

DAMOCLES

TRAINING ACTIVITY

**DEBRISFALL ASSESSMENT IN MOUNTAIN
CATCHMENTS FOR LOCAL END-USERS**

CONTRACT NO EVG1 - CT-1999-00007

**Debris Flow Routing
and Distributed Fan Model Application**

METHODOLOGICAL GUIDE

CASE STUDIES AND APPLICATIONS

M.A. Lenzi, V. D'Agostino, C. Gregoretti,

D. Sonda, A. Guarnieri, F. Comiti, L. Mao

University of Padova
Department of Land and Agro-Forest Environments
Agripolis, Legnaro

September 2002

DAMOCLES

TRAINING ACTIVITY

**DEBRISFALL ASSESSMENT IN MOUNTAIN
CATCHMENTS FOR LOCAL END-USERS**

CONTRACT NO EVG1 - CT-1999-00007

**Modellistica della propagazione delle colate detritiche
e della sedimentazione nei conoidi alluvionali**

GUIDA METODOLOGICA CASI DI STUDIO ED APPLICAZIONI

M.A. Lenzi, V. D'Agostino, C. Gregoretti,

D. Sonda, A. Guarnieri, F. Comiti, L. Mao

**Università di Padova
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali
Agripolis, Legnaro**

Settembre 2002

MODELLISTICA DELLA PROPAGAZIONE DELLE COLATE DETRITICHE E DELLA SEDIMENTAZIONE NEI CONOIDI ALLUVIONALI

GUIDA METODOLOGICA

INDICE

INTRODUZIONE-----	4
1. IL SOTTOMODELLO MODDS (1-D)-----	6
1.1. CARATTERISTICHE DEL MODELLO -----	6
1.2. PARAMETRI DI INPUT -----	7
1.3. MODALITA' DI CALCOLO-----	14
1.4. OUTPUT DEL PROGRAMMA -----	16
2. IL SOTTOMODELLO DFPDM (2-D) -----	17
2.1. CARATTERISTICHE DEL MODELLO -----	17
2.2. PARAMETRI DI INPUT -----	19
2.3. MODALITA' DI CALCOLO-----	22
2.4. OUTPUT DEL PROGRAMMA -----	24
3. IL MODELLO DEFLIMO (DEBRIS FLOW IMPACT MODEL)-----	27
4. APPLICAZIONI E CASI DI STUDIO -----	30
4.1. APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO MODDS AL BACINO DEL TORRENTE SAHUN -----	30
4.1.1. CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA --	30
4.1.2. ANALISI DELLA PORTATA MASSIMA DI PIENA -----	34

4.1.3.	ANALISI DEL CONOIDE -----	34
4.1.4.	ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO -----	35
4.1.5.	ANALISI DEGLI ATTRAVERSAMENTI E DELLE SEZIONI CRITICHE	37
4.2.	APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO MODDS AL BACINO DEL TORRENTE RUDAN -----	43
4.2.1.	CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA --	43
4.2.2.	DESCRIZIONE DEL CORSO D'ACQUA -----	47
4.2.3.	ANALISI DELLA PORTATA MASSIMA DI PIENA -----	51
4.2.4.	ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO -----	51
4.2.5.	ANALISI DEGLI ATTRAVERSAMENTI E DELLE SEZIONI CRITICHE	53
4.3.	APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO DFPDM (2-D) AL BACINO DEL RIO LAZER -----	56
4.3.1.	CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA ---	56
4.3.2.	VARIABILI ASSUNTE NELLE SIMULAZIONI -----	57
4.3.3.	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI-----	60
4.4.	APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO MODDS AL BACINO DEL RIO LENZI-----	63
4.4.1.	CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA-	63
4.4.2.	IL CONOIDE DEL RIO LENZI-----	68
4.4.3.	ANALISI DELLA PORTATA MASSIMA DI PIENA E DELLE SEZIONI CRITICHE-----	68
4.4.4.	DEFINIZIONE DELLE DISTANZE DI ARRESTO E MAPPATURA DELLE AREE DI RISCHIO-----	70
5.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI-----	74

INTRODUZIONE

Il progetto DAMOCLES è un programma finanziato dalla Comunità Europea, finalizzato allo sviluppo di modellistica per la definizione delle aree di rischio per colate detritiche nelle aree montane, e alla sua divulgazione alle figure amministrative locali addette alla pianificazione territoriale. Il progetto vede la partecipazione di gruppi di ricerca di tre paesi europei (Gran Bretagna, Italia e Spagna) ed il coinvolgimento di sei utilizzatori finali.

Tra gli obiettivi primari del progetto vi sono lo sviluppo e la sperimentazione di modellistica per l'individuazione delle aree di rischio, e la prevenzione e mitigazione degli impatti, soprattutto a scala locale, di bacino e regionale. Al di là delle caratteristiche innovative dei singoli modelli realizzati, la loro sinergica integrazione rappresenta un passo avanti nella direzione di un approccio più quantitativo e coerente alle tematiche trattate. Tra gli obiettivi vi è anche la raccolta di dati di campo e la creazione di database funzionali alla sperimentazione e verifica dei modelli, oltre che alla creazione o perfezionamento delle mappe tematiche locali. Tutto il lavoro è comunque destinato alla pubblicazione, al fine di favorire un diffusione delle metodologie sviluppate, destinate principalmente alle figure amministrative che si occupano di pianificazione territoriale a scale ridotte.

Il campo di ricerca si inquadra soprattutto nell'ambito delle colate detritiche (debris flow) e dei movimenti di massa, e si focalizza nella definizione dei parametri ambientali che contribuiscono al loro innesco; le indagini statistiche basate sui dati di eventi storici, sono servite alla loro identificazione e quantificazione. Questo lavoro ha permesso la realizzazione di modelli per la definizione della probabilità di innesco di colate detritiche e per la previsione della loro propagazione e deposizione nei conoidi alluvionali, potendo altresì simulare gli effetti di opere antropiche in alveo. La loro integrazione nei più moderni Sistemi di Informazione Geografica, permette di analizzare nel dettaglio il rischio nelle zone potenzialmente soggette a tali fenomeni naturali.

Le figure amministrative locali che si occupano di gestione e pianificazione territoriale svolgono un ruolo fondamentale nel progetto DAMOCLES; è a loro che queste tecnologie sono dirette, e proprio la sperimentazione in campo potrà consentirne il perfezionamento e validarne l'efficacia. La partecipazione ai corsi di divulgazione assume perciò un ruolo principe nella diffusione di queste tecnologie tra gli enti di gestione territoriale.

In tale contesto, il Corso Dimostrativo organizzato dal Dipartimento T.E.S.A.F. dell'Università degli Studi di Padova ad Agripolis (Legnaro, PD) nei giorni 10 ed 11 Settembre 2002, si propone l'obiettivo di illustrare le basi teoriche, le metodologie operative e gli esempi di applicazione dei modelli 1-D e 2-D sviluppati dalla stessa struttura. Le citate applicazioni riguardano tre corsi d'acqua dolomitici (Rudan, Lazer e Lenzi) ed il torrente Sahun (Pirenei Spagnoli).

1. IL SOTTOMODELLO MODDS (1-D)

1.1. CARATTERISTICHE DEL MODELLO

Nell'applicazione di un modello unidimensionale è prioritaria l'individuazione delle sezioni critiche lungo il canale (tratti a minore pendenza, restringimenti, ponti, ecc.) e la quantificazione dei volumi che possono eventualmente fuoriuscire. Nello sviluppo di uno schema di calcolo unidimensionale gli aspetti da prendere in considerazione possono essere così riassunti:

- ✓ laminazione dell'onda di piena per un effetto invaso operata dal canale;
- ✓ interazione della corrente con la geometria del canale;
- ✓ calcolo dei volumi fuoriuscenti (overflow);
- ✓ sopraelevazioni in curva;
- ✓ interazione della corrente con eventuali ponti.

Gli aspetti sopra elencati sono stati presi in esame nella fase di progettazione e realizzazione del software MODDS e saranno illustrati con maggior dettaglio nei successivi paragrafi. Il modello MODDS è stato sviluppato in linguaggio Pascal in ambiente Delphi 5.0, sfruttando la programmazione ad oggetti in modo da realizzare un'interfaccia tipo Windows. È stata creata pure una finestra riepilogativa dei dati immessi, in modo da controllare i dati acquisiti per la simulazione (**Figura 1**).

I risultati finali sono restituiti all'esterno come file di testo secondo una precisa tabulazione. Sono state create due possibilità in relazione all'esigenza dell'utente finale. Una prima possibilità prevede la restituzione dei parametri più significativi relativi alla simulazione, mentre la seconda, più estesa, prevede la scrittura delle principali variabili che controllano la procedura di calcolo.

La restituzione dei risultati è affidata a dei file di testo che, seppure con una specifica strutturazione, presentano qualche difficoltà di lettura dei risultati ottenuti. Per facilitare la rappresentazione con altri software è stata prevista la separazione delle singole colonne mediante un punto e virgola. Questo accorgimento facilita l'importazione dei dati in Excel per la visualizzazione grafica dei risultati. Uno sviluppo futuro del programma potrebbe

prevedere la rappresentazione grafica delle sezioni di fuoriuscita della colata in ambiente G.I.S. (ArcView per esempio).



Figura 1 – Interfaccia utente del software MODDS.

1.2. PARAMETRI DI INPUT

I parametri di input necessari al funzionamento del modello vengono acquisiti attraverso tre distinti file. Al file di testo contenente i parametri di tipo idraulico è stata data una estensione *.par* (Figura 2).

```
PARAMETRI IDRAULICI NECESSARI PER ESEGUIRE LA SIMULAZIONE.
                                                                 [.....]

Durata della simulazione in ore:                               0.5
Passo di integraz. temporale in sec.:                          1.0
Parametro alfa (calcolo sopraelevazioni)(0.5-2.5)             1.0
Coeff. deflusso luce a battente (0.3-0.6)                     0.4
Coeff. deflusso stramazzo parete grossa (0.3-0.4)             0.35
```

Figura 2 – Esempio di file di input dei parametri idraulici.

Il mantenimento di questa estensione consente alla procedura di “filtrare” i file contenenti i parametri di tipo idraulico. La strutturazione di questo file è piuttosto semplice. Le prime tre righe sono disponibili per l’inserzione di eventuali commenti, mentre a partire dalla quarta riga verranno inseriti i dati necessari alla simulazione. I primi 50 caratteri di ciascuna riga non vengono letti al momento dell’elaborazione e possono pertanto contenere testi descrittivi, mentre ai valori numerici sono riservate le colonne dalla 51 alla 60. I parametri acquisiti con questo primo file di input sono:

- ✓ Durata della simulazione espressa in ore: che definisce l’arco di tempo complessivo della simulazione; deve essere superiore o uguale alla durata dell’idrogramma solido;
- ✓ Passo di integrazione temporale espresso in secondi: passo temporale d’esecuzione dei calcoli;
- ✓ Parametro alfa (calcolo sopraelevazioni): necessario per il calcolo delle sopraelevazioni in curva (capitolo 6, paragrafo 4);
- ✓ Coefficiente di deflusso per le luci a battente: questo parametro viene utilizzato in presenza di un ponte quando il livello supera la parte inferiore della soletta del ponte; può variare tra 0.3 e 0.6;
- ✓ Coefficiente di deflusso per lo stramazzo in parete grossa: questo parametro viene utilizzato in presenza di un ponte quando la colata defluisce al di sopra del ponte stesso; può variare fra 0.3 e 0.4.

Il secondo file richiesto è quello relativo all’idrogramma solido, a questo file è stata attribuita l’estensione *.por* (**Figura 3**).

DATI RIFERITI ALLE PORTATE		
	[.....]	[.....]
	Tempo (sec)	Portata (m ³ /s)
Portata t=1	0	5
Portata t=2	125	120
Portata t=3	500	5

Figura 3 – Esempio di file di input delle portate solide.

Attraverso questo file vengono forniti al modello i valori che descrivono l'idrogramma solido. Inizialmente era stata realizzata una procedura che descriveva l'idrogramma solido attraverso tre soli valori: la portata ad inizio evento, il valore al picco e quello di fine evento. Successivamente ci si è resi conto della scarsa aderenza alla realtà dell'idrogramma solido e quindi il modello è stato implementato introducendo una procedura, in cui l'idrogramma solido può essere descritto con un massimo di 50 punti, prevedendo la possibilità di inserire idrogrammi complessi, in cui sono presenti anche due o più picchi. Adottando questa nuova procedura è possibile introdurre idrogrammi solidi caratterizzati da una fase ascendente e una di esaurimento dell'evento a diversa ripidità. Nel caso dei debris flow la fase ascendente è generalmente caratterizzata da un'elevata pendenza: da uno stato di piena ordinaria si può passare, in pochi secondi, al valore di picco. Il limite di 50 punti per la descrizione dell'idrogramma solido può essere aumentata o diminuita in qualsiasi momento modificando opportunamente il programma sorgente.

Per quanto concerne la struttura del file *.por*, le prime tre righe sono lasciate ad eventuali commenti, mentre i dati necessari alla simulazione sono localizzati dalla terza riga in poi. I primi 20 caratteri sono disponibili all'inserzione di un eventuale commento; segue poi un valore numerico che rappresenta il tempo (dal carattere 21 al 30) e un valore numerico di portata (dal carattere 31 al 40).

Un po' più complesso è il file che descrive le sezioni del canale. Questo file con estensione *.sez*, che riserva le prime tre righe ad eventuali commenti, presenta dei blocchi strutturati di informazioni, ognuno dei quali descrive una singola sezione; ciascun blocco è separato dal successivo da una riga vuota (**Figura 4**).

PARAMETRI GEOMETRICI DELLE SEZIONI			
Descrizione generica: Rio Lenzi (Palù del Fersina-TN)			
Commento:	Sezione n. 1		
Identif. sez.:	1		
Tipo sez.:	1		
Pendenza:	0.1423		
Scabrezza:	2.0		
Curvatura:	0.0		
Distanza progr.:	0.00		
Coordinata X	Coordinata Y	Coordinata Z	
1	8.0000	0.00	1426.50
2	15.0000	0.00	1426.00
3	5.0000	0.00	1428.54
4	19.0000	0.00	1426.70
5	2.0000	0.00	1429.19
6	24.0000	0.00	1426.23
7	0.0000	0.00	1429.42
8	29.0000	0.00	1427.26
Commento:	Sezione n. 2		
Identif. sez.:	2		
Tipo sez.:	1		
Pendenza:	0.1343		
Scabrezza:	2.0		
Curvatura:	0.0		
Distanza progr.:	30.00		
Coordinata X	Coordinata Y	Coordinata Z	
1	14.0000	0.00	1422.02
2	21.0000	0.00	1422.17
3	13.0000	0.00	1422.99
4	22.0000	0.00	1422.72
5	12.0000	0.00	1422.60
6	23.0000	0.00	1422.55
7	9.0000	0.00	1423.61
8	24.0000	0.00	1423.51

Figura 4 – Esempio di file di input delle sezioni (sono rappresentate solo due sezioni).

Ciascuna sezione è descritta attraverso più righe, che possono essere distinte in due parti. La prima parte viene riservata alla descrizione dei parametri generici della sezione, e richiede i seguenti dati:

- ✓ Commento: spazio riservato ad una descrizione sintetica della sezione;
- ✓ Identificativo della sezione: valore alfanumerico per una più precisa individuazione della sezione in esame;
- ✓ Tipo di sezione: valore numerico. Con il valore 1 si indica la presenza di un canale aperto, mentre con 2 la presenza di un ponte;

- ✓ Pendenza: espressa in m/m e riferita al tratto di monte della sezione presa in esame;
- ✓ Scabrezza: scabrezza del tratto a monte rispetto alla sezione presa in considerazione. La scabrezza è espressa secondo il coeff. di Chezy adimensionale;
- ✓ Raggio di curvatura: riferita al tratto in esame. Per questo parametro è stata adottata la seguente convenzione: valore positivo o negativo a seconda che il canale subisca una deviazione verso destra o verso sinistra idrografica;
- ✓ Distanza progressiva espressa in metri: si riferisce alla distanza della sezione dall'apice del conoide o meglio, dal punto in cui si intende far iniziare la simulazione.

Le righe di dati sopra elencate prevedono le prime 20 colonne affidate ad un testo descrittivo di tipo alfanumerico, mentre i valori numerici sono presenti dalla colonna 21 alla 30. La seconda parte di questo blocco strutturato di informazioni, prevede la descrizione della sezione da un punto di vista geometrico. In fase di progettazione del software si è ritenuto più che sufficiente l'adozione di 8 punti per la descrizione della sezione (**Figura 5**).

I punti che compongono la sezione sono individuati nello spazio fisico da 3 coordinate. Adottando un sistema di riferimento relativo per ogni sezione ed ortogonale all'asse del corso d'acqua, un punto può essere descritto da due soli valori. Nel caso specifico è stata adottata la coordinata X per esprimere la distanza del punto da un'origine, arbitrariamente scelta, mentre la quota è espressa dalla coordinata Z. Quest'ultima può essere assoluta oppure essere riferita ad un piano relativo. Nella figura 4 compare una terza colonna relativa alla coordinata Y; in fase di progettazione infatti, è stata prevista la possibilità futura di inserire i dati in coordinate assolute.

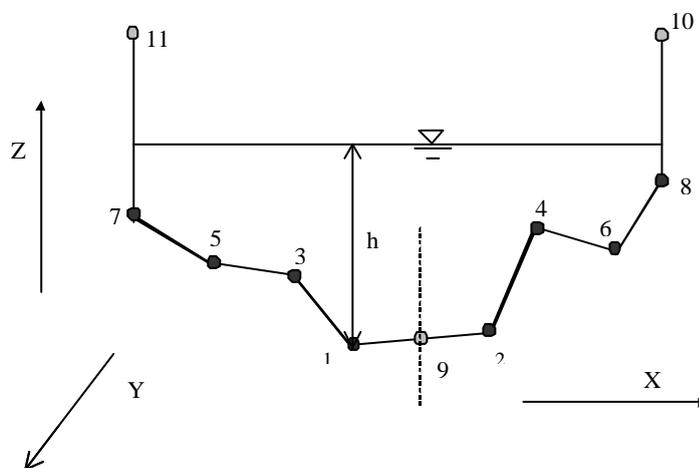


Figura 5 – Schematizzazione dei punti descrittivi della sezione (vista da valle).

Gli algoritmi utilizzati prevedono, nell'ambito di questo tipo di schematizzazione, la creazione di qualsiasi tipo di sezione, con eventuali zone depresse in corrispondenza dei punti 5 e 6. L'unico vincolo è rappresentato dalla necessità che, nella schematizzazione della sezione, le quote dei punti 3 e 4 siano inferiori a quelle dei punti 7 e 8.

Per agevolare i calcoli e per assecondare alcuni schemi geometrici adottati per il calcolo dell'area liquida e del contorno bagnato, il programma provvede al calcolo di altri tre punti: il punto 9 corrispondente alla mezzeria del corso d'acqua, e i punti 11 e 10 che rappresentano l'estremità di due ipotetici muri edificati al di sopra delle sponde per evitare eventuali fuoriuscite di sedimento.

La descrizione della sezione con 8 punti può essere limitante nel caso di sezioni complesse. In questi casi è opportuno provvedere ad una semplificazione della sezione scegliendone i punti più rappresentativi. Non è semplice fornire delle linee guida su quali punti scegliere e quali scartare, dato che i criteri possono variare in relazione alla sezione presa in esame, in ogni caso i punti 7 e 8 devono rappresentare i limiti esterni, superati i quali il flusso dà luogo ad una fuoriuscita in destra e sinistra.

Nel caso in cui vi sia la necessità di inserire un ponte in corrispondenza di una o più sezioni, il software richiede un ulteriore file di input. Tale file (estensione *.pon*) consente la descrizione dei parametri geometrici dei ponti presenti; nell'impostazione del modello è stata prevista, come unica tipologia, la presenza di ponti senza pile ad un'unica campata, con piano di calpestio anche non orizzontale (**Figura 6**).

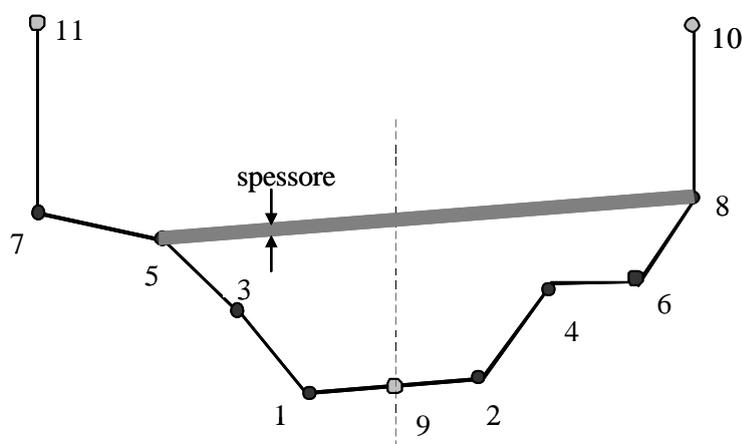


Figura 6 – Schematizzazione di una sezione in presenza di un ponte.

Anche in questo caso le prime due righe sono lasciate ad eventuali commenti e i dati riferiti a ciascun ponte sono separati fra di loro da una riga vuota (**Figura 7**). Per la descrizione di un ponte sono richieste le seguenti informazioni:

- ✓ numero ponte: codice identificativo del numero progressivo di ponti da monte verso valle;
- ✓ punto di appoggio in destra idrografica: il punto di appoggio della soletta in sponda destra; la soletta del ponte non può appoggiare in un tratto intermedio fra due punti;
- ✓ punto di appoggio in sinistra idrografica: il punto di appoggio della soletta in sponda sinistra;
- ✓ spessore della soletta del ponte espressa in metri: consente di definire l'area di ingombro della soletta.

DATI RIFERITI AI PONTI	
	[.....]
Numero ponte	1
Punto appoggio in destra	7
Punto appoggio in sinistra	8
Spessore soletta ponte (m)	0.50
Numero ponte	2
Punto appoggio in destra	7
Punto appoggio in sinistra	8
Spessore soletta ponte (m)	1.00
Numero ponte	3
Punto appoggio in destra	5
Punto appoggio in sinistra	4
Spessore soletta ponte (m)	1.20

Figura 7 – Esempio di file di input dei parametri geometrici dei ponti.

La fase di inserimento dati è affidata a delle apposite procedure attivate in modo indipendente da tasti specifici (**Figura 8**). I file di input devono rispettare rigorosamente le regole di tabulazione descritte. Per evitare gli inconvenienti relativi ad un erroneo inserimento dei dati di input sono stati predisposti dei controlli, in grado di individuare eventuali errori grossolani ed avvisare l'utente con dei messaggi. Il messaggio di errore è stato impostato in modo da fornire delle indicazioni sul parametro errato, inoltre la contemporanea

visualizzazione del file in input consente di localizzare rapidamente il problema. I controlli imposti sui dati di input consentono, pertanto, una prima validazione dei dati. Le singole procedure di acquisizione dati non eseguono nessuna elaborazione numerica significativa. La presenza di un eventuale errore o la mancanza di alcuni dati rende l'elaborazione impossibile.



Figura 8 – Sezione dell'interfaccia utente dedicata alla lettura dei dati necessari all'esecuzione della simulazione.

1.3. MODALITA' DI CALCOLO

L'inserimento di tutti i parametri richiesti per l'esecuzione della verifica idraulica del canale consente al software di procedere con la fase di calcolo. Il mancato inserimento di uno dei file d'input fondamentali, genera un messaggio di errore e non permette di poter procedere con l'elaborazione.

Nella fase realizzativa del software si è ritenuto opportuno prevedere due opzioni di calcolo. La prima prevede la sopraelevazione automatica delle sponde per 50 metri, in modo tale da evitare qualsiasi forma di fuoriuscita del materiale (punti 10 e 11 della **Figura 5**); è questa la modalità di calcolo confinata. La seconda ipotesi, invece, non prevedendo alcuna variazione geometrica della sezione, è in grado di fornire indicazioni sui sedimenti di uscita nelle varie sezioni, ossia di costruire l'idrogramma solido (overflow) del materiale che interessa il conoide. I calcoli vengono eseguiti distinguendo sponda destra e sinistra, mentre la somma definisce, ovviamente, la quantità di materiale che fuoriesce complessivamente in una determinata sezione.

E' possibile accedere alla fase di elaborazione solo se la validazione dei dati ha avuto esito positivo. Il software MODDS, rimanendo invariato lo schema di calcolo fondamentale

dell'equazione Muskingum-Cunge, consente di eseguire i calcoli in modalità confinata o in modalità non confinata (**Figura 9**).

