



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Facoltà di Agraria**

**Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali**

**Corso di Laurea Triennale in Tutela e Riassetto del Territorio**

**TESI DI LAUREA**

**NUOVE METODOLOGIE GIS PER LA  
QUANTIFICAZIONE DEL LEGNAME IN ALVEO NEI  
TORRENTI ALPINI**

Relatore:

Prof. Mario Aristide Lenzi

Correlatore:

Dott. Emanuel Rigon

Laureando:

Riccardo  
Rainato

Anno Accademico 2007 – 2008







# Indice generale

1. INTRODUZIONE .....	1
2. IL LEGNAME IN ALVEO .....	3
2.1 EVOLUZIONE DELLA GESTIONE TERRITORIALE ED INFLUENZE SUL LEGNAME IN ALVEO .....	3
2.2 NOMENCLATURA DEI DETRITI LEGNOSI .....	10
2.3 EFFETTI DEL LEGNAME IN ALVEO .....	11
2.4 ORIGINE DEI DETRITI LEGNOSI .....	13
2.5 ASPETTI FISICO-MECCANICI DEL LEGNAME .....	16
2.6 LW: MOTO INCIPIENTE, TRASPORTO E DEPOSIZIONE .....	17
2.7 CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCUMULI .....	22
2.8 RISCHIO IDRAULICO CONNESSO AL DETRITO LEGNOSO .....	29
2.9 STIMA DEI VOLUMI DI LEGNAME MOVIMENTABILE .....	34
2.10 ANALISI SVOLTE IN ITALIA .....	38
3. SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI .....	41
3.1 QUADRO CONOSCITIVO .....	41
3.2 CARTOGRAFIA .....	42
3.2.1 <i>Ellissoide e geoida</i> .....	43
3.2.2 <i>Sistemi di riferimento e Datum</i> .....	44
3.2.3 <i>Sistemi di coordinate</i> .....	46
3.2.4 <i>Proiezioni cartografiche</i> .....	47
3.2.5 <i>Forme cartografiche</i> .....	48
3.3 FOTOGRAMMETRIA .....	50
3.3.1 <i>Ortofoto digitale</i> .....	52
3.4 I SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI (SIT) .....	53
3.4.1 <i>Breve storia dei SIT</i> .....	54
3.4.2 <i>I campi d'applicazione dei SIT</i> .....	55
3.4.3 <i>La struttura di un SIT</i> .....	56
3.4.4 <i>Le tipologie di dati</i> .....	57
3.4.5 <i>Le metodologie di analisi dati</i> .....	60
3.4.6 <i>I modelli digitali del terreno</i> .....	61
4. IL GOVERNO DEL TERRITORIO .....	63
4.1 ASPETTI NORMATIVI .....	63
4.1.1 <i>Legge 18 maggio 1989, n. 183</i> .....	63
4.1.2 <i>Legge 3 agosto 1998, n. 267</i> .....	64
4.1.3 <i>D.P.C.M. 29 settembre 1998</i> .....	65
4.1.4 <i>Legge 11 dicembre 2000, n. 365</i> .....	67
4.1.5 <i>Legge regionale 23 aprile 2004, n. 11</i> .....	67
4.2 PIANIFICAZIONE TERRITORIALE ED URBANISTICA .....	69
4.2.1 <i>Piano Territoriale Regionale di Coordinamento (PTRC)</i> .....	69
4.2.2 <i>Piano Territoriale Provinciale (PTP)</i> .....	70
4.2.3 <i>Piano Regolatore Comunale (PRC)</i> .....	72
5. MATERIALI E METODI .....	75
5.1 DESCRIZIONE AREA DI STUDIO .....	75
5.1.1 <i>Inquadramento geografico dell'area di studio</i> .....	75
5.1.2 <i>Aspetti storici</i> .....	79
5.1.3 <i>Aspetti climatici</i> .....	82
5.1.4 <i>Aspetti vegetazionali</i> .....	83
5.1.5 <i>Aspetti geomorfologici</i> .....	85
5.1.6 <i>Dissesti</i> .....	86
5.2 IDROGRAFIA E MORFOLOGIA FLUVIALE .....	92
5.3 RAPPRESENTAZIONE DIGITALE DEL TERRENO .....	97
5.4 PARAMETRI MORFOMETRICI .....	101

5.4.1	Quote	103
5.4.2	Pendenze	105
5.4.3	Esposizioni	107
5.4.4	Parametri morfometrici dei sottobacini	109
5.4.5	Altri parametri morfometrici	112
5.5	RACCOLTA E DESCRIZIONE DEI RILIEVI EFFETTUATI	114
5.5.1	Rilievo ed analisi della morfologia dei torrenti	115
5.5.2	Rilievo ed analisi del legname in alveo	118
5.6	MODELLO PREVISIONALE SU BASE GIS	121
5.6.1	Progetto IFFI	122
5.6.2	Modello statistico WofE	126
6.	ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	129
6.1	ANALISI DEI DATI RIGUARDANTI IL LEGNAME IN ALVEO	129
6.2	MAPPATURA AREE SUSCETTIBILI AL DISSESTO	133
6.2.1	Punti di controllo	133
6.2.2	Fattori predisponenti	134
6.3	MAPPATURA DELLE SUPERFICI BOScate	140
6.4	APPLICAZIONE MODELLO PREVISIONALE SUL SOTTOBACINO DEL TORRENTE ORNELLA	145
6.4.1	Determinazione pesi	150
6.4.2	Carta suscettibilità ai dissesti	169
6.4.3	Determinazione aree sorgenti di legname	171
6.4.4	Quantificazione legname potenzialmente reclutabile dalla rete idrica	174
7.	CONCLUSIONI	179
8.	BIBLIOGRAFIA	183

## Indice delle figure

FIGURA 2.1	MODELLO CONCETTUALE DELLO SVILUPPO DELLA FORESTA RIPARIALE MONTANA (DA FETHERSTON ET AL., 1995).	6
FIGURA 2.2	– ESEMPI DI CLASSIFICAZIONI ADOTTATE DA DIVERSI STUDIOSI PER DESCRIVERE IL LW (DA HASSAN ET AL., 2005, MODIFICATO).	10
FIGURA 2.3	– SOVERATO (CZ), 10 SETTEMBRE 2000: OCCLUSIONE DELLA LUCE DI UN PONTE DA PARTE DI MATERIALE VEGETALE TRASPORTATO	13
FIGURA 2.4	– MOBILITAZIONE DEL DETRITO LEGNOSO: BILANCIO DELLE FORZE IN GIOCO.	18
FIGURA 2.5	– ESEMPI DI LOG STEPS RILEVATI ALL'INTERNO DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE	24
FIGURA 2.6	– ESEMPIO DI BANK INPUT DEBRIS RILEVATO ALL'INTERNO DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE.	25
FIGURA 2.7	– ESEMPIO DI DEBRIS FLOW JAMS RILEVATO ALL'INTERNO DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE.	26
FIGURA 2.8	– ESEMPIO DI BAR-APEX JAM RILEVATO ALL'INTERNO DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE.	27
FIGURA 2.9	– ESEMPIO DI BAR-TOP JAM RILEVATO ALL'INTERNO DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE.	28
FIGURA 2.10	– IL PAESE DI CAPRILE (BL) IL GIORNO DOPO L'ALLUVIONE DEL NOVEMBRE 1966.	34
FIGURA 3.1	– ESEMPIO DI ORGANIZZAZIONE DEI PIANI INFORMATIVI IN AMBIENTE GIS.	62
FIGURA 5.1	– INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA DI STUDIO. LA NUMERAZIONE SI RIFERISCE AI SOTTOBACINI INDAGATI.	77
FIGURA 5.2	– VEDUTA DELLA VAL FIORENTINA COL MONTE PELMO SULLO SFONDO.	78
FIGURA 5.3	– VEDUTA DELLA VALLE DELL'ALTO CORDEVOLE COL IL PASSO PORDOI SULLO SFONDO.	78
FIGURA 5.4	– VEDUTA DELLA VAL PETTORINA CON LA MARMOLADA SULLO SFONDO	79
FIGURA 5.5	– ANDAMENTO DEMOGRAFICO DEL COMUNE DI ROCCA PIETORE (FONTE ISTAT ELABORATO DA WIKIPEDIA, 2008).	81
FIGURA 5.6	– ANDAMENTO DEMOGRAFICO DEL COMUNE DI ALLEGHE (FONTE ISTAT ELABORATO DA WIKIPEDIA, 2008).	82
FIGURA 5.7	– ESEMPLARE DI ABETE ROSSO.	84
FIGURA 5.8	– ESEMPLARE DI LARICE.	84

FIGURA 5.9 – IL PAESE DI CAPRILE (BL) IL GIORNO DOPO L'ALLUVIONE DEL NOVEMBRE 1966.....	90
FIGURA 5.10 – DEM (DIGITAL ELEVATION MODEL) DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	102
FIGURA 5.11 – CURVA IPSOGRAFICA DELLE QUOTE .....	103
FIGURA 5.12 – FORME ASSUMIBILI DALLA CURVA IDROGRAFICA IN UN BACINO IDROGRAFICO (BENINI,1990)	104
FIGURA 5.13 – CURVA IPSOGRAFICA ADIMENSIONALE .....	105
FIGURA 5.14 – ISTOGRAMMA DELLE PENDENZE .....	106
FIGURA 5.15 – CARTA DELLE PENDENZE RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	107
FIGURA 5.16 – CARTA DELLE ESPOSIZIONI RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	108
FIGURA 5.17 – GRAFICO A RADAR DELLE ESPOSIZIONI .....	109
FIGURA 5.18– VALLE DEL TORRENTE PETTORINA.....	111
FIGURA 5.19 – TRATTO DE RIO MINIER .....	111
FIGURA 5.20 – TRATTO DEL TORRENTE FIORENTINA.....	111
FIGURA 5.21 – TRATTO DEL RIO BIANCO.....	111
FIGURA 5.22 – STRUMENTI DI MISURA UTILIZZATI NELLA FASE DI RILIEVO IN CAMPO; DA SINISTRA: PICCHETTI SEGNALATORI, CORDELLE METRICHE, CLISIMETRO, CAVALLETTO FORESTALE, ASTA TELESCOPICA. ....	116
FIGURA 5.23 – ALCUNE FASI DI RILIEVO DEL LEGNAME IN ALVEO SVOLTESI NELLE CAMPAGNE DI MISURAZIONE.....	119
FIGURA 5.24 – SCHEDA DI RILIEVO DEL MATERIALE LEGNOSO. UN ESEMPIO DEGLI ELEMENTI RILEVATI NEL TRATTO N° 22 DEL T. CORDEVOLE; LA LUNGHEZZA E LA PENDENZA DEL TRATTO SONO RICAVATE DAL PROFILO.....	121
FIGURA 5.25 – PORTALE WEB DEL PROGETTO IFFI, DA IN ALTO A SINISTRA E IN SENSO ORARIO: HOMEPAGE DEL PROGETTO ALL' INDIRIZZO <a href="http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/">WWW.MAIS.SINANET.APAT.IT/CARTANETIFFI/</a> ; DISSESTI PRESENTI NELLA REGIONE VENETO; DISSESTI PRESENTI NELLA ZONA DELL'ALTO CORDEVOLE (LAYER POLIGONI); ESEMPIO DI FOTO ASSOCIATA ALLE FRANE; ESEMPIO DI SCHEDA ASSOCIATA ALLE FRANE; DISSESTI PRESENTI NELLA ZONA DELL'ALTO CORDEVOLE (LAYER PUNTI IDENTIFICATIVI PIFF).....	124
FIGURA 5.26 – PROGETTO IFFI ( <a href="http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/">WWW.MAIS.SINANET.APAT.IT/CARTANETIFFI/</a> ): DISSESTI RILEVATI NEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA POSTA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	126
FIGURA 5.27 – PORTALE WEB DEL DIPARTIMENTO DI GEOLOGIA E SCIENZE NATURALI DELL'UNIVERSITÀ DI CAMPINAS (BRASILE) DISPONIBILE ALL'INDIRIZZO <a href="http://www.ige.unicamp.br/sdm/default_e.htm">HTTP://WWW.IGE.UNICAMP.BR/SDM/DEFAULT_E.HTM</a> .....	128
FIGURA 6.1 – RELAZIONE TRA VOLUME AREALE DI MATERIALE LEGNOSO E AREA DRENATA DEI SOTTOBACINI.....	131
FIGURA 6.2 – OPERE DI SISTEMAZIONE POSTE A DIFESA DI ABITATI E INFRASTRUTTURE VIARIE LUNGO I TORRENTI PETTORINA E FIORENTINA.....	132
FIGURA 6.3 – ESEMPI DI TORRENTI IN STATO DI SEMI-NATURALITÀ: IL RIO DELLA MINIERA E IL RIO CODE ...	133
FIGURA 6.4 – CARTA DELLE CONCAVITÀ RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	136
FIGURA 6.5 – FOGLI 12 E 11 DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA UTILIZZATI PER LA CREAZIONE DELLA CARTA GEOLOGICA RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	137
FIGURA 6.6 – OPERAZIONI DI EDITING PER LA CREAZIONE DELLA CARTA GEOLOGICA .....	138
FIGURA 6.7 – CARTA GEOLOGICA DEL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	139
FIGURA 6.8 – CARTA DELL'USO DEL SUOLO RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	140
FIGURA 6.9 – ORTOFOTO UTILIZZATE E RIGUARDANTI IL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	141
FIGURA 6.10 - ESEMPIO DI ELABORAZIONE DI ORTOFOTO PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE SUPERFICI BOSCADE.....	142
FIGURA 6.11 – ESEMPIO DI EDITING PER LA CREAZIONE DELLA CARTA DEI PARTICELLARI FORESTALI.....	142
FIGURA 6.12 – ESEMPIO DI COMPILAZIONE DELLA TABELLA DEGLI ATTRIBUTI RELATIVA ALLA CARTA DEI PARTICELLARI FORESTALI, I PARAMETRI DENDROMETRICI SONO RICAVATI DAL PIANO D'ASSESTAMENTO FORESTALE DEL COMUNE DI ALLEGHE.....	144
FIGURA 6.13 – CARTA DEI PARTICELLARI FORESTALI RELATIVA AL BACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	145
FIGURA 6.14 – INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA ALL'INTERNO DEL MACROBACINO DEL TORRENTE CORDEVOLE CON SEZIONE DI CHIUSURA PRESSO IL LAGO DI ALLEGHE.....	145

FIGURA 6.15 – VEDUTA DALL'ALTO DEL BACINO IDROGRAFICO DEL TORRENTE ORNELLA.....	147
FIGURA 6.16 – ALCUNI TRATTI DEL TORRENTE ORNELLA.....	147
FIGURA 6.17 – CARTA DEI PUNTI DI CONTROLLO RELATIVA AL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	149
FIGURA 6.18 – CARTA DELLE QUOTE RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	152
FIGURA 6.19 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI QUOTA RIGUARDO AL FENOMENO FRANE.....	153
FIGURA 6.20 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI QUOTA RIGUARDO AL FENOMENO DEBRIS FLOW.....	154
FIGURA 6.21 – CARTA DELLE PENDENZE RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	155
FIGURA 6.22 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI PENDENZA RIGUARDO AL FENOMENO FRANE.....	156
FIGURA 6.23 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI PENDENZA RIGUARDO AL FENOMENO DEBRIS FLOW.....	157
FIGURA 6.24 – CARTA DELLE ESPOSIZIONI RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	158
FIGURA 6.25 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI D'ESPOSIZIONE RIGUARDO AL FENOMENO FRANE.....	158
FIGURA 6.26 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI ESPOSIZIONE RIGUARDO AL FENOMENO DEBRIS FLOW.....	159
FIGURA 6.27 – CARTA DELLE CONCAVITÀ RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	160
FIGURA 6.28 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI CONCAVITÀ RIGUARDO AL FENOMENO FRANE.....	161
FIGURA 6.29 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI CONCAVITÀ RIGUARDO AL FENOMENO DEBRIS FLOW.....	162
FIGURA 6.30 – CARTA GEOLOGICA RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	163
FIGURA 6.31 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI GEOLOGICHE RIGUARDO AL FENOMENO FRANE.....	164
FIGURA 6.32 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI GEOLOGICHE RIGUARDO AL FENOMENO DEBRIS FLOW.....	165
FIGURA 6.33 – CARTA DELL'USO DEL SUOLO RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	167
FIGURA 6.34 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI USO DEL SUOLO RIGUARDO AL FENOMENO FRANE.....	167
FIGURA 6.35 – PESI ATTRIBUITI ALLE CLASSI DI USO DEL SUOLO RIGUARDO AL FENOMENO DEBRIS FLOW....	168
FIGURA 6.36 – CARTA DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLE FRANE RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA. .....	170
FIGURA 6.37 – CARTA DELLA SUSCETTIBILITÀ AI DEBRIS FLOW RIGUARDANTE IL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	171
FIGURA 6.38 – CARTA DEI PARTICELLARI FORESTALI RELATIVA AL BACINO DEL TORRENTE ORNELLA.....	172
FIGURA 6.39 – FRANE: AREE POTENZIALMENTE SORGENTI DI LEGNAME.....	173
FIGURA 6.40 – DEBRIS FLOW: AREE POTENZIALMENTE SORGENTI DI LEGNAME.....	173
FIGURA 6.41 – LEGNAME IN ALVEO: CONFRONTO TRA VOLUMI RILEVATI IN CAMPO E QUANTITÀ POTENZIALMENTE MOVIMENTABILI STIMATE DAL MODELLO PREVISIONALE.....	176
FIGURA 6.42 – LEGNAME IN ALVEO: QUANTITÀ POTENZIALI PREVISTE UTILIZZANDO COME AREE SORGENTI LE CLASSI MEDIAMENTE E MOLTO SUSCETTIBILE.....	177
FIGURA 6.43 – LEGNAME IN ALVEO: QUANTITÀ POTENZIALI PREVISTE UTILIZZANDO COME AREE SORGENTI LA SOLA CLASSE MOLTO SUSCETTIBILE.....	177

## Indice delle tabelle

TABELLA 5.1 – BACINI SOTTESI DALL'AREA DI STUDIO.	77
TABELLA 5.2 – PRINCIPALI PARAMETRI MORFOMETRICI DEL BACINO DEL CORDEVOLE CHIUSO AL LAGO DI ALLEGHE	102
TABELLA 5.3 – PRINCIPALI PARAMETRI MORFOMETRICI RELATIVI AI 13 SOTTOBACINI	109
TABELLA 5.4 – INDICI DI COMPATTEZZA RELATIVI AI 13 SOTTOBACINI	112
TABELLA 5.5 – INDICI DI BOSCOITÀ TOTALE RELATIVI AI 13 SOTTOBACINI	113
TABELLA 5.6 – MORFOLOGIA, SINTESI DEI DATI OTTENUTI DURANTE LE VARIE CAMPAGNE DI MISURAZIONE SVOLTESI NEL BACINO DI STUDIO.	118
TABELLA 6.1 – DETRITO LEGNOSO IN ALVEO, SINTESI DEI DATI OTTENUTI DURANTE LE VARIE CAMPAGNE DI MISURAZIONE SVOLTESI NEL BACINO DEL CORDEVOLE.	129
TABELLA 6.2 – CLASSIFICAZIONE DEL TEMATISMO GEOLOGIA UTILIZZATA NELLA CARTA TEMATICA	163
TABELLA 6.3 – CLASSIFICAZIONE DEL TEMATISMO USO DEL SUOLO UTILIZZATA NELLA CARTA TEMATICA.	166

## 1. INTRODUZIONE

Il detrito legnoso perviene all'interno dei corsi d'acqua da più di 400 milioni di anni e da sempre ha rivestito un ruolo di fondamentale importanza nella dinamica fluviale (Montgomery et al., 2003). Esso ha assunto una notevole rilevanza soprattutto in epoca recente a causa del progressivo abbandono delle attività mirate alla gestione e alla cura dei boschi, in particolare in ambiente montano. Qui il forte spopolamento ha ridimensionato le pratiche dedite al pascolo e all'agricoltura causando un progressivo aumento delle superfici boscate. In conseguenza a ciò la probabilità che il detrito legnoso possa pervenire nelle reti idriche è notevolmente aumentata. Il materiale vegetale, una volta giunto nel collettore, ne influenza le caratteristiche idrauliche, morfologiche ed ecologiche. Solo di recente, grazie a diversi studi condotti in Europa e nel nostro paese, si è cominciato ad approfondire tale materia, rivolgendo l'attenzione soprattutto sul ruolo del detrito legnoso ai fini della sicurezza idraulica nei collettori montani. In tale ambito, infatti, il materiale vegetale può accrescere il rischio di sovralluvionamento ed esondazione durante gli eventi di piena a causa della riduzione della sezione di deflusso e all'ostruzione della luce dei ponti. Oltre a questo gli accumuli di legname possono ridurre la funzionalità delle opere di trattenuta, come le briglie selettive, le quali vengono realizzate a monte degli insediamenti e delle infrastrutture. Al contempo, dal punto di vista ecologico, il detrito legnoso in alveo riveste un ruolo fondamentale, aumentando la biodiversità ambientale e favorendo la presenza di un ecosistema fluviale.

In ambiente montano le cause che determinano l'immissione di materiale vegetale in alveo variano al variare delle caratteristiche del bacino. Nei torrenti di primo e secondo ordine, infatti, la maggior parte del materiale vegetale presente in alveo è da ricondursi a dissesti generatisi nei versanti; al contrario nei collettori d'ordine superiore i maggiori volumi provengono dall'erosione spondale che destabilizza le piante presenti nella fascia riparia facendole poi crollare all'interno dell'alveo.

Attualmente una pulizia frequente e generalizzata degli alvei dalla vegetazione e dal materiale legnoso viene richiesta spesso dalla popolazione, e questa viene realizzata periodicamente (ogni 5-10 anni) ad opera degli Enti competenti (Genio Civile, Servizi Forestali, Comunità Montane).

Nel presente lavoro si è cercato di applicare un modello previsionale per la quantificazione del legname in alveo. Questo modello sarà applicato grazie alle

funzionalità offerte dagli attuali Sistemi Informativi Territoriali (SIT) che permettono di gestire contemporaneamente informazioni descrittive e rappresentazioni grafiche georiferite. Il modello sarà riferito al bacino del torrente Ornella, tributario di secondo ordine del torrente Cordevole, situato nell'alto Bellunese. Nella parte iniziale saranno trattati tre argomenti, posti alla base di questo studio: inizialmente saranno affrontati gli aspetti legati alla presenza del legname in alveo, in seguito verranno introdotte le principali caratteristiche dei Sistemi Informativi Territoriali, infine sarà sviluppata una breve panoramica sulla legislazione vigente e riguardante il governo del territorio. In seguito verrà descritta l'area di studio, evidenziandone gli aspetti geografici, storici, climatici, vegetazionali, geomorfologici e morfometrici, oltre che i dissesti presenti. Saranno riportate tutte le cartografie utilizzate ai fini dello studio oltre che quelle ottenute dalle elaborazioni effettuate. I risultati ricavati dalle campagne di misurazione, svoltesi negli anni precedenti, verranno riassunti e utilizzati per verificare la risposta del modello previsionale. Quest'ultimo sarà descritto in ogni sua parte: i dati di partenza, la fase preparatoria, l'applicazione, le cartografie e la risposta ottenuta.

## **2. IL LEGNAME IN ALVEO**

### **2.1 Evoluzione della gestione territoriale ed influenze sul legname in alveo**

La gestione del territorio incide in maniera significativa sulla presenza del legname in alveo. Numerosi studi condotti da diversi autori come Abbe e Montgomery 2003, Andreoli et al. 2007, Comiti et al 2007, Mao et al. 2007, in bacini idrografici prossimi a condizioni di quasi naturalità evidenziano come il legname sia capace di determinare la morfologia dei collettori, aumentando di molto la complessità del sistema fisico e di conseguenza la biodiversità ambientale. Al contrario, i corsi d'acqua di regioni antropizzate presentano una struttura morfologica molto impoverita derivante dalla riduzione del materiale legnoso in alveo (Comiti et al. 2006, Rigon et al. 2006).

Il tipo di gestione influenza il volume di legname presente in alveo in due modi distinti: in modo diretto ed in modo indiretto. Le influenze dirette sono riassumibili in quelle azioni antropiche che comportano un effetto immediato e, appunto diretto, sulla quantità e distribuzione dei *LW*, queste sono tutte le operazioni forestali come il taglio della vegetazione ripariale, le pratiche selvicolturali sui soprassuoli immediatamente adiacenti al corso d'acqua e le opere idraulico-forestali che tendono a rimodellare direttamente l'alveo e la presenza d'insediamenti urbani. In linea generale questo tipo d'operazioni tende a ridurre la quantità di materiale legnoso presente nell'alveo, nonostante ciò alcuni studi hanno rilevato una controtendenza (Piegay 2003). In molti fiumi europei, è stato riscontrato un aumento del volume di legname rispetto alla prima metà del ventesimo secolo a causa delle modificazioni avvenute nella gestione del territorio dopo la Seconda Guerra Mondiale.

Ritornando alle influenze dirette, le operazioni selvicolturali sono quelle che hanno una maggiore incidenza sulla quantità di materiale arboreo presente nell'alveo; a seguito di un taglio il volume di legname che entra nel corso d'acqua cresce notevolmente (Lisle e Napolitano 1998). Mettendo a paragone torrenti che scorrono in regioni dove viene praticato il taglio a raso con quelle delle foreste vergini, è stato osservato che nei primi i depositi di legname sono notevolmente maggiori (Swanson 1984, Lisle 1986). Bisogna anche ricordare però gli studi effettuati da Dahlstrom, i quali ponendo a confronto piccoli collettori che attraversano foreste quasi vergini con altri in cui vengono effettuate pratiche selvicolturali diverse dal taglio raso, si è

osservato che questi non presentano differenze nelle caratteristiche morfologiche ma nei primi la quantità di legname in alveo è più elevata, con anche una maggiore frequenza di accumuli di materiale legnoso e con pezzi di maggiori dimensioni.

Le attività selvicolturali possono avere effetti indiretti a seconda della modalità dell'esecuzione: le operazioni di taglio ad esempio, se eseguite rispettando i parametri della stazione e del popolamento arboreo (taglio su piccole superfici o taglio selettivo) migliorano le condizioni del bosco aumentando di conseguenza l'efficacia antierosiva e regimante del bosco stesso. Al contrario se eseguite su vaste aree (taglio raso), porta ad un depauperamento delle condizioni del suolo boschivo con un conseguente accrescimento dell'instabilità del suolo stesso, inoltre ogni riduzione della copertura forestale provoca un aumento del deflusso totale, in seguito a taglio raso per esempio si nota un aumento del deflusso medio annuo, da minimi del 20%, fino a massimi dell'80%. Le stesse conseguenze si hanno al variare delle pratiche pastorali, se questo sono turnate o razionate in modo tale da utilizzare in maniera adeguata e uniforme la fitomassa, garantiscono la conservazione della cotica erbosa che a sua volta garantisce un aumento di stabilità grazie al suo potere regimante e antierosivo fondamentale in ambienti come quello montano. Se il pascolo al contrario è effettuato in modo libero ed eccessivo si ha la rottura della cotica erbosa, lasciando il terreno esposto all'effetto battente della pioggia, allo scorrimento superficiale dell'acqua, all'infiltrazione e all'azione disgregante (Siffredi Duranti 2005). La presenza di insediamenti umani (residenza, attività agricole, turistiche ed industriali) influisce sulla presenza di legname in alveo in modo diretto. L'influenza diretta la si deve in primo luogo alle numerose opere di sistemazione idraulico-forestali, la cui presenza è correlata proprio alla necessità di mettere in sicurezza i principali siti residenziali-agricolo-industriali nella zona, dalle influenze che il collettore potrebbe avere su di essi. Gli interventi di sistemazione si applicano su questo ambiente con la costruzione di opere di difesa longitudinali e trasversali atte a ridurre i fenomeni di erosione spondale e di franamento per erosione al piede causate dal collettore. Queste difese, oltre agli effetti sopraccitati, comportano il mancato instaurarsi della vegetazione nella zona della bankfull che solitamente funge da sorgente di materiale legnoso per mortalità naturale. Oltre a questo, la sezione idrica del corso d'acqua, resa più regolare e meno scabra dagli interventi di sistemazione, facilita la fluitazione del legname, il quale si presenta anche di

dimensioni minori rispetto a quelle potenziali per via dei frequenti tagli di “manutenzione”.(Rigon et al. 2007)

Le influenze indirette sono individuabili su di una scala più ampia del territorio e determinano degli influssi sullo stato di salute dei popolamenti arborei (mortalità), ma anche sull'uso e la stabilità del suolo (insediamenti urbani, frane ed erosione spondale). Lo stato di salute dei popolamenti arborei, e di conseguenza la loro mortalità, concorre ad aumentare la presenza in alveo del detrito legnoso. Cause biologiche e cause fisiche sono imputate per la mortalità arborea, le cause biologiche includono la morte naturale della pianta o quella indotta, cioè dovuta a malattie o insetti; le cause fisiche invece sono rappresentate da schianti e crolli in conseguenza di eventi climatici. Il sistema radicale, l'apparato fogliare, la snellezza e la densità del popolamento sono le caratteristiche delle specie arboree che influenzano in maniera più significativa le cause fisiche (per esempio l'abete rosso con sistema radicale superficiale è più suscettibile a crolli). Prendendo in esame, invece, la snellezza, cioè il rapporto tra l'altezza e il diametro della pianta, si nota come tanto più alto è il suo valore tanto più la pianta è instabile e a rischio crollo. Per questo nei popolamenti fitti dove le piante non hanno spazio sufficiente per sviluppare le chiome e crescere di diametro, la probabilità di schianti e crolli è maggiore e di conseguenza anche la mortalità. Attraverso le attività selvicolturali è possibile intervenire migliorando alcuni aspetti negativi delle popolazioni forestali. In particolare l'attuazione di un buon diradamento selettivo può ridurre la densità in boschi fitti ottenendo l'accrescimento delle chiome e del diametro, con conseguente aumento della stabilità meccanica delle piante. La possibilità di compiere diradamenti selettivi tramite operazioni selvicolturali riguarda non solo la vegetazione presente nel bacino idrografico del collettore, ma assume un ruolo di prima importanza anche negli interventi sulla vegetazione ripariale. Questa, infatti, svolge numerose funzioni ecologiche tra le quali: l'ombreggiamento dei corsi d'acqua, con risvolti sulla temperatura dell'acqua e di conseguenza sull'ossigeno disciolto; fornisce l'habitat per la fauna vertebrata e invertebrata; è un corridoio ecologico in quanto in ambienti fortemente antropizzati può rappresentare l'unica via di spostamento sicuro per la fauna; ha funzione di filtro biologico grazie alla capacità di trattenuta ed utilizzo dei sali (assimilandoli nei tessuti vegetali) e di favorirne la denitrificazione; nonché la funzione protettiva rispetto le rive prodotta dalle specie arboree ed arbustive adattate a questo particolare ambiente (in



La pulizia degli alvei dal legname vivo o morto, eseguita con lo scopo di ridurre la pericolosità di eventi di piena (riduzione della scabrezza complessiva e di possibili ostruzioni a luci di ponti) è pertanto una pratica con altissimo impatto ambientale (Sansoni 2006). Attualmente una pulizia frequente e generalizzata degli alvei dalla vegetazione e dal materiale legnoso viene richiesta spesso dalla popolazione, e questa viene realizzata periodicamente (ogni 5-10 anni) ad opera degli Enti competenti (Genio Civile, Servizi Forestali, Comunità Montane). La legge italiana ha spronato nel passato tali attività, e solo recentemente alcune Regioni hanno cercato di limitare i tagli indiscriminati alla fascia riparia, ma rimane sempre presente una visione a breve periodo che non tiene conto dei benefici ambientali della vegetazione e del materiale legnoso, in nome di una presunta sicurezza idraulica che deve essere garantita per ogni infrastruttura ad ogni costo, nel senso letterale del termine in quanto gli interventi di pulizia rappresentano un costo diretto il quale va ad aggiungersi ai costi ambientali indiretti (Sansoni 2006).

In dubbio sono anche i reali benefici per la sicurezza idraulica apportati dalla pulizia dell'alveo in territorio montano. Questo si deduce verificando come la maggior parte del detrito legnoso presente in alveo derivi da fenomeni quali frane e colate detritiche attivate in seguito a fenomeni di piena. Certamente la rimozione del materiale vegetale riduce la quantità di detrito nel collettore *in un determinato istante*, ma non impedisce che volumi di ben maggiore entità possano venir accorpati alla corrente *durante* eventi di piena creando fenomeni ad elevata densità solida che rendono del tutto aleatorio il grado di sicurezza perseguito e successivamente raggiunto. La riduzione del rischio perciò si raggiunge soltanto con una efficace trattenuta del detrito vegetale a monte di sezioni critiche tramite opere a basso impatto ambientale come briglie a funi o briglie a rete (Mazzalai et al., 2006). In ogni caso nulla è più utile al fine della prevenzione del rischio che una buona pianificazione territoriale a scala di bacino che vada ad identificare i reali valori da difendere da eventi alluvionali e che determini gli interventi di prevenzione da finanziare nel lungo periodo. In linea generale saranno da preferire gli interventi tesi a diminuire la vulnerabilità del territorio (ovvero verso la riduzione del danno economico potenziale in caso di alluvione) rispetto alla pericolosità di un certo evento, ben più difficile da contrastare (Rigon et al. 2007).

La sicurezza idraulica si occupa anche di contrastare fenomeni come gli eventi franosi, intesi come qualsiasi forma di spostamenti di terreni o rocce dovuti

essenzialmente alla gravità, che sono da considerarsi nel nostro caso come un afflusso di tipo indiretto. Il fatto che i fenomeni gravitativi influenzino notevolmente la quantità di detrito legnoso in alveo è stato dimostrato da diversi autori: Grant e Swanson (1995) e successivamente Johnson et al (2000) hanno evidenziato come le principali sorgenti di materiale legnoso nei torrenti di primo e secondo ordine sono le frane e le colate detritiche, Rigon (2005) analizzando il torrente Codalunga (BI) ha rilevato come la presenza di aree in dissesto, nella zona d'influenza del collettore, influisca in modo notevole sulla quantità di detriti legnosi presenti in alveo. Nel caso, infatti, di eventi franosi o colate detritiche, queste causano l'ingresso in alveo di legname di grandi dimensioni (alberi interi compreso l'apparato radicale) che fungono da elementi chiave nella formazione degli accumuli (Slongo 2005).

Viceversa, come la presenza di eventi franosi influisce sul materiale vegetale presente in alveo, anche la presenza di vegetazione influisce in modo considerevole sulla stabilità dei versanti e di conseguenza sulla formazione di frane e/o smottamenti.

Il bosco, infatti, agisce sui deflussi idrici e sull'erosione del suolo. Sul 60% della superficie forestale italiana, l'alto fusto è stato ridotto a ceduo, la cui efficienza ecologica e quindi idrologica è scesa a livelli bassissimi, i rimanenti boschi ad alto fusto hanno una densità che raramente supera i 200 metri cubi/ettaro, in Italia in genere la densità si trova abbassata a 80-150 metri cubi/ettaro ciò favorisce i fenomeni di erosione dei terreni ad opera del deflusso superficiale.

Entrando nello specifico fenomeno della trasformazione degli afflussi in deflussi si può notare che con piogge con altezze comprese fra 1-10 mm, l'intercettazione da parte degli apparati fogliari è elevata, con precipitazioni intense o superiori ai 20-30 mm le chiome non trattengono più del 5-15% dell'acqua caduta, con precipitazioni superiori le chiome ormai sature lasciano passare interamente l'acqua. Oltre che l'intercettazione delle precipitazioni, gli apparati fogliari assumono grande importanza, insieme al sottobosco e alla copertura morta, nella riduzione della forza viva dell'acqua meteorica. Importante è l'azione idrologica epigea, ma da non dimenticare, perché spesso influisce in maniera ancora maggiore, è l'effetto che il sistema forestale svolge nella sfera ipogea. Qui, infatti, l'acqua contenuta nei macropori si muove con velocità rallentata, ciò porta ad una "decapitazione" delle punte di piena distribuendo questa in tempi che, se riferiti all'inizio delle piogge, risultano da 2 a 7 volte maggiori. Sommando l'acqua intercettata dagli apparati

fogliari con quella di ritenzione idrica (mesopori), si nota come un bosco provvisto di caratteri discreti appare verosimilmente capace di sottrarre al deflusso un'altezza d'acqua pari a circa 60-70 mm e di trattenere temporaneamente nei macropori una quantità da 4 a 5 volte maggiore.

Prendendo invece, in considerazione dei boschi alterati e con suolo eroso e degradato, si nota come l'acqua penetra nel terreno fino a 10 volte più lentamente e, con piogge di intensità superiore a 0,1-0,5 mm/min è costretta a defluire parzialmente in superficie, il potere di ritenzione idrica inoltre, diminuisce di circa 2/3 rispetto ai boschi mediamente efficienti e i tempi di corrivazione vengono notevolmente abbreviati.

Per concludere si può notare come in uno stesso bacino, nel caso di piogge intense, il disboscamento può portare anche a raddoppiare i deflussi di piena, d'altro canto il reinsediamento per via spontanea del bosco tende a riportare rapidamente i deflussi ai valori primitivi.

L'influenza che possiede il tipo di soprassuolo sul processo di trasformazione degli afflussi in deflussi viene dimostrato anche dall'uso del parametro CN (Numero di Curva) nel metodo di calcolo dell'idrogramma di progetto proposto dal Soil Conservation Service (1972). Questo metodo consente di determinare la pioggia efficace mediante proprio l'utilizzo del CN, parametro questo che può variare tra valori che vanno da 0 a 100 ed esprime l'attitudine delle diverse combinazioni suolo-soprassuolo a generare deflussi diretti. Se il valore di CN assume valori bassi identifica un combinazione suolo-soprassuolo capace di intercettare una notevole quantità di afflussi e perciò di limitare la formazione di deflusso superficiale, al contrario valori sempre maggiori di CN indicano una combinazione sempre più prossima all'impermeabilità o comunque con tendenza a creare sempre più deflusso in quanto non capace di intercettare grandi quantità di afflussi.

L'erosione spondale è l'ultimo influsso indiretto, ma non il meno importante, in quanto è un processo che influisce sulla quantità di legname in alveo con una duplice modalità: da un lato è un fattore sorgente di legname poiché destabilizza le sponde causando la caduta in alveo della vegetazione ripariale "viva" (Piégay et al., 1999), dall'altro è un fattore di rimobilitazione e di accumulo del legname "morto", presente nella piana alluvionale a causa dei sopraccitati influssi diretti e indiretti quali azioni antropiche (operazioni selvicolturali), mortalità delle piante stesse e frane e/o smottamenti.

## 2.2 Nomenclatura dei detriti legnosi

Il legname presente in alveo è conosciuto in letteratura con diversi nomi a seconda delle proprie caratteristiche dimensionali, si possono distinguere i *Large Woody (LW)*, i *Fine Woody (FW)* e i *Coarse Woody (CW)*. Con il termine *Large Woody* s'indica il materiale legnoso morto presente all'interno dell'alveo o della piana alluvionale caratterizzato da misure superiori ad una certa dimensione minima, assegnata questa a seconda degli autori. Numerose sono le classificazioni esistenti in letteratura (**Figura 2.2**), qui ricordiamo: Young (1994) pone come diametro minimo 0,15 m e lunghezza minima 2 m, Gurnell et al. (2002) individuano i limiti rispettivamente a 0,10 m e a 1 m., invece per May e Gresswell (2003) sono detriti se con dimensioni di 0,20 m e 2 m.

Minimum Diameter (m)	Minimum Length (m)	Channel Width (m)	Location	References
0.10	1.5	5.5-10.9	Coweeta, North Carolina	Hedman <i>et al.</i> (1996)
0.10	0.5	0.6-3.7	Southeast Alaska	Gomi <i>et al.</i> (2001)
0.15	2.0	6.4-7.0	Yellowstone National Park, Wyoming	Young (1994)
0.10	1.0	3.7-10.2	Central Colorado	Richmond and Fausch (1995)
0.15	3.0	5.3-22.9*	Western Oregon	Wing and Skaugset (2002)
0.10	1.0	3.9-36.7	Northwest Montana	Hauer <i>et al.</i> (1999)
0.10	1.0	8.2-31.4	Southwest Alaska	Murphy and Koski (1989)
0.20	2.0	3.3-4.8	Costal Oregon	May and Gresswell (2003b)
0.10	3.0	–	Western Washington	Ralph <i>et al.</i> (1994)
0.10	0.5	< 4	Coastal Washington	Jackson and Sturm (2002)
0.10	1.0	2.4-5.4	Costal British Columbia	Fausch and Northcote (1992)
0.08	1.8	2.9-14	Northern California	Benda <i>et al.</i> (2002)
0.10	3.0	5-15	Carnation Creek, British Columbia	Toews and Moore (1982)
0.10	–	5-20	Queen Charlottes, British Columbia	Hogan (1987)
0.10	1.0	9.0-23.0	Western Cascade, Oregon	Nakamura and Swanson (1994)
0.20	1.5	5.1-25.9	Southwest Alaska	Robison and Beschta (1990b)
0.10	2.0	3.1-23.5	Southwestern Washington	Bilby and Ward (1991)
0.20	1.0	4.8-12.3	Cascade Mountain, Washington	Rot <i>et al.</i> (2000)
0.10	1.0	–	Western Cascade, Oregon	Faustini and Jones (2003)
0.10	1.0	0.6-3.2	Yellowstone National Park, Wyoming	Marcus <i>et al.</i> (2002)

**Figura 2.2 – Esempi di classificazioni adottate da diversi studiosi per descrivere il LW (da Hassan et al., 2005, modificato).**

Dall'elevata eterogeneità delle misure soglia si nota come queste non possano essere universali, ma debbano, invece, essere calibrate a seconda delle caratteristiche dimensionali del corso d'acqua o dello scopo dello studio. Dalla tabella sopra riportata si nota come la maggior parte degli autori ha adottato un diametro minimo 0,1 m ed una lunghezza minima di 1 m.

Col termine *Fine Woody (FW)* s'indica il materiale legnoso di dimensioni minori rispetto agli *LW*, questo tipo di materiale viene intercettato dagli accumuli creati dagli stessi *LW*, formando una sorta di "riempimento" per questi ultimi, contribuendo ad aumentarne la stabilità. Proprio per le loro dimensioni minime, questo tipo di materiale è meno importante degli *LW* e meno studiato nell'ambito della fluviomorfologia.

Ultimo termine conosciuto in letteratura per il detrito legnoso in alveo è il *Coarse Woody (CW)*, con questo termine si indica tutto il materiale legnoso morto presente in alveo e di dimensioni paragonabili a quelle dell'alveo stesso.

### **2.3 Effetti del legname in alveo**

Il materiale rappresentato negli *LW* comprende tronchi, ceppaie o parti d'albero che concorrono a caratterizzare dal punto di vista ecologico ed idraulico il collettore. Idraulicamente il detrito legnoso influisce su aspetti quali la scabrezza idraulica, la velocità del flusso, la portata, l'intensità del trasporto di fondo e la granulometria (Smith et al. 1993, Assani e Petit 1995, MacDonald e Keller 1987, Lisle 1995, Shields e Gippel 1995, Buffington e Montgomery 1999, Manga e Kirchner 2000). Favoriscono la formazione di strutture interne al canale quali gli steps e le pools (Nakamura e Swanson 1993, Lisle 1995, Montgomery et al 1995-1996), procurano cambiamenti alla struttura dei canali e favoriscono le ostruzioni (Keller e Swanson 1979), infine concorrono alla formazione della piana alluvionale e quella del cono di deiezione (Abbe e Montgomery 1996, Piégay et al. 1997, Gurnell et al. 2002).

Gli effetti dovuti alla presenza di detrito legnoso in alveo si evidenziano in primo luogo sull'idraulica dei flussi e sulla geomorfologia fluviale. Proprio questi ambiti sono quelli su cui si sono concentrati numerosi studi. Per quanto riguarda l'idraulica dei flussi si è notato come, soprattutto nei piccoli collettori, il legname in alveo aumenti la complessità dei deflussi e la ritenzione idrica (Ehrman e Lamberti 1992), di conseguenza diminuisce la portata massima delle piene di piccolo e medio ordine (Gregory et al. 1985).

Dal punto di vista della geomorfologia fluviale gli accumuli di legname condizionano la geometria del canale in quanto possono alterare il flusso della corrente variandone la direzione, in questo modo l'erosione spondale che ne consegue altera la sezione

dei collettori (Carlig 2004). Inoltre creano varie tipologie geomorfologiche nel canale come sono state descritte da Bisson et al. (1987) e aumentano in generale la stabilità dei torrenti, proprio grazie alla formazione di queste particolari morfologie.

In alcuni casi la deviazione del flusso della corrente può anche far cambiare radicalmente la morfologia dei canali, trasformando un singolo collettore in una serie complessa di rami di larghezza minore (Harwood e Brown, 1993). Un aspetto negativo della presenza d'accumuli dovuti a *LW*, può essere legata alla movimentazione del legname durante gli eventi di piena. Questo fenomeno può provocare diversi danni, come la perdita d'efficienza di opere idrauliche selettive, occlusioni di briglie e luci di ponti (**Figura 2.3**) aumentandone notevolmente la spinta idrostatica a monte (Ishikawa 1990). In ogni caso si può affermare che gli effetti prodotti dal legname dipendono dalla sua stabilità e quindi dalla dimensione del legname che crea l'ostruzione e della relativa dimensione del canale (Bisson et al 1987).

Dal punto di vista ecologico, gli *LW* permettono l'instaurarsi di molti habitat per invertebrati e pesci, favorendo perciò un aumento della biodiversità, inoltre forniscono materia organica regolando il movimento e la trasformazione dei nutrienti. Le influenze ecologiche sono da anni studiate nel Nord America e solo recentemente si è notato un aumento delle ricerche in ambito europeo, questo è dovuto alla sempre maggiore necessità di possedere indicazioni scientifiche tali da permettere l'interpretazione degli aspetti fluviomorfologici ed ambientali. Questa necessità si è percepita in seguito al progressivo spopolamento delle aree montane col conseguente abbandono delle attività pascolive e selvicolturali, che portano a loro volta all'aumento del materiale legnoso in alveo.



**Figura 2.3 – Soverato (CZ), 10 Settembre 2000: occlusione della luce di un ponte da parte di materiale vegetale trasportato**

## **2.4 Origine dei detriti legnosi**

L'origine del materiale legnoso in alveo è plurima ma riconducibile a tre cause di mortalità del soprasuolo forestale, quali: cause biologiche, fisiche ed antropiche.

Le cause biologiche rappresentano tutti quei processi che determinano l'apporto del materiale legnoso in alveo proprio per effetti biologici che intervengono a livello della pianta stessa, fanno parte di questa categoria sia la mortalità naturale della pianta sia quella indotta a causa di malattie fungine e insetti. Le cause biologiche, nel breve periodo apportano una quantità esigua di materiale legnoso in alveo. Al contrario, risultano avere un ruolo fondamentale nel lungo periodo in quanto processo continuo e stabile di rifornimento per gli *LW*.

Le cause fisiche sono determinate da fenomeni strutturali come frane, colate detritiche, erosioni spondali, valanghe e schianti dovuti a fenomeni atmosferici come neve o vento; queste coinvolgono una quantità di materiale superiore rispetto le cause biologiche, causando l'immissione in alveo di grandi quantità in poco tempo.

Le cause antropiche, infine, sono rappresentate da tutte le azioni compiute dall'uomo che influenzano in modo diretto o indiretto il volume di materiale legnoso in alveo. Sono rappresentate in questa categoria le operazioni selvicolturali, la manutenzione

della vegetazione ripariale ed in generale la gestione territoriale nell'area prossima al collettore di studio.

Questo tipo di cause si possono influenzare l'una con l'altra, per esempio un buon diradamento selettivo in un bacino idrografico può intervenire sulla snellezza di un popolamento arboreo, fornendo sufficiente spazio alle piante per sviluppare chiome estese e crescere in diametro. Snellezza che rappresenta il rapporto tra altezza e diametro della pianta ed è un importante indicatore della suscettibilità a subire crolli o schianti in seguito ad eventi meteorici da parte della pianta stessa.

Precisazione va fatta inoltre sull'erosione spondale: questa, infatti, agisce sul materiale in alveo con una duplice modalità: da una parte è sorgente di legname poiché destabilizza le sponde causando la caduta in alveo della vegetazione ripariale "viva" (Piègay et al. 1999), dall'altra parte rimobilizza il materiale legnoso "morto" già presente nella piana alluvionale per cause biologiche, fisiche e antropiche sopraccitate.

Il limite massimo al deposito e al trasporto di legname entro il sistema fluviale è dato dalla quantità di legname che giunge al collettore, questa dipende dalle caratteristiche (specie, età, densità, stato fitosanitario) dei popolamenti arborei che l'alimenta e dalle cause (biologiche, fisiche e antropiche) che causano l'introduzione di legname all'interno del collettore. I processi responsabili dell'input di legname al collettore cambiano a seconda del territorio, poiché variano con la componente spaziale e con quella temporale, tuttavia sono generalmente i medesimi, mutando solamente la loro importanza relativa (Siffredi Duranti, 2005).

La componente spaziale influenza l'origine degli *LW* al variare dell'ordine del collettore e al variare della geomorfologia dell'alveo, aspetti questi connessi tra di loro.

In questo ambito alcuni studi condotti da Grant e Swanson (1979), e successivamente da Johnson et al. (2002), hanno evidenziato come le principali sorgenti di materiale legnoso in torrenti di primo e secondo ordine sono le frane e le colate detritiche, mentre nei fiumi di ordine superiore l'ingresso di legname nel collettore è dovuto principalmente all'erosione delle sponde. Oltre a questo Keller e Swanson (1979) e Nakamura e Swanson (1993) hanno stabilito che nei corsi d'acqua di ordine inferiore la quantità di legname in alveo è maggiore rispetto a quelli di ordine superiore ed importante, nei primi influenzano fortemente la morfologia fluviale. Da questo punto di vista si può notare come nei bacini di ordine inferiore la

percentuale di superficie boscata è quasi sempre maggiore rispetto a quelli di ordine superiore così come assumono valori più rilevanti le dimensioni dei tronchi rispetto alle caratteristiche del collettore quali larghezza alla bankfull e tirante idrico. Oltre l'ordine del collettore, come ricordato prima, altro fattore importante è la geomorfologia dell'alveo, in particolare la pendenza dello stesso. Come notato da Ishikawa (1990), la maggior parte del sedimento e del legname è prodotto da alvei con pendenze superiori al 15%, questa pendenza nei territori montani è spesso superata dall'inclinazione media dei bacini che possono raggiungere pendenze tra il 20 e 30%. All'elevata pendenza del corso d'acqua corrisponde una maggiore inclinazione dei versanti adiacenti che favorisce lo scivolamento del materiale legnoso, inoltre l'accentuato dislivello dei versanti rappresenta una delle cause potenzialmente scatenanti di fenomeni quali frane, smottamenti e colate detritiche che sono, soprattutto nei collettori d'ordine inferiore, i principali processi d'immissione di legname nelle reti idriche montane.

Al contrario nei fiumi d'ordine superiore al primo e al secondo, la principale fonte di rifornimento di detrito legnoso è rappresentata dall'erosione spondale, che tende a far cadere all'interno del collettore alberi che prima erano stabili (Grant e Swanson 1995).

Prendendo in considerazione l'aspetto temporale, si nota come i processi responsabili del reclutamento di legname in alveo possano essere distinguibili in processi a *lungo, medio e breve termine* (Pecorari 2003).

I processi a lungo termine si sviluppano su di una scala temporale dell'ordine dei 100-200 anni, e riguardano fenomeni quali la mortalità naturale delle popolazioni arboree.

I processi a medio termine, sono nell'ordine dei 10-20 anni e sono da ricondurre principalmente a fenomeni come l'erosione spondale, che possiede il doppio effetto di rimobilizzare il materiale morto già presente in alveo e di inglobare nuovo materiale legnoso destabilizzando i versanti.

Nei processi a breve termine (quantificabili in giorni o perfino ore) sono da includere i fenomeni provocati da eventi estremi come frane, smottamenti, piene ordinarie, colate detritiche e incendi boschivi che si presentano con minor frequenza nel tempo ma causano un notevole apporto di detrito legnoso in un piccolo lasso di tempo.

## 2.5 Aspetti fisico-meccanici del legname

Prima di entrare nello specifico fenomeno della dinamica del legname in alveo, è importante conoscere gli aspetti fisico-meccanici del legno. Con il termine legno in anatomia vegetale s'intende un complesso di tessuti delle piante superiori, composti essenzialmente da vasi legnosi destinati al trasporto della linfa grezza più altri elementi, con funzione di riserva o sostegno (Strasburger, 1995).

Tra le svariate proprietà fisico-meccaniche possedute dal legno, solo alcune influenzano in modo significativo il comportamento del legname in alveo.

L'anisotropia è una caratteristica del legno dovuta al fatto che le fibre hanno forme diverse e sono orientate in una direzione preferenziale nei vari tessuti, questo determina che il materiale reagisca con modalità diversa in funzione della direttrice di sollecitazione. Inoltre le caratteristiche meccaniche nei diversi punti dello stesso tronco sono molto diverse tra loro in funzione soprattutto della presenza di difettosità dovuta ai nodi e alla massa volumica, mentre all'interno della stessa pianta variano al variare della temperatura e dell'umidità del legno (Bonamini, Uzielli, Zanutti 1993).

Altra importante caratteristica da ricordare è il peso specifico che definisce il peso di un corpo riferito all'unità di volume, nel nostro caso l'unità di misura adottata è il  $\text{kg}/\text{m}^3$  e per tutte le specie legnose assume il valore di 1500, nello stato di secchezza assoluta cioè intendendo il legname come sostanza integra priva di pori. Dal valore assunto dal peso specifico del legno si può notare come questo è maggiore rispetto il peso specifico dell'acqua, dato a  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ , nonostante ciò il legno galleggia grazie alla presenza al suo interno di aria. Questo comportamento è dato, come ricordato prima, dal fatto che i tessuti legnosi non possiedono una continuità strutturale e contengono al loro interno una certa quantità di aria ed altre sostanze. Il peso specifico apparente varia da specie a specie, e può variare anche all'interno della stessa pianta a causa delle condizioni stagionali (esposizione) del luogo in cui è cresciuta, all'umidità contenuta e alla presenza di nodi. La specie arborea con il peso specifico minore che si conosca è il Balsa con un peso specifico ad umidità normale compreso tra i 50 e i  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ , mentre il più pesante legno nazionale è quello di olivo che può superare i  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Giordano, 1997).

Il peso specifico è a sua volta influenzato da una caratteristica fondamentale del legno, l'igroscopicità, intesa come capacità di un materiale ad assorbire umidità dall'ambiente circostante. Caratteristica fondamentale questa dell'igroscopicità in

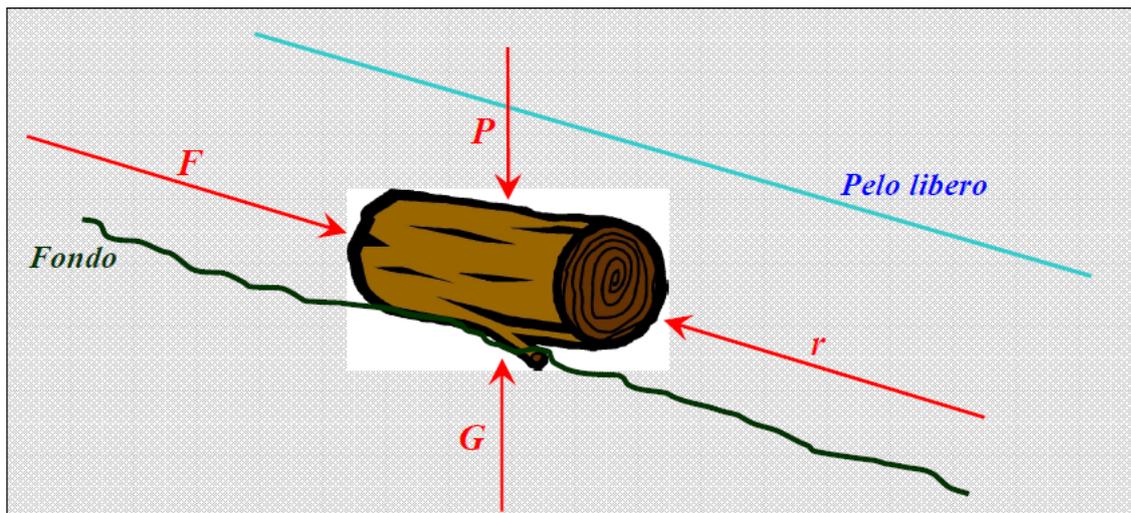
quanto il tasso di umidità del legno ne determina le caratteristiche tecnologiche (Giordano, 1976), infatti un alternanza di fasi assorbimento e desorbimento producono movimenti della struttura che tende a sfibrarsi e fessurarsi superficialmente deteriorandosi progressivamente. Quest'ultimo fenomeno è ben visibile nel legname depositato in alveo, il quale sia per l'azione del tempo sia per l'aumento dell'umidità al suo interno, subisce un peggioramento delle proprietà meccaniche quali modulo d'elasticità, resistenza a compressione, trazione e flessione. Proprio la resistenza a flessione è fortemente messa alla prova nel caso di formazione di log steps nei torrenti montani, i log steps sono morfologie assunte dai LW nel caso in cui un tronco si incastra tra sedimenti lapidei ortogonalmente alla direzione della corrente. La sollecitazione a flessione è dovuta alla spinta idrodinamica che agisce sul tronco provocando una certa curvatura lungo il suo asse maggiore che comporta a sua volta una certa freccia. Come ricordato in precedenza l'aumento d'umidità porta ad una diminuzione della resistenza a flessione, infatti, in questo contesto la spinta idrodinamica che agisce sui tronchi è sufficiente a superare il limite elasto-plastico del legname e a ridurlo in pezzi più piccoli, questo è stato dimostrato accade già con piccoli eventi di piena, pari a portate con tempi di ritorno di 10 anni e continua in modo ciclico (fase di bloccaggio e successiva fase di rottura), fino a che il legname non raggiungerà una lunghezza minima che consenta un facile deflusso lungo il collettore stesso (Degetto, 2000). Altri fattori da ricordare comunque per le loro influenze sulla resistenza a flessione sono la deviazione della fibratura, la presenza di nodi e le alterazioni dovute a malattie fungine e insetti (Giordano, 1997).

## **2.6 LW: Moto incipiente, trasporto e deposizione**

Una volta chiariti gli aspetti che influenzano le caratteristiche fisico-meccaniche del legname, si può passare allo studio della dinamica degli LW in alveo, qui il legname può venir trasportato dalla corrente oppure può depositarsi. L'eventuale mobilitazione del detrito legnoso avverrà a seconda del bilancio delle forze in gioco (**Figura 2.4**), infatti su di un singolo tronco presente in alveo agiscono le seguenti forze:

- ✓ *Forza idrodinamica (F)*, data dalla corrente e possiede il verso uguale al verso della corrente stessa, da monte verso valle.

- ✓ *Forza di resistenza* ( $r$ ), data dal tipo di detrito e possiede direzione uguale alla forza idrodinamica ma verso opposto e contrario.
- ✓ *Spinta idrostatica* ( $G$ ), tende a far galleggiare il detrito ed è applicata con verso che dal fondo del collettore sale in direzione del pelo libero.
- ✓ *Forza peso* ( $P$ ), tende a far affondare il detrito, possiede stessa direzione ma verso contrario alla spinta idrostatica.



**Figura 2.4 – Mobilitazione del detrito legnoso: bilancio delle forze in gioco.**

Tutte le forze sopraccitate dipendono a loro volta dalle caratteristiche del legno quali diametro, coefficiente di forma e densità relativa intesa come rapporto tra la densità del legno e quella del fluido in cui è immerso. Ulteriore prova di questo la si può avere notando come variano i comportamenti del detrito a seconda che questi siano originati da latifoglie o da conifere. Le prime avendo una struttura simpodiale, creano detriti di forma irregolare che trasportati dalla corrente, possono facilmente ancorarsi ad altri LW formando accumuli all'interno dell'alveo; le conifere invece avendo una struttura più compatta danno origine a pezzi quasi cilindrici che sono favoriti nella fluitazione.

Le considerazioni appena citate sono riscontrabili nella realtà solamente se si considerano dei detriti giunti nel collettore direttamente o in ogni caso giunti di recente nell'alveo. Se al contrario il legname è da lungo tempo presente nel collettore o nella zona ripariale dello stesso, avrà subito dei fenomeni di degradazione tali da annullare la distinzione latifoglie-conifere.

