare la futura larghezza del canale l'allargamento del e utilizza il tasso di migrazione del knick-point per calcolare il numero di alberi ed il volume di legname reclutato per unità di lunghezza del torrente. Il potenziale di intrappolamento è stato valutato sulla base della lunghezza dei tronchi rispetto all'ampiezza del canale e dell'angolo di caduta rispetto alla direzione della corrente. I risultati del modello indicano che complessivamente i processi di formazione del canale possono influenzare il risultato del processo di reclutamento di legname per mezzo dell'erosione spondale.

### **RAIS model (2002)**

Un modello di produzione di LW e ed uno di ombreggiamento della vegetazione riparia sono stati combinati in un unico modello deterministico chiamato Riparian Aquatic Interface Simulator (RAIS). Le dinamiche della vegetazione riparia sono state modellate mediante ORGANON, un modello di crescita e produzione per l'Abete di Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) adattato anche per *Tsuga heterophylla*, *Alnus rubra* e *Acer macrophyllum*. Il legname viene immesso in alveo come risultato della mortalità degli alberi basata sui modelli sviluppati da Beechie et al. (2000) e Kennard et al. (1999). Questo modello è un'estensione di quello prodotto da Beechie con l'aggiunta di un modello di crescita e produzione per valutare le diverse alternative di gestione per la foresta ripariale. Esso infatti permette agli utenti di

modificare l'approccio del diradamento e delle utilizzazioni forestali ed osservare il potenziale risultato in termini di LW prodotti e ombreggiamento del torrente. È stato anche il primo modello sul legname disponibile on-line.

### **Benda and Sias model (2003)**

Le frane e i movimenti di massa sono le principali fonti di legname in alveo negli ambienti con elevata pendenza e marcati fenomeni erosivi, ma non sono molti i modelli ad incorporare esplicitamente tali processi. Il modello deterministico sviluppato da Benda e Sias incorpora frane, movimenti di massa ed erosioni spondali assieme agli schianti da vento e alla mortalità naturale. Si tratta del primo modello riguardante le dinamiche del legname che modella esplicitamente l'ingresso del legname in alveo mediante processi geomorfologici di movimento di massa ed erosione spondale nei torrenti montani ad elevata pendenza. Un'altra innovazione che esso presenta è la possibilità di simulare prontamente l'ingresso del legname in diversi corsi d'acqua di uno stesso reticolo idrografico.

### **STREAMWOOD model (2002)**

Modello stocastico sviluppato da Meleanson et al. che simula le dinamiche del legname in alveo e della foresta riparia. Reclutamento, accumulo e trasporto di legname possono essere simulati sia per singoli corsi d'acqua che per le diverse componenti di un reticolo idrografico. È stato utilizzato il modello di Zelig modificato per simulare la rigenerazione, la crescita, la mortalità e la conseguente emissione di LW da parte della foresta ripariale. Mediante il metodo di Monte Carlo vengono generate centinaia di migliaia di simulazioni per ogni scenario del modello, stimando i valori medi e la varianza. Il modello simula l'immissione del legname in alveo e la rottura per caduta degli alberi basandosi sia su direzioni di caduta casuali che prestabilite. Osservazioni empiriche mostrano che le piante della zona riparia tendono a cadere prevalentemente in direzione del canale. (Sobota, 2003). I singoli tronchi nel torrente vengono modificati nel corso del tempo per rottura, movimento e decomposizione.

### **Fleece model (2002)**

Per determinare l'ingresso di legname in alveo in questo modello sono stati applicati i metodi e le tecnologie del telerilevamento analizzando un'area di studio di 28 km<sup>2</sup>. Tramite i dati LIDAR sono state stimate l'elevazione del suolo, la pendenza, l'altezza degli alberi ed il tipo di copertura vegetale. L'emissione di legname è stata basata sulla densità del popolamento, la probabilità di caduta in alveo e il tasso di caduta degli alberi (determinato dalle stime di mortalità tramite il modello di crescita e produzione ORGANON). Questo modello apporta un contributo soprattutto perché illustra l'applicazione su larga scala delle dinamiche di produzione di LW e l'utilizzo di informazioni sulla copertura forestale acquisite mediante telerilevamento. Il tasso di produzione di LW stimato dal modello risulta vicino ai valori osservati da H. J. Andrews nei suoi studi nei fiumi in Oregon e la distanza di reclutamento è simile alle osservazioni in campo effettuate nella regione.

La maggior parte dei precedenti modelli fanno riferimento a contesti molto diversi da quello che si vuole studiare nel presente lavoro, possono comunque essere tratte alcune utili considerazioni generali:

- Il tasso massimo d'ingresso o di immagazzinamento di materiale in alveo si ha dopo 150 – 200 anni dall'insediamento della nuova vegetazione a seguito di pratiche selvicolturali o fenomeni naturali (incendi, schianti, frane ...);
- L'antropizzazione del territorio e le pratiche ad essa legate riducono il numero ed il volume di legname in alveo;
- La maggior parte delle piante (90%) sono reclutate entro una distanza di 20 m dalle sponde.

## 4.2) La modellazione di LW nelle Alpi

Fra i modelli più significativi sviluppati nel periodo recente per il territorio alpino vi è quello di Mazzorana (2010), che prende in esame il torrente Passirio, situato nella provincia autonoma di Bolzano. Il torrente Passirio drena un'area di circa 415 km<sup>2</sup> e confluisce nel fiume Adige presso Merano. La struttura concettuale sviluppata da Mazzorana comprende:

- Criteri per la localizzazione e la classificazione delle aree di reclutamento di materiale legnoso e la valutazione del relativo volume dei LW
- Procedura computazionale per i processi di reclutamento del materiale legnoso
- Schema computazionale per le dinamiche di trasporto, deposizione e rimobilitazione del materiale legnoso
- Procedura di analisi dei fenomeni d'interazione che coinvolgono il materiale legnoso trasportato presso le sezioni critiche

I dati sono stati implementati in ambiente GIS ed è stato eseguito un test in grado di simulare reclutamento, trasporto e deposizione del materiale legnoso per un evento con tempo di ritorno di 300 anni, il quale è stato comparato con l'evento di flash-flood avvenuto nello stesso torrente nel 1987.

Le aree di reclutamento del materiale legnoso sono state identificate mediante la foto-interpretazione di immagini aeree. L'area boscata compresa nella zona d'influenza del torrente è stata classificata in sette tipologie strutturali in relazione al differente comportamento che presenta la vegetazione quando viene esposta al carico idrodinamico. La classificazione è stata eseguita sulla base di *digital elevation models* (DEM), foto aeree e *digital terrain model* (DTM) derivato da tecnologia LIDAR ad alta risoluzione spaziale.

La stima del volume di LW reclutato si compone di tre differenti procedure computazionali che corrispondono al reclutamento di legname proveniente rispettivamente dai versanti, dai tributari e dall'area inondata nella sua massima estensione.

Per quanto riguarda le dinamiche di trasporto dei LW lungo il torrente il modello prevede due differenti tipi di approccio: se l'obiettivo principale è la stima del percorso e le possibili zone di deposizione il trasporto dei tronchi viene calcolato con metodo cella-per-cella, se l'obiettivo primario è di studiare l'interazione dei tronchi con gli ostacoli quali i ponti il loro trasporto viene calcolato seguendo un approccio orientato agli oggetti. Le basi per il calcolo delle dinamiche di trasporto sono comunque le stesse nei due tipi di approccio.

La valutazione del potenziale impatto di pericolosità in sezioni critiche avviene rappresentando i LW come punti (approccio orientato agli oggetti), ognuno corredato di informazioni riguardo il diametro del tronco, la lunghezza del tronco, il diametro dell'apparato radicale e le caratteristiche di resistenza agli impatti. Nel modello gli ostacoli vengono suddivisi in due categorie, sulla base dell'interazione che generano con il legname:

- ostacoli in alveo: ostacoli posizionati all'interno dell'alveo, come le pile dei ponti, sui quali il legname può rimanere incastrato con qualsiasi condizione del flusso;
- ostacoli sopraelevati: ostacoli che attraversano il corso d'acqua con una certa altezza, sui quali il legname può restare intrappolato solamente quando il tirante idrico è sufficientemente elevato.

Questi ostacoli vengono rappresentati mediante degli oggetti poligonali a cui vengono associate due informazioni fondamentali:

- probabilità di ritenzione: probabilità per ogni tronco che entra in collisione con l'ostacolo di restare bloccato;
- altezza dell'ostacolo: misurata al punto più basso dell'attraversamento sul livello iniziale dell'acqua.

## 5) DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO

La zona d'interesse del presente elaborato è il bacino idrografico del torrente Cordevole, localizzato in Veneto, nella porzione nord-occidentale della provincia di Belluno. La sua estensione non è però totalmente compresa nel territorio bellunese, alcune piccole aree sono infatti situate oltre il confine regionale, in trentino. Il bacino, chiuso alla confluenza con il fiume Piave, copre una superficie di circa 853 km<sup>2</sup> e coincide grossomodo con il territorio agordino. In questa zona è incorniciata da alcuni fra i più importanti e noti gruppi montuosi delle Dolomiti, come la Marmolada, il Monte Civetta, la Moiazza, il Pelmo e l'Agner. La parte bassa del bacino ricade all'interno del territorio del Parco Nazionale delle Dolomiti Bellunesi e nel complesso sono presenti diversi ambienti naturalistici e paesaggistici di interesse regionale.

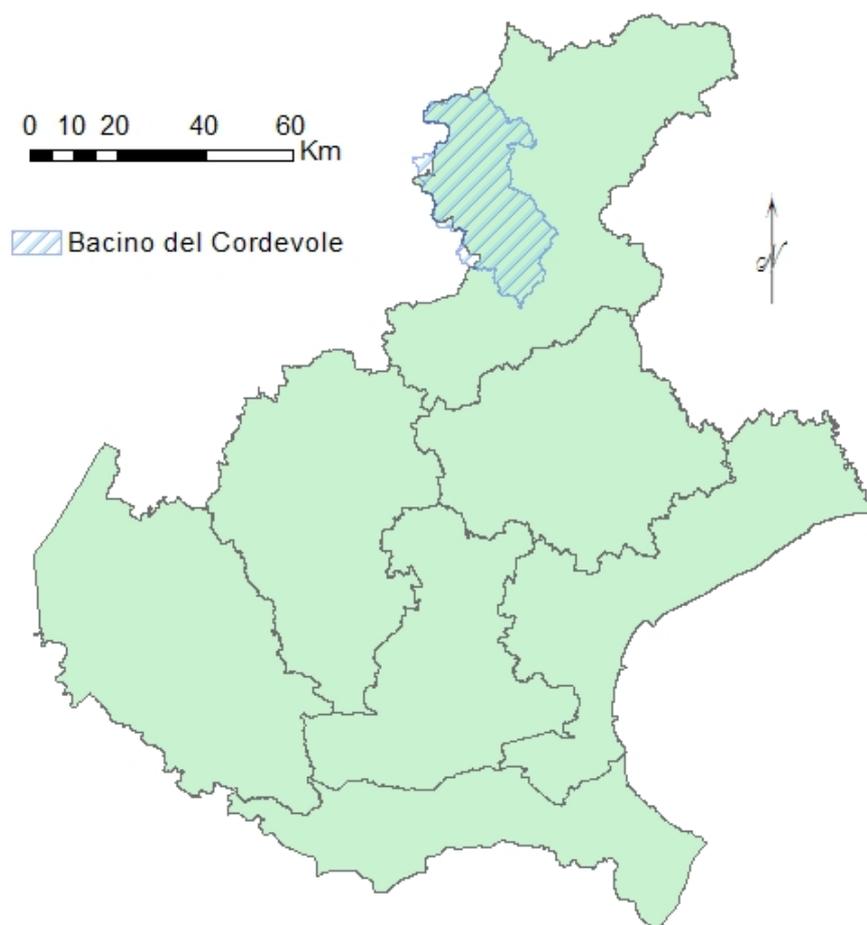


Figura 13 - Localizzazione del bacino del Cordevole rispetto alla Regione Veneto.

Il bacino possiede caratteristiche spiccatamente montane, come si può notare anche dai seguenti elaborati cartografici. La morfologia del territorio è molto articolata, con grandi differenze di quota e presenza di versanti a forte pendenza. Si può inoltre osservare una certa diversificazione delle aree per quanto riguarda la copertura vegetale, le caratteristiche meteorologiche e litologiche. La popolazione residente all'interno del bacino ammonta a circa 35.000 persone, ma il territorio è anche soggetto ad un notevole flusso turistico, sia nei mesi invernali che nei mesi estivi. In tutta la vallata è molto praticata l'attività di pesca a scopo ludico sportivo, effettuata sia dai residenti che da molti turisti. Agli usi igienico-sanitari, turistico-ricreativi ed ambientali della risorsa idrica nel torrente Cordevole si aggiunge anche un intenso uso a scopo idroelettrico che sovrappone al reticolo naturale un importante reticolo artificiale caratterizzato da 4 sbarramenti del corso d'acqua principale e da numerose opere di presa su affluenti minori. (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2007).

## 5.1) Idrografia e parametri morfometrici

Il T. Cordevole è il principale affluente del fiume Piave, nonché il più lungo fra i torrenti interamente compresi nella provincia di Belluno. Piave e Cordevole costituiscono i due corsi d'acqua più importanti delle Dolomiti ed il secondo ne separa per definizione la porzione occidentale da quella orientale. Il torrente in esame nasce presso il Passo Pordoi, in comune di Livinallongo del Col di Lana a circa 2237 m di quota e, dopo un percorso di circa 75 km, s'immette nel fiume Piave presso Sedico, ad un'altitudine di 275 m s.l.m. La superficie del bacino risultante è di 853 km<sup>2</sup>, con quote che variano dai 282m ai 3343m e si presenta con una forma allungata in direzione NO-SE.

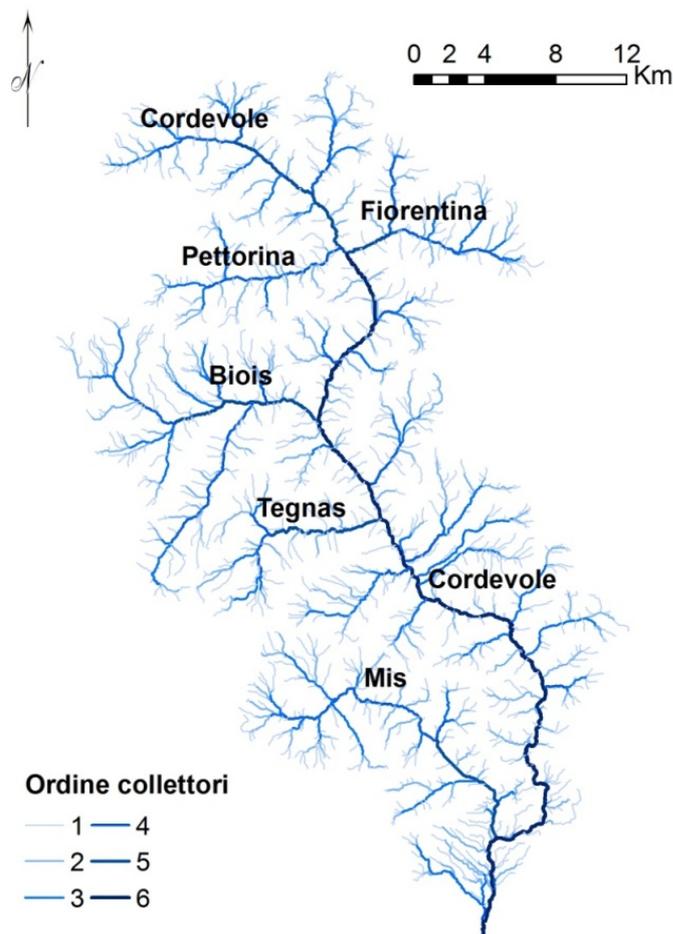
Il regime idrologico del torrente Cordevole ha caratteristiche nivo-pluviali, con portate medie mensili elevate nei mesi di Maggio-Giugno (ove l'apporto meteorico si somma allo scioglimento del manto nevoso) e portate di magra nei mesi di Gennaio-Febrero in cui la temperatura dell'aria scende

notevolmente, in particolare nei versanti in ombra ed alle quote più alte, provocando precipitazioni a carattere nevoso e bloccando per la formazione di ghiaccio gli apporti sorgentizi e dei piccoli corsi d'acqua. In autunno è inoltre solitamente maggiore l'intensità di precipitazione con conseguenti eventi di piena. (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2007). Il bacino dell'alto Cordevole, in particolare il tratto compreso tra gli abitati di Caprile e Alleghe rappresenta un'area fragile dal punto di vista idraulico ed idrogeologico. Ciò è dovuto alle caratteristiche geologiche locali, il sottobacino del T. Fiorentina risulta infatti una delle aree maggiormente dissestate, ma dipende anche dalla particolare morfologia del fondovalle. L'originario profilo del T. Cordevole è stato infatti sensibilmente alterato in seguito all'evento franoso del 1771 che causò l'ostruzione dell'alveo e la formazione del lago di Alleghe. Nonostante le difese arginali realizzate negli anni '70, tutt'oggi non si possono escludere a monte del lago condizioni di pericolosità idraulica e situazioni con mancanza o limitato franco arginale per eventi con tempo di ritorno prossimo ai 100 anni. La morfologia del torrente cambia notevolmente nel tratto più prossimo alla confluenza con il Fiume Piave. Lungo gli ultimi chilometri il Cordevole presenta larghezze rilevanti, localmente anche di 1000 m e l'alveo assume caratteri di pluricursalità, ampie espansioni golenali e tendenze al sovralluvionamento. In questa zona è favorito un forte sviluppo spontaneo della vegetazione, un tempo equilibrato da una continua raccolta per vari usi ed ora invece del tutto incontrollato. (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2007). In *Tabella 1* sono riportati i principali parametri morfometrici del bacino.

Superficie	853 km <sup>2</sup>
Quota massima	3343 m
Quota minima	282 m
Quota media	1542 m
Pendenza media	31,4°
Lunghezza asta principale	75 km

**Tabella 1 - Parametri morfometrici del bacino**

I principali affluenti del Cordevole sono il Pettorina, il Fiorentina, il Biois, il Tegnás e il Mis, dei quali vengono riassunte le principali caratteristiche in *Tabella 2*. La classificazione secondo Horton-Strahler, rappresentata in *Figura 14*, mostra che il Cordevole, dopo la confluenza con il Fiorentina, raggiunge il 6°ordine. Fra gli affluenti appena citati il Pettorina è l'unico del 4°ordine, mentre gli altri raggiungono tutti il 5° ordine prima d'immettersi nel Cordevole.



**Figura 14 - Ordine collettori e principali affluenti.**

Affluente	Ordine	Posizione idrografica	Lunghezza asta principale (km)	Area drenata (km <sup>2</sup> )
Pettorina	4	destra	12,35	51
Fiorentina	5	sinistra	10,85	58
Biois	5	destra	14,56	132
Tegnas	5	destra	11,35	52
Mis	5	destra	21,82	117

Tabella 2 - Caratteristiche affluenti principali

### 5.1.1) Quote

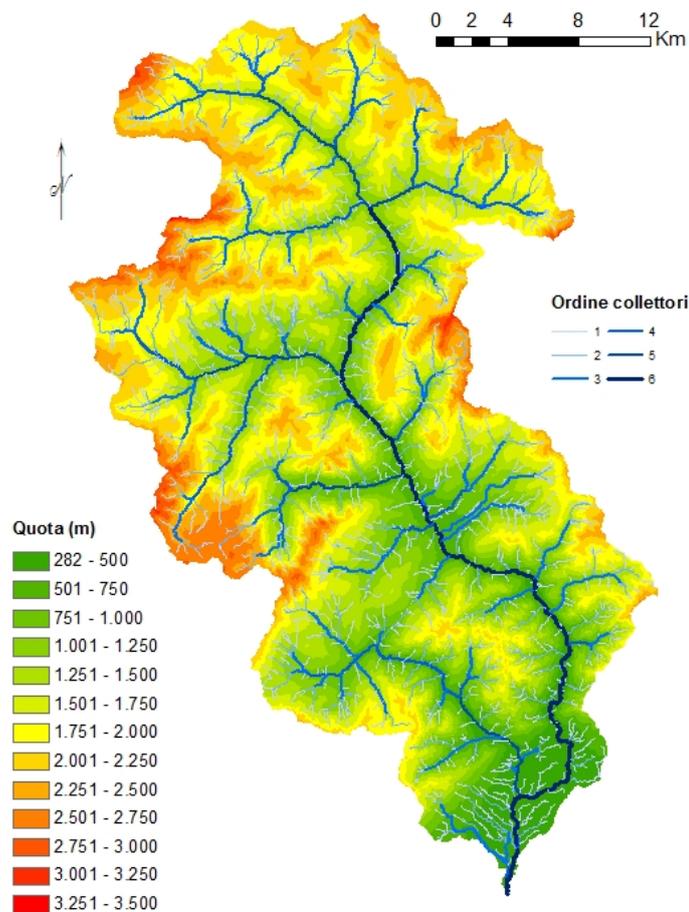


Figura 15 - Mappa della distribuzione altimetrica del bacino e dell'ordine dei collettori.