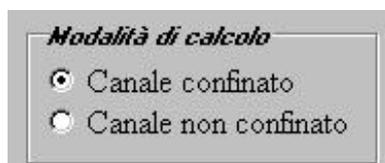


Figura 9 – Sezione dell'interfaccia utente dedicata al tipo di elaborazione.

Nel caso in cui l'utente scelga la modalità di calcolo *Canale confinato* il software provvede ad inserire, al di sopra dei punti 7 e 8 (**Figura 5**) di ciascuna sezione, dei "muri" verticali in modo tale da non permettere delle fuoriuscite di sedimento. Questo tipo di calcolo può essere molto utile quando, dato un certo idrogramma solido, si vuol conoscere la sopraelevazione da realizzare per ottenere un sufficiente margine di sicurezza. Nell'altro caso (*Canale non confinato*), quando il tirante supera la quota delle sponde (punto 7 e punto 8 di **Figura 5**), si attivano una serie di sottoprocedure per il calcolo della quantità di sedimento che fuoriesce.

Il passo temporale di calcolo fornito al modello è dell'ordine di alcuni secondi (generalmente inferiore ai 10 secondi), mentre l'idrogramma è descritto, generalmente, per punti significativi intervallati da alcuni minuti. Al fine di sincronizzare le due scale temporali, l'idrogramma solido viene interpolato in modo lineare ad intervalli pari a quelli richiesti dall'algoritmo di calcolo.

L'idrogramma solido fornito come dato di input transita attraverso la prima sezione senza possibilità di overflow anche nel caso in cui sia stata scelta l'opzione *Canale non confinato*, ciò perché la mancanza di dati relativi al tratto di monte non consente di eseguire nessun calcolo relativo ad un'eventuale fuoriuscita di sedimenti. Questa condizione è soddisfatta a partire dalla sezione numero 2 dove è possibile confrontare il livello raggiunto dalla corrente con la quota sommitale delle sponde. Solo attraverso il confronto fra due sezioni contigue il modello è in grado di calcolare la lunghezza del tratto in cui si verifica l'overflow distinguendo, come si è detto, fra sponda destra e sponda sinistra.

1.4. OUTPUT DEL PROGRAMMA

Gli output del software MODDS sono rappresentati da file di testo in cui l'utente può scegliere il diverso grado di dettaglio voluto. Una prima possibilità è rappresentata dalla riscrittura delle sezioni in cui, oltre ai parametri geometrici di input, sono accodati degli ulteriori valori di tipo idraulico quali l'area liquida, il contorno bagnato e la portata massima che la sezione è in grado di condurre in condizioni di moto uniforme.

Una seconda possibilità di output è rappresentata da un veloce riepilogo dei principali parametri forniti al modello, seguito dai valori di portata calcolati per ogni sezione ai vari istanti.

Infine, come ultima opzione, è possibile generare un file di testo contenente i valori di portata calcolati per ogni singola sezione ai diversi istanti, i valori di overflow in sponda destra, in sponda sinistra e quello complessivo, la velocità della corrente, il tirante, le sopraelevazioni in curva destra e sinistra, la larghezza al pelo libero e la lunghezza del tratto sfiorante fra due sezione successive, distinguendo fra sponda destra e sponda sinistra.

2. IL SOTTOMODELLO DFPDM (2-D)

2.1. CARATTERISTICHE DEL MODELLO

La simulazione della propagazione di colate detritiche in un bacino o in alcune particolari aree dello stesso, viene ottenuta attraverso l'applicazione di un modello distribuito che si appoggia ad un DEM dell'area esaminata. Il DEM (Digital Elevation Model) rappresenta la zona attraverso una discretizzazione raster della stessa in celle quadrate a cui viene associata una quota altimetrica. Le celle in cui viene suddivisa la zona, sono distinte dal modello in celle sorgenti e celle di conduzione del deflusso.

Le celle sorgenti, sono le celle del bacino in cui si immette l'idrogramma di entrata della colata. Nel caso in cui il modello DFPDM fosse abbinato ad un modello monodimensionale, le celle sorgenti sarebbero le celle adiacenti l'alveo percorso dalla colata detritica che sono soggette ad per prime ad esondazione. Le celle di conduzione sono quelle celle che ricevono il flusso di colata dalle celle adiacenti (sorgenti di sedimento).

Si definisce area sorgente, l'insieme delle celle sorgenti attivate in uno stesso istante con uguale idrogramma di entrata.

Durante il primo passo temporale della simulazione, solo le celle sorgenti sono interessate dal passaggio della colata, successivamente da queste prime celle inondate, la colata si propaga alle limitrofe. Queste ultime costituiscono le celle di conduzione di secondo ordine, che a loro volta possono propagare la colata detritica nelle celle confinanti e così via.

L'ordine assegnato alle celle di conduzione rappresenta perciò l'intervallo temporale corrispondente al periodo intercorrente tra lo stato asciutto e il passaggio del debris flow.

Il trasferimento di massa o di e di quantità di moto tra celle è governato da due meccanismi diversi.

Il primo di questi consente i trasferimenti di massa solo se la cella sorgente si trova ad una quota superiore o uguale rispetto a quella della cella ricevente. Il trasferimento di massa è dunque limitato dal fatto che il dislivello esistente tra la cella sorgente e la ricevente sia positivo. Un'altro vincolo imposto dal modello è che la massa trasferita da una cella ad un'altra deve essere inferiore alla totalità della massa disponibile ad essere trasferita (in conformità al principio di conservazione della massa).

La massa viene perciò trasferita (**Figura 10**) da una cella all'altra (a quota inferiore) secondo la legge del moto uniforme:

$$q_j = w_j C h (g h i)^{0.5}$$

Dove:

q_j Portata unitaria che defluisce dalla cella i -esima

C Coefficiente di deflusso

g Accelerazione di gravità (9.81 m/s^2)

h Tirante del fluido

i $\sin \vartheta$

ϑ Angolo tra l'orizzontale e la linea congiungente il centro di due celle vicine

w_j Peso relativo della cella i -esima = $\sin J_j / \sum \sin J_j$

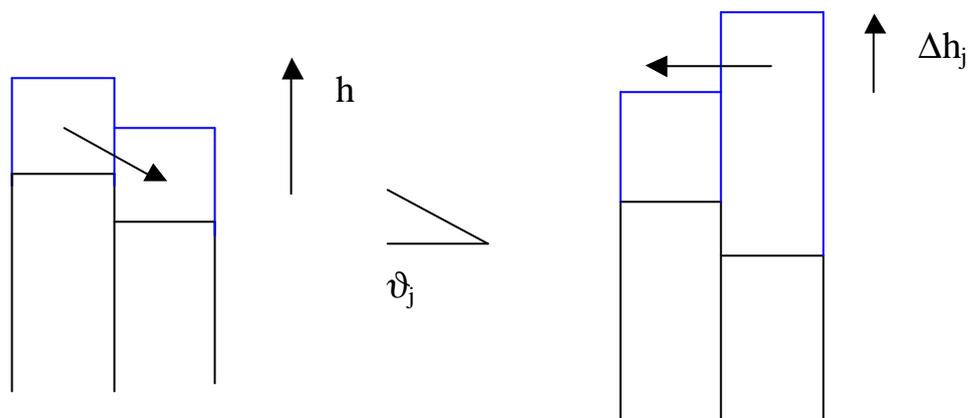


Figura 10 - Trasferimento di massa tra due celle vicine.

Il secondo meccanismo di trasferimento di massa segue la legge di deflusso dello stramazzo in parete grossa. La massa di una cella viene trasferita a quelle confinanti a quota più elevata ma con tirante minore, secondo la seguente equazione di portata:

$$q_j = w_j 0.385 (2g)^{0.5} \Delta h_j^{1.5}$$

Dove:

q_j Portata unitaria

Δh_j Differenza di livello del fluido tra la cella sorgente e la cella ricevente

w_j Coefficiente di peso = $\Delta h_j / \sum \Delta h_j$

Ogni cella può trasmettere la massa di fluido alla otto celle confinanti, così come illustrato nella **Figura 11**.

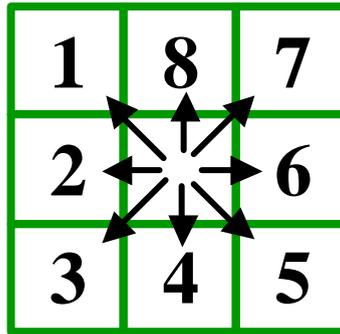


Figura 11 - Le plausibili direzioni di deflusso.

L'intervallo temporale delle simulazioni non è prefissato, ma è imposto dalle condizioni di contorno:

$$\Delta t = \Delta x / a < 1$$

Dove Δt è l'intervallo temporale di calcolo, Δx è la dimensione del lato della cella, ed a è la celerità dell'onda: $a = U + (g h)^{0.5}$

Il modello DDPM consente di simulare l'entrata di più idrogrammi da differenti aree, permettendo la contemporanea presenza di più celle sorgenti di deflusso. Ad ognuna delle celle raster assunte come celle sorgenti, può essere associato un idrogramma di deflusso diverso.

È importante segnalare come, nel momento della costruzione del raster del bacino, le celle di contorno debbano essere esterne alle celle costituenti il bacino.

2.2. PARAMETRI DI INPUT

Il modello è stato strutturato in modo tale da avere tre archivi di input per l'inserimento dei dati. I tre archivi sono file di testo con estensione *.txt*.

1. Il primo di questi (**Figura 12**) è predisposto all'inserzione delle caratteristiche generali della simulazione, e richiede i seguenti parametri:
2. La durata della simulazione (in secondi);
3. Il numero di intervalli di tempo della simulazione (numero intero);
4. Il numero di colonne del raster descrittivo del bacino (numero intero);
5. Il numero di righe del raster descrittivo del bacino (numero intero);
6. Il massimo numero di celle sorgenti attivate in un determinato istante con lo stesso idrogramma di entrata (numero intero);

7. Il massimo numero di celle di conduzione allagate in un determinato istante (numero intero);
8. Il numero di aree sorgenti o il numero di idrogrammi d'entrata (numero intero);
9. Il numero di Courant (numero reale e <1);
10. La dimensione del lato della griglia raster (numero reale, in metri);
11. La profondità del flusso di colata sotto quale la cella è considerata asciutta (numero reale, in metri);
12. Il DEM (archivio raster binario);
13. Il coefficiente di Chezy (numero reale); nell'opzione 0 si inserisce un solo valore di Chezy adimensionale costante per tutte il conoide, mentre nell'opzione 1 si inserisce un archivio raster binario con i numeri di Chezy adimensionale relativi ad ogni cella. Nella riga successiva si immette il valore numerico o la direzione dell'archivio raster.

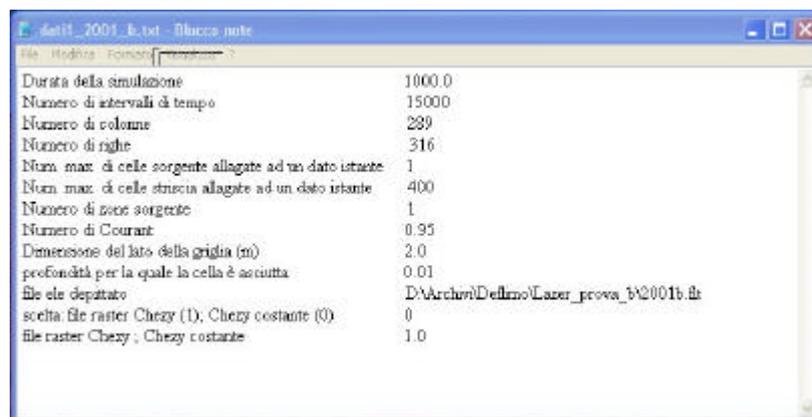


Figura 12 – File ascii di input delle caratteristiche generali della simulazione.

Il secondo degli archivi di inserimento dati (**Figura 13**) è stato predisposto per la descrizione delle aree sorgenti previste e richiede, per ognuna di esse:

1. Il numero di celle sorgenti di deflusso (numero intero);
2. L'indice delle colonne e delle righe delle celle sorgenti della zona;
3. Il numero di ascisse temporali dell'idrogramma corrispondente alla zona descritta (numero intero).

Le aree sorgenti devono essere inserite seguendo un ordine cronologico; l'area denominata *zona 1* sarà la prima ad essere inondata, e così via per le successive.

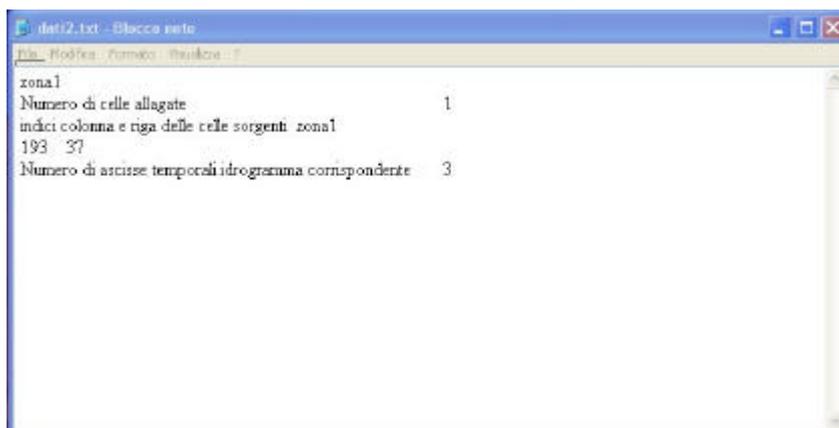


Figura 13 – File ascii di input per la definizione delle zone sorgenti del deflusso.

Il terzo ed ultimo archivio di input (**Figura 14**) richiede l’inserimento degli idrogrammi corrispondenti a ciascuna delle aree sorgenti. Per ognuno di questi è necessario introdurre la serie di coppie di dati tempo-portata. Anche in questo caso, i dati andranno inseriti seguendo lo stesso ordine di denominazione delle aree sorgenti.



Figura 14 – File ascii di input per la descrizione dell’idrogramma corrispondente ad ogni zona sorgente.

L’origine della coordinata temporale dovrà coincidere con l’origine della coordinata tempo del primo intervallo temporale del primo idrogramma. Nel caso in cui due distinte aree sorgenti fossero simultaneamente attivate, il modello provvederà a posticipare il secondo idrogramma di un intervallo temporale intero. La stessa procedura viene adottata nel caso in cui la separazione tra due idrogrammi successivi sia minore del passo temporale del modello, calcolato in base al numero di Courant.

Il numero massimo di celle di conduzione lungo il “canale di propagazione” è in genere minore del massimo tra il numero di righe e di colonne moltiplicati per 1,5.

2.3. MODALITA' DI CALCOLO

Il software DFPDM è provvisto di un'interfaccia utente semplice ed intuitiva. Una volta avviato il programma con un doppio click del tasto sinistro del mouse sull'icona *damocles.exe*, la schermata di presentazione del programma si presenta così come appare nella **Figura 15**.

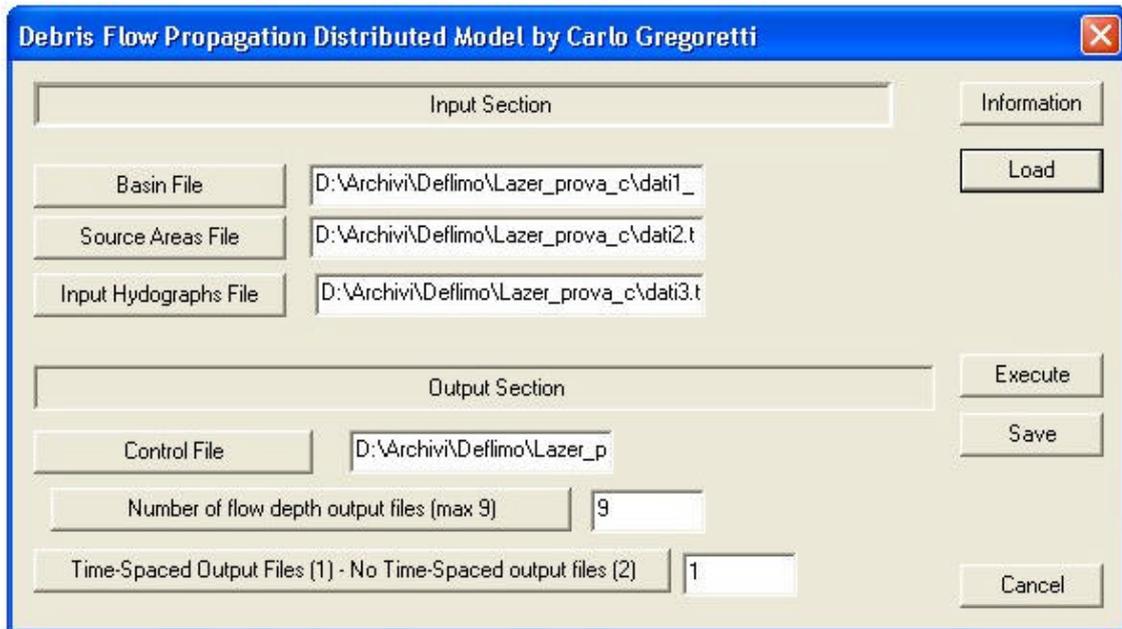


Figura 15 – L'interfaccia utente del software DFPDM.

I tre file di input dei dati andranno inseriti accanto ai pulsanti in rilievo identificati con *Basin File*, *Source Area File* ed *Input Hydrographs File*. Pigiando una volta con il tasto sinistro del mouse su detti riquadri, si accede ad una finestra di ricerca file con la quale sarà agevolmente possibile rintracciare e selezionare il file voluto. L'insieme dei tre archivi di input può essere salvato come progetto sotto forma di file di comando con estensione *.clm* per essere successivamente richiamato con un click del tasto destro del mouse sul pulsante *load* (**Figura 16**).



Figura 16 – Finestra di ricerca dei file.

Altre due informazioni di cui necessita il programma prima di poter procedere alla vera e propria fase di esecuzione, è la definizione del tipo di output richiesti. In particolare andranno precisati il numero dei file di profondità del flusso che il programma dovrà elaborare (con un massimo di 9). Il programma provvederà automaticamente alla produzione di questi file in relazione a momenti equispaziati nel tempo; nel caso in cui si vogliano produrre file di output riferiti a momenti precisi, dovrà essere scelta l'opzione 2 e dovranno essere inserite le coordinate temporali.

Completato l'inserimento dei dati di entrata, è poi possibile procedere all'esecuzione del programma clickando il pulsante *Execute* nella schermata iniziale (**Figura 15**).

Il modello DFPDM è stato predisposto per fornire all'utente alcuni messaggi di errore nel caso in cui uno o più dei file di input siano stati compilati incorrettamente, o con alcune imperfezioni tali da poter compromettere una corretta procedura di calcolo da parte del software. Una delle più comuni cause di aborto delle elaborazioni del software è addebitabile alla sovrapposizione coincidenza delle celle del bacino con quelle del contorno nel raster descrittivo del bacino.

Messaggi di errore sono previsti anche se il raster con i valori del coefficiente di Chezy non sia perfettamente sovrapponibile al DEM del bacino, nel caso in cui non si immetta nessun valore numerico del coefficiente di Chezy, se compaiono valori negativi tra i dati di portata o tra le coordinate temporali negli idrogrammi di input al programma, e infine

se ad una o più celle sorgenti vengono assegnate coordinate che ricadono all'esterno del raster del bacino.

2.4. OUTPUT DEL PROGRAMMA

Una volta terminata la fase di elaborazione, che può durare alcuni minuti in relazione al numero di file di profondità di flusso richiesti come output ed alla velocità di elaborazione del computer utilizzato verranno prodotti, nella stessa cartella in cui è stato salvato il file di comando con estensione *.clm*, gli archivi di restituzione della simulazione. Questi file di output sono:

1. Un archivio raster con la sequenza temporale di inondazione delle celle (*time_flooded_area.flt*);
2. Fino a nove archivi raster binari con i valori di altezza di inondazione di ogni cella (*flow_depth.flt*);
3. Fino a nove archivi raster binari con i valori di altezza totale di inondazione (quota + altezza di inondazione) di ogni cella (*total_height.flt*);
4. Un archivio in formato Ascii contenente messaggi di controllo ed errore.

Per poter visualizzare i file raster di output del programma DFPDM in un software GIS (in questo caso ArcView), è necessario creare previamente un file con estensione *.hdr* per ognuno degli archivi che si vogliono poi visualizzare nel GIS. La procedura consiste nel copiare il file *.hdr* del DEM del bacino, e rinominarlo con il nome dell'archivio di output del software DFPDM che si desidera visualizzare in ArcView.

Una volta ultimato l'iter descritto, si potrà agevolmente importare in ambiente GIS il file voluto, utilizzando la funzione *Import Data Source* (**Figura 17**).

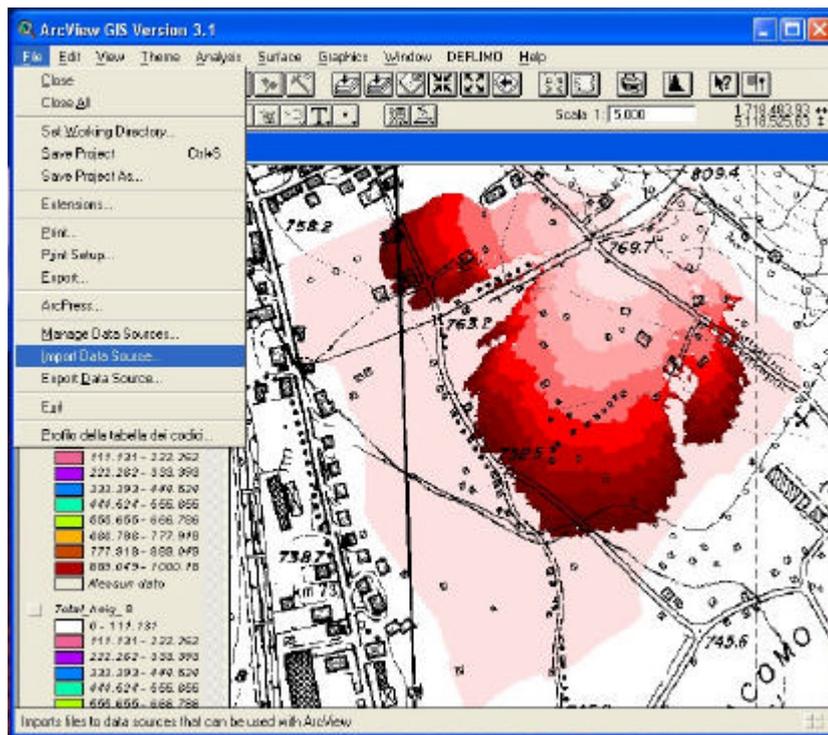


Figura 17 – Importazione dei file raster binari in ambiente GIS (I).

Selezionando la ricerca di file binari (Figura 18) e cercando poi l'archivio voluto con la finestra di ricerca che ArcView apre automaticamente, si dovrà scegliere il file voluto e un nuovo nome, con cui verrà salvato in una omonima cartella di lavoro.

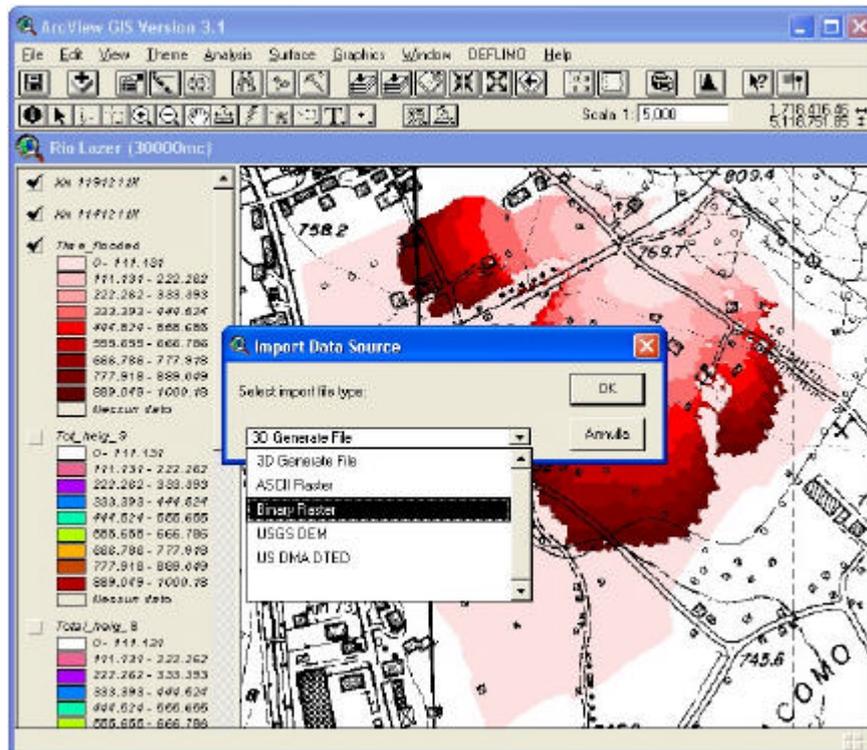


Figura 18 – Importazione dei file raster binari in ambiente GIS (II).