Oltre le caratteristiche del legno anche la morfologia del corso d'acqua influisce sul trasporto in alveo del legname. I parametri che più influiscono il moto incipiente, a parità di forma e peso del detrito, sembrano essere la pendenza del collettore, il tirante e gli angoli formati dai tronchi con la direzione della corrente (Degetto, 2000). Tirante e velocità della corrente, che insieme danno il regime idraulico del collettore, condizionano anche l'approvvigionamento di materiale legnoso, questo in quanto all'aumentare della velocità della corrente, aumenta l'erosione delle sponde, se inoltre cresce il tirante idraulico, allora vengono interessate dalla corrente anche aree in cui generalmente non avviene il deflusso (piana alluvionale) e in cui nel tempo si è depositato materiale legnoso, che così viene mobilitato ed entra nel corso d'acqua (Siffredi Duranti, 2005). Una volta entrati in acqua, i detriti legnosi possono essere movimentati attraverso tre tipologie di trasporto:

- Moto per trascinamento o rotolamento al fondo, il detrito si sposta rotolando o strisciando sul fondo sospinto dalla corrente. Le condizioni perchè questo avvenga sono: la presenza di un tirante idraulico minore del diametro del materiale legnoso ( $h/D_{log} < 1$ ) o che la densità del legno sia maggiore a quella dell'acqua.
- Moto in sospensione nella corrente, il materiale si muove immerso nell'acqua evitando contatti con il fondo e con il pelo libero. Ciò avviene per un tirante idraulico maggiore del diametro del tronco ( $h/D_{log} > 1$ ) o nel caso di una densità del legno prossima a quella dell'acqua.
- Moto per fluitazione e galleggiamento sul pelo libero, il detrito si muove in superficie o a pochi centimetri di profondità rispetto il pelo libero del collettore. Le condizioni perché questo accada sono: tirante idraulico prossimo o maggiore al diametro del detrito legnoso ( $h/D_{log} \geq 1$ ) e densità del legno inferiore a quella dell'acqua.

Un ridotto tirante idraulico, accompagnato da un'alta velocità della corrente, provoca durante il trasporto continui urti e abrasioni del detrito legnoso contro le rocce, causando a sua volta la rottura del materiale ligneo in pezzi sempre più piccoli. Man mano questo fenomeno favorisce il trasporto lungo il collettore del detrito, in quanto causa una continua riduzione delle sue dimensioni, in relazione soprattutto alla larghezza del corso d'acqua. Questo determina un legame di tipo inverso tra il rapporto dimensione materiale legnoso/larghezza del canale e l'attitudine del legname a venir mobilitato, infatti maggiore sarà la possibilità che il detrito sia movimentato al diminuire delle dimensioni dei  $LW$  rispetto la larghezza del collettore,

al contrario minore sarà la possibilità di movimentazione del materiale legnoso in presenza di un canale stretto con detrito di dimensioni notevoli.

Braudrick e Grant nel 2001 hanno creato un modello semiquantitativo per cercare di determinare la distanza, il tempo impiegato e il modo in cui si depositano i tronchi trasportati, considerando le caratteristiche geometriche del legname e quelle geomorfologiche del corso d'acqua. Con questo studio gli autori hanno determinato che i tronchi galleggiano parallelamente al flusso fintanto che la parte anteriore non si scontra con il letto del fiume o sulle sponde. Se questo accade i tronchi possono ruotare o rotolare, cercando di ritornare alla posizione di origine e riprendere il loro moto, ciò non accade se anche la parte a monte si incastra, in quanto in movimento si arresta e il detrito si deposita. Grazie a queste osservazioni su casi reali, Braudrick e Grant hanno individuato gli aspetti capaci di influenzare la capacità di deposito ( $DR$ ): tre sono grandezze caratteristiche del canale quali, larghezza, sinuosità e tirante idraulico; e due sono caratteristiche del materiale legnoso trasportato quale lunghezza e diametro.

A partire da queste informazioni, secondo gli autori la capacità di deposito ( $DR$ ) è data da:

$$DR \propto \left( \alpha_1 \frac{L_{log}}{W_{av}} + \alpha_2 \frac{L_{log}}{R_c} + \alpha_3 \frac{d_b}{d_{av}} \right) \quad (2.1)$$

In cui  $L_{log}$  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. I tre coefficienti  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  sono fattori che variano in funzione dell'importanza assunta dalle tre grandezze adimensionali.

La formula sopraccitata non tiene conto di particolari condizioni locali, dovute all'interazione della corrente con il materiale di trasporto, che possono talvolta risultare più significative di quelle medie nell'influenzare il deposito del legname. In aggiunta il materiale trasportato agisce da elemento di scabrezza aggiuntiva che tende a ridurre la velocità della corrente ed a aumentare il tirante idraulico (Siffredi Duranti, 2005).

Il legame presente tra la lunghezza dei tronchi e la larghezza del collettore, e l'influenza che hanno sulla dinamica del detrito legnoso in alveo è stato confermato

anche da altri autori; Gurnell et al. (2002) osservando come questo legame varia, hanno suddiviso i collettori in:

- **Small rivers:** la lunghezza media dei pezzi è superiore alla larghezza del collettore, in questo caso il detrito legnoso è poco mobile, tende a bloccarsi trasversalmente nell'alveo o a formare strutture caotiche indipendenti dal regime idraulico della corrente, gli *LW* così depositati controllano il trasporto ed il deposito di materiale (sedimenti e materiale vegetale più fine).
- **Medium rivers:** la lunghezza della maggior parte dei detriti è di poco inferiore o prossima alla larghezza del collettore, la mobilità del legname dipende dalle sue dimensioni e dal regime idraulico presente. Possibile la presenza di tronchi con notevoli dimensioni che fungono da *key pieces*, cioè da elementi intercettatori (grazie alla presenza dell'apparato radicale) per il materiale più fine proveniente da monte, favorendo la creazione di nuovi accumuli.
- **Large rivers:** la lunghezza dei pezzi è nettamente inferiore alla larghezza del collettore. Il trasporto del detrito legnoso è influenzato dalla geometria del canale (forma e pendenza) insieme alla distribuzione della velocità della corrente, i quali determinano la continua rottura del materiale legnoso ed il conseguente deposito di questo nelle zone marginali dell'alveo.

La probabilità di congestione aumenta al decrescere dell'ordine del collettore, proprio per rappresentare ciò, Braudrick et al. (1997) hanno redatto una classificazione del tipo di trasporto in base al grado di congestione degli elementi fluitati, individuando:

- **Trasporto non congestionato:** il detrito legnoso si muove liberamente all'interno del collettore ciò gli permette di superare eventuali ostacoli ruotando o rullando.
- **Trasporto congestionato:** il materiale legnoso occupa più del 33% dell'area unitaria del canale, si muove tutto insieme, come un corpo unico, con moto ad impulsi.
- **Trasporto semi-congestionato:** situazione intermedia rispetto le due precedenti, parte del detrito si muove in modo isolato spostandosi liberamente, altra parte invece si muove in modo congiunto, come un unico corpo.

In conclusione i fattori che influiscono maggiormente i processi di deposizione del detrito legnoso trasportato da un collettore sono secondo l'ordine di importanza: le caratteristiche del materiale legnoso (dimensione, forma e densità), dimensioni del

canale, regime di deflusso e di trasporto dei sedimenti, caratteristiche geomorfologiche del torrente (Gurnell et al., 2002).

## 2.7 Classificazione degli accumuli

Un volta esaurite le forze che ne favoriscono il trasporto, il detrito legnoso presente in alveo tende a depositarsi creando degli accumuli. In genere il materiale legnoso morto accumulatosi in alveo che possiede un diametro non trascurabile (superiore a 4-5 cm), viene chiamato in letteratura log jams. La “struttura portante” di questi accumuli è rappresentata da *LW* (*Large Woody*) di notevoli dimensioni, ai quali si aggiungono, grazie al continuo processo di trasporto-deposito, detriti di dimensioni minori, come gli *FW* (*Fine Woody*) o gli stessi *LW* di piccola taglia, i quali forniscono così una sorta di riempimento per la “struttura portante” formata da *LW* di grandi dimensioni. Le modalità di deposito dipendono dagli stessi fattori che regolano il trasporto del detrito, perciò sono influenzate dalle caratteristiche del collettore e del bacino idrografico, oltre che dalle caratteristiche del materiale legnoso. Questo ultimo aspetto è dimostrato dal diverso comportamento assunto dal log jams a seconda della specie d'appartenenza: se latifolia favorisce la formazione di accumuli (struttura simpodiale, presenza di molti rami), se conifera (struttura monopodiale, pezzi cilindrici) è facilmente trasportabile e non favorisce la formazione di accumuli. Le diverse forme di deposito influenzano l'idraulica, la morfologia e le caratteristiche ecologiche di un corso d'acqua. Dal punto di vista idraulico e morfologico la formazione di accumuli rappresenta un elemento aggiuntivo di scabrezza, in quanto provoca un aumento degli sforzi tangenziali richiesti al fondo per l'inizio della mobilità dei sedimenti (Assani e Petit, 1995). Inoltre, a seconda del tipo di accumulo, questo modifica puntualmente o in modo diffuso nell'alveo la velocità e l'energia della corrente, influenza la sezione di deflusso, la planimetria del collettore stesso e infine altera il trasporto di materiale (sedimenti e detrito vegetale).

L'aspetto ecologico è influenzato dalla presenza di accumuli di detrito in quanto questi rappresentano un habitat per la fauna vertebrata ed invertebrata, aumentando la biodiversità dell'ecosistema fluviale.

I modelli strutturali d'aggregazione degli elementi legnosi variano sistematicamente al variare delle dimensioni del corso d'acqua considerato (Nakamura e Swanson,

1993). Questo lo si può notare soprattutto nei collettori di primo e secondo ordine, dove i log jams assumono disposizioni caotiche, quasi casuali; viceversa nei corsi d'acqua di ordine superiore, dove la larghezza dell'alveo è maggiore, gli accumuli assumono forme più organizzate (Abbe e Montgomery, 1996,2003; D'Agostino, 2004).

Proprio la possibilità di individuare forme di deposito non casuali ma organizzate, permise ad Abbe e Montgomery (2003) di stilare una classificazione delle varie forme d'accumulo di legname in alveo. Gli autori, a seconda dello spostamento subito dai diversi elementi nella formazione degli accumuli, suddivisero questi ultimi in:

➤ ***In situ debris and jams***: consistono in materiale legnoso con dimensione e massa tali da annullare la forza idrodinamica degli eventi di piena ordinari in modo da impedirne lo spostamento dal punto di prima immissione in alveo. Solitamente consistono in intere piante comprendenti l'apparato radicale e i rami, A causa delle sue ampie dimensioni questo tipo di forma di deposito influenza in modo notevole la scabrezza del canale, la geometria della corrente, la morfologia del collettore, inoltre prende parte ai processi di erosione e di trasporto dei sedimenti. A loro volta gli *in situ debris and jams* si suddividono in:

- ***log steps***, depositi caratterizzati dalla presenza di uno o più elementi chiave disposti con orientamento prevalentemente ortogonale rispetto alla direzione della corrente (**Figura 2.5**). Gli elementi chiave sono di grandi dimensioni e proprio grazie alle loro dimensioni riescono ad “incastrarsi” alle sponde e al fondo, assumendo così una forma a gradino (step) simile alla morfologia degli *step-pool*. Sono diffusi in collettori caratterizzati da una limitata larghezza alla *bankfull* (minore ai 15 metri) e da una elevata pendenza. La pendenza a sua volta influisce sulla frequenza degli *steps*, in quanto un maggior gradiente equivale ad una minore distanza tra gli *steps*. L'analogia con gli *step-pool* la si nota anche studiando gli effetti che i *log-steps* determinano nell'alveo: essi infatti intrappolano sedimenti e materiale organico a monte, inoltre a valle dello step si va a formare una pozza (pool) causata dalla dissipazione dell'energia della corrente dovuta al salto. Tutto questo porta ad una riduzione della capacità di trasporto della corrente nonché dei processi erosivi, e ciò si traduce in un consolidamento delle sponde e del fondo del collettore (Siffredi Duranti, 2005).



**Figura 2.5 – Esempi di log steps rilevati all'interno del bacino del torrente Cordevole**

- **bank input debris**, al contrario dei sopraccitati log step, essi ostruiscono solo parzialmente l'alveo e per questo apportano un effetto locale sulla morfologia del collettore con la formazione di pozze e barre adiacenti agli accumuli. I *bank input debris* sono formati da tronchi d'albero (spesso con relativa ceppaia) caduti in alveo direttamente dal luogo di crescita, in seguito a processi di erosione delle sponde, schianto o movimento franoso dei versanti (**Figura 2.6**). I tronchi, con le relative ceppaie, possono rimanere ancorati al sito di crescita, assumendo le più svariate posizioni, e a volte questo li può portare anche a rimanere sospesi al di sopra della bankfull. Situazione quest'ultima che può cambiare col passare del tempo, in seguito all'aggravarsi delle cause che hanno immesso il detrito in alveo: l'allargamento del fronte frana può far cambiare posizione al detrito legnoso presente in alveo.



Figura 2.6 – Esempio di bank input debris rilevato all'interno del bacino del torrente Cordevole.

- **Transport jams:** sono accumuli costituiti da detrito legnoso movimentato lungo il collettore, solitamente il trasporto maggiore avviene lungo la linea di massima profondità e velocità del flusso, chiamata in letteratura *talweg*. Il deposito avviene durante la fase calante delle piene, quando il tirante idraulico raggiunge bassi livelli anche sulla linea di *talweg* e permette l'accumularsi del detrito legnoso in corrispondenza delle diramazioni della stessa attorno ad ostacoli, isole, barre o lateralmente alla *bankfull* (Braudrick et al. 1997). I transport jams, a seconda della loro natura e della posizione assunta in alveo, possono essere suddivisi in due sottocategorie, **depositi stabili** come i *debris flow/flood*, *bench jams*, *bar-apex jams*, *meander jams*, *log rafts jams* e i **depositi instabili** come i *bar-top jams*, *bank edge jams* e *bank revetment jams*:
  - **debris flow/flood jams:** sono accumuli generati dalla deposizione di materiale legnoso da parte di eventi di piena caratterizzati da alta concentrazione solida (colate detritiche). Morfologicamente sono strutture di grandi dimensioni e la struttura dell'accumulo non è organizzata in quanto è caratterizzata da elementi disposti casualmente in tutte le direzioni (**Figura 2.7**). A causa della loro natura derivante da fenomeni di piena i *debris flow/flood jams* possono formarsi frequentemente sulla piana alluvionale del collettore, quindi all'esterno dell'alveo vero e proprio; piana alluvionale che durante le piene, viene invasa dalla corrente e dai tronchi all'interno di essa, i quali si vanno ad "ancorare" contro gli alberi in piedi.



Figura 2.7 – Esempio di debris flow jams rilevato all'interno del bacino del torrente Cordevole.

- **bench jams:** sono depositi formati da uno o più elementi chiave incastrati, lateralmente all'alveo, in massi o nella vegetazione riparia. Rispetto il flusso della corrente sono orientati in maniera parallela od obliqua, proprio per questo determinano una deviazione della corrente e permettono il reclutamento di altro detrito vegetale e di altro sedimento fine.
- **bar-apex jams:** si tratta di accumuli che si vanno a formare principalmente alla testa delle barre, dove uno o più elementi chiave, composti da un tronco comprendente anche l'apparato radicale, si depositano parallelamente alla direzione della corrente e con le radici rivolte verso monte (**Figura 2.8**). Proprio la presenza dell'apparato radicale in tale posizione permette, col passare del tempo, che altro materiale vegetale venga intercettato e che vada a depositarsi ortogonalmente alla corrente nella zona delle radici. Proprio per questa struttura i *bar-apex jams* sono considerati accumuli molto stabili. Caratteristiche strutturali queste che influiscono sulla sezione di deflusso del collettore diminuendola oltre che causare una divisione e un rallentamento della corrente ai lati dell'accumulo stesso.



Figura 2.8 – Esempio di bar-apex jam rilevato all'interno del bacino del torrente Cordevole.

- **meander jams:** tipologia di accumulo presente principalmente in collettori di ordine superiore. La struttura è caratterizzata dalla presenza di elementi chiave, cioè tronchi interi con relativa ceppaia, disposti lungo la sponda parallelamente alla direzione del flusso con l'apparato radicale rivolto a monte. La posizione dell'apparato radicale comporta il continuo intercettamento e bloccaggio del materiale vegetale e sedimento trasportato dalla corrente, questo continuo processo permette il crearsi di grandi strutture tridimensionali di deposito, caratterizzate da un'elevata stabilità (Siffredi Duranti, 2005). Stabilità tale che permette lo stanziamento sulla struttura stessa di chiazze di vegetazione che comportano una riduzione della sezione di deflusso, una deviazione del corrente che a sua volta riduce l'erosione spondale ed infine un aumento considerevole della scabrezza. La grande stabilità di questo accumulo, oltre che dal tipo di struttura assunta, dipende dalla sua collocazione, infatti i *meander jams* si formano in collettori di ordine superiore e in particolare nella parte concava della sponda interna del meandro.
- **log rafts jams:** sono accumuli che si riscontrano nei grandi fiumi che attraversano aree boscate naturali, come quelle presenti in Nord America nei secoli scorsi. Caratterizzata da una struttura di grandi dimensioni derivante dal trasporto congestionato di grandi quantità di detrito legnoso. Caratteristica quest'ultima che causava spesso il blocco completo dell'alveo.

- **bar-top jams:** tipologia di accumulo generata in seguito alla fase calante di una piena, quando il legname trasportato resta depositato nella parte più alta delle barre (parte mediana). Il detrito legnoso assume posizione caotica e casuale (verticale e obliqua) rispetto il flusso della corrente, proprio per questo sono depositi instabili e con scarsa influenza sulla morfologia del collettore (Figura 2.9).



Figura 2.9 – Esempio di bar-top jam rilevato all'interno del bacino del torrente Cordevole.

- **bank edge jams:** accumulo formatosi in seguito al deposito di LW lungo il bordo delle sponde prive di elementi lapidei in gradi di immobilizzarli. In tale posizione assumono una disposizione all'incirca parallela alla direzione della corrente e non apportano significative influenze alla morfologia del collettore o al suo flusso. Questo anche per il fatto che sono depositi facilmente movimentabili con piccoli incrementi della portata idrica.
- **bank revetment jams:** simili come tipologia ai *meander jams* ma non possiedono gli elementi chiave, cioè i tronchi interi con relativa ceppaia, che ne potrebbero aumentare la stabilità. Non possedendo un grande stabilità possono essere facilmente mobilitati con piene ordinarie. Finché questo non avviene essi sono caratterizzati strutturalmente dalla presenza di alcuni

tronchi in alveo disposti parallelamente alla direzione della corrente, sui sedimenti laterali, fornendo un sorta di “rivestimento” alle sponde che così subiscono una minore erosione.

➤ **Combinated jams:** tipologia intermedia tra i sopraccitati *in situ debris and jams* e i *transport jams*, in quanto generata in parte da elementi autoctoni e stabili poco movimentati dalla zona di origine (*in situ debris and jams*), a cui vanno a sommarsi in un secondo tempo detriti vegetali trasportati dal flusso della corrente (*transport jams*). Individuabili in questa tipologia due tipi di accumuli i *valley jams* e i *flow-deflection jams*:

- **valley jams:** l'elemento chiave o gli elementi chiave sono grandi piante che a causa di frane, schianti dovuti ad eventi meteorici o altri eventi calamitosi di grande entità, cadono in alveo creando un'ostruzione di grandi dimensioni. Si sviluppano perpendicolarmente alla direzione del flusso e con la deviazione della corrente causata, tendono ad erodere le sponde e a reclutare altro materiale vegetale lì presente. Grazie a questo detrito reclutato il deposito aumenta sempre più le sue dimensioni fino a formare delle vere e proprie dighe naturali di legname che possono arrivare ad interessare l'intero l'alveo attivo, se non anche la piana alluvionale.
- **flow-deflection jams:** depositi caratterizzati da uno o più elementi chiave non movimentati, e perciò situati nel luogo di prima immissione, a cui si vanno a sommare elementi di minor dimensione trasportati dalla corrente e intercettati dai maggiori LW. Gli elementi minori “rastrellati” tendono ad assumere una posizione allineata al flusso della corrente.

## 2.8 Rischio idraulico connesso al detrito legnoso

L'Italia, dal punto di vista geologico, è un Paese giovane, con una seria fragilità naturale e con precari equilibri, che vengono spesso alterati dalla mancanza di una corretta programmazione e pianificazione territoriale. Prendendo in considerazione il recente passato del nostro Paese, si nota come, il dissesto idrogeologico rappresenta per esso un problema di notevole rilevanza, visti gli ingenti danni arrecati ai beni e, soprattutto, la perdita di moltissime vite umane. In Italia il rischio idrogeologico è diffuso in modo capillare e si presenta in modo differente secondo

l'assetto geomorfologico del territorio: frane, esondazioni, dissesti morfologici di carattere torrentizio, trasporto di massa lungo i conoidi nelle zone montane e collinari, esondazioni e sprofondamenti nelle zone collinari e di pianura.

Lo spopolamento degli ambienti montani, l'abusivismo edilizio, il continuo disboscamento, l'utilizzo di tecniche agricole estensive poco rispettose degli equilibri idrogeologici, l'occupazione di zone di pertinenza fluviale, il prelievo abusivo di inerti dagli alvei fluviali, la mancata manutenzione dei versanti e dei corsi d'acqua sono tutti fattori che hanno portato ad un ulteriore peggioramento delle condizioni di sicurezza del territorio nazionale.

Il rischio idrogeologico, di un dato territorio, può essere determinato tramite l'espressione di tre fattori riferiti all'area di studio, i fattori sono:

✓ *Pericolosità*: è una caratteristica intrinseca del territorio stesso ed esprime la probabilità che in una zona si verifichi un evento dannoso di una determinata intensità entro un determinato tempo di ritorno. Esso è un dato stimabile per certi tipi d'evento, quali gli alluvioni, per i quali il tempo di ritorno è determinabile. Al contrario per altri tipi d'evento, quali le frane, tale previsione è di gran lunga più difficile se non impossibile.

✓ *Valore*: sta a rappresentare il valore complessivo messo a rischio da un dato evento idrogeologico dannoso nell'area di studio. Esso è dato dal numero delle presenze umane, dall'esistenza di insediamenti urbani con conseguente presenza di edifici a destinazione residenziale, turistica o produttiva ed infine dalla presenza di infrastrutture di comunicazione e rete viaria.

✓ *Vulnerabilità*: indica l'attitudine del territorio preso in considerazione (comprendente la popolazione umana, gli edifici, i servizi e le infrastrutture), a sopportare gli effetti in funzione dell'intensità dell'evento. La vulnerabilità esprime il grado di perdite di un dato fattore o di più fattori risultante dal verificarsi di un fenomeno con specifica "magnitudo".

Specificati i tre fattori è possibile determinare il *rischio* come il risultato della seguente espressione:

$$\text{Pericolosità} \times \text{Valore} \times \text{Vulnerabilità}$$

Dalla sopraccitata formula si nota come il *rischio* esprima, dato un evento dannoso di determinata magnitudo, il numero atteso di: danni ad edifici residenziali, turistici e produttivi, danni alle attività e servizi che su questi venivano svolti e forniti, le

alterazioni sulle risorse naturali e soprattutto il numero atteso di perdite di vite umane e di feriti.

Data la storia recente del nostro paese si nota come questa sia costellata da eventi idrogeologici che hanno portato a conseguenze spesso disastrose, per capire questo basti pensare che negli ultimi 30 anni a causa di fenomeni franosi e ad alluvioni sono morte oltre 3500 persone, pari a più di 116 morti l'anno. Eventi questi che colpiscono il territorio nazionale in maniera massiccia, nel decennio 1991-2001, infatti, sono state registrate quasi 12 000 frane e oltre 1 000 alluvioni; ma aspetto importante è che la frequenza di accadimento di questi fenomeni va sempre più aumentando nel tempo, segno di un territorio sempre più fragile. Col termine alluvione si intende un fenomeno causato da un corso d'acqua che, a causa di significative precipitazioni, aumenta la sua portata fino a rompere le arginature oppure tracima sopra di esse, invadendo la zona circostante ed arrecando danni ad edifici, insediamenti industriali, vie di comunicazione, zone agricole e in generale a tutte le infrastrutture presenti nel suo bacino. Per frana invece si intende "un movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante" e possono essere a seconda della loro natura *frane di crollo* (movimento per caduta libera su versante molto ripido, nel movimento prevale la componente verticale), *frane di scivolamento* (movimento verso la base del versante di una massa di roccia che avviene lungo una superficie di rottura o entro una fascia di intensa deformazione di taglio), *frane con movimento rotazionale* (movimento innescato quando viene superato il limite della resistenza al taglio lungo superfici di discontinuità curve) e *colate detritiche* (movimento molto rapido distribuito in modo continuo all'interno del corpo di frana, questo assume l'aspetto di un corpo movimentato come un fluido). Il rischio frane in Italia è tale da far risultare il nostro paese tra i primi al mondo nella classifica dei danni subiti sia in termini economici e, soprattutto, in termini di perdita di vite umane. Da dati censiti dall'A.p.a.t. (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici), le frane attive sul nostro paese sono circa 395 mila. Dei 301000 km<sup>2</sup> di superficie italiana, ben 13760 risultano a rischio frane (compresi 1500 km<sup>2</sup> a pericolo valanghe), mentre 7791 km<sup>2</sup> sono a rischi alluvioni, per un totale di 21551 km<sup>2</sup> a rischio idrogeologico, pari al 7,1% della superficie totale del paese. Ancora più significativo è il dato riguardante i comuni, fornito dal rapporto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio insieme all'Unione delle Province d'Italia nel 2003, che dimostra come 5581 comuni italiani (68,9% del totale) ricadano in aree classificate a potenziale rischio idrogeologico

molto elevato. In particolare nel Veneto sono ben 161 i comuni soggetti a tale rischio, pari circa al 30% del totale. Nella Provincia di Belluno i comuni a rischio idrogeologico siano ben 28 pari al 41% di quelli esistenti nella provincia stessa. Di fondamentale importanza anche l'aspetto economico, basti pensare che lo Stato e gli Enti Locali nel periodo che va dal gennaio 1999 fino a marzo 2006 hanno finanziato ben 1959 interventi per la riduzione del rischio idrogeologico, con una spesa di circa 1500 milioni di euro. Il dato sopraccitato però tiene conto solo dei costi delle opere di prevenzione, tralasciando invece le spese sostenute dallo Stato e dagli Enti Locali per far fronte alle emergenze causate dagli eventi dannosi, dato questo che può raggiungere tutt'altro tipo di valore, com'è capitato nel biennio 2000-2001 (piene e colate detritiche in Val d'Aosta, alluvione del Po nel Nord Ovest d'Italia, colata di fango su campeggio abusivo a Noverato solo per citarne alcuni) in cui sono stati spesi per tale motivo oltre 1 miliardo e 689 milioni di euro. Cifre queste, che dimostrano come la tendenza non sia quella di prevenire i fenomeni tramite uno sforzo di ricerca e di studio per dotarsi di adeguati strumenti conoscitivi, come per esempio un'adeguata pianificazione territoriale, ma sia piuttosto quella di correre ai ripari dopo che il danno sia stato subito dalla collettività.

Il ruolo degli *LW* nell'ambito del rischio idrogeologico è di fondamentale importanza, anche se ancora oggi tende ad essere sottovalutato, questo a causa del fatto che gli eventi dannosi dovuti alla presenza di legname in alveo sono tuttora poco studiati o poco documentati. Uno dei pochi ad essere sufficientemente documentato fu l'evento che colpì la frazione di Caprile, nel comune di Alleghe durante l'alluvione del Novembre 1966. Questa piccola frazione si trova proprio alla confluenza tra i torrenti Fiorentina e Pettorina con il collettore principale, cioè il torrente Cordevole. Qui nel 1966, in seguito alle piene che colpirono tutto il bellunese e tutto il Trentino, i due affluenti insieme al Cordevole depositarono un'enorme massa di fango e legname tale da sommergere diverse abitazioni e raggiungere i 5 metri di altezza (**Figura 2.10**). L'importanza del detrito legnoso è legato al fatto che accresce il rischio di sovralluvionamento ed esondazione durante gli eventi di piena a causa della riduzione della sezione di deflusso degli alvei e alla ostruzione della luce dei ponti; dall'altro gioca un ruolo fondamentale nella dinamica fluviale poiché contribuisce alla formazione di unità morfologiche stabili che influenzano l'idraulica, la geomorfologia e l'ecologia del corso d'acqua (Siffredi Duranti, 2005). Entrando nello specifico si può notare come la presenza di *LW* determini spesso la formazione di ostruzioni sulle pile

dei ponti, aumentando la spinta idrostatica a valori che possono superare la tolleranza del manufatto stesso, fino a causarne il cedimento; determina erosioni localizzate, aumenta la scabrezza e accresce la portata al colmo negli eventi di piena (Abbe e Montgomery, 1996). L'aumento della portata al colmo è ancora più significativa nel caso di *dam-break*; questo si presenta nel caso in cui gli accumuli di legname prima stabilizzati in alveo si rompono per l'eccessiva spinta idraulica e vengono movimentati da una portata liquida non ordinaria. Il volume di legname così animato va a sommarsi, spesso anche in modo repentino, al già presente volume d'acqua, accrescendone ancor di più la portata al picco.

Gli accumuli di legname possono inoltre ridurre la funzionalità delle opere di trattenuta, come le briglie selettive, le quali vengono realizzate a monte degli insediamenti e delle infrastrutture. A ridosso dei filtri di questi manufatti, gli elementi legnosi (tronchi, ramaglie, ecc.) tendono ad accumularsi in modo disordinato, favorendo il deposito dei sedimenti più fini, innescando una compattazione del deposito a monte che va a rallentare o bloccare il meccanismo di autopulizia delle opere durante le piene ordinarie (Mazzalai et al., 2006). Tutto questo va a compromettere l'efficienza delle opere di trattenuta che sono di fondamentale importanza, infatti, durante le piene, i processi di erosione e di trasporto compromettono la stabilità dei versanti, generando una portata solida, che spesso rappresenta il fattore di pericolosità maggiore per gli insediamenti antropici (Benini, 1990).



Figura 2.10 – Il paese di Caprile (BL) il giorno dopo l'alluvione del Novembre 1966.

## 2.9 Stima dei volumi di legname movimentabile

Visto l'influsso che la presenza di *LW* ha sul rischio idrogeologico, sarebbe molto utile, allo scopo di perseguire l'obiettivo della sicurezza idraulica, possedere strumenti capaci di poter determinare il volume di legname movimentabile durante un evento di piena. Tale informazione oltre che ad approfondire la conoscenza dell'area di studio permette di acquisire un dato fondamentale per la progettazione delle opere di trattenuta, tanto importanti al fine della riduzione del rischio. In letteratura le ricerche effettuate allo scopo della quantificazione del legname movimentabile sono esigue, in ogni caso però i primi studi sono da ricondurre a Ishikawa (1990). Questo autore si interessò all'argomento studiando alcuni bacini in Giappone caratterizzati da una notevole presenza di detrito legnoso in alveo, quantità tale che negli anni precedenti era stata causa di frequenti ostruzioni su opere di trattenuta e tracimazioni. Grazie all' utilizzo di foto aeree, Ishikawa riuscì ad individuare le zone in frana e quelle con possibili smottamenti, individuando così le aree boscate potenzialmente sorgenti di *LW*. Come risultato dei suoi studi l'autore determinò

l'esistenza di una relazione tra l'area drenata del bacino e il numero di tronchi trasportati da un evento di piena, caratterizzata da un inviluppo superiore della distribuzione rappresentabile dalla formula:

$$N_{log} = 5000 \cdot A_b \quad (2.2)$$

dove  $N_{log}$  è il numero dei tronchi,  $A_b$  è l'area del bacino idrografico in  $km^2$ .

Sempre Ishikawa (1990) nello stesso studio riesce a determinare una seconda relazione che lega il numero dei tronchi questa volta con il volume di sedimento prodotto, il limite dell'inviluppo superiore è dato dalla seguente espressione:

$$N_{log} = 0,2 \cdot V_y \quad (2.3)$$

dove  $N_{log}$  è il numero dei tronchi,  $V_y$  è il volume di sedimento prodotto in  $m^3$ .

Questa espressione evidenzia l'esistenza di una relazione diretta fra il trasporto di sedimento e quello di legname. Tale relazione, secondo Ishikawa, è possibile in quanto i tronchi trasportati e il sedimento prodotto sono (di norma) proporzionali alle aree con movimenti franosi o con erosione spondale (Degetto, 2000).

Altro passo fatto dallo studioso giapponese è stato quello di ricavare due ulteriori formule statistiche che questa volta mettono in relazione con i diversi parametri il volume trasportato. La prima formula è data da:

$$V_g = 500 \cdot A \quad (2.4)$$

dove  $V_g$  è il volume di legname trasportato ( $m^3$ ),  $A$  è l'area del bacino idrografico ( $km^2$ ).

La seconda formula invece è data da:

$$V_g = 0,02 \cdot V_y \quad (2.5)$$

dove  $V_g$  è sempre il volume di legname trasportato ( $m^3$ ),  $V_y$  invece è il volume di trasporto solido ( $m^3$ ).

Altro studio effettuato in Giappone è quello proposto da Uchiogi et al. (1996). Questi, appoggiandosi agli studi precedentemente formulati da Ishikawa e con lo scopo di

dare origine ad una metodologia per pianificare gli interventi di prevenzione e difesa dal legname durante un evento di piena, hanno determinato l'espressione:

$$V_{log} = K_5 \cdot A_w \quad (2,6)$$

dove  $V_{log}$  è il volume del legname trasportabile ( $m^3$ ),  $A_w$  è l'area boscata del bacino idrografico ( $km^2$ ),  $K_5$  è una costante che può assumere valori fra 10 e 1000 per le foreste di conifere, tra 10 e 100 per le foreste di latifoglie. Il passo in avanti fatto da Uchiogi et al. è dato dal fatto che al fine di determinare il volume di sedimento trasportabile, si ritiene necessario prima stimare le dimensioni di possibili frane o smottamenti e l'eventuale probabilità di formazione di un *debris flow*. Una volta individuati questi fenomeni si passa alla stima dei volumi, dei diametri e altezze delle piante viventi in piedi e di quelle morte in alveo che possano venir coinvolte da eventi di piena o da *debris flow*. Terminata la fase di acquisizione di questi dati si passa alla determinazione del volume di materiale trasportabile grazie alla formula (2.6). Approfondimento va fatto sul parametro  $K_5$  soprattutto in merito al "peso" che può assumere nella sopraccitata formula. Questa costante è ottenuta stimando valori di eventi precedenti, moltiplicando il volume di legname per un rapporto di deflusso si perviene al probabile volume defluibile. Questo rapporto di deflusso è calcolato tramite lo studio di eventi precedenti, se questi sono documentati in maniera insufficiente il rapporto di deflusso viene allora posto uguale a 0,9 per torrenti con sezione di deflusso "stretta", mentre assume il valore di 0,8 per torrenti a sezione "larga". L'arbitrarietà con cui vengono definiti i collettori in modo "largo" o "stretto", fa intendere che forse il metodo debba ancora essere affinato (Degetto, 2000), questo anche in ottica del notevole peso che il valore  $K_5$  può assumere nella formula, modificando i volumi di legname di 3 ordini di grandezza.

Rickenmann (1997) è stato tra i primi studiosi a sviluppare ricerche in questo ambito anche a livello europeo, raccogliendo dati da 34 differenti bacini con caratteristiche eterogenee ma comunque interessati da un elevato trasporto legnoso in seguito ad eventi di piena. Da queste analisi l'autore ha ricavato la seguente relazione:

$$V_{log} = 45 \cdot A_b^{2/3} \quad (2.7)$$

dove  $V_{log}$  è il volume del legname trasportabile ( $m^3$ ) durante eventi di piena,  $A_b$  è la superficie del bacino idrografico ( $km^2$ ). Questa relazione però, come affermato anche dallo stesso Rickenmann, restituisce una dispersione dei dati notevolmente dispersa, sia per bacini estesi che per quelli con minor superficie, per questo la correlazione del bacino con il legname risulta molto bassa.

Altra espressione ottenuta dall'autore è:

$$V_{log} = 90 \cdot A_w \quad (2.8)$$

dove  $V_{log}$  è il volume del legname trasportabile ( $m^3$ ),  $A_w$  è la superficie boscata all'interno del bacino ( $km^2$ ), in questo caso si ottengono risultati migliori ma resta una notevole dispersione per valori di superficie boscata inferiore ai  $100 km^2$ .

Considerando invece la sola lunghezza degli alvei boscati, l'autore ha ottenuto una dipendenza di tipo quadratico:

$$V_{log} = 40 \cdot L_w^2 \quad (2.9)$$

dove  $V_{log}$  è il volume del legname trasportabile ( $m^3$ ),  $L_w$  è appunto la lunghezza degli alvei boscati espressa in km. Fondamentale è ricordare che la relazione si mantiene in tal modo quadratica solo per valori di  $L_w$  inferiori ai 20 km.

Sempre lo studioso svizzero, studiando gli idrogrammi di piena, è riuscito a ricavare una relazione che dimostra come il volume di materiale solido trasportato durante un evento sia correlato al massimo volume d'acqua transitato durante il medesimo evento.

La relazione è la seguente:

$$V_{log} = 4 \cdot V_w^{2/5} \quad (2.10)$$

dove  $V_{log}$  è il volume del legname trasportabile ( $m^3$ ),  $V_w$  è il massimo volume d'acqua transitato durante l'evento di piena ( $m^3$ ).

Alla conclusione dei suoi studi Rickenmann nota come gli esigui studi applicati ai bacini alpini paiano rispecchiare i bacini idrografici giapponesi caratterizzati da piccole aree drenate, con un estensione massima di  $2 km^2$ . Al contempo però lo stesso autore fa notare come le relazioni da lui formulate siano da considerarsi

indicative, questo a causa dell'elevata eterogeneità dei dati riguardanti la presenza di detrito legnoso, comprendendo in questa categoria diverse tipologie di materiale non sempre riconducibili alla categoria degli *LW*.

## 2.10 Analisi svolte in Italia

Gli studi condotti in Italia riguardanti la formazione e il trasporto dei *LW* sono pochi e concentrati nell'ultimo decennio. Le aree geografiche più "studiate" da questo punto di vista sono quelle del Fiume Cecina in Toscana (Rinaldi et al., 2006), alcuni collettori montani nel Trentino Orientale (Degetto, 2000), e diversi torrenti nell'Alto Bellunese (Slongo, 2005; Ebo, 2005; Rigon, 2005; Siffredi Duranti, 2005; Calligaro, 2006; Rosin, 2007; Comel, 2007). I primi studi sono stati realizzati da Degetto (2000) sui torrenti Caserine, Fumola, Ceggio, Vael, Udai, Dona nel Trentino Orientale. L'autore compiendo delle operazioni di campagna su questi collettori montani caratterizzati da un'elevata quantità di materiale legnoso, ha potuto determinare il valore da lui definito come *volume di base*, cioè il volume del legname presente in alveo. Se al *volume di base* si va a sommare la quantità di *LW* prodotta dai fenomeni di erosione e mobilitazione lungo le sponde e lungo le zone adiacenti l'alveo, si ottiene il *volume potenziale*. Sempre Degetto ha riscontrato anche l'esistenza di una relazione direttamente proporzionale tra la lunghezza dei tronchi trasportati durante gli eventi di piena e la larghezza della bankfull.

L'area dell'Alto Bellunese è stata studiata da diversi autori che hanno esaminato vari torrenti del bacino dell'Alto Cordevole, a Nord del Lago di Alleghe. Questi studi sono stati effettuati tramite delle misurazione in campo dei detriti legnosi presenti in alveo, riportandone le caratteristiche dimensionali come diametro medio e lunghezza, e alcune caratteristiche qualitative, come la specie d'appartenenza e lo stato di aggregazione, solo per citarne alcune. Oltre alle proprietà del materiale vegetale presente in alveo si sono determinate le caratteristiche morfometriche dei vari torrenti e bacini oggetto di studio. Conclusione a cui tutti gli studiosi sono giunti è stata l'esistenza di una relazione di tipo inverso tra l'area del bacino e la quantità di detrito espresso in termini unitari. Entrando nello specifico di questi studi si nota come Slongo (2005) abbia esaminato i torrenti Fiorentina, Cordon e Code individuando una relazione di tipo diretto tra la pendenza del collettore e il volume rilevato di *LW*. Un'

ulteriore relazione determinata dallo stesso studioso riguarda i soli torrenti Cordon e Code (affluenti del Fiorentina), qui si nota una corrispondenza tra il volume del legname in alveo e il rapporto di boscosità (rapporto tra area boscata e superficie totale del bacino). Altro studio sviluppato nell'area del Cordevole è quello di Rigon (2005), qui l'autore ha provato ad applicare le formule di Ishikawa e Rickenmann al bacino del torrente Codalunga. Le suddette formule sono risultate non idonee per l'applicazione ai bacini dolomitici in quanto restituiscono valori di gran lunga superiori a quelli realmente rilevati in campo. Nonostante ciò i risultati ottenuti in campo sono risultati dello stesso ordine di grandezza rispetto a quelli conseguiti da altri studiosi in altri bacini del Cordevole, dimostrando perciò l'esistenza di una certa omogeneità di volumi al cambiare del bacino di studio. Ulteriore sviluppo operato da Rigon è stato nella definizione del termine *detrito legnoso potenziale*, con cui si vuole rappresentare tutta la vegetazione viva presente all'interno della piana alluvionale; vegetazione che a causa della mobilitazione operata da eventi di piena non ordinari diventa una delle principali sorgenti di detrito legnoso.

Sempre nel 2005 è stato condotto lo studio di Ebo che si è occupato di verificare il rischio idraulico connesso alla presenza di accumuli di detrito legnoso posti trasversalmente al collettore. Questa tipologia di deposito può influire sul canale ostruendolo e successivamente causando fenomeni noti come *dam breaks*. Tramite il software "DAMBRK<sup>®</sup>", Ebo ha effettuato delle simulazioni verificando il comportamento assunto dal Rio Molini (affluente di destra del Cordevole) nel caso questo subisse sia fenomeni di piena non ordinari sia la presenza di accumuli trasversali all'alveo.

Altro studio sviluppato nel Rio Molini è quello di Siffredi Duranti (2005), l'autrice in questo caso si è concentrata sull'influenza assunta da parte dalla gestione del territorio nella presenza del legname in alveo, evidenziando soprattutto i diversi comportamenti delle aree gestite da quelle non gestite.

Gli studi più recenti sono quelli di Calligaro (2006) sul torrente Ru Davedin; di Rosin (2007) sui torrenti Rio Valbona, Rio delle Miniere e Rio Bianco (tributari di destra del torrente Pettorina); di Comel (2007) nei torrenti Ornella ed Andraz e hanno avuto come oggetto il ruolo assunto dagli accumuli di legname in alveo. Queste ricerche hanno evidenziato come fenomeni quali frane e smottamenti abbiano un "peso" fondamentale sulla quantità di detrito legnoso presente nel collettore, lo stesso dicasi per le aree non gestite e caratterizzate da uno stato di semi-naturalità.



### 3. SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI

#### 3.1 Quadro conoscitivo

Nel campo della pianificazione e gestione territoriale va sempre più assumendo un ruolo centrale la possibilità di utilizzo degli strumenti definiti SIT, acronimo di Sistemi Informativi Territoriali. Questa tendenza non vale solo per le discipline da noi toccate ma vale anche per molti altri campi di ricerca scientifica riguardanti la scienza della Terra

I SIT sono spesso presenti in letteratura anche con diversi altri acronimi quali:

- GIS: Geographical Information System (Sistema Informativo Geografico)
- SIS: Sistema Informativo Spaziale

I due termini più usati sono sicuramente SIT e GIS, e su questo aspetto sono presenti “due scuole di pensiero”: la prima definisce i due acronimi come aventi lo stesso significato, la seconda al contrario intende per l’acronimo GIS la componente tecnologica del sistema, tanto che nel linguaggio comune questo termine viene inteso come pacchetto GIS o software GIS. Proprio seguendo quest’ultima indicazione nel presente scritto si userà preferibilmente il termine SIT per riferirsi ai Sistemi Territoriali Informativi.

Di definizioni riguardanti questo strumento ce ne sono molte, le più esaustive, però lo definiscono come:

- “una potente serie di strumenti per acquisire, memorizzare, estrarre a volontà, trasformare e visualizzare dati spaziali del mondo reale” (Burrough, 1986).
- “un gruppo di procedure che consentono input, memorizzazione, accesso, mapping e analisi spaziale sia per dati spaziali che per attributi, per supportare le attività decisionali dell’organizzazione” (Grimshaw, 1995).
- “un sistema composto da banche dati, hardware, software ed organizzazione che gestisce, elabora ed integra informazione su una base spaziale o geografica” (Barrett e Rumor, 1993).

Le attività in ambito scientifico di Osservazione della Terra hanno avuto una rapida espansione e, anche se esiste una scarsa consapevolezza del come utilizzare correttamente le potenzialità a disposizione, settori economici sempre più ampi accedono all’utilizzo di dati rilevati con procedure di posizionamento satellitare, fotogrammetria tradizionale e digitale, laser scanner e telerilevamento multi e

iperspettrale da aereo e da satellite con immagini a diverse risoluzioni geometriche, spettrali, radiometriche, temporali, ottiche e radar (Gomarasca, 2004). Le informazioni così ottenute sono rappresentate su supporti cartografici digitali e numerici, gestibili nei Sistemi Informativi Territoriali. Nonostante ciò si tratta pur sempre di una notevole mole di dati che deve essere gestita ed utilizzata in tempi rapidi se si vuole avere un'ottimale conoscenza del contesto territoriale.

Prima di entrare nelle specifiche caratteristiche dei SIT si preferisce approfondire alcune materie su cui si fondano i Sistemi Territoriali Informativi; infatti, discipline quali, la Cartografia, la Fotogrammetria, la Topografia, il Telerilevamento e l'Informatica solo per citarne alcune, sono le basi che insieme convogliano negli strumenti definiti SIT.

Di seguito verranno trattate in modo sintetico le sole materie toccate da questo studio tralasciando le nozioni più specifiche.

### **3.2 Cartografia**

Questa disciplina è stata definita dall'Associazione Internazionale di Cartografia come: "l'insieme degli studi e delle operazioni scientifiche, artistiche e tecniche che a partire dai risultati delle levate originali o dall'esame e dallo studio dei dati di una documentazione, vengono compiuti sia per l'elaborazione e l'allestimento delle carte, di piani e di altri sistemi di espressione, sia per la loro utilizzazione". Le funzioni principali di questa disciplina sono tre: fornire una conoscenza del territorio *puntuale* cioè riferita allo studio di ogni singolo oggetto, ma anche *generale* allo scopo di fornire una visione d'insieme; favorire lo sviluppo di processi logici di tipo deduttivo e induttivo in funzione di relazioni di vicinanza, frequenza.....(Gomarasca, 2004); fornire un aiuto fondamentale per operazioni di classificazione, pianificazione, progettazione e gestione del territorio.

Lo scopo principale della Cartografia è l'ottenimento di una carta cioè di una rappresentazione approssimata, piana, ridotta e simbolica dell'intera superficie terrestre o di parte di essa. La carta è creata secondo processi che permettono di trasformare le figure ellissoidiche in figure piane e che, mediante particolari simbologie riescono a rappresentare tutte le informazioni di forma e misura degli elementi del terreno. Inoltre forniscono la possibilità di raffigurare fenomeni concreti

localizzabili nello spazio o astratti con la loro posizione relativa. La carta è ottenuta tramite un processo comprendente diverse fasi: prima di tutto vengono rilevati e selezionati i dati spaziali; poi questi vengono omogeneizzati e standardizzati agli scopi della relativa cartografia; successivamente i punti appartenenti alla superficie terrestre vengono trasformati in punti corrispondenti su di una superficie di riferimento in modo tale da creare una corrispondenza biunivoca tra di loro, si opera perciò un' approssimazione della superficie terrestre; questa superficie viene poi "trasportata" sulla carta grazie ad un sistema di riferimento cartografico, grazie cioè ad una serie di equazioni matematiche che permettono la rappresentazione della superficie terrestre sul piano; infine si realizza la carta scegliendone i dettagli quali la tipologia, la legenda, la scala e i simbolismi.

Questo processo ha ottenuto un forte impulso grazie alle possibilità offerte dalla restituzione fotogrammetrica e dal telerilevamento che hanno sostituito o potranno sostituire in futuro la prima fase del processo, cioè il rilevamento diretto, semplificandolo e velocizzandolo.

### **3.2.1 Ellissoide e geoide**

Come si è detto in precedenza in Cartografia si compie un' approssimazione della superficie terrestre in modo tale da permetterne la rappresentazione su di un piano. Solitamente si pensa alla Terra come ad un pianeta di forma sferica, invece essa è uno sferoide, cioè possiede una forma leggermente più larga all' equatore e schiacciata ai poli. La superficie di riferimento più idonea per la descrizione della Terra risulta essere il *geoide*, cioè quella superficie definita dall'andamento medio del livello dei mari in assenza di fenomeni quali maree, correnti o eventi meteorologici. Essa è una superficie equipotenziale cioè è una superficie caratterizzata dal fatto che in ogni suo punto la forza di gravità assume lo stesso valore, per questo è normale in ogni punto alla direzione della verticale, cioè è perpendicolare alla direzione della forza di gravità. Riassumendo il geoide può essere definito come la superficie equipotenziale passante per il livello medio del mare. Di tali superfici ne esistono infinite, in Italia si è perciò deciso di scegliere quella passante per il livello medio mare nel porto di Genova. Esso rappresenta un'ottima superficie teorica, ma però non risponde ai requisiti matematici necessari per permettere il posizionamento di ogni punto della superficie terrestre. Proprio per questo viene utilizzata un'altra forma

rispetto il geode, una forma in cui ogni punto della superficie terrestre possa essere posizionato e individuato tramite processi matematici, questa forma viene definita *ellissoide* e rappresenta la superficie geometrica che meglio approssima il geode. L'ellissoide geometricamente è definito come un ellissoide biassiale generato dalla rotazione di un'ellisse intorno al proprio asse minore e può essere descritto grazie tre dati: l'asse maggiore "a", l'asse minore "b" e il rapporto di schiacciamento  $\alpha$  dato dall'espressione  $\alpha = (a - b) / a$ . Questa tipologia di superficie grazie alle caratteristiche di essere regolare e di poter essere rappresentata matematicamente trova largo uso per la determinazione delle coordinate planimetriche. Al contrario per le coordinate altimetriche si preferisce l'utilizzo del geode, in quanto questo assume anche un significato fisico, aspetto non posseduto invece dall'ellissoide. Nel corso degli anni molti studiosi hanno determinato diversi ellipsoidi di riferimento grazie anche all'evolversi della tecnica migliorando sempre più l'approssimazione ellissoide-geode.

Uno degli ellipsoidi più importanti è quello di Hayford, determinato nel 1909, questo nel 1924 venne adottato in sede internazionale e successivamente nel 1940 venne approvato anche in Italia come ellissoide di riferimento per la cartografia nazionale. Come detto anche in precedenza l'evolversi della tecnica e dei suoi strumenti ha portato anche ad una sempre maggiore precisione nelle misurazioni, maggiore precisione che ha portato nel 1984 alla definizione dell'ellissoide WGS84, sistema di riferimento ufficiale del GPS (Global Position System). Storicamente, ma con pesanti riflessi ancora oggi sulle cartografie nazionali, il problema delle individuazioni di ellipsoidi di riferimento è stato affrontato in modo locale disgiungendo l'aspetto planimetrico da quello altimetrico attraverso la definizione di un ellissoide e un geode locali. Solo l'introduzione di sistemi di posizionamento satellitari ha permesso di pensare ad un utilizzo di sistemi geocentrici globali.

### **3.2.2 Sistemi di riferimento e Datum**

Il sistema di riferimento viene definito come l'insieme di misure e di regole per la determinazione della posizione spazio temporale di un qualsiasi punto della superficie terrestre. Come prima ricordato molte nazioni hanno creato il proprio sistema di riferimento, detto in questo caso sistema locale, orientando un ellissoide rispetto ad un punto di emanazione, cioè rispetto ad un punto definito all'interno del

proprio territorio. Con *Datum planimetrico* invece si definisce un insieme di prescrizioni costituite da otto parametri (due riguardanti la forma dell'ellissoide e sei di posizione ed orientamento) e da una rete compensata di punti che lo materializza nell'area di interesse. In Italia il primo utilizzato fu il *Datum ante 1940*, che utilizzava come ellissoide di riferimento quello di Bessel e come centro d'emanazione l'Istituto Idrografico della Marina a Genova, questo costituì la base di tutta la cartografia italiana dal 1877 al 1942. Successivamente venne adottato il cosiddetto *Datum post 1940*, utilizzando come superficie di riferimento l'ellissoide di Hayford (detto anche ellissoide Internazionale) orientato a Roma Monte Mario, questo nuovo Datum permise di superare l'elevata frammentazione della rappresentazione riguardante il territorio nazionale che affliggeva il *Datum ante 1940*, inoltre questo Datum è quello ancora oggi più utilizzato nel nostro paese, ai fini geodetici e topografici, tanto che la maggior parte delle regioni lo utilizza tuttora per la memorizzazione della propria carta tecnica numerica. Nel 1951 è partita l'unificazione delle reti geodetiche europee con lo scopo di creare il nuovo *European Datum 1950* conosciuto con l'acronimo ED50, anche questo Datum ha assunto come superficie di riferimento l'ellissoide Internazionale di Hayford, orientandolo in questo caso con l'orientamento medio europeo, imposto perciò sulla verticale del punto situato presso l'osservatorio astronomico di Potsdam in Germania. Le longitudini invece sono originate dal meridiano di Greenwich. L' ED50 in Italia è utilizzato ai soli scopi cartografici, oggi infatti con tale sistema viene prodotta la quasi totalità della cartografia. Altro importante Datum è il World Geodetic System, conosciuto con l'acronimo WGS84, realizzato con le conoscenze tecniche e tecnologiche disponibili al 1984. Il WGS84 è un sistema terrestre convenzionale (CTS) in quanto è costituito da un sistema cartesiano geocentrico con l'origine coincidente con il centro di massa della Terra, l'asse Z passante per il polo Nord e l'asse X passante per il meridiano di Greenwich. A questo sistema di riferimento è associato uno specifico ellissoide con caratteristiche, quali l'asse minore e il rapporto di schiacciamento, proprie. Anche in questo caso le longitudini sono originate dal meridiano di Greenwich. Il WGS84 ha assunto una grande importanza in quanto è il sistema di riferimento utilizzato dal Global Position System (GPS) a livello internazionale, a livello nazionale è stato utilizzato per esempio nella creazione della nuova rete geodetica dell'IGM denominata IGM95 che copre l'intero territorio nazionale con 1230 vertici.

### 3.2.3 Sistemi di coordinate

Con la scelta del Datum da utilizzare si sceglie anche il sistema di coordinate che permetterà di descrivere il posizionamento di un punto rispetto la superficie di riferimento assegnata. La posizione di un punto sulla Terra può essere indicata in uno dei seguenti tre modi:

#### ➤ **Coordinate geografiche**

Il posizionamento viene definito in funzione di una coppia di coordinate ellissoidiche quali latitudine ( $\varphi$ ) e longitudine ( $\lambda$ ). Per definire queste due coordinate bisogna considerare un punto generico P appartenente all'ellissoide e la normale superficiale ad esso relativa N. L'angolo acuto che la normale N forma con il piano equatoriale con segno concorde all'asse Z prende il nome di latitudine ( $\varphi$ ) del punto P. La longitudine ( $\lambda$ ) di P invece è definita dall'angolo che il semipiano meridiano passante per P forma con il semipiano di origine passante per Greenwich. Le linee di uguale latitudine ( $\varphi$ ) sono definite paralleli mentre le linee di uguale longitudine ( $\lambda$ ) sono chiamate meridiani, grazie a questo aspetto è inoltre possibile generare un reticolo geografico che "ricopre" la superficie terrestre costituito interamente da meridiani e paralleli.

#### ➤ **Coordinate cartesiane**

In questo caso la posizione di un punto viene data in funzione delle sue coordinate rispetto un sistema cartesiano con origine al centro dell'ellissoide. Esempio di questo tipo sono le coordinate del sistema di riferimento WGS84 che per ogni punto della superficie restituisce la terna cartesiana X,Y,Z.

#### ➤ **Coordinate cartografiche**

Nel posizionamento cartografico è necessario mettere in corrispondenza i punti dell'ellissoide con quelli presenti nel sistema cartesiano piano, per far ciò si utilizzano delle relazioni puramente matematiche (esempio Gauss). Queste relazioni permettono di proiettare ogni punto dell'ellissoide su di un cilindro orizzontale. Riassumendo le coordinate cartografiche sono rappresentate dalle coordinate Est (E) e Nord (N) che determinano sulle carte un riferimento cartesiano piano, esse sono legate alle coordinate geografiche attraverso

trasformazioni matematiche note la cui forma dipende dalla proiezione adottata (Gomarasca, 2004).

### 3.2.4 Proiezioni cartografiche

Come detto in precedenza, lo scopo principale della cartografia è l'ottenimento di una carta creata secondo processi che permettono di trasformare le figure ellissoidiche in figure piane. Questi processi sono delle trasformazioni analitiche, che pur se affinate nel corso degli anni, comportano sempre un'alterazione nelle dimensioni e nelle forme delle figure piane rispetto all'originale figura ellissoidica. Proprio per cercare di ovviare a questo si possono utilizzare diverse proiezioni (strumento per "trasformare" le figure ellissoidiche in figure piane) a seconda della caratteristica che si vuole mantenere inalterata: nelle proiezioni *equivalenti* le aree sulla carta corrispondono ad aree uguali nella realtà, questo a discapito delle altre caratteristiche che subiscono delle deformazioni; le proiezioni *conformi* mantengono costanti gli angoli fra due direzioni; nelle *equidistanti* ad essere immutati sono i rapporti di scala lungo specifiche direzioni (meridiano o parallelo di interesse); infine le affilattiche subiscono deformazioni in tutte le caratteristiche sopraccitate ma in modo contenuto.

Tra le proiezioni conformi più utilizzate, se non la più utilizzata, spicca quella di Gauss. In questo tipo di proiezione è di grande importanza la scelta del meridiano di riferimento in quanto questo viene trasformato nell'asse delle ordinate Nord, lo stesso vale per l'Equatore che diviene asse di riferimento Est. Una volta definito il sistema di riferimento piano grazie agli assi Nord e Est, si possono trasformare tutti i meridiani e tutti i paralleli formando così un gruppo di curve tra loro simmetriche e perpendicolari rispetto gli stessi assi principali. A livello internazionale, al fine di limitare le deformazioni, si è scelto di dividere la superficie terrestre in 60 fusi longitudinali, ognuno con ampiezza pari a 6°. A sua volta ciascun fuso viene suddiviso in 20 fasce orizzontali di ampiezza 8°, cosicché l'incrocio di un fuso e di una fascia permetta di identificare una zona. Per le caratteristiche sopraccitate le superfici rappresentabili in un fuso sono solo una porzione della superficie terrestre totale, per questo si usa affiancare due o più fusi per ritrarre aree più estese. Questo vale anche per il territorio nazionale italiano che è compreso tra i fusi 32 e 33 e le zone T e S. Grazie al fatto che ciascuno di essi possiede un diverso meridiano centrale, ogni fuso avrà anche un diverso sistema di riferimento piano, dato da una

falsa origine Est al cento del fuso di 500 km e dalla coordinata Nord originata dall'equatore.

### 3.2.5 Forme cartografiche

Con il passare degli anni e con il parallelo progredire della tecnica il dato cartografico oltre che possedere un aspetto cartaceo va assumendo sempre più un aspetto numerico, aspetto questo che ne ha favorito il crescente utilizzo negli strumenti definiti SIT.

Ad oggi le forme con cui la Cartografia si presenta sono:

#### ➤ **Cartografia tradizionale**

Trattasi della cartografia, come dice il nome, tradizionalmente conosciuta. Riproduce le informazioni sottoforma di tavole disegnate e parametrate a seconda dello scopo della carta, inoltre la rappresentazione del territorio viene definito in uno specifico sistema di coordinate. Al suo interno si possono individuare due tipologie di informazioni: *le informazioni planimetriche*, in cui sono rappresentati i particolari naturali e artificiali della superficie terrestre, e *le informazioni altimetriche*, dove l'informazione è "slegata" da quella planimetrica e possiede una propria simbologia descrittiva data dalle curve di livello e da punti quotati che definiscono l'altimetria della superficie terrestre. Questo tipo di cartografia possiede due peculiarità che sono la scala della carta, indica il numero di volte di cui è ridotta sul disegno la reale distanza tra due punti, e la legenda della carta che rappresenta la chiave interpretativa (Gomarasca, 2004) a cui l'utente può far riferimento per comprendere il significato della simbologia adottata come per esempio le diverse tipologie di linea, di retinature, d'espressioni numeriche e acronimi.

#### ➤ **Cartografia automatica**

Tipologia intermedia tra la cartografia tradizionale e quella numerica-digitale. Collocabile all'interno del processo produttivo della cartografia tradizionale come strumento per la gestione numerica del dato ai fini della sua riproduzione su formato cartaceo, nasce perciò da esigenze cartografiche di produzione. Permette la rappresentazione numerica, vettoriale o raster del contenuto della

cartografia tradizionale consentendone una facile riproducibilità. Oltre a ciò materializza in ambiente informatico l'informazione cartacea, questa può esservi aggiunta nel corso della produzione, in fase di restituzione fotogrammetrica, o in un secondo momento grazie alla digitalizzazione vettoriale o raster della cartografia cartacea preesistente.