La curva ipsografica (Fig. 16), che fornisce la distribuzione delle superfici nelle diverse fasce altimetriche, mostra che il territorio situato a quote superiori ai 2500m è inferiore al 5%, mentre la porzione al di sotto dei 1000

m rappresenta poco meno del 20%. La curva ipsometrica (Fig. 17) rappresenta anch'essa la distribuzione delle superfici relativamente alla quota, ma con valori normalizzati in modo da poterla agevolmente confrontare in diversi bacini. Dall'andamento di questa curva si possono dedurre alcune informazioni sul grado di evoluzione del bacino, che in questo caso risulta complessivamente nello stadio di maturità, quindi in condizioni di equilibrio. Alle quote più elevate però il grafico mostra una tendenza verso uno stadio più senile.

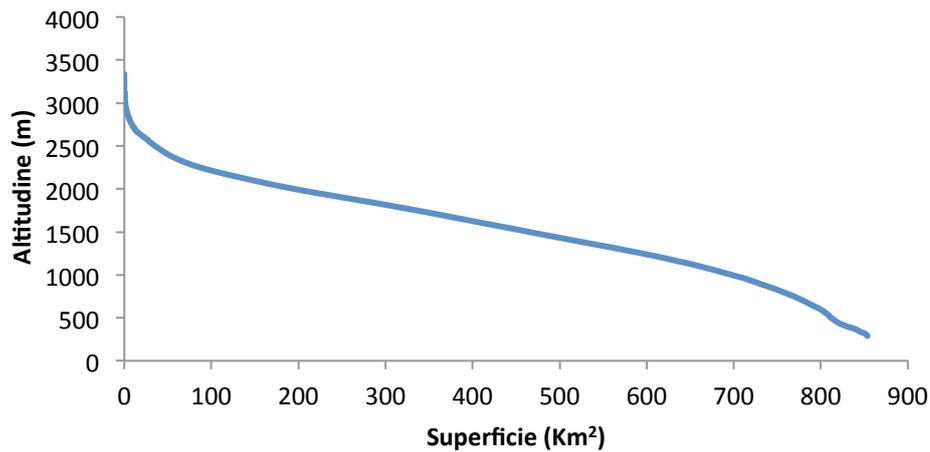


Figura 16 - Curva ipsografica

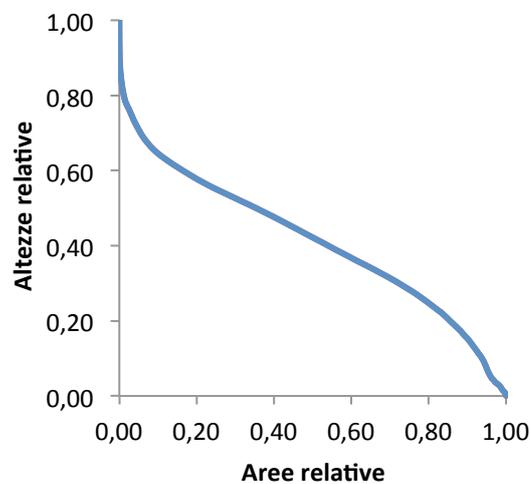


Figura 17 - Curva ipsometrica adimensionale

### 5.1.2) Pendenze

Le aree che presentano pendenze inferiori al 30% costituiscono circa il 20% della superficie e sono localizzate in 3 aree, una a nord del bacino, una fascia centrale e la porzione più a sud che rappresenta l'area meno acclive. Il territorio restante è invece caratterizzato da pendenze mediamente elevate che favoriscono l'innescò di movimenti franosi e la mobilitazione del legname lungo i versanti.

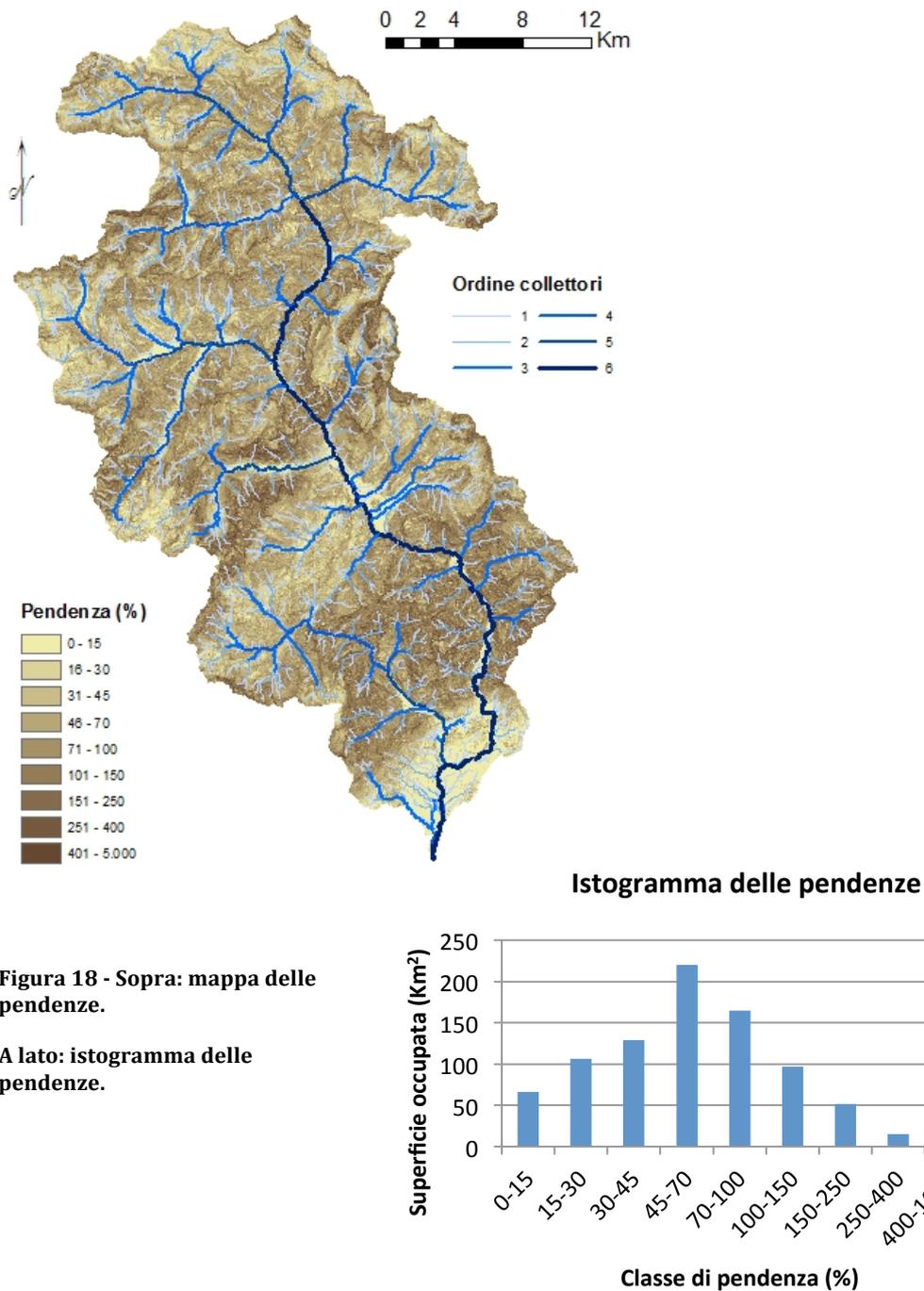


Figura 18 - Sopra: mappa delle pendenze.

A lato: istogramma delle pendenze.

### 5.1.3) Esposizione

Le esposizioni di un bacino sono direttamente influenzate dall'andamento della rete idrica principale. Il grafico radar mostra una distribuzione abbastanza uniforme lungo le 8 direzioni principali, come di norma accade per i bacini di grandi dimensioni.

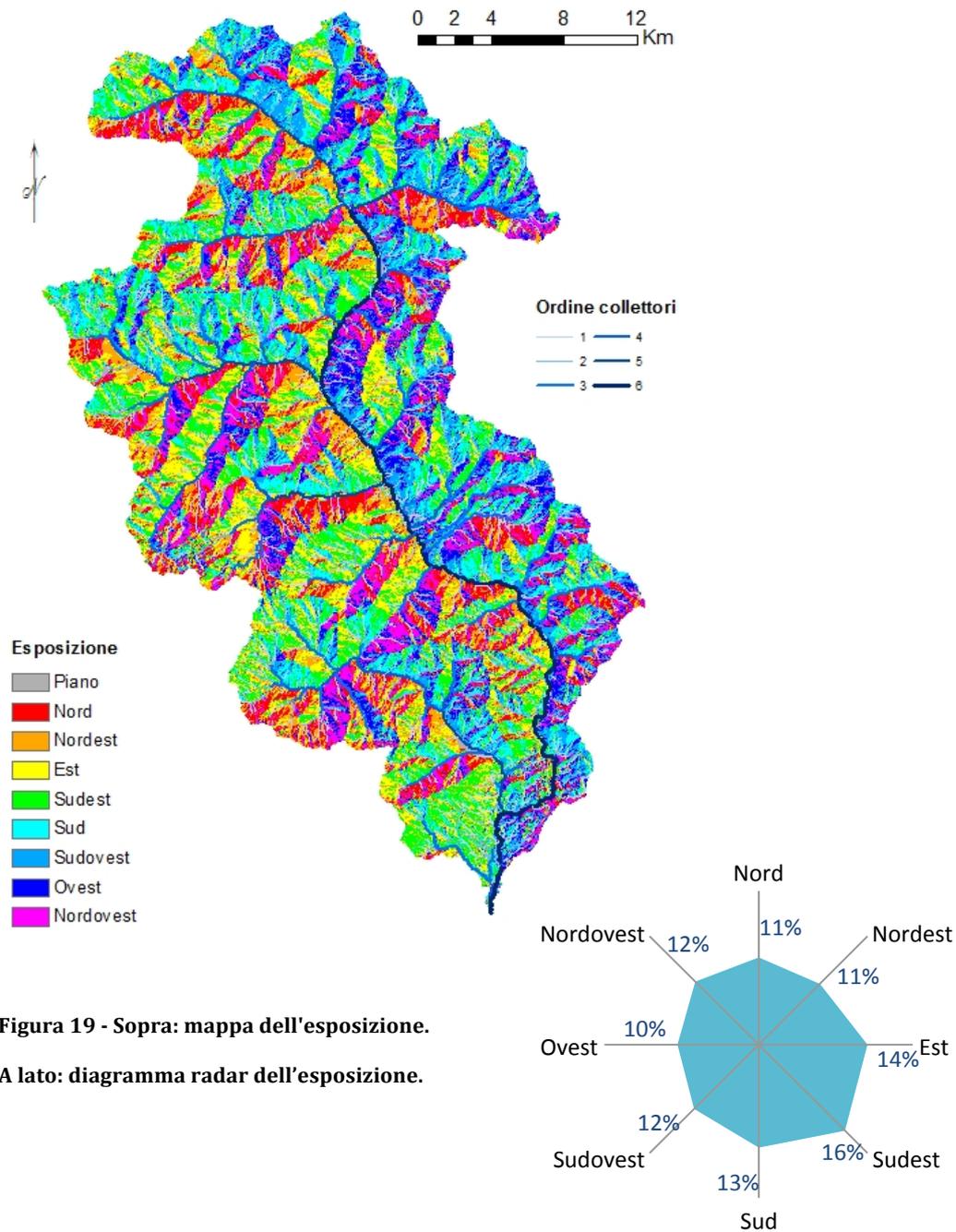


Figura 19 - Sopra: mappa dell'esposizione.

A lato: diagramma radar dell'esposizione.

## 5.2) Clima

Il clima della regione dolomitica è ascrivibile al tipo alpino, del quale è utile distinguere un settore esterno con caratteristiche suboceaniche, più piovoso, ed un settore interno marcatamente più continentale. Il bacino del Cordevole in particolare è situato in una zona di transizione fra i distretti fitogeografici endalpico, mesalpico ed esalpico. Dai dati storici risulta una distribuzione quantitativa areale delle precipitazioni annue molto variabile, con valori minimi di 500 mm misurati a Caprile (1921) fino a valori superiori ai 2500 mm per il Passo Cereda (1921 e 1928). I valori medi annuali di piovosità si aggirano attorno ai 1100 mm per l'area settentrionale e ai 1400 mm per quella centro-meridionale. I valori medi mensili evidenziano un regime pluviometrico diverso tra le due zone, quella centro-meridionale è caratterizzata da un massimo di piovosità in giugno, mentre quella settentrionale da un massimo di piovosità in novembre.

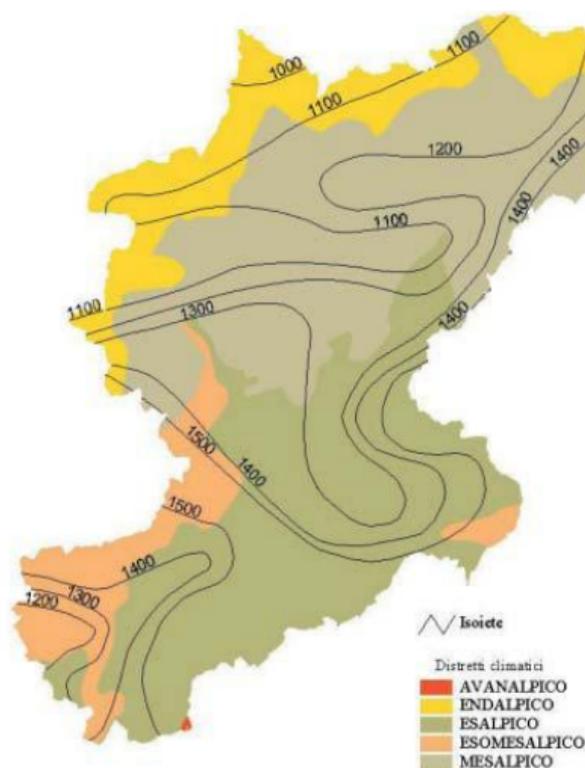


Figura 20 - Distretti climatici e isoiete della provincia di Belluno. Fonte: Ramanzin & Somnavilla, 2003.

La permanenza al suolo del manto nevoso interessa generalmente il periodo da novembre a marzo, ma nella parte centro-settentrionale del bacino, dove sono presenti i massicci più elevati, la neve spesso persiste fino ad aprile-maggio. In questo periodo il brusco aumento delle temperature causa un rapido scioglimento della neve che, in concomitanza con le intense precipitazioni primaverili, determinano la circolazione e l'infiltrazione di enormi quantità d'acqua causando la maggior parte degli eventi gravitativi più rilevanti. Le temperature, data la grande variabilità altimetrica, sono abbastanza eterogenee e le medie annuali si attestano attorno ai 5°C.

### 5.3) Vegetazione

La copertura forestale, con i suoi 464 km<sup>2</sup>, rappresenta circa il 53% del territorio Agordino in esame ed è costituita in prevalenza da peccete, sostituite al disopra dei 1500-1600 m da larici-cembreti e dagli arbusteti subalpini comprendenti rodoro-vaccinieti, mughete, ontanete e consorzi di salici. Nel sottostante orizzonte montano inferiore sono diffuse le faggete, soprattutto nella zona centrale del bacino. In molti casi faggio e abete rosso costituiscono le piceo-faggete, come quelle in prossimità del lago di Alleghe. La porzione più a sud del bacino è invece caratterizzata da estesi orno-ostrieti, tipici dell'orizzonte submontano. Nei distretti più umidi sono frequenti formazioni a frassini e ontani; sulle alluvioni torrentizie si sviluppano soprattutto consorzi di salici. Alle quote maggiori le conifere prevalgono anche lungo i corsi d'acqua. Numerosi sono anche i prati e i pascoli, sparsi fra la fascia montana e la subalpina.

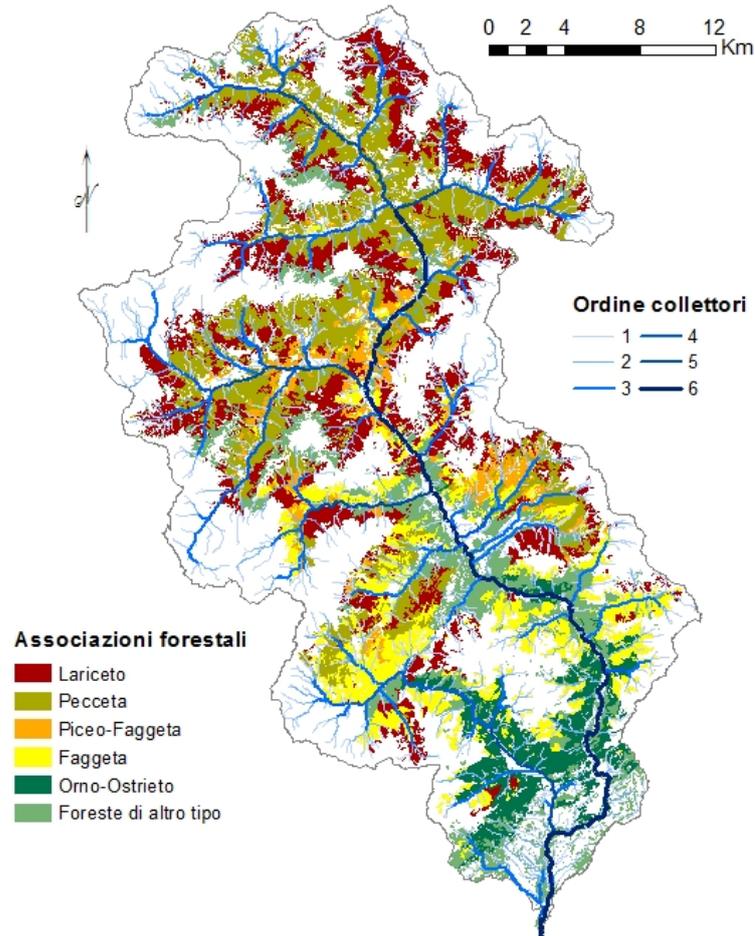


Figura 21 - Mappa delle associazioni forestali.

In *Tabella 3* sono riportate le principali associazioni forestali con relativa area in ettari e in percentuale.

<b>Associazione forestale</b>	<b>Area (ha)</b>	<b>Area (%)</b>
Pecceta	13017	28
Lariceto e Larici-Cembreto	11885	26
Faggeta	6179	13
Orno-ostrieto	3806	8
Piceo-faggeto	2418	5
Foreste di altro tipo	9095	20
<b>Totale copertura forestale</b>	<b>46400</b>	

Tabella 3 - Associazioni forestali e relativa superficie

## 5.4) Geologia e dissesti

Dal punto di vista tettonico, il bacino del Cordevole è caratterizzato da una serie di strutture ad andamento trasversale. La sinclinale di Belluno, il cui fianco settentrionale è interessato dall'omonima linea, coincide sostanzialmente con l'ampia conca della Val Belluna, lungo cui scorre il fiume Piave. Più a nord vi è la linea della Valsugana che attraversa l'agordino in direzione NE-SW. Si tratta di una struttura di fondamentale importanza, la quale ha portato ad un innalzamento della parte settentrionale del bacino. Si succedono, ancora più a nord, una serie di sinclinali ed anticlinali minori più o meno parallele fra loro. La struttura all'estremo settentrione del bacino è l'anticlinale del Cordevole, il cui asse segue grossomodo il corso del torrente. La litologia dei terreni affioranti è delle più varie, è possibile raggruppare tali formazioni nei seguenti complessi:

- **Complesso filladico**

Costituito da metamorfiti, filladi carboniose e paragneiss albitici. Si tratta di rocce ad elevata degradabilità e alterabilità con produzione di materiali argillosi. Esse sono le principali responsabili dei dissesti che si manifestano nella zona compresa tra Agordo e Passo Cereda.

- **Complesso eruttivo**

Comprende le rocce effusive del Permiano superiore e parte delle vulcaniti ladiniche. Le prime affiorano con maggior estensione nella zona compresa tra Falcade, passo S. Pellegrino e passo Valles. I litotipi di questo complesso hanno in genere buone caratteristiche meccaniche, possono comunque dar luogo a isolati fenomeni di crollo con distacco lungo superfici di discontinuità preesistenti.

- **Complesso gessoso**

Generalmente calcari micritici bituminosi, calcari marnosi, dolomie evaporitiche e gessi. Si tratta di rocce facilmente erodibili, caratterizzate da estesi fenomeni franosi. Sono diffuse prevalentemente lungo la valle del Biois, ma affiorano anche nei pressi di Selva di Cadore, Avoscan, San Tomaso, Agordo e Voltago.