Conclusa questa fase di lavoro, sarà poi sufficiente cercare ed allegare in ambiente GIS, alla *view* di lavoro il *theme* corrispondente al file di output trasformato in archivio raster (Figura 19).

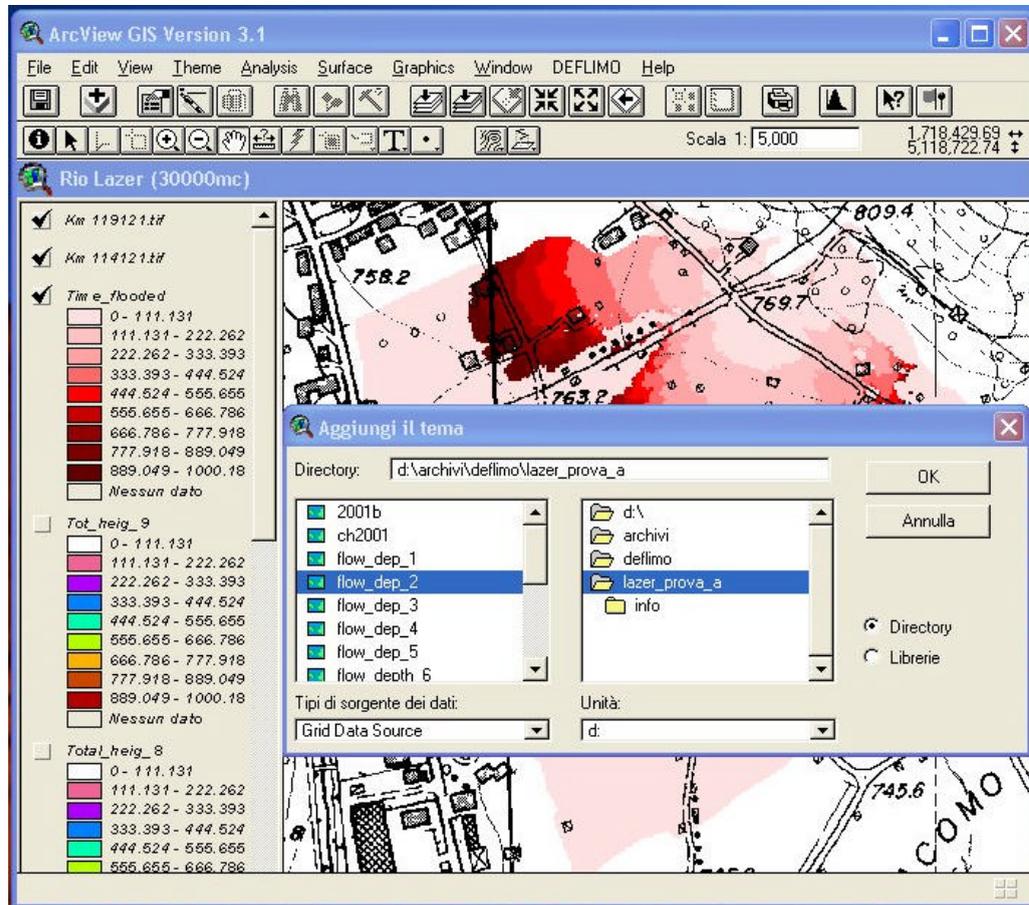


Figura 19 – Visualizzazione degli output del software DFPDM in ambiente GIS.

3. IL MODELLO DEFLIMO (DEBRIS FLOW IMPACT MODEL)

L'integrazione del modello monodimensionale MODDS con il modello bidimensionale DFPDM avvengono in ambiente GIS (in particolare, nel software ArcView 3.1), così come rappresentato schematicamente nella **Figura 20**.

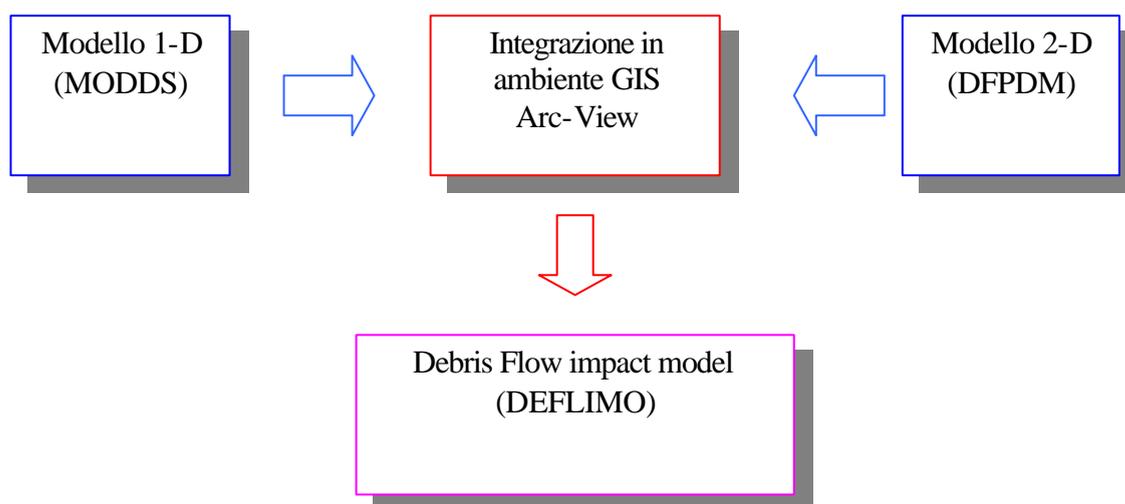


Figura 20 – Rappresentazione dell'integrazione dei modelli mono e bidimensionali in ambiente GIS.

E' perciò possibile convertire gli output delle elaborazioni del modello 1-D in una rappresentazione raster del conoide soggetto al passaggio di una colata detritica, come supporto alla visualizzazione dei risultati ottenibili dall'applicazione del modello bidimensionale.

Il vantaggio principale dell'integrazione dei due modelli in ambiente GIS, è la possibilità di relazionare i risultati del modello 1-D (direzioni vettoriali di propagazione della colata lungo il canale) con quelli del modello 2-D, costituiti da file raster. Inoltre, risulta semplice ed immediata la visualizzazione della propagazione del flusso di colata lungo il canale e la sua successiva evoluzione e sedimentazione nel conoide. La procedura di lavoro in ArcView può essere distinta in due fasi.

Nella prima, il programma elabora i file vettoriali di output del modello MODDS, ed è in grado di visualizzare e georeferenziare le sezioni del canale e le vie di esondazione, nonché di identificare se l'esondazione interessa il lato destro, sinistro o entrambi i lati del canale simultaneamente (**Figura 21**). Infine, il modello DEFLIMO fornisce il numero e la posizione delle celle lungo il profilo del canale in cui si verifica una esondazione (**Figura 22**).

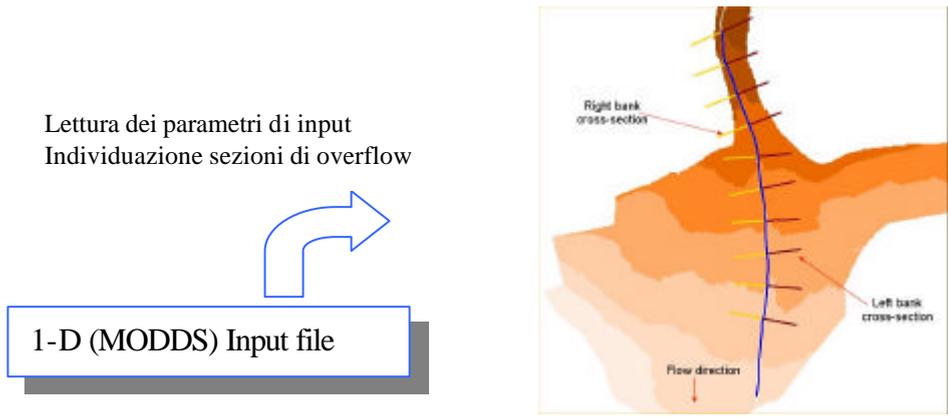


Figura 21 – File vettoriali di output del modello 1-D (MODDS).

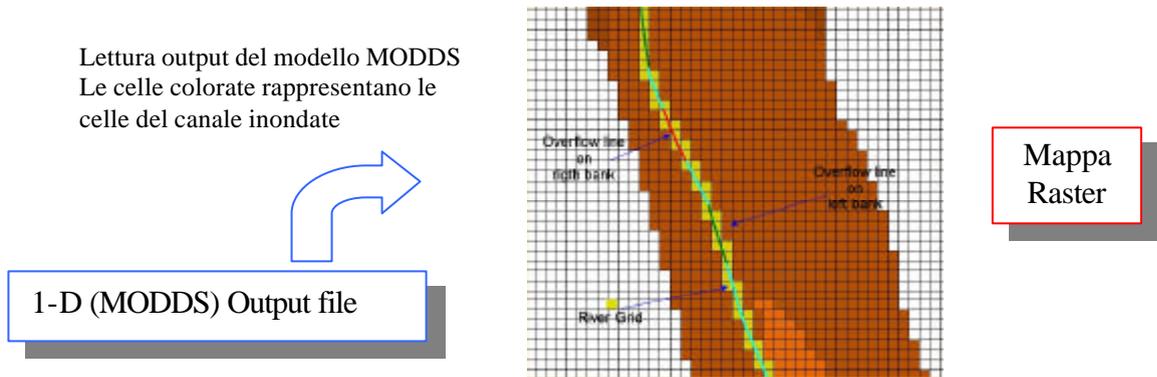


Figura 22 – Procedura di elaborazione del GIS ArcView a partire dai file vettoriali prodotti dal modello 1-D.

Nella seconda fase, il modello 2-D utilizza come dati di input alle sue elaborazioni le celle di esondazione lungo il canale, ottenute dal modello 1-D durante la prima fase del lavoro. L'utilizzo del GIS consente, quindi, di visualizzare i risultati dell'elaborazione effettuata con il modello DFPDM in forma di mappa raster delle aree soggette ad inondazione (Figura 23).

- ✓ Visualizzazione dei tratti di overflow
- ✓ Conversione vector-raster
- ✓ Definizione delle aree sorgenti (input per il modello 2-D)

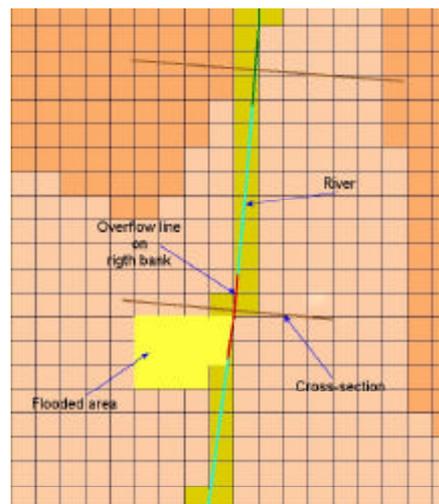


Figura 23 – Mappa raster delle aree inondate.

La dinamica dell'evoluzione temporale del processo di accumulazione dei sedimenti nel conoide, viene resa graficamente in ambiente ArcView grazie ad una serie (massimo 9) di mappe di inondazione istantanee, restituite per diversi e predefiniti intervalli temporali.

DEFLIMO può essere impiegato come software d'integrazione fra i modelli 1-D e 2-D per una rappresentazione raster del cono di sedimentazione, tuttavia è possibile impiegare separatamente i due modelli. Nel primo caso vengono calcolate le celle di overflow e viene restituito un file nel quale sono riportati i valori di portate ed altezze di inondazione per ogni sezione ed in ogni istante Δt . Nel secondo caso, il modello DEFLIMO funge da supporto alle elaborazioni del modello 2-D, che richiede come input i dati delle condizioni al contorno (portate di esondazione e posizione nel raster del bacino delle celle in cui si verificano tali fuoriuscite).

4. APPLICAZIONI E CASI DI STUDIO

4.1. APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO MODDS AL BACINO DEL TORRENTE SAHUN

Nell'ambito dell'attività del progetto DAMOCLES è stato studiato il bacino del torrente Sahun, allo scopo di definire i volumi potenzialmente mobilizzabili da un evento estremo, e verificare idraulicamente il tratto terminale del corso d'acqua (conoide), individuando le zone di fuoriuscita della corrente e le probabili distanze di arresto.

Il bacino del torrente Sahun è localizzato nella regione pirenaica della penisola iberica, e si estende sulle pendici sud orientali del Pico de Cierco (2628 m s.l.m.). Nel corso degli anni, il torrente in questione ha edificato un conoide di medie proporzioni, a testimonianza dell'intensa attività torrentizia esercitata in passato.

Scopo dell'indagine è stato quello di quantificare, nel modo più attendibile possibile, le portate liquide, oltre che di fornire delle stime sulla tipologia di evento atteso. Inoltre, lo studio ha previsto l'applicazione del modello MODDS, al fine di individuare le sezioni critiche e le possibili zone alluvionabili.

Dopo una preliminare fase di studio del bacino, con un sopralluogo sull'area di studio (Settembre 2001), si è proceduto all'analisi morfometrica del bacino e alla stima delle portate liquide calcolate per diversi tempi di ritorno. A partire dalle portate liquide sono state dedotte le potenziali portate solide associate; si è quindi proceduto all'individuazione delle sezioni idraulicamente poco efficienti o inefficienti. Le sezioni descrittive del tratto di corso d'acqua attraverso il conoide sono state estratte dal piano quotato realizzato dal Servizio Geologico di Madrid. La verifica idraulica delle singole sezioni e la quantificazione dei volumi fuoriuscenti è stata eseguita con il software MOODS, di recente realizzazione ed appositamente progettato per la simulazione di eventi da colata detritica (debris flow).

4.1.1. CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA

Il torrente Sahun prende origine dalle pendici sud orientali della catena montuosa Tuca de Cambra – Pico Eriste. La rete idrografica è composta dall'asta principale e da una serie di affluenti, molti dei quali di natura effimera, che drenano la testata del bacino.

Nello studio del bacino idrografico del torrente Sahun è stata scelta come sezione di chiusura l'apice del conoide (1200 m s.l.m. circa). A partire da questo punto lo spartiacque risale il versante destro prima con direzione Ovest fino ad arrivare al monte San Pedro Martin (1622 m s.l.m.) e poi con direzione Nord Ovest fino al monte Tuca de Cambra (2535 m s.l.m.). Da qui la dislivello cambia direzione orientandosi verso Est, passa per il Paso La Liastra (2330 m s.l.m.) e raggiunge il Pico Eriste (2118 m s.l.m.), per poi cambiare nuovamente direzione, orientandosi verso Sud e ricongiungendosi con la sezione di chiusura.

L'assetto vegetazionale presente all'interno della zona analizzata (**Figura 24**) è condizionato dalla fertilità e dalla morfologia dei terreni, nonché dalle pratiche silvo-pastorali ed agricole passate e presenti. Nella parte alta del bacino, dove le condizioni morfologiche e climatiche si fanno più severe, sono presenti pascoli alternati a zone di improduttivo. A quote inferiori la maggiore potenza del soprassuolo e le condizioni microclimatiche più favorevoli hanno consentito l'insediamento di specie arbustive e arboree. Qui la specie dominante è rappresentata dal pino uncinata. Scendendo a quote inferiori si incontrano specie tipicamente mediterranee (leccio, ginestre, erica arborea, orniello, ecc.)

Nella **Tabella 1** si riporta l'estensione delle varie categorie d'uso del suolo e l'indice di boscosità del bacino idrografico analizzato.

CLASSI DI USO DEL SUOLO	AREA (km²)	AREA (ha)	%
Pascoli	0.928	92.85	28.47
Bosco di pino uncinata	0.647	64.69	19.85
Bosco misto di latifoglie	1.685	168.49	51.68
TOTALE	3.260	326.03	100.00
Coefficiente di boscosità		71.53 %	

Tabella 1 - Estensione delle varie categorie di uso del suolo ed indice di boscosità.

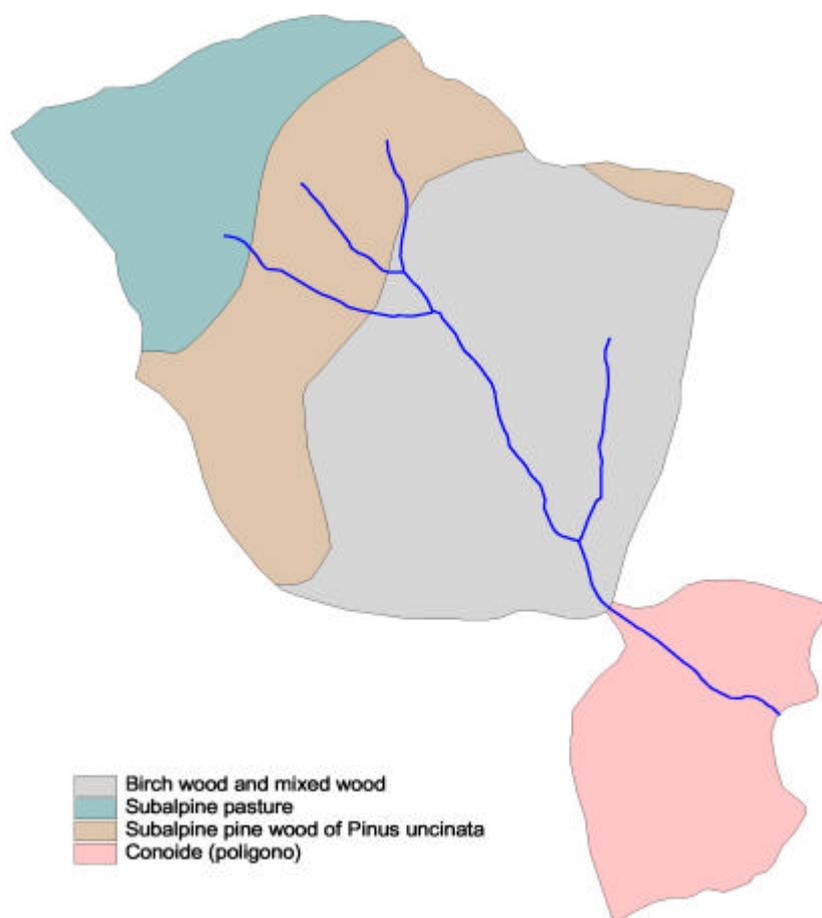


Figura 24 – Assetto vegetazionale del bacino del torrente Sahun.

Il bacino del Rio Sahun insiste su di una superficie di 3.26 km² e presenta un reticolo idrografico piuttosto semplice costituito dall'asta principale e da una serie di piccoli affluenti, molti dei quali di natura effimera (**Foto 1**). Proprio le vallecole incise da questi corsi d'acqua effimeri, rappresentano nel periodo invernale percorsi preferenziali per le valanghe.

L'asta principale non presenta nessuna opera di consolidamento trasversale o laterale. L'abbondante vegetazione presente in alveo, specie nel tratto su cui insiste il conoide, può costituire un problema al deflusso in caso di piena.

Le morfologie d'alveo osservate durante il sopralluogo evidenziano un certo equilibrio dell'alveo, testimoniato da numerosi affioramenti rocciosi e da strutture a gradinata o step pool.

Il bacino in esame non presenta visivamente delle condizioni di elevata instabilità, tuttavia sono state individuate una serie di zone che possono configurarsi come sorgenti di sedimenti. Alcune di queste sono strettamente a contatto con il reticolo idrografico, altre invece, localizzate un po' più lontano, contribuiscono in misura minore all'alimentazione solida dell'alveo.



Foto 1 – Visione d’insieme del bacino idrografico del torrente Sahun.

La morfologia attuale del bacino del torrente Sahun (**Figura 25**) deriva dall’azione modellatrice prima dei ghiacciai quaternari, e successivamente dall’opera delle acque incanalate. Nella **Tabella 2** si riportano le formazioni geologiche presenti all’interno del bacino analizzato.

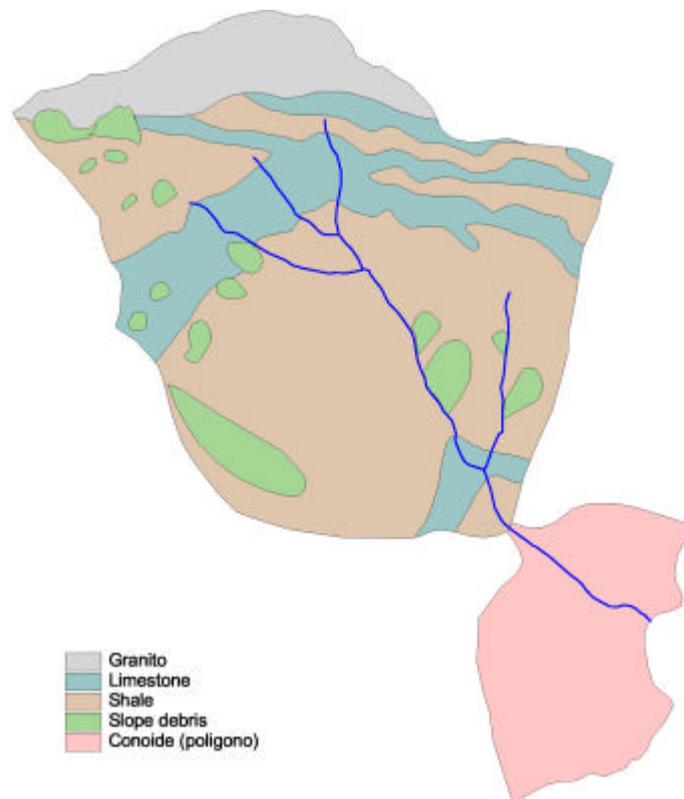


Figura 25 – Mappa geologica del bacino del torrente Sahun.

FORMAZIONI	AREA (km²)	AREA (ha)	%
Granito	0.367	36.74	11.27
Calcari grigi	0.714	71.40	21.91
Argilla	1.922	192.28	58.98
Accumuli di versante	0.255	25.59	7.84
TOTALE	3.260	326.00	100.00

Tabella 2 – Estensione superficiale delle varie classi litologiche presenti all'interno del bacino.

4.1.2. ANALISI DELLA PORTATA MASSIMA DI PIENA

Il calcolo del picco di piena è stato eseguito adottando il metodo razionale. I valori forniti dai collaboratori del Servizio Geologico di Madrid indicavano, per il bacino in questione, un tempo di corrivazione di poco inferiore 12 minuti. Tale valore è stato ricalcolato utilizzando la formula proposta da Giandotti, attraverso la quale si è ottenuto il tempo di corrivazione di 21 minuti circa.

Le analisi delle precipitazioni incidenti nella zona di indagine, stimano la precipitazione critica pari a 48 mm circa. Utilizzando questi valori e un coefficiente di deflusso pari 0.168 è stata ottenuta una portata di 20.52 m³/s per un tempo di ritorno di 50 anni. Il valore fornito dai colleghi spagnoli per il medesimo tempo di ritorno è pari a 24.60 m³/s. Entrambi i valori sono stati utilizzati per il calcolo dell'idrogramma solido.

4.1.3. ANALISI DEL CONOIDE

Il torrente Sahun ha edificato un conoide di medie proporzioni, dimensionalmente proporzionale all'area drenata a monte. Il rapporto intercorrente fra l'area del bacino e l'area del conoide fornisce un valore di 5,5. I principali parametri che descrivono il conoide in questione sono riportati nella **Tabella 3**.

Il valore dell'indice di Melton, se messo in relazione alla pendenza del conoide espressa in gradi, fornisce delle indicazioni sulla tipologia di fenomeni, che hanno generato il conoide stesso. Questo tipo di analisi fanno rientrare il conoide edificato dal torrente Sahun fra quelli generati da colate detritiche; non è da escludere, quindi, che si possano verificare ancora eventi di questo tipo.

Parametri	Valore
Superficie	0.80 km ²
Lunghezza	1.27 km
Pendenza media del conoide	13.00 %
Quota massima	1200.00 m s.l.m.
Quota minima	1030.00 m s.l.m.
Lunghezza del collettore	0.83 km
Numero di Melton	0.74 -
Numero degli attraversamenti	2 -

Tabella 3 – Principali parametri morfometrici che caratterizzano il conoide del torrente Sahun.