### ➤ **Cartografia numerica-digitale**

Permette di mantenere tutte le caratteristiche metriche e qualitative della cartografia tradizionale, aggiungendone però alcuni particolari come: *la memorizzazione e strutturazione* dei dati che avvengono in forma numerica su supporto magnetico delle coordinate degli oggetti rappresentati e della loro codifica rispetto alla tipologia; grazie allo sviluppo informatico la *visualizzazione del dato* avviene su video che ne permette la gestione e la riproduzione cartacea, inoltre rende possibile la visione del dato a diverse scale scelte a seconda della necessità d'uso. Altra importante caratteristica della cartografia numerica-digitale è nella forma di organizzazione del dato numerico che permette un accesso ai database elettronici conducibile con l'ausilio di logiche programmabili tipiche dei calcolatori. La cartografia numerica-digitale inoltre consente di condurre operazioni automatiche di classificazione, selezione, statistiche basate sulla codifica, geometria e posizione topografica degli oggetti; requisiti questi che ne permettono un facile utilizzo nei Sistemi Territoriali Informativi. Date le informazioni al suo interno contenute, questo tipo di cartografia può essere suddivisa in:

- ✓ *planimetrica*: memorizza solamente le coordinate planimetriche (Est, Nord) degli oggetti.
- ✓ *plano-altimetrica*: memorizza in modo distinto le informazioni planimetriche relative al posizionamento degli oggetti (Est, Nord) e quelle altimetriche del terreno (punti quotati, curve di livello).
- ✓ *tridimensionale*: le tre coordinate spaziali (Est, Nord, quota altimetrica) vengono descritte per tutti gli oggetti rappresentati.

### 3.3 Fotogrammetria

Questa disciplina posa i suoi fondamenti sulla volontà di ricostruire in modo rigoroso la corrispondenza geometrica tra immagine ed oggetto al momento dell'acquisizione (Gomasca, 2004). I prodotti ottenibili da un processo fotogrammetrico sono di due tipi:

- ✓ **prodotti immagine:** derivanti da trasformazioni geometriche di immagini originali, all' interno di questa categoria di prodotti si possono includere le *ortofoto* e i *mosaici* (insieme di immagini singole adiacenti).
- ✓ **prodotti numerici puntuali e vettoriali:** in questi la restituzione avviene attraverso la determinazione delle coordinate di punti oggetto in un sistema di riferimento tridimensionale. All' interno di questa categoria si possono includere le *carte topografiche*, le *carte tematiche*, i *profili altimetrici* e i *modelli tridimensionali* a seconda della tipologia degli oggetti a cui le coordinate si riferiscono e a seconda delle modalità con cui queste vengono organizzate.

A seconda della rappresentazione del dato restituito e quindi degli strumenti utilizzati per l'ottenimento del dato stesso, si possono definire, inoltre, due differenti tipi di fotogrammetria: la *fotogrammetria tradizionale* che restituisce l'immagine su supporto fotografico, e la *fotogrammetria digitale* che restituisce l'immagine su supporto digitale.

#### ➤ **Fotogrammetria tradizionale**

La fotogrammetria tradizionale può essere *terrestre* o *aerea* a seconda della posizione da cui si effettua la presa degli oggetti. Nel primo caso infatti la presa di oggetti posizionati sulla superficie terrestre avviene tramite camere posizionate anch'esse a terra, esempio di questo sono i rilievi di edifici o di versanti franosi. Nella fotogrammetria aerea invece la presa degli oggetti avviene dall'alto, grazie a camere posizionate a bordo di aeromobili. Il processo fotogrammetrico tradizionale è caratterizzato dalle seguenti fasi: acquisizione e registrazione delle immagini, successivo orientamento delle immagini acquisite e ricostruzione del modello tridimensionale dell'oggetto, infine restituzione su supporto fotografico con conseguente misura dell'oggetto e formalizzazione numerica o grafica delle sue caratteristiche dimensionali.

### ➤ **Fotogrammetria digitale**

Questo tipo di fotogrammetria viene definita digitale in quanto agisce in tutte le sue fasi su immagini gestibili attraverso il calcolatore (Gomarasca, 2004). Al contrario di una fotocamera tradizionale che registra l'immagine su di una pellicola, una fotocamera digitale registra l'immagine mediante un dispositivo ad accoppiamento di carica (CCD). Al contrario della fotogrammetria tradizionale, quella digitale fornisce in tempo reale le immagini e la possibilità di controllo su di esse, grazie a questo si ha la possibilità di effettuare un riscontro immediato sulla qualità delle acquisizioni. In una fotografia digitale l'immagine viene creata partendo da un segnale analogico che viene trasformato in pixel da un convertitore analogico-digitale. Il *pixel* è definibile come ognuna delle superfici elementari che costituiscono un'immagine digitale. Ad ogni pixel vengono assegnati tre differenti valori di numeri digitali (DN), corrispondenti al rosso (R), verde (G) e blu (B). Questi tre valori di RGB vengono utilizzati dagli elaboratori per ricostruire il colore di ogni singolo pixel. Detto questo si può notare come siano chiaramente definibili diversi vantaggi del metodo digitale rispetto il processo tradizionale, questi vantaggi sono:

- ✓ elevata risoluzione radiometrica;
- ✓ a parità di tempi di ripresa, maggiore rapidità di ottenimento dell'immagine;
- ✓ facilità di elaborazione digitale;
- ✓ riproducibilità identica all'originale, in tempi brevi e con costi contenuti;
- ✓ possibilità di inserimento in sistemi informativi e di gestione.

Una volta ottenuta un'immagine digitale questa risulta formata da una sequenza ordinata di valori numerici tale da consentire la fedele riproduzione dell'immagine che essa rappresenta. Questa particolare struttura di dati è definita da delle specifiche regole che determinano a loro volta il formato dell'immagine digitale. Data la notevole mole di dati da trattare, in Fotogrammetria queste regole rispettano alcuni criteri di base: devono rispondere ad un'economicità dimensionale, la compressione dei dati deve essere compatibile per l'integrità dell'immagine pur riducendo lo spazio occupato, devono rappresentare in modo esaustivo la radiometria originale e permettere il libero utilizzo. In fotogrammetria due sono i formati che vengono utilizzati in modo prevalente, il primo è definito TIFF (Tag Image File Format), il secondo è chiamato JPEG (Joint Photographic Experts Group). La fotogrammetria digitale però non possiede solo vantaggi rispetto la fotogrammetria tradizionale, per riassumere si possono definire i *vantaggi* come:

- ✓ ampliamento dell'utenza in quanto lo strumento informatico risulta ad oggi più familiare ad un operatore medio;
- ✓ riduzione di dimensioni e costi per la strumentazione;
- ✓ riduzione dei tempi di lavoro grazie all'automazione delle fasi;

sono presenti però anche degli *svantaggi* che il metodo digitale porta con sé, quali:

- ✓ necessaria una progettazione del software maggiormente onerosa e complessa;
- ✓ gli strumenti informatici necessari devono possedere caratteristiche avanzate di elaborazione.

### **3.3.1 Ortofoto digitale**

Prima di passare al prossimo argomento, risulta necessario un approfondimento sulle principali caratteristiche delle ortofoto in quanto utilizzate in maniera significativa in questo studio. Un ortofoto digitale si differenzia dalle altre immagini di tipo digitale, grazie al fatto che al suo interno contiene oltre alle informazioni di tipo qualitativo e di tipo geometrico, anche informazioni di tipo metrico. Normalmente un'immagine area non possiede una valenza metrica in quanto ogni particolare risulta in una posizione planimetrica scorretta rispetto alla proiezione ortogonale, questo fattore è dovuto a due aspetti: l'inclinazione del fotogramma rispetto il piano orizzontale e l'orografia del terreno che causa una variazione continua di scala del fotogramma in funzione della quota relativa di ciascun punto rispetto il punto di presa. L'ortofoto supera questi limiti grazie alla correzione che ogni suo pixel subisce riguardo la propria posizione. Prima di tale correzione, infatti, la posizione di ciascun pixel risulta spostata per effetto delle deformazioni prospettiche dovute alle variazioni altimetriche descritte in modo dettagliato da un Modello Digitale del Terreno (DTM) georiferito. Questa fase di correzione permette all'ortofoto di poter possedere delle caratteristiche proprie, quali:

- ✓ rappresentare il modo reale la situazione dell'area ripresa ricavandone delle informazioni aggiornate,
- ✓ consentire una flessibilità di elaborazione dei dati e di gestione in un sistema informativo,
- ✓ permettere una precisione geometrica tale da essere confrontabile con le cartografie tradizionali alla stessa scala.

Grazie soprattutto a quest'ultimo aspetto, l'ortofoto rappresenta un prodotto finale di elaborazione tale da permetterne un utilizzo cartografico.

### 3.4 I Sistemi informativi territoriali (SIT)

I Sistemi Informativi Territoriali sono stati definiti in vari modi durante questi anni:

- ✓ una potente serie di strumenti per acquisire, memorizzare, estrarre a volontà, trasformare e visualizzare dati spaziali del mondo reale” (Burrough, 1986).
- ✓ “un gruppo di procedure che consentono input, memorizzazione, accesso, mapping e analisi spaziale sia per dati spaziali che per attributi, per supportare le attività decisionali dell'organizzazione” (Grimshaw, 1995).
- ✓ “un sistema composto da banche dati, hardware, software ed organizzazione che gestisce, elabora ed integra informazione su una base spaziale o geografica” (Barrett e Rumor, 1993).

Già il nome di per sé fa intendere in qualche modo le funzionalità che esso possiede:

- ✓ **Sistema:** insieme di parti interagenti tra loro,
- ✓ **Informativo:** produce informazioni (dati),
- ✓ **Territoriale:** fa riferimento al territorio (informazioni georeferenziabili).

Le problematiche inerenti, il territorio che includono aria, acqua, suolo e sottosuolo con cui interagiscono le attività antropiche, delineano un intreccio di situazioni in cui è necessario fornire efficaci strumenti e conseguenti servizi per un corretto sviluppo di attività di programmazione e gestione (Gomarasca, 2004). Lo strumento definito SIT risponde a pieno a queste necessità consentendo di interpretare fenomeni del mondo reale attraverso l'elemento unificante del territorio e dà la possibilità di effettuare interrogazioni (query) ed analisi statistico-spaziali in aggiunta a quelle tradizionali, fornendo così ulteriori basi conoscitive per chi deve assumere decisioni riguardanti il territorio. I Sistemi Territoriali Informativi basandosi sul principio di poter associare informazioni descrittive a rappresentazioni grafiche georiferite, permettono l'elaborazione e la rappresentazione territoriale come non sarebbe possibile con altri strumenti. Questa caratteristica è stata raggiunta grazie ad esperienze maturate in altri settori, esperienze queste convogliate successivamente in modo congiunto nei SIT per aumentarne le potenzialità. I settori interessati sono:

- ✓ *Computer Aided Design (CAD)*: strumenti utilizzati come supporto nella progettazione architettonica e del disegno tecnico, sviluppano le capacità di calcolo per permettere una visione tridimensionale del disegno stesso;
- ✓ *Data Base Management Systems (DBMS)*: sistemi di gestione di basi dati adeguatamente organizzate;
- ✓ *Automated Mapping/Facilities Management (Am/Fm)*: strumenti in grado di gestire contemporaneamente le componenti grafiche e quelle alfa-numeriche relative ai dati geografici, questi strumenti sono utilizzati per le funzioni di calcolo e analisi spaziali permettendo di gestire anche la terza dimensione (quota).

### 3.4.1 Breve storia dei SIT

La diffusione dei Sistemi Informativi Territoriali in Italia è abbastanza recente, a livello mondiale invece la loro storia segue questo percorso:

- ✓ **Anni '60**: nascono i primi Sit inizialmente diffusi solo in ambienti di ricerca scientifica a causa del loro elevato costo. Le prime esperienze in ambito applicativo sono sviluppate in Canada e negli Stati Uniti. In questi anni vengono applicate nella geografia tecniche di altre discipline, come per esempio la statistica. Nascita della cartografia tematica che necessita di strumenti informatici per rappresentare i propri risultati.
- ✓ **Anni '70**: organizzazione negli Stati Uniti, Canada ed Europa dei primi convegni aventi come oggetto i Sistemi Informativi Territoriali. Discreta evoluzione nelle capacità di analisi ed elaborazione dei dati, persistono invece le carenze nella rappresentazione grafica. Nascita della cartografia automatica.
- ✓ **Anni '80**: notevole sviluppo tecnologico dell'hardware che coinvolge sia la restituzione grafica a livello video sia la restituzione su supporto cartaceo tramite stampanti e plotter. Unione della metodologia di gestione informatica dei database con la grafica computerizzata. Lenta diffusione nelle grandi Amministrazioni Pubbliche.
- ✓ **Anni '90**: continuo miglioramento sia a livello hardware sia a livello software. Inizia la diffusione commerciale dei SIT a livello pubblico come a livello privato. La diffusione raggiunge anche le piccole Amministrazioni Pubbliche.

### 3.4.2 I campi d'applicazione dei SIT

La diffusione dei Sistemi Informativi Territoriali ormai è tale che, oltre ad utilizzo da parte di utenti esperti, questi vengono utilizzati anche dal semplice cittadino spesso senza sapere che lo strumento utilizzato è a tutti gli effetti un SIT. L'esempio più lampante è quello dei sistemi di *car navigation*, vale a dire quei sistemi che aiutano in automobilista a raggiungere una specifica località partendo da un'altra, fornendo anche la possibilità di ricalcolo del tragitto in caso di traffico intenso o imprevisti. I Sistemi Informativi Territoriali oltre che ad espandersi verso un pubblico di individui sempre più ampio, si sono diffusi anche in diversi settori economici e non. Per capirne questo ampio utilizzo, basti pensare alla moltitudine di dati utilizzati quotidianamente contenenti una componente geografica, in tutti questi casi un SIT può fornire notevoli potenzialità di ricerca, analisi ed elaborazioni dei dati stessi. Oltre ovviamente al settore per il quale sono stati creati cioè la gestione e pianificazione del territorio, l'utilizzo dei SIT ora si può rintracciare in svariati altri settori. Per citarne solo alcuni:

- ✓ *ambientale*, potenzialità fornite soprattutto dal collegamento tra gli strumenti SIT e gli strumenti di modellistica; l'uso di modelli permette un notevole risparmio a livello di rilievi sul terreno e permette di valutare gli impatti di un dato evento anche su territori estesi; i risultati ottenuti possono essere rappresentati in simulazioni tridimensionali per valutare l'impatto degli eventi e per meglio diffondere l'informazione.
- ✓ *agricoltura*, qui sono numerose le applicazioni SIT anche a diversa scala, infatti queste vanno dalle scelte delle strategie comunitarie fino alle applicazioni in piccole aziende agricole,
- ✓ *servizi al cittadino*, la gestione e la pianificazione di reti attraverso i sistemi informativi beneficiano di potenti strumenti che migliorano l'erogazione dei servizi, aumentandone l'efficienza. È il caso dei problemi legati alla raccolta e allo smaltimento dei rifiuti solidi urbani, la cui soluzione rappresenta un'esigenza alla quale tutte le amministrazioni comunali sono chiamate a rispondere (Migani e Salerno, 2008),
- ✓ *turismo*, basti pensare a tutti i siti web che permettono la visualizzazione di carte digitali interrogabili da parte dell'utente per ottenere informazioni sulle caratteristiche del territorio.

- ✓ *trasporti*, anche qui viene fornito un supporto per ottimizzare la gestione e la pianificazione delle infrastrutture di trasporto allo scopo di migliorarne il servizio ed abbassarne i costi.

### 3.4.3 La struttura di un SIT

Un Sistema Informativo Territoriale è composto da quattro elementi essenziali che sono:

- ✓ **Hardware:** è costituito da computer, stampanti, reti di comunicazione e altri componenti. Nel caso dei SIT i componenti aggiuntivi sono i *digitizer* (consentono l'acquisizione di informazioni territoriali), i *plotter* (consentono la rappresentazione di dati territoriali su supporto cartaceo) e *monitor* con risoluzioni e dimensioni specifiche.
- ✓ **Software:** sono a loro volta suddivisibili in:
  - *software di base*, formato dal sistema operativo e non presenta specificità particolari;
  - *software d'ambiente*, all'interno di questa categoria si collocano le specifiche componenti tecnologiche usate per il trattamento dell'informazione spaziale territoriale, la tecnologia GIS e la tecnologia CAD. La tecnologia GIS è costituita da software specializzati nella gestione dell'informazione territoriale, la tecnologia CAD invece è formata da software specializzati nella gestione delle informazione spaziale non territoriale. I prodotti costituenti la tecnologia GIS sono comunemente conosciuti con i termini *pacchetto GIS*, *software GIS* o a volte semplicemente *GIS*;
  - *software applicativi*, sono prodotti specifici per supportare funzioni ben precise, realizzati sulla base di uno o più pacchetti GIS o da altre componenti del software d'ambiente ed utilizzano uno o più linguaggi di sviluppo. Riescono a fornire risposte a precise e particolari necessità dell'utilizzatore. I programmi dedicati al trattamento dei dati territoriali sono ormai evoluti e diversificati in vettoriali, raster, integrati, dedicati o ibridi.
- ✓ **Dati:** rappresentano una componente fondamentale per l'esistenza e l'alimentazione del sistema SIT, in quanto dalla loro accuratezza, disponibilità ed

omogeneità dipende l'esito del lavoro prodotto. I *metadati* rispondono a pieno a queste necessità fornendo per ogni file le informazioni riguardo la qualità, la provenienza, la precisione e la completezza degli stessi. Altro fondamentale requisito che i dati devono possedere è quello di corrispondere ad uno standard prefissato che ne permetta il trasferimento fra diversi hardware e fra diversi software. I dati possono essere generati grazie a diversi metodi, tra cui i rilevamenti sul territorio, i censimenti, le stazioni e gli strumenti di misura a terra, con immagini da aeree e da satellite, sistemi di posizionamento globale (GPS) e sistemi a scansione laser solo per citarne alcuni.

- ✓ **Contesto organizzativo:** questo componente è costituito dagli utenti che possiedono le capacità per far funzionare gli elaboratori e la struttura all'interno della quale operano.

#### 3.4.4 Le tipologie di dati

I sistemi GIS devono gran parte del loro successo alla propria capacità di analisi ed integrazione di informazioni spesso di natura diversa. Essi, infatti, permettono la gestione sia di *dati geografici (componente spaziale)* sia la gestione di *dati alfanumerici (componente non spaziale)*

##### ➤ I dati geografici

Questi dati costituiscono la componente spaziale. Questa componente è solitamente presente su supporti quali le carte geografiche, in particolare in quelle topografiche e tematiche. I dati geografici a seconda delle caratteristiche possono essere suddivisi in:

##### ✓ I dati vettoriali

I GIS vettoriali nascono intorno agli anni '60 per rispondere ad esigenze cartografiche di tipo catastale e per il governo delle reti tecnologiche. I dati vettoriali riescono a descrivere gli oggetti del mondo reale utilizzando una serie di primitive:

- *la primitiva punto* è costituita da una coppia di coordinate x,y e per questo è idonea a rappresentare, a seconda della scala di rappresentazione, oggetti quali pozzi, pali, alberi, località;
- *la primitiva linea* è costituita da un insieme ordinato di punti connessi tra di loro, viene utilizzata per modellare oggetti che possono essere rappresentati come linee, per esempio curve di livello, fiumi e viabilità;
- *la primitiva area* è costituita da quella parte di piano che si trova all'interno di una linea spezzata chiusa in cui il primo e l'ultimo punto coincidono, questa primitiva è idonea per la descrizione di oggetti che possono venir rappresentati come aree quali per esempio appezzamenti di terreno, laghi e confini amministrativi.

Esistono numerosi problemi nel descrivere geometricamente un'entità territoriale utilizzando queste primitive. I software GIS gestiscono queste situazioni definendo primitive complesse, formate da più primitive semplici, sia dello stesso tipo che di tipo diverso (Migani e Salerno, 2008). Varie sono le fonti da cui vengono ricavati i dati vettoriali, solo per citarne alcune si possono ricordare la digitalizzazione manuale, la vettorializzazione dei dati raster, i rilievi topografici effettuati con appositi strumenti, i CAD e i GPS. Questa tipologia di dati presenta degli importanti limiti nei costi di produzione ed aggiornamento, non riducibili neanche con l'aiuto offerto dalle acquisizioni automatiche. L'aggiornamento di tali dati richiede l'intervento di personale esperto, il quale deve svolgere un lavoro continuo e costante, allungando notevolmente i tempi operativi. Questo fattore comporta una notevole difficoltà nella gestione di fenomeni a rapida evoluzione. I vantaggi che il formato vettoriale possiede rispetto agli altri tipi di formato invece, sta sia nella bassa occupazione di memoria, sia nei vantaggi apportati nella precisione e nell'estetica di rappresentazione.

#### ✓ **I dati raster**

La seconda tipologia di dati geografici è data dai dati *raster*, nati negli anni '70 come supporto per numerose discipline. In questo tipo di dati lo spazio è suddiviso in una griglia (*formato grid*), questa griglia è costituita da una serie di righe e colonne di dimensioni regolari che vanno a definire porzioni del territorio definite *celle*. Ad ogni cella viene assegnato un valore alfanumerico che rappresenta un attributo della cella stessa. I dati raster, come i precedenti dati

vettoriali, non provengono da un'unica fonte ma da varie come per esempio: i programmi d'interpretazione di immagini, le fotocamere digitali, gli scanner, le immagini satellitari e la rasterizzazione di dati vettoriali per citarne solo alcune. Una carta di tipo raster non può essere utilizzata per effettuare valutazioni di tipo metrico e/o spaziale, questo è dovuto al fatto che la georeferenziazione di un dato raster si ottiene deformando il numero di pixel che formano l'immagine stessa e spostandoli dalla loro posizione originaria. L'accuratezza dell'immagine raster dipende dalla dimensione delle celle, ricordando però che minore è la dimensione della cella, maggiore è la risoluzione dell'immagine e maggiore è il "peso" del file utilizzato. In ogni caso anche con una griglia a bassa risoluzione il dato raster richiede molto spazio per la sua memorizzazione. Grazie alla possibilità di associare ad ogni cella un numero infinito di attributi su differenti livelli, questa tipologia di dati risulta la più idonea alla gestione dei dati tematici, cioè di elementi che non hanno confini netti ma che variano gradualmente nello spazio. Questo formato inoltre, grazie all'uso di immagini digitali, permette un aggiornamento continuo dei SIT, cosa che invece non può avvenire con l'utilizzo del modello vettoriale in cui l'aggiornamento risulta molto più complesso.

Nel modello dati di un SIT, i dati vettoriali vengono utilizzati per rappresentare dati discreti mentre i dati raster vengono utilizzati per rappresentare i dati continui. L'evoluzione dei Sistemi Informativi Territoriali è stata fortemente influenzata da questa doppia presenza di formati. Per migliorarne ancora di più la coesistenza gli ultimi sviluppi GIS consentono di integrare i due tipi nel miglior modo possibile, permettendo la convivenza e l'integrazione di dati, l'elaborazione interconnessa e la conversione da un formato all'altro.

### ➤ **I dati alfanumerici**

Rappresentano la componente non spaziale (elementi non grafici) che ha lo scopo di esprimere le caratteristiche della componente spaziale (dati geografici). Ad ogni elemento geografico è possibile associare un numero infinito d'attributi, questi verranno legati alla singola cella nel caso di dati raster; alla primitiva punto, linea o area nel caso di dati vettoriali. In un SIT i dati alfanumerici vengono gestiti tramite un *Data Base Management Systems (DBMS)*, cioè un database di tipo relazionale. Qui gli attributi sono organizzati in tabelle costituite da righe e colonne, ad ogni colonna

corrisponde una diversa classe di attributi, ogni riga invece rappresenta un diverso elemento spaziale. Il legame tra i dati geografici e i dati alfanumerici che li descrivono, si realizza grazie al codice identificatore (ID), grazie cioè ad un codice che fa da tramite tra l'elemento geografico e il proprio attributo. I SIT si distinguono dagli altri strumenti della cartografia proprio grazie a questa possibilità di unire dati alfanumerici a dati geografici attraverso l'uso di un database di tipo relazionale. I Sistemi Informativi Territoriali, infatti, non hanno il solo scopo di produrre una cartografia rappresentativa del territorio, ma permettono bensì un "passo" in più cioè la possibilità d'analisi dei dati allo scopo di fornire un utile supporto alle decisioni.

### 3.4.5 Le metodologie di analisi dati

I Sistemi Informativi Territoriali si sono distinti rispetto altri strumenti per la loro capacità di poter effettuare analisi spaziali tra i dati alfanumerici e i dati geografici, permettendo così la creazione di un modello idoneo a fornire aiuti, soluzioni e previsioni riguardo a problemi e fenomeni presenti nel mondo reale. Le analisi effettuabili con un SIT sono riassumibili in tre macrocategorie:

- ✓ **Analisi dei dati geografici:** sono l'insieme di tutte le analisi effettuabili sui dati spaziali siano questi in forma vettoriale o in forma raster. Permettono per ciò di adattare i dati inseriti alla struttura interna richiesta dal SIT stesso, consentendo di georiferire, aggiornare, correggere ed elaborare i vari file utilizzati senza presentare delle perdite di dettaglio.
- ✓ **Analisi dei dati alfanumerici:** operazioni effettuabili grazie alle potenzialità dei DBMS. Consentono di organizzare, interrogare, analizzare e rappresentare gli attributi contenuti nelle tabelle. Sono suddivisibili in tre sottocategorie a seconda delle operazioni svolte: le *funzioni di ricerca* o *query*, permettono di interrogare in modo avanzato gli attributi contenuti nelle tabelle anche se riferiti a livelli informativi differenti, fornendo come prodotto finale la creazione di nuove tabelle contenenti i risultati ottenuti. Le *funzioni di generalizzazione* forniscono gli strumenti per ridurre di dettaglio il livello di classificazione, questo grazie ai processi di fusione e successiva attribuzione tra le nuove classi di attributi. Infine le *funzioni di calcolo* permettono di elaborare con operazioni di tipo aritmetico, matematico e logico gli attributi contenuti nelle tabelle.

- ✓ **Analisi integrate tra dati geografici e dati alfanumerici:** sono date a loro volta da quattro categorie. Le *funzioni di ricerca, classificazione e misura* sono operazioni di “studio” svolte sia su dati geografici che su quelli alfanumerici non apportando su di essi nessuna modifica. Le *funzioni di incrocio* sono uno dei principali pilastri nel funzionamento dei SIT, queste infatti permettono la sovrapposizione di diversi piani informativi allo scopo di ottenerne di nuovi contenenti informazioni prima non visibili. Fondamentale evidenziare che questa funzione non agisce creando solamente un nuova visualizzazione grafica ma interviene anche a livello dei dati alfanumerici. Da ricordare infine le *funzioni di vicinanza* che consentono di analizzare le caratteristiche di un territorio circostante un determinato punto geografico e le *funzioni di connettività* che verificano se e a quali reti sono collegati determinati elementi.

### 3.4.6 I modelli digitali del terreno

Negli strumenti di analisi forniti da un Sistema Informativo Territoriale, capitolo a parte è meritato dai modelli digitali del terreno (**Figura 3.1**). Questi permettono di studiare, analizzare e visualizzare in modo tridimensionale la morfologia del territorio e i fenomeni ad essa legati. L'aspetto tridimensionale nella rappresentazione ha un ruolo di primaria importanza in quanto consente tra le svariate possibilità di calcolare lunghezze reali e non ridotte all'orizzonte, questo grazie al fatto che gli elementi geografici tridimensionali oltre ad una determinata geometria forniscono anche informazioni sull'aspetto altimetrico. I modelli a tre dimensioni gestibili da un SIT sono:

- ✓ **TIN (Triangulated Irregular Network):** utilizzabile nel caso in cui si disponga di un gruppo sparso di elementi quotati, sui quali vengono posti i vertici di una rete di triangoli. Verrà perciò costituita una rete di triangoli i cui vertici sono determinati dai punti di cui si conoscono le tre coordinate.
- ✓ **DTM (Digital Terrain Model):** questo modello è generabile nel caso in cui si disponga di una serie di punti quotati e ordinati in griglie regolari.
- ✓ **DEM (Digital Elevation Model):** modello tridimensionale simile al DTM, ma differisce da quest'ultimo grazie ad una più densa distribuzione dei punti quotati. Questo fattore permette un maggiore dettaglio nella rappresentazione della

morfologia del terreno, consentendone la visualizzazione di tutte le variazioni locali.

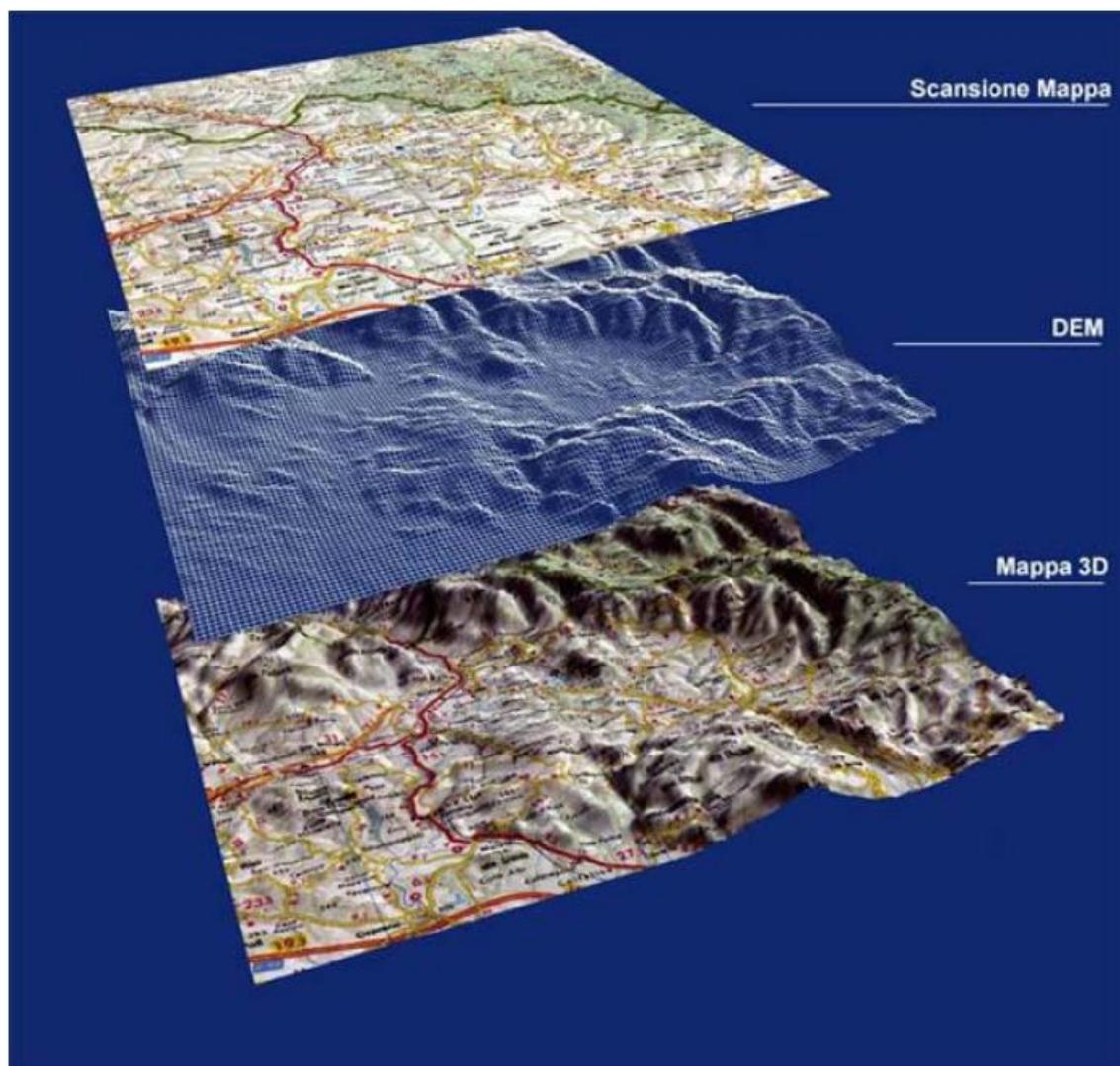


Figura 3.1 – Esempio di organizzazione dei piani informativi in ambiente GIS.

## **4. IL GOVERNO DEL TERRITORIO**

Col passare degli anni il territorio italiano presenta un rischio idrogeologico sempre maggiore a causa dei pesanti processi d'antropizzazione che hanno agito su di esso negli ultimi 60 anni. All'elevata urbanizzazione sono da sommarsi fattori quali la mancata manutenzione dei corsi d'acqua e dei versanti, il disboscamento e l'abbandono della montagna, l'apertura di cave di prestito, tutti concorrenti nell'aggravare il rischio idrogeologico del territorio. In particolare la continua espansione delle aree urbanizzate, talvolta presenti anche in zone vulnerabili dal punto di vista idraulico e geologico, parallelamente al progressivo abbandono delle attività primarie su vaste superfici agricole e non, hanno portato ad un aumento costante nell'accadimento di fenomeni dannosi come frane ed alluvioni. Proprio allo scopo di evitare fenomeni di questo tipo risulta di fondamentale importanza gestire il territorio tramite un'appropriata pianificazione territoriale, intesa quest'ultima come la disciplina che ha per oggetto l'organizzazione dell'assetto sociale, economico e territoriale di un'area con estensione sovracomunale. Nell'ambito del rischio idrogeologico risulta opportuno, al fine di consentire un'azione razionale ed efficace nella mitigazione del rischio, considerare il bacino idrografico come l'unità di riferimento per le azioni di pianificazione e programmazione. Appare evidente dunque, come gli interventi edilizi già realizzati e soprattutto le previsioni insediative e infrastrutturali debbano essere confrontate con le condizioni di sicurezza (grado di pericolosità e di vulnerabilità) definite negli studi per la pianificazione di bacino, al fine di individuare le situazioni di rischio da tutelare con adeguati strumenti urbanistici e quelle localizzazioni che invece risultano più sicure e indispensabili per garantire la salvaguardia delle popolazioni e lo sviluppo delle attività antropiche (Siffredi Duranti, 2005).

### **4.1 Aspetti normativi**

#### **4.1.1 Legge 18 maggio 1989, n. 183**

La legge 18 maggio 1989, n. 183 ha riformato il settore della difesa del suolo, per fare questo ha introdotto delle norme tese ad assicurare il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico per gli usi di razionale sviluppo

economico e sociale, la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi, oltre che ovviamente alla sopraccitata difesa del suolo. Questa legge, in particolare nell'ambito del governo del territorio, ha comportato una vera e propria innovazione in quanto ha mutato l'ottica con cui si agiva sul territorio fino a quel momento. Prima di tale normativa, infatti, si seguiva un approccio di tipo "emergenziale", non si cercava in pratica di compiere operazioni di prevenzione dei rischi, ma s'interveniva solo ad evento già avvenuto legiferando norme ad hoc. N'è l'esempio la legge n. 1142 del 1966 creata per favorire la ricostruzione e la ripresa economica nelle aree colpite dal grande alluvione. La legge 18 marzo 1989, n. 183 denominata "*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*" ha fornito gli strumenti per poter superare l'approccio "emergenziale", permettendo di approdare ad un approccio di tipo "sistemico" teso alla pianificazione dell'uso del suolo attraverso lo studio approfondito del territorio e la successiva identificazione delle aree a rischio (Siffredi Duranti, 2005). I Bacini idrografici sono gli strumenti forniti da questa norma, con essi infatti tutto il territorio nazionale viene suddiviso in entità territoriali omogenee che vanno a costituire, nell'attività di programmazione, di pianificazione ed intervento, degli ambiti unitari, tutto ciò indipendentemente dai confini e dalle attribuzioni amministrative locali. I Bacini idrografici possono essere classificati a seconda della loro scala d'applicazione in bacini nazionali, interregionali e regionali. La norma sopraccitata prevede che la gestione dell'ente "Bacino idrografico" sia affidata all'Autorità di Bacino, organismo questo che ha il compito di coordinare tutte le attività svolte da parte delle amministrazioni ed enti locali all'interno del bacino stesso, garantendo inoltre che queste siano svolte in modo coerente con la programmazione prevista. Questo può avvenire grazie alla redazione del Piano di Bacino che rappresenta uno strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo riguardo il bacino interessato. Questo piano permette sia d'attuare una pianificazione ed una programmazione degli interventi a scala di bacino, sia di individuare all'interno dello stesso i punti soggetti a potenziale rischio idrogeologico ed ambientale individuandone anche le relative iniziative di prevenzione.

#### **4.1.2 Legge 3 agosto 1998, n. 267**

In seguito al continuo accadimento di eventi idrogeologici disastrosi, quali l'alluvione nel Nord-Ovest del 1994, l'alluvione in Toscana del 1996 e la colata di fango a Sarno

nel 1998, fu legiferata la legge 3 agosto 1998, n. 267 “*Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi in Campania*”. Questa norma prevede che le Autorità di Bacino di rilevanza nazionale ed interregionale e le regioni per i rimanenti bacini debbano adottare, ove non si sia già provveduto, Piani Stralcio di Bacino per l’assetto idrogeologico allo scopo di individuare, perimetrare e dove possibile eliminare le situazioni a rischio. Inoltre gli organi di protezione civile hanno il compito, entro sei mesi dall’adozione del Piano di Stralcio, di redigere piani urgenti di emergenza contenenti le misure per la salvaguardia delle popolazioni residenti all’interno delle aree a rischio idrogeologico, definendo per le stesse le fasi di preallertamento, allarme e messa in salvo preventiva. In questa norma inoltre si evidenzia la necessità di formulare delle misure mirate all’incentivazione per l’adattamento delle infrastrutture e per la rilocalizzazione fuori delle aree a rischio delle attività produttive e delle abitazioni private.

#### **4.1.3 D.P.C.M. 29 settembre 1998**

Col D.P.C.M. 29 settembre 1998, “Atto d’indirizzo e coordinamento per l’individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all’art. 1, comma 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180” si definisce il metodo per la valutazione del rischio dipendente dai fenomeni di carattere idrogeologico. In tale normativa si stabilisce innanzi tutto che il rischio idrogeologico è dato dal prodotto logico di tre fattori, quali:

- ✓ *la pericolosità*, definita come la probabilità d’accadimento dell’evento calamitoso;
- ✓ *il valore degli elementi a rischio*, intesi come l’incolumità delle persone, gli agglomerati urbani comprese le zone di espansione urbanistica, le aree su cui insistono insediamenti produttivi ed impianti tecnologici di rilievo, le infrastrutture a rete e le vie di comunicazione di rilevanza strategica anche a rilievo locale, il patrimonio ambientale ed i beni culturali di interesse rilevante, le aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, di strutture ricettive ed infrastrutture primarie;
- ✓ *la vulnerabilità degli elementi a rischio*, la quale dipende sia dalla capacità degli elementi a sopportare le sollecitazioni esercitate dall’evento, sia dall’intensità con cui questo si manifesta.

Una volta definito il rischio, si passa allo stadio successivo che comporta lo svolgersi delle attività previste dalla norma stessa, queste attività sono articolate in tre fasi successive: nella *prima* fase, con l'ausilio di tutte le informazioni disponibili sullo stato dei dissesti, si individuano le aree soggette a rischio idrogeologico; nella *seconda* fase si effettuano le operazioni di perimetrazione e valutazione dei livelli di rischio esistenti nelle diverse aree del territorio, questo allo scopo di stabilire quali siano le misure più urgenti di prevenzione e salvaguardia da eseguire. In questa stessa fase una volta individuate le aree soggette a rischio potenziale, si procede poi con l'applicazione di una zonizzazione sulle aree stesse secondo la diversa probabilità d'accadimento dell'evento calamitoso. Seguendo queste indicazioni si possono individuare: aree ad alta probabilità d'inondazione (caratterizzate da tempo di ritorno di 20-50 anni), aree a moderata probabilità d'inondazione (tempo di ritorno di 100-200 anni) e aree a bassa probabilità d'inondazione (tempo di ritorno di 300-500 anni). In questo modo, determinando la pericolosità del territorio, si perviene alla carta delle aree inondabili; questa a sua volta sarà associata alle carte riguardanti la presenza d'elementi vulnerabili nel territorio (carta degli insediamenti, delle attività antropiche e del patrimonio ambientale) allo scopo di ottenere il reale livello di rischio presente nelle diverse zone. Il rischio viene espresso tramite quattro classi a gravosità crescente, nominate nel seguente modo:

- **classe R1**, per livello di **rischio moderato**, i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali;
- **classe R2**, per livello di **rischio medio**, in questo caso sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- **classe R3**, per livello di **rischio elevato**, sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, l'interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale;
- **classe R4**, per livello di **rischio molto elevato**, sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, possibile distruzione di attività socioeconomiche.

A questo punto, individuate le aree soggette a rischio e la loro classe di gravosità, si perviene alla *terza ed ultima fase* che consiste nell'attuazione di una programmazione della mitigazione del rischio, individuando le tipologie d'interventi da eseguire ed individuando dove e come porre dei vincoli all'utilizzazione territoriale.

#### **4.1.4 Legge 11 dicembre 2000, n. 365**

La Legge 11 dicembre 2000, n. 365 rappresenta la conversione in legge con modificazioni del D.L. 12 ottobre 2000 intitolato "Interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato e in materia di protezione civile, nonché a favore di zone della regione Calabria danneggiate dalle calamità idrogeologiche di settembre ed ottobre 2000". Con questa norma si definisce una nuova procedura per l'approvazione dei Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, infatti, per la prima volta s'indica una data limite per l'adozione definitiva del Piano, questa, di fatto, deve avvenire entro e non oltre sei mesi dalla data d'adozione del relativo Progetto di Piano. Altra novità apportata dalla Legge 11 dicembre 2000, n. 365 sta nella convocazione di una conferenza programmatica, allo scopo di adottare e attuare i Piani di Stralcio ricercando la necessaria coerenza tra pianificazione di bacino e pianificazione territoriale. Le conferenze programmatiche sono convocate dalle Regioni, articolandole per sezioni provinciali o per altro ambito, all'interno di esse partecipano le Province, i Comuni interessati, le Regioni e un rappresentante dell'Autorità di Bacino. Questi soggetti unitamente esprimono un parere sul progetto di piano che va a sostituire il parere della Regione ai sensi dell'articolo 18, della legge 18 maggio 1989, n. 183; il parere espresso deve far particolare attenzione alle integrazioni dei contenuti del piano su scala provinciale e comunale, prevedendo le necessarie prescrizioni idrogeologiche ed urbanistiche. Le determinazioni assunte in sede di comitato istituzionale, a seguito d'esame nella conferenza programmatica, costituiscono variante agli strumenti urbanistici (art. 1-bis, comma 5)

#### **4.1.5 Legge regionale 23 aprile 2004, n. 11**

Negli ultimi anni si è registrato un processo di revisione delle leggi urbanistiche in diverse regioni, questo in seguito ad una nuova coscienza delle risorse territoriali, ad una maggiore partecipazione dei cittadini al governo del territorio ed alla sempre

maggior necessità di un efficace cooperazione tra i diversi livelli e soggetti istituzionali. Il Veneto ha risposto a quest'esigenza con la Legge regionale 23 aprile 2004, n. 11,, questa rappresenta la nuova legge urbanistica regionale e "detta le norme per il governo del territorio del Veneto, definendo le competenze di ciascun ente territoriale, le regole per l'uso dei suoli secondi criteri di prevenzione e riduzione o d'eliminazione dei rischi, d'efficienza ambientale, di competitività e di riqualificazione territoriale al fine di migliorare la qualità della vita". La nuova legge urbanistica regionale si basa su alcuni principi:

- ✓ *sostenibilità*: dello sviluppo;
- ✓ *partecipazione*: l'obiettivo è e deve essere condiviso da più soggetti;
- ✓ *concertazione*: favorisce la partecipazione alla formazione dei piani informando tutti i soggetti e condividendo con tutti loro le informazioni;
- ✓ *sussidiarietà*: ciascun ente è direttamente responsabile nel suo ambito;
- ✓ *co-pianificazione*: consente a più soggetti (Regioni, Province e Comuni) di lavorare insieme allo scopo di ottenere un adeguato livello di pianificazione.

All'interno di questa norma si definisce una gerarchia dei soggetti tale per cui il Piano Territoriale Regionale di Coordinamento (PTRC) è sovraordinato al Piano Territoriale Provinciale (PTP) che a sua volta lo è per il Piano Regolatore Comunale (PRC).

Il processo di revisione riguarda principalmente la pianificazione a livello comunale ed interessa la struttura e i contenuti del "vecchio" Piano Regolatore Generale. A livello comunale, infatti, si attua una diversificazione tra l'apparato normativo *strutturale* comprendente l'individuazione delle invariabili territoriali come vincoli e tutele, gli indirizzi di sviluppo e le scelte a lungo termine; dalla disciplina *operativa* che comprende invece la scelta degli obiettivi e i contenuti operativi a breve termine. In questo modo prendono forma i nuovi strumenti urbanistici comunali denominati Piano di Assetto Territoriale comunale e Piano degli Interventi comunali, che costituiscono insieme il Piano Regolatore Comunale. Altra novità apportata dalla Legge regionale 23 aprile 2004, n. 11, è l'introduzione dello strumento definito Valutazione Ambientale Strategica conosciuto con l'acronimo Vas. Questo strumento, accogliendo le direttive europee, si pone come obiettivo quello di garantire la compatibilità ambientale dei piani e dei programmi di pianificazione territoriale. Tramite gli strumenti di pianificazione vengono definite le priorità di sviluppo; di queste la Vas ne valuta le implicazioni dal punto di vista ambientale,

prevedendo se necessario delle operazioni di conservazione e compensazione a favore delle risorse influenzate.

## 4.2 Pianificazione territoriale ed urbanistica

### 4.2.1 Piano Territoriale Regionale di Coordinamento (PTRC)

Il PTRC della Regione Veneto redatto seguendo le indicazioni delle LR urbanistica n. 61/1985 e LR n. 40/1990, viene adottato definitivamente con Deliberazione del Consiglio Regionale n. 250 del 13 dicembre 1991. Le funzioni attribuite al PTRC riguardano:

- ✓ la zonizzazione territoriale relativamente alla conservazione e alla tutela delle risorse del territorio e dell'ambiente;
- ✓ la definizione dei servizi, infrastrutture, opere pubbliche e relative aree di tutela;
- ✓ la definizione delle direttive e degli eventuali vincoli nei confronti degli strumenti di pianificazione subordinati.

Per quanto riguarda gli elaborati contenuti, il PTRC, come tutti i piani in seguito riportati, è costituito da:

- ✓ **relazione**, la quale illustra, per ciascuno delle aree e dei sistemi, gli obiettivi dell'azione pubblica e privata per la tutela, la trasformazione e l'uso del territorio; definisce le aree da sottoporre a particolare disciplina o da assoggettare a Piani Territoriali per cui fornire particolari direttive;
- ✓ **elaborati grafici**, riportano in scala appropriata, le scelte e le politiche attinenti le diverse parti del territorio, in riferimento alla *relazione* ed in stretta connessione con le *norme* del PTRC;
- ✓ **norme d'attuazione**, contengono le direttive sulla cui base la Regione e i suoi enti strumentali redigono i piani di settore ed i piani di area di livello regionale e specifici piani di competenza, nonché gli strumenti urbanistici e territoriali generali e attuativi degli Enti locali. Contengono inoltre le prescrizioni ed i vincoli cui deve uniformarsi l'attività dei soggetti pubblici e privati per gli interventi di trasformazione del territorio e per il suo uso e gestione anche in relazione alla salvaguardia, conservazione e valorizzazione delle risorse territoriali.

Per quanto riguarda i contenuti, il PTRC è suddiviso in quattro settori funzionali, quali:

- ✓ sistema ambientale;
- ✓ sistema insediativo;
- ✓ sistema produttivo;
- ✓ sistema relazionale.

Altro compito assolto dal PTRC è quello di individuare e definire i parchi naturali e le riserve mediante appositi elaborati cartografici anche sulla base delle proposte e indicazioni ricevute da parte delle Province, Comunità Montane e Comuni. In questo momento la Regione sta provvedendo a redigere il nuovo PTRC, infatti, in data 7 agosto 2007, è stato adottato il Documento Preliminare al Piano Territoriale Regionale di Coordinamento che rappresenta il primo passo per la nascita del futuro PTRC.

#### **4.2.2 Piano Territoriale Provinciale (PTP)**

Il Piano Territoriale Provinciale (PTP) viene redatto dalle Province seguendo i riferimenti dati dalla LR urbanistica n. 61/1985, dalla Legge Nazionale n. 142/1990 sulle autonomie locali e dalla riforma urbanistica attuata con la LR 11/2004. Il compito pianificatorio delle Province, in attuazione delle leggi regionali, risulta essere quello di adottare piani territoriali in grado di coordinare le proposte avanzate dai Comuni definendo, le diverse destinazioni del territorio sulla base delle loro prevalenti vocazioni, le localizzazioni di massima delle principali infrastrutture relazionali, le linee d'intervento riguardo al rischio idrogeologico ed in particolare per la gestione dell'assetto ambientale. La legge regionale urbanistica del Veneto individua nelle Province i soggetti cui affidare i compiti di tutela dell'ambiente in ambito paesaggistico, per tale motivo il PTP si occupa di difesa del suolo, valorizzazione dell'ambiente, prevenzione calamità, tutela delle risorse idriche, valorizzazione dei beni culturali, viabilità, trasporti e smaltimento rifiuti. Per quanto riguarda l'agricoltura, a causa della riduzione della superficie destinata e della polverizzazione delle proprietà, il PTP cerca di favorire la permanenza delle popolazioni rurali e tutela l'integrità del territorio rurale. L'art. 3 della LR 11/2004 prevede la preventiva redazione di un Documento Preliminare (DP) del Piano Territoriale Provinciale, allo scopo di *“individuare gli obiettivi generali che s'intendono perseguire con il piano e le scelte strategiche di assetto del territorio anche in relazione alle previsioni degli strumenti di pianificazione di livello sovraordinato”* e *“le*

*indicazioni per lo sviluppo sostenibile e durevole del territorio*". La Provincia di Belluno ha approvato, in data 20 febbraio 2007, il relativo Documento Preliminare permettendo così l'avvio della formazione del PTP e l'attivazione della fase di concertazione concernente, le scelte strategiche per lo sviluppo provinciale. Nel Documento Preliminare si descrive il modo in cui il PTP bellunese sarà redatto, questo infatti sarà caratterizzato come:

- ✓ un piano flessibile;
- ✓ un piano più di indirizzi che di prescrizioni;
- ✓ un piano strutturale ed integrato;
- ✓ un piano equilibrato ecologicamente e con valenza paesistica;
- ✓ un piano per implementare i vantaggi competitivi;
- ✓ un piano equo.

Come riportato nel Documento Preliminare, anche il PTP come il PTRC, riguarda quattro ambiti: il sistema insediativo, quello produttivo, il relazionale e quello ambientale.

In merito a quest'ultimo si evidenzia come la Provincia di Belluno sia, date le sue caratteristiche geomorfologiche e idrauliche, un territorio particolarmente soggetto ad eventi collegati a fenomeni di dissesto. Risultano particolarmente critiche le situazioni presenti nei centri abitati di Alleghe, Cencenighe, Longarone, Belluno e nella zona a monte del lago di S:Croce. Al fine della salvaguardia ambientale vengono individuati alcuni punti da perseguire:

- ✓ contenere la pericolosità idrogeologica per consentire il vivere in condizioni di maggiore sicurezza del territorio ed evitare interventi in aree ritenute pericolose;
- ✓ implementare la gestione sostenibile della risorsa acqua, salvaguardando la qualità complessiva dell'ambiente idrico, il suo risanamento e valorizzazione;
- ✓ contenere il fenomeno "cave e miniere";
- ✓ mantenimento di buoni livelli di qualità dell'aria,
- ✓ controllo delle emissioni e certificazione ambientale;
- ✓ riciclaggio e valorizzazione del rifiuto prodotto;
- ✓ sostegno a progetti di produzione energetica innovativa per la creazione di un efficiente network energetico e per migliorare l'efficienza energetica degli edifici pubblici e privati.

In particolare nell'ambito del rischio idrogeologico si individuano le seguenti prescrizioni:

- ✓ individuare le aree in cui si manifesta la presenza della risorsa acqua potabile (sorgenti) e le possibili aree in cui si potranno realizzare i futuri impianti di depurazione;
- ✓ salvaguardare i corsi d'acqua, classificarli in funzione del rapporto tra grado di naturalità e funzionalità (IFF) dando linee guida per il loro uso;
- ✓ normare le fasce di territorio ad elevato rischio idrogeologico, utilizzando anche i più recenti modelli di simulazione attualmente elaborati dai centri di ricerca e dalle università.

#### **4.2.3 Piano Regolatore Comunale (PRC)**

La pianificazione urbanistica comunale si esplica mediante il Piano Regolatore Comunale che si articola in disposizioni *strutturali*, contenute nel Piano di Assetto del Territorio (PAT) ed in disposizioni *operative*, contenute nel Piano degli Interventi (PI). Il Piano di Assetto del Territorio (PAT) è lo strumento di pianificazione che delinea le scelte strategiche di assetto e di sviluppo per il governo del territorio comunale, individuando le specifiche vocazioni e le invarianti di natura geologica, geomorfologica, idrogeologica, paesaggistica, ambientale, storico-monumentale e architettonica, in conformità agli obiettivi ed indirizzi espressi nella pianificazione territoriale di livello superiore ed alle esigenze della comunità locale. Il PAT, redatto sulla base di previsioni decennali, fissa gli obiettivi e le condizioni di sostenibilità degli interventi e delle trasformazioni ammissibili. Per citare alcuni di questi obiettivi e condizioni, il PAT:

- ✓ verifica ed acquisisce i dati e le informazioni necessari alla costituzione del quadro conoscitivo territoriale comunale;
- ✓ individua gli ambiti territoriali cui attribuire i corrispettivi obiettivi di tutela, riqualificazione, e valorizzazione, nonché le aree idonee per interventi diretti al miglioramento della qualità urbana e territoriale;
- ✓ individua gli ambiti per la formazione dei parchi e delle riserve naturali di interesse comunale;
- ✓ determina il limite quantitativo massimo della zona agricola trasformabile in zone con destinazione diversa da quella agricola, avendo riguardo al rapporto tra la superficie agricola utilizzata (SAU) e la superficie territoriale comunale (STC), secondo le modalità indicate nel provvedimento;

- ✓ detta una specifica disciplina di regolamentazione, tutela e salvaguardia con riferimento ai contenuti del Piano Territoriale Provinciale;
- ✓ assicura il rispetto delle dotazioni minime complessive dei servizi;
- ✓ determina, per ambiti territoriali omogenei, i parametri teorici di dimensionamento, i limiti quantitativi e fisici per lo sviluppo degli insediamenti residenziali, industriali, commerciali, direzionali, turistico-ricettivi e i parametri per i cambi di destinazione d'uso;
- ✓ definisce le linee preferenziali di sviluppo insediativo e le aree di riqualificazione e riconversione.

Il Piano degli Interventi (PI) è lo strumento urbanistico che, in coerenza e in attuazione del PAT, individua e disciplina gli interventi di tutela e valorizzazione, di organizzazione e di trasformazione del territorio programmando in modo contestuale la realizzazione di tali interventi, il loro completamento, i servizi connessi e le infrastrutture per la mobilità. Il PI si rapporta con il bilancio pluriennale comunale, con il programma triennale delle opere pubbliche e con gli altri strumenti comunali settoriali previsti da leggi statali e regionali e si attua attraverso interventi diretti o per mezzo di Piani Urbanistici Attuativi (PUA). Il PI in coerenza e in attuazione del PAT sulla base del quadro conoscitivo aggiornato, provvede tra i vari compiti a :

- ✓ suddividere il territorio comunale in zone territoriale omogenee secondo le modalità stabilite;
- ✓ individuare le unità minime di intervento, le destinazioni d'uso e gli indici edilizi;
- ✓ definire le modalità di intervento sul patrimonio edilizio esistente da salvaguardare;
- ✓ definire le modalità per l'attuazione degli interventi di trasformazione e di conservazione;
- ✓ individuare le eventuali trasformazioni da assoggettare ad interventi di valorizzazione e sostenibilità ambientale.

Sia il PAT che il PI, come tutti i piani urbanistici, sono formati da relazione, norme d'attuazione ed elaborati grafici, oltre a questi però contengono anche una banca dati alfa-numerica e vettoriale contenente l'aggiornamento del quadro conoscitivo di riferimento, nonché le informazioni contenute negli elaborati grafici.

Il Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (PATI), rappresenta lo strumento di pianificazione intercomunale finalizzato a pianificare in modo coordinato scelte strategiche e tematiche relative al territorio di più Comuni, disciplinandone in tutto o

in parte il territorio comunale o affrontandone singoli tematismi. La necessità del coordinamento può essere stabilita dai Comuni interessati e dal PTP o dal PTRC a seconda che l'intercomunalità riguardi una o più Province.

## **5. MATERIALI E METODI**

Il presente lavoro riguarda l'applicazione di un modello previsionale per la quantificazione del materiale vegetale in alveo. Tale modello è stato applicato al bacino idrografico del torrente Ornella, tributario di secondo ordine del torrente Cordevole, situato nell'alto Bellunese. In questo capitolo si è scelto di analizzare non solo l'area su cui si svolgerà l'analisi vera e propria, ma bensì descrivere le caratteristiche dell'intero macrobacino del torrente Cordevole inteso con sezione di chiusura posta presso il lago di Alleghe. I principali aspetti storico-sociali, ambientali e morfometrici del luogo saranno in seguito descritti. Oltre a ciò verranno riassunti i risultati ottenuti dai precedenti studi condotti in questa stessa zona.

### **5.1 Descrizione area di studio**

#### **5.1.1 Inquadramento geografico dell'area di studio**

L'analisi del materiale legnoso in alveo presentata in questo lavoro riguarda diversi torrenti di piccolo e medio ordine situati nelle dolomiti venete. I corsi d'acqua indagati convergono tutti nel torrente Cordevole (**Figura 5.3**), prima del lago d'Alleghe. Il bacino idrografico corrispondente dista circa 50 km da Belluno e comprende i comuni di Livinallongo del Col di Lana, Rocca Pietore, Colle Santa Lucia, Selva di Cadore, Alleghe, Borca di Cadore, San Vito di Cadore e Zoldo Alto situati, come detto in precedenza, tutti in provincia di Belluno.

Il Torrente Cordevole nasce a quota 2237 m s.l.m. da alcune sorgenti poste a breve distanza dal passo Pordoi, da qui scende dolcemente fino a raggiungere a quota 1600 m s.l.m. la località d'Arabba. In prossimità del centro abitato le acque del collettore vengono convogliate in un cunettone allo scopo di prevenire eventi idrogeologici dannosi per l'abitato stesso. Già in tale località il collettore è di 4° ordine grazie all'immissione in destra idrografica dell'affluente Ru Boè (3° ordine). Superata Arabba, il Cordevole si dirige in direzione Est attraversando il comune di Livinallongo del Col di Lana per poi giungere attraverso un percorso inciso in ripidi versanti franosi la località di Caprile. Raggiunta la località di Caprile, il torrente Cordevole, divenuto nel frattempo di 5° ordine grazie all'immissione del Torrente Andraz, accoglie le acque provenienti dai torrenti Pettorina (4° ordine) e Fiorentina (5° ordine)

divenendo perciò un corso d'acqua di 6° ordine. I torrenti Pettorina e Fiorentina rappresentano i principali tributari del Cordevole, il primo trae origine dal gruppo della Marmolada (Sud-Ovest dell'area di studio) e dopo un percorso di circa 13 km s'immette nel Cordevole in destra idrografica (**Figura 5.4**), il secondo invece nasce alle pendici del monte Pelmo (Sud-Est dell'area di studio), presso il passo Staulanza, e scorre nell'omonima valle Fiorentina per circa 12 km prima di sfociare nel Cordevole alla sua sinistra idrografica (**Figura 5.2**). Superata Caprile, il torrente Cordevole grazie all'apporto idrico dei sopraccitati tributari ed alla brusca riduzione di pendenza, assume un andamento meno torrentizio, quasi fluviale, distendendosi in un ampio alveo. Caratterizzato da quest'andamento prosegue il suo percorso fino a raggiungere il lago di Alleghe, formatosi nel 1771 a causa di una ostruzione della valle generata da una enorme frana staccatasi dal monte Forca. Presso il lago di Alleghe, precisamente allo sbarramento di Masarè, termina la nostra area di studio; il Cordevole però continua il suo percorso, scendendo per la valle Agordina fino a raggiungere la località denominata Mel nel comune di Sedico (BL). Qui a quota 279 m s.l.m le sue acque confluiscono nel fiume Piave. Il bacino idrografico da noi studiato, chiuso perciò all'altezza di Masarè, copre un'area di 254 km<sup>2</sup>, il bacino complessivo del torrente Cordevole è invece di 866 km<sup>2</sup>; per quanto riguarda la lunghezza presso il lago di Alleghe il collettore principale ha coperto una distanza di 22,5 km, alla confluenza con il Piave invece il Cordevole raggiunge una lunghezza di 70 km circa.