- **Complesso calcareo-dolomitico**

Costituito da potenti successioni di dolomie e calcari massicci, poco stratificati, di varia natura e di colore generalmente chiaro. Hanno quasi sempre buone caratteristiche meccaniche e notevole resistenza ai processi di alterazione ma in presenza di discontinuità molto sviluppate possono dar luogo a fenomeni di crollo anche di notevole cubatura. Questo complesso affiora in corrispondenza dei principali massicci, quali il Civetta, la Marmolada, le pale di S. Lucano etc.

- **Complesso arenaceo-argilloso e calcareo-marnoso**

Comprende calcari, calcari marnosi, arenarie, marne, fitte alternanze di arenarie e argille, siltiti e argilliti. Queste formazioni sono spesso sede di estesi fenomeni franosi e di erosione accelerata. Questo complesso è spesso caratterizzato da morfologie poco acclivi, sede di insediamenti urbani. I maggiori affioramenti si hanno nell'alto bacino in corrispondenza dei comuni di Livinallongo e Selva di Cadore e nella zona di Agordo e La Valle.

- **Complesso arenaceo-conglomeratico-tufaceo**

Appartengono a questo complesso litotipi arenaceo-quarzosi, calcari nodulari selciferi, tufiti e vulcaniti. Sono tutti materiali altamente degradabili che presentano qualità geomeccaniche scadenti, ciò causa frequenti fenomeni di scivolamento superficiale. Affioramenti sono riscontrabili nella valle del Biois, nei dintorni di Agordo e nell'estremo settore settentrionale del bacino del Cordevole.

Per quanto riguarda i depositi quaternari, essi sono rappresentati da estese coperture detritiche derivanti dal disfacimento del substrato roccioso e quindi litologicamente ben differenziate. I depositi morenici, abbondanti in tutto il bacino, sono costituiti da materiale eterogeneo e di composizione variabile e possono dare luogo a fenomeni franosi anche estesi. Depositi alluvionali e depositi fluvio-glaciali sono presenti in particolare nella parte settentrionale del bacino e nella valle del torrente Mis. Una mappa dei principali gruppi litologici del bacino è riportata negli Allegati.

## 5.5) Cenni storici

“*Cor dubium habeo*” (ho il cuore dubbioso) fu la frase che Giulio Cesare esclamò quando, lungo il suo cammino da Belluno verso Feltre, si trovò di fronte al Torrente Cordevole gonfiato dalle piogge. Secondo la tradizione tale frase fu pronunciata dal proconsole romano nell’incertezza se tentare o meno il guado. Da quel giorno il torrente venne chiamato Cordubium, ed in epoca più recente Cordevole. (Piloni, 1607).

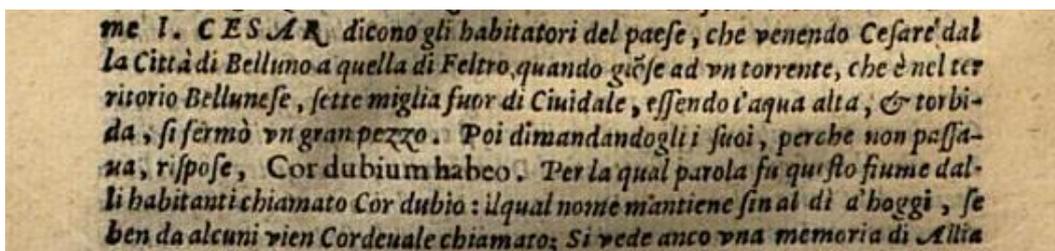


Figura 22 - Alcune righe del testo di Piloni (1607).

La presenza dell’uomo nell’area dell’Agordino ha però origini molto più antiche, essendo frequentata da cacciatori e pastori già in epoca pre-romana. In epoca alto-medioevale cominciarono a stabilirsi i primi insediamenti, costituiti prevalentemente da boscaioli e cercatori di ferro e piombo. Con il tempo il paesaggio cominciò a mutare, iniziarono le prime utilizzazioni del bosco e i centri abitati cominciarono ad espandersi, con la formazione di attività artigianali ed industriali.

Fra i più importanti eventi naturali va ricordata la catastrofica frana che si staccò dal Monte Forca nel 1771 e andando ad ostruire la valle diede origine al lago di Alleghe (Soccol e Tessarolo, 2003). Nella seconda metà del XIX secolo numerose alluvioni interessarono la zona, causando morti e danni alle strutture, almeno 5 di esse furono caratterizzate da un abbondante apporto di materiale legnoso. In epoca più recente si ricorda invece l’alluvione avvenuta il 4 novembre 1966 che causò ingenti danni a molti abitati, distruggendo case, aziende industriali ed infrastrutture. Particolarmente colpito fu l’abitato di Caprile, posto alla confluenza del Pettorina, del

Fiorentina e dell'Alto Cordevole, sommerso da circa tre metri di fango, sassi ed un enorme groviglio di legname.

Lo scorso secolo è stato interessato da numerose attività umane che hanno alterato le dinamiche del torrente, sono state costruite diverse centrali idroelettriche (La Stanga, Agordo, Taibon e Sospirolo), le dighe del Lago del Ghirlo e del Lago del Mis, opere di presa e restituzione e le opere in alveo per la difesa dei centri abitati.

Negli ultimi 50 anni si è sempre più sviluppato il turismo, fino ad affermarsi come una delle principali attività della vallata. Ciò ha portato a nuove trasformazioni del territorio, all'espansione dei centri abitati e delle vie di comunicazione, con la crescente presenza di elementi esposti di valore che vanno ad incrementare il rischio generato dagli eventi idrogeologici.



**Figura 23 - LW depositati a Caprile durante l'alluvione del 1966. Archivio Fotografico Fondazione Mazzotti, 2011.**



## 6) MATERIALI E METODI

Il presente lavoro di tesi è incentrato sull'implementazione di un modello concettuale su base GIS per il trasferimento di LW in alveo. Esso fa riferimento ad un sottomodello compreso nel più ampio lavoro svolto da Rigon (2009) che incorpora i modelli previsionali di produzione di LW, traslazione lungo i versanti ed infine trasferimento all'interno dei collettori. Lo scopo del presente elaborato è quello di sviluppare un sottomodello di trasferimento del legname in alveo esteso all'intero bacino del Cordevole che includa fra i fattori anche l'influenza delle opere in alveo. In questo capitolo verrà esposta prima la struttura e le componenti del modello creato da Rigon e poi il materiale utilizzato e le metodologie che hanno prodotto il modello oggetto di questa tesi.

### 6.1) Modello previsionale del legname in alveo

Il lavoro svolto da Rigon durante la sua attività di dottorato aveva come obiettivo la creazione di un modello in grado di determinare la presenza ed effettuare una previsione sulla quantità e sulla localizzazione del materiale legnoso negli alvei del territorio dolomitico, in modo da dare delle priorità ad eventuali interventi di controllo. La prospettiva di un utilizzo del modello previsionale da parte di tecnici ed enti preposti alla gestione del territorio ha reso indispensabile l'utilizzo di tecniche e metodologie semplici e nel contempo sufficientemente affidabili nella modellazione a scala di bacino. (Rigon, 2009). L'estrema complessità e stocasticità dell'insieme di processi coinvolti nel reclutamento, trasporto e deposizione del legname hanno reso inattuabile l'implementazione di un modello deterministico per la predizione del volume di LW trasportato su breve scala temporale. Un approccio più semplice, orientato alla determinazione del budget di legname, è risultata invece una soluzione praticabile e più affidabile per i bacini montani. In particolare l'implementazione di un modello concettuale su base GIS ha

permesso un approccio spazialmente distribuito in grado di predire la localizzazione dei siti di reclutamento, dei versanti in cui avviene il trasporto e dei tratti in cui si verifica la deposizione. (Rigon et al., 2012). L'area presa in esame è la porzione di bacino del Cordevole chiusa al Lago di Alleghe. La struttura del modello è schematizzata in *Figura 24* ed è composta dai seguenti sottomodelli:

- Reclutamento
- Trasferimento versante
- Trasferimento rete idrografica

ognuno dei quali prende come input i risultati del blocco che lo precede. Il sottomodello "reclutamento" produce infatti la carta delle aree sorgente di legname, la quale viene presa come input dal sottomodello "trasferimento versante" che produce la mappa con le quantità di legname immesso in alveo, a sua volta utilizzata dall'ultimo sottomodello per simulare la traslazione del legname in alveo.

## RECLUTAMENTO

Nel primo sottomodello vengono determinate e quantificate le aree sorgente di legname che potenzialmente può giungere alla rete idrografica. I dissesti sono stati considerati come causa preponderante nella formazione di questo materiale, le altre possibili origini (mortalità naturale, vento, incendi) non sono invece state considerate. Le aree sorgente di legname sono state identificate mediante l'intersezione della carta dei particellari (ottenuta dai Piani Economici-Forestali dei comuni coinvolti) con quella della suscettibilità dei dissesti. Quest'ultima mappa è stata creata considerando tre categorie principali di fenomeni erosivi coinvolti:

- Frane per scivolamento
- Colate detritiche
- Erosioni di sponda

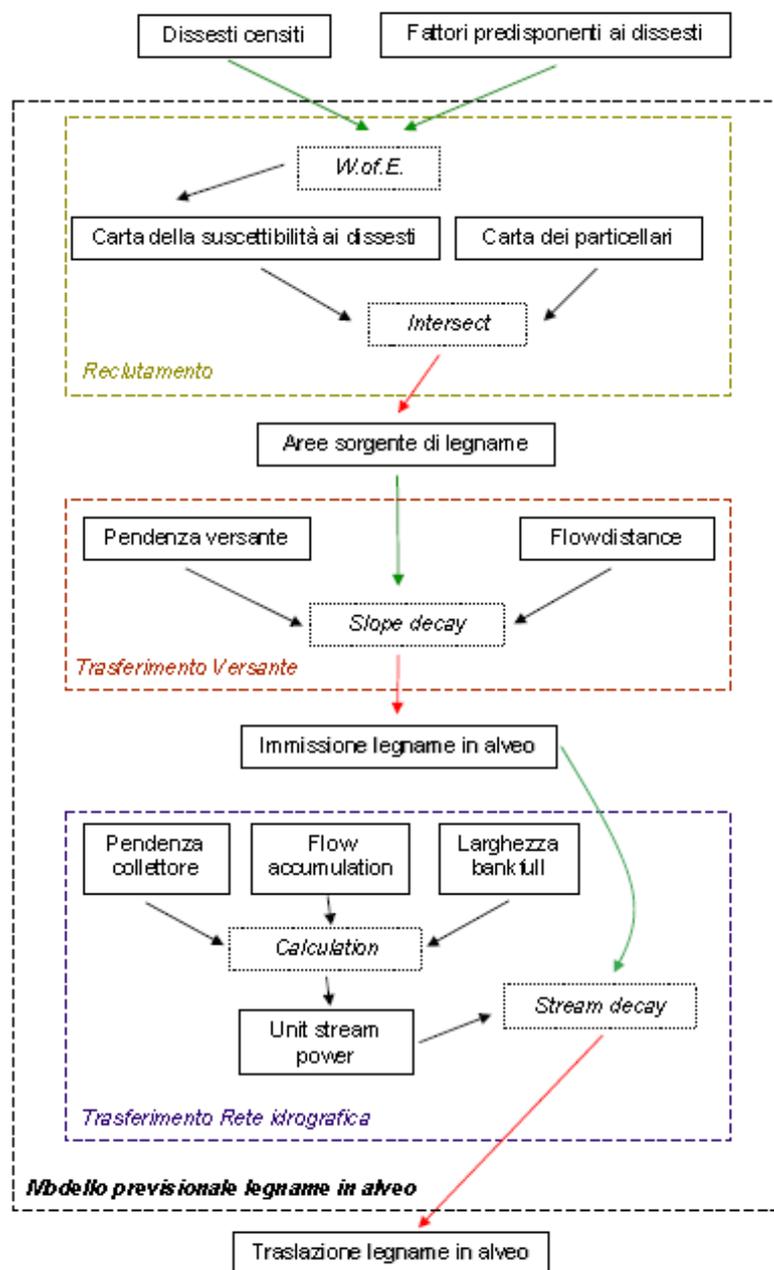


Figura 24 - Schema del modello previsionale di produzione e traslazione di legname in alveo. I tre sottomodelli sono indicati con i blocchi tratteggiati. (Rigon, 2009)

I dissesti censiti per le prime due categorie provengono dai metadati del Progetto I.F.F.I. (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), mentre le erosioni di sponda sono state registrate da Rigon durante i rilievi in campo. Mediante il modello statistico bivariato “*Weight of Evidence*” (W.of.E.) i dissesti censiti sono stati messi in relazione a vari fattori predisponenti ottenendo una mappa della propensione ai dissesti caratterizzata da tre classi di suscettibilità in relazione all’intensità degli eventi meteorici. La

mappa delle aree sorgente di legname è quindi stata ottenuta incrociando la carta dell'approvvigionamento con le carte di suscettibilità ai dissesti, ottenendo i seguenti scenari:

- **Scenario 1:** (massa forestale x alta suscettibilità ai dissesti) Si tratta dell'ipotesi più probabile, in quanto comprende le aree più facilmente erodibili e molto propense all'innescò di colate, anche con eventi meteorici non eccezionali. A questi fenomeni è attribuibile un tempo di ritorno inferiore ai 10 – 20 anni.
- **Scenario 2:** (massa forestale x media suscettibilità ai dissesti) Questo è il caso intermedio, le aree in dissesto coinvolte sono più estese e il contributo delle colate detritiche aumenta notevolmente. In questo caso si ipotizza tempi di ritorno compresi tra i 20 e i 100 anni.
- **Scenario 3:** (massa forestale x bassa suscettibilità ai dissesti) In questo caso vengono coinvolte tutte le aree con suscettibilità al dissesto, anche minima. Si tratta di eventi del tutto eccezionali che si riferiscono a tempi di ritorno superiori a 100 – 200 anni.

#### TRASFERIMENTO VERSANTE

Il sottomodulo di trasferimento lungo il versante calcola la probabilità d'immissione in alveo del legname prodotto dalle aree sorgente. Questo materiale è infatti situato in aree anche distanti dai collettori e quindi solamente una parte di esso arriva fino alle reti idrografiche. Il suo moto lungo i versanti è inoltre condizionato da diversi fattori, la pendenza e la forma dei versanti in particolar modo, ma anche la presenza di ostacoli come la vegetazione arborea stabile. Dei tre scenari prodotti dal sottomodulo "reclutamento" viene quindi simulata la traslazione lungo i versanti ottenendo altrettante mappe. La simulazione si arresta una volta che il materiale viene immesso nei corsi d'acqua e il risultato finale è la carta del materiale legnoso in alveo (valore espresso in  $m^3ha^{-1}$ ).

## TRASFERIMENTO RETE IDROGRAFICA

Il materiale giunto dai versanti e quello già presente in alveo a causa delle erosioni di sponda e delle colate detritiche viene trasportato dalla corrente verso valle. La funzione che modella questo processo viene definita *stream decay* ed è basata sullo *unit stream power* (USPI) dell'alveo, strettamente legato al materiale legnoso fluitato. L'USPI viene definito nel seguente modo:

$$(14) \quad \text{USPI} = (S * A^{0,38}) / (3,844 * A^{0,2135})$$

Dove S è la pendenza e A è l'area drenata, mentre il calcolo della larghezza dell'alveo a piene rive è stato fatto a partire dall'area drenata secondo la relazione ottenuta dalle misure in campo. La mappa dello *stream decay* così prodotta evidenzia le zone di torrente con possibile accumulo di legname. È stata quindi simulata la quantità di legname fluitato e depositato all'interno dei torrenti per ognuno dei tre scenari ipotizzati.

## 6.2) Materiale

Il presente lavoro di tesi è incentrato sullo sviluppo di un modello concettuale su base GIS, quindi interamente svolto con l'ausilio di mezzi informatici. Un GIS (Geographical Information System) inteso nel senso generale del termine è composto da dati spaziali, procedure per il trattamento e l'analisi, software dedicato, hardware dedicato e utenti, molto spesso con il termine GIS si intende però il solo software. Tramite esso è possibile gestire, elaborare ed integrare informazioni su base spaziale o geografica, rappresentando il mondo reale attraverso una modellazione per livelli. (Rossi, 2014). Queste sono caratteristiche molto importanti che hanno permesso di sviluppare modelli sempre più precisi e in grado di considerare i diversi fattori coinvolti, che in questo caso non si limitano alle dinamiche interne al corso d'acqua ma coinvolgono anche diverse caratteristiche e fenomeni delle aree circostanti comprese nel bacino idrografico. Il software GIS utilizzato è ArcGIS 10.2.2®, con estensione TauDEM 5.1® (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Model*) sviluppata da Tarboton D.G. (2001). Altri software utilizzati sono Google Earth® che ha permesso un'esplorazione

virtuale, semplice e rapida, del territorio oggetto d'indagine e il pacchetto Office®, in particolar modo Excel® per un'ulteriore elaborazione dei dati e la produzione di grafici e tabelle di sintesi. I principali tipi di file che sono stati gestiti tramite ArcGIS® sono quelli vettoriali (nel formato Shape File) e quelli raster (con estensione .adf), essi rappresentano le due metodologie di modellazione dei dati spaziali comunemente adottate dai software GIS. Oltre a questi, sono stati prodotti output di tipo tabellare (.dbf) e grafico (layout in formato .jpg) utili all'interpretazione dei dati ed è stato utilizzato il servizio wms fornito dal ministero dell'ambiente (al sito [www.pcn.minambiente.it](http://www.pcn.minambiente.it)) che permette la visualizzazione online di diversi *open data*, in particolare ortofoto e cartografia IGM. I principali dati in input utilizzati in questo progetto sono i seguenti:

- **DTM (*Digital Terrain Model*)**

Modello digitale del terreno CTR-derivato con risoluzione spaziale 5x5 m comprendente la porzione veneta del bacino del Cordevole. Il DEM è stato realizzato dal CNR di Pisa e i dati di partenza sono le curve di livello e i punti quotati desunti dalla CTRN (basata su rilievi del 2007). Questi file sono scaricabili in formato ASCII dal Geoportale Veneto con estensione spaziale pari alle singole sezioni CTR. Alcune piccole aree di bacino appartengono però al territorio amministrativo trentino, pertanto sono stati scaricati i relativi file raster dal portale geocartografico della provincia di Trento. Questi ultimi sono derivati da rilievi LIDAR e presentano celle di 1x1 m di dimensione.

- **Catasto Opere SIF-RV**

Catasto delle opere di sistemazione idraulica della Regione Veneto, consultabile tramite ArcGIS. Tale progetto è stato coordinato dalla Regione Veneto con la collaborazione del Centro Valanghe di Arabba che ha organizzato le campagne di rilevamento. Le opere sono suddivise in categorie e corredate di dati tecnici (non sempre presenti) sulle dimensioni, sull'accessibilità e sullo stato di

manutenzione. L'elenco delle opere risulta però incompleto e non aggiornato poiché il progetto è stato sospeso ormai da diversi anni.

- **Carta dei particellari**

Carta ottenuta dai Piani Economici-Forestali dei comuni di Alleghe, Selva di Cadore, Colle S. Lucia, Livinallongo del Col di Lana e Rocca Pietore. Questa mappa digitalizzata contiene la quantità di approvvigionamento dendrometrico, ovvero la massa forestale su unità di superficie espressa in  $m^3ha^{-1}$ .

- **Progetto I.F.F.I.**

Il progetto I.F.F.I (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) costituisce il primo inventario omogeneo e aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale. I dati sono stati raccolti, elaborati e resi disponibili online dal *Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia* dell'ISPRA in collaborazione con le Regioni e le Province Autonome.

- **Dati territoriali dal Geoportale Veneto**

L'infrastruttura dei dati territoriali del Veneto, consultabile al sito <http://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/> mette a disposizione numerosi dati territoriali e prodotti cartografici. Sono risultati utili in particolare la carta geolitologica e la carta di uso del suolo.

- **Servizio WMS del Geoportale Nazionale**

Il geoportale del Ministero dell'Ambiente ([www.pcn.minambiente.it](http://www.pcn.minambiente.it)) mette a disposizione un servizio WMS (Web Map Services). Esso è stato utilizzato per la visualizzazione di ortofoto e cartografia IGM 1:25000 che hanno agevolato l'interpretazione e l'elaborazione dei dati.

## 6.3) Metodologie di lavoro

La parte pratica del presente progetto di tesi è stata svolta con l'ausilio del computer, prevalentemente mediante il software ArcGIS® e può essere distinta in alcune fasi successive: la creazione di un unico file DEM che comprenda l'intero bacino del Cordevole, l'analisi idrologica e morfometrica dell'area di studio, l'individuazione e la rappresentazione in ambiente GIS delle opere in alveo con valutazione delle principali caratteristiche e della probabile interazione con il legname fluitato ed infine la fase di modellazione che ha permesso di ottenere le varie mappe di reclutamento e trasferimento del legname.