Le strutture morfologiche del conoide sono state profondamente alterate nel corso degli anni dall'espansione degli insediamenti residenziali, ma soprattutto a causa delle attività di dissodamento del terreno per la messa a coltura o pascolo dei suoli circostanti. Tali attività hanno cancellato le originali forme geomorfologiche tipiche degli eventi che hanno generato il conoide stesso. Attualmente la superficie occupata da fabbricati ad uso residenziale è pari a 3.92 ha, (5.49% della superficie del conoide), mentre la restante parte (94.51%) è utilizzata a fini agricoli, soprattutto per la produzione di foraggio e per il pascolo del bestiame nelle aree marginali meno fertili. Tale assetto ha impedito la realizzazione di un'analisi morfologica di dettaglio che permettesse di individuare le strutture tipiche dell'accrescimento per debris flow.

4.1.4. ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO

Come evidenziato dal valore dell'indice di Melton, nel bacino preso in considerazione si possono potenzialmente verificare degli eventi di trasporto di massa o debris flow. Allo stato attuale, il detrito trascinato a valle deriverebbe prevalentemente dal sedimento presente in alveo e i dai contributi più o meno elevati dalle zone sorgenti localizzate a ridosso dell'alveo.

Date queste premesse sulle possibili fonti di sedimento, la quantificazione del volume potenziale che il bacino sarebbe in grado di produrre in caso di evento estremo è stato stimato con le formule, riportate in **Tabella 4**, che si ritrovano nella letteratura tecnica. L'attendibilità di questi valori è poi stata valutata in modo oggettivo e verificata con un sopralluogo specifico.

Formulazione	Valore	
$M = 13600A^{0.61}$	Takei (1986) 27953 m ³	
$M = K_b A i$	Kronfellner-Kraus (1984) 79683 m ³	
$M = 29100A^{0.67}$	D'Agostino, Cerato, Coali (1996)	
$M = 211A i^{1.3}$		57212 m ³
$M = (667e^{-0.005A}) A i$		64139 m ³
$M = 45A^{0.9} i^{1.5} (I.G.)$		50933 m ³
$M = 334A i^{1.3} (I.T.)^{-0.6}$		90563 m ³
$M = 39A i^{1.5} (I.G.) (I.T.)^{-0.3}$		49676 m ³
$M = 70000A$	Marchi 228200 m ³	

Tabella 4 – Formulazioni empiriche per la stima del volume potenziale di produzione solida che un bacino idrografico è in grado di generare.

Per il calcolo dei volumi potenziali sono stati utilizzati i valori riportati nella tabella seguente (**Tabella 5**).

Parametri	Valore
Area del bacino (A)	3.26 km ²
Pendenza media del collettore (i)	30.00 %
k ₁ (per il calcolo di K _b)	845
k (per il calcolo di K _b)	0.011
Indice geologico (I.G.)	2.38
Indice di trasporto (I.T.)	1

Tabella 5 – Parametri utilizzati per l'applicazione delle formule della tabella 4.

Mediando i valori ottenuti, e soprattutto considerando le effettive potenzialità di erosione nel bacino analizzato, si stima che il volume movimentabile sia quantificabile in 58000 m³. Si tratta di un volume raggiungibile solo in caso di evento estremo, con tutte le sorgenti di sedimento attivate; pertanto per eventi intensi ma non eccezionali, ci si possono

ragionevolmente attendere volumi inferiori. Per questo motivo, anche sulla base delle considerazioni effettuate *de visu* durante il sopralluogo, si ritiene più veritiero un volume di 40000 m³.

4.1.5. ANALISI DEGLI ATTRAVERSAMENTI E DELLE SEZIONI CRITICHE

Gli attraversamenti aerei presenti all'interno dell'area indagata sono due. Le loro principali caratteristiche geometriche sono riportate nella seguente **Tabella 6**.

Tipo	Luce (m)	Franco minimo (m)	Franco massimo (m)	Note
Ponte	12.00	2.17	3.00	Ponte all'apice del conoide
Ponte	11.40	0.00	9.60	Ponte sulla strada nazionale

Tabella 6 – Principali caratteristiche geometriche degli attraversamenti lungo il torrente Sahun nel tratto di area indagata.

Dalle analisi condotte emerge dunque, la possibilità per il Torrente Sahun di generare colate detritiche. Per individuare nel dettaglio le zone soggette a pericolo di alluvionamento, è stato eseguito un rilievo topografico specifico, con lo scopo di definire la geometria del canale dall'apice del conoide fino alla confluenza. In totale sono state estratte dal piano quotato 40 sezioni e il profilo longitudinale del tratto d'alveo soggiacente al conoide.

Nell'ipotesi di colata detritica, il picco di piena della portata solida è stato determinato adottando un metodo di tipo volumetrico a partire dalla portata liquida, come documentato in letteratura tecnica da numerose ricerche. In genere, tali metodi determinano la portata solida a partire da quella liquida secondo un fattore moltiplicativo variabile fino a 20 (Hashimoto, 1978). Nel caso specifico del Torrente Sahun, considerando il grado di dissesto e le condizioni generali del bacino, si è deciso di adottare un coefficiente pari a 8. Secondo quest'ipotesi il valore al picco della portata solida è quello riportato nelle sottostanti tabelle (**Tabelle 7 e 8**).

Q_l Tr 50 anni	Q_s Tr 50 anni
20.52 m ³ /s	164.00 m ³ /s

Tabella 7 – Stima dei valori di picco della colata detritica, dedotti dai valori liquidi nell'ipotesi di progetto (Prima ipotesi).

Q_l Tr 50 anni	Q_s Tr 50 anni
24.60 m ³ /s	197.00 m ³ /s

Tabella 8 – Stima dei valori di picco della colata detritica, dedotti dai valori liquidi nell'ipotesi di progetto (Seconda ipotesi).

Per la mappatura delle zone di pericolo da debris flow in un conoide alluvionale è necessaria, in prima istanza, la simulazione di ciò che avviene all'interno del canale principale. In particolare è necessario simulare la propagazione dell'onda di piena lungo il canale, la quale cambia forma e si lamina per effetto dell'invaso di parte dell'onda nel canale stesso e per effetto delle eventuali fuoriuscite di materiale nelle sezioni insufficienti alla conduzione del deflusso.

Per la simulazione degli eventi attesi è stato utilizzato il modello matematico (MODDS) di recente realizzazione (Sonda, 2001). Si tratta di un modello matematico unidimensionale di propagazione delle colate detritiche, di tipo parabolico, in grado di individuare le sezioni insufficienti al deflusso e di quantificare le onde detritiche che fuoriescono dal collettore principale, distinguendo fra sponda destra e sponda sinistra.

Le simulazioni sono state condotte, oltre che per i due valori di portata solida al picco precedentemente calcolati, anche ipotizzando due possibili scenari: nel primo si ipotizza un mancato rientro del materiale a valle del ponte posto all'apice del conoide, mentre nel secondo scenario si prevede un parziale rientro del materiale. Per quest'ultimo caso, si è cautelativamente valutato che il picco di piena, a seguito della fuoriuscita in corrispondenza del ponte all'apice del conoide ed ai fenomeni di rientro a valle della corrente, subisca un'attenuazione del 40%. In virtù di questi due distinti scenari e dei due diversi valori di portata solida sono state eseguite 4 simulazioni.

Le simulazioni così condotte hanno evidenziato l'insufficienza della sezione in corrispondenza del primo ponte (sez. 15). Tale sezione infatti, con un'area utile di 33.80 m², è in grado di assicurare il deflusso solo per portate inferiori a 135 m³/s. Il ponte posto sulla strada nazionale, complice la maggiore ampiezza e la pendenza del fondo (in roccia) è in grado di smaltire una portata molto superiore (fino a 586 m³/s), tanto da non generare esondazioni laterali.

L'applicazione del modello MODDS ha inoltre evidenziato l'insufficienza di alcune sezioni intermedie, del tutto naturali e prive di opere antropiche in alveo. In particolare il tratto a monte del ponte posto all'apice del conoide (sez. 16), oltre a presentare una brusca variazione planimetrica, è caratterizzato da una sezione poco contenuta, favorendo una esondazione (prevalentemente nella sponda destra).

Con riferimento alla prima ipotesi (picco di portata solida 164 m^3), sono stati stimati dei volumi fuoriuscenti di circa 11000 m^3 in sponda destra e 750 m^3 in sponda sinistra (**Figura 26**). Per il materiale fuoriuscente in sponda sinistra, la morfologia dei luoghi presenta un prato abbastanza pianeggiante e in grado di contenere il materiale, mentre in sponda destra la corrente si troverebbe a defluire in un'area di parcheggio. In quest'ultimo caso, applicando la formula della distanza di arresto di Ikeya (1984) si ottiene un valore di lunghezza coperta compresa fra 70 e 120 m. (pendenza del parcheggio circa 5%).

L'estensione complessiva del parcheggio è di circa 80 m e vi è quindi la possibilità che correnti secondarie rientrino nell'alveo principale. Da qui la necessità di prevedere il secondo scenario, che prevede il rientro della corrente a valle del ponte posto all'apice del conoide (**Figura 27**).

Altri tratti critici si localizzano nel tratto compreso fra i due ponti. In sponda destra si registrano delle fuoriuscite molto limitate (circa 150 m^3) (Sez. 24-25-26), mentre nella sinistra idrografica, in corrispondenza di un tratto d'alveo poco inciso, si osservano valori di fuoriuscita molto elevati. In un primo tratto (Sez. 27-28-29-30) è stato stimato un volume di fuoriuscita di circa 3300 m^3 , mentre in un secondo tratto più a valle (Sez. 33-34-35), localizzato circa 70 m a monte del ponte della strada nazionale, circa 12000 m^3 .

L'applicazione della formula sulla distanza di arresto di Ikeya (1984) stima la distanza raggiunta dalla colata variabile fra i 150 e 200 m. Nell'ipotesi in cui tale situazione dovesse realmente verificarsi, la corrente acquisirebbe un'energia sufficiente per incanalarsi lungo la strada podereale e raggiungere la strada nazionale, generando concretamente una condizione di pericolo.

Assumendo un valore di portata solida al picco pari a $197 \text{ m}^3/\text{s}$, le sezioni insufficienti alla conduzione della colata rimangono invariate, generando però dei volumi di fuoriuscita maggiori (**Figure 28 e 29**).

A partire dai risultati così ottenuti è stata elaborata una prima mappa del pericolo da colata detritica (**Figura 30**). Tale mappa è da considerarsi provvisoria, dato che una zonizzazione più raffinata richiederebbe ulteriori indagini nel sito, in particolare per ciò che

riguarda la definizione delle direttrici di deflusso. Queste ultime non sono purtroppo deducibili dal rilievo topografico, a causa del suo scarso dettaglio.

L'indagine dovrebbe essere completata sia da un'indagine storica relativa alle catastrofi provocate dalle colate e dai fenomeni di piene intense verificatesi nel passato, che dall'analisi idrologica delle piogge intense e sulla generazione di idrogrammi di piena con diversi tempi di ritorno.

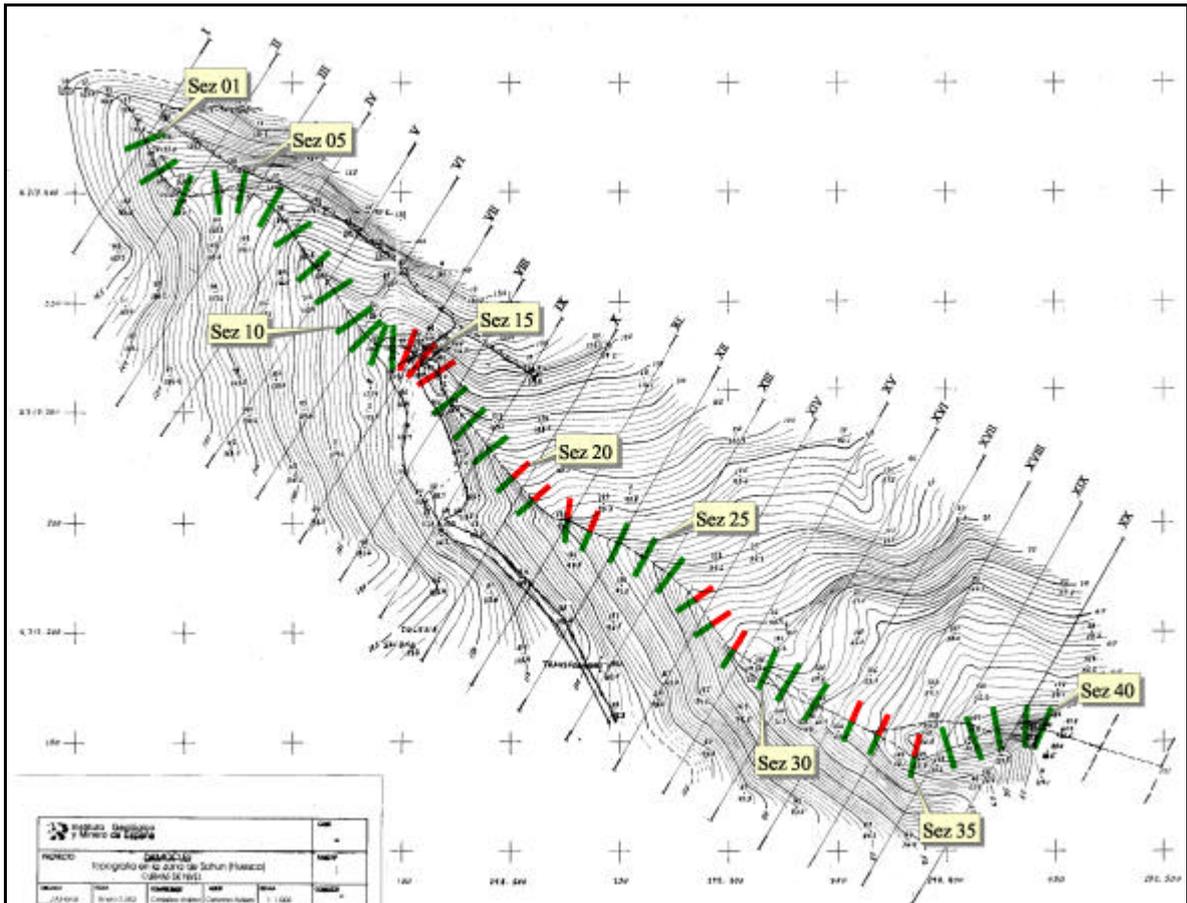


Figura 26 – Simulazione condotta ipotizzando il non rientro del materiale a valle della sezione 15 (ponte); portata al picco $164 \text{ m}^3/\text{s}$. In rosso le sezioni in cui si ha overflow.

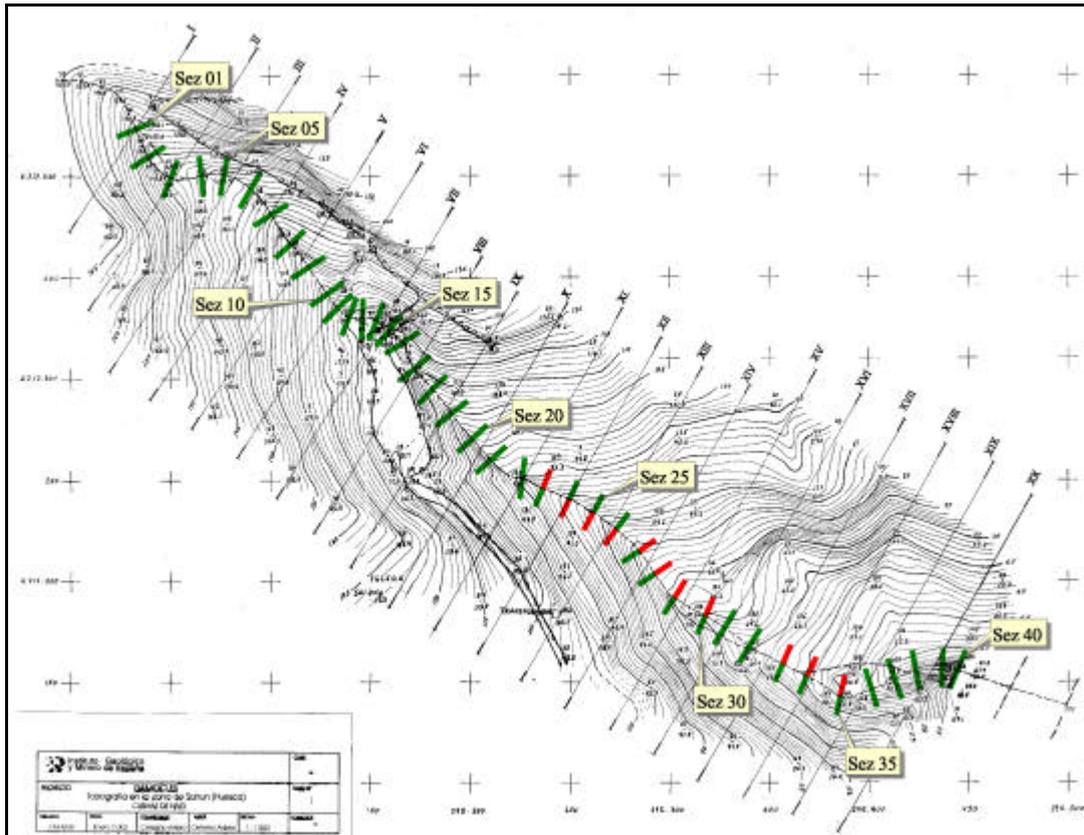


Figura 27 – Simulazione condotta ipotizzando il rientro del materiale a valle della sezione 15 (ponte); portata al picco $98 \text{ m}^3/\text{s}$. In rosso le sezioni in cui si ha overflow.

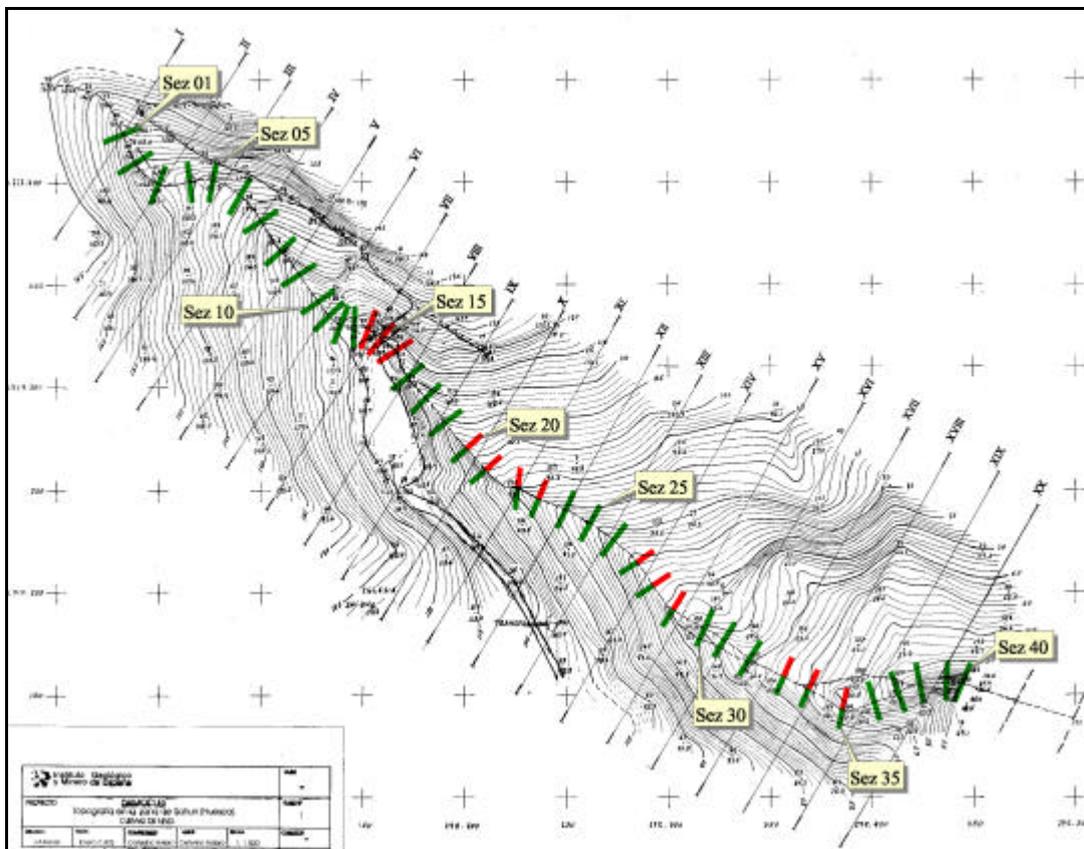


Figura 28 – Simulazione condotta ipotizzando il non rientro del materiale a valle della sezione 15 (ponte); portata al picco $196 \text{ m}^3/\text{s}$. In rosso le sezioni in cui si ha overflow.

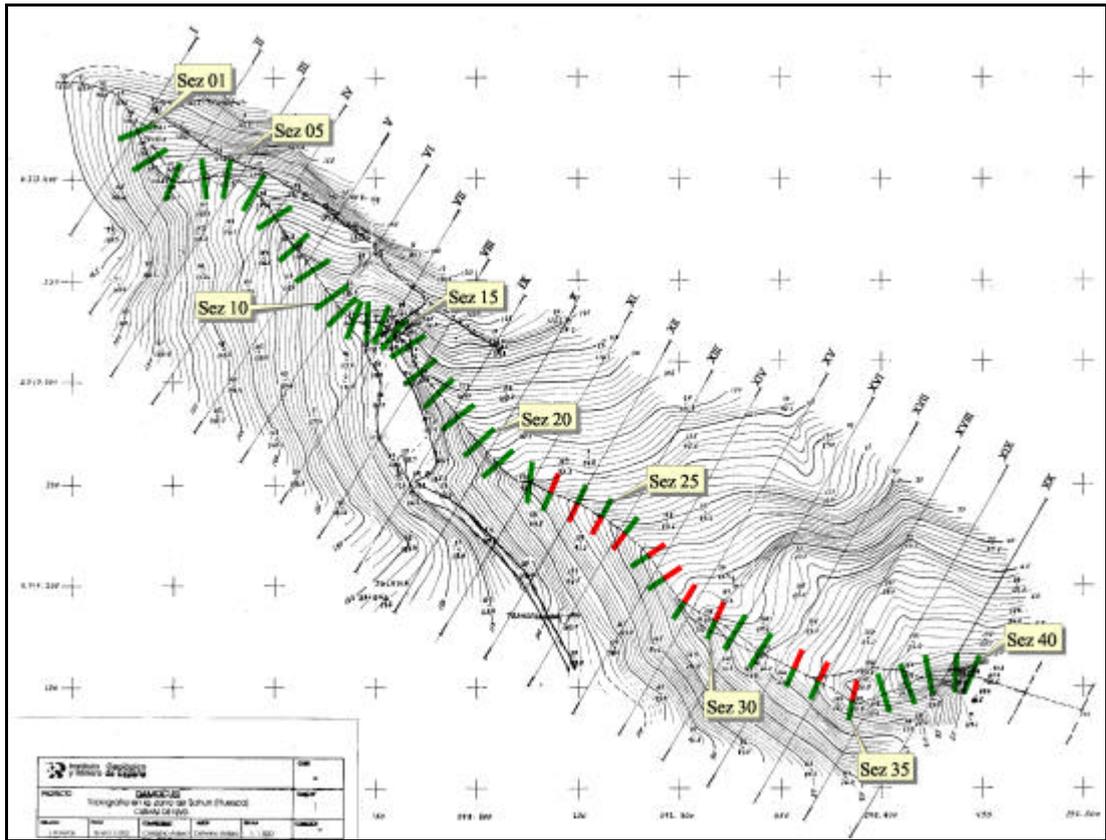


Figura 29 – Simulazione condotta ipotizzando il rientro del materiale a valle della sezione 15 (ponte); portata al picco $118 \text{ m}^3/\text{s}$. In rosso le sezioni in cui si ha overflow.