## Bacino dell'Alto Cordevole

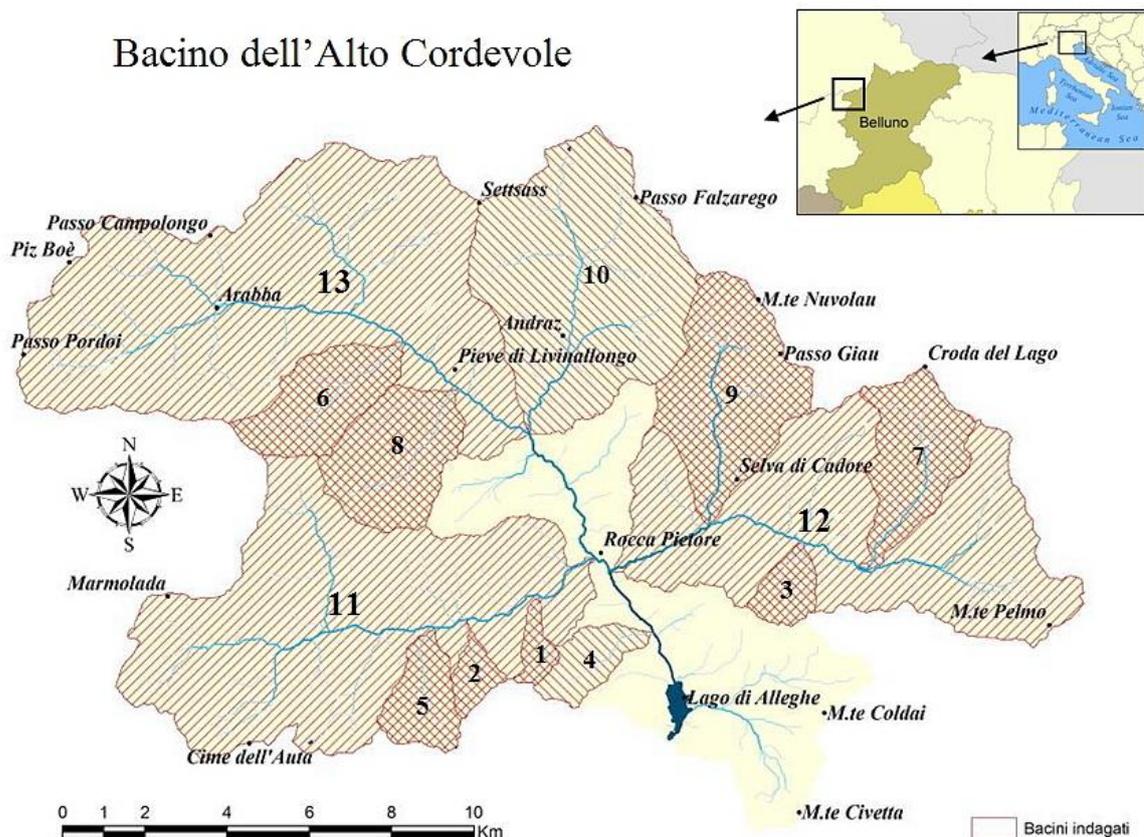


Figura 5.1 – Inquadramento geografico dell'area di studio. La numerazione si riferisce ai sottobacini indagati.

In **Figura 5.1** è riportato l'inquadramento geografico del bacino di studio con i relativi sottobacini ad esso sottesi. Di seguito, in **Tabella 5.1**, vengono riportati i nomi dei sottobacini indagati.

n°	Nome bacino
1	Bianco
2	Delle Miniera
3	Code
4	Molini
5	Valbona
6	Ornella
7	Cordon
8	Davedino
9	Codalunga
10	Andraz
11	Pettorina
12	Fiorentina
13	Alto Cordevole

Tabella 5.1 – Bacini sottesi dall'area di studio.



**Figura 5.2 – Veduta della Val Fiorentina col Monte Pelmo sullo sfondo.**



**Figura 5.3 – Veduta della Valle dell'Alto Cordevole col il Passo Pordoi sullo sfondo.**



**Figura 5.4 – Veduta della Val Pettorina con la Marmolada sullo sfondo**

### **5.1.2 Aspetti storici**

Le prime testimonianze archeologiche riguardanti, la presenza umana in quest'area sono state ritrovate nelle vicinanze del monte Pore, dove è stata rivenuta una stele funeraria con iscrizioni paleovenete, e nella zona di Mondeval (San Vito di Cadore). Qui, nel 1987 fu ritrovata una sepoltura mesolitica con ben 61 oggetti di corredo funebre, il tutto risalente al VI millennio a.C. Tali ritrovamenti dimostrano come l'area oggetto di studio fosse popolata dall'uomo già in età preromana. In questi luoghi la presenza umana sicuramente venne favorita dall'ambiente ricco di corsi d'acqua e dall'abbondante selvaggina presente negli estesi boschi. La testimonianza della presenza romana in questo territorio è data dal ritrovamento, nella parte settentrionale del gruppo del Civetta, di iscrizioni confinarie databili al I secolo d.C. Nei secoli seguenti la caduta dell'Impero Romano, oltre alle già presenti attività pastorali e venatorie, si diffusero le attività estrattive riguardanti principalmente ferro e piombo, e quelle riguardanti il commercio di legname. Grazie a queste attività stanziali, le popolazioni dell'area formarono degli insediamenti stabili, posizionandosi

nelle zone più soleggiate e ricche d'acqua. In questo modo il paesaggio cominciò a mutare progressivamente, il bosco venne gradualmente tagliato per far posto alle abitazioni, stalle ed edifici pubblici. L'esistenza di una chiesa, documentata nel 1171, è una significativa testimonianza di una presenza umana importante (Soccol e Tessarollo, 2003). Con la romanizzazione delle Alpi, nacque in queste aree il ladino. Il ladino è una lingua neolatina derivata dal latino volgare, cioè il latino popolare, risentendo però delle particolarità della lingua locale (sintassi, fonetica e vocabolario). In altre parole la lingua ladina, non è altro che il latino parlato dalle popolazioni delle Alpi verso la fine dell'Impero Romano, poi tramandata di generazione in generazione fino ai giorni nostri.

Nel XV secolo la Repubblica di Venezia espanse i propri domini fino alle Dolomiti Bellunesi; in questi secoli lo sfruttamento delle risorse forestali raggiunse intensità mai raggiunte prima, infatti oltre alle tradizionali richieste di legname per l'edilizia, per il consolidamento delle miniere locali e per le lavorazioni siderurgiche, si aggiunse la pesante richiesta di legname per la costruzione delle navi veneziane. Lo sfruttamento delle aree boscate bellunesi raggiunse livelli tali, nel XVII secolo, da costringere la stessa amministrazione veneziana all'emanazione di precise direttive aventi lo scopo di ridurre lo sfruttamento dei boschi e di migliorare la difesa del suolo. Questa problematica si ripresentò nel XVIII secolo quando, a causa di tensioni tra la Repubblica di Venezia e il Vescovato di Bressanone, l'attività mineraria dovette ridimensionarsi riducendo le estrazioni. Questo portò ad un aumento delle attività riguardanti il commercio del legname, impoverendo però allo stesso tempo il patrimonio boschivo e deteriorando la stabilità dei versanti. La natura fece sentire il suo peso l'11 gennaio 1771, quando un'enorme massa franosa si staccò dal monte Forca, in destra del Cordevole, ostruendo l'intera valle e creando quello che oggi noi conosciamo con il nome di lago di Alleghe. La frana seppellì i villaggi di Riete, Marin e Fucine mentre altri cinque borghi furono sommersi dalle acque del lago stesso.

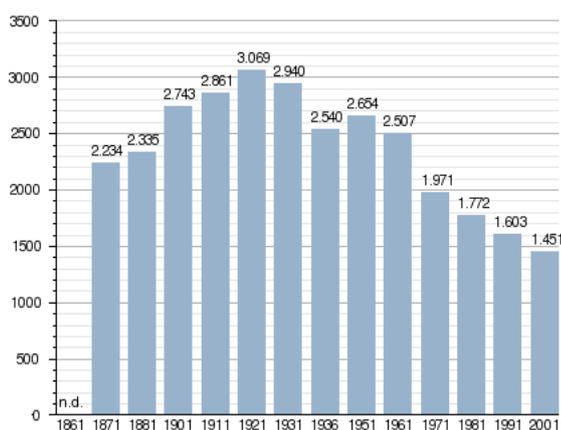
Il dominio veneziano terminò nel 1797 con l'arrivo delle truppe napoleoniche e con il successivo trattato di Campoformido che stipulò il passaggio di queste aree sotto il controllo austriaco.

Nel XIX secolo nacquero le prime attività turistiche nella zona, comparvero infatti i primi alberghi e pensioni di montagna, frequentati soprattutto da signorotti inglesi interessati all'aspetto paesaggistico e naturalistico delle Dolomiti Bellunesi. Nell'800

ben sei alluvioni (1868, 1869, 1882, 1885, 1889, 1890) colpirono questi territori causando vittime e danni agli insediamenti.

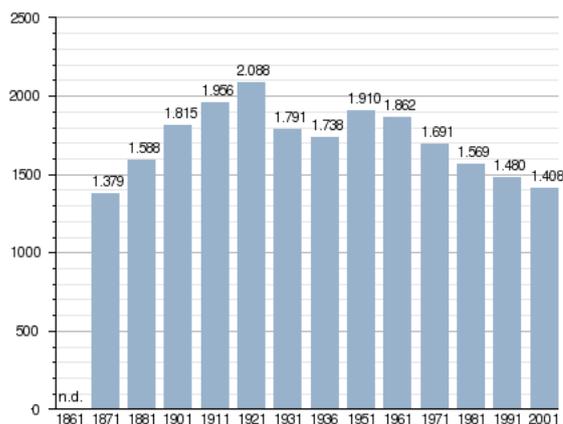
La Prima Guerra Mondiale travolse in pieno il bacino del Cordevole; qui, infatti, si trovavano le prime linee di combattimento, passanti per il Col di Lana e la Marmolada. Durante questo conflitto vaste aree della montagna veneta vennero disboscate; queste operazioni venivano svolte con lo scopo di reperire legname per fornire materiale da costruzione, per il riscaldamento delle truppe oltre che per la migliore individuazione delle divisioni nemiche. Il secondo conflitto mondiale, invece, interessò la zona solo marginalmente, e le uniche ripercussioni sono riconducibili ad alcune azioni di partigianeria.

Nel secondo dopoguerra il grande sviluppo economico portò ad un progressivo spopolamento della montagna causando l'abbandono delle attività agricole, selvicolturali e pastorali, a favore delle attività turistico-ricreative (**Figura 5.5 e 5.6**). I centri geograficamente più marginali furono quelli che risentirono di più dello spopolamento, il tutto a favore dei centri con la migliore posizione geografica che si espansero sempre più, attrezzandosi di nuovi alberghi, pensioni, ristoranti ed impianti di risalita. Questo sviluppo urbanistico ha accresciuto ancor di più la vulnerabilità del territorio, aumentando da un lato i beni danneggiabili in caso di calamità e dall'altro andando a creare infrastrutture su terreni non idonei allo scopo. Tutto ciò comporta un notevole incremento del rischio idrogeologico complessivo.



fonte ISTAT - elaborazione grafica a cura di Wikipedia

**Figura 5.5 – Andamento demografico del comune di Rocca Pietore (fonte ISTAT elaborato da Wikipedia, 2008).**



fonte ISTAT - elaborazione grafica a cura di Wikipedia

**Figura 5.6 – Andamento demografico del comune di Alleghe (fonte ISTAT elaborato da Wikipedia, 2008).**

### 5.1.3 Aspetti climatici

Dal punto di vista climatico, il bacino idrografico del Cordevole, può essere suddiviso in due aree. La zona più a Nord ricade in un clima di tipo Endalpico, contraddistinto da un'elevata escursione termica e da un regime pluviometrico continentale, con un massimo di precipitazioni nel mese di luglio. In questa zona le precipitazioni medie annuali si attestano sui 1162 mm, dati questi rilevati grazie agli Annali Idrologici del periodo 1925-1969 prodotti dal centro meteorologico di Arabba. Sempre ad Arabba si riscontra una temperatura media annua pari a 3,9°C.

La parte Sud del bacino è caratterizzato invece da un clima di tipo Mesalpico, questo comporta delle precipitazioni medie annuali pari a 1018 mm (serie temporale 1920-1969) distribuite in modo uniforme nel periodo che va da aprile a novembre. Per quanto riguarda la temperatura, in quest'area la media annuale si attesta su valori pari a 7,6°C. I valori medi annui delle precipitazioni e delle temperature, per questa zona, sono ricavati dalla stazione meteorologica di Caprile.

Le precipitazioni di tipo nevoso raggiungono uno spessore medio di 80 cm nel mese di febbraio, e perdurano al suolo per tutto il periodo che va da novembre ad aprile.

Si deve sottolineare, comunque, il fatto che le condizioni morfologiche del territorio, come le forti variazioni di quota e di esposizione influenzano notevolmente i parametri climatici medi, determinando delle condizioni microstanziali che differiscono notevolmente fra di loro (Rosin, 2007).

In conclusione se si dovesse caratterizzare in modo unitario il clima del bacino di studio, lo si potrebbe descrivere come un clima di tipo alpino-orientale con estati

fresche e rigidi inverni. Le piogge estive, che qui sono tipicamente brevi ed intense, causano spesso fenomeni di piena improvvisa nei sottobacini più piccoli, provocando a loro volta colate detritiche.

#### 5.1.4 Aspetti vegetazionali

Le specie arbustive riscontrabili nell'area del Cordevole sono diverse, nonostante ciò su tutte prevale la massiccia presenza dell'abete rosso. Questo è dovuto alle scelte selvicolturali del passato che si sono contraddistinte nel favorire le specie più idonee alla produzione del legname da opera (Barbierato, 2004). Di seguito si riportano le principali specie arbustive presenti nella zona:

- ✓ *Larice*: specie vegetale (**Figura 5.8**) capace di spingersi, in condizioni favorevoli, fino alla quota di 2400 metri; è quasi esclusivamente tipica delle Alpi. Per questi due aspetti il Larice è considerato l'albero alpino per eccellenza. Riesce a spingersi, spesso in associazione con il Pino Cembro, sopra la zona popolata da peccete fino a raggiungere il limite delle vette rocciose. Il Larice è una pianta che non è particolarmente esigente in fatto d'ambiente, ma predilige zone con forte illuminazione e i climi continentali caratterizzati da forti escursioni termiche (Comel, 2007).
- ✓ *Abete rosso*: specie diffusa in tutto il continente europeo, dalle regioni centro-orientali fino ai paesi scandinavi, oltre ovviamente alle nostre Alpi (**Figura 5.7**). La sua diffusione è dovuta alla capacità di adattarsi oltre che al clima continentale anche ai climi freddi sopportando bene le basse temperature. Dal punto di vista altimetrico riesce a spingersi fino ai 1800-2000 metri. Le associazioni pure d'abete rosso formano ampie foreste dense che prendono il nome di peccete e rappresentano il tipico paesaggio forestale Veneto.
- ✓ *Abete bianco*: esso prospera principalmente in zone montane, trovando il suo areale ideale nelle zone a piovosità e umidità medio-alte, comprese tra i 1000 e i 1800 metri. L'abete bianco raramente forma boschi puri (abetine), favorendo invece la formazione di boschi misti nel piano montano e subalpino. Tra le più importanti associazioni ci sono quelle con il Faggio, albero con il quale condivide esigenze climatiche e pedologiche, oltre che con il Larice e con l'Abete Rosso. Il suo areale a livello continentale è vasto ma frazionato; lo stesso vale per l'Italia

dove è presente sulle Alpi in maniera discontinua, frequente nella parte orientale, raro nelle zone centrali e occidentali dell'arco alpino.

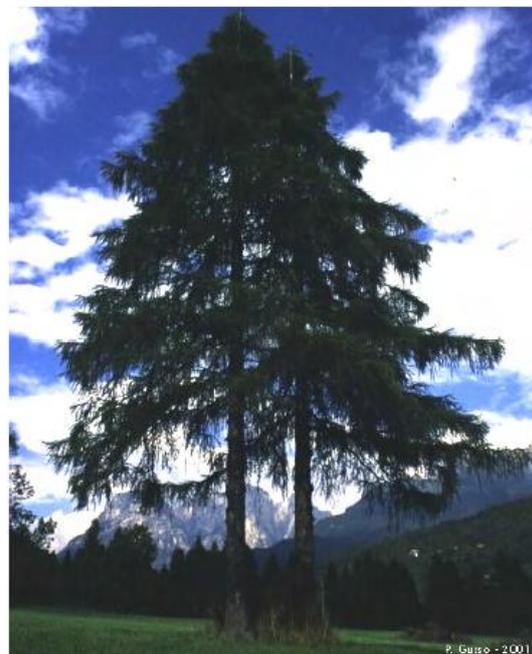
- ✓ *Faggio*: come detto in precedenza questa specie arborea è diffusa soprattutto sul cosiddetto "piano montano". Proprio per questo è facilmente riscontrabile nelle vette non molto alte e ventose oltre che a quote inferiori dove, grazie alla sua forza d'espansione, prende il sopravvento sulle altre specie vegetali. Predilige climi umidi, con piovosità costante durante l'anno. Nelle Alpi orientali sono presenti le più vaste faggete, tra le quali spicca quella del Cansiglio, a cavallo tra province di Belluno, Treviso e Pordenone.

Salendo da valle le specie arboree riscontrabili nella regione sarebbero: a quote medio-basse i piceo-faggeti, l'associazione cioè delle peccete con il faggio. Proseguendo il faggio, a causa della bassa temperatura, lascia spazio ai boschi d'abete rosso e abete bianco, chiamati piceo-abieteti. Salendo ancora di quota entra gradualmente il larice con i suoi lariceti, i quali poi lasciano spazio alle specie arbustive quali l'ontano verde, il pino mugo, il ginepro e alle praterie alpine.

Da ricordare infine le specie arboree presenti lungo le zone riparali dei torrenti montani, dove sono facilmente individuabili boschetti di salice e d'ontano bianco.



**Figura 5.7 – Esempio di Abete Rosso**



**Figura 5.8 – Esempio di Larice.**

### 5.1.5 Aspetti geomorfologici

Lo studio della litologia di un territorio, permette di interpretare al meglio i processi geologici dei versanti e dei corsi d'acqua. Questo grazie alla stretta relazione esistente tra la natura delle rocce, le loro condizioni strutturali e le forme assunte dai versanti. Il territorio oggetto di studio presenta la tipica morfologia, aspra e variabile, degli ambienti montani, caratterizzata da forti dislivelli tra il fondovalle e le vette rocciose. Le principali vette sono caratterizzate da una buona resistenza geomeccanica dimostrata dalla presenza di importanti pareti verticali. La solidità delle parti più elevate è dovuta al fatto che esse sono costituite da rocce carbonatiche e vulcanoclastiche; al contrario i versanti inferiori, costituiti da rocce sedimentarie, risultano facilmente erodibili dai fenomeni idrogeologici. Prendendo in considerazione l'aspetto morfologico si nota come le valli del Cordevole siano classificabili come valli fluvio-glaciali. Esse, infatti, sono caratterizzate dalla tipica forma ad "U" e dall'abbondante presenza d'argini e depositi morenici, fattori questi dovuti all'azione modellatrice dei ghiacciai würmiani. Col progressivo ritiro dei ghiacciai ebbe termine la fase modellatrice glaciale, ed ebbe inizio quella fluviale. In questa fase le valli del bacino vennero rimodellate da processi erosivo-sedimentologici dei versanti e dei corsi d'acqua. I torrenti in questi ambienti operano la loro azione erosiva approfondendo l'alveo ed erodendo le sponde, provocando in questo modo lo scalzamento alla base dei versanti. Il materiale prodotto da questi processi alimenta il trasporto solido durante gli eventi di piena, costituendo un potenziale rischio per le zone a valle. Se si sommano tutti questi fattori di fragilità del territorio (rocce alterabili, versanti ripidi, erosione idrica), appare chiaro come questa area sia soggetta a continui fenomeni quali frane e colate, soprattutto in concomitanza ad intensi fenomeni atmosferici.

Di seguito vengono riportate le principali formazioni geologiche presenti nell'area:

- ✓ *Arenarie e conglomerati vulcanici (Conglomerato della Marmolada)*: rocce clastiche e materiali tufacei scuri derivati in netta prevalenza dal rimaneggiamento di formazioni vulcaniche.
- ✓ *Calccare della Marmolada*: risalenti al Ladinico e Carnico Inferiore sono calcari massici, grigi, detritici ed organogeni (prevalentemente a diplopore e crinoidi).
- ✓ *Calccare di Contrin*: calcari stratificati, detritico-organogeni, grigi, generati nell'Anisico Medio-Superiore.

- ✓ *Conglomerato di Richthofen*: risalenti all'Anisico Inferiore, banchi conglomeratici a ciottoli della serie werfeniana sottostante, siltiti ed arenarie rosse mal stratificate.
- ✓ *Dolomia Principale*: calcari dolomitici e dolomie, bianche e grigie, in bancate massicce; dolomie biogeniche sottilmente stratificate, formatesi nel Norico.
- ✓ *Dolomia dello Scillar*: dolomie massicce e calcari di scogliera di color chiaro, di solito non stratificati, con resti di coralli, alghe e diplopore.
- ✓ *Formazione di La Valle (Wengen)*: arenarie poligeniche di colore bruno scuro, marne nerastre, argilliti, calcareniti brune, tufi e tufiti nerastri, arenarie e conglomerati vulcanici; formazione risalente al Ladinico Superiore.
- ✓ *Formazione di Livinallogno*: calcari e marne nodulari, calcari bituminosi, calcari detritici, tufiti come la locale Pietra Verde, il Ladinico Inferiore è il periodo di formazione.
- ✓ *Formazione di Raibl*: marne e argille rosse e gialle, calcari marnosi, calcari bituminosi, dolomie, areniti calcaree e dolomitiche, localmente arenarie quarzose e depositi tufacei.
- ✓ *Formazione di San Cassiano*: marne, marne arenacee, calcari impuri e arenarie poligeniche di vari colori, risalenti al Carnico Inferiore e Superiore.
- ✓ *Formazione di Werfen*: marne, arenarie, arenarie sottili e calcari marnosi rossastri, grigi o bruni. Formazione risalente al Werfeniano.

### 5.1.6 Dissesti

La maggioranza dei dissesti idrogeologici presenti nell'area di studio è dovuta a due fattori: l'azione erosiva dell'acqua e la geomorfologia della zona. Come visto in precedenza la geologia e la geomorfologia del bacino, sia a livello di versante sia a livello di torrente, presentano fattori predisponenti al dissesto. A questo va sommata l'azione dell'acqua, soprattutto nel caso in cui questa si presenti sottoforma di circolazione superficiale o sotterranea. In queste condizioni, infatti, è stato dimostrato come l'acqua fornisca spinte idrostatiche, diminuisca la coesione dei materiali, lubrifichi le superfici potenziali di scivolamento, aumenti la componente del peso lungo le superfici dei versanti, espliciti un'azione erosiva al piede dei materiali instabili ed infine favorisca la fessurazione delle rocce lapidee attraverso la continua

azione di gelo-disgelo. Questo avviene principalmente a livello di versante, ma nei dissesti non è da sottovalutare l'azione svolta dalla dinamica torrentizia, ad essa, infatti, sono imputabili azioni quali l'erosione al fondo e alle sponde dell'alveo, lo scalzamento di opere antropiche in alveo, nonché il trasporto durante fasi parossistiche di grandi volumi di sedimenti (Lenzi, 2005).

Il territorio oggetto di studio, a causa soprattutto delle caratteristiche citate, è stato nel corso dei secoli continuamente modellato da fenomeni quali frane, alluvioni ed erosioni più o meno localizzate. L'alluvione del 1966 rappresenta l'evento che più ha inciso su quest'area aggravando uno stato generale di instabilità latente, esplosa in un unico evento a causa dell'eccezionale apporto idrico (Soccol e Tessarollo, 2003). L'evento del '66 evidenziò la franosità dell'area oggetto di studio, dimostrando come questa sia una caratteristica intrinseca e costante che si è manifestata periodicamente già nel corso dei secoli precedenti. Grazie a vari riferimenti bibliografici, ci sono giunte numerose testimonianze riguardanti fenomeni di dissesto:

- ✓ 1626: in data 25 aprile una frana in località Masarei seppellì l'intera frazione di Renaz;
- ✓ 1771: l'11 gennaio dal monte Forca si mobilitò una frana di dimensioni tali da ostruire nei pressi di Alleghe il corso del Cordevole. Proprio a causa di questo sbarramento si formò il bacino che oggi noi conosciamo col nome di lago d'Alleghe. Il corpo di frana seppellì gli abitati di Riete, Marin e Fucine, mentre altri 5 villaggi furono sommersi dall'acqua del lago formatosi;
- ✓ 1851: il 6 novembre dopo prolungate piogge si staccò una grossa frana dal Monte Colmarce in località Rova, causando 17 vittime e la distruzione di 4 case, 7 fienili e danni e alle infrastrutture viarie;
- ✓ 1877: nel mese di maggio il torrente Fiorentina in piena causa il crollo di un ponte nell'omonima località;
- ✓ 1882: nel periodo settembre-ottobre strariparono, nel comune di Rocca Pietore, il torrente Valbona ed il Pettorina causando una vittima ed ingenti danni alla rete viaria;
- ✓ 1888: in aprile a seguito del disgelo e delle intense precipitazioni si innescarono numerose frane; tra queste si ricorda quella in località Pescul (Selva di Cadore), di dimensioni tali da provocare seri danni a 15 nuclei familiari;
- ✓ 1890: tra il 28 ed il 30 maggio le prolungate piogge e le conseguenti piene provocarono in val Fiorentina il crollo di 4 ponti;

- ✓ 1917: la notte del 27 maggio, a causa delle abbondanti nevicate dell'inverno precedente, si staccò a ciel sereno una frana di 4-5 milioni di m<sup>3</sup> dalla val di Fuori. Le vittime furono 28, di cui 21 militari e 7 civili, mentre 6 furono gli edifici completamente distrutti lungo il Rio Loschiesuoi, nel comune di Selva di Cadore;
- ✓ 1951: il 28 maggio il persistere del mal tempo caratterizzato da intense precipitazioni e nevicate causò una frana in località Crepaz (Livinallongo del Col di Lana). I danni riguardarono solamente gli edifici e le infrastrutture, non provocando nessun danno a persone; oltre a questo, a causa dell'evento il corso del Cordevole fu interrotto formando un piccolo bacino idrico che durò per circa due decenni. Nello stesso anno si evidenziarono i primi segnali di un movimento misto sconscendimento-colata nella val Ciarnara, questo riguarda all'epoca una superficie di 8 ha circa per un volume stimato in 1,2 milioni di m<sup>3</sup> di materiale;
- ✓ 1962: in data 10 novembre le abbondanti precipitazioni piovose e lo scioglimento del manto nevoso già accumulato in quota, provocarono l'ingrossamento di tutti i corsi d'acqua facendo registrare erosioni e smottamenti, soprattutto nel comune di Rocca Pietore. In questo comune e più precisamente nella frazione di Sottoguda, si verificò un singolare evento, qui si aprì, infatti, una voragine nella quale confluiva tutta l'acqua del torrente, per riemergere la stessa poco più a valle;
- ✓ 1966: l'alluvione di novembre colpì in modo intenso tutto il bacino del Cordevole. Nella val Fiorentina la strada provinciale fu completamente distrutta, l'abitato di Caprile fu colpito dalle ondate di piena del torrente Fiorentina che invasero il paese seppellendolo sotto 5 metri di materiale misto tra legname, detriti e fango (**Figura 5.9**). Il torrente Codalunga provocò ingenti danni nel comune di Colle Santa Lucia, asportando tutti i ponti presenti, circa 6 km di tratto stradale e danneggiando le rimanenti vie vicinali. Sempre nel '66 l'Alto Cordevole, con l'apporto anche dei torrenti Boè e Campolongo, invase i centri abitati di Davedino, Visinè di Là e Ornella isolandoli dal resto della valle; questi abitati furono colpiti anche a causa della mancanza delle opere di difesa idraulica, distrutte l'anno precedente da un'alluvione che colpì la stessa zona;
- ✓ 1972: a seguito di una piena alluvionale fu generata una colata detritica che scese dal Rio Aurora fino a raggiungere il Cordevole, si contarono gravi danni alla SS 48 tra i comuni di Arabba ed Alfauro;

- ✓ 1978: intense precipitazioni provocarono l'alluvionamento di parte del paese di S.Fosca (Selva di Cadore), colate di fango lungo il Rio Giavaz e l'interruzione della SS 251;
- ✓ 1981: le stesse zone colpite nel '78 furono nuovamente soggette a dissesti nel '81; in questo anno le forti precipitazioni localizzate portarono alla formazione di numerose colate di fango lungo il Rio Giavaz con la distruzione di 4 briglie poste a difesa degli abitati, la strada per Mondeval e la SS 251 furono interrotte, nella zona a monte di Pescul (Selva di Cadore) si innescarono vari smottamenti. Inoltre in Val Fiorentina una frana si staccò presso l'imbocco della galleria stradale in costruzione;
- ✓ 1988: in data 24 aprile si ebbe il collasso della frana di Pien Pont con apporto solido nell'alveo del torrente Codalunga, il movimento franoso interessò 500 000 m<sup>3</sup> di materiale e 22 000 m<sup>2</sup> di bosco ad alto fusto, causando la distruzione di 6 briglie;
- ✓ 1994: il 14 settembre nel Rio Cordon si manifestò un evento caratterizzato da un tempo di ritorno di 50 anni, la piena movimentò un volume complessivo di materiale pari a 890 m<sup>3</sup> circa e fu caratterizzata da un'intensità massima di trasporto solido al fondo dell'ordine di 500 kg s<sup>-1</sup>. Nonostante la modesta permanenza delle portate liquide intorno al valore di picco (5-10 minuti), è stata mobilitata, in termini granulometrici, la quasi totalità del materiale costituente l'alveo (D'Agostino e Lenzi, 1996) con diametri intermedi dei massi di maggiore pezzatura dell'ordine dei 50-60 cm. Le caratteristiche dell'evento nel Rio Cordon sono state determinate grazie all'installazione, nel 1986, di un dispositivo automatico per la misurazione delle portate liquide e solide;
- ✓ 2003: il 28 ottobre i comuni di Livinallongo, Cadore, Canale D'Agordo, Cencenighe e Rivamonte furono colpiti da un evento di piena del Cordevole, la viabilità fu sconvolta a causa dell'interruzione di numerose strade per frane, erosioni e danni a ponti.



**Figura 5.9 – Il paese di Caprile (BL) il giorno dopo l'alluvione del Novembre 1966.**

Fin qui sono stati descritti i dissesti avvenuti nel passato, ma per capire meglio la situazione del bacino è importante definire le attuali condizioni delle principali aree:

- ✓ La Val Fiorentina che si estende nella parte sud-orientale del bacino del Cordevole, con direzione est-ovest è caratterizzata da una profonda diversità tettonica tra i due versanti: il versante in destra idrografica (Nord) è costituito prevalentemente da strati a reggipoggio, mentre quello in sinistra idrografica (Sud) è caratterizzato da strati a franapoggio. Proprio a causa di ciò in sinistra idrografica si manifestano spesso profonde frane di scivolamento, evidenti soprattutto nella parte medio-bassa dove sono situate rocce tufaceo-marnose instabile e facilmente erodibili dall'azione dell'acqua. In destra idrografica, invece, lungo gli affluenti, si sono innescati numerosi fenomeni di trasposto di massa, danneggiando in maniera più o meno lieve gli abitati e la rete viaria. Le aree più vulnerabili da punto di vista dei dissesti sono: le frazioni di Marin, Franceschin, Costa e Toffol (Selva di Cadore) dove si sono innescati ripetuti processi di trasporto in massa da parte dei rii Stretto e Laschiesuoi; la frazione di Santa Fosca (Selva di Cadore), dove in occasione di brevi ma intense precipitazioni si rimobilizzano conoidi detritici situati alla base del Piz del Corvo, con conseguenti

estese colate di materiale detritico, questo incanalandosi lungo il Rio Giavaz può provocare danni sia alla rete viaria sia all'abitato stesso di Santa Fosca; il fondovalle del Fiorentina, nel tratto compreso tra Santa Fosca e Caprile, dove l'erosione del torrente ha causato numerose frane (Slongo, 2005).

- ✓ La Val Pettorina si estende nella parte sud-occidentale del bacino oggetto di studio e si sviluppa in direzione ovest-est. Essa è caratterizzata, nella parte Ovest, da valli con la tipica forma ad "U" dovuta al ritiro dei ghiacciai würmiani. Sono presenti in questa area del bacino tenaci calcari ladinici (Calcere della Marmolada) che consentono la conservazioni di notevoli pareti rocciose verticali. Nella parte Est il bacino è caratterizzato prevalentemente da rocce piroclastiche sempre risalenti al Ladinico. Le zone in cui si possono individuare i maggiori dissesti sono: nel tratto tra Col di Rocca e Saviner (Rocca Pietore), in quanto il torrente Pettorina qui si presenta inciso all'interno di terreni morenici, erodibili e franosi, causando abbondante trasporto solido in direzione di Caprile; il maggiore dissesto del bacino del Pettorina se non il maggiore di tutto l'Agordino è rappresentato dal bacino del Ru di Roccia, dove un accumulo di frana di 500 000 m<sup>3</sup>, risalente al 1966, è periodicamente rimobilizzato ed eroso, con abbondante trasporto solido nel collettore, proprio a monte di Saviner.
- ✓ La Valle dell'Alto Cordevole si trova nella parte nord-nord-occidentale del bacino oggetto di studio e si estende in direzione ovest-est. Qui la geomorfologia della valle risente fortemente sia dell'azione modellatrice dei ghiacciai würmiani, sia dell'opera erosiva dei torrenti che approfondiscono l'alveo ed erodono le sponde. Questi due fattori comportano la presenza di versanti fortemente acclivi e al contempo la presenza di numerosi depositi morenici facilmente movimentabili. Anche in questo caso sono individuabili alcune zone con i maggiori dissesti: nel versante sinistro del Cordevole tra Arabba e Passo Pordoi si verificano fenomeni di erosione accelerata; nel versante sinistro del Rio Andraz (affluente di 4° ordine del Cordevole) sono presenti numerosi accumuli franosi movimentabili (Zorzi, 2007); l'area compresa tra il Rio Valparola e Rio Falzarego, dove alcune colate interessano la SS 48 (Comel, 2007).

Fornire un completo quadro conoscitivo dei dissesti presenti su tutto il territorio nazionale, è lo scopo principale del progetto denominato *IFFI*, acronimo di *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia*. Questo progetto si pone come obiettivo quello di individuare la distribuzione e la relativa pericolosità dei fenomeni franosi presenti

sull'intero territorio italiano. L'idea di creare un inventario nazionale dei fenomeni franosi è nata grazie ad una convenzione stipulata tra l'ex Servizio Geologico Nazionale (l'attuale Apat) e le Regioni e Province italiane. Il lavoro svolto dal *Progetto IFFI* ha dato i suoi frutti, basti pensare che:

- ✓ sono state censite oltre 460 000 frane;
- ✓ tutti i dati registrati nell'ambito del progetto sono consultabili tramite un'apposita cartografia on-line presente nel portale web [www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/](http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/);
- ✓ nel 2007 è stato pubblicato il volume "Rapporto sulle frane in Italia – Il Progetto IFFI – Metodologia, risultati e rapporti regionali", tale inventario è già stato utilizzato da diverse Autorità di Bacino come strumento conoscitivo per l'aggiornamento dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI).

## 5.2 Idrografia e morfologia fluviale

Nel bacino idrografico del Cordevole, come in tutti i bacini montani, sono riscontrabili numerosi corsi d'acqua. Questi collettori assumono forme diverse a seconda delle condizioni ambientali a cui sono sottoposti e le stesse forme sono in continua evoluzione. Le diverse configurazioni che un corso d'acqua assume lungo il suo percorso sono il risultato di una complessa interazione di fattori geologici, climatici, idrologici, idraulici, morfologici, sedimentologici, vegetazionali e biologici, che agiscono sia sul collettore che a livello di bacino. Le continue modificazioni dei parametri idrologici ed idraulici, imposte dai fattori appena elencati, si traducono in alterazioni del "sistema fiume", con variazioni della geometria e della pendenza dell'alveo (Lenzi, D'Agostino e Sonda, 2000). Per poter attuare una distinzione tra le diverse morfologie fluviali, si devono considerare diversi parametri, quali:

- ✓ *Sinuosità*: indica il rapporto tra la lunghezza del corso d'acqua e la lunghezza dell'asse della valle;
- ✓ *Intrecciamento*: esprime il numero di barre ed isole; è espresso come rapporto tra la larghezza del collettore in condizioni di piena e la somma delle larghezze dei singoli rami in condizioni di flusso normale;
- ✓ *Planimetria*: illustra come il corso d'acqua defluisce all'interno del suo bacino idrografico;

- ✓ *Incassamento*: definisce il grado di confinamento verticale del corso d'acqua, misurato come rapporto fra la larghezza della piana alluvionale e la larghezza della bankfull;
- ✓ *Pendenza*: parametro più importante per la determinazione delle caratteristiche idrauliche, morfologiche e biologiche in un collettore idraulico;
- ✓ *Sezione trasversale*: indica il grado di incisione del canale nella valle;
- ✓ *Granulometria*: valuta la componente granulometrica del materiale di fondo, che condiziona il trasporto solido e la resistenza al moto e all'erosione;
- ✓ *Trasporto solido totale*: formato da una componente di fondo e da una in sospensione;
- ✓ *Profilo longitudinale*;
- ✓ *Rapporto larghezza/Profondità*

Una volta definiti i parametri caratterizzanti, si possono applicare le classificazioni. Una prima distinzione va fatta tra fiumi e torrenti. I primi sono corsi d'acqua perenni caratterizzati da pendenze e velocità della corrente molto basse, accompagnate da una granulometria fine del sedimento. I torrenti invece hanno importanti variazioni altimetriche con pendenze anche maggiori al 4% e velocità molto variabili; le velocità di deflusso nei tributari minori possono variare dagli 0,2 m/s, nei periodi di magra, fino ai 10 m/s raggiungibili nei periodi con intense precipitazioni.

Gli studiosi americani Montgomery e Buffington (1997), hanno realizzato una classificazione per i corsi d'acqua montani, basandosi essenzialmente sullo studio delle forme di fondo. Le tipologie individuate sono:

***Cascade (rapida)***: tratto caratterizzato da una corrente a velocità sostenuta in cui il flusso presenta un'alternanza di getti in caduta, risalti idraulici (*tumbling flow*) e separazione della corrente sopra o attorno ai grossi clasti. Il susseguirsi dei getti in caduta, dei risalti idraulici e della forte turbolenza così generatasi causa una notevole dissipazione d'energia posseduta dalla corrente, favorendo così la stabilità del tratto. Questa tipologia è individuabile nei corsi d'acqua contraddistinti da una forte pendenza (7-20%), dalla presenza di un alveo confinato e dal materiale lapideo presente (massi e ciottoli) disposto in maniera disorganizzata. Il materiale lapideo caratterizzato da un'elevata granulometria è stabile durante i deflussi ordinari, stabilità che viene meno nel caso di deflussi non ordinari dovuti ad eventi di piena con tempo di ritorno superiore ai 50-100 anni. La movimentazione del materiale

grossolano causa a sua volta la movimentazione del materiale più fine intrappolato prima nelle vicinanze dei massi stessi.

**Step pool:** tratto caratterizzato da una forma di fondo a gradinata, determinata dal susseguirsi di sequenze di *step* e di *pool*. Gli *step* (gradini) sono costituiti da un insieme di massi incastrati tra loro e disposti in modo trasversale rispetto la corrente. Tra uno *step* e l'altro si trovano le *pool* (pozze); all'interno di esse il tirante idraulico varia notevolmente, la maggiore profondità infatti è localizzata al piede dello *step* di monte, mentre la profondità minore la si trova nella parte finale della *pool*, nelle vicinanze del successivo *step*. Questa morfologia è fortemente influenzata dall'eterogeneità granulometrica e dalla pendenza, infatti, i tratti a *step pool* sono facilmente individuabili negli ambienti in cui il materiale d'alveo grossolano, compreso il detrito legnoso, è dello stesso ordine della larghezza del collettore, il quale possiede solitamente pendenze superiori al 3-5%. Inoltre questi tratti sono facilmente riscontrabili in alvei caratterizzati da un forte confinamento laterale, dovuto ai versanti, e da un rapporto contenuto fra larghezza e tirante. La morfologia a *step pool* viene generata solamente con piene non ordinarie, con tempo di ritorno dell'ordine di 50-100 anni, ciò significa che in caso di portate ordinarie questi tratti presentano una notevole stabilità. La stabilità, dal punto di vista idraulico, è ottenuta grazie allo stesso principio che permette la stabilità dei tratti a *cascade*. Nel caso degli *step pool* si nota come il susseguirsi di gradini e pozze comporti nella corrente delle continue accelerazioni e decelerazioni, movimenti questi capaci di dissipare efficacemente l'energia della corrente stessa, limitandone il potere erosivo altrimenti presente a causa delle notevoli pendenze. Da evidenziare poi il ruolo fondamentale che possiedono le *pool*, all'interno di esse infatti il 95% dell'energia potenziale posseduta dalla corrente sopra uno *step* viene dissipata all'interno di vortici turbolenti.

**Plane bed (letto piano):** morfologia individuabile sia in ambiente montano sia in ambiente pianeggiante. Con questa tipologia non si intendono i corsi d'acqua di pianura o a scarsa pendenza, bensì i tratti aventi un profilo di fondo a pendenza uniforme. Per questo sono caratterizzati da un profilo longitudinale regolare, dall'assenza di brusche variazioni altimetriche. Mancano di barre laterali, possiedono un ridotto rapporto fra larghezza e profondità e la lunghezza del singolo tratto può arrivare anche a 10 volte la larghezza alla *bankfull*. I tratti a *plane bed* sono riscontrabili nei corsi d'acqua aventi una pendenza medio-alta, indicativamente tra l'1

e il 3%. Per quanto riguarda la granulometria i tratti a letto piano sono composti da elementi diversi, si va dalla sabbia fino ai piccoli massi, con una predominanza di ghiaie e sassi. Si differenzia dalle morfologie a *cascade* e a *step pool*, oltre che per l'omogeneità del profilo longitudinale, anche per l'assenza del fenomeno di *tumbling flow*, cioè il flusso caratterizzato da un'alternanza di getti e risalti idraulici. Spesso, in ambiente montano, i tratti a *plane bed* fungono da collegamento tra due morfologie differenti.

**Riffle pool:** morfologia presente soprattutto nei corsi d'acqua naturali di fondovalle e pedemontani. L'aspetto è caratterizzato da una successione ritmica di tratti a pendenza sostenuta e tirante modesto, chiamati *riffle*, con tratti a profilo quasi piatto e tiranti elevati, chiamati *pool*. Se osservati in planimetria questi tratti presentano un flusso sinuoso della corrente, che si sposta in modo alternato da una sponda all'altra, formando estese barre laterali. I *pool* sono distanziati uno dall'altro da una lunghezza d'onda pari a 5-7 volte la larghezza del corso d'acqua, spaziatura questa che viene ridotta nel caso in cui il collettore sia caratterizzato da un elevato trasporto di detrito legnoso. I tratti a *riffle pool* sono localizzati in corsi d'acqua aventi una sezione trasversale poco confinata e delimitata da una piana alluvionale di discrete dimensioni. Le pendenze sono medio basse e variano tra l'1 ed il 2%. La granulometria predominante è la ghiaia, ma si può variare dalla sabbia fino ai sassi. I diametri maggiori sono localizzati nei *riffle*, dove sono depositati in maniera caotica e comunque non allineati per riuscire a formare ostacoli trasversali alla corrente. Proprio per la presenza delle granulometrie maggiori, i *riffle* rappresentano le zone in cui si formano instabilità della superficie dell'acqua, risalti idraulici, increspature e velocità superiori rispetto i *pool*.

**Dune ripple:** sono tratti presenti in collettori caratterizzati da una pendenza modesta, mediamente inferiore allo 0,5%, e composti da una granulometria a sabbia prevalente. Grazie a queste condizioni si possono generare delle piccole dune o delle increspature sul fondo che generano resistenza nei confronti del flusso della corrente. La formazione di questa morfologia dipende da diversi fattori come la profondità e velocità della corrente, dalle dimensioni del materiale costituente il contorno bagnato, dal tasso di trasporto e dalla planimetria del collettore. Questa morfologia è riscontrabile anche in corsi d'acqua con fondo ghiaioso, nel caso in cui un evento non ordinario causi delle portate estreme. I tratti a *dune ripple* presentano

un cosiddetto “alveo vivo” per il trasporto, quest’ultimo, infatti, avviene anche con portate liquide piuttosto basse.

**Tratti colluviali:** morfologia presente nei collettori di primo o secondo ordine, che rappresentano i tratti in testata del reticolo idrografico. Si formano su depositi morenici o di falda, o comunque in generale su depositi di versante. Dal punto di vista idraulico possiedono bassi deflussi, insufficienti a movimentare la grande quantità di materiale presente in alveo che tende sempre più ad accumularsi. Il trasporto solido avviene solo in modo intermittente ed impulsivo essendo notevolmente influenzato dalla presenza di detrito legnoso, grossi massi, gradini in roccia e vegetazione in alveo che contribuiscono a ridurre l’energia disponibile. Nei tratti colluviali non è difficile imbattersi in fenomeni quali le colate detritiche, questi sono gli unici eventi capaci di movimentare verso valle il materiale. Alcuni studi hanno appurato che il sedimento accumulato in collettori di primo e secondo ordine è movimentabile da colate detritiche ogni 300-500 anni.

**Tratti in roccia:** caratterizzati dall’assenza, in modo continuo, di sedimento in alveo. L’assenza di sedimento è in primo luogo da attribuire all’elevata pendenza del collettore accompagnata spesso da un elevato tirante che ne aumenta la capacità di trasporto. Possibile la presenza di limitato materiale in corrispondenza di buche o a valle di ostruzioni. Questa morfologia è incassata nelle pareti della valle e per questo difficilmente può variare il suo andamento planimetrico.

**Tratti a morfologia imposta:** morfologia dovuta alla presenza di ostruzioni che modificano la geometria originaria del tratto. Il caso più frequente avviene nelle regioni boscate dove il detrito legnoso caduto in alveo, a seconda delle dimensioni, può causare locali escavazioni, divergenze del flusso ed accumuli di detrito che favoriscono a loro volta la formazione di *pool*, barre e *step*. Le due morfologie imposte più diffuse sono il *riffle pool* e lo *step pool*; il primo si può formare a causa dell’ostruzione prodotta da materiale vegetale vario, mentre il secondo si genera in seguito all’immissione in alveo di piante di grosse dimensioni che vanno a posizionarsi trasversalmente al flusso della corrente (*log step*), formando veri e propri gradini (*step*).

Partendo dalle morfologie individuate da Montgomery e Buffington, è stata redatta un’ulteriore classificazione da parte di Lenzi, D’Agostino e Sonda (2000), allo scopo di “adattare” le tipologie individuate anche ai torrenti alpini. Questi, infatti, non

sempre presentano delle così chiare morfologie, ma spesso sono caratterizzati da tipologie intermedie. La nuova classificazione ha individuato morfologie quali:

***Riffle-step pool:*** formato da un gradino generato da un insieme di sedimenti aventi larghezza superiore alla media. Questa morfologia assume l'aspetto di una corta rampa a forte pendenza a cui segue una pozza e può ripetersi in sequenza come presentarsi isolata.

***Transverse rib:*** morfologia caratterizzata dalla sequenza allineata di ciottoli disposti trasversalmente al flusso della corrente e elevati verticalmente rispetto la quota basa del letto dell'alveo.

***Cascade:*** salti più o meno verticali, generalmente non in sequenza, e di altezza superiore ai 3 metri. Si formano per lo più per cause litologiche.

***Tratti a barre e raggruppamenti:*** simile ai *riffle pool* da cui però si differenziano per quanto riguarda le barre, che risultano più irregolari, e per una minore pendenza. Le barre possono essere sia laterali sia mediane ma risultano meno pronunciate rispetto a quelle dei *riffle pool*.

***Tratti deposizionali:*** morfologia presente in corrispondenza di allargamenti dell'alveo o sul conoide alluvionale. Questi tratti, a causa della diminuzione di pendenza rispetto i tratti a monte e a valle, assumono una struttura caotica, con depositi consistenti e spesso ricoperti da vegetazione.

***Tratti meandriiformi:*** morfologia presente alla testata dei bacini, dove le valli, a causa dell'erosione glaciale o di fattori tettonici, si presentano ampie e poco pendenti.

***Tratti non strutturati:*** tratti per cui non è possibile individuare una precisa e stabile morfologia. Sono diffusi in ambiente alpino a causa dei numerosi torrenti soggetti a dissesti come frane di versante o colate detritiche che versano grandi quantità di sedimento in alveo.

***Tratti sistemati:*** tratti in cui sono stati compiuti interventi di sistemazione.

### 5.3 Rappresentazione digitale del terreno

Nell'ambito degli studi ambientali e delle indagini territoriali hanno ormai raggiunto un ruolo di primo piano i Sistemi Informativi Territoriali (SIT). In queste analisi è comune aver a che fare con una grande quantità di dati, spesso di natura ed origine diversa. Gli strumenti definiti SIT permettono proprio la gestione di una notevole mole di dati

ed al contempo permettono l'associazione di informazioni descrittive a rappresentazioni grafiche georiferite, permettendone l'elaborazione e la rappresentazione come non sarebbe possibile con altri strumenti. Tra le svariate opzioni fornite dai SIT c'è anche la possibilità di poter creare dei modelli digitali del terreno, conosciuti anche col termine DEM o DTM. Questi permettono di studiare, analizzare e visualizzare in modo tridimensionale la morfologia del territorio e i fenomeni ad essa legati. In questo studio come strumento informatico si è utilizzato il software *ArcGis*<sup>®</sup> nella versione 9.1 e per analizzare la morfometria del bacino idrografico studiato si è ricorso alla creazione di un modello digitale del terreno. La creazione di un DEM richiede delle fasi preparatorie ben precise. Innanzitutto si è provveduto ad acquisire la cartografia numerica (formato vettoriale), utilizzata come base per le successive elaborazioni. Questa cartografia è stata ottenuta dalla sezione Ambiente e Territorio/Territorio/Cartografia Regionale/Area SIT/WebGis presente all'interno del sito della Regione Veneto, la quale ha deciso di diffondere liberamente e in modo non oneroso la propria Carta Tecnica Regionale (CTR). La CTR del Veneto adotta una scala di rappresentazione di 1:10000 per le zone montane scarsamente urbanizzate, mentre per quasi totalità del territorio possiede una scala di 1:5000. Gli elaborati relativi alle zone montane scarsamente urbanizzate sono chiamati *Sezioni* mentre quelli relativi al restante territorio sono chiamati *Elementi*. Le informazioni riguardanti il territorio sono organizzate tramite una gerarchia, la prima suddivisione è affidata ai *Livelli* che costituiscono una prima classe di aggregazione delle informazioni, i *Livelli* sono poi a loro volta suddivisi in *Codici* che descrivono nel particolare gli elementi. Nello specifico il *Livello* riguardante l'idrografia, il n°04, è suddiviso al suo interno da 22 *Codici* che definiscono in modo dettagliato gli elementi rappresentati (laghi, canali, cascate, bacino artificiale, linee di costa, ecc.). Il sistema di riferimento adottato è il sistema nazionale Gauss-Boaga inoltre la cartografia riporta anche i riferimenti geografici e le coordinate del sistema UTM. I formati di distribuzione sono due: il *DXF (Drawing Exchange File format)* ed il *SHP (Shape File)*. Le *Sezioni* utilizzate per la creazione del DEM sono state acquisite in formato *DXF* e sono le seguenti:

- |                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| ✓ 028060 Piz Boè          | ✓ 046010 Monte Civetta |
| ✓ 029140 Passo Campolongo | ✓ 028100 Passo Pordoi  |
| ✓ 046010 Settsass         | ✓ 028110 Arabba        |
| ✓ 029090 Selva di Cadore  | ✓ 028150 La Marmolada  |
| ✓ 029140 Monte Pelmo      |                        |

oltre alle sopraccitate *Sezioni* sono stati utilizzati anche i seguenti *Elementi*:

- |                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| ✓ 028121 Andraz             | ✓ 029101 Cadini di Federa    |
| ✓ 028122 Sopracordevole     | ✓ 029102 La Rocchetta        |
| ✓ 028123 Davedino           | ✓ 029103 Malghe Mondeval     |
| ✓ 028124 Pecosta            | ✓ 029104 Cima Ambrizzola     |
| ✓ 028161 Rocca Pietore      | ✓ 029131 Pescul              |
| ✓ 028162 Bramezza           | ✓ 029132 Monte Coldai        |
| ✓ 028163 Monte Pezza        | ✓ 029133 Alleghe             |
| ✓ 028164 Sottoguda          | ✓ 029134 Villagrande         |
| ✓ 029051 Tofana di Rozes    | ✓ 045031 Feder               |
| ✓ 029052 Cinque Torri       | ✓ 045034 M.ga Bosco Bruciato |
| ✓ 029053 Passo Falzarego    | ✓ 045041 S. Tommaso Agordino |
| ✓ 029054 Punta Sud di Fanis | ✓ 045044 Vallada Agordina    |
| ✓ 029062 Zuel               | ✓ 046024 Mareson             |
| ✓ 029063 Bosco d'Aial       |                              |

Una volta ottenuta la cartografia numerica, sono state ricavate le informazioni riguardanti le aste fluviali (*Livello* n°04), le curve di livello (*Livello* n°10) e i punti quotati (*Livello* n°11). Questi dati sono inseriti in tre layer differenti chiamati rispettivamente *asteflu*, *curve* e *punti\_q*. Le informazioni così ottenute non sono però ancora pronte per l'utilizzo in quanto devono essere prima validate, è possibile infatti che esse contengano al loro interno degli errori di digitalizzazione o siano presenti dei dati spaziali (linee, serie di punti, poligoni) incompleti. Per ovviare a questo sono stati eliminati i punti quotati chiaramente errati e sono state corrette le aste fluviali assegnando alle linee che le rappresentano il giusto verso, seguendo la direzione del flusso. La correzione dei punti quotati è stata eseguita analizzando gli stessi tramite una visualizzazione 3D che ha permesso di individuare chiaramente le altimetrie non corrette. Terminata la fase di verifica dei dati si è proceduto con la creazione del DEM vero e proprio. Visto le finalità di questo studio si è deciso di creare un modello digitale costituito da una matrice di celle quadrate (*raster*) aventi lato pari a 10 metri. Tramite l'opzione *Topo to Raster*, di *ArcGis*<sup>®</sup>, si è provveduto ad interpolare i tre layer, ottenendo così un DEM, corretto anche dal punto di vista idrologico. Al fine di migliorare ancor di più la rappresentazione della morfologia, si è eseguito il *depitaggio* (*Fill DEM*), si sono eliminati cioè i restanti errori e le restanti imperfezioni presenti nel modello digitale ottenuto. Una tipica anomalia che si presenta in questa fase di elaborazione è dovuta alla formazione di depressioni presenti all'interno del *raster* delle quote. All'interno di questo, infatti, si possono trovare delle celle la cui

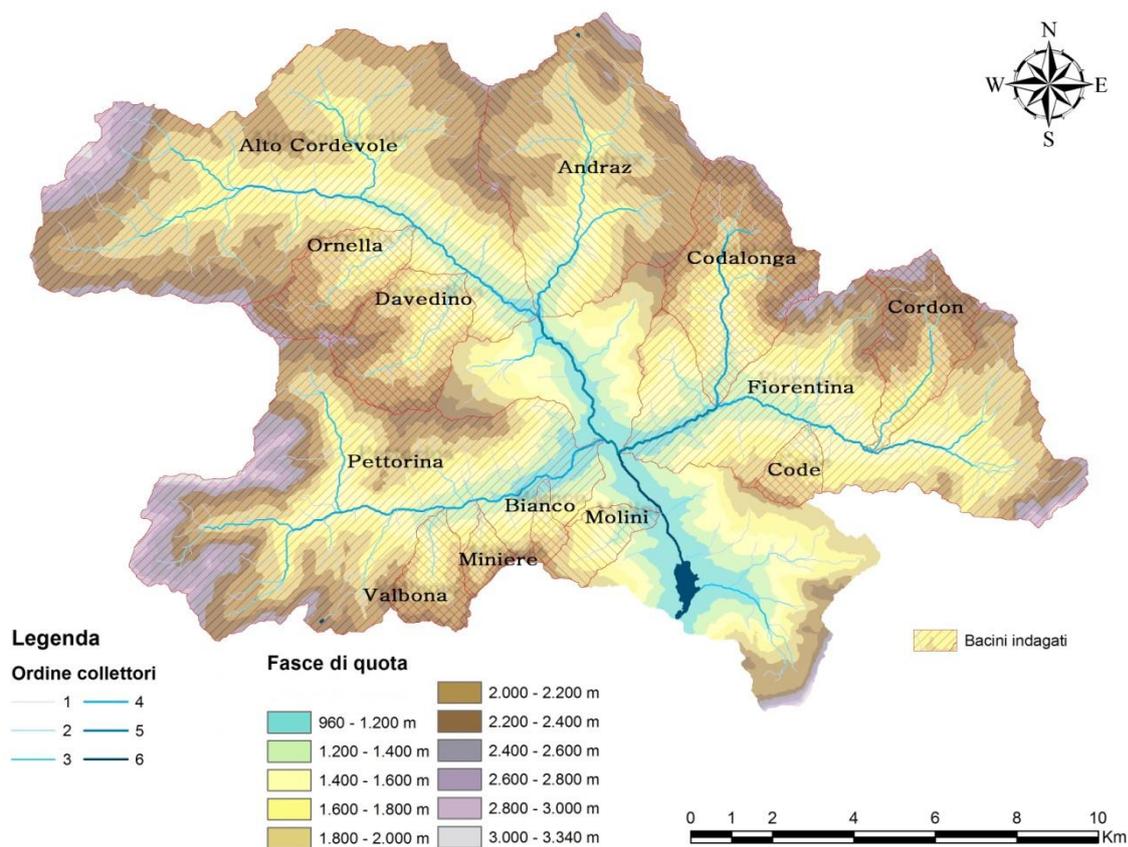
quota altimetrica risulta inferiore a quella delle otto celle circostanti, questo può essere dovuto ad un errore commesso nelle fasi preparatorie, ad un'approssimazione effettuata dal modello statistico utilizzato dal software oppure può rispecchiare una reale concavità presente nel bacino, come per esempio un piccolo lago o pozzo. Solitamente la presenza di un certo numero di depressioni non altera la bontà del DEM ottenuto, tuttavia nel nostro caso si è preferito correggerle in quanto possono interferire in modo significativo nella determinazione del reticolo idrografico. La correzione di questa anomalia è possibile in quanto alcune funzioni del software utilizzato permettono di collegare ciascuna cella del DEM alla sezione di chiusura prescelta, non considerando in questo modo eventuali concavità locali od ostacoli presenti lungo il reticolo. A questo punto grazie ad alcune estensioni in ambito GIS (*Arc Hydro Tools*<sup>®</sup>) è possibile stabilire la direzione (*Flow direction*) e l'accumulo (*Flow accumulation*) del deflusso nel bacino. Grazie a queste funzioni si ottiene un *raster* in cui per ogni cella che lo costituisce è stabilito il numero di pixel che convergono su di essa. Avendo questo *raster* di base ed ipotizzando una distribuzione uniforme del deflusso, è possibile individuare l'area minima contribuyente (area soglia) capace di formare un collettore. Quando su una singola cella converge un deflusso prodotto da un numero di celle pari o superiore all'area soglia si ritiene che su tale cella il deflusso sia sufficiente per assumere le caratteristiche di una corrente, di conseguenza la cella può essere classificata come "canale" e perciò definire il reticolo idrografico sintetico. Per esclusione tutte le restanti celle saranno classificate come "versante" (Sonda, 2005). Nel nostro caso si è stabilito che l'area soglia di deflusso fosse pari a 1600 celle drenate, pari perciò ad una superficie di 16 ha sottesi. Ottenuto in questo modo il reticolo idrografico sintetico si è proceduto a convertire il file *raster* in formato vettoriale, con questa tipologia di file si è potuto rappresentare il reticolo sintetico tramite delle polilinee di diverso spessore in base alla classificazione di Horton-Strahler. A questo punto si è delimitato il bacino di studio all'area interessata, ponendo la sezione di chiusura del Cordevole presso il lago di Alleghe, in corrispondenza della chiusa in località Masarè. Definito il macrobacino si possono delimitare i relativi sottobacini: per questi ultimi bisogna preventivamente stabilire il punto esatto di confluenza del collettore di cui si vuol determinare l'area drenata, questo punto diventerà la sezione di chiusura del sottobacino; successivamente alcune funzioni di *ArcGis*<sup>®</sup> (*Snap Pour Point*) permettono l'individuazione di tutte le celle del modello digitale che sottendono al

punto stabilito come sezione di chiusura, l'insieme di queste celle determinano l'area del sottobacino. Grazie al DEM ottenuto e ad alcune funzioni applicabili in ambiente GIS è possibile procedere ad un'analisi dei parametri morfometrici del bacino, quali: altimetria, esposizioni e pendenze.