### 6.3.1) Elaborazione DEM e analisi idrologiche e morfometriche

I singoli file DTM scaricati dai due portali geocartografici sono stati convertiti dal formato ASCII in formato *.adf* e gli è stato assegnato il corretto riferimento spaziale, ovvero Monte Mario Italy 1 per i dati veneti e WGS84-UTM Fuso 32 N per i dati trentini. Questi file raster sono quindi stati mosaicati assieme creando un unico DTM con risoluzione 5x5 m. Tale operazione ha permesso di eseguire le successive elaborazioni senza trascurare le porzioni trentine del bacino.

L'analisi idrologica è stata eseguita principalmente mediante gli strumenti contenuti nell'*Hydrology toolset* di ArcGIS® e l'utilizzo di Excel® per alcune ulteriori elaborazioni. Come primo passaggio è stato necessario eseguire la rimozione delle depressioni locali presenti nel DTM, spesso causate da imperfezioni del raster, che avrebbero alterato i risultati. Tale operazione è stata eseguita mediante un apposito algoritmo di riempimento (*Fill*). In seguito sono stati prodotti i raster di direzione di deflusso e di area drenata. Una volta ottenuta la mappa di accumulo del deflusso e stabilita la sezione di chiusura (poco a monte della confluenza con il Fiume Piave) è stato possibile definire lo spartiacque che delimita il bacino d'interesse. L'estrazione del reticolo sintetico è stata eseguita considerando un'area di soglia di 16 ha, valutata come valore attendibile sulla base di rilievi in campo (Rigon, 2009).

Lo strumento utilizzato in questa operazione è stato il “calcolatore raster”. Il reticolo è stato quindi gerarchizzato secondo l’indice di Horton-Strahler e vettorializzato, lo *shape file* rappresentante l’ordine dei collettori così ottenuto ha fornito ulteriori informazioni, quali la lunghezza di ogni tratto e il numero di rami di ciascun ordine. Dal DTM sono stati ricavati anche diversi parametri morfometrici del bacino fra cui la distribuzione delle quote, delle pendenze e dell’esposizione. Le principali informazioni ottenute da queste elaborazioni, mediante le statistiche raster e i comandi “riepiloga” e “calcola geometrie” per i file vettoriali, sono: l’area del bacino, il perimetro del bacino, la lunghezza totale dei collettori per ogni ordine, il numero di rami per ogni ordine, quote, pendenze ed esposizioni minime, massime e medie. Questi dati sono stati utilizzati per calcolare i seguenti parametri ed indici:

#### DENSITÀ DI DRENAGGIO

Rapporto fra la lunghezza totale di un reticolo idrografico (L) e la superficie del bacino che lo comprende (A), generalmente espressa in  $\text{km}^{-1}$ . Esso dipende da quanto il reticolo idrografico è ramificato e generalmente presenta valori molto alti in presenza di terreni impermeabili.

$$(15) \quad D = L / A$$

#### INDICE O FATTORE DI FORMA

Rapporto fra la lunghezza L dell’asta principale ed il diametro del cerchio avente una superficie pari all’area A de bacino. Esprime la forma allungata o compatta di un bacino.

$$(16) \quad Rk = 0,89 * L / \text{radq}(A)$$

## INDICE DI COMPATTEZZA DI GRAVELIUS

Rapporto fra il perimetro  $P$  del bacino e la circonferenza del cerchio avente una superficie pari all'area  $A$  del bacino.

$$(17) \quad R_k = 0,28 * P / \text{radq}(A)$$

## RAPPORTO DI BIFORCAZIONE

La prima legge di Horton afferma che in un bacino il rapporto tra il numero  $N_w$  dei corsi d'acqua di ordine  $w$  ed il numero  $N_{w+1}$  dei corsi d'acqua di ordine  $w+1$  è circa costante. Esso prende il nome di rapporto di biforcazione ( $R_b$ ) ed è normalmente compreso tra 3 e 5.

$$(18) \quad R_B = N_w / N_{w+1}$$

## RAPPORTO DELLE LUNGHEZZE DEI CORSI D'ACQUA

La seconda legge di Horton afferma che in un bacino il rapporto tra la lunghezza media  $L_w$  dei corsi d'acqua di ordine  $w$  e la lunghezza media  $L_{w-1}$  dei corsi d'acqua di ordine  $w-1$  è circa costante. Tale rapporto prende il nome di rapporto delle lunghezze dei corsi d'acqua ed è normalmente compreso tra 1,5 e 3,5.

$$(19) \quad R_L = L_w / L_{w-1}$$

### 6.3.2) Opere in alveo

Le opere in alveo possono influire notevolmente sulle dinamiche di trasporto del legname lungo il corso d'acqua, per questo motivo sono state localizzate, classificate e incluse nel modello. L'individuazione delle opere è avvenuta principalmente tramite Google Earth®, percorrendo virtualmente i corsi d'acqua del bacino e cercando dove possibile un'inquadratura nella modalità *Street View* che permettesse di apprezzarne le caratteristiche. Le opere sono state classificate in cinque tipologie: (1) ponti, (2) briglie basse ( $h < 2m$ ), (3) briglie alte ( $h > 2m$ ), (4) briglie filtranti e (5) dighe. Per ognuna di esse è stato quindi valutato il "grado di bloccaggio", ovvero la loro capacità di bloccare il legname fluitato espressa con un valore da 0 a 100. Tale valore è stato valutato in base alla tipologia dell'opera, alle sue dimensioni e forma e alle caratteristiche del canale in cui si trova. Indicativamente per i ponti è stato preso in considerazione il seguente schema basato sull'ampiezza delle luci:

Ampiezza luci (m)	Grado di bloccaggio
< 10	50 ÷ 70
10 ÷ 15	40 ÷ 50
15 ÷ 25	20 ÷ 40
> 25	< 20

nell'attribuzione del valore finale all'opera sono comunque stati considerati anche gli altri fattori. Un altro strumento utile è stato il catasto delle opere SIFRV che ha fornito numerose indicazioni tecniche, però a causa dell'incompletezza di tale elenco e dell'inaccessibilità di alcuni luoghi da parte della funzione *Street View* di Google Earth® non è stato possibile considerare la totalità delle opere presenti sul territorio. In totale le opere rilevate sono 251, ognuna di esse è stata rappresentata in ambiente GIS mediante un punto georeferenziato e corredato delle seguenti informazioni: numero identificativo univoco, codice che ne rappresenta la tipologia e grado di bloccaggio.

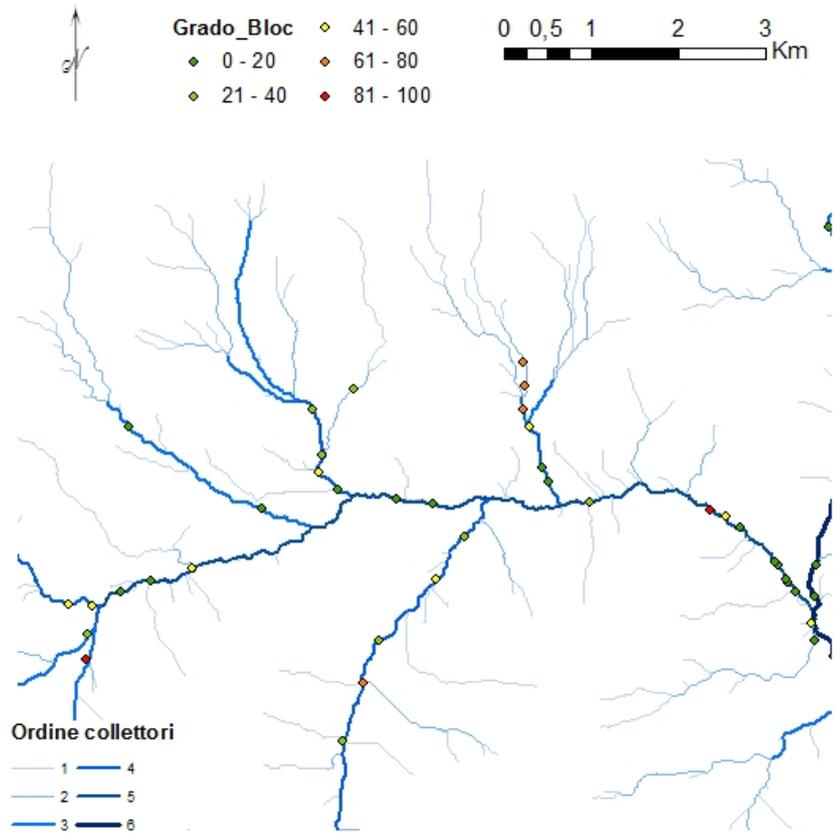


Figura 25- Dettaglio della carta delle opere in alveo. Torrente Biois.

Opere_Cord					
	FID	Shape	Id	Categ	Grad
	147	Punto	0	1	70
	148	Punto	0	1	70
	149	Punto	0	1	30
	150	Punto	0	1	30
	151	Punto	0	1	50
	152	Punto	0	3	80
	153	Punto	0	1	20
	154	Punto	0	1	20
	155	Punto	0	1	25
	156	Punto	0	1	15
	157	Punto	0	1	0
	158	Punto	0	2	20
	159	Punto	0	1	0
	160	Punto	0	2	0
	161	Punto	0	1	0
	162	Punto	0	1	30
	163	Punto	0	1	60
	164	Punto	0	1	60
	165	Punto	0	1	60
	166	Punto	0	1	50
	167	Punto	0	2	30
	168	Punto	0	2	30
	169	Punto	0	1	20
	170	Punto	0	1	0
	171	Punto	0	1	0



Figura 26 - Dettaglio della tabella attributi e foto di alcune delle opere censite. (Immagini da Google Maps®).

### 6.3.3) Sottomodello 1: Reclutamento

Nella prima fase della modellazione è stato necessario produrre la mappa delle aree sorgente per l'intero bacino del Cordevole. Come descritto in precedenza per l'elaborazione svolta da Rigon sull'Alto Cordevole tale mappa deriva dall'intersezione fra la carta della provvigione e la carta dei dissesti. La mappa derivante dai Piani Economici-Forestali dei comuni compresi nell'area dell'alto Cordevole è stata estesa all'intero bacino del Cordevole per estrapolazione geostatistica con le tipologie forestali presenti nella carta di uso del suolo CORINE. La mappa delle aree potenzialmente interessate da fenomeni di dissesto è stata invece ottenuta a partire dai fenomeni censiti nel progetto I.F.F.I. (frane e *debris flow*) applicando il modello statistico bivariato "*Weight of Evidence*" (W.of.E.), i fenomeni di erosione spondale non sono invece stati considerati. Il modello W.of.E. esegue un raffronto dei diversi fattori predisponenti, determinando per ogni classe un peso (positivo o negativo) sulla base della densità dei dissesti ad esso correlata. I fattori considerati sono stati: quota, pendenza, esposizione, concavità, geolitologia e uso del suolo. Sommando i diversi pesi sono state quindi ottenute le mappe della propensione ai dissesti per i due fenomeni indagati, e tali mappe sono state incrociate con quella della provvigione ottenendo la distribuzione e la massa della superficie forestale potenzialmente reclutabile.

### 6.3.4) Sottomodello 2: Trasferimento versante

Ottenuta la mappa della massa forestale potenzialmente in dissesto ne è stato simulato il trasferimento lungo i versanti in modo da determinare la quantità che può giungere ai collettori. La probabilità dell'immissione in alveo della superficie forestale in dissesto è stata modellata mediante la funzione *slope decay*, implementata attraverso l'estensione TauDEM®. Lo spostamento del materiale verso il collettore simulato da tale funzione dipende dalla morfologia locale (in particolare dalla pendenza) e dalla distanza lungo le linee di drenaggio. La simulazione si arresta quando il legname incontra la

piana alluvionale, è stato quindi prodotto un *raster* che riporta la quantità di LW proveniente dai versanti che giunge fino a tale area.

### 6.3.5) Sottomodello 3: Trasferimento rete idrografica

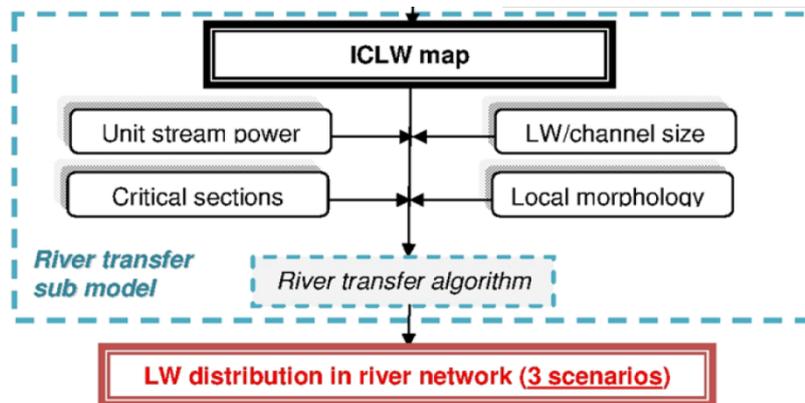


Figura 27 - Schema del sottomodello “trasferimento rete idrografica”. Fonte: Rigon et al. 2015

La terza ed ultima fase ha riguardato la modellazione del trasporto del legname in alveo. In questa simulazione è stato considerato il materiale proveniente dai dissesti (frane e *debris flow*) e quello reclutabile all’interno della piana alluvionale nel caso di eventi di piena eccezionali come quello simulato. I dati utilizzati sono quindi il raster del legname proveniente dai versanti, risultante dal sottomodello “trasferimento versante”, e il raster della provvigione, il quale è stato ritagliato in modo da considerare solamente le aree interne alla piana alluvionale, entrambi sono espressi in  $m^3ha^{-1}$ . L’implementazione del trasferimento è stata fatta tramite l’estensione TauDEM® lungo la linea di direzione del deflusso basata sul DTM fornito dal Geoportale Veneto il cui rilievo risale al 2007; Le opere sono invece state inserite nella mappa in riferimento alle ortofoto del 2012. Nel lasso di tempo trascorso la morfologia dei canali si è modificata ed il punto in cui il corso d’acqua interseca l’opera in molti casi non coincide, pertanto è stato necessario spostare le *features* delle opere censite mediante il comando “Move Outlets To Streams” in modo da sovrapporle al flusso. La funzione che

ha modellato il trasferimento è la “D-Infinity Decaying Accumulation”, la quale crea un *grid* che riporta per ogni cella un valore di quantità accumulata lungo la direzione di deflusso (secondo l’algoritmo *D-infinity*), quantità che è però soggetta a decadimento di primo ordine nel passaggio da una cella all’altra. Per default il contributo quantitativo di ciascuna cella della griglia è proporzionale alle dimensioni stesse della cella, ma può opzionalmente essere espressa tramite un “*grid* dei pesi”, che in questo caso è rappresentato dalla quantità di LW proveniente dai versanti e dalla piana alluvionale. Il *grid* che rappresenta invece il moltiplicatore di decadimento dà la riduzione percentuale della quantità di accumulo dalla cella alla successiva lungo il percorso. Tale tasso di decadimento è dato da due fattori: l’indice di potenza del flusso e le opere SIF che intercettano e bloccano il legname. L’indice di potenza del flusso utilizzato non è un vero e proprio *unit stream power index* (USPI) perché è stato calcolato a partire da pendenza e area drenata sul *grid* che definisce il reticolo idrografico sintetico. La relazione è stata ricavata mediante una regressione lineare multipla utilizzando i dati di USPI, pendenza (*i*) e area drenata (*A*) di 212 tratti monitorati in campo (Rigon et al., 2012). La formula utilizzata è la seguente:

$$(20) \quad \text{Indice di potenza del flusso} = 417.382 + (2.26 * A) + (80.06272 * i)$$

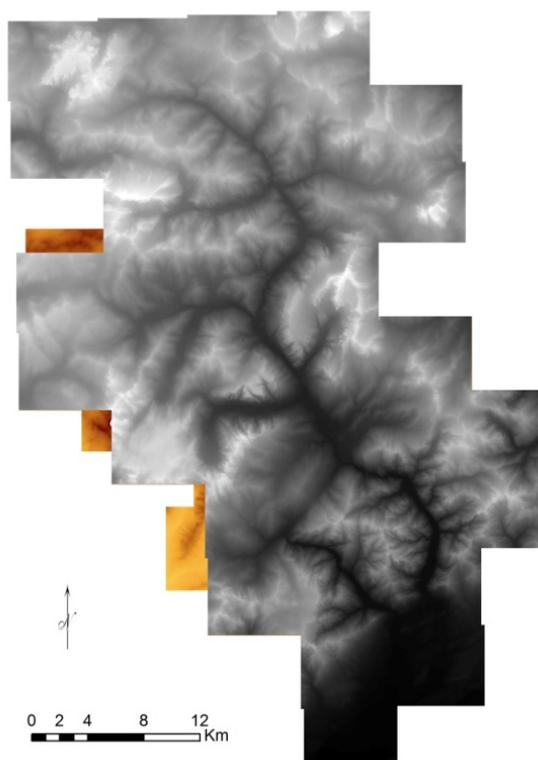
dove *A* è l’area drenata e *i* la pendenza. Questo indice è stato riclassificato nel tasso di decadimento in alveo, includendo anche l’inverso del grado di bloccaggio in corrispondenza delle opere SIF. Il risultato finale è un raster che definisce il materiale accumulato dal corso d’acqua lungo il suo percorso e ogni cella riporta la quantità di LW proveniente da monte. Per conoscere la quantità di LW depositato in un certo tratto va quindi calcolata la quantità in ingresso (dai versanti, dalla piana alluvionale e dal tratto di torrente a monte) e sottrarne la quantità in uscita. Questo procedimento è stato eseguito per i 13 bacini indagati da Rigon (2009) nella sua tesi di dottorato di ricerca, in modo da ottenerne un confronto. Sono stati creati dei poligoni vettoriali comprendenti i 13 sottobacini in esame e mediante lo strumento “statistiche zonali” è stata estratta la somma di tutto il materiale legnoso immesso dal versante e presente in alveo per ognuno di essi. È stata quindi

interrogata la cella del raster di accumulo del materiale presso la sezione di chiusura di ogni sottobacino, essa rappresenta la quantità di legname uscente e va sottratta alla quantità precedentemente calcolata di legname in ingresso per ottenere la quantità di LW depositato. Questo valore è poi stato convertito da  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$  a  $\text{m}^3$  moltiplicandolo per la dimensione delle celle: 0,0625 ha. Lo stesso procedimento è stato poi applicato ai principali sottobacini del Cordevole: Alto Cordevole (chiuso a Caprile), Fiorentina, Pettorina, Biois, Tegas, Mis e il tratto di Cordevole che va da Caprile alla confluenza con il Piave.

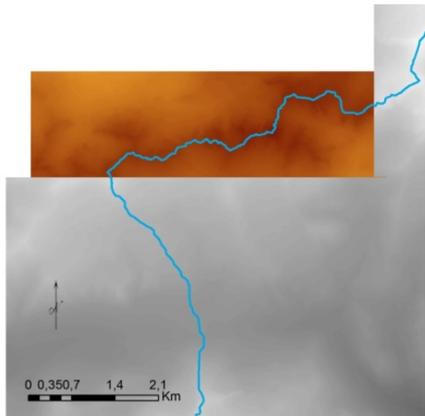
## 7) RISULTATI

### 7.1) Estrazione area drenata T. Cordevole a livello sovra-regionale

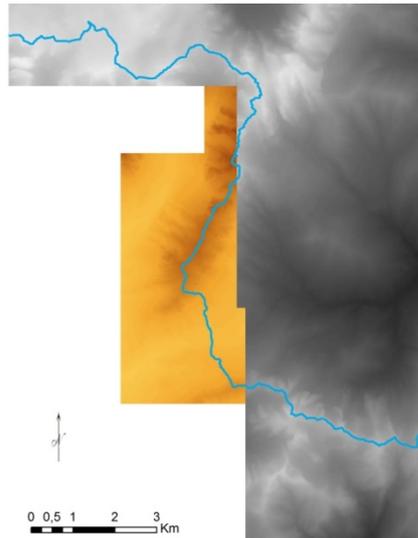
Il Bacino del Cordevole è quasi interamente compreso nella regione Veneto, alcune piccole porzioni però appartengono al territorio trentino. Per un'elaborazione più accurata sono quindi stati scaricati dal portale geocartografico della provincia di Trento i relativi DTM e sono stati mosaicati assieme a quelli veneti. Nella *Figura 1* viene riportato il DTM 5x5 m della porzione veneta del bacino in scala di grigi, mentre le porzioni trentine che sono state aggiunte sono rappresentate con le tonalità giallo-marrone. In *Figura 29a* e *Figura 29b* sono riportati i dettagli di due porzioni del bacino (rappresentato dalla linea azzurra) sconfinanti nella provincia di Trento. In *Figura 29c* è riportato il DTM completo, risultato della mosaicatura di tutti i singolo DTM.