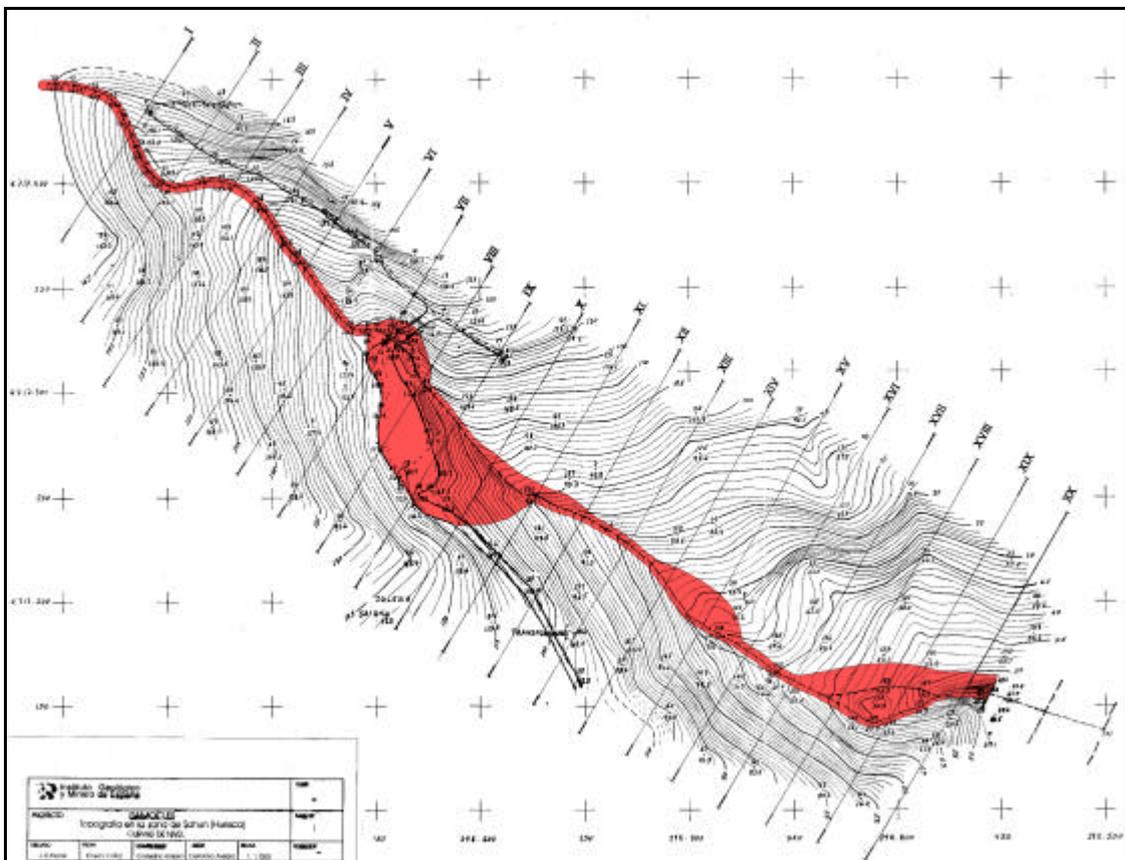


Figura 30 – Mappa provvisoria del pericolo da colata detritica.

4.2. APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO MODDS AL BACINO DEL TORRENTE

RUDAN

Nell'ambito dell'attività del progetto DAMOCLES è stato studiato il bacino del torrente Rudan, allo scopo di definire i volumi potenzialmente mobilizzabili da un evento estremo, e verificare idraulicamente il tratto terminale del corso d'acqua (conoide), individuando le zone di fuoriuscita della corrente e le probabili distanze di arresto. A causa della morfologia locale, il torrente Rudan, non è stato in grado di sviluppare un conoide vero e proprio. Tale struttura morfologica si presenta attualmente incisa dallo stesso corso d'acqua.

Scopo dell'indagine è stata la quantificazione delle portate liquide, e la stima della tipologia di evento atteso. Lo studio ha inoltre previsto l'applicazione del modello MODDS, al fine di individuare le sezioni critiche e le possibili zone alluvionabili.

Dopo una preliminare fase di studio del bacino, con un sopralluogo sull'area di studio, si è proceduto all'analisi morfometrica del bacino ed alla stima delle portate liquide calcolate per un tempo di ritorno di 150 anni. A partire dalle portate liquide sono state dedotte le potenziali portate solide associate; si è quindi proceduto all'individuazione delle sezioni idraulicamente inefficienti. Le sezioni descrittive del tratto di corso d'acqua attraverso il conoide sono state dedotte dallo studio condotto dal Dipartimento Foreste della Regione Veneto (2002). La verifica idraulica delle singole sezioni e la quantificazione del volumi fuoriuscenti è stata eseguita con il software MOODS, di recente realizzazione ed appositamente progettato per la simulazione di eventi da colata detritica (debris flow).

4.2.1. CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA

Il torrente Rudan (**Figura 31**) prende origine dalle pendici meridionali del monte Antelao. La rete idrografica è composta dall'asta principale e da una serie di affluenti, molti dei quali di natura effimera, che drenano la testata e la parte mediana del bacino.

Nello studio del bacino idrografico del torrente Rudan è stata scelta come sezione di chiusura, quella corrispondente al ponte sulla Strada Statale n. 51 di Alemagna (885 m s.l.m. circa). A partire dalla sezione di chiusura lo spartiacque risale verso sinistra, in direzione NE, seguendo la dorsale fra i paesi di Peaio e Vinigo, attraversa i boschi di Greanes (1330 m s.l.m.), lambendo gli omonimi fienili (1322 m s.l.m.). In questa località la linea di displuvio cambia direzione e piega verso N, attraversa la località fienile Barco (1350 m s.l.m.) e i boschi di Sote Crepo (1608 m s.l.m.), prosegue attraverso La Pala, fino a quota 1600. Da questo punto in poi lo spartiacque segue le aspre morfologie del versante meridionale del torrente Rudan fino a raggiungere la cima del monte

Antelio (3263 m s.l.m.). Dalla cima dell'Antelao, lo spartiacque inizia a scendere prima con direzione SO e S; attraversa il ghiaione (2874 m s.l.m.) e poi scende lungo il crinale roccioso (in direzione SSO). Successivamente la dislivellatura attraversa i boschi di Peroi de la Vegia e il Col de Santa Lucia (1265 m s.l.m.). Da qui attraversa la località Crepes de Morello per poi ricongiungersi alla sezione di chiusura.

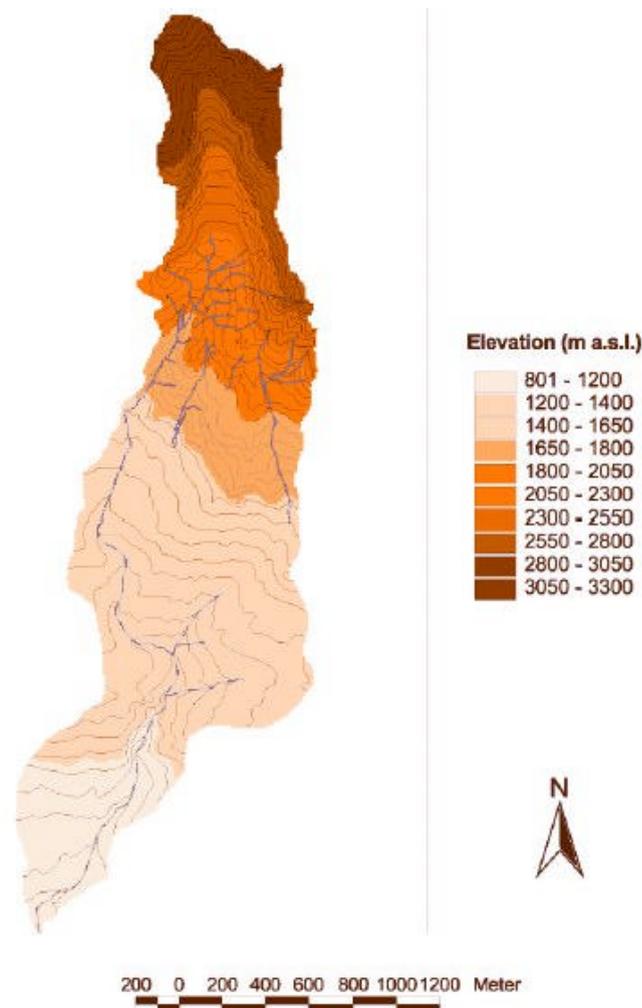


Figura 31 – DEM descrittivo del bacino del torrente Rudan.

L'assetto vegetazionale della zona analizzata (Figura 32), condizionato dalla fertilità e dalla morfologia dei terreni, vede il susseguirsi di tipologie forestali abbastanza difformi all'aumentare della quota: la parte bassa del bacino risulta coperta da una fitta fustaia mista di latifoglie (faggio e frassini maggiore) e conifere (abete rosso) che si sviluppano ove il terreno risulta più profondo ed evoluto. A quote maggiori le condizioni stazionali divengono limitanti, a causa della riduzione dello strato di terreno fertile, della comparsa di rocce affioranti, delle condizioni di maggior aridità dovuta alla forte pendenza e al substrato altamente drenante e delle condizioni di instabilità dei versanti, soggetti a continui movimenti di terra. In questa fascia centrale del bacino diventa predominante la fustaia a Pino Silvestre a cui, salendo ancora di quota, si aggiunge il pino mugo,

che più in alto diventa il netto dominatore del paesaggio spingendosi, seppur rado, fino ad oltre i 2000 m assieme a tutta una serie di piccoli arbusti nani caratteristici delle quote più alte.

Nella **Tabella 9** si riporta l'estensione delle varie categorie d'uso del suolo e l'indice di boscosità del bacino idrografico analizzato.

CLASSI DI USO DEL SUOLO	AREA (km²)	AREA (ha)	%
Improduttivo	0.8330	83.30	27.74
Arbusteti e rupi boscate	0.4450	44.50	14.82
Fustaia densa di conifere	1.5310	153.10	50.98
Fustaia rada di conifere	0.1610	16.10	5.36
Prati falciabili	0.0330	3.30	1.10
TOTALE	3.003	300.30	100.00
Coefficiente di boscosità		0.56 %	

Tabella 9 - Estensione delle varie categorie di uso del suolo ed indice di boscosità.

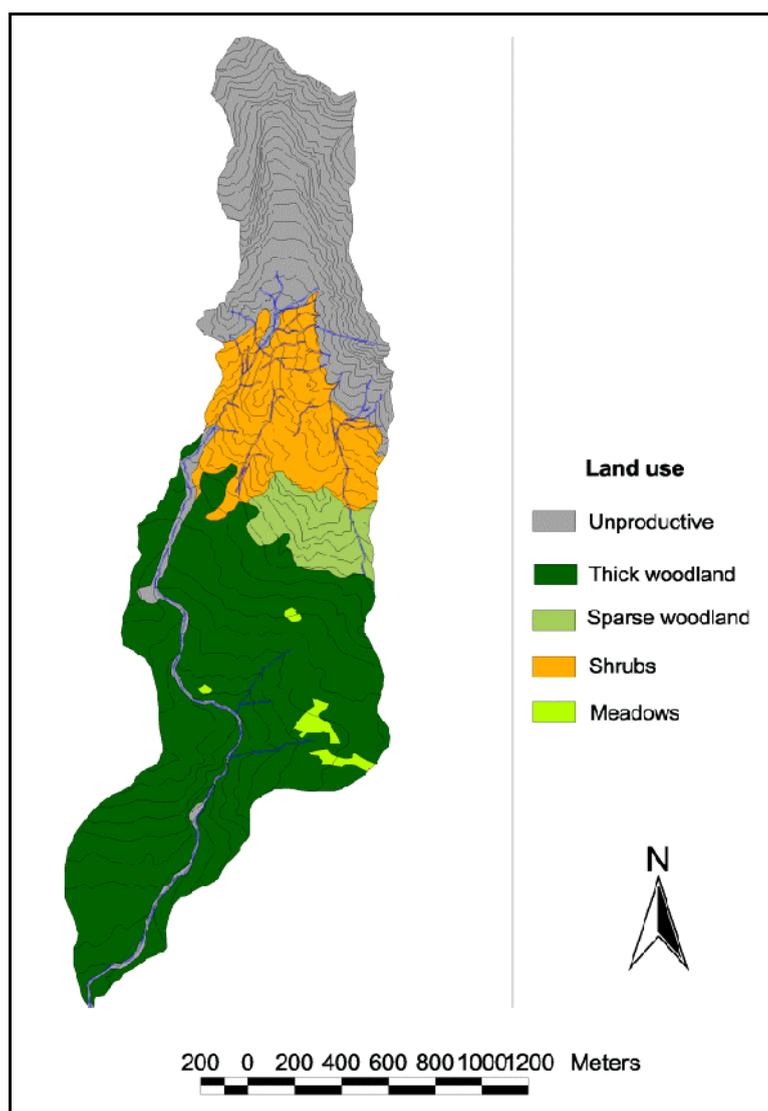


Figura 32 – Assetto vegetazionale del bacino del torrente Rudan.

La morfologia attuale del bacino del torrente Rudan (**Figura 33**) deriva dall'azione modellatrice prima dei ghiacciai quaternari, e successivamente dall'opera delle acque incanalate. Nella **Tabella 10** si riportano le formazioni geologiche presenti all'interno del bacino analizzato.

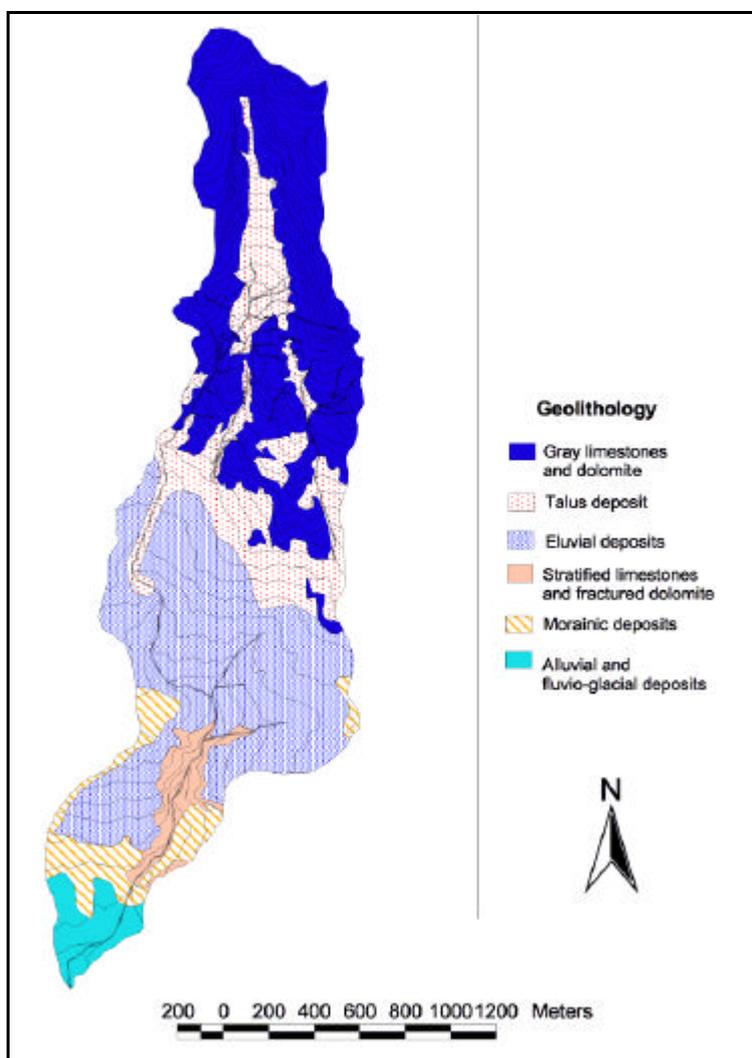


Figura 33 – Mappa geologica del bacino del torrente Rudan.

FORMAZIONI GEOLOGICHE	AREA (km²)	AREA (ha)	%
Calcari stratificati e dolomie fratturata	0.1103	11.0348	0.037
Calcari grigi	0.0046	0.4581	0.002
Dep.detrítico-morenici	1.0421	104.2082	0.346
Depositidi falda	0.2019	20.1926	0.067
Depositi eluviali	0.5339	53.3938	0.177
Depositi alluvionali	1.0031	100.3082	0.333
TOTALE	3.003	300.300	100.00

Tabella 10 – Estensione superficiale delle varie classi litologiche presenti all'interno del bacino.

4.2.2. DESCRIZIONE DEL CORSO D'ACQUA

Il bacino del Rio Rudan insiste su di una superficie di 3,003 km² e presenta un reticolo idrografico piuttosto semplice, costituito dall'asta principale e da una serie di piccoli affluenti, molti dei quali di natura effimera.

Il corso del Rio Rudan può essere suddiviso in un certo numero di tratti omogenei per caratteristiche morfologiche ed idrauliche.

Nel suo tratto terminale, tra la confluenza con il torrente Boite e la quota 900 m s.l.m., il rio scorre in un alveo incanalato e delimitato da muri di sponda in calcestruzzo alti circa 2 m, costruiti per ridurre il rischio di alluvionamento degli edifici circostanti e per favorire il transito di eventuali colate detritiche all'interno del centro abitato il più velocemente possibile, non essendovi la possibilità di realizzare interventi di difesa attiva a monte, vista l'inaccessibilità del luogo.

E' in questo tratto che si sono registrati i maggiori danni a seguito dell'esondazione, nei tratti arginati a minor franco idraulico, di alcune colate detritiche verificatesi tra l'inizio degli anni '80 e la fine degli anni '90 (**Foto 2 e 3**). In tal senso, una delle sezioni più critiche sembra essere quella corrispondente al ponte che attraversa il torrente sulla SS. Alemagna. Tale ponte è caratterizzato da una luce probabilmente sottodimensionata, che non sembra in grado di convogliare l'intera portata solida in caso di eventi di piena con rilevante trasporto solido.

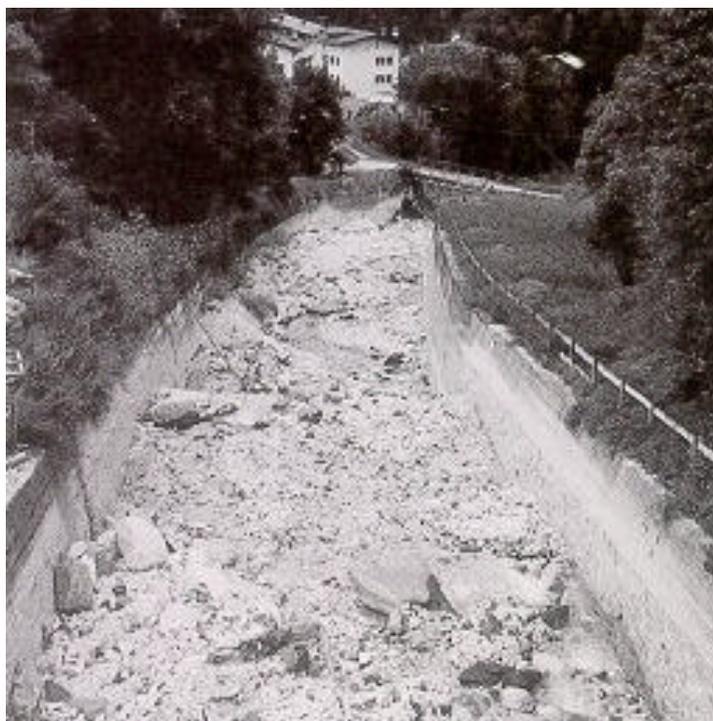


Foto 2 – Parziale colmatazione del canale nel tratto finale del rio Rudan (1 Settembre 1999).

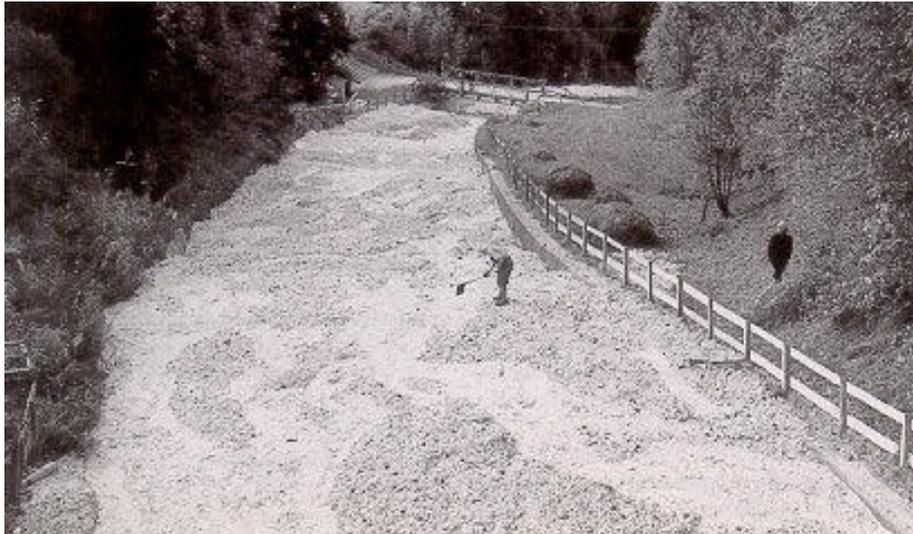


Foto 3 – Il canalone nel tratto finale del rio Rudan a seguito del passaggio di una colata detritica (20 Settembre 1999).

Segue quindi il tratto tra 900 e 1000 m s.l.m. caratterizzato da una pendenza media abbastanza ridotta e da un susseguirsi di curve, allargamenti e restringimenti d'alveo, in cui prevalgono i fenomeni di deposizione del materiale più fine costituente la coda dei debris flow o tratto dagli ordinari eventi con trasporto solido associato. E' un tratto caratterizzato da evidenti fenomeni di dissesto in entrambe le sponde (scorrimenti superficiali, decorticamenti, scivolamenti ed erosioni al piede) che causano un continuo apporto solido, che si aggiunge all'ingente quantità di materiale già presente.

Più a monte è distinguibile poi un tratto, tra 1000 e 1150 m s.l.m. in cui il torrente scorre incassato entro una profonda e stretta forra rocciosa, che in diversi tratti presenta pareti rocciose prive di vegetazione per altezze variabili fino ad alcuni metri e sezioni con frequenti allargamenti e strozzature. Trattasi di un settore che non partecipa direttamente al rifornimento di materiale per il trasporto solido ma che, a causa della sua morfologia, potrebbe prestarsi a delle occlusioni e/o sbarramenti da parte di materiale grossolano proveniente da monte, con formazione di pericolosi invasi temporanei.

Salendo ancora si percorre un tratto tra i 1150 e i 1400 m s.l.m. in cui il rio scorre sempre in una valle stretta e profondamente incisa dove, a tratti ricoperti da ingenti accumuli di materiale detritico (anche 2-3 m di diametro) di vari eventi, si alternano tratti in cui emerge il substrato roccioso argillo-limoso semi-impermeabile e solo parzialmente disgregato, costituito da marne, favorente il deflusso superficiale.

I versanti di questo tratto risultano estremamente instabili, in particolare per erosione al piede soprattutto nella destra idrografica, caratterizzata da una vasta area di frana in corrispondenza di una curva dell'alveo a quota 1350 m s.l.m.

Si giunge così al tratto del torrente compreso tra i 1400 e i 1550 m di quota (loc. Pian delle Fontanelle) lungo circa 400-450 m, quasi completamente rettilineo e caratterizzato da una pendenza media di circa 20° (circa 35%), ma con tratti più pendenti intervallati a tratti meno pendenti che favoriscono rispettivamente il trasporto e l'accumulo di materiale detritico.

In questo settore è stato registrato negli ultimi tempi un notevole approfondimento del corso d'acqua, che qui scorre in un consistente deposito di origine calcarea costituito da sabbie, ghiaie e massi di dimensioni anche maggiori a 5 m³, a cui si aggiunge in misura minore del detrito costituito da limi e ciottoli lastriformi. Ciò ha provocato la mobilitazione di notevoli quantità di materiale e il drastico incremento dell'instabilità delle sponde, che contribuiscono così ad alimentare in maniera consistente i fenomeni di trasporto di massa. Sono ivi presenti grandi massi provenienti dai versanti, che possono provocare la parziale e temporanea occlusione dell'alveo, salvo cedere improvvisamente, incrementando così l'energia distruttrice delle colate.

Questo tratto del canale viene rifornito di materiale detritico dal ghiaione formatosi nella vasta conca morfologica posta alle pendici settentrionali dell'Antelao tra i 2000 e 2650 m s.l.m. da cui, durante i fenomeni piovosi più intensi, si mobilitano grandi quantità di materiale che giungono, probabilmente già in forma di debris flow di media entità, fino alla base delle rocce ove si sviluppa la prima parte del canale collettore del Rudan **(Foto 4)** e dove si ha un primo accumulo di materiale (ove la pendenza tende a ridursi). Tale meccanismo è confermato dalla presenza di diversi cordoni laterali da debris flow e dalla propagazione di piccoli lobi frontali di colata fuori dal canale.