#### **5.4 Parametri morfometrici**

La morfometria è stata definita da De Horatiis come “una seconda elaborazione dei dati rilevati dalla geodesia e dalla topografia e da questa preliminarmente elaborati e consegnati in schemi, profili, carte e simili documenti, o quanto meno compensati dagli errori di osservazione, per ricavarne indici morfologici vari, ossia funzioni che forniscano con precisione e concisione indicazioni immediate delle forme della superficie terrestre”. Col passare degli anni è risultata sempre più evidente la possibilità di relazionare tra loro i parametri morfometrici di un dato collettore con i processi idrologici a scala di bacino. Tale evidenza viene sottolineata anche dal fatto che il reticolo idrografico rappresenta l'impronta lasciata sulla superficie terrestre da una successione discontinua di eventi di deflusso in condizioni di piena e di trasporto solido e pertanto, in un assegnato bacino, il meccanismo di formazione del deflusso può essere ricondotto alla struttura morfometrica del reticolo (Ferro, 2006).

Come detto in precedenza l'analisi morfometrica dell'area di studio è stata possibile grazie alla preventiva creazione di un DEM (**Figura 5.10**), ovvero di un modello digitale del terreno, e grazie ad alcune strumenti forniti dal software GIS utilizzato.



**Figura 5.10 – DEM (Digital Elevation Model) del bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.**

Per quanto riguarda il bacino idrografico è possibile una prima descrizione dei parametri morfometrici, in questo modo:

<b>Area drenata</b>	254 (km <sup>2</sup> )
<b>Quota massima</b>	3340 (m s.l.m.)
<b>Quota minima</b>	960 (m s.l.m.)
<b>Quota media</b>	1857 (m s.l.m.)
<b>Pendenza media</b>	28,5°

**Tabella 5.2 – Principali parametri morfometrici del bacino del Cordevole chiuso al Lago di Alleghe**

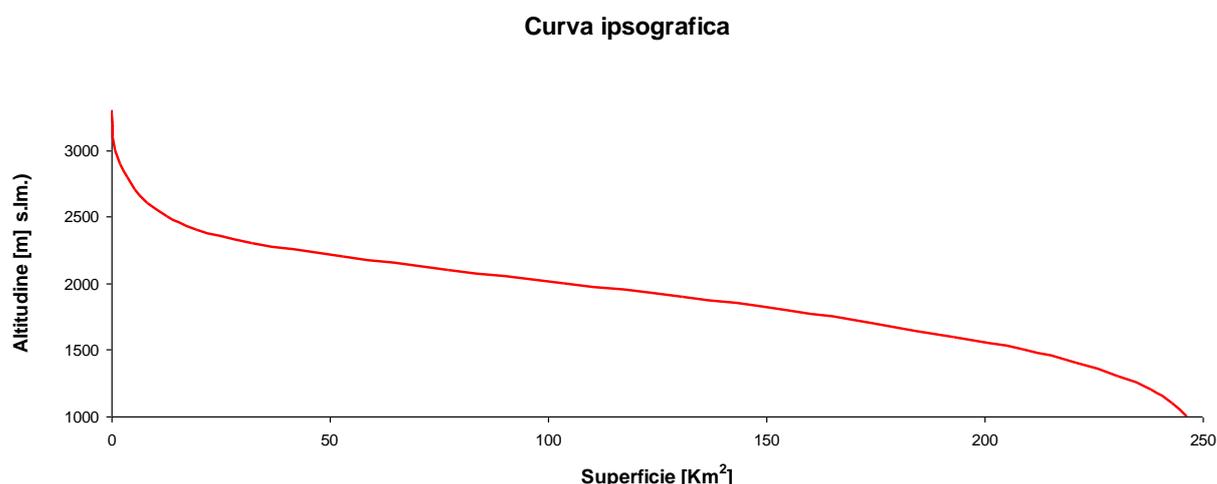
Da questi primi dati si può notare come sia presente una notevole variazione altimetrica accompagnata da un considerevole dislivello dei versanti, fattore questo ultimo dovuto in particolare alla presenza di catene montuose particolarmente ripide ed a diffuse pareti sub-verticali.

### 5.4.1 Quote

La quota massima pari a 3340 m s.l.m. è raggiunta dalla vetta della Marmolada posta nella zona sud-occidentale del bacino; la quota minima invece, pari a 960 m s.l.m. è situata in corrispondenza della sezione di chiusura posta presso il lago di Alleghe, precisamente in località Masarè. La quota media ( $h_m$ ) pari a 1857 m s.l.m. la si ottiene tramite l'equazione (5.1), che fornisce la media ponderata delle altezze medie delle superfici parziali.

$$h_m = \frac{\sum h_i \cdot A_i}{A} \quad (5.1)$$

Per interpretare al meglio l'aspetto altimetrico del bacino è possibile utilizzare la curva ipsografica (**Figura 5.11**), con questo termine si intende il grafico che fornisce la distribuzione delle superfici nelle diverse fasce altimetriche. La curva si applica su di un grafico cartesiano ed ogni punto di tale curva ha come ordinata un valore di quota e come ascissa la superficie parziale del bacino posta al di sopra della quota considerata. Ovviamente risulterà una superficie nulla in corrispondenza della quota massima, mentre in relazione alla quota minima, cioè quella di chiusura, risulterà l'area dell'intero bacino.



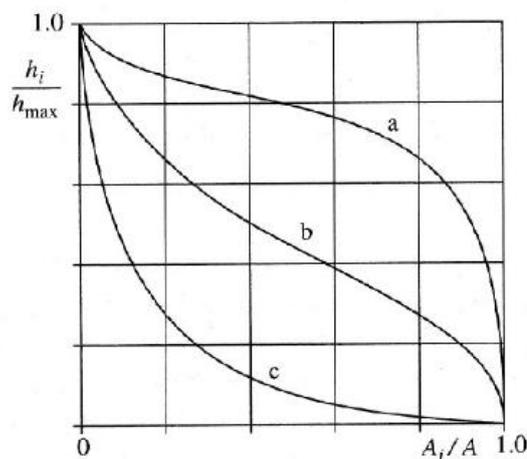
**Figura 5.11 – Curva ipsografica delle quote**

Da tale diagramma si può notare come le superfici poste al di sopra dei 2500 m s.l.m. siano esigue, sono, infatti, solamente il 5% circa della superficie totale. Inoltre si può evidenziare come la maggior parte delle aree topografiche, circa l'80%, siano

comprese tra i 1400 ed i 2300 m s.l.m. Altra osservazione che si può fare studiando la curva ipsografica è in merito alla pendenza, essa, infatti, risulta piuttosto uniforme ad eccezione della zona di testata dove si nota un brusco aumento dovuto alle numerose pareti sub-verticali.

La curva ipsografica può essere anche rappresentata in modo adimensionale, questa modalità di rappresentazione risulta utile in quanto rende possibile un confronto tra differenti bacini ed anche perchè da essa si possono dedurre informazioni riguardo lo stato evolutivo del bacino. Sono, infatti, tre le configurazioni che la curva ipsografica può assumere (**Figura 5.12**):

- ✓ *curva a*, rappresenta lo stadio *giovanile*, il bacino sarà in una fase di erosione;
- ✓ *curva b*, rappresenta lo stadio di *maturità* ed il bacino sarà in una fase d'equilibrio;
- ✓ *curva c*, rappresenta lo stato di *senilità*, il bacino è nella fase cosiddetta *monadnock*, in presenza perciò di colline isolate che rappresentano i resti di un'antica superficie sottoposta ad erosione.

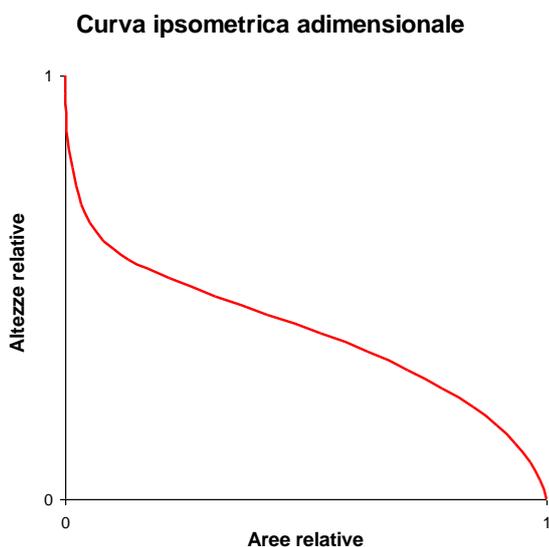


**Figura 5.12 – Forme assumibili dalla curva idrografica in un bacino idrografico (Benini,1990)**

La curva per poter essere adimensionale deve contenere, invece che i parametri quota e superficie, le variabili relative  $h_i/h_{max}$  e  $A_i/A$ , dove:

- ✓  $h_i$  è la quota media di ogni fascia altimetrica;
- ✓  $h_{max}$  rappresenta la quota massima del bacino;
- ✓  $A_i$  è l'area di ogni fascia altimetrica;
- ✓  $A$  rappresenta la superficie totale del bacino.

Con la determinazione di tali variabili si è potuto ottenere la curva ipsografica adimensionale relativa al bacino di studio (**Figura 5.13**). Da essa si può notare come la zona di testata sembri caratterizzata da una fase *monadnock* (senilità) dovuta alla geologia stabile delle vette, al contrario la zona dei fondovalle presenta un bacino in fase giovanile e perciò sottoposto a fenomeni di erosione.

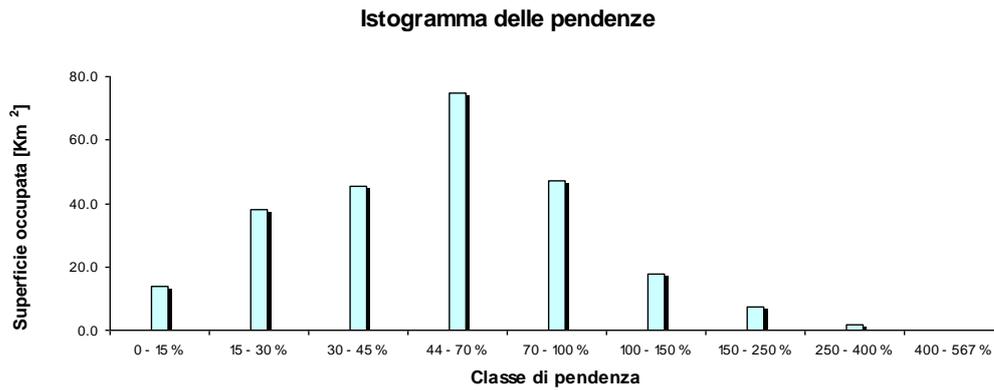


**Figura 5.13 – Curva ipsografica adimensionale**

#### **5.4.2 Pendenze**

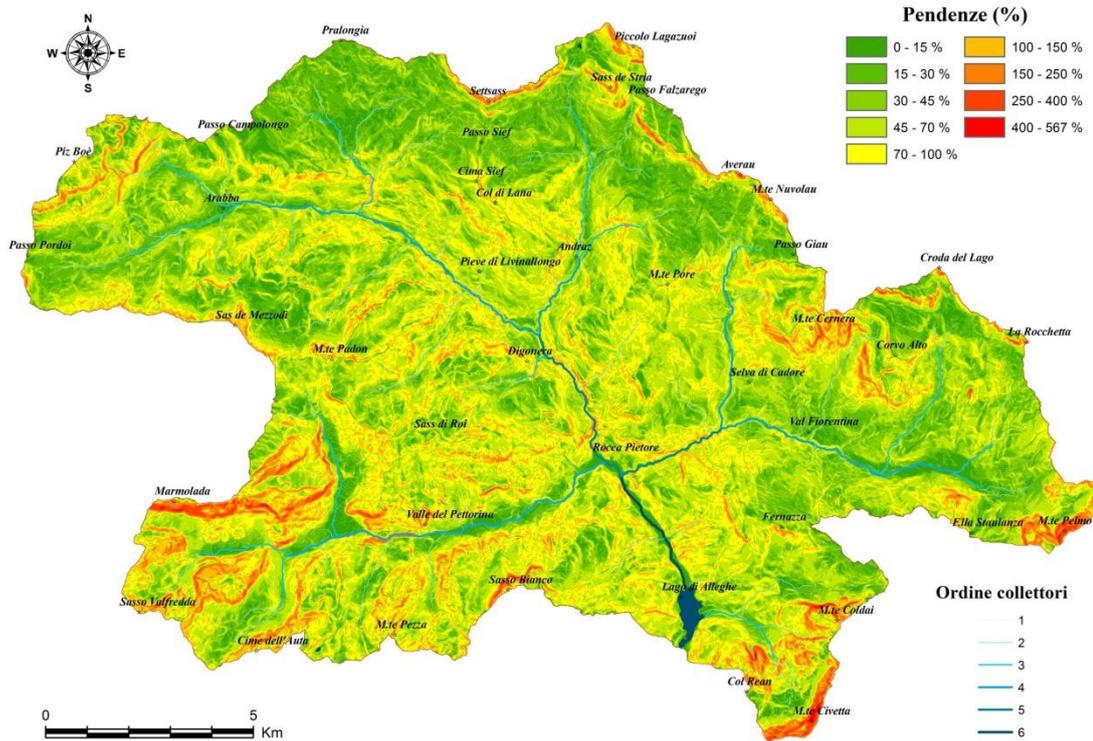
Attraverso il DEM è possibile ricavare le pendenze dei versanti, questa caratteristica assume un ruolo fondamentale nella produzione di *LW*. Questa relazione è evidente soprattutto nei torrenti che scorrono tra ripidi versanti, in questo caso, infatti, la forte pendenza favorisce l'entrata nel collettore del detrito legnoso, determinando un maggior reclutamento di *LW* da parte del corso d'acqua. L'elevata pendenza inoltre aumenta la velocità di ruscellamento dei deflussi causando una maggiore produzione di sedimento. Da ricordare poi i risultati degli studi condotti da Ishikawa (1990), il quale ha evidenziato come la maggior parte del sedimento e del legname è prodotto da alvei con pendenze superiori al 15%.

L'istogramma delle pendenze (**Figura 5.14**) mette in evidenza due fattori: il primo esprime come nel bacino di studio la maggior parte della superficie abbia un'inclinazione compresa tra il 44 ed il 100%, il secondo invece mostra come le aree con pendenze inferiori al 30% siano solo il 15% della superficie totale.



**Figura 5.14 – Istogramma delle pendenze**

La carta delle pendenze (**Figura 5.15**), ottenuta sempre sulla base del DEM, rappresenta le inclinazioni caratterizzanti il bacino idrografico del torrente Cordevole, chiuso al lago di Alleghe. Grazie a questo elaborato si può notare come le aree a maggior pendenza siano localizzate per lo più nella zona Nord del bacino (Cherz, Andraz). Le pareti sub-verticali sono invece distribuite in varie zone del bacino: si possono riscontrare presso il Piz Boè a Nord-Ovest, a Settsass e sul Piccolo Lagazuoi a Nord, sul monte Pelmo ad Est, sul Civetta a Sud e sulla Marmolada a Ovest. I forti dislivelli presenti sommati alle formazioni geologiche facilmente erodibili spiegano il perché dei numerosi dissesti presenti nell'area.



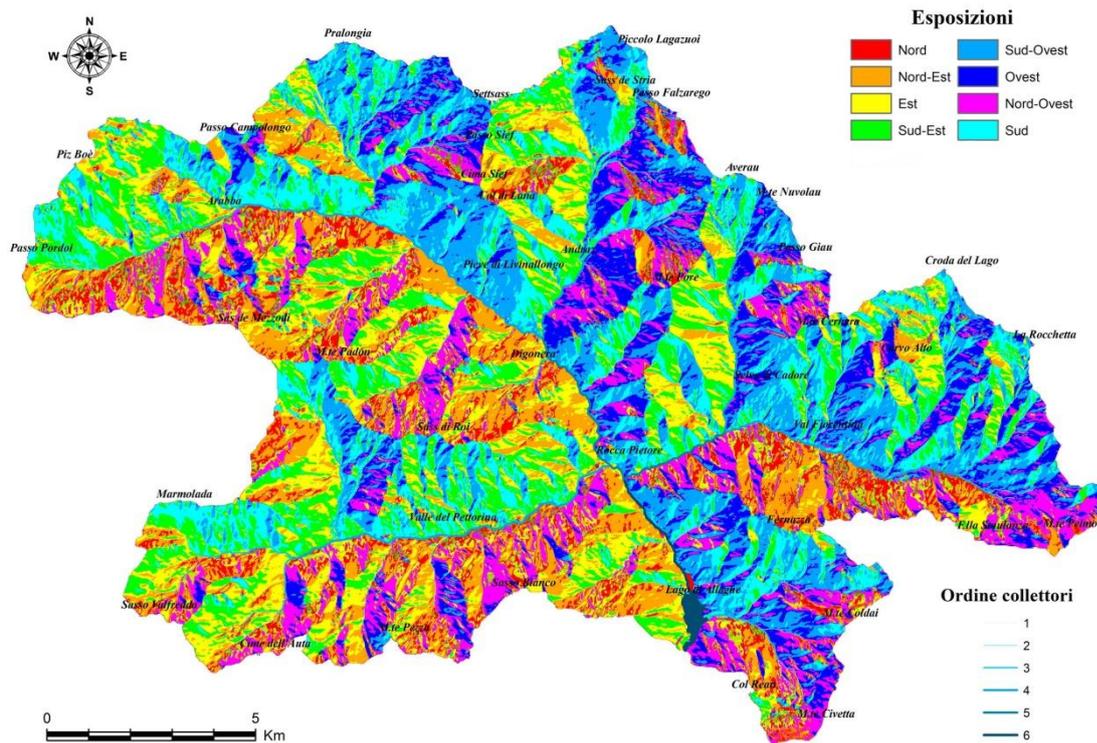
**Figura 5.15** – Carta delle pendenze riguardante il bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.

Infine è da ricordare il parametro della pendenza media del bacino ( $i_m$ ) che risulta pari a  $28,5^\circ$ . Questo valore è ottenuto tramite la formula (5.2), dove ( $i_i$ ) rappresenta le pendenze medie delle fasce altimetriche,  $A_i$  l'area di ciascuna fascia altimetrica ed  $A$  è la superficie totale del bacino.

$$i_m = \frac{\sum i_i \cdot A_i}{A} \quad (5.2)$$

### 5.4.3 Esposizioni

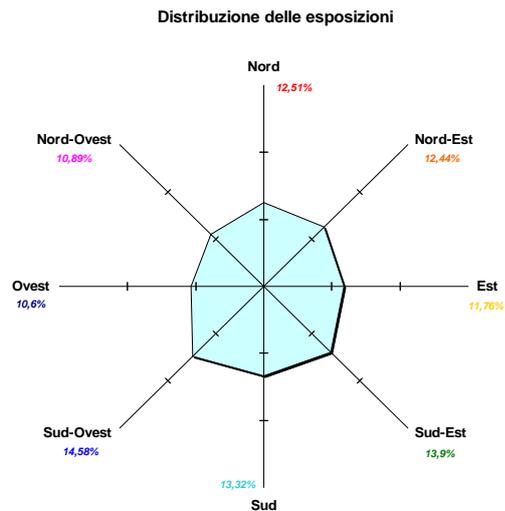
La carta delle esposizioni (**Figura 5.16**) è un'altra elaborazione realizzata con l'ausilio del modello digitale del terreno. Tramite tale elaborato si intende determinare l'orientamento di ogni punto del bacino, rispetto i quattro punti cardinali principali. Questa carta la si ottiene applicando al sopraccitato DEM, una classificazione in nove categorie di cui una corrisponde al valore nullo, terreno piatto, mentre le rimanenti otto indicano le principali direzioni del piano (Gomarasca, 2004).



**Figura 5.16** – Carta delle esposizioni riguardante il bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.

Le esposizioni, in un bacino idrografico, sono strettamente correlate all'andamento della rete idrica principale. L'orientamento dei versanti influisce, innanzitutto, sulla determinazione di microclimi. A sua volta questo fattore influisce sulla vegetazione determinando o meno la possibilità di insediamento di determinate specie arboree ed arbustive; alcune piante, infatti, preferiscono come areale versanti con forte illuminazione e limitate escursioni termiche, altre invece prosperano su versanti ombreggiati e riescono a sopportare notevoli variazioni di temperatura. Oltre che la vegetazione, l'esposizione influenza anche la diffusione delle attività antropiche. Storicamente i versanti orientati a Sud sono quelli prediletti per quanto riguarda le principali attività antropiche, qui, infatti, si destinarono i terreni per la coltivazione. Al contrario i versanti esposti a Nord furono lasciati a bosco, presentando raramente abitati di grandi dimensioni.

I bacini di dimensioni contenute (sottobacini) sono caratterizzati solitamente dal possedere un'esposizione prevalente; al contrario nei bacini di grandi dimensioni, come quello qui studiato, l'esposizione tende ad essere distribuita in modo uniforme lungo le quattro direzioni principali. Questo aspetto lo si può chiaramente osservare dal grafico a radar delle esposizioni (**Figura 5.17**).



**Figura 5.17 – Grafico a radar delle esposizioni**

#### 5.4.4 Parametri morfometrici dei sottobacini

Il bacino del torrente Cordevole, chiuso presso il lago di Alleghe, sottende al suo interno ben 13 sottobacini idrografici. Tramite lo studio e l'analisi del DEM è possibile individuare, per ognuno dei sottobacini presenti, i principali parametri morfometrici. Questi per chiarezza d'esposizione vengono riportati in **Tabella 5.3**.

Bacino di Studio	Lunghezza collettore principale	Ordine collettore principale	Area drenata	Lunghezza totale reticolo idrografico	Pendenza media collettore principale	Pendenza media versanti	Quota media	Esposizione prevalente
	(km)	(n°)	(km <sup>2</sup> )	(km)	(%)	(%)	(m s.l.m.)	
Alto Cordevole	13,3	4°	70,0	92,0	11,8	51,0	1194	NE-SE
Andrai	7,7	4°	27,2	36,9	13,0	49,0	1950	S-SO
Bianco	2,2	1°	1,2	2,2	38,0	72,0	1724	NE
Codalunga	6,3	4°	13,5	17,8	16,0	55,0	1930	S-SO
Code	1,7	2°	2,2	2,6	26,0	41,0	1776	NO
Cordon	5,5	3°	7,7	11,0	12,0	47,0	2673	S-SO
Davedino	4,1	3°	8,7	12,5	19,0	60,0	1961	NE
Della Miniera	1,9	1°	1,5	1,9	28,0	75,0	1886	NO-NE
Fiorentina	12,0	5°	58,1	81,2	6,0	55,0	1848	O-SO
Molini	2,7	2°	2,9	3,1	26,0	51,0	1463	E-NE
Ornella	4,6	2°	6,6	10,2	21,0	54,0	1961	NE
Pettorina	12,9	4°	51,0	73,7	9,0	65,0	1994	E-NE
Valbona	1,9	2°	3,8	3,8	21,0	76,0	1888	N

**Tabella 5.3 – Principali parametri morfometrici relativi ai 13 sottobacini**

Dall'analisi di questi dati, si possono trarre alcune conclusioni. Innanzi tutto si può notare come i torrenti Pettorina, Fiorentina e Alto Cordevole rappresentano le tre maggiori valli all'interno del bacino di studio. Se, infatti, si sommano le relative aree drenate, si può notare come questi tre bacini da soli sottendano  $179 \text{ km}^2$ , pari a circa il 70% dell'area totale ( $254,4 \text{ km}^2$ ). Questo aspetto lo si nota anche analizzando la lunghezza totale del reticolo idrografico, i tre collettori sopracitati difatti possiedono ben 247 km di reticolo idrografico, pari a circa il 71% dei 349 km totali.

Insieme ai grandi sottobacini sono presenti anche diversi collettori caratterizzati da un'area drenata limitata, è il caso questo dei torrenti Bianco, Code e Della Miniera. Questi tre bacini complessivamente occupano solamente il 2% dell'area totale, per complessivi  $4,9 \text{ km}^2$ . Altro aspetto interessante da notare è come per questi piccoli bacini la lunghezza del collettore principale coincida o si avvicina di molto alla lunghezza totale del reticolo idrografico, ciò è dovuto al fatto che questi corsi d'acqua sono tutti di 1° o 2° ordine.

Per quanto riguarda le pendenze si può notare come i sottobacini più estesi, Alto Cordevole, Fiorentina e Pettorina, siano quelli caratterizzati da un basso dislivello del collettore principale (**Figura 5.18 e 5.20**). Al contrario le pendenze maggiori si riscontrano nei piccoli sottobacini come il Bianco ed il Della Miniera (**Figura 5.19 e 5.21**). Questa sorta di "proporzionalità" tra area del sottobacino e dislivelli non trova riscontro nelle pendenze dei versanti. In questo caso, infatti, le maggiori inclinazioni sono localizzabili nei bacini dei torrenti Valbona, Della Miniera e Bianco. Notevole è anche il dislivello medio che caratterizza i versanti del Pettorina, questo collettore, infatti, si sviluppa in un'area geologicamente ricca di dolomia che causa la presenza di numerose pareti verticali. Al contrario il Code, che è il bacino più piccolo, possiede la pendenza minore rispetto a tutti gli altri bacini, pari ad un'inclinazione del 41%.



**Figura 5.18– Valle del torrente Pettorina.**



**Figura 5.19 – Tratto de Rio Minier**



**Figura 5.20 – Tratto del torrente Fiorentina**



**Figura 5.21 – Tratto del Rio Bianco.**

#### 5.4.5 Altri parametri morfometrici

Allo scopo di approfondire la conoscenza del bacino di studio, si è deciso descrivere anche altri parametri morfometrici. Il primo di questi è un indice di forma proposto da Gravelius, conosciuto col termine di *indice di compattezza* o *indice di Gravelius*. Questo parametro è ottenuto tramite la seguente equazione:

$$R_k = \frac{0,28 \cdot P}{\sqrt{A}} \quad (5.3)$$

questa espressione rappresenta il rapporto tra il perimetro P del bacino e la circonferenza del cerchio avente una superficie pari a quella A del bacino. Questo indice assume valori tanto più vicini all'unità quanto, più raccolta, o rotondeggiante, è la forma del bacino; al contrario assumerà valori tanto più grandi di 1 quanto più allungata si presenta la forma del bacino (Ferro, 2006). Sempre grazie alle elaborazioni in ambiente GIS si sono potuti definire gli indici di Gravelius per tutti e 13 i sottobacini (**Tabella 5.4**).

Bacino di Studio	Indice di compattezza (Gravelius)
Alto Cordevole	1,73
Andraz	1,93
Bianco	1,47
Codalunga	1,32
Code	1,49
Cordon	1,97
Davedino	1,16
Della Miniera	1,89
Fiorentina	1,90
Molini	1,79
Ornella	1,65
Pettorina	1,93
Valbona	1,58

Tabella 5.4 – Indici di compattezza relativi ai 13 sottobacini

Dai dati così ottenuti si nota come l'unico sottobacino che possieda una forma più o meno raccolta sia quello del torrente Davedino. I restanti 12 sottobacini assumono

valori di compattezza abbastanza lontani dall'unità, fino quasi a raggiungere valore 2 nei bacini dell'Andraz, del Cordon e del Pettorina, caratterizzati da forme irregolari. Altro parametro che risulta utile agli obiettivi dello studio è l'*indice di boscosità totale*, questo indica la percentuale di superficie territoriale coperta da bosco. Il sopraccitato parametro è stato definito per ognuno dei 13 sottobacini (**Tabella 5.5**) grazie all'analisi in ambiente GIS della Carta Forestale Regionale.

Bacino di Studio	Indice di boscosità totale
	(% superficie territoriale)
Alto Cordevole	29,0
Andraz	44,0
Bianco	69,0
Codalunga	43,0
Code	89,0
Cordon	32,0
Davedino	48,0
Della Miniera	57,0
Fiorentina	51,0
Molini	91,0
Ornella	53,0
Pettorina	41,0
Valbona	49,0

**Tabella 5.5 – Indici di boscosità totale relativi ai 13 sottobacini**

Dalla **Tabella 5.5** è possibile notare come sono presenti, nell'area di studio, alcuni sottobacini vicini ad una condizione di seminaturalità. Questi sono senz'altro i bacini del Code e del Molini, che possiedono rispettivamente l'89 ed il 91% di superficie coperta da aree boscate. Il sottobacino con la minor superficie occupata da bosco è l'Alto Cordevole, bacino questo che è anche il più esteso tra i 13 studiati. Un così basso indice di boscosità totale (29%) si spiega col fatto che la zona dell'Alto Cordevole è caratterizzata dalla presenza di diversi insediamenti abitativi e turistici, basti citare gli abitati di Arabba e Livinallongo del Col di Lana. Altre cause della bassa boscosità sono da ricondurre alla presenza di vaste aree destinate a prati e pascoli. Altro sottobacino caratterizzato da una bassa boscosità è quello del rio Cordon, in questo caso, però il fenomeno non è dovuto alla presenza umana ma bensì alle alte quote in cui si trova il bacino (quota media a 2673 m s.l.m.).

## 5.5 Raccolta e descrizione dei rilievi effettuati

Il bacino del torrente Cordevole, chiuso preso il lago di Alleghe, è stato in questi anni studiato in modo approfondito. Il principale scopo degli studi è stata l'analisi del ruolo assunto dal materiale legnoso presente in alveo. Le campagne di misurazione hanno riguardato tutti e 13 i sottobacini presenti con i relativi corsi d'acqua. Queste analisi sono state condotte direttamente in campo da studiosi diversi, in periodi diversi; di seguito se ne riporta l'elenco completo:

- **Rio Bianco:** giugno – agosto 2007 (Rosin, 2007);
- **Della Miniera:** giugno – agosto 2007 (Rosin, 2007);
- **Code:** agosto – settembre 2003 (Slongo, 2005);
- **Molini:** luglio – settembre 2004 (Ebo, 2005; Siffredi Duranti, 2006; Geremia, 2007);
- **Valbona:** giugno – agosto 2007 (Rosin, 2007);
- **Ornella:** giugno – agosto 2007 (Comel, 2007);
- **Cordon:** agosto – settembre 2003 (Slongo, 2005);
- **Davedino:** maggio – settembre 2006 (Calligaro, 2007);
- **Codalunga:** luglio – settembre 2004 (Rigon, 2005);
- **Andraz:** giugno – agosto 2007 (Comel, 2007);
- **Pettorina:** agosto – settembre 2004 (Tonon, 2005);
- **Fiorentina:** agosto – settembre 2003 (Slongo, 2005);
- **Alto Cordevole:** giugno – agosto 2007 (Zorzi, 2007).

Tutte le campagne di misurazione sopraccitate hanno avuto una prima parte comune, esse, infatti, hanno innanzitutto misurato ed analizzato la morfologia dei collettori, oltre che rilevare in campo le caratteristiche qualitative e quantitative del detrito legnoso. Oltre questa parte comune però i diversi studi sono stati condotti su vari fronti, tra i quali:

- ✓ sviluppo di un'analisi statistico-probabilistica delle relazioni "legname – caratteri morfologici dell'alveo" oltre che "legname – caratteri a scala di bacino";
- ✓ analisi riguardante la caratterizzazione della gestione forestale passata e presente dei bacini;
- ✓ analisi dendrocronologica del legname in alveo;
- ✓ monitoraggio della mobilità del legname (TAG);

- ✓ creazione di un modello in ambiente GIS per la quantificazione dei volumi di legname potenzialmente movimentabile e determinazione della pericolosità idrogeologica ad esso associata.

Tutte le analisi sopraindicate sono state condotte con metodi, materiali e strumenti differenti, anche se come detto, contengono tutte una parte comune riguardante lo studio morfologico del bacino oltre che l'analisi del detrito legnoso. Queste due misurazioni comuni hanno fornito dati necessari anche al presente studio, per questo di seguito verranno illustrati i risultati ottenuti oltre che le metodologie utilizzate nei rilievi di campo.

### **5.5.1 Rilievo ed analisi della morfologia dei torrenti**

La fase di analisi e di rilievo dei corsi d'acqua si è svolta direttamente in campo operando in due modi. La maggior parte degli studi condotti hanno indagato in modo continuo i corsi d'acqua, partendo perciò dalla sezione di chiusura posta alla confluenza col collettore a valle e procedendo verso monte fino a che le condizioni del territorio lo permettevano. Alcuni studi invece sono stati condotti in modo differente, in questi casi l'attività di campagna è stata preceduta da una fase a "tavolino". Qui tramite un supporto GIS si è provveduto preventivamente a creare un DEM dell'area da analizzare su cui successivamente sono state sovrapposte le foto aree della zona. Grazie a questa elaborazione sono state individuate le aree da indagare in campo, assicurandosi poi che i tratti scelti coprissero almeno il 10% della lunghezza totale del collettore. Come detto questa metodologia di analisi a campionamento sistematico non è stata utilizzata per tutti i bacini indagati ma solo per quelli relativi al Rio delle Miniere, Valbona, Ornella, Andraz e Rio Bianco.

Una volta completate le operazioni preparatorie, è stato svolto il lavoro in campo, fase questa compiuta in modo uguale per tutti gli studi. In campo, infatti, tutti i collettori sono stati suddivisi in tratti di diversa lunghezza a seconda delle variazioni riguardanti la pendenza, la larghezza e la morfologia d'alveo. L'estensione dei tratti comunque è sempre stata compresa tra 5 e 10 volte la larghezza dell'alveo a piene rive ed è stata segnalata con appositi picchetti posizionati lateralmente all'alveo. Nella fase di rilievo in campo sono stati utilizzati diversi strumenti di misura tra cui delle cordelle metriche di varia lunghezza, delle aste graduate telescopiche ed il

clisimetro (**Figura 5.22**). Nei rilievi condotti sul Rio Davedino e sull'Alto Cordevole, oltre alla tradizionale strumentazione sopra citata, è stato utilizzato un distanziometro laser modello *Impulse 200 Standard*<sup>®</sup>. Tale apparecchio ha permesso agli studiosi di creare anche il profilo longitudinale dei collettori analizzati.



**Figura 5.22 – Strumenti di misura utilizzati nella fase di rilievo in campo; Da sinistra: picchetti segnalatori, cordelle metriche, clisimetro, cavalletto forestale, asta telescopica.**

Come detto in precedenza, ogni collettore è stato suddiviso in tratti a seconda delle variazioni di pendenza, larghezza e di morfologia. Per ogni tratto studiato si è provveduto perciò a analizzarne la morfologia d'alveo, seguendo la classificazione di Montgomery e Buffington (1997), adattata ai torrenti montani da Lenzi, d'Agostino e Sonda (2000). Ulteriormente a questo sono state riportate le principali caratteristiche della piana alluvionale, come presenza di vegetazione, massi, manufatti; oltre che segnalare la presenza di eventuali frane o colate detritiche lungo i versanti. Per quanto riguarda i parametri morfometrici sono state fatte, per ogni tratto analizzato, le seguenti misure:

- **lunghezza** del tratto analizzato;
- **larghezza alveo a piene rive (*bankfull*)** media del tratto, rilevata dal punto più rappresentativo;
- **larghezza piana alluvionale**, questo rilievo ha necessitato di una rapida analisi delle caratteristiche morfologiche delle sponde del torrente e, in caso di dubbio la ricerca di tracce lasciate da eventi di piena con tempo di ritorno di 50 anni (come i sedimenti di medie o grosse dimensioni);
- **pendenza** media del tratto; rilevata con il clisimetro e con l'asta graduata telescopica, lunga da 1 a 6 metri. La misura è stata eseguita da due persone,

uno posto all'inizio del tratto con clisimetro ed uno collocato nel punto finale, con l'asta graduata;

- **tirante** medio in condizioni di piena ordinaria (tirante a piene rive), rilevato con l'asta graduata;
- **frequenza massi** caratterizzati da un diametro medio superiore al tirante. Questi blocchi di pietra assumono un ruolo fondamentale nell'ambito della dinamica fluviale ed in quello della fluviomorfologia. Essi infatti con il manifestarsi di piene ordinarie, intercettano il detrito legnoso proveniente da monte, favorendo la formazione di accumuli, spesso anche di notevoli dimensioni.

Un riassunto dei dati ottenuti nelle varie campagne di misurazione è riportato in **Tabella 5.6**. Da notare come la percentuale di collettore analizzata sia inferiore al 20% solamente nei sottobacini Andraz, Bianco, Della Miniera, Ornella e Valbona, che come detto rappresentano i corsi d'acqua studiati con la metodologia del campionamento sistematico. Tutti i restanti sottobacini sono stati analizzati in modo continuo, fino a studiarne porzioni superiori al 70%, come successo per il Code, il Davedino e per il Molini. Analizzando i dati ottenuti dai rilievi si possono fare alcune osservazioni: innanzitutto si può notare come le minori pendenze del collettore siano localizzate ancora una volta nei tre grandi tributari, cioè l'Alto Cordevole, il Fiorentina ed il Pettorina, che presentano, infatti, una morfologia a tratti artificiale, cioè ricca di sistemazioni idraulico-forestali atte a controllarne il dislivello. Al contrario le maggiori pendenze si riscontrano nel Rio Bianco e nel Rio delle Miniere che presentano una morfologia mista rapide/letto in roccia e cascate/letto in roccia, queste ultime caratterizzate anche da un limitata dimensione della *bankfull*.

Bacino di Studio	Lunghezza analizzata	Percentuale su lunghezza totale	Numero tratti	Pendenza media tratti	Larghezza alveo a piene rive	Tirante medio	Morfologia prevalente
	(km)	(%)	n	(%)	(m)	(m)	
Alto Cordevole	3,30	25,0	34	2,6	8,7	0,64	artificiale/riffle pool
Andraz	0,70	10,0	7	13,0	7,3	0,52	rapide/step-pool
Bianco	0,34	16,0	5	38,0	3,9	0,49	rapide/letto in roccia
Codalunga	4,20	67,0	43	10,4	6,5	0,53	rapide/step-pool
Code	1,60	73,0	24	26,0	4,8	0,46	rapide/letto in roccia
Cordon	2,70	49,0	41	11,0	5,4	0,71	step pool
Davedino	2,90	71,0	37	17,0	6,4	0,69	Rapide
Della Miniera	0,21	11,0	3	28,0	3,5	0,43	cascade/letto in roccia
Fiorentina	5,40	45,0	51	4,5	10,9	0,57	artificiale/riffle pool
Molini	2,10	78,0	35	16,0	3,6	0,48	step pool/letto in roccia
Ornella	0,41	10,0	6	17,6	4,5	0,46	Rapide
Pettorina	8,80	68,0	46	5,0	7,4	0,56	artificiale/riffle pool
Valbona	0,35	18,4	5	26,0	6,6	0,38	Rapide

Tabella 5.6 – Morfologia, sintesi dei dati ottenuti durante le varie campagne di misurazione svoltesi nel bacino di studio.

### 5.5.2 Rilievo ed analisi del legname in alveo

Contemporaneamente ai rilievi riguardanti la morfologia, sono state compiute anche le analisi relative alla presenza di detrito legnoso in alveo (**Figura 5.23**). A questo scopo sono stati rilevati lungo i corsi d'acqua tutti gli elementi caratterizzati da un diametro medio superiore a 5 cm e con una lunghezza maggiore di 50 cm. Queste misurazioni sono state ottenute grazie agli strumenti rappresentati in **Figura 5.22**, in particolare grazie all'utilizzo del cavalletto forestale e delle cordelle metriche. Oltre ai singoli elementi sparsi, che sono stati classificati col termine materiale *singolo*, sono stati individuati anche i vari accumuli di *LW* classificandoli col termine materiale *accumulato*. Di questi ultimi sono state rilevate le dimensioni di ogni singolo elemento costituente, oltre che le misure dell'accumulo nel suo complesso (larghezza, altezza e profondità). In alcune campagne di misurazione, nello specifico quelle riguardanti i torrenti Cordevole e Davedino, gli accumuli sono stati studiati approfonditamente, rilevandone le seguenti caratteristiche:

- **tipo di accumulo**, secondo la classificazione di Abbe e Montgomery (2003) adattata ai torrenti dolomiti;
- **localizzazione** all'interno dell'alveo;
- **elementi chiave** determinanti la formazione dell'accumulo stesso;

- **dimensioni**, per calcolarne il volume ipotetico sono stati annotati lunghezza, altezza e larghezza;
- **numero** totale di elementi che formano l'accumulo;
- **materiale legnoso fine** presente, cioè elementi con dimensioni inferiori ai 5 cm di diametro medio e 50 cm di lunghezza;
- dimensioni (lunghezza, larghezza e altezza) del **cuneo di sedimento** trattenuto a monte dall'accumulo stesso;
- **contrazione**, cioè il rapporto tra la larghezza ostruita dell'alveo e quella totale.



Figura 5.23 – Alcune fasi di rilievo del legname in alveo svoltesi nelle campagne di misurazione.

Nel caso fossero presenti *debris dem* e *log step* sono state rilevate anche:

- l'altezza del salto;
- il numero di tronchi che formano il salto;
- la larghezza della gaveta;
- le dimensioni della pool che si forma a valle (larghezza, lunghezza e profondità).

Il detrito legnoso rilevato in alveo oltre che ad essere descritto dal punto di vista quantitativo è stato descritto anche dal punto di vista qualitativo. Per il rilievo del materiale legnoso sono stati analizzati diversi parametri, di seguito riportati:

- **Classe vegetazionale**, se *conifere* o *latifoglie*;
- **Tronchi o ceppaie**;
- **Ubicazione**, suddivisa nelle categorie *dentro*, *marginale*, *bankfull*, *sospeso* e *step*. Nel primo caso è stato incluso tutto il materiale presente all'interno dell'alveo a piene rive, nel secondo caso invece si intende il detrito legnoso posizionato esternamente alla *bankfull* ma internamente alla piana

alluvionale. Il termine *bankfull* è stato utilizzato nel caso di posizione intermedia alle due sopra citate. Nella categoria *sospeso* si sono inclusi i tronchi posti internamente all'alveo ma ad un'altezza superiore rispetto al tirante a piene rive. Infine il termine *step* è stato utilizzato nel caso di materiale legnoso disposto trasversalmente alla direzione del flusso, posizione questa che favorisce la formazione di una morfologia a *log step*.

- **Orientamento**, cioè la disposizione del materiale (asse principale) rispetto alla direzione del flusso. Suddivisa in tre categorie: *parallela*, *perpendicolare* ed *obliqua*. Nel caso in cui fossero presenti delle ceppaie si è provveduto a riportarne la posizione delle radici, se verso *monte*, *valle*, *destra* o *sinistra*.
- **Stato di degradazione**, caratteristica atta a valutare il tempo di permanenza del detrito legnoso in alveo. La determinazione di questa caratteristica non è sempre stata facile in quanto l'aspetto fisico del materiale legnoso dipende, oltre che dal tempo di permanenza in alveo, anche dal tipo di trasporto subito e dalla specie vegetale d'appartenenza. Per la classificazione sono state utilizzate le seguenti categorie: col termine *fresco* si è identificato il materiale che ha origine più recente (inferiore all'anno) e che presenta ancora una corteccia integra e foglie (a volte). La seconda categoria viene descritta col termine *medio*, includendo all'interno di essa tutto il detrito legnoso che preserva ancora le caratteristiche meccaniche proprie del legno, presentando nel contempo anche i primi segni di degradazione dovuti al tempo (parti di corteccia mancanti). Infine nella classe *vecchio* sono inclusi tutti gli elementi legnosi caratterizzati da condizioni di degrado avanzato a causa di processi meccanici (azione della corrente) e processi chimico-biologici; per questi il tempo stimato di permanenza in alveo supera i cinque anni.
- **Origine**, descritta come *sponda* se il materiale proviene dall'azione di erosione del torrente, *fluitato* nel caso in cui provenga da monte tramite fluitazione nella corrente, *frana* include il detrito immesso in alveo a causa di movimenti del versante. Categoria a parte invece è stata definita per descrivere i residui di utilizzazione e le piante presenti a causa di morte naturale.

Tutte le misurazioni sopra citate sono state svolte, oltre che con la strumentazione descritta in **Figura 5.22**, anche con l'ausilio d'apposite schede di rilievo in campo (**Figura 5.24**). Ogni tratto analizzato è descritto in una o più schede di rilievo, in

queste vengono riportati i dati sia qualitativi che quantitativi del materiale rinvenuto oltre che i riferimenti a fotografie, scheda accumuli e i numeri degli eventuali segnalatori (TAG) collocati per monitorare la mobilità del legname in alveo (attività svolta solo nel Rio Cordon e Davedino).

<b>Tratto</b>	<b>22</b>	<b>Torrente</b>	<b>Cordevole</b>	<b>Data</b>	<b>04/07/2007</b>
Morfologia					
Lunghezza		<b>m</b>			
Larghezza -Bf		<b>m</b>	<b>7.8</b>		
Larghezza -Pa		<b>m</b>	<b>47.2</b>		
Pendenza		<b>%</b>			
Tirante ( $h_{br}$ )		<b>m</b>	<b>0.57</b>		
N° Massi	<b>35</b>	<i>(diametro medio maggiore del tirante)</i>			
N° step					
Veget riparia	<input type="checkbox"/>				

	L=Idrofobia C=Confina	D=dentro S=sospeso L=Idrofobia C=Confina	T=lonco C=ceppaia	S=singolo A=accumulo 2	Fana FR, sponda SP, naturale N, fluitato FL, residui RU	Para (f) - Per(p) - Obi (bl) ceppaie: M - V - dx - sx	Stato degradaz. F=trsc M=ndio V=chlo	Singolo		Accumulo			Note  altezza step H profondità pool s volume sedimento V TAG foto influenza morfologica (fm) %dentro
								DIAMETRO medio se T, minore se C	LUNGHEZZA	ALTEZZA	LUNGHEZZA	LARGHEZZA	
1	C	M	T	A	FL	//	V	0.06	1.40				
2	C	M	T	A	FL	//	V	0.07	3.15				S.A. 22.1 Foto 5201 - 5202 - 5203
3	C	M	T	A	FL	//	V	0.07	3.62				
4	C	M	T	A	N	bl	M	0.11	8.70				
5	C	M	T	A	N	bl	M	0.07	6.30				
6	C	M	T	A	N	bl	V	0.05	3.10				
7	L	Bf	T	A	FL	bl	V	0.07	3.00				S.A. 22.2 Foto 5204 - 5205 -

Figura 5.24 – Scheda di rilievo del materiale legnoso. Un esempio degli elementi rilevati nel tratto n° 22 del T. Cordevole; la lunghezza e la pendenza del tratto sono ricavate dal profilo.

## 5.6 Modello previsionale su base GIS

Nei precedenti paragrafi sono stati descritti i risultati ottenuti dalle varie campagne di misurazione svoltesi nel bacino di studio. A questo punto tutte le informazioni fin qui ottenute possono essere utilizzate come dati di partenza per l'elaborazione di un modello previsionale su base GIS. Lo scopo finale di questa ricerca, infatti, è quello di utilizzare gli strumenti forniti in ambiente GIS per individuare le aree sorgenti del legname in alveo. Grazie agli studi disponibili in letteratura e soprattutto alle analisi svolte nel bacino di studio, si può affermare che le aree sorgenti si possono individuare nelle zone dove due fattori, la superficie boscata ed un'alta suscettibilità ai dissesti, sono contemporaneamente presenti. Affinché il modello sia significativamente affidabile deve rappresentare la realtà con quanti più dati, fenomeni e processi naturali possibili. A tal fine, come detto, si utilizzeranno i dati

ottenuti dalle precedenti campagne di misurazione in campo e riguardanti sia la morfologia del corso d'acqua e del relativo sottobacino, sia quelli riguardanti la presenza di detrito legnoso nel collettore. Oltre a questi si farà uso anche delle carte tematiche ottenute grazie alle elaborazioni del modello digitale del terreno (DEM) a scala di bacino. I dati vengono utilizzati nella loro interezza in quanto la presenza di legname in alveo non è influenzata solo da fenomeni concentrati a livello di collettore, ma subisce influssi da fenomeni territoriali più estesi come la presenza di dissesti, la presenza di insediamenti antropici e le opere di riqualificazione fluviale solo per citarne alcuni. La possibilità di gestire una così grande mole di dati e di fenomeni è data dalle potenzialità dei SIT, e nello specifico dagli strumenti forniti in ambiente GIS.

Le aree sorgenti di legname in alveo sono localizzabili in funzione delle superfici boscate e della suscettibilità ai dissesti. Per definire in primo tematismo si sono utilizzati i *Piani di Assestamento Forestale* ed l'elaborazione tramite *ArcGis*<sup>®</sup> delle ortofoto riguardanti il bacino di studio, processo questo che verrà ripreso successivamente in maniera approfondita. La suscettibilità ai dissesti invece è stata determinata tramite un modello statistico basato sull'analisi bivariata, denominato *WofE*, acronimo di *Weight of Evidence*. Questo metodo permette di utilizzare i dati raccolti nella fase preparatoria e attraverso carte tematiche appositamente "pesate" arriva a definire un valore di propensione al dissesto per ogni singola unità di territorio. La determinazione dei "pesi" viene eseguita grazie al confronto delle carte tematiche disponibili con una carta dei dissesti che rappresenta appunto i fenomeni franosi presenti nell'area di studio. Nel presente studio si è utilizzata come carta dei dissesti la cartografia prodotta dal *Progetto IFFI*.

### **5.6.1 Progetto IFFI**

Il *Progetto IFFI*, acronimo di *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia*, nasce dalla collaborazione tra l'ex Servizio Geologico Nazionale (attuale APAT) e le Regioni e Province Autonome d'Italia. Questo progetto ha come scopi:

- fornire un quadro completo ed aggiornato sulla distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale secondo procedure standardizzate;
- realizzare un Sistema Informativo Territoriale Nazionale contenente tutti i dati sui dissesti censiti in Italia;

- offrire uno strumento conoscitivo di base per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana, per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale.

I soggetti interessati nella redazione del progetto sono stati: l'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici), che ha svolto una funzione di indirizzo e di coordinamento delle attività verificandone la conformità dei dati cartografici e alfanumerici alle specifiche del progetto; le Regioni e le Province Autonome che hanno effettuato la raccolta dei dati storici, la mappatura dei dissesti, la validazione e l'informatizzazione dei dati stessi. Da ricordare anche la partecipazione delle Università, del SINAnet (Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale) e società d'informatica specializzate in banche dati.

La metodologia adottata per l'individuazione e l'analisi dei dissesti, nonché per la redazione del *Progetto IFFI* si è basata sulle attività di aerofotointerpretazione, rilievo di campagna e sulla ricerca dei dati storici. Dato che questa attività si è svolta a livello nazionale è stato necessario creare un metodo di rilevamento dei dissesti omogeneo per tutti i soggetti interessati. Per questo è stata predisposta una *Scheda Frane IFFI*, creata sulla base di standard internazionali. Essa è suddivisa in tre livelli di approfondimento progressivi:

- **1° livello:** contiene informazioni di base riguardanti il dissesto, come ubicazione, tipologia di movimento, stato di attività;
- **2° livello:** informazioni ricavate da attività di campagne quali morfometria, litologia, uso del suolo e data di attivazione;
- **3° livello:** contiene informazioni riguardanti l'idrogeologia, sugli studi e indagini effettuati, sugli interventi di sistemazione e sui segni precursori dell'evento franoso.

Tutti i dissesti così individuati sono stati successivamente riportati in un'apposita rappresentazione cartografica informatizzata alla scala 1:25000, dove ogni frana viene raffigurata da un punto georeferenziato definito *PIFF* (*Punto Identificativo del Fenomeno Franoso*) che viene posto per convenzione in corrispondenza del punto più elevato del dissesto. Le frane possono anche essere rappresentate da un poligono, nel caso in cui il dissesto sia cartografabile alla scala adottata, oppure da una linea se sono dissesti con forma molto allungata (colamenti rapidi). Questa cartografia è disponibile presso l'indirizzo web [www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/](http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/) (**Figura 5.25**), dove è facilmente consultabile grazie ad un'interfaccia *WebGIS*

suddiviso su più livelli. Qui su vari *layer* sono rappresentati: le frane rilevate, l'urbanizzato sul territorio nazionale (ricavato dal progetto *Corine Land Cover 2000*), il tracciato stradale, i fiumi, i laghi, i confini amministrativi, il modello digitale del terreno (DEM 20X20), le immagini satellitari (*Landsat*) e la Carta topografica IGM in scala 1:25 000. Altra caratteristica fondamentale della cartografia è che essa può essere interrogata tramite ricerche per comune o località, oppure per ricavare informazioni riguardanti la banca dati contenente foto, video e documenti. Ad ogni frana rilevata è stato assegnato un codice alfanumerico denominato ID-Frana che consente sia un'univoca identificazione a livello nazionale sia ne costituisce un collegamento tra il database alfanumerico e quello cartografico.

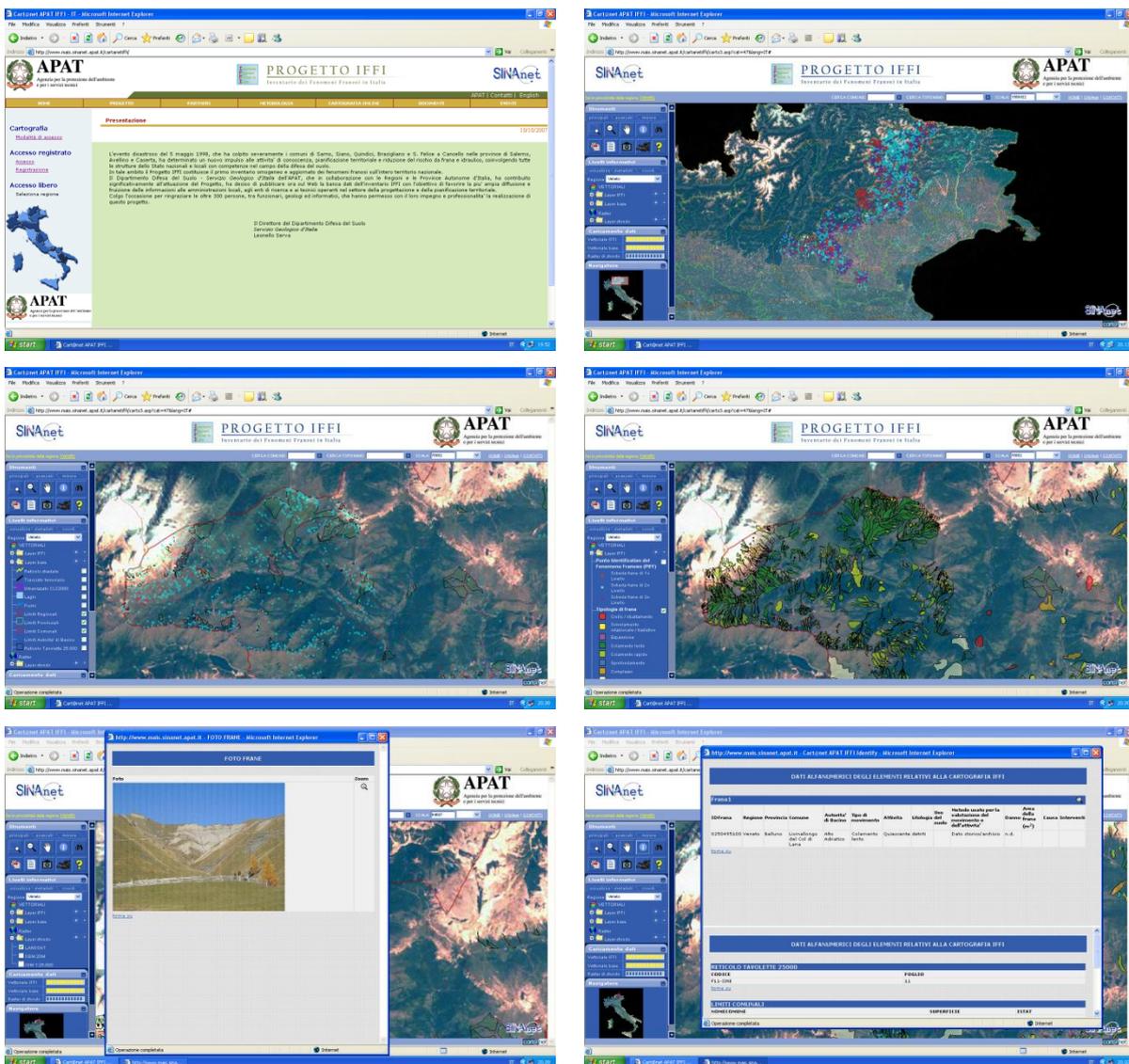


Figura 5.25 – Portale web del Progetto IFFI, da in alto a sinistra e in senso orario: homepage del Progetto all' indirizzo [www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/](http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/); dissesti presenti nella regione Veneto; dissesti presenti nella zona dell'Alto Cordevole (layer poligoni); esempio di foto associata alle frane; esempio di scheda associata alle frane; dissesti presenti nella zone dell'Alto Cordevole (layer punti identificativi PIFF).

I risultati ottenuti dal *Progetto IFFI* sono notevoli, basti pensare che sono state censite ben 461083 frane, le quali interessano un'area di circa 19700 km<sup>2</sup>, pari al 6,5% del territorio nazionale. Inoltre questo progetto rappresenta il primo inventario omogeneo ed aggiornato dei fenomeni franosi in Italia. Analizzando velocemente i dati ricavati dal censimento si può notare come le tipologie di dissesto più diffuse, relativamente al numero totale di dissesti, siano lo scivolamento rotazionale/traslativo e le colate.

Il *Progetto IFFI* si è occupato inoltre di valutare il livello di attenzione su base comunale, definendo quattro classi in funzione all'importanza degli elementi a rischio:

- **molto elevato**, quando le geometrie puntuali, poligonali e lineari del livello frane intersecano il tessuto urbano continuo e discontinuo, le aree industriali o commerciali;
- **elevato**, presenza di intersezioni con la rete autostradale, ferroviaria e stradale, le aree estrattive, discariche e cantieri;
- **medio**, nel caso di influenze su aree agricole, terreni boscati e ambienti semi naturali, aree verdi urbane e aree sportive ricreative;
- **trascurabile**, nel caso di comuni che non presentano dissesti nel proprio territorio di competenza.

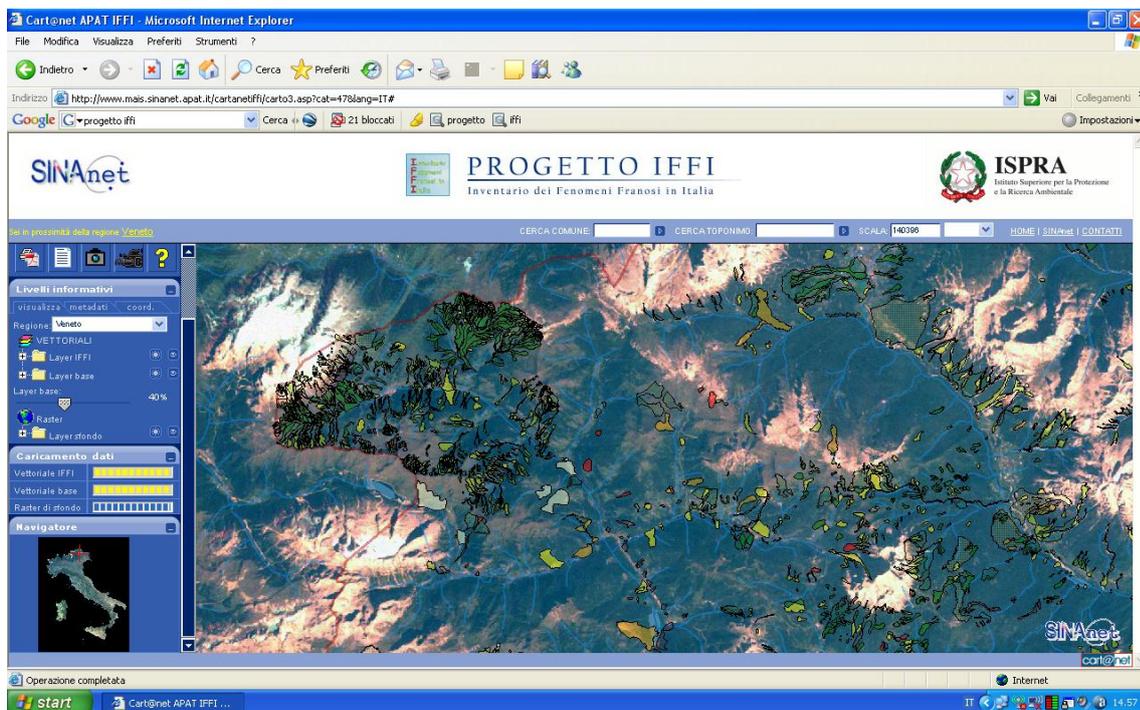
Da tale analisi si è stabilito che ben 5596 comuni italiani, su un totale di 8101, sono interessati da fenomeni franosi, pari al 69% del totale. Di questi sono 2839 quelli classificati nel livello d'attenzione *molto elevato* e 1691 nel livello *elevato*.

Altro risultato ottenuto dal *Progetto IFFI* è stata la redazione del volume "*Rapporto sulle frane in Italia – Il Progetto IFFI – Metodologia, risultati e rapporti regionali*" pubblicato nel 2007. Questo elaborato, insieme alla cartografia on line, è già stato impiegato da diversi enti locali come le Autorità di Bacino di rilievo nazionale, interregionale e regionale quale strumento conoscitivo per l'aggiornamento dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI).