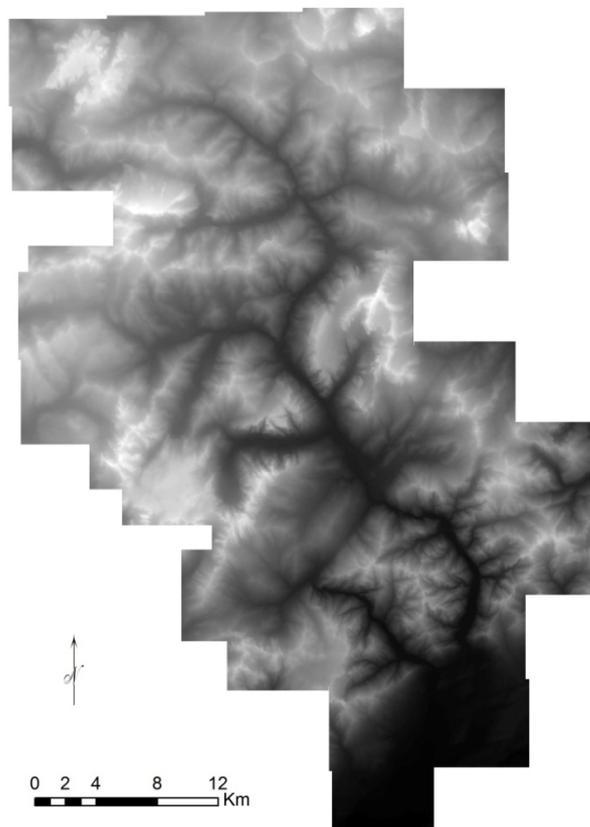
**Figura 28 - DTM Veneto in scala di grigi e DTM Trentino in tonalità giallo-marrone.**



**Figura 29a - Dettaglio DTM Veneto-Trentino. La linea azzurra rappresenta lo spartiacque.**



**Figura 29b - Dettaglio DTM Veneto-Trentino. La linea azzurra rappresenta lo spartiacque.**



**Figura 29c - DTM completo (mosaico DTM Veneti e Trentini)**

## 7.2) Analisi idrologiche

Le analisi idrologiche svolte hanno permesso di ottenere diversi output cartografici e dati descrittivi del bacino, i principali prodotti sono la mappa di direzione del deflusso, il reticolo sintetico, la classificazione di quest'ultimo secondo Horton-Strahler e il calcolo di alcuni parametri idrologici.

### DIREZIONE DI DEFLUSSO

La direzione di deflusso si basa sulla pendenza locale e determina la morfologia del reticolo sintetico. Di seguito viene riportata la mappa prodotta, suddivisa nelle otto direzioni principali.

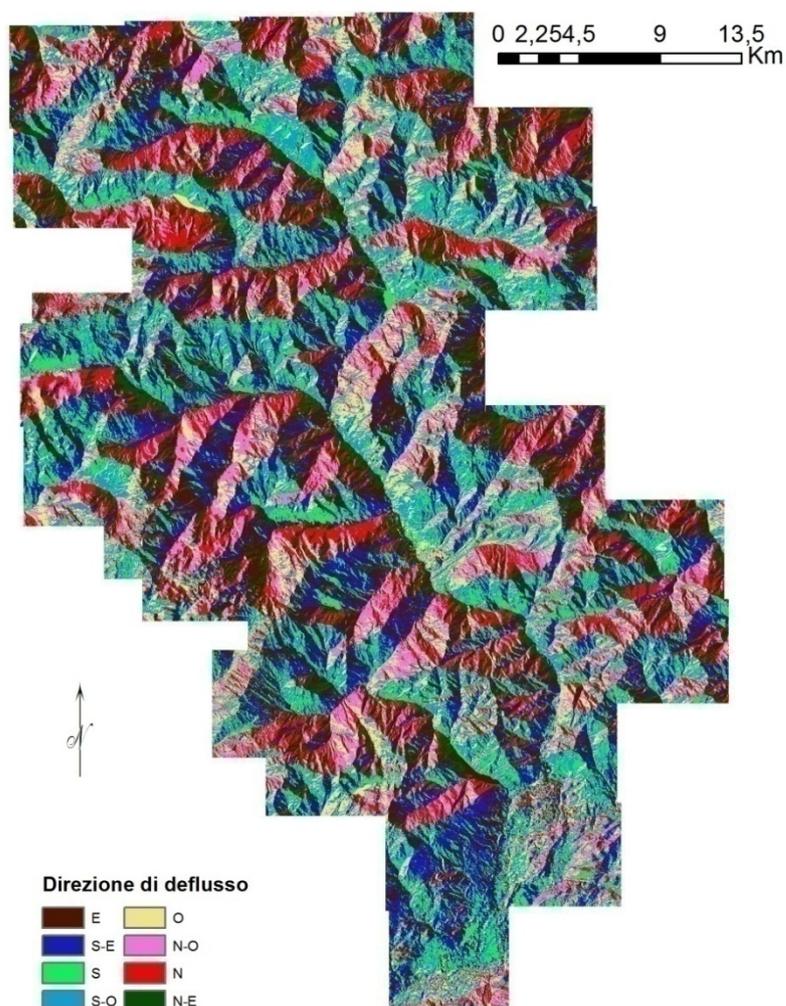


Figura 30 -Raster di direzione di deflusso.

## RETICOLO SINTETICO

Il reticolo sintetico è stato elaborato considerando un'area soglia di 16 ha, tale valore è stato valutato attendibile sulla base di rilievi in campo (Rigon, 2009). Nella *Figura 31* viene riportato un dettaglio della carta IGM 1:25000 riguardante una porzione del bacino del Biois, a tale mappa è stato sovrapposto il reticolo sintetico elaborato (color lilla). Il confronto mostra che in alcune zone il reticolo sintetico elaborato è leggermente meno esteso rispetto alle *blue lines* del prodotto cartografico, ma in generale vi è una buona corrispondenza fra i due.

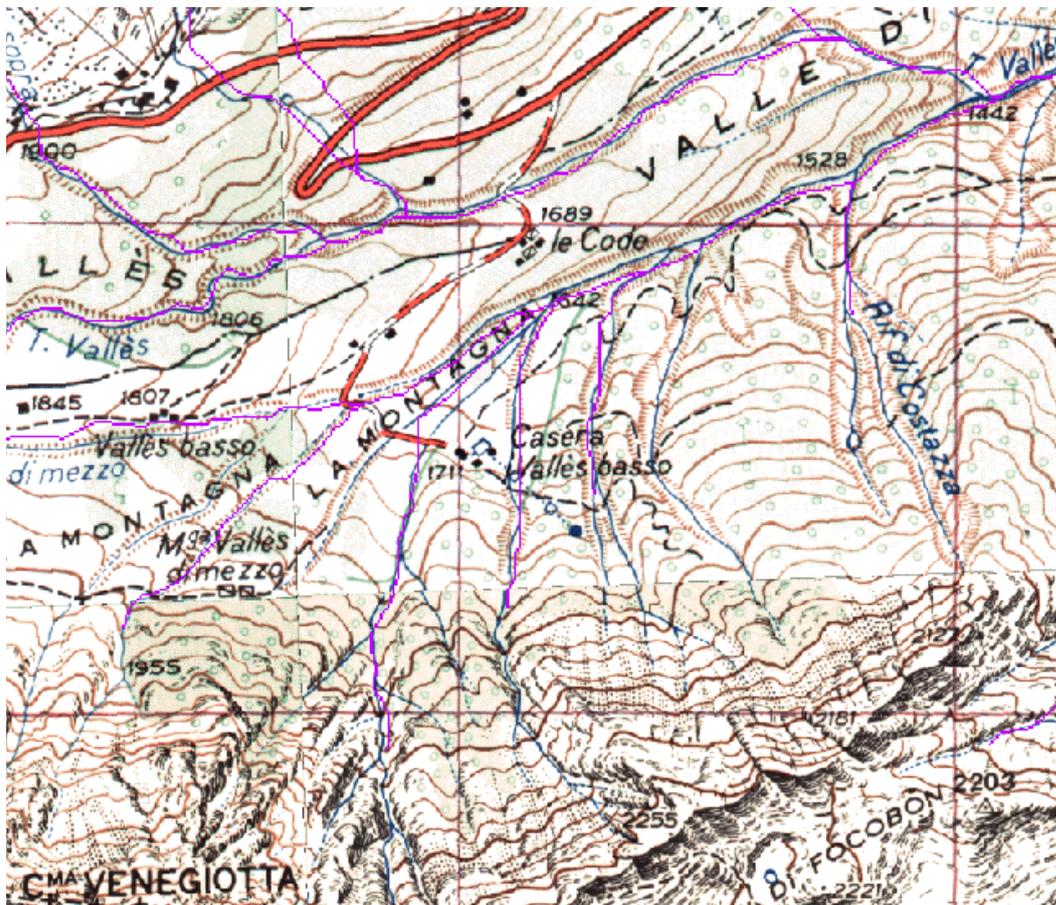
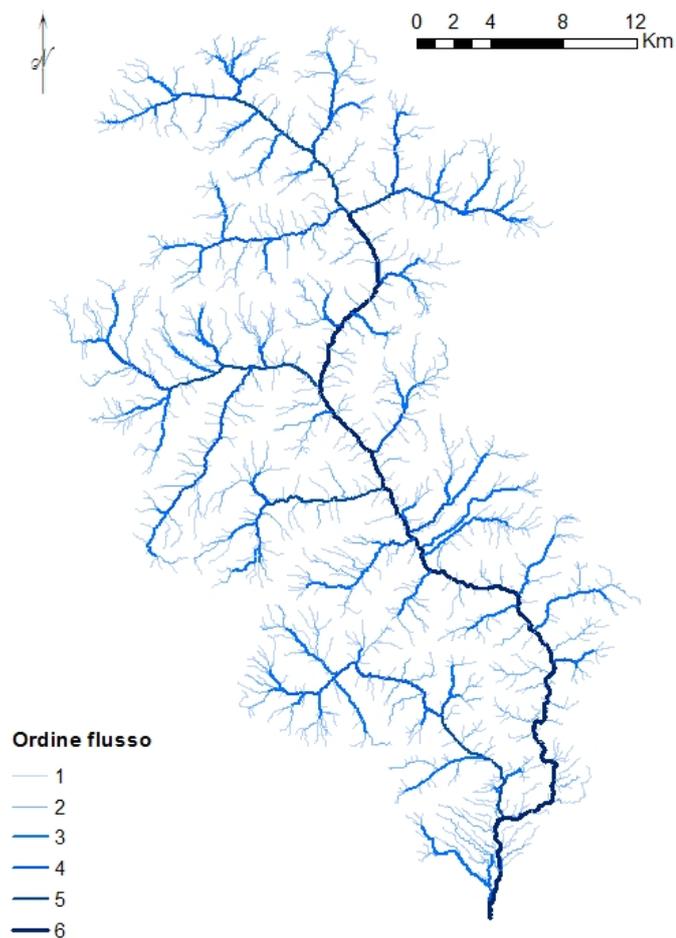


Figura 31 - Dettaglio del reticolo sintetico elaborato (color lilla) con area di soglia di 16 ha, a confronto con i canali (segmenti blu) rappresentati nella carta IGM 1:25000.

## GERARCHIZZAZIONE SECONDO HORTON-STRAHLER

Sulla base del reticolo sintetico è stato possibile classificare i collettori secondo la gerarchia di Horton-Strahler, come riportato in *Figura 32*. Si nota che il torrente Cordevole raggiunge il 6° ordine dopo la confluenza con il Fiorentina. Nella tabella successiva sono riportate per ogni ordine il numero di rami (N), la lunghezza totale (L), la lunghezza media ( $L_m$ ) e i rapporti di biforcazione ( $R_B$ ) e delle lunghezze dei corsi d'acqua ( $R_L$ ).



**Figura 32 - Classificazione di Horton-Strahler.**

Ordine	N	L (m)	L <sub>m</sub> (m)	R <sub>B</sub>	R <sub>L</sub>
1	1368	760068	556	4,5	-
2	305	324225	1063	4,2	1,9
3	73	163403	2238	3,5	2,1
4	21	81838	3897	4,2	1,7
5	5	39365	7873	5,0	2,0
6	1	57196	57196	-	7,3

**Tabella 4 - Per ogni ordine dei collettori viene riportato il numero di rami (N), la lunghezza totale (L), la lunghezza media (L<sub>m</sub>), il rapporto di biforcazione e i rapporti di biforcazione (R<sub>B</sub>) e delle lunghezze dei corsi d'acqua (R<sub>L</sub>).**

## PARAMETRI IDROLOGICI

La tabella seguente contiene i principali parametri idrologici calcolati:

Lunghezza totale rete idrografica	1426 km
Lunghezza collettore principale	75 km
Pendenza media collettore princ.	2,60%
Perimetro bacino	201 km
Area bacino	853 km <sup>2</sup>
Densità di drenaggio	1,67 km <sup>-1</sup>
Indice di forma	2,29
Indice di compattezza di Gravelius	1,93

**Tabella 5 - Principali parametri idrologici**

La densità di drenaggio, calcolata come rapporto fra la lunghezza totale della rete idrografica e l'area del bacino, rispecchia la capacità d'infiltrazione media ed è generalmente alta nel caso di terreni impermeabili e viceversa bassa in presenza di terreni permeabili. Il valore ottenuto sull'intero bacino è leggermente superiore rispetto a quello relativo al bacino chiuso ad Alleghe (1,36 km<sup>-1</sup>), suggerendo la presenza di terreni mediamente più permeabili nella porzione centro-meridionale. La pendenza media del Cordevole, che nel

tratto a monte del lago di Alleghe è del 7%, se si considera l'intera lunghezza risulta pari al 2,6% evidenziando un netto cambiamento.

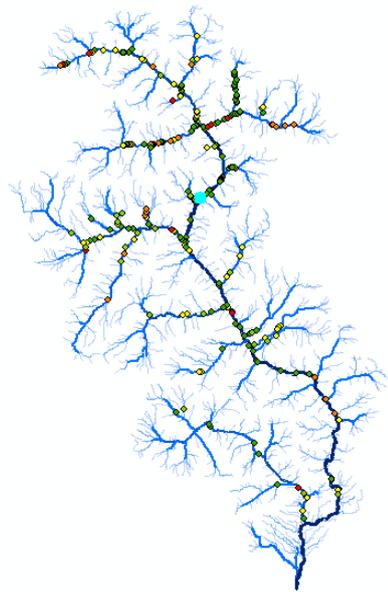
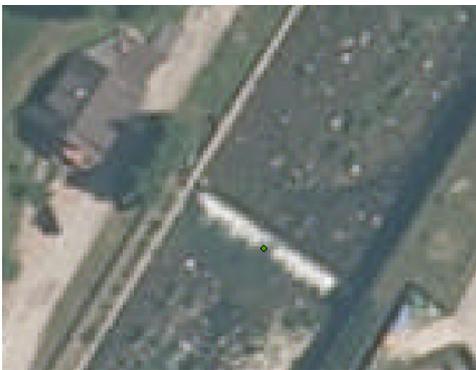
### 7.3) Opere SIF e grado di bloccaggio LW

In totale sono state rilevate, mediante fotointerpretazione delle ortofoto visualizzabili con Google Earth, 251 opere in alveo nel bacino del Cordevole e sono state classificate in base alla tipologia nelle seguenti categorie:

- 1- Ponte
- 2- Briglia bassa (altezza inferiore ai 2 m)
- 3- Briglia alta (altezza superiore a 2 m)
- 4- Briglia filtrante
- 5- Diga

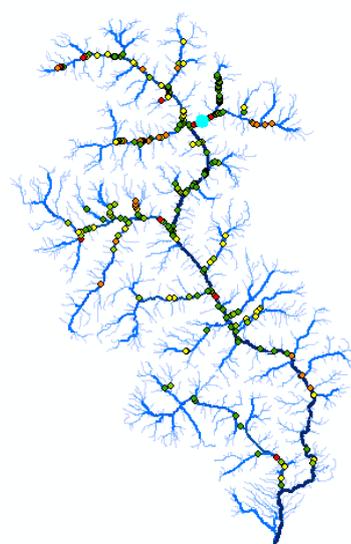
Ad ognuna di esse è stato assegnato un grado di bloccaggio del legname in base alle dimensioni e alle caratteristiche esaminate mediante lo strumento Street View di Google Earth. Negli Allegati è presente la tabella riportante tutte le opere censite, identificate da numero univoco (ID) e corredate di codice della categoria e grado di bloccaggio. Di seguito vengono riportati alcuni esempi con immagini frontali e aeree, localizzazione sulla mappa e tabella attributi.

Opera n°11 – Soglia bassa – Grado di bloccaggio: 0%



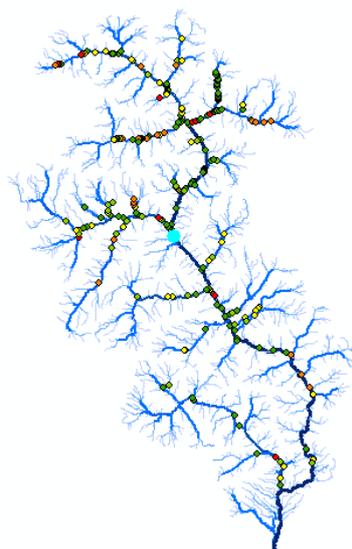
	FID	S	Id	Cate	Grad
	9	Pu	0	1	40
	10	Pu	0	2	0
	11	Pu	0	2	0
	12	Pu	0	1	20
	13	Pu	0	1	10
	14	Pu	0	1	10
	15	Pu	0	2	10

Opera n°112 – Briglia alta – Grado di bloccaggio: 10%



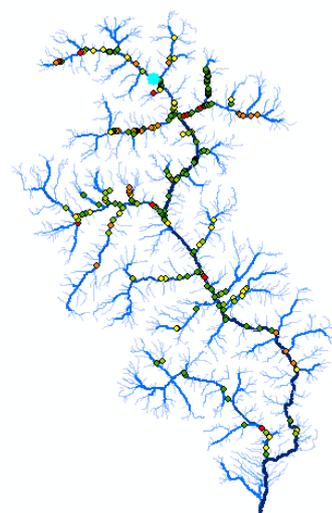
	FID	S	Id	Cate	Grad
	108	Pu	1	0	60
	109	Pu	0	4	100
	110	Pu	0	4	100
	111	Pu	0	1	10
	112	Pu	0	3	10
	113	Pu	0	3	10
	114	Pu	0	4	90
	115	Pu	0	3	10

Opera n°17 – Diga – Grado di bloccaggio: 100%



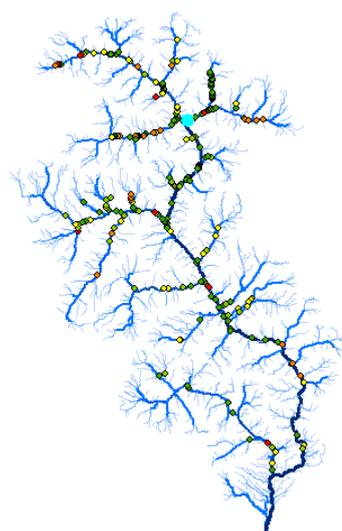
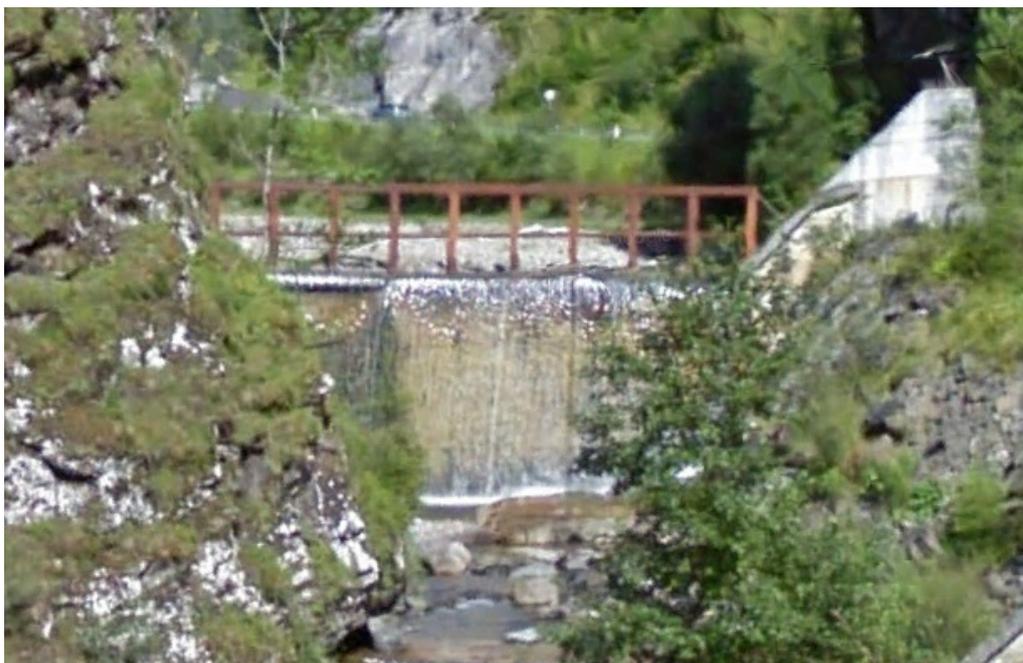
FID	S	Id	Categ	Grad
12	Pu	0	1	20
13	Pu	0	1	10
14	Pu	0	1	10
15	Pu	0	2	10
16	Pu	0	1	60
17	Pu	0	5	100
18	Pu	0	1	50
19	Pu	0	1	0
20	Pu	0	1	50