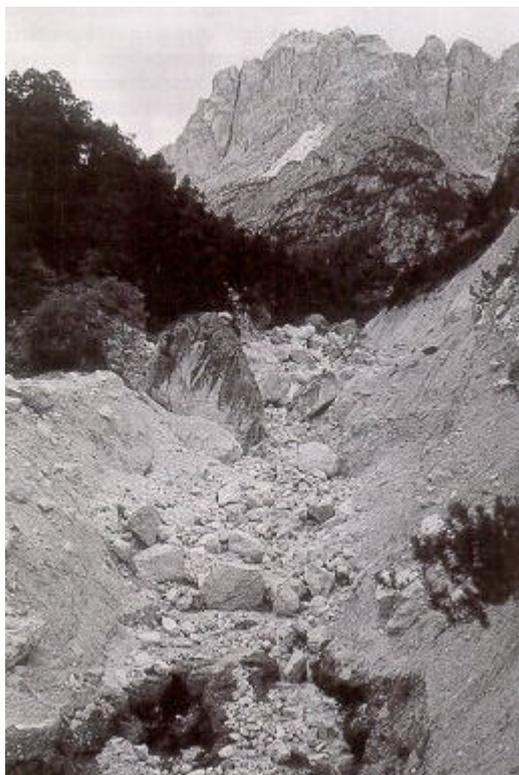


Foto 4 – Il lungo canalone che si origina alle falde del Monte Antelao.

Questo tratto sembra essere, a ragione, il più suscettibile all'innesco dei debris flow che raggiungono l'abitato di Peaio, sia per la pendenza che lo caratterizza che per la presenza dello strato roccioso quasi impermeabile a diretto contatto con la copertura detritica quaternaria e affiorante circa a quota 1420 m s.l.m., carattere questo che può far pensare ad un meccanismo d'innesco, almeno in questa sezione, dovuto a saturazione subsuperficiale dell'ammasso, reso instabile dall'aumento delle pressioni interstiziali nella zona di contatto con la roccia sottostante e dalla successiva comparsa della falda in superficie.

Non è da escludersi, comunque, un meccanismo d'innesco causato dalla mobilitazione del materiale a seguito di un deflusso superficiale di una certa entità (secondo Takahashi) originato dall'acqua che, in caso di eventi piovosi di forte intensità, si riversa nel canale dalle pareti rocciose strapiombanti dell'Antelao alla testata del bacino.

A monte della quota 1650 m il collettore, dotato di larghezze contenute, si incassa in una stretta valletta scavata nella roccia calcarea alla base dell'Antelao, ramificandosi in tanti collettori secondari discendenti dalle rocce sovrastanti, che raccolgono l'acqua proveniente dalle fessure del massiccio roccioso. Trattassi di una soglia morfologica rocciosa a forte pendenza che separa il collettore principale dalla conca detritica di alimentazione a cui si è precedentemente accennato.

Dalla quota 2200 m s.l.m. non risulta agevole l'individuazione della traccia dell'alveo nella coltre detritica. Il prolungamento con lo spartiacque viene fatto coincidere con la cima dell'Antelao a quota 3264 m s.l.m.

L'asta principale non presenta nessuna opera di consolidamento trasversale o laterale. L'abbondante vegetazione presente in alveo, specie nel tratto su cui insiste il conoide, può costituire un problema al deflusso in caso di piena.

Le morfologie d'alveo osservate durante il sopralluogo, evidenziano un certo equilibrio dello stesso, testimoniato da numerosi affioramenti rocciosi e da strutture a gradinata o step pool. Il bacino in esame non presenta visivamente delle condizioni di elevata instabilità, tuttavia sono state individuate una serie di zone che possono configurarsi come sorgenti di sedimento. Alcune di queste sono strettamente a contatto con il reticolo idrografico, altre invece, localizzate un po' più lontano, contribuiscono in misura minore all'alimentazione solida dell'alveo.

Il torrente Rudan, nel corso degli anni, ha edificato un conoide che poi è stato inciso dallo stesso corso d'acqua. I principali parametri che descrivono il conoide in questione sono riportati nella **Tabella 11**.

Il valore dell'indice di Melton, se messo in relazione alla pendenza del conoide espressa in gradi, fornisce delle indicazioni sulla tipologia di fenomeni che hanno generato il conoide stesso.

Tale analisi fa rientrare il conoide edificato dal torrente Rudan fra quelli generati da colate detritiche; non è da escludere quindi, che si possano verificare ancora eventi di questo tipo.

Parametri	Valore
Pendenza media del collettore lungo il conoide	17.86 %
Quota massima	885.00 m s.l.m.
Quota minima	801.00 m s.l.m.
Lunghezza del collettore	476.00 km
Numero di Melton	1.42 -
Numero degli attraversamenti	2 -

Tabella 11 – Principali parametri morfometrici che caratterizzano il conoide del torrente Rudan.

Le strutture morfologiche del conoide sono state profondamente alterate nel corso degli anni dall'espansione degli insediamenti residenziali, ma soprattutto a causa delle attività di dissodamento del terreno per la messa a coltura o pascolo dei suoli circostanti. Tali attività hanno cancellato le originali forme geomorfologiche tipiche degli eventi che hanno generato il conoide stesso. Tale assetto ha impedito la realizzazione di un'analisi morfologica di dettaglio che permettesse di individuare le strutture tipiche dell'accrescimento per debris flow.

4.2.3. ANALISI DELLA PORTATA MASSIMA DI PIENA

Il picco di piena utilizzato nella simulazione è stato estratto dallo studio eseguito dalla Regione Veneto (2002), in cui era stato adottato il metodo proposto dal Soil Conservation Service (1972). Il valore della portata liquida per un tempo di ritorno di 100 anni è stato stimato in 7.5 m³/s. Tale valore è stato ottenuto utilizzando un'istogramma costante di durata pari a 2 ore, ossia il tempo della pioggia critica.

4.2.4. ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO

Come evidenziato dal valore dell'indice di Melton, nel bacino considerato si possono potenzialmente verificare degli eventi di trasporto di massa o debris flow. Attualmente, i detriti trascinati a valle deriverebbero prevalentemente dal sedimento presente in alveo e i dai contributi più o meno elevati dalle zone sorgenti localizzate a ridosso dell'alveo.

Date queste premesse sulle possibili fonti di sedimento, la quantificazione del volume potenziale che il bacino sarebbe in grado di produrre in caso di evento estremo è stato stimato con le

formule, riportate in **Tabella 12**, che si ritrovano nella letteratura tecnica. L'attendibilità di questi valori è poi stata valutata in modo oggettivo e verificata con un sopralluogo specifico.

Formulazione	Autore	Valore
$M = 13600A^{0.61}$	Takei (1986)	25597 m ³
$M = K_b A i$	Kronfellner-Kraus (1984)	86860 m ³
$M = 29100A^{0.67}$	D'Agostino, Cerato, Coali (1996)	58285 m ³
$M = 211A i^{1.3}$		66416 m ³
$M = (667e^{-0.005A}) A i$		69733 m ³
$M = 45A^{0.9} i^{1.5} (I.G.)$		68579 m ³
$M = 334A i^{1.3} (I.T.)^{-0.6}$		105133 m ³
$M = 39A i^{1.5} (I.G.) (I.T.)^{-0.3}$		65927 m ³
$M = 70000A$	Marchi	210000 m ³

Tabella 12 – Formulazioni empiriche per la stima del volume potenziale di produzione solida che un bacino idrografico è in grado di generare.

Per il calcolo dei volumi potenziali sono stati utilizzati i valori riportati nella tabella seguente (**Tabella 13**).

Parametri	Valore
Area del bacino (A)	3.003 km ²
Pendenza media del collettore (i)	37.86 %
k ₁ (per il calcolo di K _b)	845 -
k (per il calcolo di K _b)	0.011 -
Indice geologico (I.G.)	2.62 -
Indice di trasporto (I.T.)	1 -

Tabella 13 – Parametri utilizzati per l'applicazione delle formule della tabella 4.

Mediando i valori ottenuti, e soprattutto considerando le effettive potenzialità di erosione nel bacino analizzato, si stima che il volume movimentabile sia quantificabile in 64400 m³. Si tratta di un volume raggiungibile solo in caso di evento estremo, con tutte le sorgenti di sedimento attivate; pertanto per eventi intensi, ma non eccezionali, ci si possono ragionevolmente attendere volumi

inferiori. Poiché lo scopo dell'indagine è quello di ipotizzare la peggiore delle condizioni per il bacino, tale volume viene assunto nella sua interezza.

4.2.5. ANALISI DEGLI ATTRAVERSAMENTI E DELLE SEZIONI CRITICHE

Gli attraversamenti aerei presenti all'interno dell'area indagata sono due. Le loro principali caratteristiche geometriche sono riportate nella **Tabella 14**.

Tipo	Luce (m)	Franco minimo (m)	Franco massimo (m)	Note
Ponte	11.50	2.28	6.36	Ponte S.S. n. 51 di Alemagna
Ponte	8.63	3.56	3.95	Ponte Bailey (Strada Regia)

Tabella 14 – Principali caratteristiche geometriche degli attraversamenti lungo il torrente Rudan nel tratto di area indagata.

Posto che dalle analisi condotte emerge la possibilità che il Torrente Rudan possa generare colate detritiche, al fine di individuare nel dettaglio le zone soggette a pericolo di alluvionamento, è stato eseguito un rilievo topografico specifico, con lo scopo di definire la geometria del canale dall'apice del conoide fino alla confluenza. In totale sono state estratte dal piano quotato 65 sezioni e il profilo longitudinale del tratto d'alveo sottostante al conoide (Regione del Veneto, 2002).

Nell'ipotesi di colata detritica, il picco di piena della portata solida è stato determinato adottando un metodo di tipo volumetrico a partire dalla portata liquida, come documentato in letteratura tecnica da numerose ricerche. In genere, tali metodi determinano la portata solida a partire da quella liquida secondo un fattore moltiplicativo variabile fino a 20 (Hashimoto, 1978). Nel caso specifico del Torrente Rudan, considerando il grado di dissesto e le condizioni generali del bacino, si è deciso di adottare un coefficiente pari a 15. Secondo quest'ipotesi il valore al picco della portata solida è quello riportato nella sottostante tabella (**Tabella 15**).

Q_l Tr 50 anni	Q_s Tr 50 anni
7.50 m ³ /s	112.5 m ³ /s

Tabella 15 – Stima dei valori di picco della colata detritica, dedotti dai valori liquidi nell'ipotesi di progetto.

Per la mappatura delle zone di pericolo da debris flow in un conoide alluvionale è necessaria, in prima istanza, la simulazione di ciò che avviene all'interno del canale principale. In particolare è necessario simulare la propagazione dell'onda di piena lungo il canale, la quale cambia forma e si lamina per effetto dell'invaso di parte dell'onda nel canale stesso e per effetto delle eventuali fuoriuscite di materiale nelle sezioni insufficienti alla conduzione del deflusso.

Per la simulazione degli eventi attesi è stato utilizzato un modello matematico (MODDS) di recente realizzazione (Sonda, 2001). Si tratta di un modello matematico unidimensionale di propagazione delle colate detritiche, di tipo parabolico, in grado di individuare le sezioni insufficienti al deflusso e di quantificare le onde detritiche che fuoriescono dal collettore principale, distinguendo fra sponda destra e sponda sinistra.

La simulazione ha evidenziato che il canale delimitato dai muri in calcestruzzo è in grado di contenere la portata di ingresso, tranne il tratto a valle del ponte Bailey, dove il modello segnala la fuoriuscita di materiale solido con picco di alcuni metri cubi al secondo. Data la morfologia della zona tuttavia, la corrente è destinata a rientrare in alveo o ad arrestarsi nelle immediate vicinanze dello stesso.

La morfologia locale dei punti di fuoriuscita e l'assenza di strutture sensibili al danno, fanno sì che non si registrino condizioni di reale pericolo. Altro punto idraulicamente insufficiente è posto più a valle lungo la sponda sinistra, dove il volume fuoriuscente è stato stimato in circa 300 m³. Anche in questo caso la morfologia locale favorisce un rientro totale della corrente nell'alveo. Proseguendo verso valle, in prossimità della confluenza, il modello segnala delle sezioni insufficienti ma, anche in questo caso, i volumi fuoriuscenti tenderanno a rientrare senza creare alcun danno.

Una rappresentazione cartografica delle sezioni insufficienti è rappresentata in **Figura 34**.

L'analisi critica dei risultati ottenuti dalla simulazione, dimostra come il modello applicato non interpreti troppo bene le condizioni idrauliche del torrente Rudan, soprattutto durante gli eventi di piena. Gli eventi occorsi in questi ultimi anni hanno infatti evidenziato l'inefficienza dei salti di fondo del cunettone che, provocando una forte dissipazione dell'energia della colata, provocano un sovralluvionamento dell'alveo con conseguente fuoriuscita della corrente anche per eventi di piena con tempi di ritorno inferiore ai 150 anni.

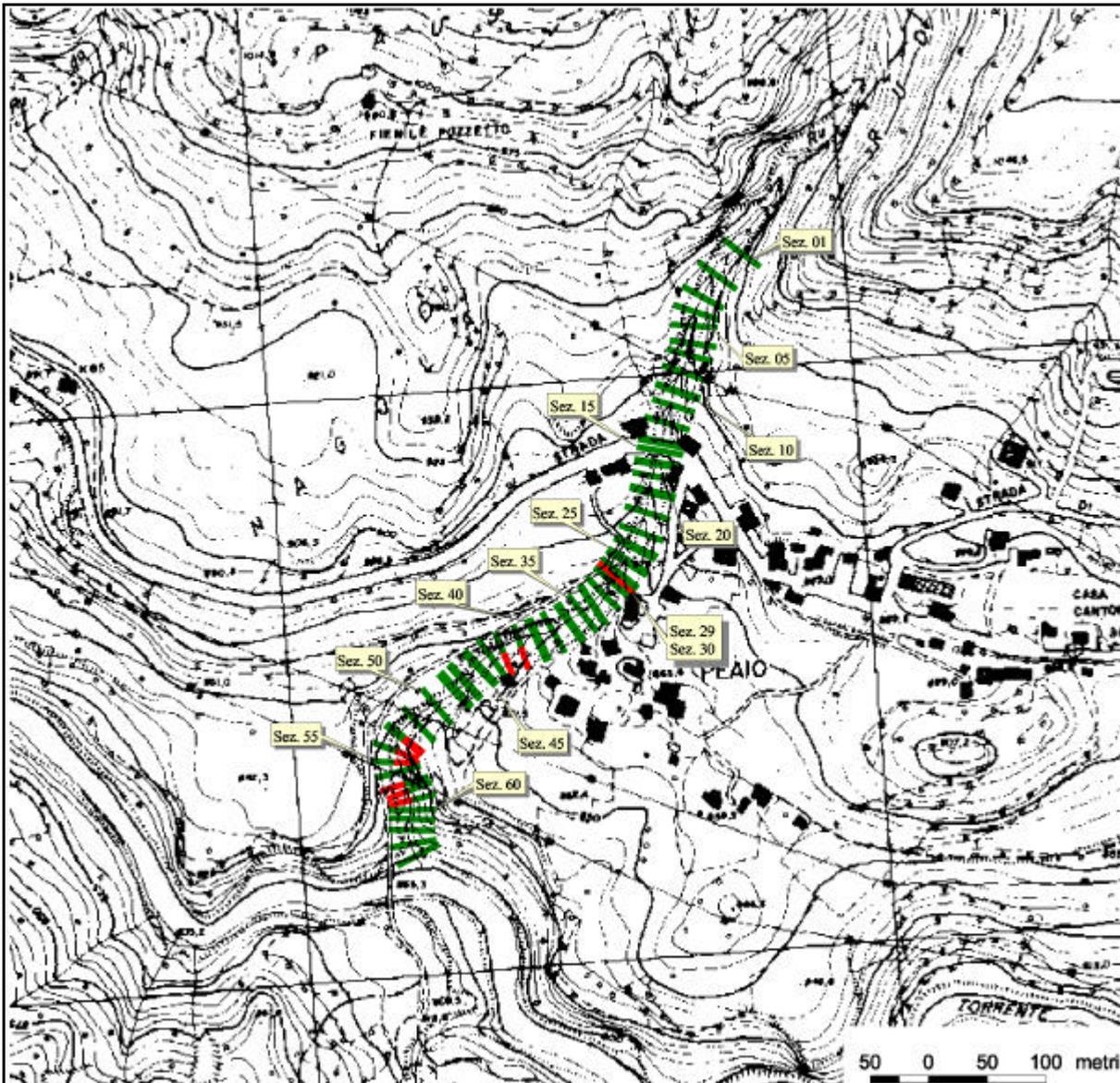


Figura 34 – Tratto terminale del torrente Rudan. Sono indicate in rosso le sezioni idraulicamente insufficienti.

4.3. APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO DFPDM (2-D) AL BACINO DEL RIO LAZER

4.3.1. CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA

Si è ritenuto opportuno scegliere il bacino del rio Lazer per l'applicazione del modello 2D, perché significativo per l'analisi della sicurezza idrogeologica del territorio nei confronti del passaggio di colate detritiche. L'area in questione risulta essere ampiamente dissestata e, in particolare, la conoide ha subito nel passato ripetuti fenomeni di debris flow.

Il bacino del rio Lazer, situato alle estreme propaggini orientali della provincia di Trento, è un affluente di sinistra del torrente Cismon, a sua volta tributario del fiume Brenta.

Il bacino, che si presenta piuttosto complesso ed articolato, drena il versante compreso tra gli abitati di Siror e Tonadico. La sua rete idrografica si organizza su un collettore principale e tre affluenti. Lo spartiacque orografico si stacca dal torrente Cismon a quota 742 m s.l.m. e risale il versante in direzione Nord fino al Col dei Cistri; da qui la displuviale ridiscende il versante e si ricongiunge al Cismon. I parametri idrografici e morfologici (**Tabella 16**) sono stati ricavati dalla PAT in scala 1:10.000 e sono stati integrati da rilievi di campo. L'area del bacino è di 1,57 km² e la sua pendenza media del bacino è del 30,8%, tali valori indicano che la risposta idrologica del bacino è tendenzialmente rapida; il valore della densità di drenaggio è di 1,85 Km⁻¹, ciò indica che il bacino è ben drenato.

Parametro	Unità di misura	Valore
Superficie	km ²	1,57
Quota massima	m s.l.m.	1608
Quota alla sezione di chiusura	m s.l.m.	784
Quota media	m s.l.m.	1310
Pendenza media del collettore	%	24,1
Pendenza media del bacino	%	29,8
Lunghezza del collettore, prolungata allo spartiacque	km	2,87
Lunghezza della rete idrografica totale	km	2,95
Tempo di corrvazione secondo Giandotti	h	0,52
Densità di drenaggio	Km/km ²	
Tempo di ritardo (Mokus)	h	0,41
Numero di Melton	-	0,7
Coefficiente di boscosità	-	0,7

Tabella 16 – Principali caratteristiche morfometrico-idrografiche del bacino del rio Lazer.

La forma del bacino, che si presenta allungata e dotata di pochi rami laterali di breve lunghezza, principalmente a causa della litologia locale, dà luogo a più sorgenti che si concentrano nei pressi dell'alveo.

Analizzando la morfologia del bacino, ed in particolare il profilo longitudinale del collettore principale, si distingue una zona del conoide ed il tratto finale del torrente caratterizzati da una pendenza contenuta (5,88%), a cui segue il settore centrale fortemente inclinato, e quello terminale dotato di curva di fondo poco pendente.

Le fasce altimetriche maggiormente significative nell'analisi del trasporto solido sono quelle intermedie, dove la presenza di vaste coltri moreniche in copertura a formazioni metamorfiche e la notevole inclinazione, favoriscono la formazione di vasti fenomeni erosivi e franosi.

4.3.2. VARIABILI ASSUNTE NELLE SIMULAZIONI

Per quanto concerne la simulazione, sono state ipotizzate quattro situazioni diverse, al fine di valutare la sensibilità del modello e saggiarne l'applicabilità in distinte condizioni.

Le tre simulazioni si distinguono per ciò che riguarda l'idrogramma di piena ed il coefficiente di Chezy. Relativamente all'idrogramma di piena, ne sono stati considerati due, uno con picco di $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e volume totale di 30000 m^3 ed un'altro con picco di $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e volume totale di 20000 m^3 , entrambi con durata 1000 secondi e con ramo ascendente verticale (**Figura 35**).

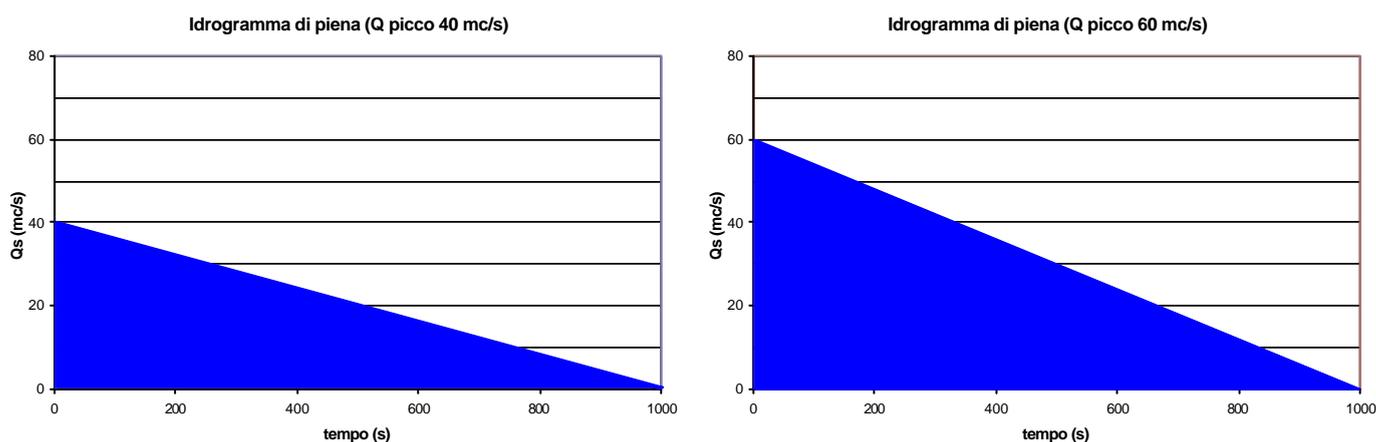


Figura 35 – Idrogrammi di piena utilizzati nelle simulazioni.

I due idrogrammi di piena considerati nell'ambito di questo studio, che derivano dalla valutazione degli piene storiche e dall'applicazione del "metodo razionale" e del "metodo S.C.S.", rappresentano due eventi con tempo di ritorno prossimo ai 50 anni.

Per quanto riguarda il coefficiente di Chezy, si sono considerate due ipotesi: l'assunzione di un coefficiente di Chezy costante (valore 1) in tutto il cono di sedimentazione del Rio Lazer, e l'adozione di una mappa raster con valori di Chezy valutati individualmente cella per cella (**Figura 36**). Le prove effettuate utilizzando il raster rappresentativo della scabrezza puntuale nella conoide, sono state realizzate al fine di valutare l'effetto che i diversi usi del suolo comportano sulla propagazione dei debris flow, effetto che si può sostanzialmente addebitare alla conduzione preferenziale in zone a scabrezza più bassa.



Figura 36 – Mapa raster con i valori del coefficiente di Chezy.

Le caratteristiche comuni alle tre prove sono invece la localizzazione dell'area sorgente di sedimento (l'apice della conoide), il DEM della zona (**Figura 37**), la durata della simulazione (1000 secondi) ed il numero di Courant (0,95).

Le caratteristiche distintive di ognuna delle quattro simulazioni sono riportate nella seguente **Tabella 17**.