Questo progetto assume un'indubbia valenza scientifica, rappresentando per dimensioni, qualità del dato e copertura del territorio, un prezioso strumento operativo nella valutazione della pericolosità di frana oltre che fornire un valido supporto alle decisioni nell'ambito delle politiche di pianificazione territoriale.

Proprio per queste caratteristiche si è scelto di utilizzare le cartografie redatte dal *Progetto IFFI* ai fini dello studio. In particolare si è usufruito dell'inventario dei dissesti individuati nel bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura posta presso il

lago di Alleghe (**Figura 5.26**). In quest'area il rilievo dei fenomeni franosi risulta particolarmente accurato, questo è dovuto anche al fatto che nella zona dell'Alto Cordevole (Nord-Ovest) si è svolto uno studio realizzato da Campana et al. (2007), per conto del *Progetto CARG Veneto*, che ha individuato e quindi analizzato tutti i dissesti presenti nell'area.



**Figura 5.26** – Progetto IFFI ([www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/](http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/)): dissesti rilevati nel bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura posta presso il lago di Alleghe.

## 5.6.2 Modello statistico *WofE*

Il modello statistico *WofE*, acronimo di *Weight of Evidence*, è stato sviluppato dal Servizio Geologico Canadese (Bonham-Carter et al., 1989) originariamente per la valutazione e la mappatura delle potenzialità minerarie di alcune aree dell'America settentrionale. Negli anni successivi è stato applicato in vari campi quali la ricerca mineraria (Bonham-Carter et al., 1990; Chung e Keating, 2002) e l'analisi del dissesto per frana (Sabto, 1991; Van Westen, 1993).

Il metodo *Weight of Evidence* è un metodo bivariato e multifattoriale che permette di analizzare separatamente il contributo di varie classi tematiche al manifestarsi di uno specifico evento (in questo caso i dissesti). Nella sua applicazione definisce inizialmente la reciproca indipendenza tra le classi per poi sommarne i vari pesi ed

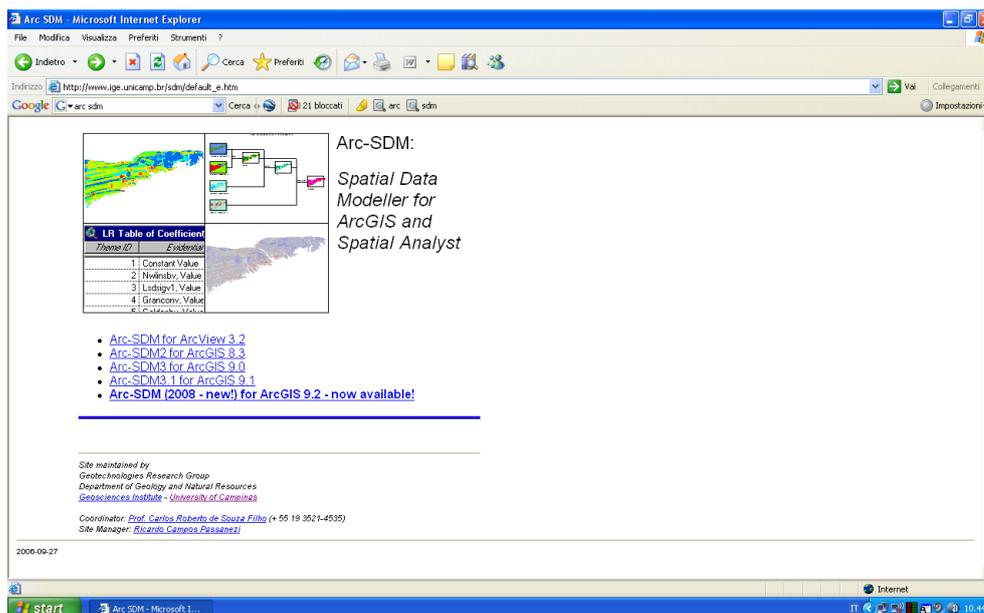
ottenere infine una probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento considerato. Il metodo *WofE*, come detto, è stato utilizzato nel presente studio per determinare la suscettibilità al dissesto relativamente al bacino analizzato. Una volta determinato il grado di propensione al dissesto, questo sarà rappresentato tramite una cartografia informatizzata (*Carta della suscettibilità ai dissesti*) che a sua volta sovrapposta alla *Carta dei particellari forestali*, permetterà di ottenere un elaborato rappresentante le aree potenzialmente sorgenti di legname. Nel modello statistico utilizzato, si accettano le considerazioni secondo cui i fenomeni franosi sono controllati da proprie leggi meccaniche; grazie a ciò si possono determinare dei precisi *fattori predisponenti* al dissesto che possono essere collegati direttamente od indirettamente al fenomeno franoso. Tali fattori possono essere individuati ed utilizzati per elaborare modelli previsionali. Questo principio, nel presente studio, viene utilizzato dal metodo *WofE* che analizza le varie combinazioni di *fattori predisponenti* e la relazione che questi hanno con la distribuzione dei fenomeni franosi. Entrando nello specifico il modello utilizzerà come dati di partenza le carte tematiche create nella fase preparatoria confrontandole con la carta inventario delle frane. Quest'ultima è stata ricavata dalle informazioni disponibili grazie al *Progetto IFFI*, mentre le carte tematiche utilizzate sono state:

- ✓ *Carta delle pendenze;*
- ✓ *Carta geologica;*
- ✓ *Carta dell'uso del suolo;*
- ✓ *Carta delle esposizioni;*
- ✓ *Carta delle concavità;*
- ✓ *Carta delle Quote.*

Ognuna di queste carte tematiche viene sottoposta ad un'analisi bivariata. Grazie a tale operazione ogni classe, presente all'interno di ogni singolo tematismo, viene valutata, stabilendone il relativo peso ai fini della suscettibilità al dissesto. Le classi con cui i vari tematismi (pendenze, geologia, esposizioni, ecc.) sono stati classificati possono essere sia di forma qualitativa (formazione geologica) sia quantitativa (valore di pendenza) e rappresentano i veri e propri *fattori predisponenti*. Il peso che ogni classe possiede viene espresso sulla base della densità dei dissesti ad essa correlati. Per chiarire si può prendere come esempio il fenomeno frana ed il tematismo uso del suolo: in via teorica, ci si aspetta di trovare per la classe *suolo nudo* molti dissesti ad essa collegati, così da caratterizzare tale classe con un peso

che favorisca il verificarsi di fenomeni franosi, contrariamente alla classe *bosco* per cui ci si aspetterà un peso che sfavorisca il fenomeno. Come detto, questo è un esempio in via teorica, perché come si vedrà successivamente molti sono i fattori che nella realtà influenzano la suscettibilità ai dissesti di un dato territorio. A livello digitale il metodo *WofE* riduce ogni tematismo presubilmente relazionato al dissesto, in un formato binario (0,1), dove 0 indica l'assenza di frane correlate e 1 la presenza. Questo tipo di operazione viene effettuata per ogni singola classe componente il tematismo considerato e per ogni *pixel* che la compone nella cartografia. Da evidenziare poi come il modello *WofE* possa gestire sia classi quantitative, come per esempio le quote altimetriche, sia le classi qualitative, come i tipi di uso del suolo. Una volta stabilito il peso per tutte le classi presenti all'interno dei singoli tematismi, si ottiene una carta di sintesi o carta della suscettibilità ai dissesti, ricavata dalla combinazione di tutte le carte preventivamente "pesate".

A livello informatico il modello *Weight of Evidence* si sviluppa all'interno del software *ArcGis*® 9.1 tramite l'estensione denominata *ArcSDM*® (*Spatial Data Modeller*). Quest'ultima è realizzata dal Dipartimento di Geologia e Scienze Naturali dell'Università di Campinas (Brasile), dal cui sito si può scaricare liberamente (**Figura 5.27**). L'estensione *ArcSDM*® ha avuto particolare successo in ambito scientifico in quanto oltre al *WofE*, permette di applicare diversi altri modelli statistici spaziali (*Fuzzy Logic*, *Weighted Logistic Regression*).



**Figura 5.27** – Portale web del Dipartimento di Geologia e Scienze Naturali dell'Università di Campinas (Brasile) disponibile all'indirizzo [http://www.ige.unicamp.br/sdm/default\\_e.htm](http://www.ige.unicamp.br/sdm/default_e.htm).

## 6. ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

### 6.1 Analisi dei dati riguardanti il legname in alveo

Nel bacino del torrente Cordevole, chiuso presso il lago di Alleghe, si sono svolte diverse campagne di misurazione per analizzare il materiale legnoso in alveo (vedi paragrafo 5.5.2). I dati qualitativi e quantitativi sono riassunti nella **Tabella 6.1**.

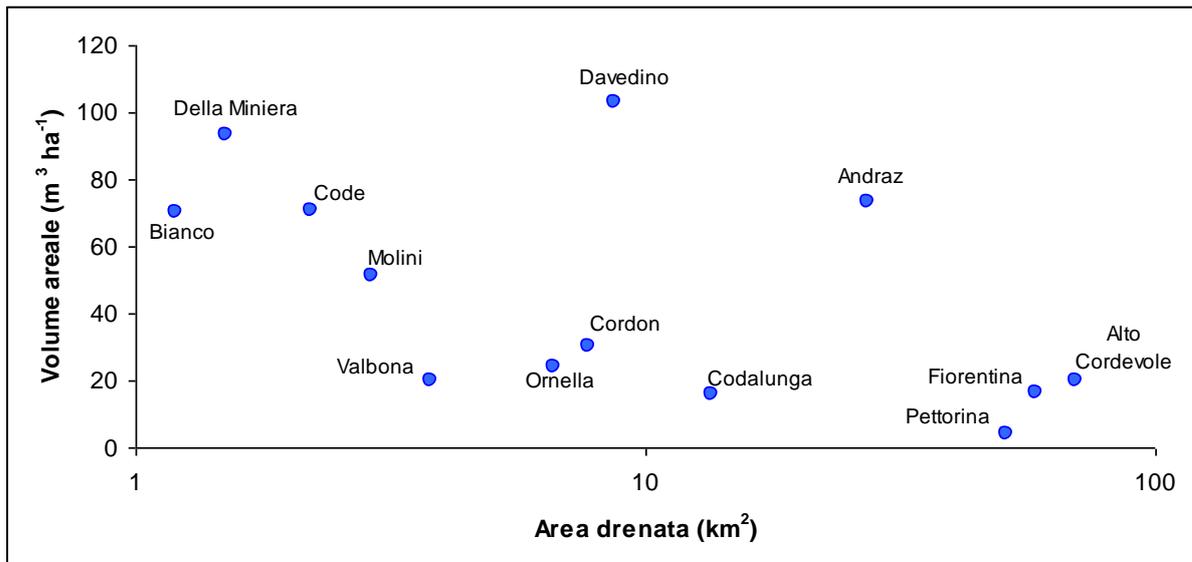
Bacino di Studio	Numero elementi	Rapporto numero/area	Volume elementi	Rapporto volume/area	Diametro medio	Lunghezza media	Percentuale di detrito in alveo
	(n)	(n/ha)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /ha)	(m)	(m)	(% del volume)
Alto Cordevole	838	292	56,8	19,8	0,09	1,73	47,3
Andraz	159	311	37,5	73,3	0,13	3,50	97,1
Bianco	77	581	9,3	70,1	0,11	1,24	57,1
Codalunga	732	268	42,7	15,6	0,07	3,20	78,0
Code	767	999	54,2	70,6	0,10	1,80	34,5
Cordon	600	412	43,9	30,1	0,11	2,10	40,0
Davedino	2014	1085	191,1	103,0	0,12	2,00	71,2
Della Miniera	184	2503	6,9	93,3	0,10	1,20	69,7
Fiorentina	1557	264	97,5	16,5	0,10	1,70	72,6
Molini	653	864	38,9	51,5	0,10	1,60	54,5
Ornella	119	645	4,4	24,0	0,07	1,70	92,0
Pettorina	1322	203	25,9	4,0	0,08	0,79	58,0
Valbona	60	260	4,6	20,0	0,13	3,75	49,8

**Tabella 6.1** – Detrito legnoso in alveo, sintesi dei dati ottenuti durante le varie campagne di misurazione svoltesi nel bacino del Cordevole.

Come si può notare in queste campagne di misurazione è stato svolto un notevole ed accurato lavoro, basti pensare che sono stati rilevati oltre 9000 elementi nei 13 sottobacini. Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia innanzitutto la notevole variabilità di quantità areale di legname (volume e numero in rapporto alla superficie dell'alveo a piene rive). Risultano estremi di 2503 n ha<sup>-1</sup> riguardanti il rio Della Miniera e 203 n ha<sup>-1</sup> relativo al Pettorina. Se invece ci si riferisce al *rapporto volume/area*, il valore più alto è stato registrato presso il Davedino (103 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>), al contrario del valore minimo che riguarda nuovamente il Pettorina con i suoi 4 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>. Questa grande variabilità è imputabile alle diverse caratteristiche e condizioni morfologiche caratterizzanti i vari sottobacini. Se, infatti, si osservano anche questi ultimi aspetti si può notare come il sottobacino dell'Alto Cordevole, che assume rispettivamente valori di *rapporto numero/area* e di *rapporto volume/area* molto bassi

(292 n ha<sup>-1</sup> e 19,8 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>), presenti al suo interno un elevato grado di antropizzazione connesso a numerose sistemazioni spondali e trasversali, fattori che sommati determinano una notevole modificazione della naturalità del corso d'acqua, limitando ovviamente il reclutamento di detrito legnoso. Stesso ragionamento lo si può fare per il torrente Fiorentina (264 n ha<sup>-1</sup> e 16,5 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>) che presenta lungo il suo corso numerose infrastrutture viarie, strade e ponti, che vengono difese da varie sistemazioni spondali. Anche il torrente Pettorina (203 n ha<sup>-1</sup> e 4 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>) rientra nei corsi d'acqua caratterizzati da una forte antropizzazione, ma i valori così limitati dei rapporti *numero/area* e *volume/area* sono da ricondurre anche ad una "pulizia in alveo" compiuta dai Servizi Forestali Regionali prima delle misurazioni di campo. Come detto i maggiori valori di detrito legnoso sono stati rilevati presso il rio Della Miniera (2503 n ha<sup>-1</sup> e 93,3 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>) e presso il Davedino (1085 n ha<sup>-1</sup> e 103 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>), in questo caso però le cause sono differenti. Nel primo caso, infatti, i valori elevati sono riconducibili alle condizioni del sottobacino, il Della Miniera difatti è un collettore quasi totalmente naturale che non presenta alcun'opera di sistemazione, ad eccezione di un cunettone realizzato nella parte più a valle (**Figura 6.3**). Lo stato di semi-naturalità caratterizza anche il sottobacino del Davedino, qui però la grande quantità di legname in alveo è da ricondurre altresì ad alcuni dissesti innescatisi lungo il collettore; in particolare una frana nel tratto 11 ha immesso circa 30 m<sup>3</sup> di materiale in un unico punto. Da evidenziare poi le notevoli quantità rilevate nei collettori Code (999 n ha<sup>-1</sup> e 70,6 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>) e Andraz (73,3 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>). Nel primo caso i valori così elevati sono dovuti alla boscosità del sottobacino che risulta quasi interamente coperto da fitto soprassuolo e da un'abbondante vegetazione ripariale (**Figura 6.3**); nel caso dell'Andraz invece le cause sono da ricondurre ad alcune frane che hanno causato l'immissione in alveo di grandi conifere, aspetto questo che si deduce anche dal fatto che l'Andraz possiede il secondo maggior valore di *lunghezza media* degli elementi, pari a 3,5 m.

Dall'analisi di questi dati è possibile osservare l'esistenza di una chiara relazione inversa tra il volume areale, espresso dal parametro *rapporto volume/area*, e l'area drenata del bacino. Questo aspetto è rappresentato in **Figura 6.1**, dove si può chiaramente notare come i sottobacini più estesi siano quelli che presentano anche un valore inferiore di volume areale, parametro questo che raggiunge i suoi massimi nei piccoli sottobacini.



**Figura 6.1 – Relazione tra volume areale di materiale legnoso e area drenata dei sottobacini.**

Questa relazione inversa è spiegabile con i diversi gradi di antropizzazione che caratterizzano i vari sottobacini. Le aree del Fiorentina, del Pettorina e dell'Alto Cordevole sono contraddistinte da un'elevata presenza di abitati ed infrastrutture viarie (strade e ponti) messe in sicurezza da numerose sistemazioni idraulico-forestali (**Figura 6.2**). Queste ultime incidono in maniera significativa sul reclutamento del detrito legnoso da parte del collettore in quanto: riducono i fenomeni di erosione spondale e di franamento per erosione al piede, rendono più regolare e meno scabra la sezione idrica facilitando la movimentazione del legname, nel caso di difese spondali impediscono l'instaurarsi di una vegetazione riparia lungo le rive, necessitano di frequenti "pulizie d'alveo" allo scopo di migliorarne l'efficienza. È bene ricordare però che una scarsa presenza di legname in alveo comporta anche delle conseguenze dal punto di vista morfologico, idraulico ed ecologico: in torrenti montani con pendenza elevata causa una scarsa presenza di *log steps* nonché delle *pool* ad essi associati; la dissipazione energetica di forma risulta ridotta (Wilcox et al, 2006; Comiti et al, 2007) come la capacità di trasporto dei sedimenti mentre l'incisione dell'alveo si presenta notevolmente aumentata (Faustini e Jones, 2003); la minor complessità idrodinamica derivante dall'assenza di ostacoli quali tronchi ed accumuli comporta una ridotta eterogeneità granulometrica spaziale, con poche aree dell'alveo coperte da sedimento fine (Buffington e Montgomery, 1999); la capacità di ritenzione della sostanza organica risulta fortemente compromessa (Bilby, 2000).

Dai dati ottenuti si possono anche individuare alcune eccezioni alla relazione inversa tra il volume unitario e l'area drenata dal sottobacino, è il caso questo del torrente Andraz e del Rio Davedino. Entrambi, infatti, nonostante siano classificabili come medio-grandi tra i sottobacini studiati, presentano valori del *rapporto volume/area* elevati, rispettivamente  $73,3 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  per l'Andraz e  $103 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  per il Davedino, simili o addirittura maggiori a quelli registrati in bacini di  $1-2 \text{ km}^2$ . Questo aspetto si spiega con l'abbondante presenza, in queste specifiche aree, di estesi dissesti riguardanti i versanti che causano l'immissione in alveo di ingenti volumi di materiale.

Proprio per il ruolo che assumono i fenomeni di instabilità dei versanti nel fornire materiale legnoso al collettore, si è applicato in questo studio il modello previsionale. Questo strumento permette di individuare le aree potenzialmente soggette a fenomeni di dissesto e successivamente determina le quantità potenzialmente reclutabili dalla rete idrica.



**Figura 6.2 – Opere di sistemazione poste a difesa di abitati e infrastrutture viarie lungo i torrenti Pettorina e Fiorentina.**



Figura 6.3 – Esempi di torrenti in stato di semi-naturalità: il Rio Della Miniera e il Rio Code

## 6.2 Mappatura aree suscettibili al dissesto

Dai dati ottenuti nelle campagne di misurazione (paragrafo 6.1) appare chiaro come, nei collettori di ordine inferiore, siano i fenomeni di dissesto a fornire le maggiori quantità di materiale vegetale al corso d'acqua. Per questo al fine di quantificare il detrito legnoso presente in alveo, risulta innanzitutto fondamentale stabilire le aree soggette a fenomeni franosi. In questo studio tali aree sono individuate sulla base del metodo statistico denominato *Weight of Evidence*. L'aspetto fondamentale del metodo *WofE* consiste nel raffronto tra le carte tematiche, create appositamente, e la carta inventario dei dissesti. La carta inventario sarà rappresentata nel presente studio dalla carta contenente i *punti di controllo*, mentre le carte tematiche utilizzate saranno le cartografie ottenute nella fase preparatoria (DEM, pendenze, esposizioni) con alcune integrazioni (geologia, uso del suolo e concavità).

### 6.2.1 Punti di controllo

Il modello *WofE* (paragrafo 5.6.2) determina la suscettibilità al dissesto di un dato territorio analizzando le relazioni esistenti tra le varie combinazioni di classi tematiche (*fattori predisponenti*) e la distribuzione dei fenomeni franosi (*punti di controllo*). Il peso che verrà assegnato ad ogni classe di ogni singolo tematismo sarà stabilito sulla base della densità dei dissesti ad esso connessi. In questo studio si è utilizzato come carta inventario dei dissesti la cartografia informatizzata redatta dal *Progetto IFFI*, in tale cartografia sono riportati tutti i dissesti individuati, di qualsiasi origine essi

siano. Ai fini dello studio si è deciso però di non considerare tutte le tipologie di dissesto individuate dall'inventario *IFFI*, esaminando i soli i tipi di frana che causano direttamente l'immissione di legname in alveo. I dissesti *IFFI*, presenti nel bacino del Cordevole ma non considerati sono i *DGPV*, acronimo di Deformazioni Gravitative Profonde di Versante, le espansioni e gli sprofondamenti. Tutte le restanti categorie di dissesto, crolli-ribaltamenti, scivolamenti rotazionali-traslativi, colamenti rapidi, colamenti lenti e fenomeni complessi sono state accorpate in un unico file e successivamente riordinate in due differenti classi: da una parte i colamenti rapidi definiti col nome di *debris flow (colate detritiche)* e dall'altra tutti i restanti fenomeni, classificati questi col nome generico *frane*. A livello cartografico i fenomeni franosi sono riportati nell'inventario *IFFI* in formato *shapefile (shp)*, adatto per la rappresentazione di elementi areali, come appunto i dissesti. Questi *shapefile* per poter essere utilizzati in ambiente GIS dal modello *WofE* sono stati rasterizzati e rappresentati in un'apposita cartografia non più sotto forma di poligoni ma come punti. Questi sono creati in modo tale da ottenere una densità di 25 punti per ettaro: il risultato di queste operazioni è rappresentato dalla *Carta dei punti di controllo*.

### 6.2.2 Fattori predisponenti

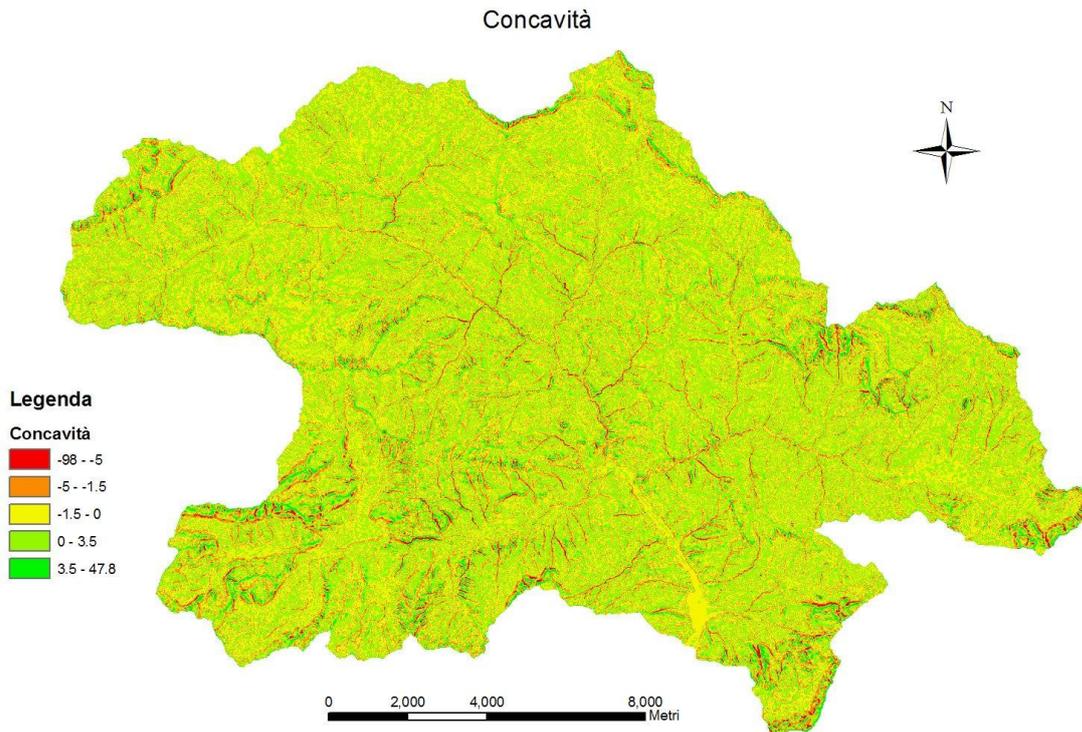
Con il termine *fattori predisponenti* vengono intesi tutti i caratteri morfologici ed ambientali caratterizzanti il bacino di studio che concorrono alla formazione di dissesti. In questo studio tali fattori sono rappresentati dalle varie classi presenti all'interno delle carte tematiche. Una volta definiti i *punti di controllo* necessari per stabilire i dissesti presenti nell'area di studio, si è passati all'elaborazione delle cartografie riguardanti i *fattori predisponenti*. Le carte tematiche utilizzate sono state:

- ✓ *Carta delle pendenze;*
- ✓ *Carta geologica;*
- ✓ *Carta dell'uso del suolo;*
- ✓ *Carta delle esposizioni;*
- ✓ *Carta delle concavità;*
- ✓ *Carta delle quote.*

Ognuna di queste carte tematiche verrà successivamente incrociata con la carta contenente i *punti di controllo* permettendo così di valutare per ogni classe, presente all'interno di ogni singolo tematismo, il relativo peso ai fini della suscettibilità al

dissesto. Alcune delle sopraccitate carte tematiche sono già state ottenute grazie alla fase preparatoria riguardante i parametri morfometrici, difatti i tematismi *pendenza*, *esposizione* e *quote* (**Figure 5.10, 5.15 e 5.16**) sono stati ricavati dall'analisi del *Digital Elevation Model (DEM)*, come indicato nel paragrafo 5.3. Le tre carte tematiche restanti sono state ottenute sempre tramite l'utilizzo di *ArcGis 9.1*, ma con modalità differenti.

La *Carta delle concavità* (**Figura 6.4**) è stata ottenuta grazie alla preventiva creazione del DEM riguardante l'area di studio. Una volta che si possiede il modello digitale del terreno è possibile produrla velocemente, grazie ad apposite funzioni del software *ArcGis*<sup>®</sup>. Nel presente studio si è scelto di utilizzare anche la *Carta delle concavità* in quanto questo attributo morfologico rappresenta un vero e proprio *fattore predisponente* riguardo la suscettibilità ai dissesti. La concavità morfologica, infatti, regola innanzitutto i deflussi superficiali e la cartografia che la rappresenta permette la distinzione delle aree (*pixel* nel nostro caso) in cui si genera ruscellamento (superfici convesse) da quelle in cui invece si genera un deflusso concentrato (superfici concave). In determinate aree perciò questo fattore, sommato agli altri *fattori predisponenti*, può definire delle particolari condizioni di instabilità. Dal punto di vista matematico la concavità esprime la derivata seconda del tematismo quota, di conseguenza quando la derivata assume valori positivi siamo in presenza di una superficie convessa, mentre i valori negativi indicano una superficie concava.



**Figura 6.4** – Carta delle concavità riguardante il bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.

La *Carta geologica* (**Figura 6.7**) del bacino del torrente Cordevole, chiuso presso il lago di Alleghe, è stata prodotta tramite una fase di *editing* in ambiente GIS (**Figura 6.6**). Nello specifico è stata compiuta una digitalizzazione del Foglio 11 (Marmolada) e del Foglio 12 (Cortina d’Ampezzo) della Carta Geologica d’Italia (**Figura 6.5**).



**Figura 6.5 – Fogli 12 e 11 della Carta Geologica d'Italia utilizzati per la creazione della carta geologica riguardante il bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.**

Queste cartografie sono disponibili in formato immagine *tiff* e *jpg* e perciò non analizzabili in ambiente GIS, inoltre sono riprodotte in scala 1:100000 ed interessano perciò una vasta area delle Dolomiti bellunesi. Per questo in prima battuta si è individuato su di esse il bacino di studio, una volta stabilita l'area su cui operare si è passati alla creazione di uno *shapefile* che permette la riproduzione delle caratteristiche geologiche del bacino. In GIS, infatti, il formato *shp* è il più adatto alla rappresentazione di entità areali come appunto il tematismo geologia. Prima di procedere con la redazione della carta tematica si è provveduto anche a georeferenziare le carte geologiche acquisite, come sistema di riferimento si è scelto il datum *Roma 40* con origine delle longitudini presso l'Osservatorio di Roma Monte Mario. Una volta terminata la fase preparatoria si è iniziata la fase di *editing* vera e propria. In questa fase sono state prima di tutto individuate le varie formazioni presenti nelle carte geologiche di partenza, questo per poi riprodurle in formato *shp* raffigurandole come poligoni.

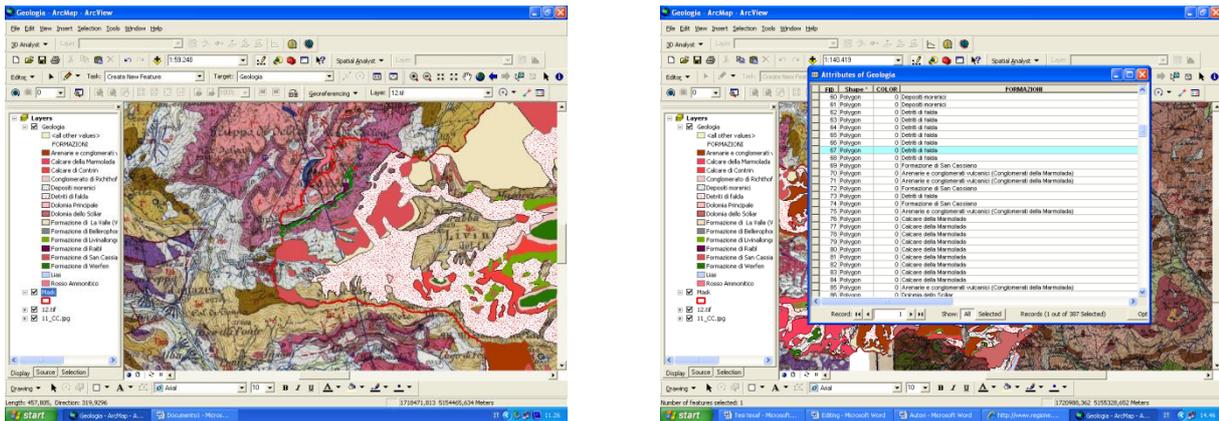
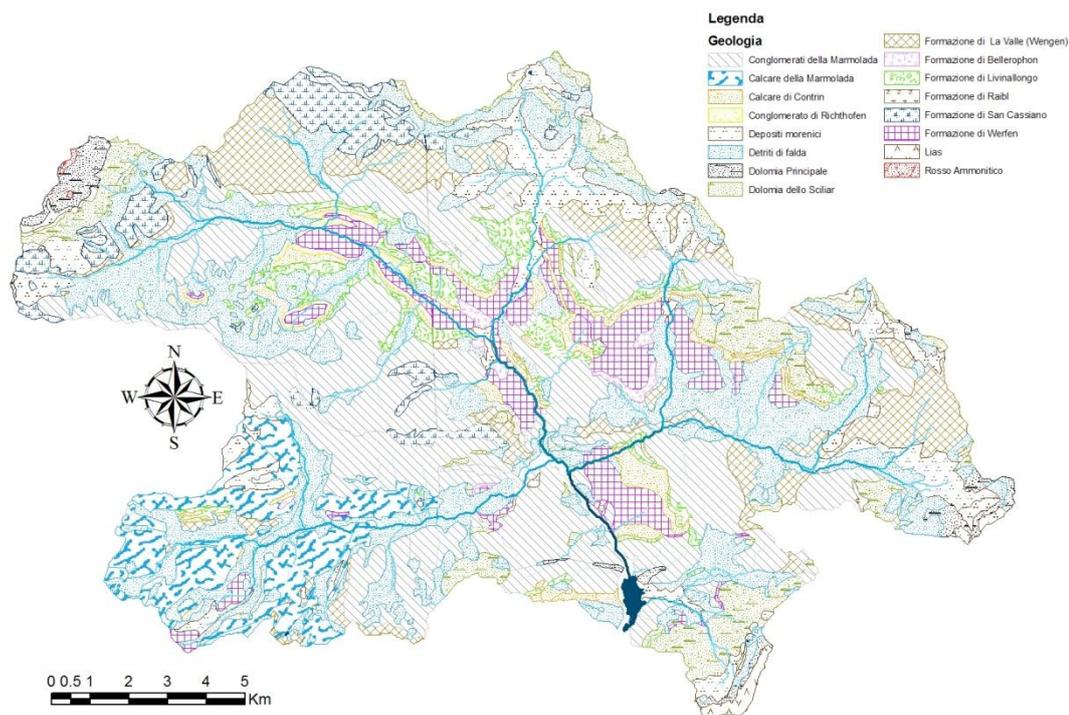


Figura 6.6 – Operazioni di editing per la creazione della carta geologica

Tutti i poligoni individuati sono stati classificati riportando per ognuno di essi lo specifico attributo riguardante la formazione geologica di appartenenza, quest'ultima ricavata dalla legenda della Carta Geologica d'Italia. Le formazioni geologiche presenti nell'area di studio sono:

- ✓ Conglomerato della Marmolada
- ✓ Calcarea della Marmolada
- ✓ Calcarea di Contrin
- ✓ Conglomerato di Richthofen
- ✓ Depositi morenici
- ✓ Detriti di falda
- ✓ Dolomia principale
- ✓ Dolomia dello Scillar
- ✓ Formazione di La Valle (Wengen)
- ✓ Formazione di Bellerophon
- ✓ Formazione di Livinallongo
- ✓ Formazione di Raibl
- ✓ Formazione di San Cassiano
- ✓ Formazione di Werfen
- ✓ Lias
- ✓ Rosso Ammonitico

Il tipo di formazione geologica è stato inserito nella tabella degli attributi riguardante lo specifico file. Una volta completata questa operazione per tutto il bacino di studio si è arrivati ad ottenere la definitiva *Carta geologica*.



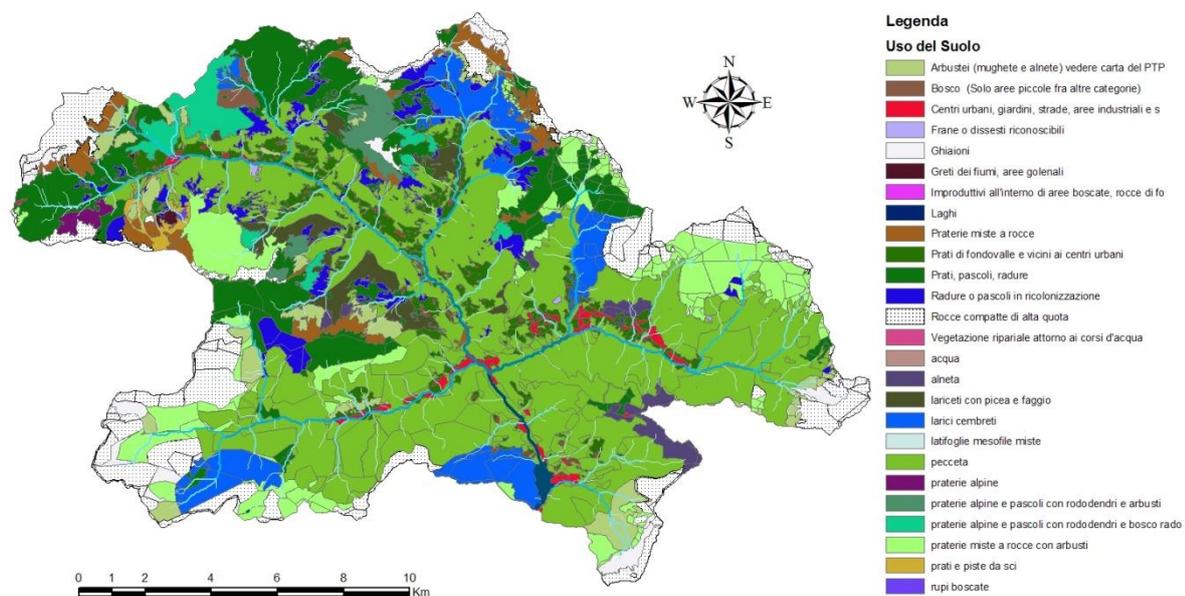
**Figura 6.7 – Carta geologica del bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.**

La *Carta dell'uso del suolo* (**Figura 6.8**) è stata ottenuta anch'essa grazie ad una fase di *editing*, simile a quella effettuata per il tematismo geologia. Il processo di ottenimento è stato però differente, in questo caso come basi per la digitalizzazione non sono state utilizzate delle cartografie preesistenti ma bensì le ortofoto riguardanti l'area di studio. Queste provengono dalla Regione Veneto e riprendono il territorio regionale ad una scala di 1:10000. Studiando accuratamente le ortofoto si è creato un apposito *shapefile* che ha permesso di riprodurre le numerose classi di uso del suolo presenti all'interno dell'area di studio. Di seguito vengono riportate le classi individuate:

- |                                      |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| ✓ Vegetazione ripariale              | ✓ Prati e piste da sci         |
| ✓ Acqua                              | ✓ Rupi                         |
| ✓ Alneta                             | ✓ Arbusteti (mughete e alnete) |
| ✓ Lariceti con picea e faggio        | ✓ Bosco                        |
| ✓ Larici cembreti                    | ✓ Centri urbani                |
| ✓ Latifoglie mesofite miste          | ✓ Ghiaioni                     |
| ✓ Pecceta                            | ✓ Greti dei fiumi              |
| ✓ Praterie alpine                    | ✓ Improduttivi                 |
| ✓ Praterie miste a rocce con arbusti | ✓ Laghi                        |

- ✓ Praterie miste a rocce
- ✓ Prati di fondovalle
- ✓ Prati, pascoli e radure
- ✓ Rocce compatte di alta quota

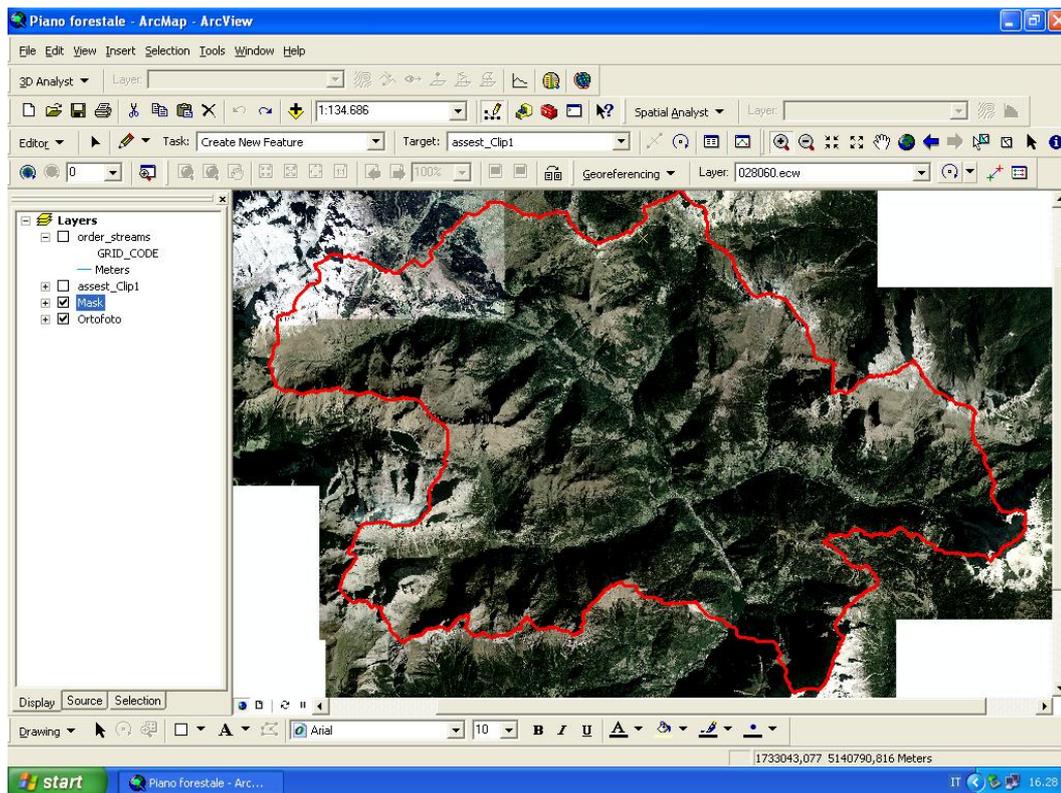
L'intera area oggetto di studio è stata indagata e, all'interno dello shapefile appositamente creato, suddivisa in poligoni a seconda del tipo di uso del suolo riconosciuto. Come per la geologia, utilizzando la relativa tabella degli attributi ogni poligono creato è stato poi classificato riportando la classe di uso del suolo d'appartenenza.



**Figura 6.8 – Carta dell'uso del suolo riguardante il bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.**

### 6.3 Mappatura delle superfici boscate

Allo scopo della quantificazione del materiale, è indispensabile avere a disposizione una mappatura della superficie boscata. Una volta terminata la fase preparatoria per le cartografie riguardanti la suscettibilità al dissesto si è provveduto a redigere la *Carta dei particellari forestali*. Anche questa cartografia è stata prodotta in ambiente GIS tramite un'operazione di *editing* (**Figura 6.11**). Per poter però effettuare tale operazione si è reso necessario svolgere una preventiva fase di foto-interpretazione delle ortofoto relative al bacino di studio (**Figura 6.9**).



**Figura 6.9** – Ortofoto utilizzate e riguardanti il bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.

Grazie alla foto-interpretazione è stato possibile individuare sia le aree boscate sia quelle che presentano una significativa copertura vegetale di diverso tipo (per esempio gli arbusteti di pino mugo). I dati di partenza sono state anche in questo caso le ortofoto in scala 1:10000 ricavate dalla Regione Veneto, grazie ad esse il bacino di studio è stato indagato nella sua interezza. Usufruento delle funzionalità offerte da *ArcGis*<sup>®</sup> 9.1 (**Figura 6.10**) è stato possibile analizzare anche le zone delle ortofoto in ombra, aree spesso vaste e boscate che ad un primo controllo non sembravano presentare copertura vegetale.

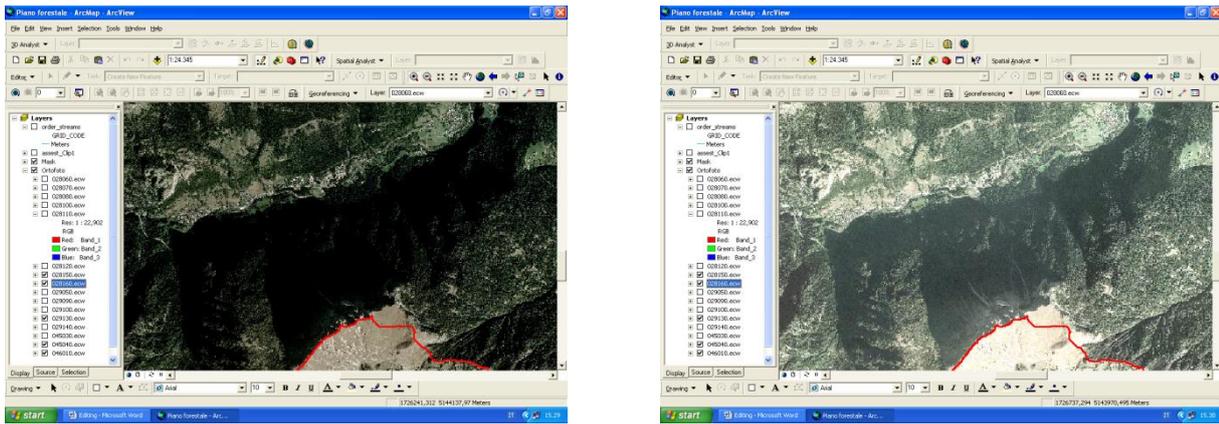


Figura 6.10 - Esempio di elaborazione di ortofoto per l'individuazione delle superfici boscate.

Una volta analizzate le ortofoto si è passati alla vera e propria creazione della *Carta dei particellari forestali*, per far questo si è creato un apposito *shapefile* in cui tutte le aree boscate o con presenza di copertura vegetale sono state individuate e rappresentate da poligoni. In questo modo sono state descritte tutte le aree che presentano una fitta copertura vegetale, tralasciando invece le zone caratterizzate da vegetazione rada.

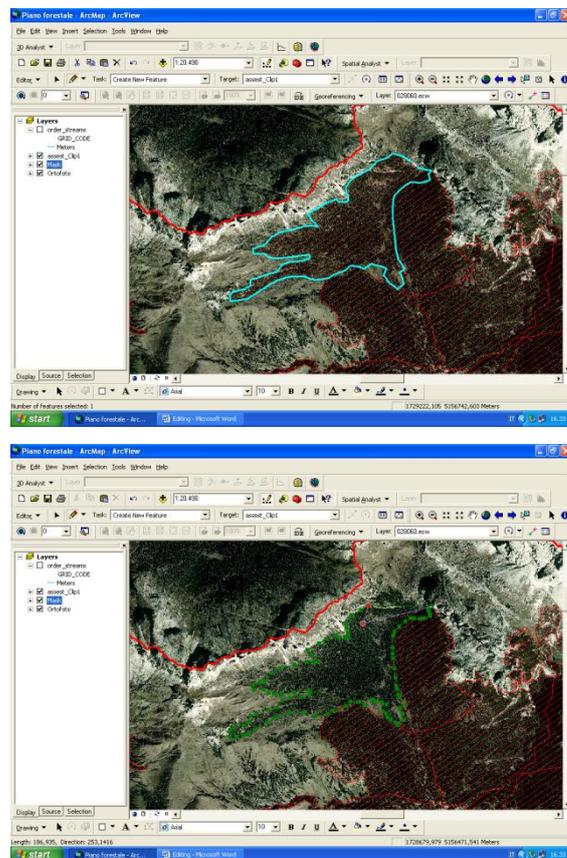


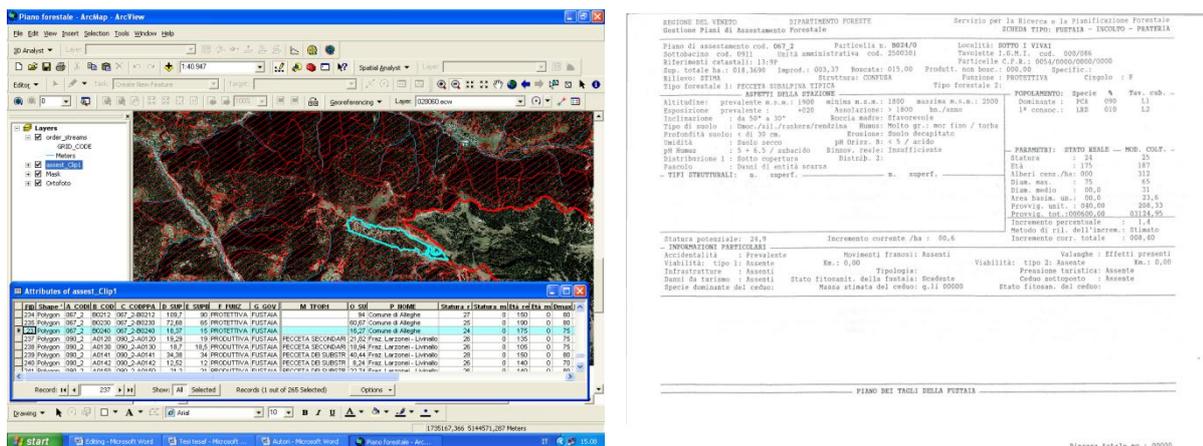
Figura 6.11 – Esempio di editing per la creazione della carta dei particellari forestali.

Una volta individuate e delimitate tutte le aree boscate si è provveduto a determinare e poi assegnare i relativi parametri dendrometrici. Per determinare tali parametri ci si è avvalsi dei Piani d'Assestamento Forestale relativi ai comuni di Livinallongo del Col di Lana, Rocca Pietore, Colle Santa Lucia, Selva di Cadore ed Alleghe. Il Piano d'Assestamento rappresenta un vero e proprio strumento per il governo del territorio e viene redatto dai comuni al fine di esaminare il proprio patrimonio boschivo oltre che per definire gli interventi da compiere per una corretta gestione dello stesso. Ogni piano presenta al suo interno una cartografia raffigurante tutte le particelle forestali presenti nel territorio comunale, proprio grazie a tale elaborato è stato possibile effettuare un confronto tra le particelle cartografate dai Piani d'Assestamento Forestale e quelle determinate tramite la foto-interpretazione delle ortofoto. Una volta individuata questa corrispondenza si è provveduto a riportare i parametri dendrometrici delle singole particelle. All'interno di un Piano d'Assestamento, infatti, ogni area boscata è definita oltre che da una carta tematica anche da una specifica scheda descrittiva. In questa scheda sono riportati numerosi dati, tra i quali la posizione geografica (località o frazione) oltre che vari codici identificativi (n° particella, codice unità amministrativa, codice tavoletta I.G.M.I., riferimenti catastali). All'interno di un Piano d'Assestamento Forestale è inoltre possibile reperire numerosi parametri dendrometrici, capaci questi di esprimere le caratteristiche biometriche del bosco presente sulla particella interessata. Allo scopo di questo studio però si sono presi in considerazione, ed implementati nella carta, solo alcuni di essi, quali:

- ✓ *Area basimetrica*: per un singolo albero è data dalla superficie della sezione trasversale presa ad 1.30 m.
- ✓ *Età*: misura ricavata dal numero di anelli legnosi rilevati all'altezza di 1,30 m, data dall'età media delle piante analizzate nella singola particella.
- ✓ *Diametro medio*: diametro medio dei soggetti rilevati nella singola particella, il diametro misurato è quello a *petto d'uomo*, cioè a 1,30 m dalla base della pianta.
- ✓ *Diametro massimo*: media dei diametri rilevati presso le 5 piante dominanti il popolamento.
- ✓ *Statura*: nella pratica assestamentale la statura viene definita tramite la *curva ipsometrica*, grafico che esprime la relazione esistente tra le classi diametriche e l'altezza media per classe di diametro. In questa rappresentazione grafica sono

riportate in ascissa le classi diametriche ed in ordinata le altezze medie. La curva ipsometrica cambia al variare dell'età, della struttura e della fertilità della popolazione arborea.

Questi parametri sono ricavati da delle misurazioni in campo che possono essere svolte su tutta la popolazione arborea di una data particella o molto più frequentemente derivano da misurazioni applicate su aree campioni o su determinati soggetti arborei (*cavallettamento selettivo* o *localizzato*). Inoltre i parametri dendrometrici riportati nei Piani d'Assestamento possono essere reali o relativi al modello colturale, a seconda che essi vengano ricavati da un'effettiva misurazione in campo oppure derivino da operazioni di tipo indiretto (stime). In questo studio si è preferito l'utilizzo dei dati reali, i quali però non sono disponibili per tutte le particelle studiate; in tal caso si è ovviato al problema ricorrendo ai parametri del modello colturale. Una volta individuati i parametri relativi alle varie particelle si è proceduto a riportarli nella tabella degli attributi dello shapefile creato (**Figura 6.12**).



**Figura 6.12** – Esempio di compilazione della tabella degli attributi relativa alla Carta dei particellari forestali, i parametri dendrometrici sono ricavati dal Piano d'Assestamento Forestale del Comune di Alleghe.

In questa tabella compaiono elencati tutti i poligoni creati nello shapefile e raffiguranti le particelle forestali. Qui ad ogni particella sono stati attribuiti i relativi coefficienti dendrometrici così da ottenere una *Carta dei particellari forestali* (**Figura 6.13**) che, oltre alla rappresentazione delle superfici forestali presenti nel bacino, riesca ad esprimerne le caratteristiche biometriche.

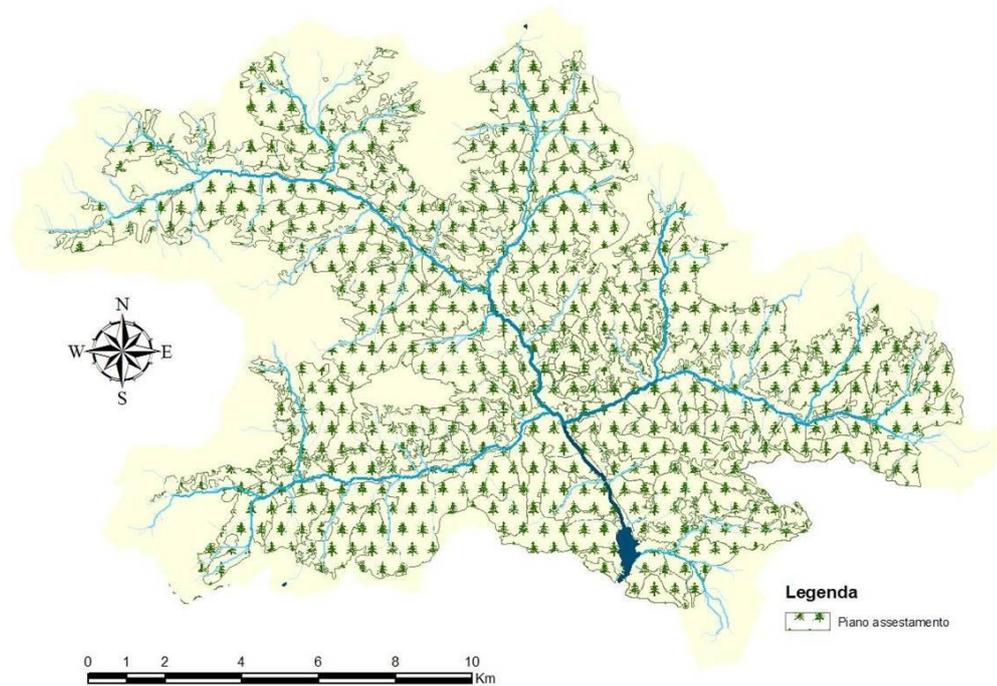


Figura 6.13 – Carta dei particellari forestali relativa al bacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.

#### 6.4 Applicazione modello previsionale sul sottobacino del torrente Ornella

In questo studio si è deciso di applicare il modello previsionale per la quantificazione del materiale legnoso in alveo al sottobacino del torrente Ornella (**Figura 6.14**).

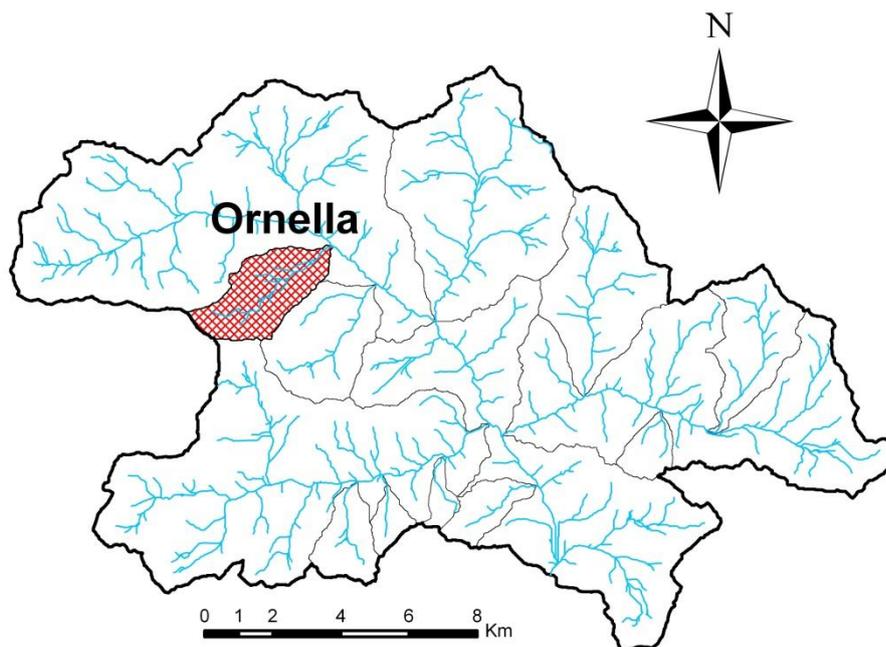


Figura 6.14 – Inquadramento geografico del bacino del torrente Ornella all'interno del macrobacino del torrente Cordevole con sezione di chiusura presso il lago di Alleghe.

Questo collettore (**Figura 6.15 e 6.16**) è un affluente di destra del torrente Cordevole ed è situato in località Pieve di Livinallongo, nel comune di Livinallongo del Col di Lana. Il corso d'acqua è di 2° ordine e deve il proprio nome al piccolo abitato di Ornella che si trova alla base della valle, dove il collettore confluisce nel Cordevole. Questo sottobacino si estende su un'area di 6,66 km<sup>2</sup> sviluppando un reticolo idrografico di 10,2 km. La quota media di 1961 m s.l.m. è tra le più elevate tra quelle presenti nel bacino del torrente Cordevole chiuso ad Alleghe, questo valore è dovuto alla presenza di numerose vette che superano i 2500 m tra cui il Monte Padon (2512 m s.l.m.), il Monte Mesola (2642 m s.l.m.) e il Sas di Mezdi (2711 m s.l.m.). La pendenza media dei versanti è del 54%: quelle maggiori si riscontrano nelle zone di testata, dove dominano le vette dolomitiche, e in alcune zone centrali (pareti rocciose). Scendendo verso valle le pendenze si addolciscono sempre più generando prima un lieve altipiano e poi una zona di deposito nella parte bassa del bacino. L'esposizione prevalente dei versanti è a Nord-Nord Est con pochissime zone disposte in direzione Sud. Questo causa il perdurare del manto nevoso al suolo, tanto da far considerare la valle dell'Ornella come una cosiddetta "valle fredda". Tale aspetto è dimostrato anche dalla quasi totale assenza di insediamenti antropici nella parte medio-alta del bacino; l'unico abitato di una certa rilevanza, quello di Ornella, si trova nella parte bassa della valle. Dal punto di vista geologico il bacino presenta diverse formazioni, la tipologia predominante è quella dei *detriti di falda* ma diffusa è anche la classe *arenarie e conglomerati vulcanici*, presente soprattutto nelle zone di testata e nelle pareti rocciose. Nella parte centrale della valle si erge una collinetta costituita da *Formazione di Werfen* che evidentemente ha resistito all'erosione (Comel, 2007), nella zona bassa invece è diffusa la *Formazione di Livinallongo*. Altre tipologie geologiche riscontrabili nel bacino dell'Ornella sono il *Calcere di Contrin*, il *Conglomerato di Richthofen* e la *Formazione di San Cassiano*. Per ciò che riguarda la copertura forestale il bacino dell'Ornella presenta un buon indice di boscosità totale, pari al 53%, presentando specie quali l'Abete Rosso, il Larice, il Pino Cembro ed il Pino Mugo.



**Figura 6.15 – Veduta dall’alto del bacino idrografico del torrente Ornella.**



**Figura 6.16 – Alcuni tratti del torrente Ornella.**

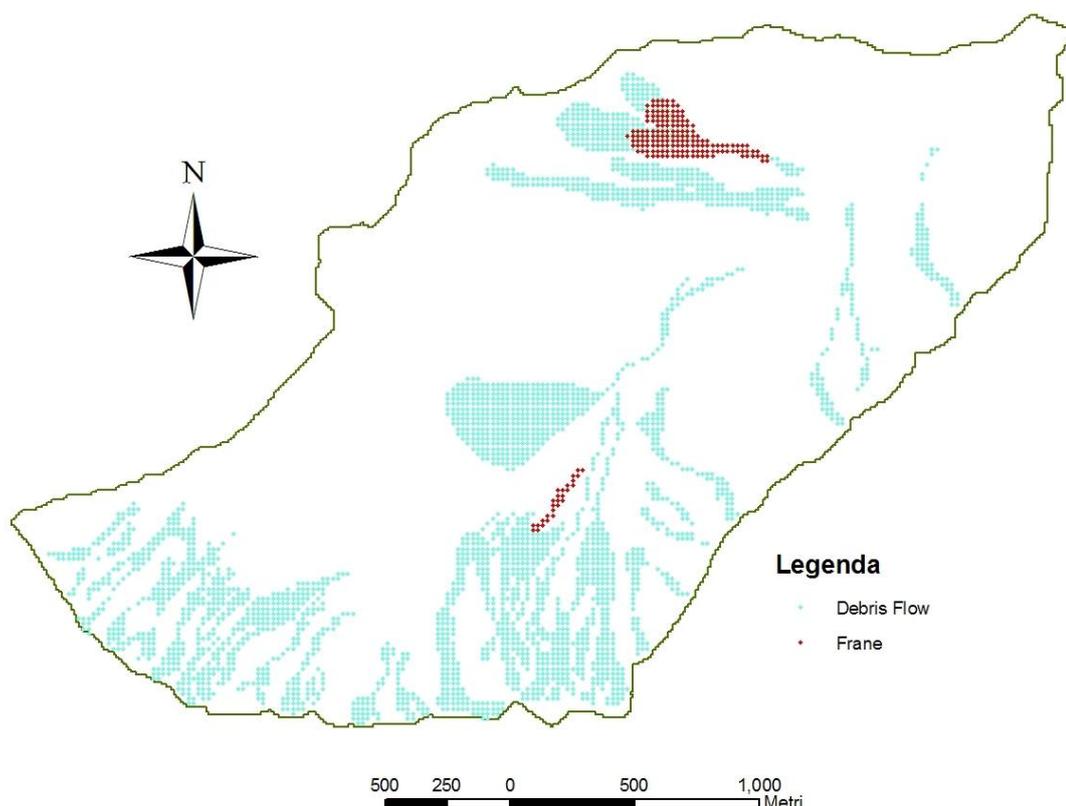
L'applicazione del modello previsionale sul bacino del torrente Ornella si basa sulla disponibilità di una *Carta della suscettibilità ai dissesti* da confrontare con la relativa *Carta dei particellari forestali*. Per quanto riguarda la *Carta della suscettibilità ai*

*dissesti* la fase preparatoria fino ad ora illustrata ha permesso di avere a disposizione le seguenti cartografie:

- ✓ *Carta delle pendenze;*
- ✓ *Carta geologica;*
- ✓ *Carta dell'uso del suolo;*
- ✓ *Carta delle esposizioni;*
- ✓ *Carta delle concavità;*
- ✓ *Carta delle quote.*

Tutti questi tematismi sono disponibili per l'intero bacino del torrente Cordevole inteso con sezione di chiusura posta presso il lago di Alleghe, in località Masarè. Grazie a ciò le cartografie relative al sottobacino del torrente Ornella sono facilmente ottenibili, in quanto l'area di influenza dell'Ornella risulta inscritta nel macrobacino del Cordevole (**Figura 6.14**). Una volta ridisegnate le carte tematiche in *ArcGis*<sup>®</sup> 9.1, è possibile procedere con l'applicazione del metodo *WofE* così da determinare il peso posseduto da ogni classe tematica (*fattori predisponenti*) ai fini della suscettibilità al dissesto. Il metodo *Weight of Evidence* determina il peso confrontando le cartografie disponibili con la carta inventario dei fenomeni franosi, quest'ultima nel presente studio è rappresentata dalla *Carta dei punti di controllo* creata con le procedure spiegate nel paragrafo 6.2.1 ed opportunamente calibrata per il bacino d'applicazione dell'Ornella (**Figura 6.17**).