Opera n°48 – Ponte – Grado di bloccaggio: 60%



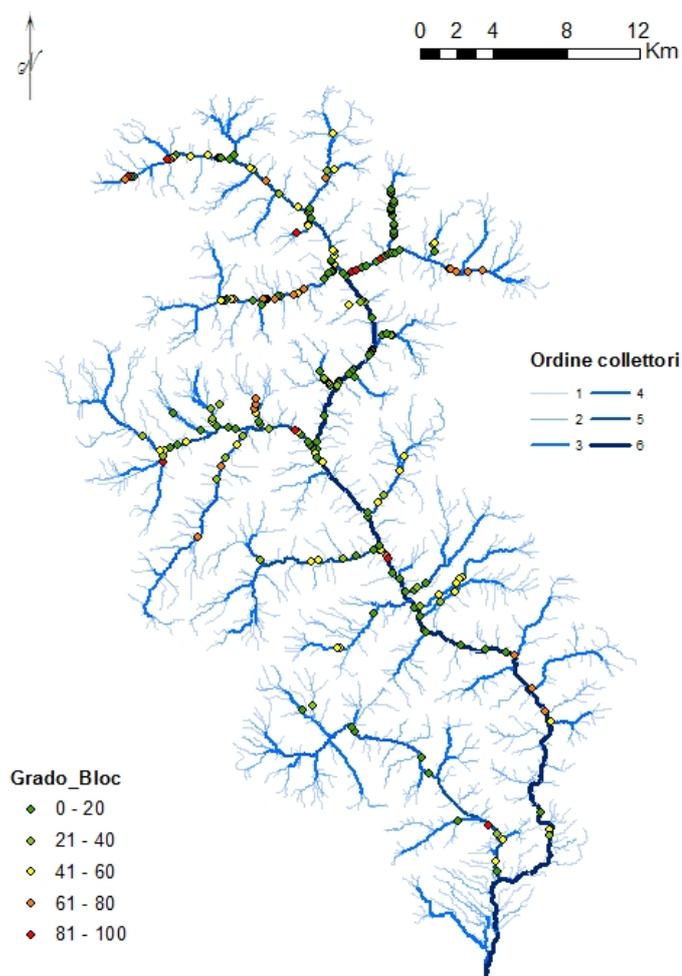
	FID	S	Id	Categ	Grad
	45	Pu	0	3	60
	46	Pu	0	2	10
	47	Pu	0	3	10
	48	Pu	0	1	60
	49	Pu	0	1	30
	50	Pu	0	1	70
	51	Pu	0	1	60

Opera n°109 – Briglia filtrante – Grado di bloccaggio: 100%



	FID	S	Id	Categ	Grad
	108	Pu	1	0	60
	109	Pu	0	4	100
	110	Pu	0	4	100
	111	Pu	0	1	10
	112	Pu	0	3	10
	113	Pu	0	2	10

In *Figura 33* è riportata la mappa dell'intero bacino con il reticolo idrografico gerarchizzato secondo Horton-Strahler e la localizzazione delle opere rappresentate da punti con colori che identificano il grado di bloccaggio. Osservando tale mappa si può avere un'idea dei collettori in cui le opere influiscono maggiormente sulla fluitazione di LW. Alcuni esempi sono il torrente Fiorentina che presenta delle opere a bloccaggio totale in prossimità della confluenza, si tratta di briglie selettive, mentre il rio Codalonga riporta numerose opere ma tutte a basso grado di bloccaggio, la Val Pettorina presenta diverse opere con valore medio di bloccaggio distribuite lungo il collettore principale.



**Figura 33 - Opere in alveo e relativo grado di bloccaggio**

## 7.4) Modellazione trasferimento LW in alveo

La modellazione effettuata in questo lavoro di tesi ha prodotto numerosi risultati, sia cartografici che numerici. Dal primo sottomodello sono emerse le zone in dissesto e la relativa provvigione delle aree boscate. Nel secondo sottomodello il legname potenzialmente movimentabile è stato trasferito lungo i versanti e ne è stata determinata la quantità e la localizzazione della porzione in grado di giungere alla piana alluvionale. Il terzo sottomodello ha permesso di simulare il trasferimento di tale legname lungo i canali, sommandolo alla vegetazione reclutabile presente all'interno della piana alluvionale.

### 7.4.1) Raster finale di trasferimento LW in alveo

Il risultato finale di queste elaborazioni è stato il raster che rappresenta il materiale legnoso fluitato, espresso in  $m^3ha^{-1}$ . La consultazione di tale mappa permette di individuare rapidamente i tratti di canale in cui transitano le maggiori quantità di legname. Tale esame, in relazione anche alle sezioni critiche rilevate e alla presenza di centri abitati o altri elementi esposti, può dare un'indicazione sui punti che richiedono una priorità d'intervento. Un'immagine dell'intero bacino risulta visivamente complessa, vengono pertanto riportati di seguito i dettagli di alcuni esempi significativi e nella sezione Allegati una panoramica di alcune zone.

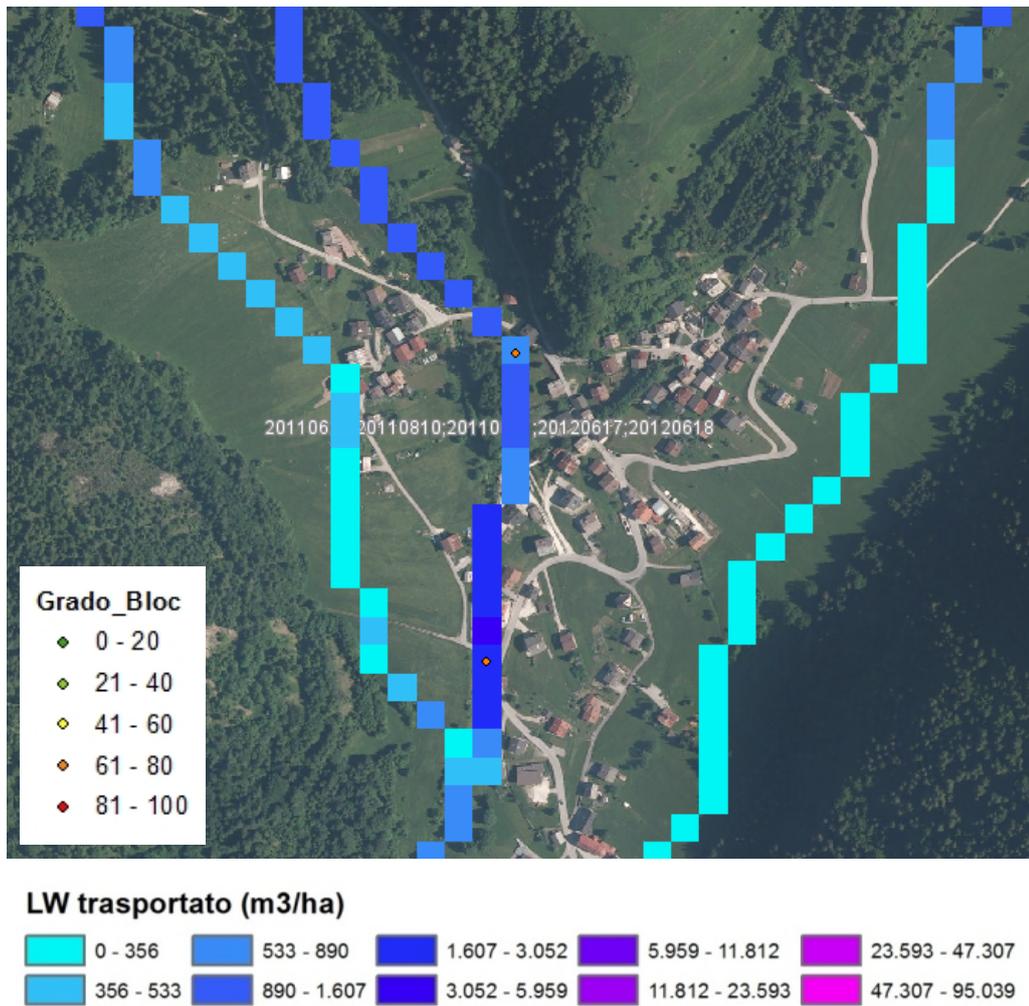


Figura 34 - Dettaglio del raster di trasferimento lungo la rete idrografica su ortofoto 2012, abitato di Toffol.



Figura 35 - Ponte a luce ridotta presso l'abitato di Toffol. Opera n°183.

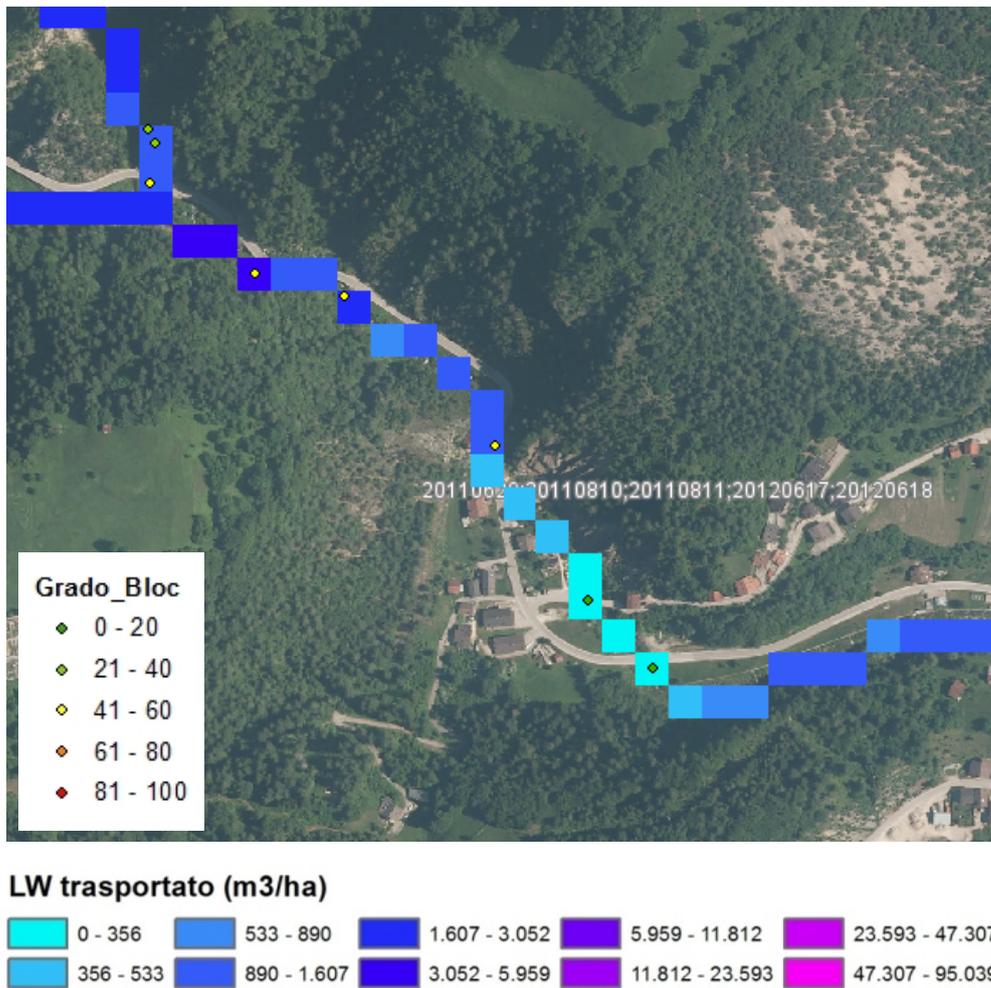
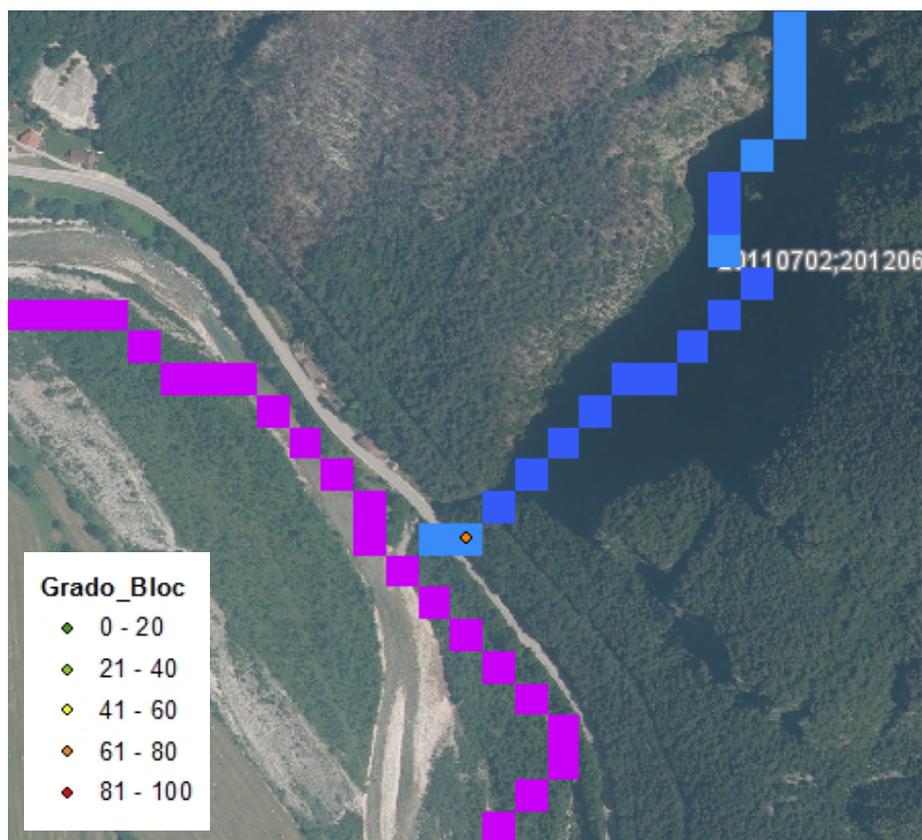


Figura 36 - Dettaglio del raster di trasferimento lungo la rete idrografica su ortofoto 2012.



Figura 37 - Ponte a luce ridotta. Opera n°163.



**LW trasportato (m3/ha)**



Figura 38 - Dettaglio del raster di trasferimento lungo la rete idrografica su ortofoto 2012.



Figura 39 - Ponte a luce ridotta. Opera n°236.

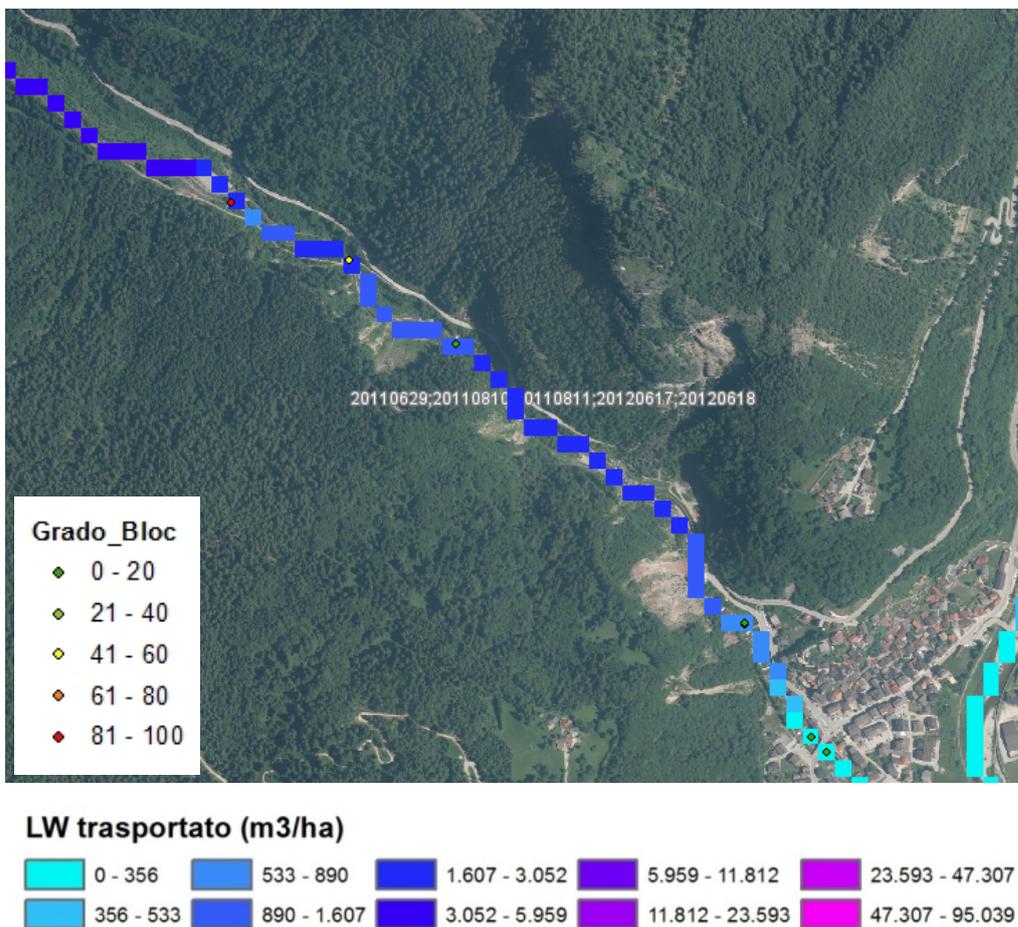


Figura 40 - Dettaglio del raster di trasferimento lungo la rete idrografica su ortofoto 2012.



Figura 41 - Briglia filtrante. Opera n°177.

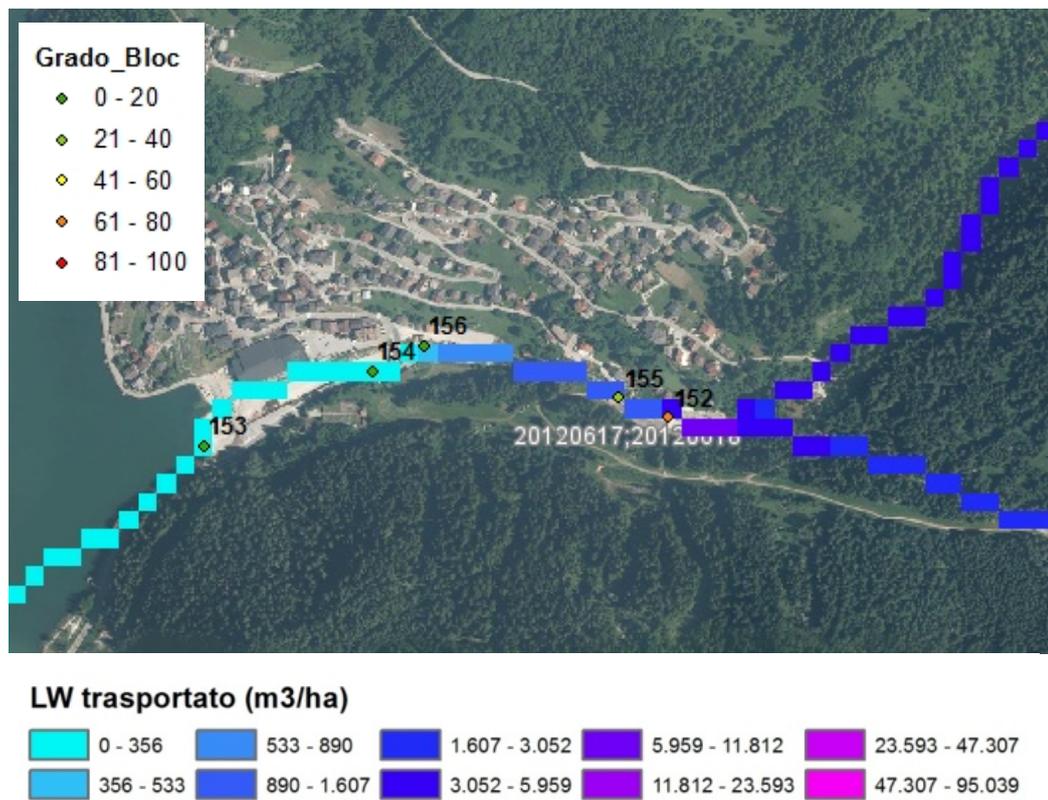


Figura 42 - Dettaglio del raster di trasferimento lungo la rete idrografica su ortofoto 2012. Ru d'Antersass, Alleghe.



Figura 43 - Briglia filtrante in costruzione sul Ru d'Antersass. Opera n°152. Alleghe.