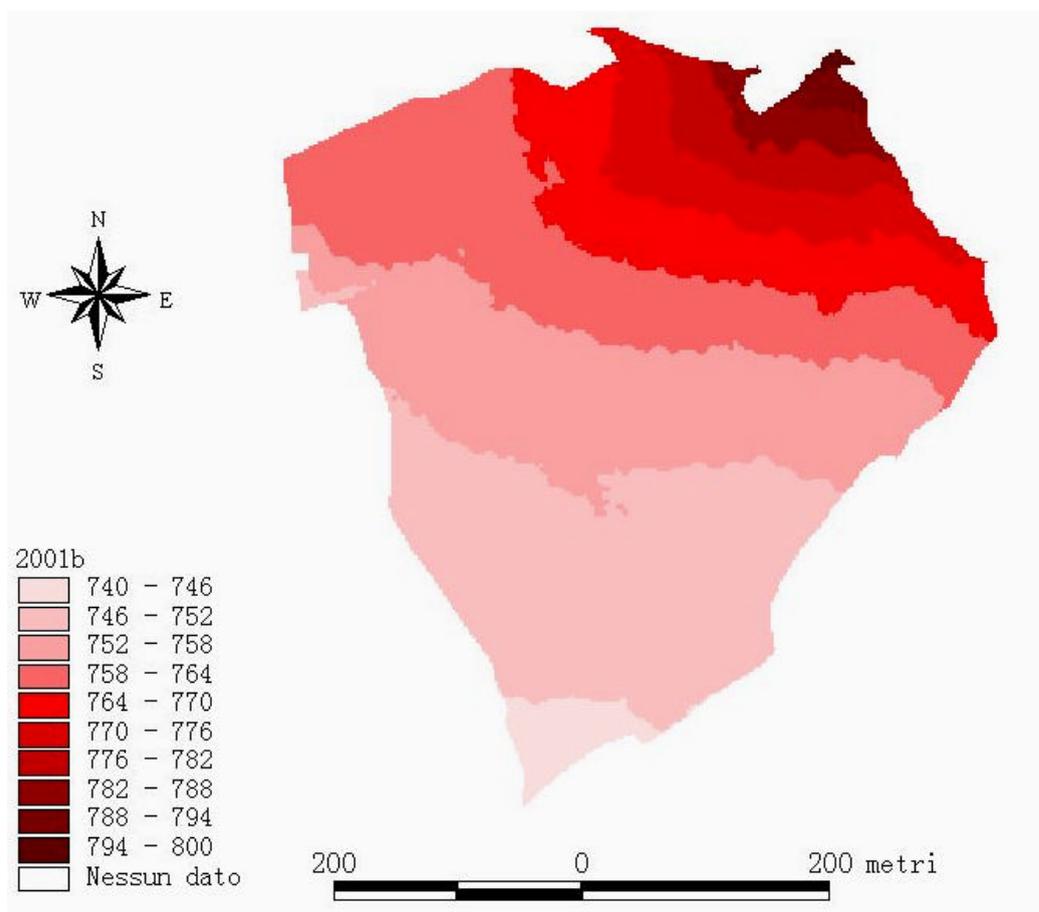


Figura 37 – Il DEM descrittivo della zona considerata (dimensione delle celle 2x2 metri).

Simulazione	Picco dell'idrogramma ($m^3 s^{-1}$)	Coefficiente di Chezy
A	60	1
B	40	1
C	60	Mappa raster
D	40	Mappa raster

Tabella 17 – Le simulazioni condotte con il sottomodulo 2-d sul rio Lazer.

Le suddette simulazioni sono state condotte con il sottomodulo 2-D, posto che il modello monodimensionale MODDS risulta inadeguato alla simulazione di overflow in una situazione come quella del rio Lazer, in cui le sezioni del cunettone che attraversano il conoide sono di ridotte dimensioni, e riescono a condurre solo una piccola parte dei materiali trasportati dal debris flow simulato. In una situazione come questa, il modello 2-D risulta essere lo strumento più adeguato per la propagazione e diffusione di una colata detritica.

In questo contesto, il processo prevalente e più significativo dal punto di vista idraulico non è rappresentato dalla propagazione di un'onda di colata nel cunettone che attraversa la conoide, bensì da un'esondazione dall'apice della conoide. Il tratto d'alveo a monte dell'apice del cono di sedimentazione, presenta caratteristiche morfologiche tali da rendere superflua la simulazione della conduzione di una colata con il sottomodulo 1-D in quanto, con le portate ed i volumi ipotizzati, non c'è possibilità che si verifichi alcuna esondazione.

L'applicazione del modello ha permesso di stimare la propagazione della colata sulla conoide e la definizione delle aree occupate dal materiale esondato in diversi istanti del suo avanzare.

4.3.3. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

I risultati dell'implementazione del modello 2-D nelle quattro situazioni ipotizzate, ha fornito delle mappe raster di tempo di inondazione, riportate di seguito (Figure 38 – 41).

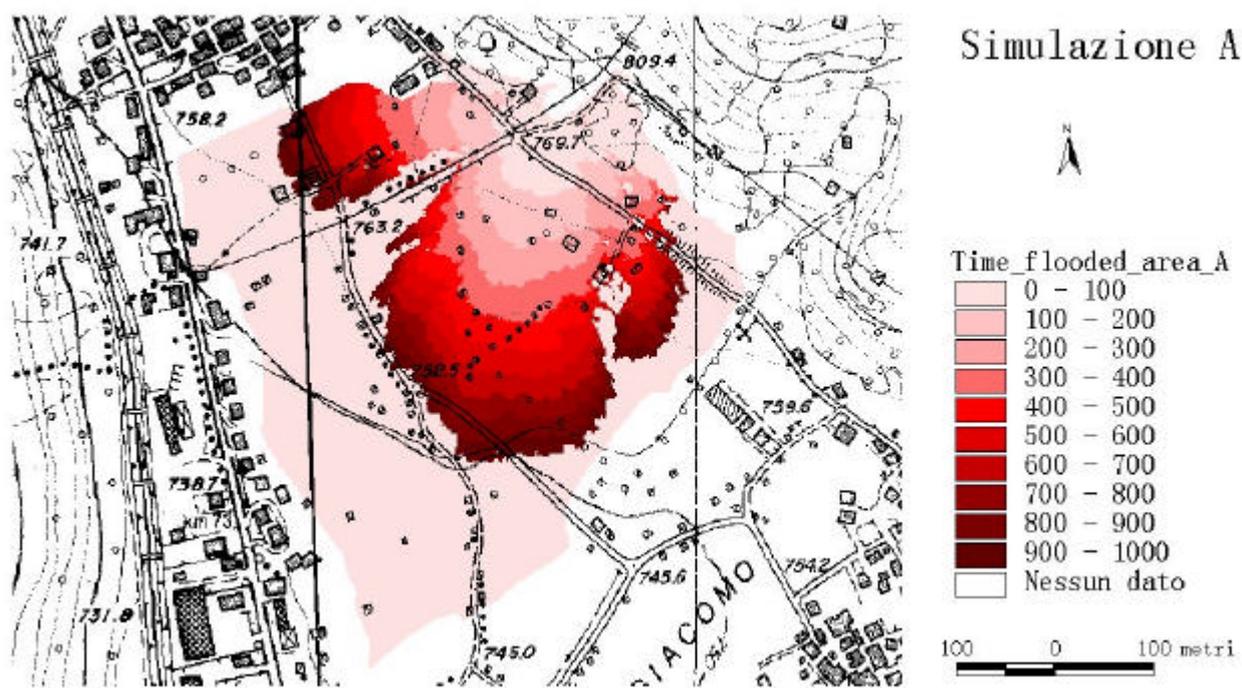


Figura 38 – Mappa raster dell'avanzamento dell'onda di colata nella simulazione A.

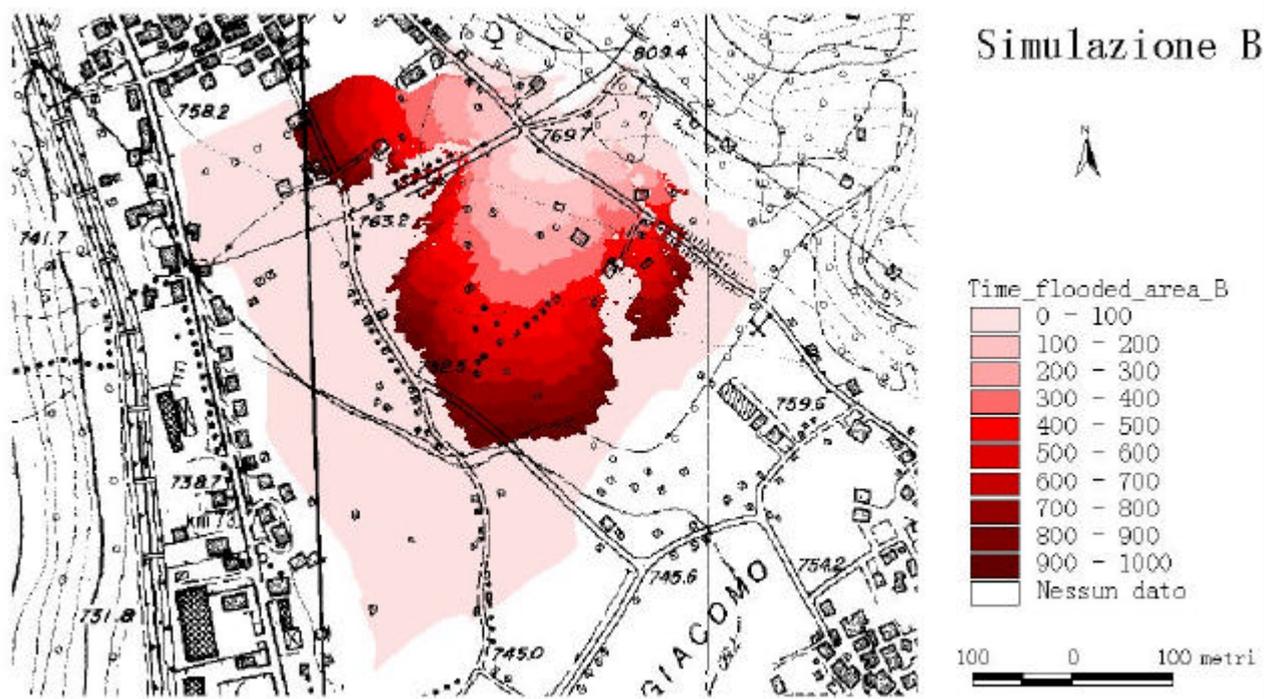


Figura 39 – Mappa raster dell'avanzamento dell'onda di colata nella simulazione B.

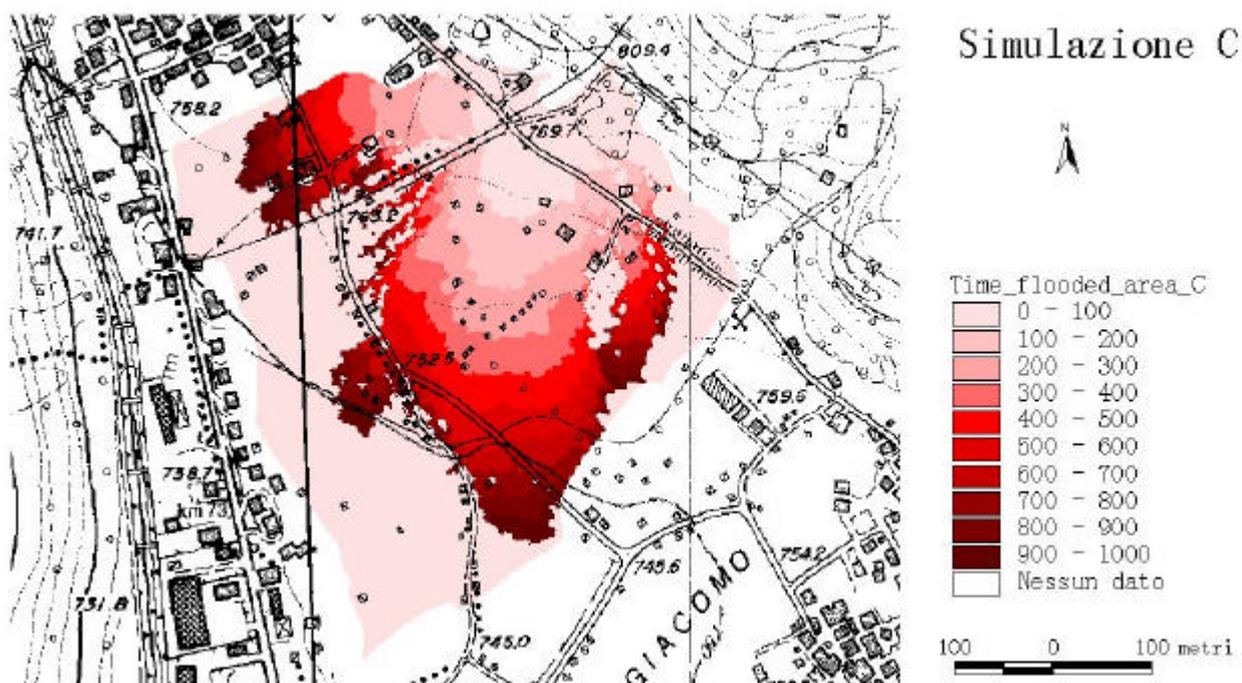


Figura 40 – Mappa raster dell'avanzamento dell'onda di colata nella simulazione C.

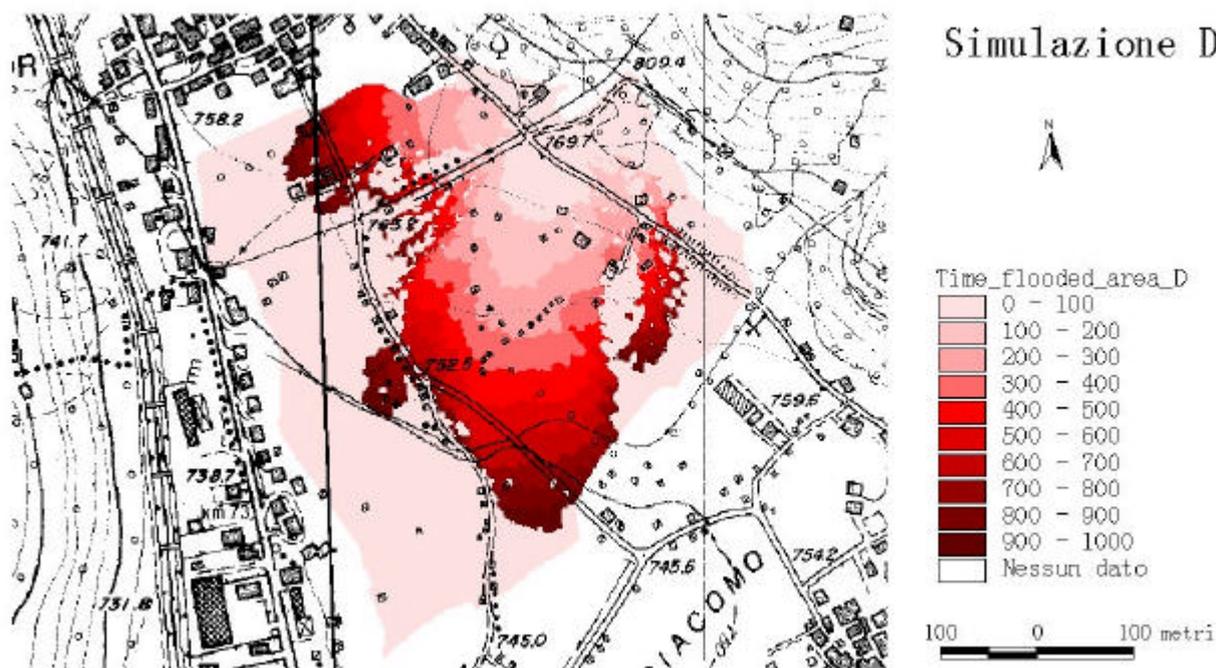


Figura 41 – Mapa raster dell'avanzamento dell'onda di colata nella simulazione D.

Gli intervalli di tempo eletti per la visualizzazione grafica degli avanzamenti dell'ondata della colata detritica, permettono di apprezzare con chiarezza l'evoluzione temporale dell'accumulo di sedimentazione sul conoide.

Dalla lettura delle figure si evince come, prevedibilmente, l'avanzamento del fronte di colata sia più rilevante per le simulazioni effettuate utilizzando l'idrogramma maggiore, e come l'utilizzo della mappa raster del coefficiente di Chezy faccia deviare la colata in direzioni preferenziali, rappresentate dalle zone a scabrezza minore.

Il risultato più rilevante è comunque la comprovazione della sensibilità del submodello e la conferma della bontà delle simulazioni di propagazione di debris flow condotte su conoidi in cui il collettore principale è insufficiente al contenimento della colata, e in cui la stessa è costretta ad espandersi a ventaglio.

4.4. APPLICAZIONE DEL SOTTOMODELLO MODDS AL BACINO DEL RIO LENZI

4.4.1. CARATTERI GENERALI DEL BACINO ED ANALISI MORFOMETRICA

Il Rio Lenzi è localizzato alla testata del bacino del torrente Fersina, nella parte orientale del territorio della Provincia Autonoma di Trento (Figura 42). Nel presente studio è stata considerata, come sezione di chiusura, il ponte sulla Strada Provinciale n. 8 della Valle dei Mocheni, all'apice del conoide di deiezione. Lo spartiacque si diparte dal collettore a quota 1363 m s.l.m. e, risalendo il crinale sulla destra orografica del torrente, si dirige verso N fino alle pendici del Monte Uomo Vecchio; da qui piega a N-E risalendo lungo tutta la dorsale. Proseguendo in questa direzione giunge alla quota massima del bacino (Monte Rujoch 2415 m s.l.m.) e scende poi verso S passando attraverso la fustaia situata in località Pruner. È a questo punto che la linea di displuvio si avvicina notevolmente all'asta torrentizia, confinando una valle molto stretta e profondamente incisa, con versante sinistro ripido. Lo spartiacque continua a scendere, sempre con direzione S-W, fino ad arrivare a monte della contrada Tollerì, che però non ricade all'interno dell'area del bacino idrografico. Da qui la linea di displuvio raggiunge il ponte e chiude il bacino.

La portata è continua grazie all'alimentazione di numerosi impluvi, il più importante dei quali è il Rio Val di Casa, e alle sorgenti localizzate soprattutto nella parte inferiore del bacino di raccolta.



Figura 42 – Inquadramento geografico del bacino idrografico del Rio Lenzi.

Il Rio Lenzi era considerato in passato come uno dei maggiori apportatori di congerie nell'alveo del Fersina. Ciò era dovuto in parte all'attività erosiva di fondo, e in parte a quella ai piedi dei versanti, a causa della continua deviazione della corrente dall'una all'altra sponda, spesso favorita dalla presenza di grossi massi in alveo. Tutt'altro che trascurabile era poi l'estendersi

progressivo delle grandi frane localizzate nel tratto medio del corso d'acqua, dove i versanti sono principalmente costituiti da depositi morenici. Il continuo apporto di sedimenti nella porzione terminale dell'alveo, ha edificato un conoide di deiezione piuttosto ampio, e ha confinato l'asta principale del torrente Fersina a ridosso del versante sinistro, generandovi delle condizioni di instabilità (frane).

Sul conoide edificato dal Rio Lenzi **(Foto 5)** sorgono i due nuclei storici di Lenzi e Canopi; altre località, come Tollerì e Stefani, sono ubicate appena fuori dello spartiacque nella parte inferiore del bacino. All'abbandono di prati e pascoli nelle aree montane si è contrapposto negli ultimi anni un incremento della presenza antropica per lo più legata al turismo; sono così sorte nuove abitazioni o sono stati recuperati vecchi fabbricati (antichi masi per l'alpeggio) soprattutto ad uso turistico-ricreativo. Per quanto concerne le infrastrutture viarie, la Strada Provinciale n. 8, che sale da Sant'Orsola, attraversa il torrente a monte dell'abitato di Lenzi e poi nei pressi dell'abitato dei Canopi.



Foto 5 – Il conoide del Rio Lenzi.

Il reticolo idrografico del Rio Lenzi è piuttosto semplice. Nella destra orografica, a quota 1500 m s.l.m. raccoglie le acque del Rio Val di Casa, suo principale affluente. Più a monte, a quota 1710 m s.l.m. e a 1830 m s.l.m., sempre in destra, confluiscono due impluvi, rispettivamente il Rio Val Vecchia e il Rio Val di Mezzo, il cui apporto idrico è ridotto, così come quello dei numerosi impluvi posti in sinistra orografica.

La pendenza dell'alveo è abbastanza elevata; nella parte alta si registrano valori superiori al 40%, mentre scende attorno al 25% nella parte media e al 20% in quella bassa; all'interno del

conoide l'asta torrentizia ha una pendenza media del 17%. L'analisi morfometrica del bacino ha fornito i valori dei parametri principali riportati nella **Tabella 18**.

Area totale del bacino	2.43	km ²
Quota minima	1362.73	m s.l.m.
Quota media	1880.37	m s.l.m.
Quota massima	2409.22	m s.l.m.
Pendenza media	53.47	%
Esposizione media	171.87	°
Lunghezza collettore	2292	m
Pendenza media collettore	26	%

Tabella 18 – Principali parametri morfometrici del bacino del Rio Lenzi.

Dal punto di vista geologico, nel bacino del Rio Lenzi si può notare la diversità morfologica fra le zone in cui affiorano metamorfiti filladiche che, a causa dell'alta erodibilità danno origine ad orografie dolci, e le zone nelle quali affiorano rocce magmatiche che, decisamente più resistenti, originano morfologie più aspre. Il substrato geologico del bacino del torrente Fersina è in gran parte porfirico, e la valle è interessata nella sua lunghezza da una faglia che, partendo dalla testata, discende verso Palù sul versante destro, e verso Fierozzo su quello sinistro. La faglia è il confine tra porfidi e porfiriti e un vasto affioramento di fillade.

All'interno del bacino del Fersina vi è una notevole presenza di depositi Quaternari, rappresentati da potenti depositi morenici estesi sul 35% della superficie (parte media e inferiore del bacino). Nella parte superiore, testata del bacino del Rio Lenzi, sono presenti le rioliti, per il 46% della superficie. Ai piedi dei versanti ripidi invece, sono diffusamente presenti le falde detritiche composte da materiale a granulometria piuttosto grossolana e scarsamente arrotondato; queste formazioni occupano circa il 13% della superficie del bacino. Di natura molto simile ai depositi morenici sono le coperture eluviali, prodotte dall'alterazione delle rocce affioranti per effetto di fenomeni atmosferici. Di minore importanza, in termini di superfici occupate, sono lave, tufi riolitici (5%), daciti e riodaciti (**Figura 43**).

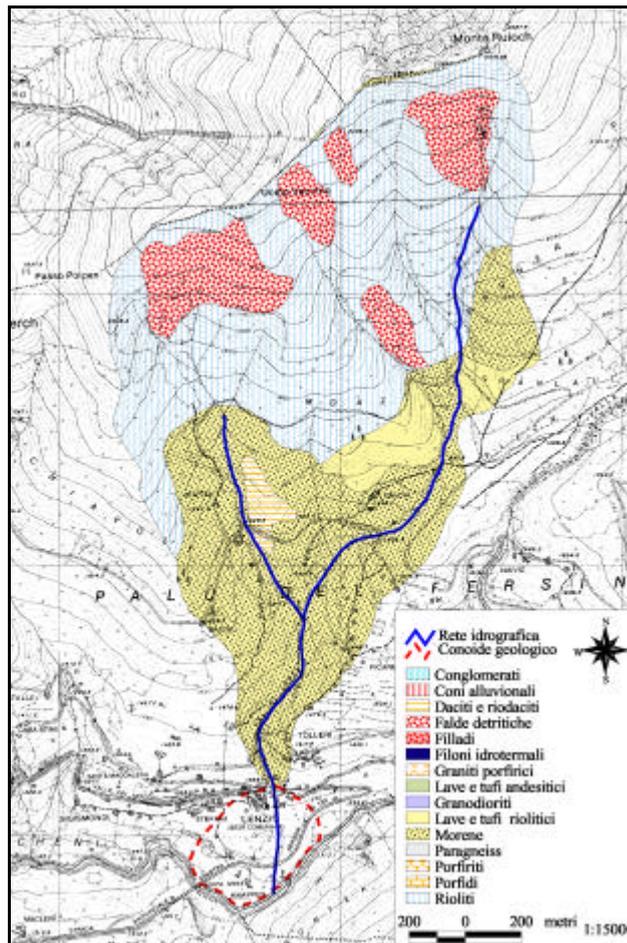


Figura 43 – Struttura geologica del bacino idrografico del Rio Lenzi.

Climaticamente, il bacino del Rio Lenzi è tipicamente continentale alpino, con piovosità massima in primavera ed autunno, inverni caratterizzati da abbondanti precipitazioni nevose ed estati fresche con frequenti piogge. L'assetto climatico e vegetazionale risente della prevalente esposizione Sud. Nonostante l'intero bacino sia ascrivibile alla fascia fitoclimatica del *Picetum* e dell'*Alpinetum*, si possono osservare alcuni elementi che testimoniano la maggiore insolazione e le temperature più miti di cui godono i versanti.

Procedendo dalla sezione di chiusura fino alle vette più elevate è possibile incontrare diverse associazioni vegetali (**Figura 44**). Nella porzione inferiore del bacino, a ridosso del centro abitato, sono presenti prati falciabili, seminativi e pascoli di piccole dimensioni. Fino a quota 1400-1500 m s.l.m. domina l'abete rosso, accompagnato dall'abete bianco e talvolta dal faggio; a quote superiori invece, l'abete rosso è dominante. Le fustaie di larice sono variamente dislocate, sia altimetricamente che topograficamente; in genere si tratta di aree pascolive abbandonate o di zone denudate a seguito dei passati disboscamenti. Al di sopra del limite del bosco s'incontrano dei tappeti erbacei più o meno discontinui di mirtillo, rododendri ed ericacee varie. Alle quote superiori, ripidi impluvi e versanti privi di vegetazione, possono diventare sede di scorrimento di valanghe; il

verificarsi di questi eventi limita e condiziona lo sviluppo della vegetazione, oltre a determinare localizzati fenomeni di dissesto (**Foto 6**).