### Ornella: punti controllo



**Figura 6.17 – Carta dei punti di controllo relativa al bacino del torrente Ornella.**

Come detto la *Carta della suscettibilità ai dissesti* si ottiene grazie al metodo *WofE* che determina per ogni classe, presente all'interno d'ogni tematismo, il peso ai fini della suscettibilità al dissesto. Avendo a disposizione le classi "pesate" sarà possibile creare una carta di sintesi che esprime il grado di suscettibilità al dissesto riguardante il bacino dell'Ornella. Dal punto di vista cartografico il modello denominato *Weight of Evidence* riproduce ogni tematismo (*fattore predisponente*) presubilmente relazionato ad eventi franosi, in un formato binario (0,1), dove 1 indica la presenza di frane correlate e 0 l'assenza. Questa operazione viene effettuata per ogni singola classe componente il tematismo considerato e per ogni pixel che la compone a livello digitale. Un'altra importante capacità del modello *WofE* è quella di riuscire a gestire sia dati quantitativi (quote, pendenze, ecc...) sia qualitativi (uso del suolo, geologia). La prima operazione effettuata dal modello sopracitato è quella di stabilire la *probabilità a priori (Ppriori)* di avere, in riferimento ad uno specifico *pixel*, un dissesto. Tale probabilità è ottenuta tramite il rapporto tra il numero di *pixel* in dissesto rilevati nell'area oggetto di studio e il numero totale di *pixel* presenti nell'area:

$$P_{priori} = \frac{N_{pix(frana)}}{N_{pix(totali)}}$$

Il funzionamento del metodo *WofE* si basa sul teorema di Bayes che dimostra come la frequenza di una variabile può essere utilizzata per stimarne la probabilità. Seguendo queste considerazioni il *Weight of Evidence* determina le probabilità che un *pixel* presenti fenomeni di dissesto data la presenza o meno di una determinata classe tematica (variabile). Inoltre utilizzando come basi le probabilità condizionali stabilite col metodo di Bayes, determina i pesi di ciascuna classe tematica tramite un valore ponderato positivo ( $W^+$ ) ed un valore ponderato negativo ( $W^-$ ). Questi due valori esprimono rispettivamente:

- ✓  $W^+$ : il rapporto tra la possibilità di trovare una classe tematica in area di frana e la probabilità di trovarla in un'area non in frana; tanto maggiore sarà il suo valore, tanto maggiore sarà il valore ponderato della classe nel prevedere il *pixel* in frana.
- ✓  $W^-$ : esprime il rapporto tra la probabilità di non trovare una classe tematica in area di frana e la probabilità di non trovarla in area non in frana; tanto maggiore è il suo valore tanto minore sarà il valore ponderato della classe nel prevedere il *pixel* in frana.

Nel presente studio per determinare la suscettibilità al dissesto è stato preso in considerazione il solo valore ponderato positivo  $W^+$ .

#### 6.4.1 Determinazione pesi

A questo punto avendo a disposizione tutti i dati di partenza è possibile applicare il metodo *WofE* al bacino del torrente Ornella. L'applicazione del metodo bivariato consiste innanzitutto nella valutazione, per ogni classe tematica (*fattore predisponente*), del relativo peso ai fini della suscettibilità al dissesto. Questa operazione verrà svolta per ognuno dei tematismi analizzati, tematismi che in questo studio sono rappresentati dalle seguenti cartografie: *Carta delle quote*, *Carta delle pendenze*, *Carta delle esposizioni*, *Carta delle concavità*, *Carta geologica* e *Carta dell'uso del suolo*.

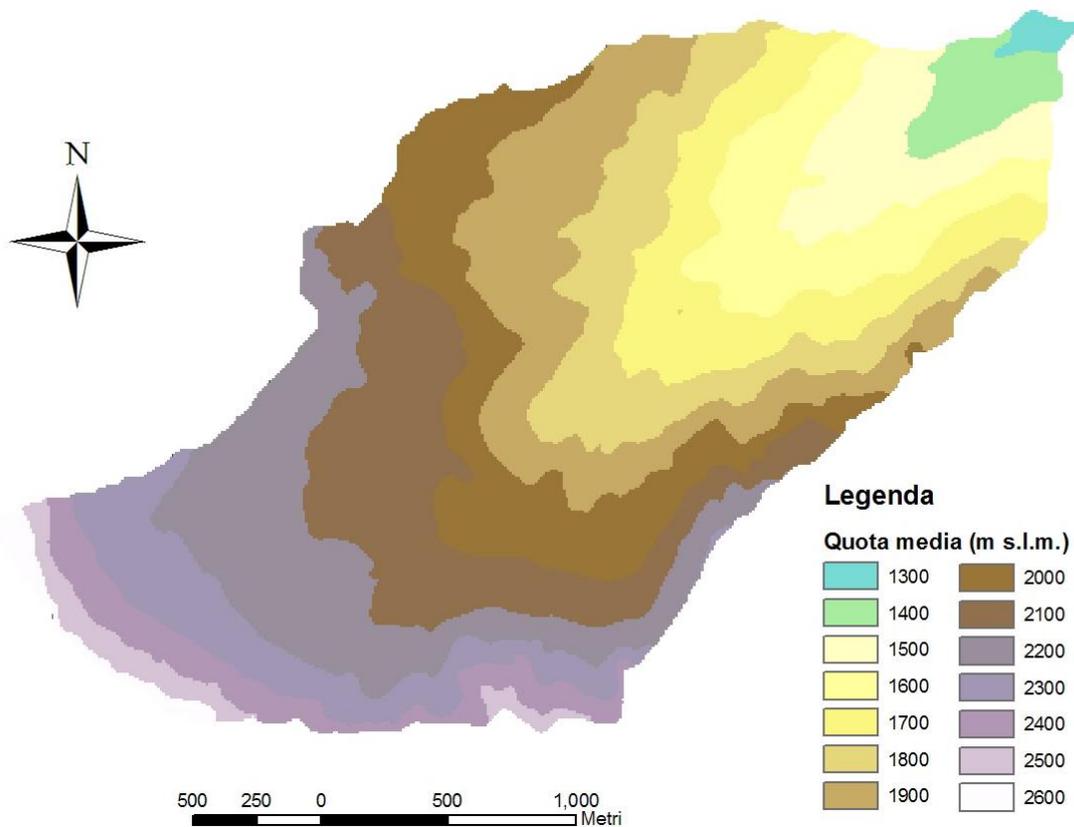
A loro volta all'interno di ogni tematismo verranno definiti i pesi riguardanti sia i fenomeni definiti *frane* sia per i fenomeni definiti *debris flow (colate detritiche)*, si avranno così dodici serie di pesi. Nella maggior parte dei casi si è resa necessaria

anche una riclassificazione delle carte tematiche che come detto sono state prodotte a scala di macrobacino. Proprio per tale motivo i tematismi necessitano di una ricalibrazione al fine di rappresentare al meglio le caratteristiche del bacino dell'Ornella o, come nel caso della *Carta geologica*, per evidenziare le caratteristiche strutturali e meccaniche piuttosto che quelle cronologiche o formazionali che non interessano direttamente la suscettibilità ai dissesti. Questa fase di riclassificazione verrà successivamente approfondita per ognuno dei tematismi analizzati. I pesi ottenuti dall'analisi bivariata assumeranno valori superiori o minori allo zero. Se il peso sarà positivo vorrà dire che la relativa classe tematica è da considerarsi predisponente al dissesto, al contrario i pesi negativi saranno riferiti a classi tematiche che favoriscono la stabilità.

- ***Carta delle quote***

La *Carta delle quote* relativa al bacino del torrente Ornella (**Figura 6.18**) deriva direttamente dal modello digitale del terreno (*DEM*). L'area di studio è caratterizzata da una quota massima posta a 2711 m s.l.m., mentre a 1264 m s.l.m. è localizzata la quota minima. Avendo questi dati si è deciso di riclassificare la carta tematica creando quattordici classi di 100 m ciascuna, in modo tale da rappresentare al meglio il dislivello totale. Tutte le classi sono identificate dalla loro quota media, per esempio la prima classe relativa al range di quote 1250 – 1350 è descritta dalla classe 1300.

### Ornella: fasce di quota



**Figura 6.18 – Carta delle quote riguardante il bacino del torrente Ornella**

Terminata la fase di riclassificazione è possibile procedere al calcolo dei pesi, quest'operazione sarà effettuata per ogni classe tematica e per entrambi i fenomeni analizzati. Si otterranno così dei pesi relativi al fenomeno *frane* e dei pesi riguardanti il fenomeno *debris flow*.

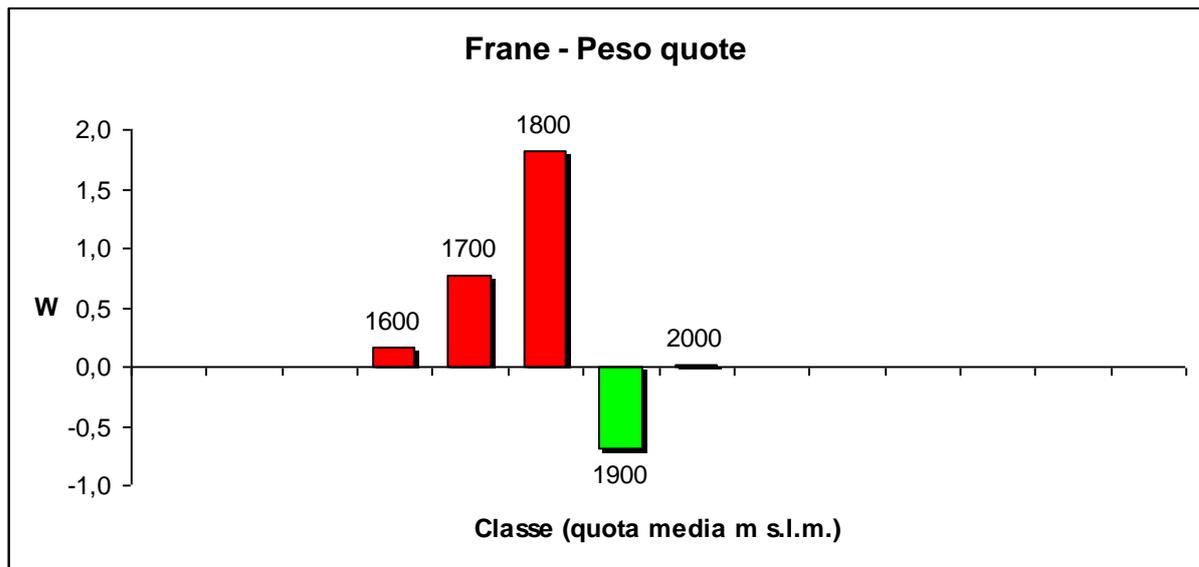


Figura 6.19 – Pesi attribuiti alle classi di quota riguardo al fenomeno frane.

I pesi ottenuti per i fenomeni denominati *frane* (Figura 6.19) risultano incompleti e con valori assegnati solo ad alcune classi, questo aspetto è dovuto al limitato numero di punti di controllo presenti nel bacino dell'Ornella relativamente a tale fenomeno (presenti solo due dissesti catalogati come *frane*). Il basso numero di punti di controllo influenza pesantemente la risposta prodotta dal metodo *WofE* e porta, per alcuni tematismi, ad ottenere dei risultati riguardanti il fenomeno *frane* che spesso non rispecchiano, o rispecchiano parzialmente, le reali caratteristiche del bacino di studio. Grazie alla risposta comunque ottenuta dal metodo bivariato si può notare come le classi di quota che più favoriscono la franosità nel bacino di studio siano quelle che vanno da 1600 a 1800 m s.l.m., con particolare rilevanza per quest'ultima.

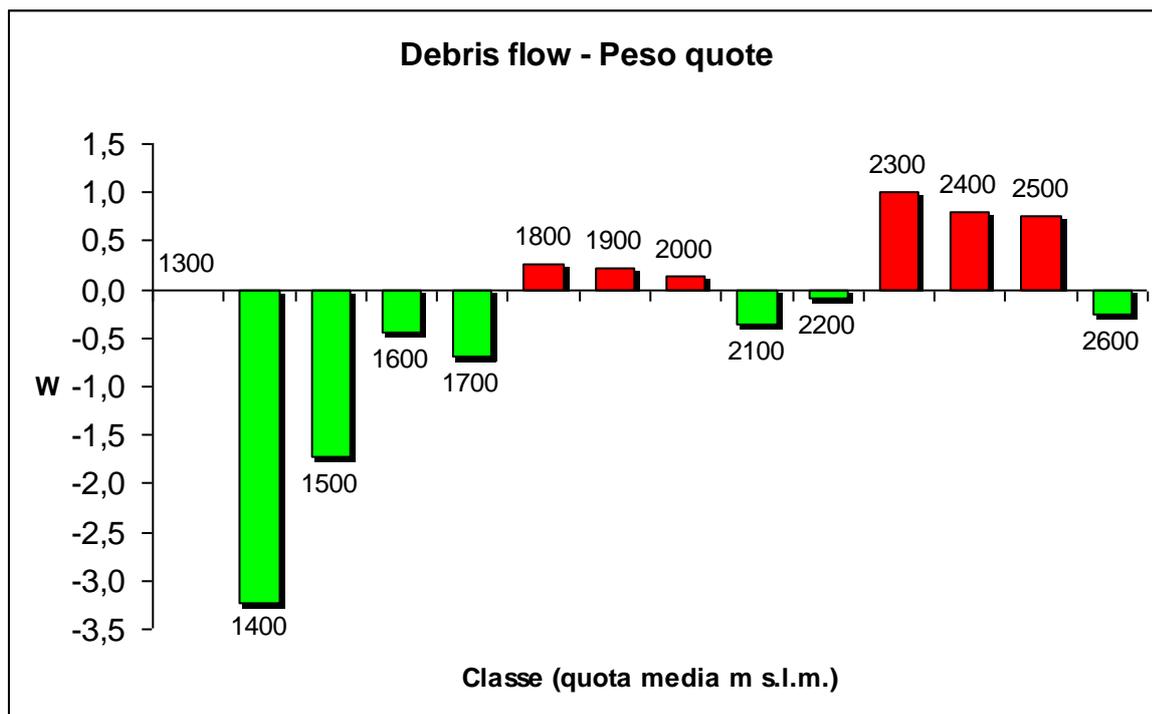


Figura 6.20 – Pesì attribuiti alle classi di quota riguardo al fenomeno debris flow

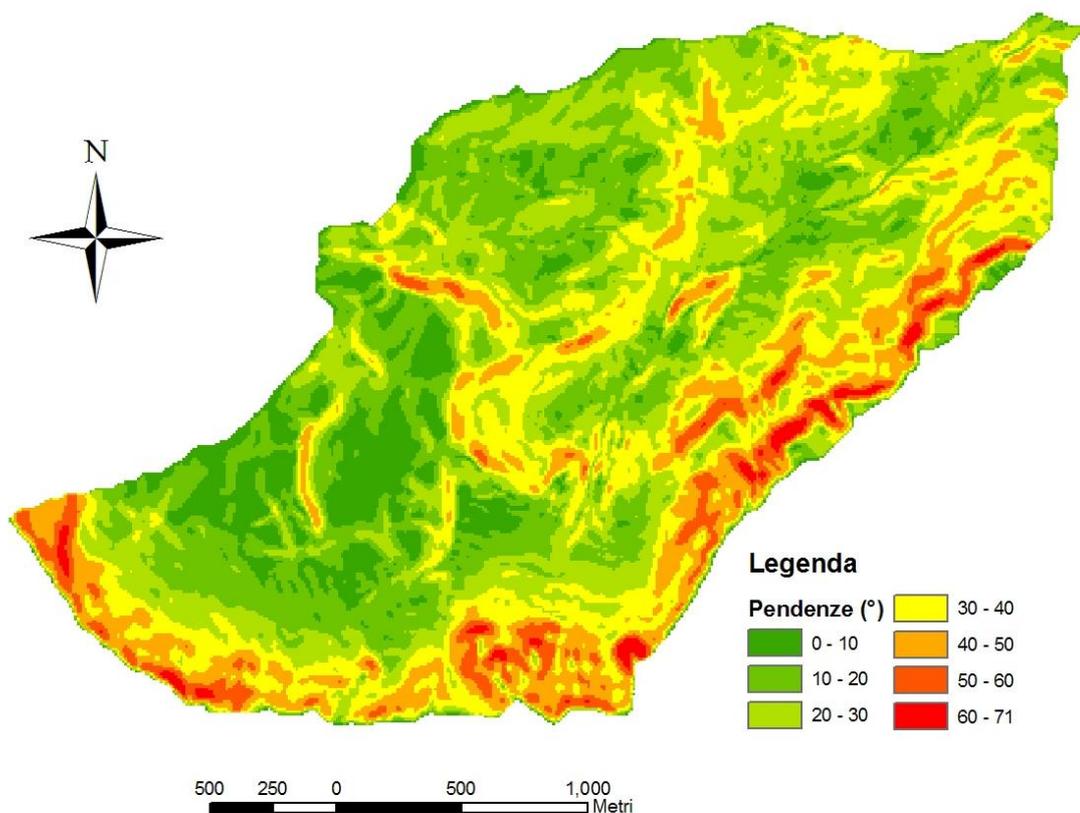
Analizzando i pesi relativi ai *debris flow* (Figura 6.20) si possono trarre alcune considerazioni. Innanzitutto questa tipologia di dissesto permette, nel bacino dell'Ornella, di ottenere risposte sicuramente migliori rispetto ai fenomeni definiti *frane*; ciò è dovuto ovviamente alla maggior disponibilità di punti di controllo. Esaminando poi il diagramma dei pesi si può notare come le fasce di quota che più favoriscono il dissesto siano quelle che vanno da 1800 a 2500 m s.l.m., con eccezione fatta per le fasce a 2100 e 2200 m s.l.m.. Questo andamento rispecchia il comportamento dei *debris flow* che si generano nella parte alta dei bacini per poi scendere verso valle finché non si depositano. I pesi negativi, favorevoli alla stabilità, sono concentrati, in parte, nella zona più alta del bacino, dove le colate non possono innescarsi in quanto presente sola roccia nuda (vette rocciose), e nella parte inferiore della valle dove le pendenze diminuiscono notevolmente ed aumenta il grado d'antropizzazione.

- **Carta delle pendenze**

La *Carta delle pendenze* riguardante il bacino del torrente Ornella è riportata in **Figura 6.21** ed è ottenuta tramite elaborazioni del modello digitale del terreno (*DEM*). Il tematismo pendenza assume un notevole valore ai fini della suscettibilità al

dissesto in quanto è un parametro morfometrico che influisce sia sull'aspetto idrologico (erosione, trasporto e sedimentazione) sia su quello idrogeologico (movimenti di versante) di un dato territorio. Avendo nel bacino dell'Ornella una pendenza massima di 71°, si è scelto di operare una fase di riclassificazione su questo tematismo che ha portato a definire sette classi di 10° ciascuna (solo l'ultima ne contiene 11°). La prima classe contiene le pendenze da 0° a 10°, e si procede con tale scala fino all'ultima classe che rappresenta le inclinazioni da 60° a 71°.

#### Ornella: pendenze



**Figura 6.21 – Carta delle pendenze riguardante il bacino del torrente Ornella**

Una volta ridefinite le classi tematiche riguardanti la pendenza si può procedere, per ognuna di esse, al calcolo dei pesi.

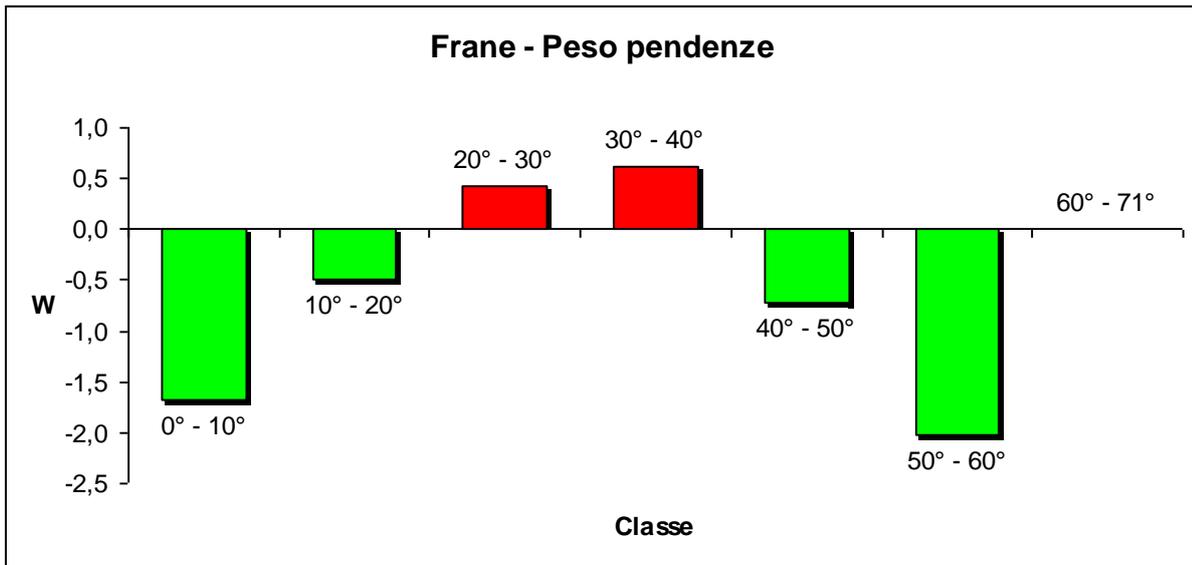
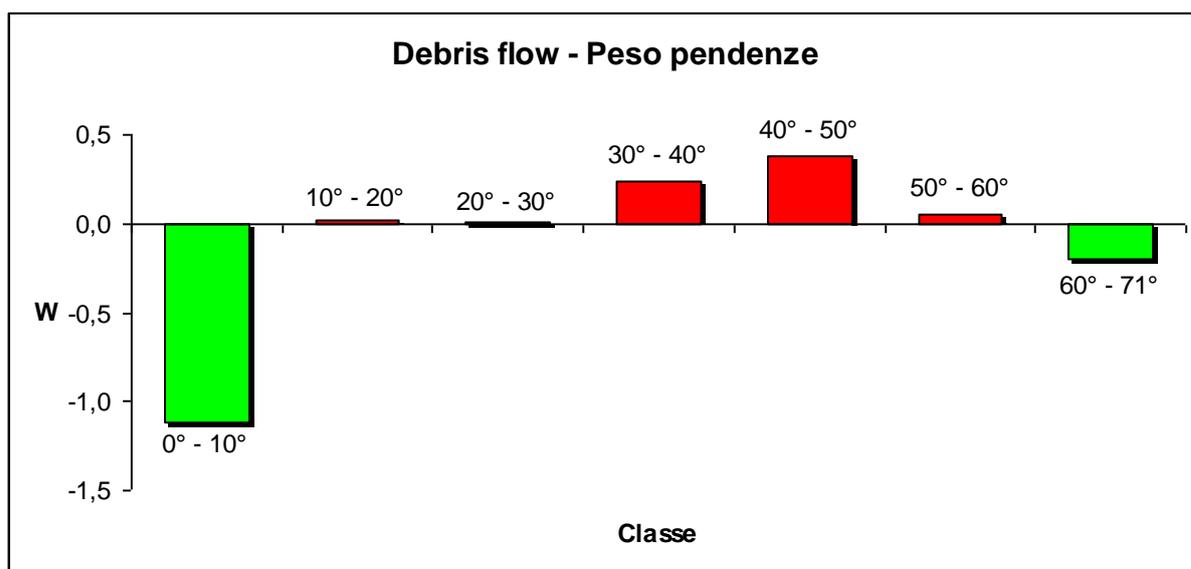


Figura 6.22 – Pesi attribuiti alle classi di pendenza riguardo al fenomeno frane

Analizzando i pesi relativi al fenomeno *frane* (Figura 6.22) si può notare come siano le pendenze intermedie, comprese tra i 20° e i 40°, a favorire l'innescio di fenomeni gravitazionali. Da notare poi come più aumenta l'inclinazione dei versanti meno peso viene attribuito alle relative classi, lo stesso andamento lo si può notare anche al diminuire delle inclinazioni. Questo comportamento può essere spiegato dal fatto che nel bacino dell'Ornella le maggiori pendenze sono localizzate nelle zone di testata, dove sono diffuse le vette rocciose che, data la loro conformazione, non vengono quasi mai coinvolte da fenomeni franosi. Come detto anche le classi di pendenza inferiori presentano pesi negativi, questo accade in quanto tali classi rappresentano zone con inclinazioni che vanno da 0° fino a 20°, perciò aree semipianeggianti, dove i fenomeni franosi raramente si generano.



**Figura 6.23 – Pesì attribuiti alle classi di pendenza riguardo al fenomeno debris flow**

I pesi riguardanti il fenomeno *debris flow* (**Figura 6.23**) assumono un andamento simile a quelli ottenuti per il fenomeno *frane*. Anche in questo caso le due classi “estreme”, cioè 0° - 10° e 60° - 71°, sono caratterizzate da pesi negativi. Nel bacino dell’Ornella questo comportamento si spiega col fatto che le colate detritiche non interessano né le vette rocciose, dove sono presenti le maggiori inclinazioni, né coinvolgono la parte bassa della valle. Le classi che favoriscono il formarsi di *debris flow* sono le classi di pendenza intermedie, con particolare rilevanza per le classi tra i 30° e i 50°, dove le colate detritiche possono facilmente innescarsi per poi scendere verso valle.

- **Carta delle esposizioni**

La *Carta delle esposizioni* (**Figura 6.24**) riguardante il bacino di studio è il risultato, come anche la *Carta delle pendenze*, di un’elaborazione del modello digitale del terreno (*DEM*). Questo tematismo influenza l’aspetto idrogeologico di un territorio determinando dei microclimi e nello specifico condizionando fattori quali l’evapotraspirazione e il perdurare delle precipitazioni nevose al suolo. La riclassificazione in quest’ambito ha portato a definire otto classi tematiche, quali: *Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ovest, Ovest, Nord-Ovest*.

Ornella: esposizioni

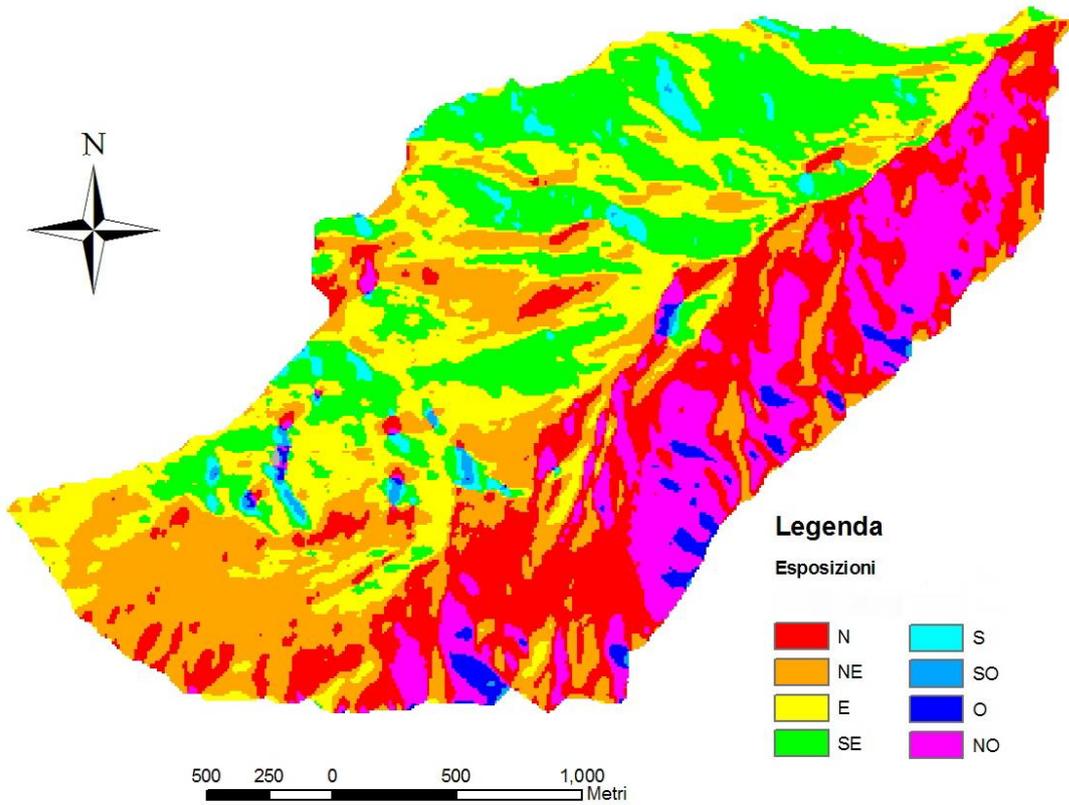


Figura 6.24 – Carta delle esposizioni riguardante il bacino del torrente Ornella.

Ottenuta la relativa carta tematica è stato possibile determinare i corrispondenti pesi.

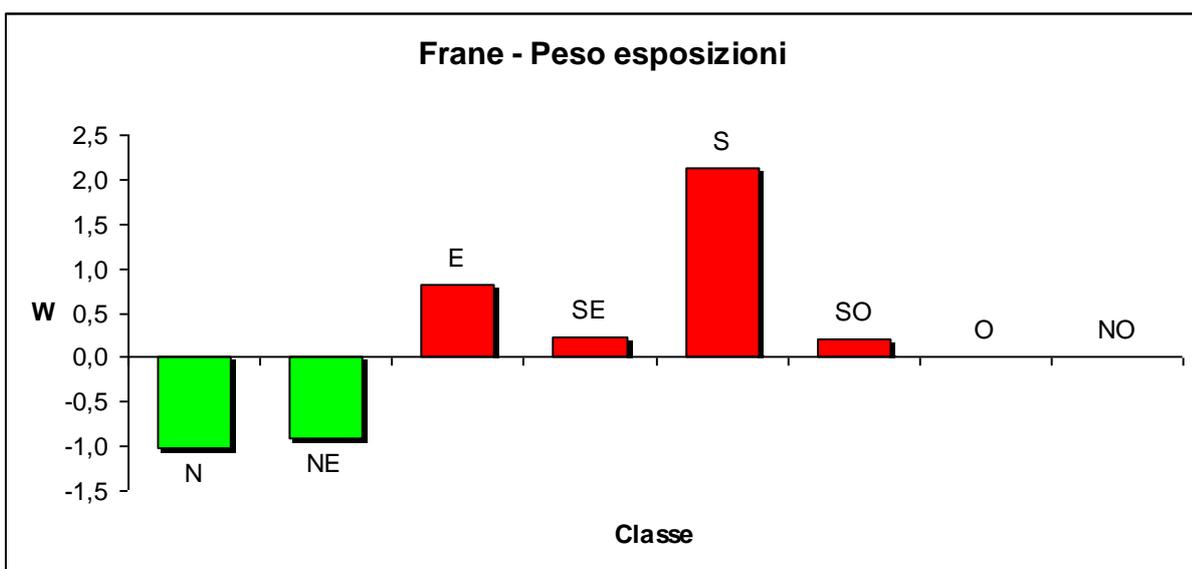
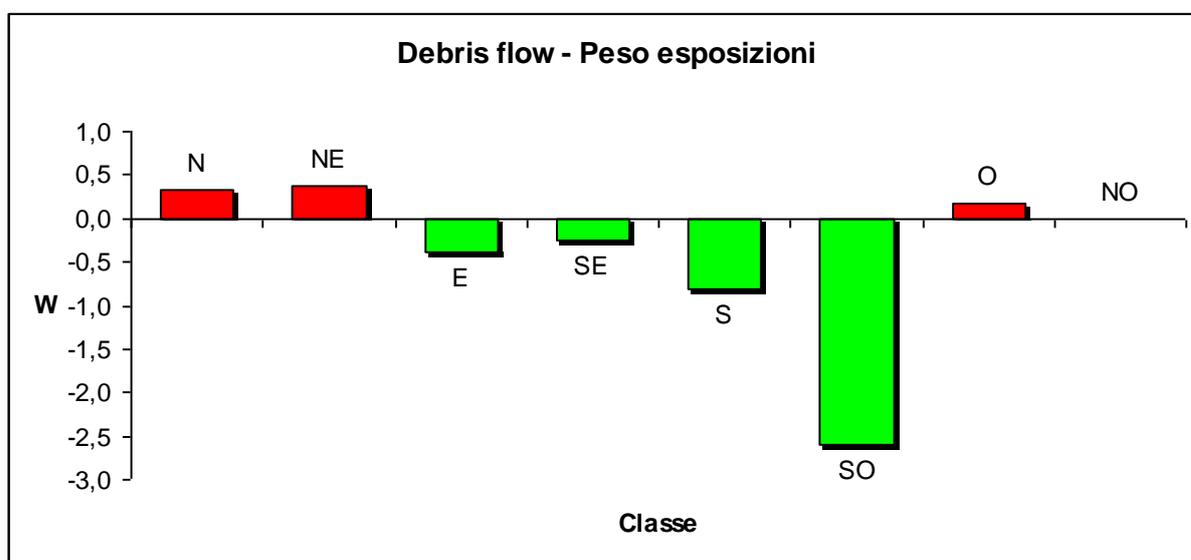


Figura 6.25 – Pesi attribuiti alle classi d’esposizione riguardo al fenomeno frane.

Dal diagramma riportato in **Figura 6.25** si può notare come i pesi positivi al dissesto siano relativi ai versanti disposti a *Est*, *Sud-Est*, *Sud* e *Sud-Ovest*. Il peso maggiore riguarda l'esposizione *Sud* che come si può osservare dalla **Figura 6.24** è una delle classi meno presenti nel bacino dell'Ornella, questo sommato a diversi punti di controllo ad essa correlati fa sì che statisticamente questa esposizione abbia un peso notevole. Da notare inoltre come non siano presenti i valori riferiti alle classi *Ovest* e *Nord-Ovest*, aspetto causato, come detto in precedenza, dalla scarsa presenza di punti di controllo relativi al fenomeno *frane*.



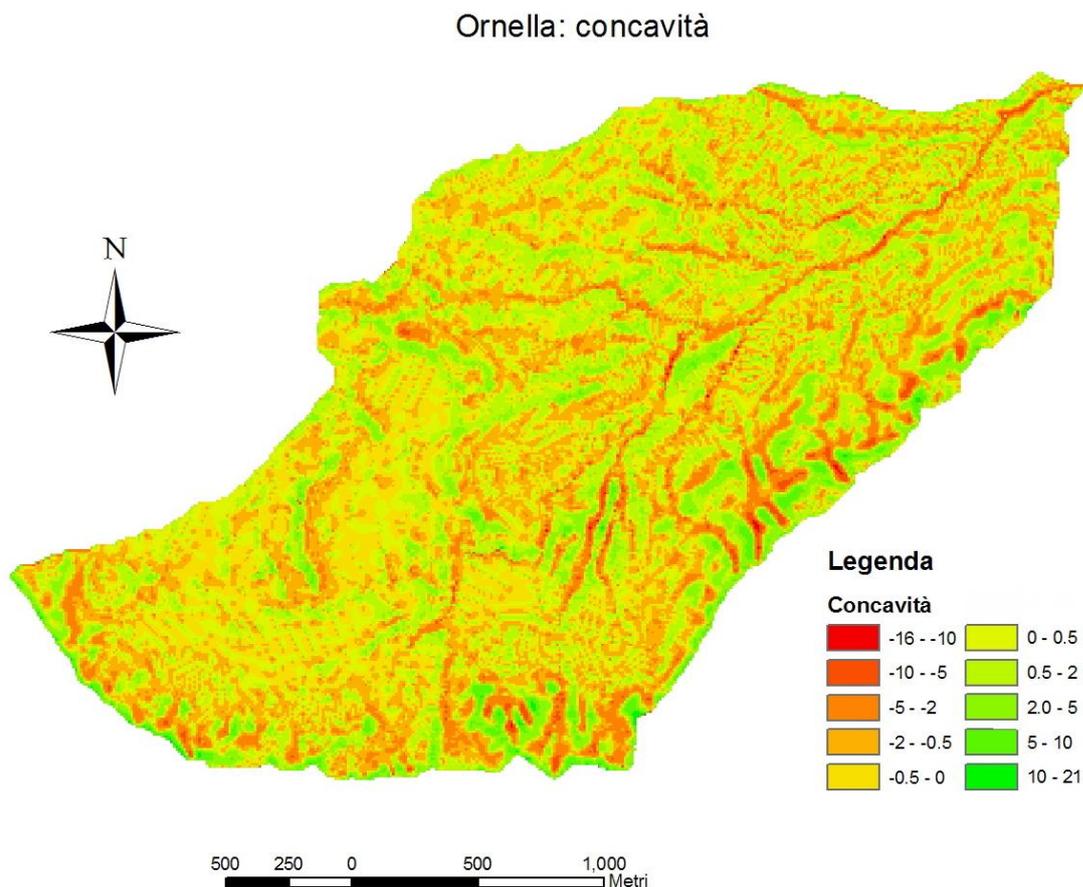
**Figura 6.26** – Pesetti attribuiti alle classi di esposizione riguardo al fenomeno debris flow.

Il diagramma dei pesetti riguardante il fenomeno *debris flow* evidenzia come, nel bacino del torrente Ornella, siano i versanti disposti a *Nord*, *Nord-Est* e *Ovest* a favorire il generarsi di colate detritiche. Anche in questo caso la classe *Nord-Ovest* appare graficamente nulla, questo è dovuto al peso assegnato dal metodo *WofE* che risulta prossimo allo zero (-0,0026) e non, come nel caso del fenomeno *frane*, ad una parziale risposta del metodo bivariato.

- **Carta delle concavità**

La *Carta delle concavità* (**Figura 6.27**); come le precedenti *Carta delle quote*, *Carta delle pendenze* e *Carta delle esposizioni*; è stata ottenuta tramite un processo di elaborazione del *DEM* (*Digital Elevation Model*) riguardante il bacino del torrente Ornella. Da un punto di vista matematico la concavità esprime la derivata seconda del tematismo quota, di conseguenza quando la derivata assume valori positivi

siamo in presenza di una superficie convessa, mentre i valori negativi indicano una superficie concava. Avendo nel bacino di studio massimi e minimi di concavità pari a +21 e -16, si è deciso di effettuare una riclassificazione tale da ottenere dieci classi. Grazie all'individuazione di tali categorie si è ottenuta la *Carta delle concavità* di seguito riportata.



**Figura 6.27 – Carta delle concavità riguardante il bacino del torrente Ornella.**

Dalla *Carta delle concavità* si può notare come i valori negativi (superfici concave) individuino chiaramente il reticolo idrografico. Ottenuta la carta tematica si passa alla determinazione dei pesi.

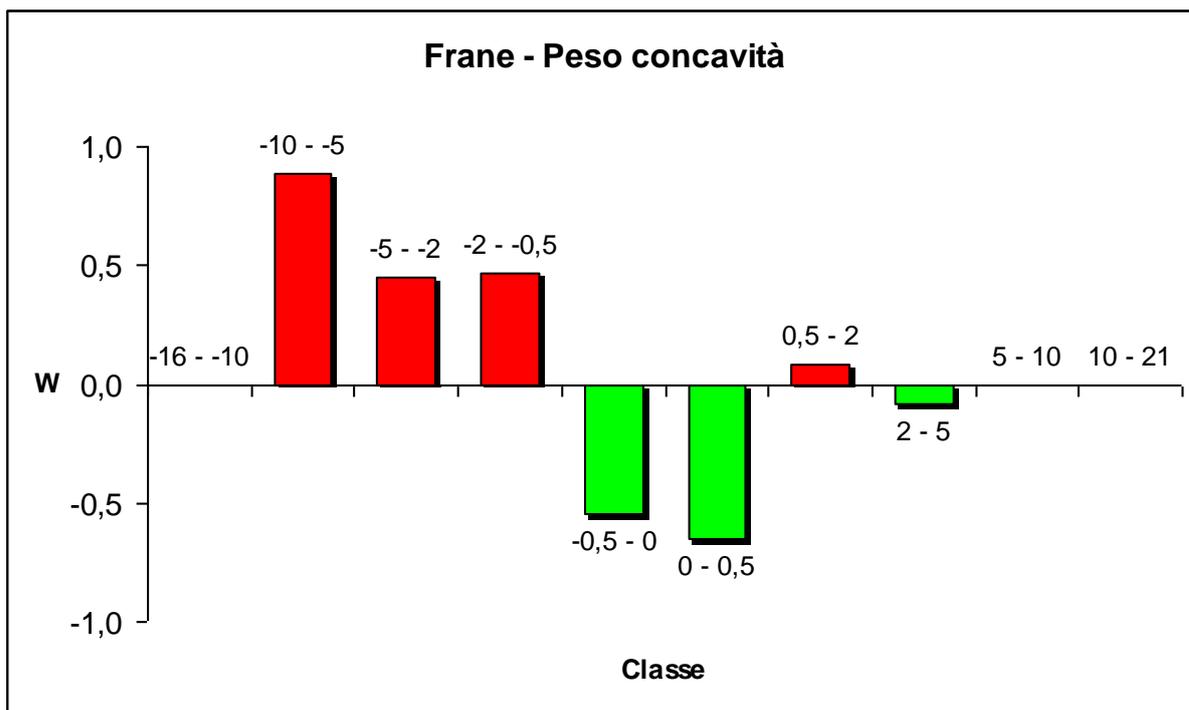


Figura 6.28 – Pesi attribuiti alle classi di concavità riguardo al fenomeno frane.

Il diagramma dei pesi relativi al fenomeno *frane* (**Figura 6.28**) risulta incompleto ed inoltre non rispecchia la realtà del territorio analizzato. La causa è dovuta sempre al basso numero di punti di controllo riguardanti tale fenomeno. Dai risultati comunque ottenuti le superfici che più favoriscono il generarsi di fenomeni franosi sono quelle aventi un andamento concavo. Allo stesso tempo i pesi negativi e perciò favorevoli alla stabilità sono presenti nei versanti con grado di concavità prossimo allo zero, cioè in quei versanti né concavi né convessi ma caratterizzati da inclinazione rettilinea. Nella realtà accade proprio il contrario, infatti, le frane si generano su pareti con inclinazione costante dove si creano piani di scorrimento e di scivolamento.

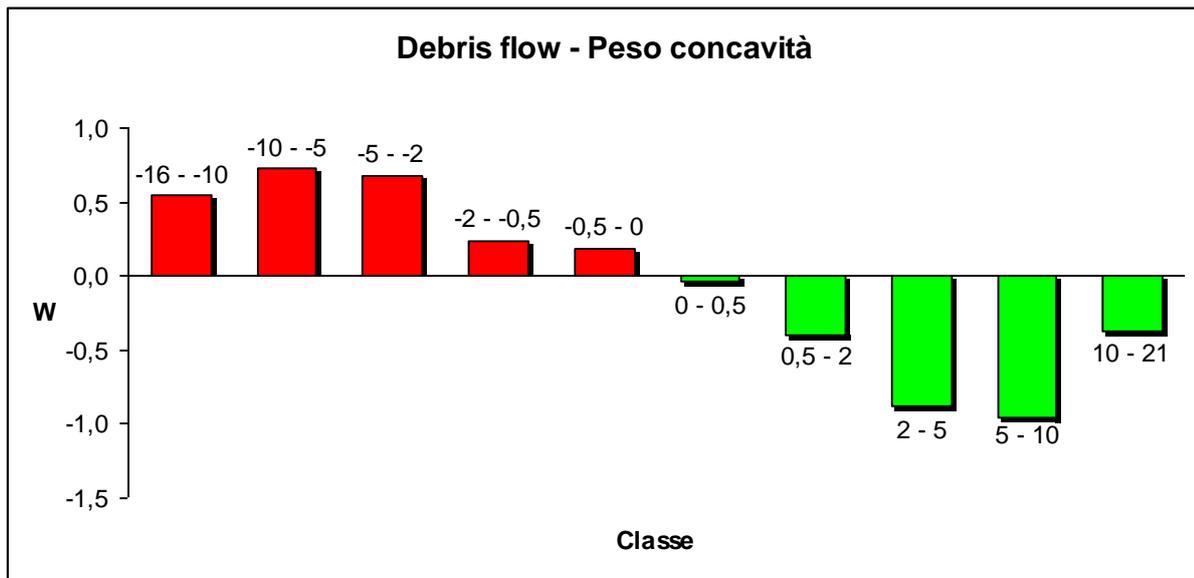


Figura 6.29 – Pesi attribuiti alle classi di concavità riguardo al fenomeno debris flow.

Contrariamente a quanto accaduto per il fenomeno *frane*, il diagramma dei pesi riguardante il fenomeno *debris flow* (Figura 6.29) rispecchia al meglio la realtà fisica del bacino studiato. Come si può notare il diagramma assume un andamento a S posizionando i pesi positivi in corrispondenza delle superfici concave e quelli negativi nelle superfici convesse. In effetti, le colate detritiche si manifestano principalmente lungo canali di varia natura o terreni concavi in genere. Al contrario i terreni caratterizzati da un andamento convesso non sono influenzati, in genere, da fenomeni di colata detritica.

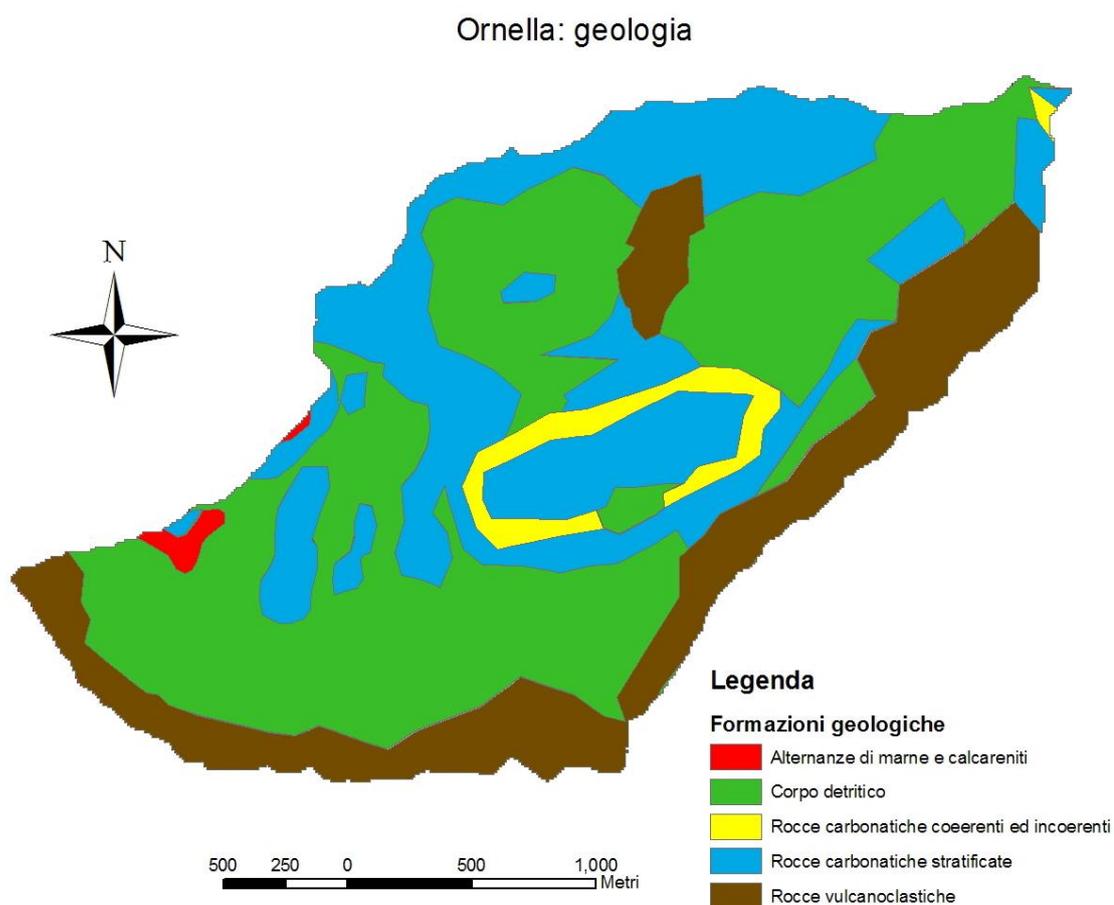
- **Carta geologica**

La carta riguardante la geologia del bacino di studio è stata prodotta, come spiegato nel paragrafo 6.2.2, grazie ad una digitalizzazione delle Carta Geologica d'Italia. La carta tematica creata riguarda l'intero bacino del torrente Cordevole, con sezione di chiusura posta presso il lago di Alleghe; avendo a disposizione tale elaborato è possibile in tempi rapidi ricavare la *Carta geologica* del torrente Ornella (Figura 6.30). Nella creazione di tale cartografia si è deciso anche di operare una riclassificazione delle formazioni geologiche presenti. Nell'iniziale carta tematica, infatti, sono presenti ben nove tipologie litologiche che nell'applicazione del modello bivariato sono state ridotte a cinque classi. Questa operazione si è resa necessaria in quanto ai fini della suscettibilità ai dissesti risulta più utile conoscere gli aspetti strutturali e geomeccanici delle litologie, piuttosto che quelli formazionali o

cronologici. Per chiarire, in quest'ambito non è indispensabile riuscire a distinguere le differenze cronologiche tra la *Formazione di Livinallongo* e la *Formazione di San Cassiano*, quanto invece risulta importante definirne le diverse caratteristiche geomeccaniche e soprattutto le differenti risposte al dissesto. Seguendo questo principio, come detto, si è applicata una riclassificazione del tematismo che ha portato ad ottenere le seguenti classi:

<b>Classe</b>	<b>Formazione geologica</b>
Corpo detritico	Detriti di falda
Alternanza di marne	Formazione di San Cassiano, Formazione di La Valle
Rocce carbonatiche coerenti ed incoerenti	Conglomerato di Richthofen
Rocce carbonatiche stratificate	Formazione di Werfen, Calcare di Contrin, Formazione di Livinallongo, Dolomia Principale
Rocce vulcanoclastiche	Conglomerato della Marmolada

**Tabella 6.2 – Classificazione del tematismo geologia utilizzata nella carta tematica**



**Figura 6.30 – Carta geologica riguardante il bacino del torrente Ornella**

Avendo a disposizione la *Carta geologica* opportunamente “calibrata” si può applicare il metodo *WofE* per la determinazione dei relativi pesi.

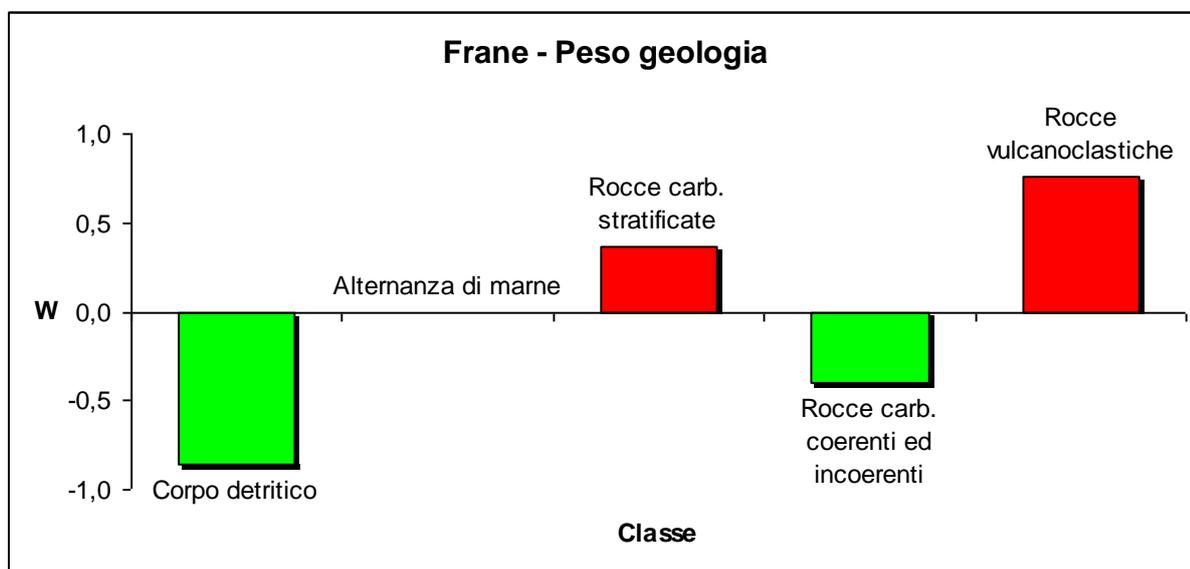


Figura 6.31 – Pesi attribuiti alle classi geologiche riguardo al fenomeno frane.

Il diagramma riguardante il fenomeno *frane* risulta in parte incompleto a causa della mancata determinazione del peso relativo alla classe *Alternanza di marne*. Questo aspetto è dovuto alla limitata presenza di punti di controllo relativi al fenomeno *frane* che può, come visto anche in precedenza, causare pesi nulli di alcune classi tematiche. Nonostante ciò si possono comunque trarre alcune considerazioni. Innanzitutto da notare come la classe *Rocce vulcanoclastiche* assuma il maggior peso ai fini della suscettibilità al dissesto, questo si spiega in quanto tale classe tematica è localizzata nelle zone di testata del bacino, dove sono concentrate le maggiori pendenze. Inoltre questa classe tematica include al suo interno rocce solitamente massicce ma caratterizzate da un fitto reticolo di fratturazione, per questo sono spesso coinvolte in frane di crollo che possono movimentare volumi anche cospicui. Da rilevare poi come anche la classe *Rocce carbonatiche stratificate* sia caratterizzata, seppur in maniera inferiore, da un valore positivo al dissesto. Ciò è dovuto al fatto che tale classe rappresenta litologie, come per esempio la *Formazione di Livinallogno*, altamente alterabili e degradabili che presentano perciò qualità meccaniche e strutturali scadenti con un elevato grado di fratturazione. Il minor peso delle *Rocce carbonatiche stratificate* rispetto le *Rocce vulcanoclastiche* si

spiega inoltre col fatto che le prime sono posizionate nella parte inferiore del bacino dove diminuiscono le pendenze ed aumenta la superficie boscata.

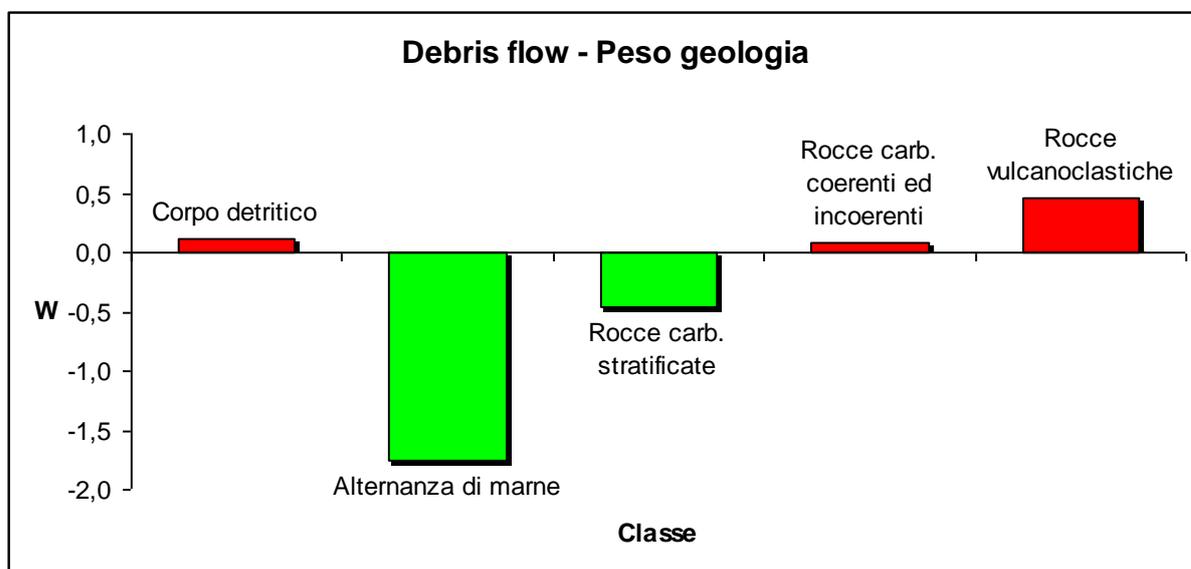


Figura 6.32 – Pesi attribuiti alle classi geologiche riguardo al fenomeno debris flow.

Dall'analisi del diagramma riguardante il fenomeno *debris flow* si può notare prima di tutto come sia fortemente favorevole alla stabilità la classe *Alternanza di marne*. La sopracitata classe rappresenta litologie come la *Formazione di San Cassiano* che nella valle del Cordevole assume una struttura flyshoide, causando valori di pendenza non uniformi nei versanti. Grazie a questa struttura a “gradini” viene bloccato l’innescio di fenomeni di colata, causando di conseguenza un relativo peso negativo per la classe *Alternanza di marne*. Altra classe caratterizzata da un peso negativo (favorevole alla stabilità), riguardo al fenomeno *debris flow*, è la categoria denominata *Rocce carbonatiche stratificate*. Questa, infatti, racchiude al suo interno litologie quali per esempio la *Dolomia principale* ed il *Calcare di Contrin*, che essendo costituite da dolomie e calcari massici, sono maggiormente suscettibili a fenomeni quali frane e crolli piuttosto che a fenomeni come le colate detritiche. I pesi favorevoli alla formazione di colate detritiche si trovano in corrispondenza delle classi *Rocce vulcanoclastiche*, *Rocce carbonatiche coerenti ed incoerenti* e *Corpo detritico*. La prima categoria assume valore positivo in quanto è localizzata principalmente nelle zone di testata del bacino dove sono presenti le maggiori pendenze, oltre che notevoli falde detritiche che possono alimentare direttamente fenomeni di *debris flow*. La classe *Rocce carbonatiche coerenti ed incoerenti* contiene al suo interno la

tipologia litologica denominata *Conglomerato di Richthofen* che in tutte le Dolomiti è associata a fenomeni di colata detritica. Nel caso in cui su di essa si generino fenomeni di *debris flow*, questi possono movimentare notevoli volumi di materiale coinvolgendo oltre che il substrato anche la copertura detritica.