## 7.4.2) Quantificazione del legname depositato nei sottobacini

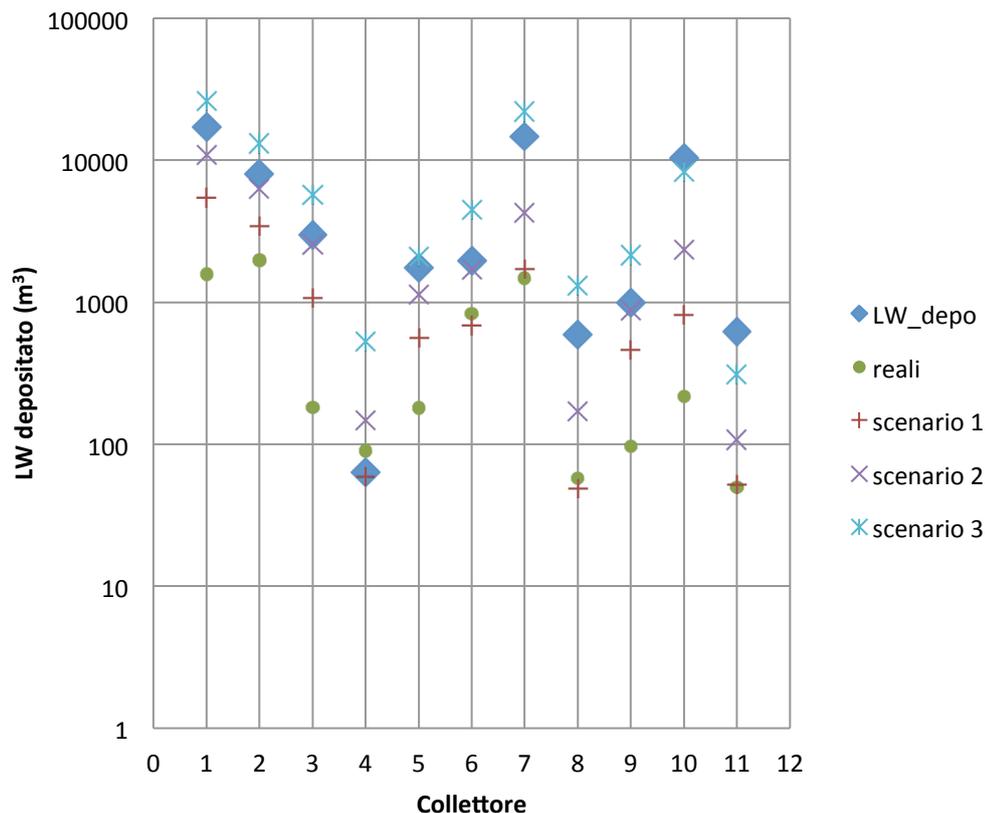
Oltre al legname trasportato dalla corrente è utile conoscere le quantità di LW che può depositarsi in vari tratti. I valori ottenuti possono infatti essere confrontati con rilievi effettuati in campo e con altre simulazioni in modo da valutarne la bontà. Le zone che presentano elevati valori di accumulo potrebbero inoltre causare problemi se situate poco a monte di centri abitati ed elementi esposti, in quanto favoriscono la formazione di ammassi e strutture potenzialmente pericolose. Nella seguente tabella sono riportate le quantità di legname depositato calcolate per gli stessi bacini indagati da Rigon nel progetto di dottorato. I corsi di primo ordine sono stati esclusi perché la modellazione è stata fatta considerando un'area di soglia superiore rispetto al precedente modello. In questo caso il bacino dell'Alto Cordevole prende in considerazione una sezione di chiusura poco a monte della confluenza con il Rio Andraz. I valori riportati in tabella sono rappresentati nel successivo grafico in scala logaritmica, dal quale si può apprezzare l'andamento dei valori calcolati, mediamente compreso fra gli scenari 2 e 3 del modello sviluppato da Rigon.

	Collettore	Ordine	LW_depo (m <sup>3</sup> )	Reali (m <sup>3</sup> )	Scenario 1 (m <sup>3</sup> )	Scenario 2 (m <sup>3</sup> )	Scenario 3 (m <sup>3</sup> )
1	Alto Cordevole	4	17248	1578	5427	10932	26304
2	Andraz	4	7995	1967	3441	6270	13161
3	Codalonga	4	3000	182	1075	2540	5720
4	Code	2	64	90	59	148	532
5	Cordon	3	1756	180	566	1128	2106
6	Davedino	3	1967	838	685	1693	4463
7	Fiorentina	4	14668	1477	1724	4312	22061
8	Molini	2	593	58	49	169	1302
9	Ornella	2	1000	97	463	869	2148
10	Pettorina	4	10348	217	820	2326	8240
11	Valbona	2	617	50	52	108	309

Dati Rigon 2009

**Tabella 6 - Quantità di legname depositato in 11 sottobacini dell'alto Cordevole. LW\_depo sono le quantità risultanti dal presente lavoro, a fianco sono riportati i valori rilevati in campo da Rigon (Reali) e quelli risultanti dalle simulazioni da lui eseguite per gli Scenari 1, 2 e 3.**

## LW depositato a confronto



**Grafico 1 - Grafico rappresentante la quantità di LW depositabile in 11 sottobacini esaminati secondo la simulazione effettuata in questo lavoro (LW-depo), secondo i dati di campo rilevati da Rigon (reali) e secondo le simulazioni da lui eseguite per i tre scenari di suscettibilità.**

Di seguito sono riportati i valori di LW depositato calcolati per i principali sottobacini del Cordevole, in questo caso l'Alto Cordevole è inteso con sezione di chiusura a Caprile e pertanto comprende anche il Rio Andraz.

COLLETORE	ORDINE	LW_depo (m <sup>3</sup> )
1 Alto Cord. (Caprile)	5	29886
2 Cordevole	6	58707
3 Fiorentina	5	14707
4 Pettorina	4	10459
5 Biois	5	28747
6 Tegnass	5	14529
7 Mis	5	12298

**Tabella 7 - Volume di legname depositabile nei principali sottobacini del Cordevole ottenuto dalla simulazione eseguita.**



## 8) DISCUSSIONE

L'obiettivo del presente elaborato è quello di sviluppare un modello concettuale su base GIS in grado di simulare il trasporto di legname lungo il Torrente Cordevole durante eventi di piena eccezionali, prestando particolare attenzione all'influenza delle sezioni critiche generate dalle opere in alveo. In conclusione riguardo agli effetti si può affermare che la presenza del materiale legnoso all'interno dei collettori assume molteplici e contrastanti funzioni; alcune con conseguenze positive, in particolare sotto l'aspetto ecologico e morfologico, ma altre con risvolti negativi, soprattutto in relazione agli effetti idraulici che possono costituire un fattore di rischio. Facendo un bilancio dei pro e dei contro e considerandone la distribuzione spaziale e temporale si possono trarre delle indicazioni per la gestione dei LW. Gli effetti positivi risultano infatti diffusi lungo tutto il reticolo e durante buona parte dell'anno, mentre gli effetti negativi sono generalmente localizzati in punti precisi e per periodi brevi e determinabili. Nel precedente capitolo sono stati presentati i risultati relativi alle varie fasi del progetto, si tratta di elaborati cartografici e dati numerici riassunti in tabelle e grafici in grado di fornire una rapida indicazione sui fenomeni studiati. I DTM forniti dalla regione Veneto sono CTR-derivati, ovvero basati sulle curve di livello e i punti quotati desunti dalla CTRN, la risoluzione spaziale è di 5x5 m e si riferiscono all'anno 2007. I DTM trentini sono invece LIDAR-derivati e presentano una risoluzione spaziale di 1x1 m. Dei dati provenienti da rilievi LIDAR disponibili per tutto il bacino avrebbero sicuramente concesso una maggior precisione nelle elaborazioni e permesso di intraprendere soluzioni differenti nell'approccio modellistico, con la possibilità ad esempio di considerare la morfologia e l'ampiezza dei corsi d'acqua e di sfruttare la differenza fra DTM e DSM per trarre indicazioni sulla massa forestale. Nonostante i DTM della regione Veneto presentino una qualità medio-bassa, le elaborazioni sembrano fornire dei risultati soddisfacenti, inoltre l'integrazione con i DTM trentini ha permesso di migliorare la definizione dello spartiacque e di ottenere dei risultati più coerenti per i sottobacini

interessati. Le elaborazioni idrologiche sono state eseguite considerando un'area soglia di 16 ha, scelta sulla base di osservazioni in campo svolte da Rigon durante il progetto di dottorato, tale valore ha prodotto un reticolo sintetico con estensione paragonabile alle *blue lines* della carta IGM 1:25000. In questa fase sono stati prodotti numerosi *output*, fra cui la mappa dell'area drenata e la mappa rappresentante i collettori classificati secondo Horton-Strahler, i rapporti di biforcazione e delle lunghezze dei corsi d'acqua, gli indici di forma e di compattezza e i parametri morfometrici del bacino relativi a pendenza, quota ed esposizione. Dai parametri idrologici calcolati per l'intero bacino del Cordevole si può notare una certa differenza rispetto ai valori calcolati per l'Alto Cordevole, com'era prevedibile la pendenza media del canale diminuisce notevolmente, mentre per quanto riguarda la densità di drenaggio, il valore ottenuto sull'intero bacino ( $1,67 \text{ km}^{-1}$ ) è leggermente superiore rispetto a quello relativo al bacino chiuso ad Alleghe ( $1,36 \text{ km}^{-1}$ ). La fase di fotointerpretazione e censimento delle opere in alveo ha prodotto un database di 251 elementi georeferenziati, catalogati secondo la tipologia (ponte, briglia bassa, briglia alta, briglia filtrante e diga) e valutati con un grado di bloccaggio del legname. La consultazione della mappa delle opere crea può di per sé fornire un'indicazione sui tratti di canale in cui il legname è maggiormente influenzato da queste costruzioni e in quale misura. La modellazione, costituita da tre fasi distinte definite "reclutamento", "trasferimento versante" e "trasferimento rete idrografica", ha permesso di ottenere per l'intero bacino del Cordevole la mappa delle aree sorgente di legname, la mappa del trasferimento lungo i versanti della massa forestale movimentabile ed infine la mappa del trasferimento di LW lungo i collettori. Quest'ultima rappresenta, per ogni punto del reticolo idrografico, la quantità di legname fluitato (in  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) prevista per un evento di piena eccezionale. Si tratta pertanto di uno strumento molto utile che potrebbe fornire un valido supporto agli enti preposti alla prevenzione dal rischio idrogeologico e alla gestione dei corsi d'acqua. Nello specifico possono essere individuati i tratti che presentano elevate quantità di LW fluitabile in presenza di sezioni critiche ed in prossimità di centri abitati ed elementi esposti. Alcuni esempi significativi sono stati esposti nel capitolo Risultati. Si possono distinguere

diverse zone in cui il modello stima una quantità rilevante di LW transitante presso ponti con luce ridotta e alcuni di essi si trovano in prossimità di centri abitati o di strade molto trafficate. Un'altra considerazione può essere fatta riguardo le aree soggette a rischio idrogeologico in cui sono state costruite delle briglie selettive al fine di prevenirne i danni. Il modello evidenzia che alcune di queste zone presentano anche valori particolarmente elevati di LW transitante. In questi casi la presenza del legname andrebbe considerata in modo da garantire l'efficienza di tali opere, prevedendo una gestione *ad hoc* per il tratto a monte ed eventualmente integrando delle opere di ritenzione appositamente pensate per il detrito legnoso. Queste ultime possono essere scelte e dimensionate in relazione alla portata unitaria e al volume di LW stimato, come descritto nello schema di Rimböck (2004) riportato nel paragrafo 3.3 "La gestione del legname". Oltre al legname transitante è stato calcolato il legname potenzialmente depositabile in diverse zone, in particolare è stato fatto un confronto con i valori ottenuti dal modello precedentemente sviluppato da Rigon et al. (2012) e i relativi valori misurati in campo. Dei 13 bacini indagati da Rigon ne sono stati valutati 11, sono infatti stati esclusi i due collettori di primo ordine (rio Miniere e rio Bianco) perché l'area soglia utilizzata per la modellazione in questo caso è maggiore. Questo ha influito anche sui bacini di secondo ordine, particolarmente dipendenti dall'apporto di materiale proveniente dai collettori di ordine inferiore, in particolare il rio Code che ha presentato valori bassi, prossimi allo scenario 1. Nella presente tesi è stato preso in considerazione lo scenario con tempo di ritorno più elevato e il confronto con i risultati del modello sviluppato da Rigon lo colloca mediamente fra lo scenario 2 e lo scenario 3. Alcune considerazioni possono essere fatte riguardo ai singoli bacini indagati, il Fiorentina ad esempio presenta valori mediamente più alti rispetto al trend generale, i quali si avvicinano molto allo scenario 3, questo può essere spiegato dalla presenza di numerose opere ad alto grado di bloccaggio. Anche il Pettorina presenta valori alti, superiori allo scenario 3, in questo caso la spiegazione potrebbe essere data dalla metodologia di reclutamento, che nel modello sviluppato da Rigon considerava l'erosione spondale in relazione anche alla tipologia di roccia, nel caso specifico poco erodibili e quindi con

basso apporto di legname, mentre nel presente elaborato il modello prevede il reclutamento di tutta la vegetazione presente in alveo. Per quanto riguarda il bacino del Valbona, che presenta anche in questo caso valori elevati, una spiegazione può essere data dal grado di suscettibilità ai dissesti, che essendo stato determinato sulla base delle caratteristiche delle litologie presenti nella parte più a nord del bacino potrebbero non trovare pieno riscontro con alcune aree più a sud con diversa composizione. In generale si può comunque osservare un andamento di questi valori correlabile alle quantità realmente rilevate in campo, il modello è quindi in grado di fornire importanti indicazioni sulle dinamiche del trasporto di LW e sulle aree maggiormente coinvolte, risultando un utile strumento previsionale che potrebbe fornire un valido supporto alla pianificazione degli interventi volti alla prevenzione dal rischio idrogeologico. Un'ultima indagine è stata fatta sui principali sottobacini del Cordevole, ricavando la quantità di LW depositabile in ognuno di essi. Sarebbe utile anche in questo caso avere un riscontro con il materiale effettivamente presente lungo i collettori in modo da poter valutare la validità del modello anche per l'area centro-meridionale del bacino. Fra le principali limitazioni incontrate in questo lavoro vi è l'assenza di DEM ad alta risoluzione per il territorio indagato, sicuramente dei dati LIDAR-derivati come quelli disponibili per il territorio trentino avrebbero permesso un maggior dettaglio nell'elaborazione e aperto la strada ad altre soluzioni di modellazione. Ulteriori sviluppi futuri potrebbero essere indirizzati alla simulazione di scenari con tempi di ritorno medi e bassi e all'estensione del modello ad altri bacini montani dell'arco alpino, con obiettivo finale la produzione di un servizio *web*-GIS che ne permetta la consultazione *online*.

## 9) CONCLUSIONI

Uno dei problemi principali di chi si occupa di gestione del rischio idraulico in territorio montano è quello di prevedere i fenomeni di trasporto solido durante gli eventi di piena. Il legname in alveo è un materiale solido che ha molteplici aspetti positivi ma che deve essere considerato anche nell'ottica della difesa idrogeologica. Con questo elaborato si è sviluppato un modello concettuale in grado di prevedere il trasporto e la deposizione del legname lungo il Torrente Cordevole (Bl) durante eventi di piena. L'utilità di un tale modello deriva dall'esigenza di una corretta gestione del detrito legnoso, che va effettuata in maniera puntuale e con interventi mirati, in modo da eliminare i fattori di rischio che sono generalmente localizzati e limitati nel tempo, preservando gli effetti positivi i quali sono più diffusi e durevoli. Il presente lavoro si è sviluppato da un'idea e da un primo modello concettuale di Rigon (Rigon 2009; Rigon et al. 2012), al quale sono state apportate due sostanziali innovazioni: l'estensione delle simulazioni all'intero bacino del Cordevole e l'introduzione delle opere di sistemazione idraulico forestale fra i fattori che condizionano il trasporto del legname. Nel perseguire tali obiettivi sono state incontrate alcune complicazioni, la prima ed essere affrontata e risolta è stata l'integrazione dei DTM veneti con quelli trentini in modo da ottenere un unico DTM dell'intero territorio in esame. Anche la fase di individuazione e analisi delle opere in alveo mediante fotointerpretazione ha presentato diverse problematiche. La risoluzione delle ortofoto non è sempre stata ottimale, la funzione *street view* non era disponibile ovunque e quando disponibile spesso le uniche prospettive disponibili rendevano difficoltosa l'interpretazione delle caratteristiche dell'opera. Il catasto delle opere SIF della regione Veneto è stato inizialmente utilizzato come supporto all'individuazione e caratterizzazione delle opere, si è però rivelato di utilità limitata in quanto incompleto. Per i motivi appena descritti non è stato possibile individuare la totalità delle opere presenti nel bacino, le "zone cieche" rappresentano comunque una porzione molto ridotta rispetto ai tratti analizzati. In totale le opere censite sono 251, esse sono state classificate in base alla tipologia, valutate con un grado di bloccaggio del legname, georeferenziate e inserite nel modello. Le analisi morfometriche ed idrologiche condotte hanno fornito numerosi risultati, utili per interpretare le dinamiche di mobilitazione del legname e non solo. La fase di modellazione ha generato prodotti cartografici e dati numerici, dalla mappa delle aree sorgente e quella di trasferimento lungo i versanti alla mappa finale di trasferimento lungo la rete idrografica. A partire da quest'ultima sono state calcolate le quantità di legname depositabile in alcuni sottobacini indagati. Il confronto di tali valori con dati di campo e precedenti simulazioni mostra un

andamento comparabile a quello dei valori reali e che si posiziona mediamente fra gli scenari 2 e 3 simulati nel modello precedentemente sviluppato da Rigon per l'alto Cordevole. I valori che si possono ottenere dal modello sviluppato presentano chiaramente un certo grado d'incertezza, in quanto i fenomeni in gioco sono numerosi, complessi ed aleatori. Tuttavia, anche se solo indicativi, i risultati ottenuti sono importanti per fornire indicazioni sulle dinamiche del trasporto di LW e sulle aree maggiormente coinvolte, risultando un utile strumento previsionale. Il presente lavoro di tesi conclude il percorso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali da me intrapreso, arricchendolo con approfondimenti negli ambiti dell'idrologia, della modellazione, dell'utilizzo di software GIS e di tutti gli aspetti legati alla presenza del legname in alveo, compreso quello del rischio idrogeologico, tema sempre attuale e di grande importanza, che richiede costanti contributi nella comprensione dei fenomeni coinvolti e nella ricerca di soluzioni sempre più efficaci.

## 10) BIBLIOGRAFIA

Abbe, T.B., e Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers: research & management* 12: 201-221.

Abbe T.B., Montgomery D.R., 2003. Patterns and process of wood debris accumulation in the Queets River basin, Washinton. *Geomorphology* 51:81-107.

Alzate L., 2000. Criteri per le modalità di gestione della vegetazione ripariale. Parma, Autorità di bacino del Fiume Po.

Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione. 2007. Piano stralcio per la gestione delle risorse idriche. Piano di bacino del fiume Piave. Relazione. Visualizzabile all'indirizzo internet: [http://www.adbve.it/Documenti/piani/Piave/dpcm\\_21\\_9\\_07/RelazioneRisorseidrichePiave2.pdf](http://www.adbve.it/Documenti/piani/Piave/dpcm_21_9_07/RelazioneRisorseidrichePiave2.pdf)

Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione. 2007. Piano stralcio per la gestione delle risorse idriche. Relazione tecnica. Prima variante. Visualizzabile all'indirizzo internet: [http://www.adbve.it/pai\\_old/RelazioneVAR\\_PAI\\_ITPB.pdf](http://www.adbve.it/pai_old/RelazioneVAR_PAI_ITPB.pdf)

Bertoldi G., 2013. Dinamica del legname nei torrenti montani. Quaderni di idronomia montana 31. Dipartimento TESAF. Università degli Studi di Padova. Editoriale Bios s.a.s. Cosenza.

Braudrick C.A., Grant G.E., Ishikawa Y., Ykeda H., 1997. Dynamics of wood transport in streams: a flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 22: 669-683.

Braudrick C.A., Grant G.E., 2001. Transport and deposition of large woody debris in stream: a flume experiment. *Geomorphology* 41: 263-283.

Campana R., Mantovani M., Pasuto A., Schiavon E., Tagliavini F. e Toffoletto F. (2007). La pericolosità geologica per instabilità dei versanti nell'Alta Val Cordevole. Regione del Veneto, Venezia.

D'Agostino V., 2001. Strutture di legname nella sistemazione dei corsi d'acqua alluvionali: dalla tradizione all'innovazione. Quaderni di idronomia montana (19/1). Il controllo dei fenomeni torrentizi, scienza tecnica e strumenti. Editoriale Bios s.a.s. Cosenza. Pag 329-342.

D'Agostino V., 2015. Corso di Protezione dal rischio idrogeologico. Appunti di lezione. Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali. Università degli Studi di Padova.