Foto 6 – Parte alta del bacino del Rio Lenzi.

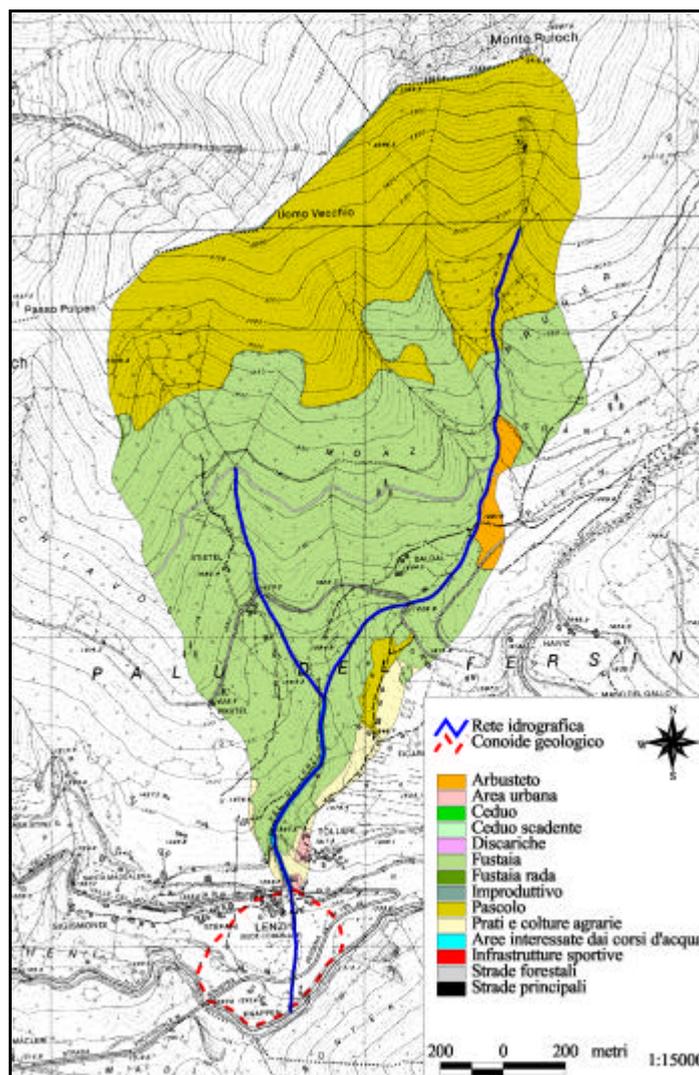


Figura 44 - Carta dell'uso del suolo nel bacino del Rio Lenzi.

4.4.2. IL CONOIDE DEL RIO LENZI

Fin dal passato il torrente Fersina, durante le piene più irruente ed impetuose, arrecò numerosi danni alla Valle dei Mocheni, alla pianura Perginese e alla città di Trento. Il Rio Lenzi era considerato, soprattutto in passato, come uno dei maggiori apportatori di congerie del bacino del torrente Fersina. Le zone maggiormente colpite erano l'abitato dei Canopi e la fascia a ridosso dell'alveo, con danni in corrispondenza dei ponti ed inghiaimento dei prati.

Per quanto concerne lo stato attuale dei dissesti, a monte del ponte che porta all'abitato dei Tollereri, l'alveo si presenta poco approfondito e privo di argini definiti; per questo motivo eventi piovosi poco superiori alla norma provocano la fuoriuscita della corrente, favorita anche dalla presenza di vegetazione in alveo.

Gli insediamenti presenti sul conoide (**Tabella 19**) sono piuttosto limitati. La località Lenzi è il nucleo abitato principale e si trova nella parte alta del conoide, mentre un secondo gruppo di case, parzialmente disabitato, i Canopi, si localizza nella parte inferiore. La parte restante del conoide è adibita a prati, nella maggior parte dei casi abbandonati e in fase di ricolonizzazione da parte di specie arboree ed arbustive.

Area totale del conoide	0.14 km ²
Quota minima	1258.10 m s.l.m.
Quota media	1319.60 m s.l.m.
Quota massima	1407.10 m s.l.m.
Pendenza media	25.13 %
Esposizione media	197 ° (S-SW)
Lunghezza del collettore sul conoide	580.00 m
Pendenza del collettore sul conoide	17 %

Tabella 19– Principali parametri morfometrici del conoide del Rio Lenzi.

4.4.3. ANALISI DELLA PORTATA MASSIMA DI PIENA E DELLE SEZIONI CRITICHE

Il software MODDS è stato applicato al torrente Lenzi con lo scopo di individuare i possibili punti di fuoriuscita della colata e di stimare, con un approccio deterministico, le aree di pericolo sul conoide. Allo scopo di descrivere dettagliatamente la geometria d'alveo nel tratto di attraversamento del conoide, sono state inserite nel modello 65 sezioni localizzate nei punti più significativi. Nella fase di preparazione dei dati necessari a MODDS per la simulazione è stato necessario definire la pendenza dell'alveo fra le varie sezioni e la scabrezza di ogni singola sezione.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, vista l'assenza di cunettoni o altre opere in alveo, si è deciso di usare un valore costante pari a 2 (espresso secondo Chezy adimensionale). L'idrogramma solido di entrata è stato definito ipotizzando un volume di sedimento movimentabile di 30.000 metri cubi e un valore al picco di 120 m³/s. Ammettendo poi un idrogramma di forma triangolare con un'onda caratterizzata da una fase di esaurimento pari a 3 volte la fase di concentrazione, si ottiene una durata dell'evento pari a 500 secondi ed un idrogramma solido così come quello rappresentato in **Figura 45**.

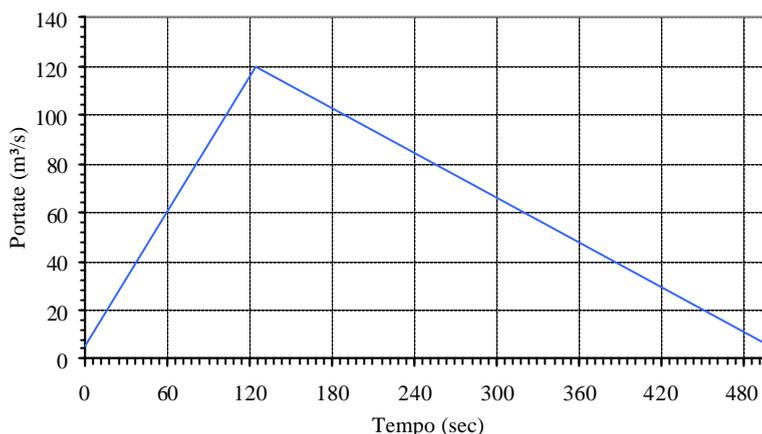


Figura 45 – Idrogramma solido utilizzato per la simulazione sul Rio Lenzi.

Una prima simulazione è stata eseguita considerando l'intero tratto d'alveo sottostante nel conoide. Così facendo, gran parte delle sezioni a monte del ponte dei Tollereri si sono dimostrate insufficienti a causa delle ridotte dimensioni dell'alveo. La valutazione oggettiva dei risultati ottenuti ha suggerito di ipotizzare il rientro di buona parte del sedimento fuoriuscito prima del citato ponte. E' stata perciò impostata una seconda simulazione, escludendo dal tratto esaminato le sezioni a monte del ponte dei Tollereri. Anche in questo caso il tirante in corrispondenza della sezione 19, subisce un rapido incremento non appena viene raggiunta la quota inferiore della soletta del ponte. L'aumento marcato del tirante si manifesta con un consistente overflow. Il confronto fra i valori assunti dai tiranti in corrispondenza della sezione 36 (sezione che descrive il ponte) e l'altezza utile del ponte stesso (4.40 m), consente di constatare il corretto dimensionamento dell'opera. La stessa analisi condotta per il ponte posto più a valle, ne conferma la funzionalità.

Il tratto compreso fra i due ponti denota alcune sezioni insufficienti, in corrispondenza delle quali si osservano delle fuoriuscite più o meno accentuate (**Figura 46**). A causa della forma convessa del conoide, il sedimento che fuoriesce è allontanato in modo definitivo e non vi sono ulteriori possibilità di rientro della corrente.

L'applicazione del modello MODDS ha indicato un maggiore overflow in sponda destra. Questo concorda con le evidenze riscontrate sul terreno (bosco di specie pioniere su un terreno arido a granulometria grossolana). Viene evidenziata un leggero overflow anche in sponda sinistra. Le sezioni individuate come critiche corrispondono dunque al tratto in cui già in passato il Rio Val dei Lenzi è fuoriuscito, inondando d'acqua e ghiaia i prati sottostanti.

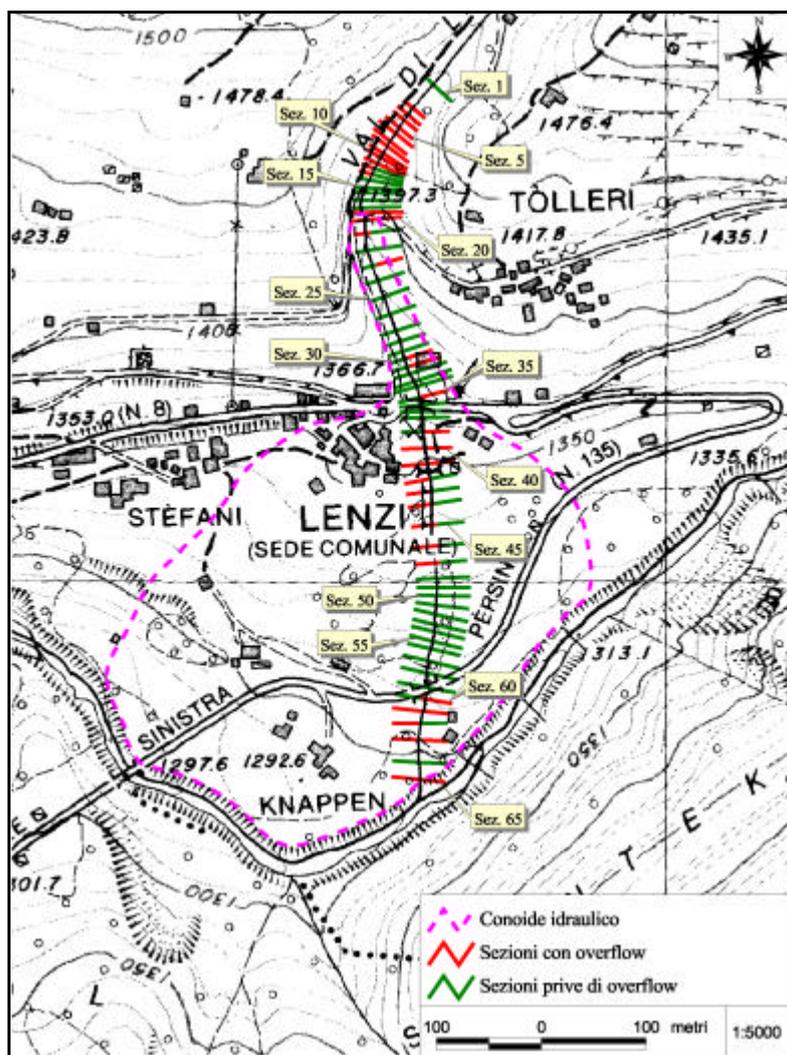


Figura 46 – Verifica delle sezioni applicando il modello MODDS sul Rio Lenzi.

4.4.4. DEFINIZIONE DELLE DISTANZE DI ARRESTO E MAPPATURA DELLE AREE DI RISCHIO

Al fine di realizzare una mappatura delle aree di pericolo, l'individuazione delle sezioni critiche non è sufficiente; è necessario infatti provvedere ad una successiva distribuzione dei volumi fuoriuscenti determinati con il modello MODDS.

Prima di applicare un qualsiasi metodo di distribuzione della colata, dato che la capacità di propagazione della stessa dipende dalla pendenza e dalla scabrezza del fondo sul quale essa si muove, è stata prodotta una mappa tematica per ognuna delle due variabili; dalla loro sovrapposizione si quindi è ottenuta una mappa della propensione al movimento della colata detritica. Questa evidenzia le zone caratterizzate da scarsa propensione al trasferimento della colata con tonalità verdi, e le zone con comportamento opposto, con tonalità rosse (**Figura 47**).

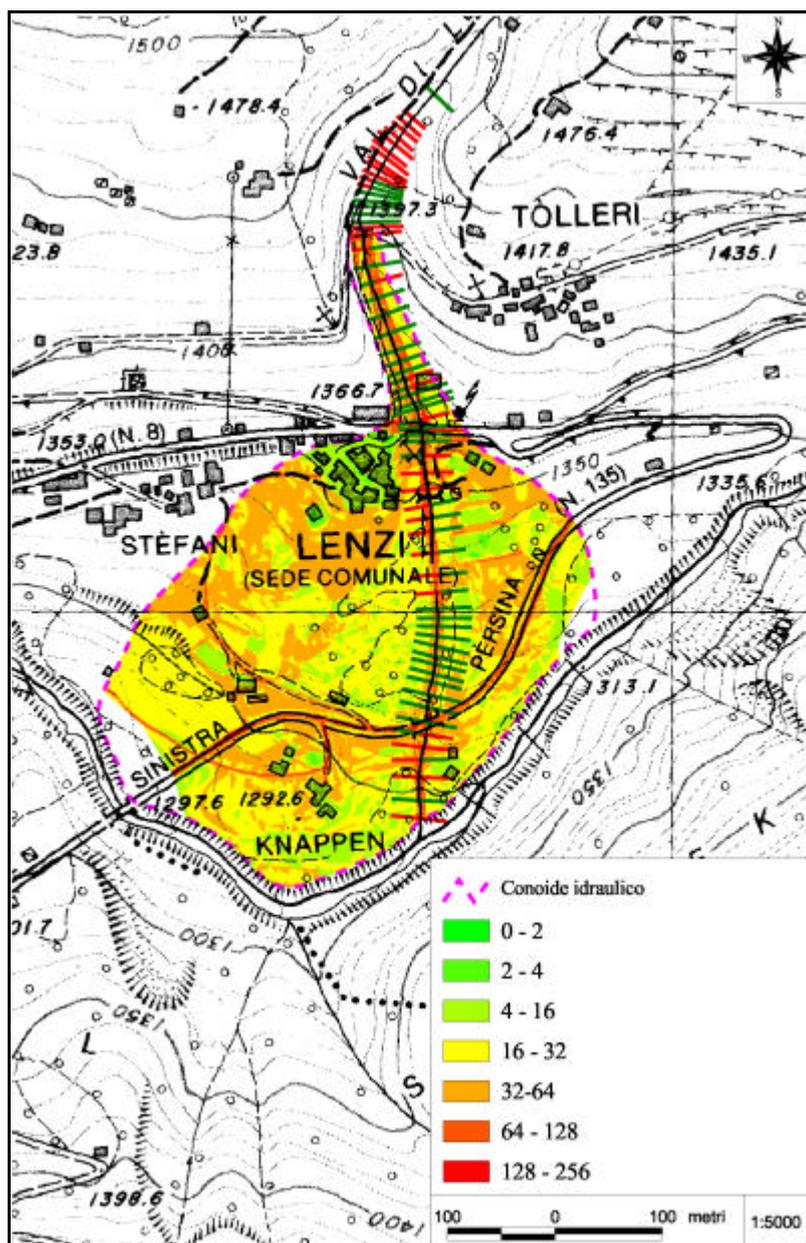


Figura 47 – Mappa della propensione alla diffusione della colata.

L'analisi di questa mappa evidenzia numerose aree caratterizzate da un'elevata capacità di diffusione della colata, tuttavia l'attenzione deve essere focalizzata solo su quelle potenzialmente

interessate da un eventuale overflow della colata detritica (sezioni critiche). La morfologia dei luoghi induce a concludere che le eventuali fuoriuscite che si realizzano a monte del ponte dei Tollerì, tendono a rientrare in alveo. Questa considerazione non vale per la quantità di sedimento che defluisce lungo la strada parallela all'alveo che, potendo arrivare fino all'abitato di Palù, potrebbe generare una condizione di pericolo medio.

Molto più interessante è l'analisi delle sezioni insufficienti individuate fra i due ponti, dove infatti la forma convessa del conoide porterebbe ad una dispersione della colata. Seguendo le linee di massima pendenza sono state individuate le due principali direttrici di deflusso e, lungo queste, è stata applicata la formula proposta da Ikeya (1989) per la stima della distanza di arresto. Per l'applicazione della citata equazione, è necessaria la stima del volume che si presenta all'imbocco della zona di fuoriuscita. Anche in questo caso possono essere utilizzati i risultati ottenuti con l'applicazione del modello MODDS, ossia la somma dei singoli idrogrammi solidi di overflow per le sezioni risultate insufficienti (**Figura 48**).

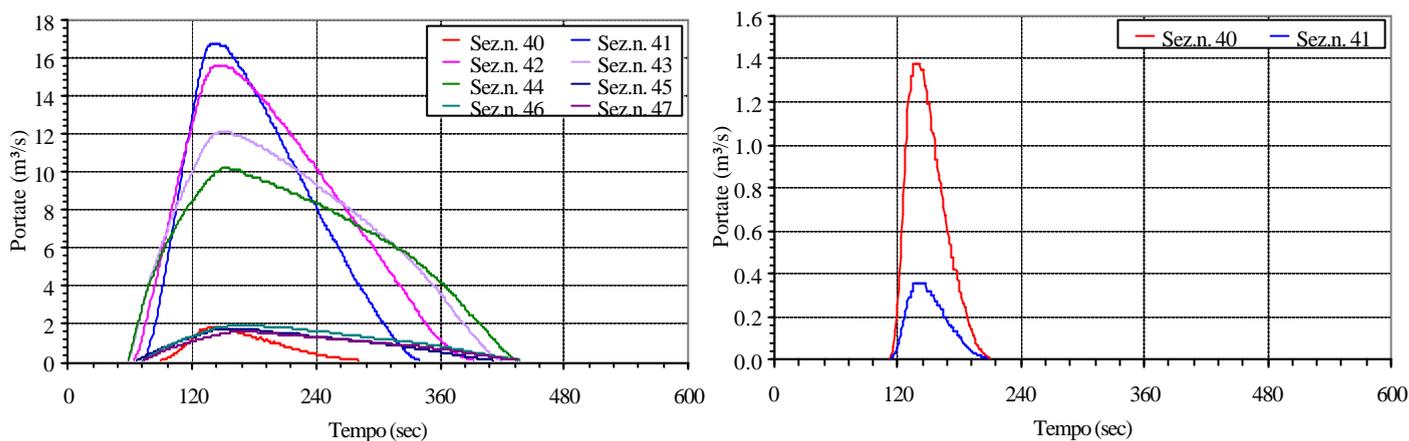


Figura 48 – Idrogrammi solidi di overflow in sponda destra ed in sponda sinistra.

Complessivamente in sponda destra escono 11200 m³, mentre in sponda sinistra solo 75 m³. Applicando l'equazione di Ikeya sono state ottenute delle distanze di arresto di 192 m in sponda destra e di 20 metri in sponda sinistra. Per quanto riguarda le sezioni poste a valle del secondo ponte sulla strada provinciale n. 8 (sez. 59, quota 1314 m s.l.m.), l'applicazione dell'equazione proposta da Ikeya indica che il materiale si distribuisce arrivando fino al torrente Fersina.

Alla luce delle considerazioni di cui sopra, la mappa del pericolo da debris flow è quella rappresentata in **Figura 49**.

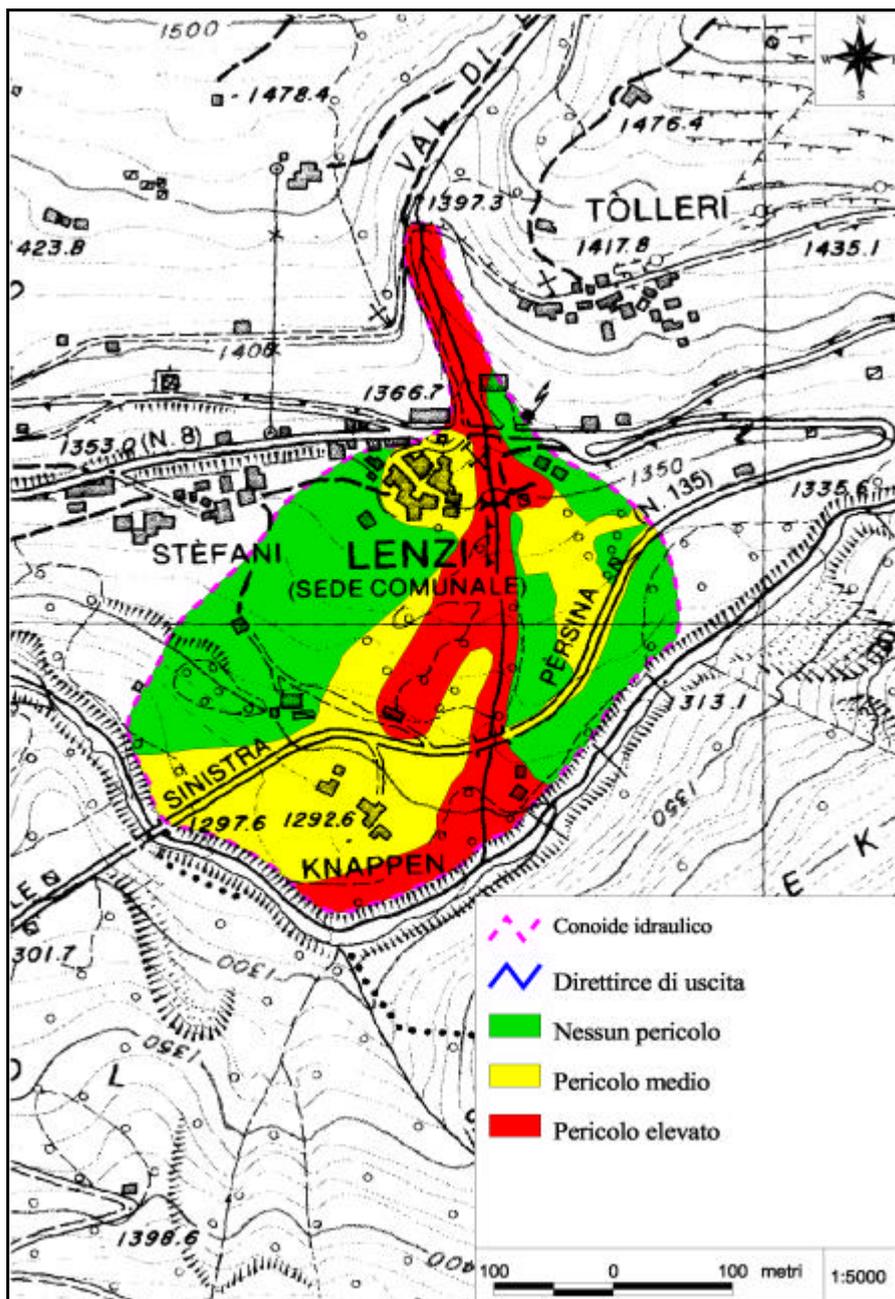


Figura 49 – Mappa del pericolo da debris flow nel conoide del Rio Lenzi.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AULITZKY H. (1994) Hazard mapping and zoning in Austria: methods and legal implications. *Mountain Research and Development*. Volume 14 (4), 307-313.

D'AGOSTINO V. & MARCHI L. (2001) Debris flow magnitude in the eastern Italian Alps: data collection and analysis. *Physics and Chemistry of the Earth. Part C*, Volume 26 (9), 657-663.

LENZI M.A. (2001) Scientific report 2000, DAMOCLES Project Contract no EVG1 - CT-1999-00007. University of Padua.

LENZI M.A. (2002) Scientific report 2001, DAMOCLES Project Contract no EVG1 - CT-1999-00007. University of Padua.

LENZI M.A. & PATERNO P. (1997) La progettazione e la valutazione di impatto ambientale degli interventi di sistemazione idraulico-forestali. Un caso di studio sul Rio Lazer. Ed. Progetto. Padova. pp158.

SINGH V.P. (1996) *Dam Breach Modelling Technology*. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 169-174.

SONDA D. (2001) Valutazione della pericolosità idrogeologica su conoidi alpini. PhD Thesis. Department of Land and Agro-Forest Environments. University of Padua. pp 256.