- **Carta dell'uso del suolo**

La *Carta dell'uso del suolo* relativa al bacino del torrente Ornella (**Figura 6.33**) è stata ricavata dalla carta riguardante lo stesso tematismo relativa però al macrobacino del torrente Cordevole. Quest'ultima cartografia è stata prodotta grazie ad una fase di *editing* delle ortofoto, come spiegato nel paragrafo 6.2.2. Anche in questo caso è stata svolta una riclassificazione delle categorie di uso del suolo presenti al fine di rappresentare al meglio le caratteristiche del bacino di studio. Le classi individuate sono:

<b>Classe</b>	<b>Tipologia di uso del suolo</b>
Arbusteti, rupi boscate e zone in ricolonizzazione	Arbusteti (mughete e alnete); Radure o pascoli in ricolonizzazione; Alneta
Boschi e vegetazione ripariale	Pecceta, Lariceti con picea e faggio; Larici cembreti; Bosco
Centri urbani, giardini, strade, aree industriali	Centri urbani, giardini, strade, aree industriali
Prati e pascoli	Prati, pascoli e radure; Praterie miste a rocce con arbusteti; Praterie miste a rocce; Praterie alpine e pascoli con rododendri e arbusti; Prati di fondovalle e vicino ai centri urbani
Rocce nude	Rocce compatte di alta quota

**Tabella 6.3 – Classificazione del tematismo uso del suolo utilizzata nella carta tematica.**

Ornella: uso del suolo

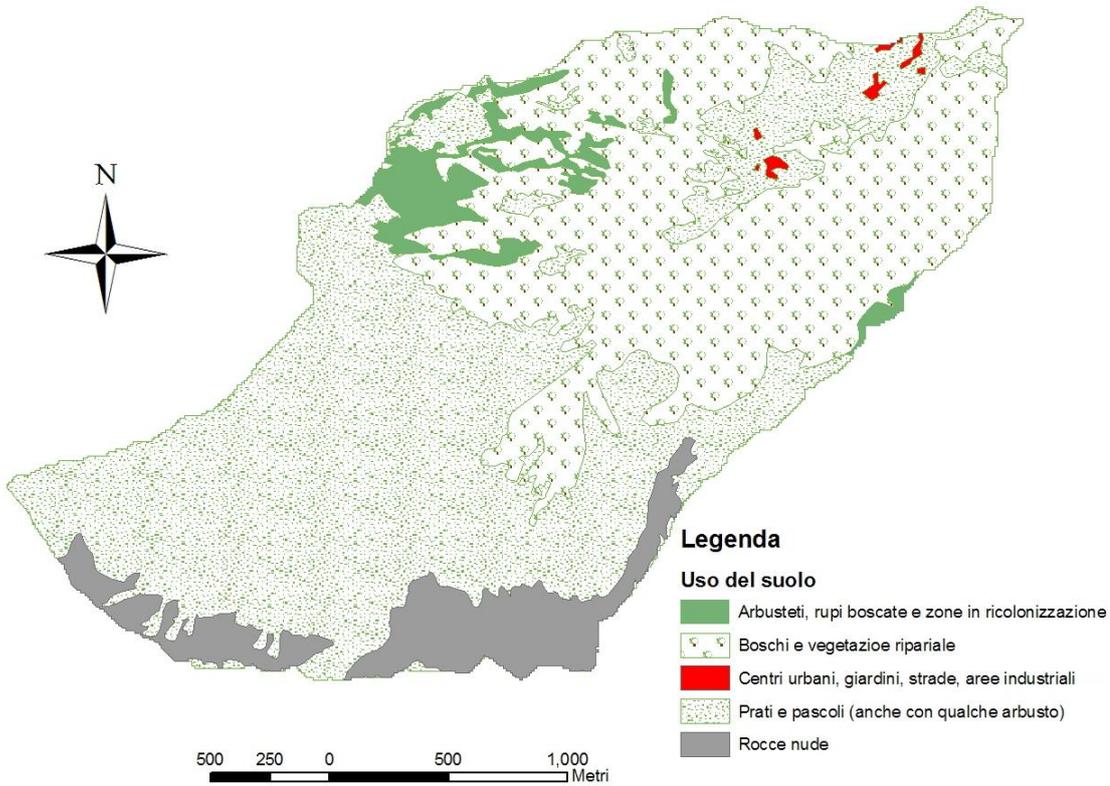


Figura 6.33 – Carta dell’uso del suolo riguardante il bacino del torrente Ornella

Una volta eseguita la riclassificazione del tematismo si è proceduto con la determinazione dei relativi pesi ai fini della suscettibilità al dissesto.

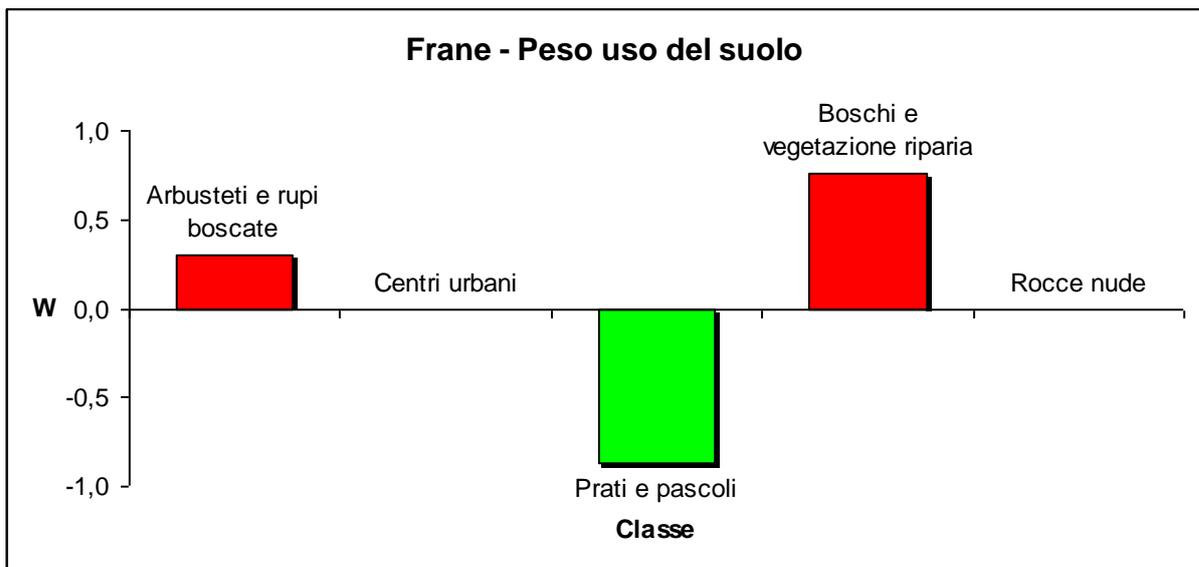


Figura 6.34 – Pesi attribuiti alle classi di uso del suolo riguardo al fenomeno frane.

Il diagramma relativo al dissesto *frane* risente pesantemente del basso numero di punti di controllo presenti nel bacino dell'Ornella. Proprio a tale motivo è da ricondurre l'andamento dei pesi, nulli per le classi *Centri urbani* e *Rocce nude* e non rispecchianti la realtà negli altri casi. In questa analisi, infatti, risultano avere pesi positivi al dissesto le due classi denominate *Arbusteti e rupi boscate* e *Boschi e vegetazione riparia* che in teoria dovrebbero favorire la stabilità dei versanti in quanto rappresentanti di superfici coperte da vegetazione localizzate nella parte bassa della valle. Al contrario la classe *Prati e pascoli* che si trova nella zona media-alta del bacino e perciò più soggetta a fenomeni franosi, assume un peso negativo.

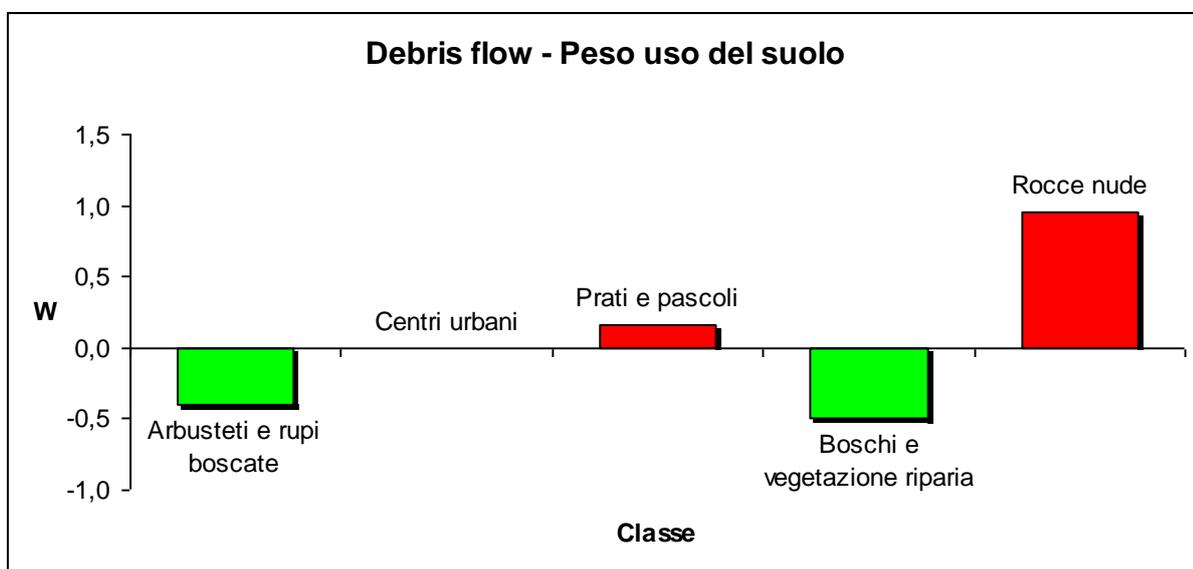


Figura 6.35 – Pesi attribuiti alle classi di uso del suolo riguardo al fenomeno debris flow.

I pesi ottenuti per il fenomeno *debris flow* sono riportati in **Figura 6.35**. In questa tipologia di dissesto i valori ottenuti rispecchiano maggiormente la realtà rispetto quelli ottenuti per il fenomeno *frane*. Innanzitutto è da evidenziare come le classi *Rocce nude* e *Prati e pascoli* siano le più predisponenti al dissesto, questo comportamento è spiegabile col fatto che la prima categoria è presente nelle zone di testata del bacino dove sono diffusi i depositi detritici oltre che le maggiori pendenze. La classe *Prati e pascoli* invece trovandosi nella zona immediatamente a valle risente in maniera indiretta dei fenomeni generati nelle zone di testata del bacino, assumendo perciò un peso leggermente positivo (0,16). Corretti appaiono anche i pesi assegnati alle classi *Arbusteti e rupi boscate* e *Boschi e vegetazione riparia* in quanto superfici coperte da vegetazione fitta e localizzate nella parte media-bassa

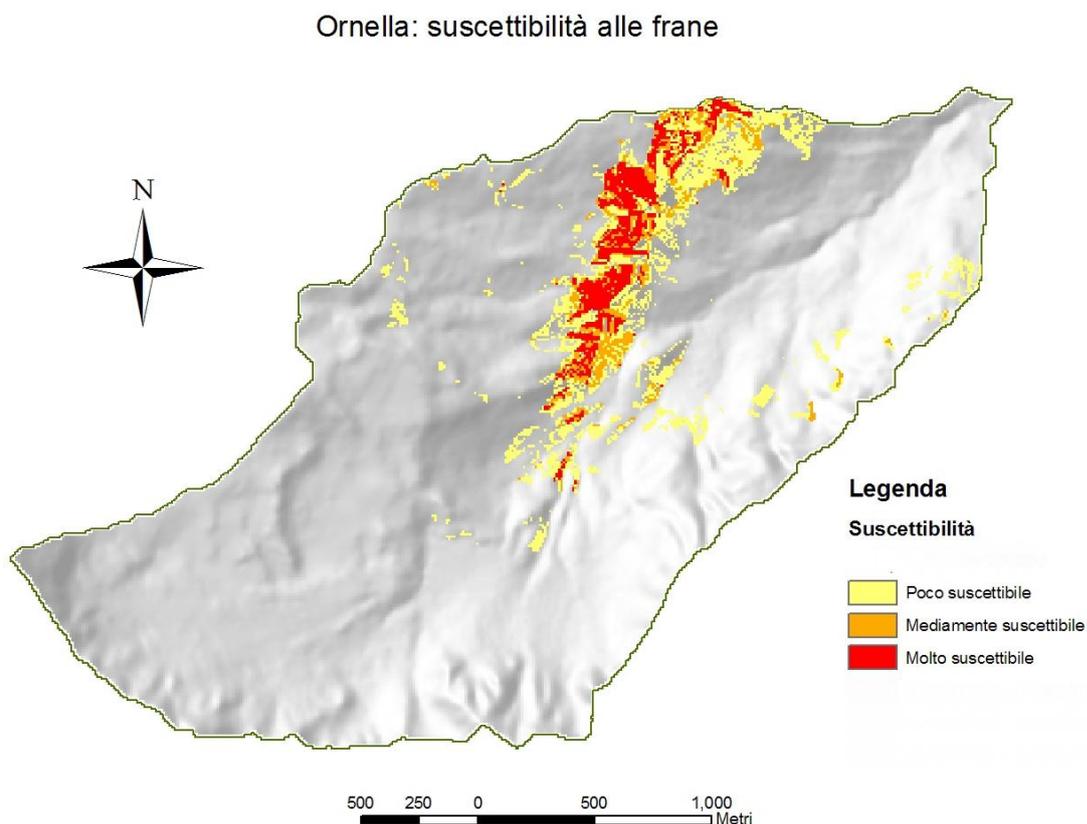
della valle dove le pendenze diminuiscono sensibilmente. Da evidenziare infine la classe *Centri urbani* che estendendosi su di una superficie limitata del bacino, e non presentando fenomeni di dissesto al suo interno, assume valore nullo.

#### 6.4.2 Carta suscettibilità ai dissesti

Grazie all'applicazione del metodo *WofE* sono stati ottenuti i pesi relativi a tutte le classi tematiche analizzate. Ora, avendo a disposizione tali dati, è possibile redigere la *Carta della suscettibilità ai dissesti*. Questa cartografia sarà prodotta per entrambi i fenomeni analizzati, si avrà perciò una carta riguardante la suscettibilità alle *frane* e una relativa al fenomeno *debris flow*. Una volta ottenuti i pesi è stato possibile riclassificare ogni cartografia impiegata (*Carta delle quote*, *Carta delle pendenze*, *Carta delle esposizioni*, *Carta delle concavità*, *Carta geologica* e *Carta dell'uso del suolo*) in funzione dei valori di peso assunti da ciascuna classe tematica. In questo modo non si ottengono più le carte tematiche presenti all'inizio dell'applicazione del metodo *WofE*, ma si hanno bensì delle cartografie appositamente "pesate". Per ottenere queste carte "pesate" ci si è avvalsi dell'applicazione della *posterior probability*, espressione bayesiana che permette, dal punto di vista statistico, di normalizzare i dati ottenuti e quindi di affinare i risultati. Tramite le funzionalità di *ArcGis*<sup>®</sup> sono state sovrapposte fra loro tutte le "nuove" carte tematiche in modo tale da sommare i vari pesi ed ottenere quindi le due carte riguardanti la suscettibilità ai dissesti. Al fine della rappresentazione i valori dei "pesi sommati" sono stati ulteriormente riclassificati, in modo da individuare nel bacino tre categorie di suscettibilità al dissesto: *poco suscettibile*, *mediamente suscettibile* e *molto suscettibile*. Definite tali classi è stato possibile, sempre in *ArcGis*<sup>®</sup>, ottenere la *Carta della suscettibilità alle frane* (**Figura 6.36**) e la *Carta della suscettibilità ai debris flow* (**Figura 6.37**). Dall'analisi dei risultati si possono trarre alcune considerazioni. Innanzitutto la cartografia riguardante il fenomeno *frane* risente in maniera significativa della limitata presenza di punti di controllo relativi a tale dissesto. La *Carta della suscettibilità alle frane* indica i principali movimenti di versante nella zona medio bassa della valle non individuandone invece nelle zone di testata dove, sia per la presenza di forti pendenze sia per la presenza di *Rocce vulcanoclastiche*, dovrebbero essere presenti. In ogni caso il metodo *WofE*, dove ha trovato una certa densità di punti di controllo, ha risposto in maniera soddisfacente. Questo lo si vede

nelle aree incluse nella classe *molto suscettibile* che sono state localizzate in corrispondenza di zone ad elevata pendenza, comunque presenti nella parte centrale del bacino, e caratterizzate allo stesso tempo da presenza di *Rocce vulcanoclastiche* e *Rocce carbonatiche stratificate*.

La *Carta della suscettibilità ai debris flow* appare più affidabile come risultato. Le aree potenzialmente generanti questo dissesto risultano, infatti, essere concentrate nella zona di testata del bacino dove sono presenti sia forti pendenze sia classi geologiche quali *Corpo detritico* e *Rocce vulcanoclastiche* che solitamente favoriscono la genesi di colate detritiche. Analizzando la disposizione delle aree suscettibili ai *debris flow* appare evidente come la caratteristica che più influenza, nel bacino dell'Ornella, la suscettibilità sia la presenza di una pendenza superiore ai 40°.



**Figura 6.36 – Carta della suscettibilità alle frane riguardante il bacino del torrente Ornella.**

### Ornella: suscettibilità ai debris-flow

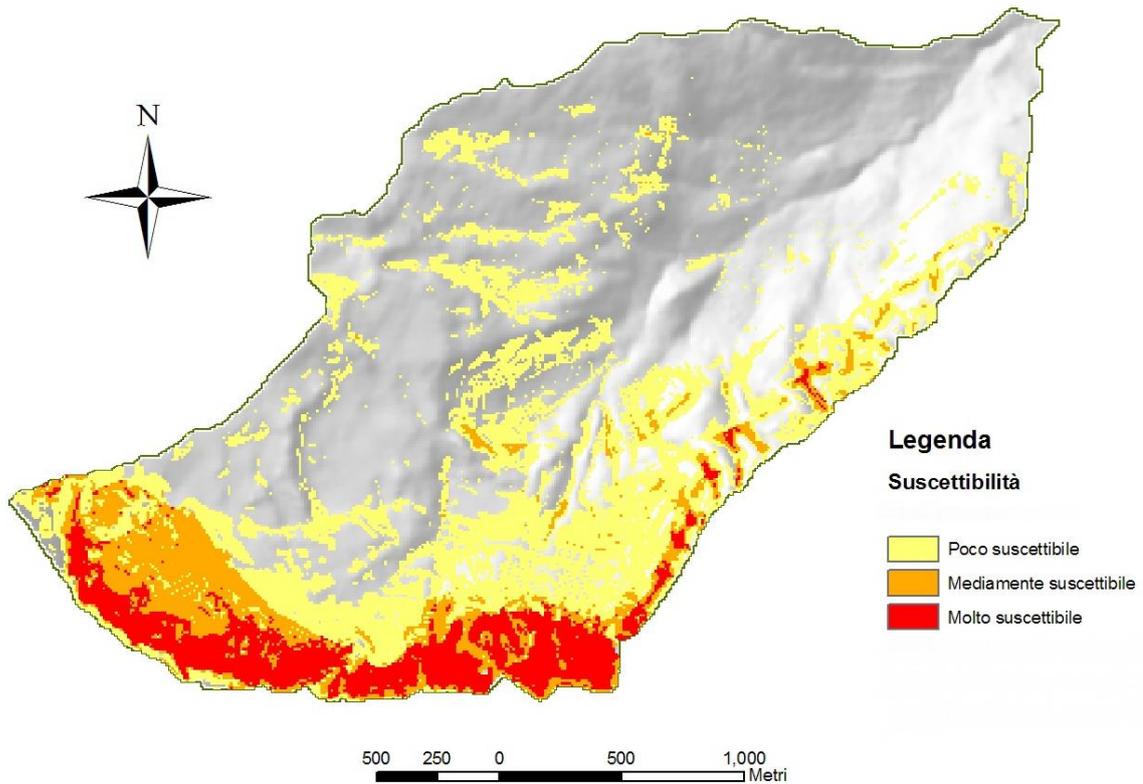
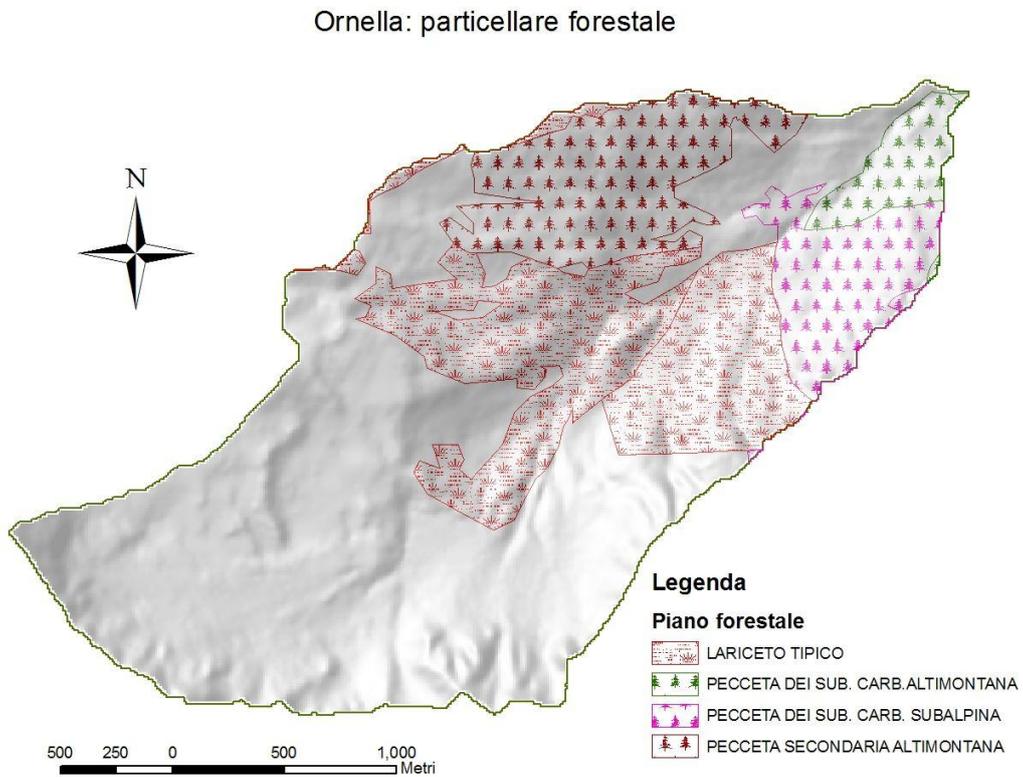


Figura 6.37 – Carta della suscettibilità ai debris flow riguardante il bacino del torrente Ornella

#### 6.4.3 Determinazione aree sorgenti di legname

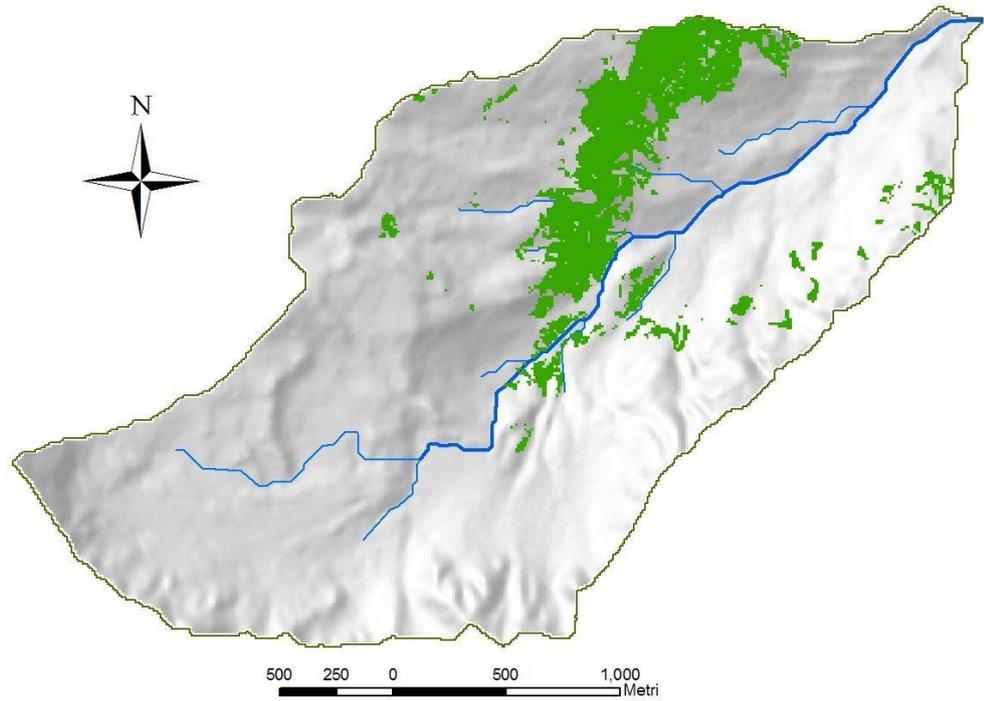
A questo punto avendo a disposizione la *Carta della suscettibilità alle frane* e la *Carta della suscettibilità ai debris flow* è possibile provare ad individuare le aree potenzialmente sorgenti di legname in alveo. Per definire queste zone si è deciso di sovrapporre, in ambiente GIS, le sopraccitate cartografie della suscettibilità ai dissesti con la *Carta dei particellari forestali* riguardante il bacino del torrente Ornella (**Figura 6.38**). Quest'ultima è stata prodotta estraendo le informazioni riguardanti il bacino dell'Ornella dalla *Carta dei particellari forestali* relativa al macrobacino del torrente Cordevole, creata con le modalità spiegate nel paragrafo 6.3. I risultati ottenuti sono riportati in **Figura 6.39** e in **Figura 6.40**. Osservandoli si può notare come le aree suscettibili a *frane* siano, nella loro quasi interezza, anche potenzialmente sorgenti di legname. Al contrario le aree suscettibili a *debris flow* assumono il ruolo di sorgenti di legname in maniera limitata e frammentata. Questo aspetto si spiega col fatto che le possibili colate detritiche sono previste, dal metodo *WofE*, soprattutto nella parte alta della valle dell'Ornella, dove non sono presenti

superfici boscate. Le frane invece sono interamente localizzate nella zona medio bassa del bacino, in corrispondenza di una particella forestale destinata a pecceta e di una caratterizzata da lariceti.



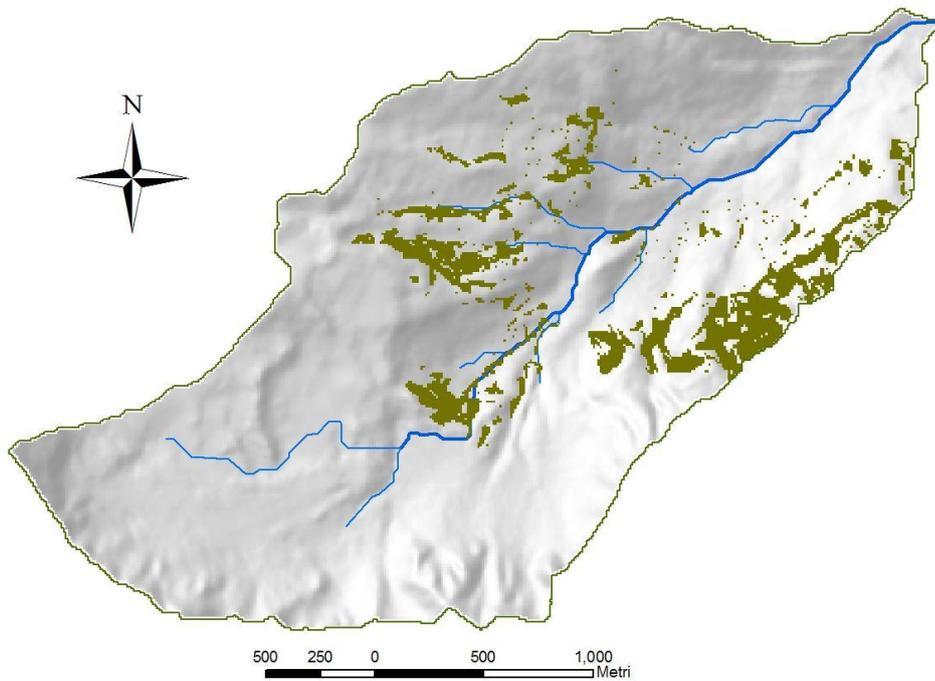
**Figura 6.38 – Carta dei particellari forestali relativa al bacino del torrente Ornella**

Ornella: aree sorgenti legname da frane



**Figura 6.39 – Frane: aree potenzialmente sorgenti di legname.**

Ornella: aree sorgenti legname da debris-flow



**Figura 6.40 – Debris flow: aree potenzialmente sorgenti di legname.**

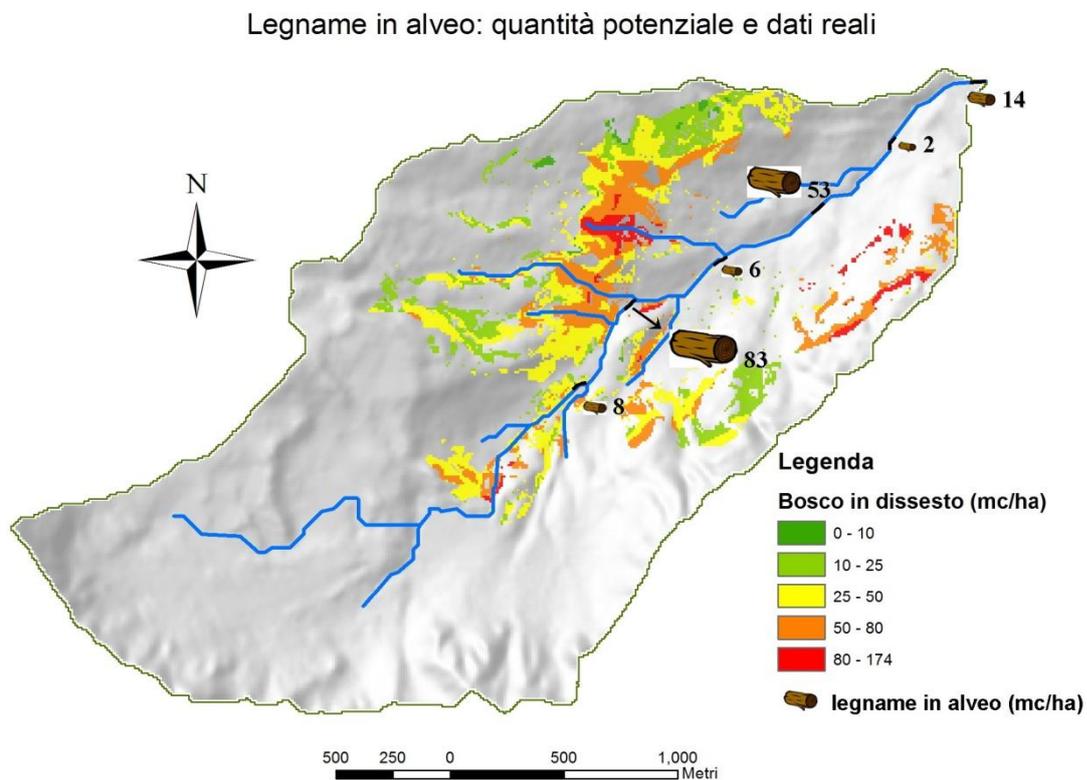
#### 6.4.4 Quantificazione legname potenzialmente reclutabile dalla rete idrica

Determinate le aree potenzialmente sorgenti di materiale legnoso è possibile effettuare un'ulteriore elaborazione. Nella *Carta dei particellari forestali* (e di conseguenza anche nelle carte delle aree sorgenti) oltre alle informazioni geografiche delle superfici boscate, sono stati riportati anche i parametri dendrometrici d'ogni singola particella presente nel bacino di studio. Di particolare interesse ai fini di questo studio è il valore *massa forestale* ( $m^3ha^{-1}$ ) che permette di ottenere una prima generica quantificazione del materiale legnoso presente nelle aree sorgenti. La quantificazione risulta generica in quanto non tutto il volume legnoso presente nell'area sorgente finisce in alveo in seguito al manifestarsi di un dissesto, di esso solo una percentuale raggiunge il collettore. Nella realtà fisica il valore di questa percentuale è influenzato da numerosi fattori. In questo studio si è deciso di utilizzare la pendenza dell'area e la distanza dal collettore, in quanto rappresentano i due fattori che più "pesano" sulla traslazione del detrito legnoso dal versante al corso d'acqua. Entrambi i fattori sono stati gestiti in ambiente GIS ed entrambi sono stati riclassificati per migliorare il modello previsionale. La riclassificazione di questi due tematismi si rende necessaria in quanto la percentuale di detrito legnoso fornito varia al variare del valore assunto da pendenza e da distanza dal collettore. Nella realtà, se si prende come esempio il solo fattore pendenza, un'area fortemente inclinata fornisce al collettore maggiori quantità di detrito legnoso rispetto ad un'area caratterizzata da una pendenza medio bassa. Lo stesso vale se si analizza la sola distanza dal collettore, un'area sorgente situata in prossimità del corso d'acqua approvvigiona il collettore di *LW* maggiormente rispetto ad una zona posta a distanza. Una volta individuate le classi si è assegnato ad ognuna di esse un coefficiente (su base decimale) che indica la frazione di volume intero con cui quella classe contribuisce. Il coefficiente assegnato varia al variare del valore della classe tematica: per quanto riguarda la pendenza esso aumenta all'aumentare dell'inclinazione dell'area, nel caso della distanza dal collettore diminuisce all'aumentare della lontananza dell'area sorgente.

A livello di rappresentazione questa riclassificazione è stata svolta sulle cartografie riguardanti il tematismo pendenza, già disponibile in quanto prodotta nella fase preparatoria dello studio, e sul cosiddetto *buffer* delle distanze. Questo ultimo è un'elaborazione effettuabile in ambiente GIS che permette di creare un'entità areale

sulla base di una distanza costante rispetto all'entità di riferimento. In quest'applicazione l'entità di riferimento è il collettore, mentre le entità areali sono le zone individuate nel bacino che possiedono distanze progressive dal corso d'acqua stesso. In ambiente GIS sono state sovrapposte tra loro le carte delle aree sorgenti da *frane* e da *debris flow* (**Figura 6.39 e Figura 6.40**), contenenti anche l'attributo *massa legnosa*, il buffer delle distanze e il tematismo pendenza opportunamente riclassificato. Dall'integrazione di queste carte è stato possibile, per ogni area sorgente, determinare le quantità potenzialmente movimentabili di detrito legnoso (**Figura 6.41**). Il risultato ottenuto permette di trarre alcune considerazioni, sia dal punto di vista della distribuzione spaziale degli *LW*, sia per la loro quantificazione in termini volumetrici. Innanzitutto confrontando la distribuzione delle quantità potenziali individuate dal modello previsionale con i tratti campione analizzati da Comel (2007) si può notare come le maggiori volumetrie rilevate in campo siano sempre localizzate in prossimità di aree a cui sono attribuiti  $80 - 174 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  di bosco in dissesto, cioè la classe massima individuata dal modello. Questo lo si vede soprattutto nel terzo e nel quinto tratto analizzati dalle campagne di misurazione, dove sono concentrati i maggiori volumi di detrito legnoso ( $53$  e  $83 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ) ma dove, allo stesso tempo, sono state anche previste diverse aree con massimo attributo di bosco in dissesto. La quantificazione del detrito legnoso è stata eseguita con le seguenti modalità: avendo a disposizione le quantità potenzialmente movimentabili per ogni area sorgente (**Figura 6.41**) è stato possibile ottenere un volume totale moltiplicando tra loro la *massa forestale* ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) dell'area sorgente per la superficie dell'area stessa. Sommando i contributi forniti da tutte le aree sorgenti si è giunti ad stimare un volume pari a  $3545 \text{ m}^3$ . Questo significa che il modello previsionale stima, nel caso del verificarsi di un evento che pone in dissesto tutte le aree suscettibili, l'arrivo in alveo di  $3545 \text{ m}^3$  di materiale vegetale. Tale risultato lo si è ottenuto considerando come aree d'origine del detrito legnoso tutte le zone classificate come suscettibili ai dissesti (**Figura 6.36 e Figura 6.37**), includendo così tutte le classi di suscettibilità (*poco, mediamente e molto suscettibile*). Ai fini dello studio e per verificare la bontà dei risultati ottenuti si è provato ad esaminare la risposta data dal modello previsionale al variare delle aree considerate come sorgenti. In merito a ciò sono state effettuate due prove: nel primo caso (**Figura 6.42**) sono state riclassificate le carte delle aree d'origine del detrito legnoso includendo all'interno di esse le sole superfici identificate come *mediamente e molto suscettibile* al dissesto, eliminando la

categoria *poco suscettibile*. Considerando solamente queste classi si ottiene un volume totale di materiale legnoso pervenibile in alveo pari a 1165 m<sup>3</sup>. Il secondo tentativo (**Figura 6.43**) è stato sviluppato assumendo come aree sorgenti le sole zone caratterizzate dalla classe di dissesto *molto suscettibile*, con questa riclassificazione la volumetria che giunge nel collettore risulta pari a 288 m<sup>3</sup>. Quest'ultimo volume risulta molto simile alla quantità di materiale in alveo realmente rilevata da studi condotti nel bacino dell'Ornella negli scorsi anni (Comel, 2007).



**Figura 6.41 – Legname in alveo: confronto tra volumi rilevati in campo e quantità potenzialmente movimentabili stimate dal modello previsionale**

Legname in alveo: quantità potenziale e dati reali

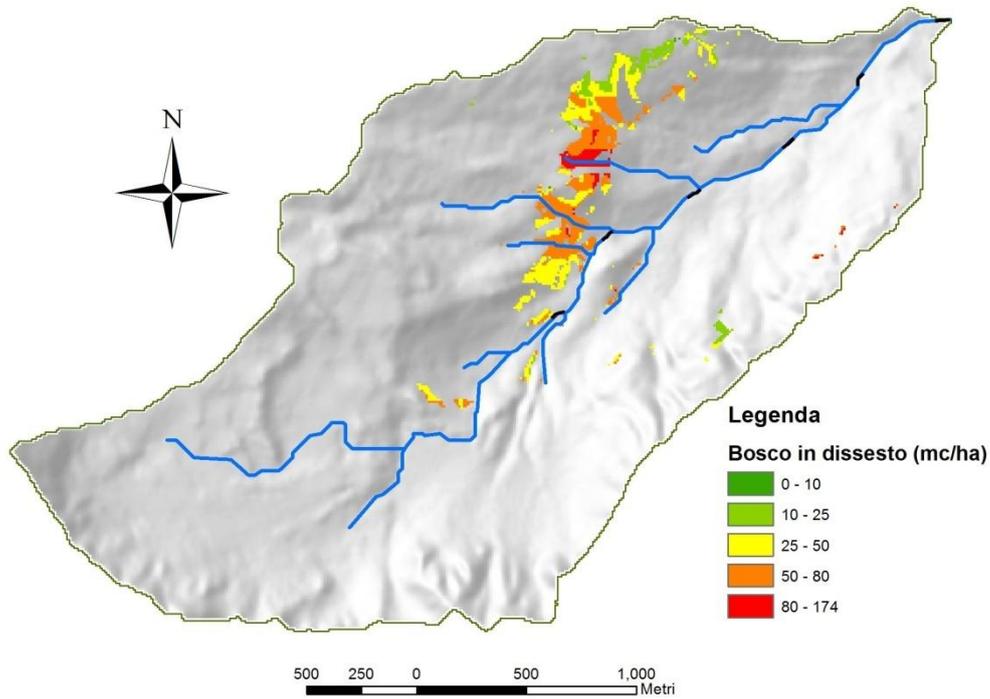


Figura 6.42 – Legname in alveo: quantità potenziali previste utilizzando come aree sorgenti le classi mediamente e molto suscettibile.

Legname in alveo: quantità potenziale e dati reali

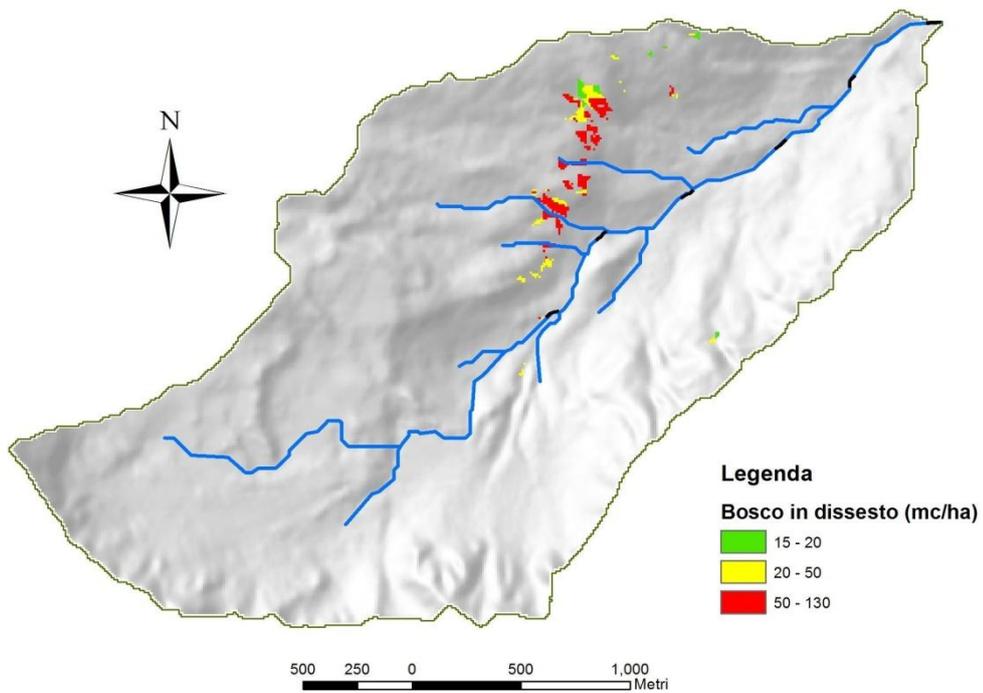


Figura 6.43 – Legname in alveo: quantità potenziali previste utilizzando come aree sorgenti la sola classe molto suscettibile.



## 7. CONCLUSIONI

Nel nostro paese, come in tutta Europa, si è assistito negli ultimi anni ad un progressivo aumento delle superfici boscate, soprattutto in ambiente alpino e prealpino. Le ragioni di tale fenomeno sono da ricercare nel progressivo spopolamento dei territori montani che, tra i molteplici effetti, causa un costante abbandono delle attività economiche locali riguardanti il settore primario, quali per esempio la selvicoltura, l'agricoltura, la pastorizia e la zootecnia. La brusca frenata che queste attività hanno subito negli ultimi decenni ha favorito l'espansione delle superfici boscate e di conseguenza ha aumentato la quantità di volume legnoso che può pervenire in alveo. Contestualmente a ciò si è assistito, in letteratura, ad un aumento degli studi riguardanti la presenza in alveo di legname: *LW* (*Large Woody* in terminologia anglosassone); questo materiale è stato analizzato per determinarne i principali effetti, e capire qual è il suo ruolo nel sistema "fiume". Negli Stati Uniti già da qualche decennio vengono studiati gli aspetti naturalistici ed ecologici dei *LW*, mentre in Europa le ricerche finora affrontate sono esigue, e perlopiù rivolte ai fini della sicurezza idraulica, soprattutto nelle reti idriche montane. Dalla bibliografia prodotta risulta chiaro come la presenza di materiale vegetale in alveo causi modifiche alle caratteristiche idrauliche e morfologiche del collettore, questo avviene soprattutto nel caso in cui il legname tenda ad aggregarsi in strutture più o meno organizzate, che spesso possono raggiungere anche notevoli dimensioni. Dal punto di vista della funzionalità ecologica la presenza di *LW* contribuisce alla biodiversità ambientale del corso d'acqua favorendo la presenza di diversi habitat per invertebrati e specie ittiche; inoltre fornisce materia organica regolando la presenza dei nutrienti. Diversi studi, tra cui alcuni svolti anche in Italia, hanno evidenziato come la quantità e la qualità dei *LW* dipenda dalle caratteristiche del bacino e del torrente. Nei collettori di primo e secondo ordine la causa principale d'immissione di detrito legnoso in alveo è rappresentata dai fenomeni d'instabilità dei versanti, nei torrenti d'ordine superiore invece l'origine predominante è l'erosione spondale. Anche nell'Alto Cordevole la maggior parte del legname che perviene fino alla rete idrica deriva da frane di versante, e nei bacini con area drenata inferiore ai 2 Km<sup>2</sup> anche dalle colate detritiche. Quando questo materiale viene trasportato dalla corrente può determinare la formazione di ostruzioni sulle pile dei ponti, aumentando la spinta idrostatica a valori che possono superare la tolleranza del manufatto stesso, fino a causarne il

cedimento; inoltre l'aggregamento in accumuli, determina delle erosioni localizzate e una contrazione del flusso idrico con conseguente congestione, così da accrescere la portata al colmo negli eventi di piena. Nel caso in cui l'ostruzione interessi tutta la sezione si possono avere dei fenomeni legati alla rottura improvvisa della "struttura" con conseguente produzione di un'ondata di piena anomala: *dam-break*. Gli accumuli di legname possono inoltre ridurre la funzionalità delle opere di trattenuta, come le briglie selettive, le quali vengono realizzate a monte di insediamenti e di infrastrutture.

Da queste considerazioni emerge l'importanza dello studio di questo fattore, al fine di dare delle precise indicazioni nella pianificazione e gestione del territorio, in particolare quello montano che per sua natura è più vulnerabile agli eventi naturali. Il presente lavoro è stato prodotto per implementare un modello previsionale su base GIS al fine di quantificare il legname potenzialmente reclutabile dalla rete idrica. Questo modello è stato applicato al bacino del torrente Ornella, tributario di secondo ordine del torrente Cordevole, situato nell'Alto Bellunese.

Prima della fase d'applicazione vera e propria sono stati riassunti ed analizzati i dati ottenuti da precedenti campagne di misurazione svoltesi nel bacino di studio: questo è stato fatto oltre che per approfondire le conoscenze dell'area, anche per avere dei dati reali con cui confrontare la risposta data dal modello previsionale. Le analisi del legname presente nei tredici sottobacini del Cordevole (con sezione di chiusura sul lago di Alleghe) hanno evidenziato una relazione inversa tra il volume di legname e l'area drenata: questo probabilmente si spiega col diverso grado d'antropizzazione che caratterizza i vari sottobacini; quelli più estesi presentano una maggiore presenza di abitati e di infrastrutture viarie difese da opere di sistemazione che diminuiscono il reclutamento del detrito legnoso da parte del collettore; al contrario i bacini con area drenata inferiore presentano i maggiori volumi areali. In queste aree la naturalità del territorio, che si traduce in un alto grado di boscosità, e le caratteristiche geomorfometriche come la forte pendenza e la geologia particolarmente instabile determinano l'immissione nella rete idrica di grandi quantità di materiale legnoso. I fenomeni d'instabilità dei versanti risultano essere le principali fonti di questo materiale, e per questo nello sviluppo del modello di previsione si rivolta particolare attenzione nella mappatura di questi fenomeni. Questo risultato è stato ottenuto grazie ad un metodo statistico bivariato definito *WofE (Weight of Evidence)*, che permette di analizzare diversi fattori predisponenti ai dissesti. Nel

nostro caso sono state create ed utilizzate sei carte tematiche (quota, esposizione, pendenza, concavità, geologia, ed uso del suolo), confrontate con i fenomeni franosi presenti nel territorio (punti di controllo). Tramite questa analisi sono state ottenute due carte della suscettibilità ai dissesti: una per i debris flow e una per le frane in generale. Nel complesso è risultato che le aree con alta propensione ai dissesti sono 513800 m<sup>2</sup>, pari al 7,7% dell'area del bacino. Intersecando la *Carta della suscettibilità* e la *Carta dei particellari forestali* sono state individuate le aree sorgenti di legname. Grazie alla mappatura di queste aree si è proceduto con la quantificazione del legname potenzialmente reclutabile dalla rete idrica. Quest'ultimo passaggio è stato reso possibile anche dalla preventiva implementazione dei parametri dendrometrici nella *Carta dei particellari forestali*, questi sono stati ricavati direttamente dai Piani d'Assesamento Forestali dei comuni presenti nell'area di studio. Di particolare interesse ai fini della quantificazione è stato il parametro *massa forestale*, che indica il volume di soprassuolo presente in una specifica particella. Attraverso un "filtraggio" delle aree sorgenti in base alla distanza e alla pendenza, si sono ottenute le cartografie riguardanti le quantità potenzialmente reclutabili dalla rete idrica. Quest'ultima fase è stata eseguita ipotizzando tre possibili scenari a seconda del grado di suscettibilità ai dissesti del bacino. Nel primo caso in cui sono state considerate tutte le aree con propensione ai dissesti si è stimato un volume di materiale vegetale potenzialmente reclutabile dalla rete idrica pari a 3545 m<sup>3</sup>. Nel secondo caso (senza le aree *poco suscettibili*) il volume diminuisce circa del 67% rispetto al primo scenario con un valore pari a 1165 m<sup>3</sup>. L'ultima quantificazione svolta ha utilizzato come aree sorgenti le sole zone classificate come *molto suscettibili* ai dissesti, in questo caso è stato determinato un volume di detrito legnoso reclutabile in alveo pari a 288 m<sup>3</sup>. Questa modellazione ha restituito un valore molto significativo in quanto rispecchia fedelmente quello misurato in campo. Le volumetrie rilevate in campo da Comel (2007) nei tratti campione sono infatti pari a 308 m<sup>3</sup>. Questo significa che il volume stimato dal modello previsionale, nel caso del verificarsi di un evento che potrebbe movimentare il legname presente delle aree molto suscettibili al dissesto, è attendibile al 93%.

In conclusione, si può affermare che i risultati del presente lavoro sono positivi, e che il modello prodotto e testato risulta sufficientemente affidabile. Si auspica che tale analisi possa essere applicata in futuro su altri bacini, così da ottenere delle preziose informazioni riguardo la produzione e la dinamica del legname in alveo.



## 8. BIBLIOGRAFIA

Abbe T.B., 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, Washington*. *Geomorphology* 51, 81-107.

Assani A., Petit F., 1995. *Log-jam effects on bed-load mobility from experiments conducted in a small gravel-bed forest ditch*. *Catena* 25, 117-126.

Barbierato C., 2004. *Il paesaggio dell'alta Val Cordevole fra abbandono e recente sviluppo turistico*. Tesi di laurea in Geografia. Università degli Studi di Padova.

Benini G., 1990. *Sistemazioni idraulico-forestali*. UTET, Torino.

Bilby R.E., 2000. *Decomposition and nutrient dynamics of wood in rivers. The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. American Fisheries Society Symposium 37, 135-147.

Bisson P.A., Bilby R.E., Bryant M.D., Dolloff C.A., Grette J.B., House R.A., Murphy M.L., Koski K.V. e Sedell J.R., 1987. *Large woody debris in forested streams in Pacific Northwest: past, present and future*. In *Streamside Management: Forestry and Fishery interaction*, Salo, E.O. e Cundy, T.W. (eds), 143-190.

Bonamini G., Uzielli L., Zanutti R, 1993. *Elementi di tecnologie del legno e utilizzazioni forestali*. UTET, Torino. Pp. 190.

Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P., Wright D.F., 1989. *Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential*. In: F.P. Agterberg & G.F. Bonham-Carter (eds.), *Statistical applications in the Earth Sciences*. Geological Survey of Canada, Paper 89(9), 171-183.

Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P., Wright D.F., 1990. *Statiscal pattern integration for mineral exploration*. Geological Survey of Canada, Inter. Rept. Ottawa.

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

Buffington J.M., and Montgomery D.R., 1999. *Effects of hydraulic roughness on surface texture of gravel bed rivers*. Water Resources Research 35, 3507-3522.

Calligaro S., 2006. *Il ruolo degli accumuli di legname in alveo nel torrente Ru Davedin, effetti idrodinamici e morfologici degli accumuli di legname*. Tesi di laurea in Tutela e Riassetto del Territorio. Università degli Studi di Padova.

Campana et al., 2007. *La pericolosità geologica per instabilità dei versanti nell'Alta Val Cordevole*. Progetto CARG Veneto.

Carlig G., 2004. *Il ruolo del legname in alveo nel torrente Tres Arroyos, Temuco, IX Regione, Cile*. Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Chung C.F., Keating P.B., 2002. *Mineral potential evaluation based on airborne geophysical data*. Exploration Geophysics 33, 28-34.

Comel F., 2007. *Analisi dei residui legnosi in due torrenti delle Dolomiti Bellunesi (T. Andraz; T.Ornella)*. Tesi di laurea in Tutela e Riassetto del Territorio. Università degli Studi di Padova.

Comiti F., Andreoli A., Lenzi M.A., and Mao L., 2006. *Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps)*. Geomorphology, Volume 78, Issues 1-2, 44-63.

D'Agostino V., 2007. Corso di Interventi di ingegneria naturalistica. *Appunti delle lezioni*. Corso di Laurea Triennale in Tutela e Riassetto del Territorio. Università degli Studi di Padova.

D'Agostino V., Lenzi M.A., 1996. *La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon*. L'Acqua 4, 23-40.

De Horatiis M., 1930. *Istituzioni di idronomia montana*. Tipografia Ricci. Firenze.

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

Ebo D., 2005. *Il rischio idraulico derivante dagli accumuli in alveo: applicazione di un modello idrodinamico al caso del Rio Molini (BL)*. Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali. Università degli Studi di Padova.

Ehrman T.P. e Lamberti G.A., 1992. *Hydraulic and particulate matter retention in a third order Indiana stream*. Journal of the North American Benthological Society 11, 341-349.

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

Ferro V., 2006. *La sistemazione dei bacini idrografici*. Seconda edizione. McGraw-Hill.

Fetherston K.L., Naiman R.J. and Bilby R.E, 1995. *Large woody debris, physical process, and riparian forest development in montane river networks of the Pacific Northwest*. Geomorphology 13, 133-144.

Giordano G., 1976. *Tecnologia del legno*. Enciclopedia, vol.1. Pp 1030-1100.

Giordano G., 1997. *Antologia del legno*. Consorzio legno SCRL. Volume I. Pp. 457.

Gomarasca M.A., 2004. *Elementi di geomatica*. Associazione italiana di telerilevamento. Milano.

Grant G.E. e Swanson F.J., 1995. *Morphology and process of valley floors in mountain streams, western Cascades, Oregon*. Pages 83-101 in J.E. Costa, A.J. Miller, K.W. Potter, and P.R. Wilcock, editors. *Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 89, Washington, D.C.

Gregory K.J., Gurnell A.M. e Hill C.T., 1985. *The permanence of debris dams related to river channel processes*. *Hydrological Science Journal* 30, 371-381.

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

Harwood K. e Brown A.G., 1993. *Fluvial processes in a forested anastomosing river: flood partitioning and changing flow patterns*. *Earth Surface Processes and Landforms* 18, 741-748.

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

Johnson A.C., Swanson D.N., and McGee K.E., 2000. *Landslide initiation, runout, and deposition within clearcuts and old-growth forests of Alaska*. *Journal of the American Water Resources Association* 36, 17-30.

Keller E.A., Swanson F.J., 1979. *Effects of large organic material on a channel form and fluvial processes*. *Earth Surface Processes*.

Lenzi M.A., 2007. *Corso di Tutela del paesaggio agricolo e forestale e riassetto idraulico del territorio. Appunti delle lezioni*. Corso di Laurea Triennale in Tutela e Riassetto del Territorio, Università degli Studi di Padova.

Lenzi M.A., D'Agostino V., Sonda D., 2000. *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti*. Editoriale Bios, Cosenza. Pp. 208.

Lisle T.E., 1986. *Effect of woody debris on anadromous salmonid habitat, Prince of Wales Island, southeast Alaska*. North American Journal of Fisheries Management 6, 538-550.

Lisle T.E., 1995. *Effects of woody debris and its removal on a channel affected by the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington*. Water Resources Research 31, 1797-1808.

Lisle T.E., and Napolitano M.B., 1998. *Effects of recent logging on the main channel of North Fork Caspar Creek*. In Proceedings of the conference on coastal watersheds: the Caspar Creek Story; 6 May 1998; Ukiah; CA. R.R. Ziemer, Ed. Pages 81-85. Gen Tech Rep PSW-GTR-168. Albany, CA; Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S., Department of Agriculture.

MacDonald A., Keller E.A., 1987. *Stream channel response to the removal of large woody debris, Larry Dam Creek, Northwestern California*. Proceedings of the Symposium on the Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, International Association of Hydrological Science Publication 165, 405-406.

Manga M. e Kirchner J.W., 2000. *Stress partitioning streams by large woody debris*. Water Resources Research 36, 2373-2379.

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, 425-438.

Migani M., Salerno G., 2008. *Manuale ArcGIS®*. Dario Flaccovio Editore.

Montgomery D.R., Buffington J.M., 1997. *Channel-reach morphology in mountain drainage basins*. GSA Bulletin 109, 596-611.

Montgomery D.R., Buffington J.M., Smith R.D., Schmidt K.M., and Pess G., 1995. *Pool spacing in forest channels*. Water Resources Research 31, 1097-1105.

Montgomery D.R., Piegay H., 2003. *Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes*. Geomorphology 51, 1-5.

Nakamura F., Swanson F.J., 1993. *Effects of the coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon*. Earth Surface Processes and Landforms 18, 43-61.

Pecorari E., 2003. *Analisi del movimento dei tronchi in alvei fluviali*. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Università degli Studi di Padova.

Piégay H., 2003. *Dynamics of wood in large rivers*. American Fisheries Society 37, 109-133.

Piégay H., Gurnell A.M., 1997. *Large woody debris and river geomorphological pattern examples from S.E. France and S.E. England*. Geomorphology 19, 99-116.

Piégay H., Thévenet A., and Citterio A., 1999. *Input, storage and distribution of large woody debris along a mountain river continuum, the Drôme River, France*. Catena 35, 19-39.

Rickenmann D., 1997. *Schwemmholz und Hochwasser*. Nasser, Energie, Liftea, Energie, Ari, 115-119.

Rigon E., 2005. *Analisi sperimentale sul ruolo del legname in alveo in un torrente delle dolomiti bellunesi*. Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Rigon E., Andreoli A., Comiti F., Lenzi M.A., 2007. *Quantità caratteristiche ed origine del detrito legnoso in un torrente montano (Codalunga, Veneto)*. Quaderni di Idronomia Montana 25, 227-243.

Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Lenzi M.A., 2007. *Il materiale legnoso in alveo nei torrenti alpini: troppo o troppo poco? Evidenze del bacino dell'alto Cordevole (Belluno)*. Quaderni di Idronomia Montana 27.

Rosin N., 2007. *Analisi del materiale legnoso presente in tributari di 1° e 2° ordine nel torrente Pettorina*. Tesi di laurea in Tutela e Riassetto del Territorio. Università degli Studi di Padova.

Rossi R., 2005. *Introduzione ai sistemi informativi geografici, Appunti di lezione*. Sistemi informativi territoriali, urbanistica per il governo del territorio. Corso di aggiornamento professionale, Collegio Geometri della Provincia di Padova.

Sabto M., 1991. *Probabilistic modelling applied to landslides in Central Columbia using GIS procedures*. Tesi non pubblicata. ITC, Enschede, The Netherlands, 26 pp.

Sansoni G., 2006. *Principi di riqualificazione fluviale*. Atti delle giornate di studio "Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviale e la gestione dei sedimenti", Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra, Sarzana, 24-26 Ottobre.

Shields F.D. e Gippel C.J., 1995. *Prediction of effects of woody debris removal on flow resistance*. American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Engineering 121, 341-354.

Siffredi Duranti E., 2005. *La problematica del legname in alveo connessa alla gestione del territorio: il caso del Rio Molini (BL)*. Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Slongo M., 2005. *Tipologia, dimensione e quantità del materiale in alveo presente in tre collettori montani (bacino del T. Fiorentina, Belluno)*. Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Smith R.D., Sidel R.C., Porter P.E., Noel J.R., 1993. *Effect of experimental removal of woody debris on channel morphology of a forest, gravel-bed stream*. Journal of Hydrology 152, 153-178.

Soccol E.U., Tessarollo A., 2003. *Il rischio idraulico nell'abitato di Caprile*. Tesi del master in difesa del suolo e protezione civile. Università degli Studi di Padova.

Sonda D., 2005. *Utilizzo di GIS per l'analisi del bacino idrografico*. In D'Agostino V. & Carraro V. (eds.), *Conoscere il sistema fiume in ambiente alpino*. Pubblicazione del Corso di Cultura Ecologica, Atti del 41.mo corso, Università degli Studi di Padova.

Spanevello M., 2008. *Cause ed effetti del materiale legnoso nei torrenti alpini: analisi del Rù Davedino (Dolomiti Agordine, BL)*. Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali. Università degli Studi di Padova.

Strasburger , Bellini E., Pupillo P., Caretta G., Lausi D., 1995. *Trattato di Botanica, parte generale*. Antonio Delfino Editore, Roma. Pp, 267.

Swanson F.J., Bryant M.D., Lienkaemper G.W., and Sedell J.R., 1984. *Organic debris in small streams, Prince of Wales Island, southeast Alaska*. U.S. Forest Service General Technical Report PNW-69.

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

Van Westen C.J., 1993. *Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation*. ITC-Publication No. 15, ITC, Enschede, 245pp.

Wilcox A., Wohl E., 2006. *Flow resistance dynamics in step-pool channels: 1. Large woody debris and controls on total resistance*. Water Resources Research 42, W05418, doi: 10.1029/2005WR004277.

Zorzi S., 2007. *Gli accumuli di legname negli alvei montani: analisi sperimentale nell'Alto Cordevole*. Tesi di laurea in Tutela e Riassetto del Territorio. Università degli Studi di Padova.

### **Siti internet consultati ai fini del presente lavoro**

[www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi](http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi)

[www.ige.unicamp.br/sdm/default](http://www.ige.unicamp.br/sdm/default)

[it.wikipedia.org](http://it.wikipedia.org)

[www.regione.veneto.it](http://www.regione.veneto.it)