Dalla Fontana G., 2014. Corso di Applicazioni GIS in idrologia. Appunti di lezione. Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Degetto, M. 2000. Dinamica del legname in alveo e modellazione del suo comportamento in presenza di briglie filtranti. Tesi di laurea in Scienze Forestali e Ambientali, Università di Padova.

Faustini, J.M., Jones, J.A. 2003. Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. *Geomorphology* 51. 187-205.

Ferro V. (2002). La sistemazione dei bacini idrografici. The McGraw-Hill Companies, Milano.

Gregory et al, 2003. Modelling the dynamics of wood in streams and rivers, *Am. Fish. Soc. Symp.* 37, pp 315-335.

Gurnell A.M., Piégay H., Swanson F.J., Gregory S.v., 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology* 47, 601-619.

Hassan M.A., Hogan D.L., Bird S.A., May C.L., Takashi G., Campbell D., 2005. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. Paper No. 04073.

Ishikawa Y., 1990. Studies on disters caused by debris flow carrying logs down mountain. *SABO Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction*.

Lenzi M.A., 2014. Corso di Fluviomorfologia e riqualificazione fluviale. Appunti di lezione. Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali. Università degli Studi di Padova.

MacVicar B.J., 2009. Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials in wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34, 2031-2046.

Mazzalai P., Cristofori V., Pecorari E., Lenzi M.A., 2006. Briglia a fune sul Fiume Sarca per la trattenuta dei detriti legnosi. In: D'Agostino V. & Fattorelli S. (Eds.), *Le Sistemazioni Idraulico-Forestali per la Difesa del Territorio*, Quaderni di Idronomia Montana 26, Bios, 425-438

Mazzorana B. et al. 2010. Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Springlink.com*.

Melville, B.W. 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 118:615-631.

Montgomery, D.R., Abbe, T.B., Peterson, N.P., Buffington, J.M., Schmidt, K., and Stock, J.D. 1996. Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. *Nature (London)* 381:587-589.

Montgomery, D.R., Buffington, R. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basin. *GSA bulletin*, maggio 1997. Vol. 109, pp. 596-611.

Mutz, M. 2003. Hydraulic effects of wood in streams and river. *American Fisheries Society Symposium* 37, Ed. by S. Gregory, K. Boyer, A. Gurnell. 93-107.

Piloni G., 1607. *Dell'Istoria di Giorgio Piloni Dottor Bellvnesei Dottor Bellunese*. Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze.

Ramanzin M. e Somnavilla G. (2003). *Piano Faunistico Venatorio-Provinciale. Aggiornamento 2003-2008*. Amministrazione Provinciale di Belluno,

Assessorato alla tutela della fauna, alle attività ittiche e venatorie:  
Dipartimento di Scienze Zootecniche Università degli studi di Padova

Rickenman D., 1997. Schwemmholz und Hocheasser. Wasser, energie, luft -  
eau, ènergie, air. 89:115-119

Rigon E., 2009. Il legname in alveo nei torrenti alpini: analisi quantitativa e  
modellazione GIS. Tesi di Dottorato di Ricerca in Territorio, Ambiente,  
Risorse e Salute. Università degli Studi di Padova.

Rigon E., Comiti F., Lenzi A.M., 2012. Large wood storage in streams of the  
Eastern Italian Alps and the relevance of the hillslope processes. Water  
Resources Research, vol. 48

Rossi R., 2014. Corso di Applicazioni GIS in Idrologia. Appunti di lezione.  
Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali. Università degli  
Studi di Padova.

Robinson, E.G., e Beschta, R.L. 1990. Coarse woody debris and channel  
morphology interactions for undisturbed streams in southeast Alaska, USA.  
Earth Surface Processes and Landforms 15:149-156.

Silvano S., Carampin R., Pasuto A. (1987). Franosità del bacino del Cordevole  
e i suoi rapporti con la piovosità. C.N.R. Istituto di geologia applicata, Padova.

Sobota D.J., 2003. Fall directions and breakage of riparian trees along the  
streams in the Pacific North-West. M.S. Thesis. Oregon State University,  
Corvallis.

Soccol E.U., Tessarolo A., 2003. Il rischio idraulico nell'abitato di Caprile. *Tesi  
di Master in Difesa del Suolo e Protezione Civile*. Università degli Studi di  
Padova.

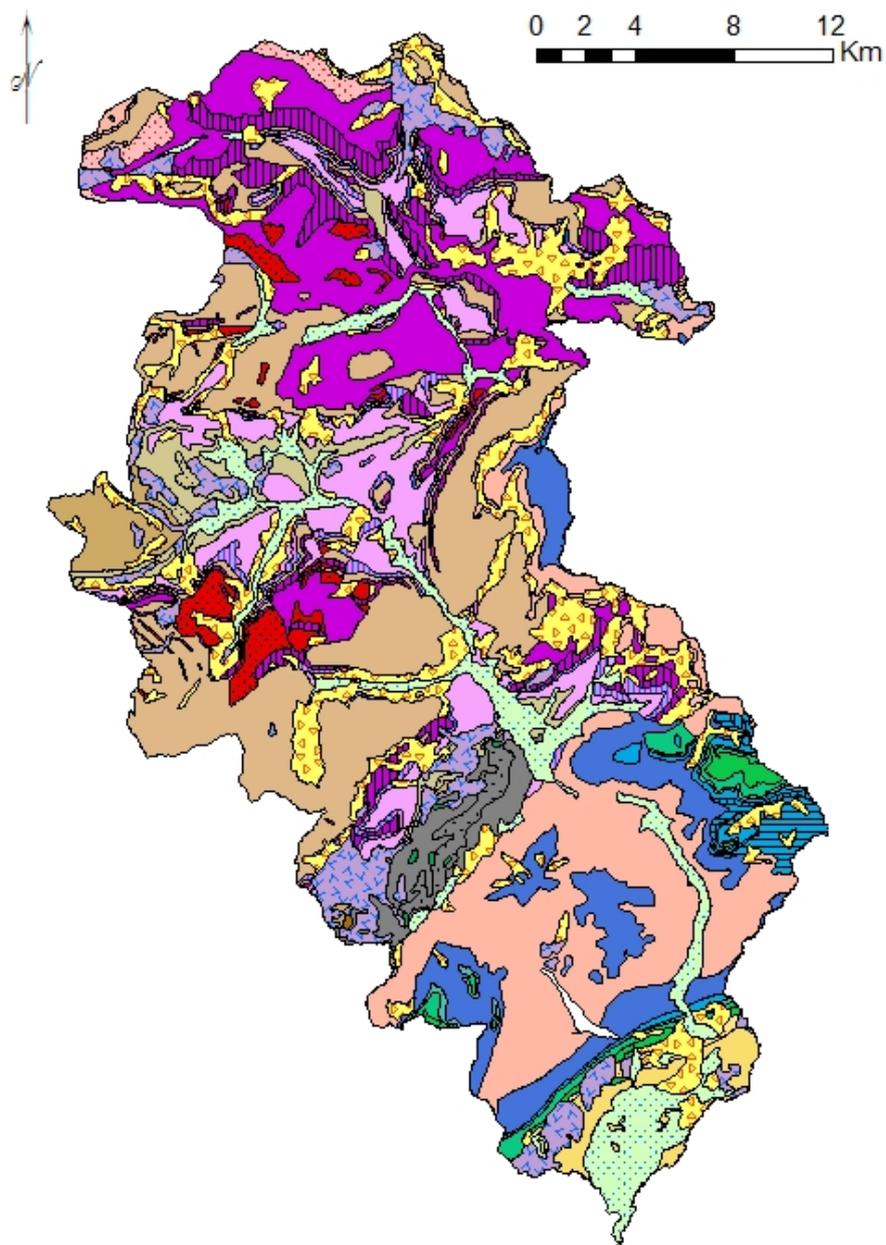
Trentini G., Fossi G., 2015. Linee guida per la gestione della vegetazione lungo  
i corsi d'acqua in provincia di Trento. Pubblicazione realizzata nell'ambito del  
progetto LIFE11/NAT/IT/000187, Trento. Disponibile al sito  
[http://www.lifeten.tn.it/binary/pat\\_lifeten/azioni\\_preparatorie/LifeTEN\\_A7\\_Linee\\_Guida\\_Boschi\\_Umidi\\_A7\\_ITA.1428050017.pdf](http://www.lifeten.tn.it/binary/pat_lifeten/azioni_preparatorie/LifeTEN_A7_Linee_Guida_Boschi_Umidi_A7_ITA.1428050017.pdf)

Uchiogi T., Shima J., Tajima H., Ishikawa Y., 1996. Design methods for wood-debris entrapment. *Proceeding Int. Symp. Interpraevent Garmisch Partenkirchen*. 5:279-288.



## 11) ALLEGATI

Allegato 1: Mappa delle litologie nel bacino del Cordevole



## Litostratigrafia

no data		15 c - Dolomie, dolomie selciferi e breccie dolomitiche - Lias med. - inf.
 1 - Depositi infravallivi		16 - Calcari oolitici ed encriniti, calcari con intercalazioni marnose, dolomie - Dogger inf. - Lias sup.
 2 - Depositi eluviali, colluviali, detritici e di frana - Quaternario		17 a - Dolomie - Trias sup.
 3 a - Depositi morenici - Quaternario		17 b - Calcari dolomitici - Trias sup.
 3 b - Depositi inframorenici		18 - Argilliti siltiti e gessi con subordinati conglomerati, calcari e dolomie - Trias sup.
 4 a - Ghiaie e sabbie prevalenti - Quaternario		19 - Arenarie, calcareniti, breccie calcaree con intercalazioni di peliti - Trias sup.
 4 b - Alternanze di ghiaie e sabbie con limi e argille - Quaternario		20 - Calcari e dolomie di piattaforma - Trias sup. - med.
 4 c - Limi e argille prevalenti - Quaternario		21 a - Arenarie vulcaniche, breccie caotiche poligeniche, siltiti con associati calcari - Trias med.
 5 - Siltiti, argilliti ed arenarie - Pliocene med. - inf.		21 b - Arenarie, calcari, calcari selciferi e bituminosi - Trias med.
 6 a - Molassa sudalpina; conglomerati poligenici - Miocene sup.		22 a - Monzoniti in corpi subvulcanici, colate, filoni, camini vulcanici e tufi - Trias med.
 6 b - Conglomerati poligenici, argilliti e arenarie con lenti conglomeratiche, arenarie quarzose e calcaree, arenarie glauconitiche, siltiti e marne - Miocene sup. - Oligocene sup.		22 b - Andesiti in corpi subvulcanici, colate, filoni, camini vulcanici e tufi - Trias med.
 6 c - Calcareniti e arenarie - Miocene med.		23 a - Rioliti e daciti ("porfiriti") in corpi subvulcanici - Trias med.
 7 a - Calcari nummulitici, calcareniti, calcari di scogliera, arenarie e marne - Oligocene - Eocene		23 b - Rioliti e daciti ("porfiriti") in colate filoni camini vulcanici e tufi - Trias med.
 7 b - Marne e calcari - Oligocene inf. - Eocene		24 - Calcari, arenarie, conglomerati e marne - Trias med.
 8 a - Basalti di colata, filoni e camini di lava - Oligocene - Paleocene sup.		25 - Dolomie e calcari con intercalazioni di marne, arenarie e gessi - Trias med. - inf.
 8 b - Ialoclastiti, tufi e breccie d'esplosione - Oligocene - Paleocene sup.		26 a - Calcari e dolomie con intercalazioni di argilliti e gessi - Permiano sup.
 9 a - Latiti - Oligocene inf.		26 b - Arenarie, siltiti e conglomerati - Permiano sup. - med.
 9 b - Trachiti - Oligocene inf.		27 - Ignimbriti riolitiche e dacitiche, locali andesiti - Permiano inf.
 9 c - Rioliti - Oligocene inf.		28 - Conglomerati poligenici - Permiano inf. - Carbonifero sup.
 10 - Arenarie e calcareniti torbiditiche in fitta alternanza con marne ed argilliti - Eocene		29 a - Calcari cristallini - Devoniano - Siluriano
 11 - Calcari, calcari argillosi e marne - Eocene inf. - Cretaceo sup.		29 b - Argilloscisti - Siluriano - Ordoviciano sup.
 12 - Calcari, calcareniti e breccie di scogliera - Cretaceo		29 c - Arenarie e conglomerati - Siluriano - Ordoviciano sup.
 13 a - Calcari e calcari argillosi selciferi, con intercalazioni di calcareniti e breccie calcaree - Cretaceo - Malm		30 a - Filladi localmente fossilifere - preCarbonifero - Cambriano sup.
 13 b - Alternanze di marne, calcari e calcari selciferi - Cretaceo inf.		30 b - Intercalazioni di metabasiti
 14 - Calcari nodulari e selciferi, argilliti, con intercalazioni di calcareniti e breccie calcaree - Malm - Dogger		30 c - Metabasalti e metavucanoclastiti basiche - Siluriano
 15 a - Calcareniti oolitiche, talora dolomitizzate - Dogger		30 d - Metapsammiti e metarioliti - Ordoviciano sup.
 15 b - Calcari selciferi e marne - Dogger inf. - Lias sup.		

## Allegato 2: Tabella opere in alveo.

ID	Categoria	Grado Blocc
0	5	100
1	1	30
2	3	10
3	3	10
4	3	10
5	3	10
6	3	10
7	3	10
8	3	10
9	1	40
10	2	0
11	2	0
12	1	20
13	1	10
14	1	10
15	2	10
16	1	60
17	5	100
18	1	50
19	1	0
20	1	50
21	1	50
22	1	0
23	1	70
24	3	90
25	1	10
26	2	5
27	1	0
28	1	0
29	1	10
30	1	10
31	1	0
32	3	80
33	1	0
34	3	60
35	1	40
36	1	0
37	1	30
38	1	20
39	1	0
40	1	50
41	2	10
42	3	10

ID	Categoria	Grado Blocc
43	1	50
44	1	40
45	3	60
46	2	10
47	3	10
48	1	60
49	1	30
50	1	70
51	1	60
52	1	60
53	2	10
54	3	10
55	3	20
56	2	10
57	1	10
58	2	10
59	1	50
60	1	60
61	1	0
62	1	60
63	1	70
64	1	90
65	2	0
66	2	10
67	1	90
68	1	80
69	1	10
70	3	30
71	3	10
72	1	60
73	1	40
74	1	80
75	1	60
76	1	90
77	4	90
78	1	50
79	1	100
80	2	10
81	2	10
82	2	10
83	3	10
84	3	10
85	1	20

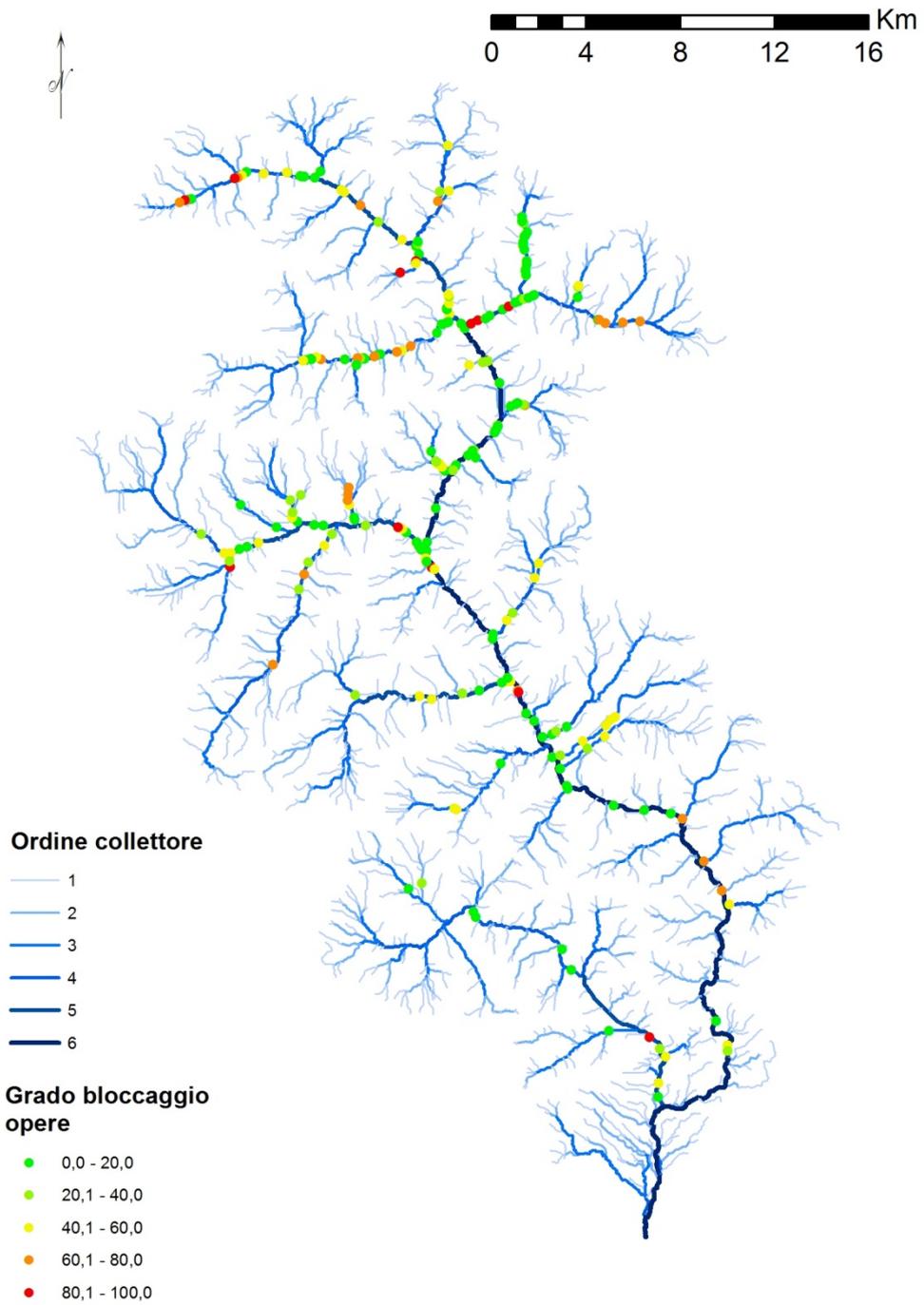
ID	Categoria	Grado Blocc
86	1	70
87	1	60
88	1	70
89	1	80
90	3	20
91	2	0
92	1	70
93	1	0
94	1	0
95	3	10
96	2	0
97	2	30
98	2	30
99	1	70
100	1	10
101	1	80
102	1	0
103	1	70
104	1	60
105	0	0
106	0	10
107	0	0
108	0	60
109	4	100
110	4	100
111	1	10
112	3	10
113	3	10
114	4	90
115	3	10
116	3	10
117	1	10
118	1	40
119	2	10
120	1	0
121	2	20
122	2	0
123	1	10
124	2	10
125	2	10
126	2	20
127	2	10
128	1	10

ID	Categoria	Grado Blocc
129	2	10
130	1	20
131	2	10
132	1	20
133	2	30
134	2	10
135	2	10
136	3	10
137	1	30
138	2	10
139	2	0
140	1	0
141	1	20
142	1	30
143	1	50
144	1	0
145	1	70
146	1	70
147	1	70
148	1	70
149	1	30
150	1	30
151	1	50
152	3	80
153	1	20
154	1	20
155	1	25
156	1	15
157	1	0
158	2	20
159	1	0
160	2	0
161	1	0
162	1	30
163	1	60
164	1	60
165	1	60
166	1	50
167	2	30
168	2	30
169	1	20
170	1	0
171	1	0

ID	Categoria	Grado Blocc
172	2	0
173	2	0
174	2	0
175	2	0
176	1	50
177	4	90
178	1	40
179	1	0
180	1	0
181	1	50
182	1	70
183	1	70
184	1	70
185	1	40
186	1	50
187	1	40
188	1	80
189	1	40
190	1	80
191	1	10
192	3	20
193	1	20
194	1	50
195	1	40
196	1	30
197	1	40
198	1	0
199	1	20
200	1	50
201	1	0
202	1	0
203	1	50
204	1	100
205	1	30
206	1	50
207	1	40
208	1	0
209	1	0
210	5	50
211	1	40
212	1	60
213	1	60
214	1	0

ID	Categoria	Grado Blocc
215	1	0
216	1	40
217	1	50
218	1	60
219	1	30
220	1	0
221	3	10
222	1	40
223	1	0
224	1	20
225	1	60
226	1	50
227	1	30
228	1	50
229	1	0
230	1	60
231	1	50
232	1	50
233	1	30
234	1	50
235	1	10
236	1	80
237	1	80
238	1	50
239	1	0
240	1	50
241	1	50
242	1	30
243	5	100
244	1	10
245	1	10
246	3	10
247	3	0
248	1	0
249	1	30
250	1	20

### Allegato 3: Mappa opere in alveo



## Allegato 4: Dettaglio mappa “trasferimento rete idrografica”

