



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI AGRARIA

Dipartimento del Territorio e dei Sistemi Agro Forestali

TESI DI LAUREA IN TUTELA E MANUTENZIONE DEL TERRITORIO

***IMPIEGO DI DEM A DIVERSA RISOLUZIONE
PER IL RICONOSCIMENTO DELLA DINAMICA DELLE COLATE
DETRITICHE: IL CASO DELL'ALTA VALLE DEL TORRENTE AVISIO
(TRENTO)***

Relatore:

Prof. Vincenzo D'Agostino

Correlatore:

Dott. Marco Cavalli

Laureando:

Caterina Ferrato

Matricola n. 492936

ANNO ACCADEMICO 2008-2009

A mia madre.

RIASSUNTO

La tesi si propone di interpretare, sulla base del riconoscimento della dinamica delle colate detritiche, il confronto fra DTM derivati da rilievo LiDAR da aeromobile a diverse risoluzioni e un DEM generato da cartografia tradizionale.

Il modello digitale delle elevazioni può essere considerato come l'informazione fondamentale da utilizzare in ambito GIS per le analisi digitali finalizzate alla comprensione e allo studio dei processi geomorfologica ed idrologici, specialmente nei bacini montani, dove la morfologia occupa un ruolo predominante per la risposta idrologica. Il DEM è la rappresentazione digitale della superficie topografica reale. L'area di studio, l'alta valle del torrente Avisio ubicata in provincia di Trento, è caratterizzata da frequenti eventi di colata detritica a causa della morfologia dolomitica che si sviluppa con l'alternanza di imponenti testate rocciose e falde detritiche.

L'intera procedura di creazione dei DTM (modello digitale del terreno) che sono stati forniti in formato testo dal servizio Bacini Montani della Provincia Autonoma di Trento, la riduzione di risoluzione del DTM raster da 2x2metri a 5x5, 10x10 e 20x20 metri, l'estrazione del reticolo sintetico e la classificazione della rete idrografica secondo la dinamica delle colate detritiche, sono state implementate in ambiente GIS. Il GIS (Sistema Informativo Geografico) è uno strumento per interrogare, analizzare e visualizzare i dati a supporto degli utilizzatori per effettuare valutazioni e prendere decisioni di carattere gestionale e pianificatorio. Questo sistema è tanto più di supporto quanto migliori sono le informazioni di base sulle quali si lavora.

I dati di base utilizzati sono generati da rilievo LiDAR, una nuova tecnologia che ha aumentato la qualità del DTM permettendo a questi modelli digitali di competere, specialmente in aree con copertura vegetale e morfologia complessa, con i metodi tradizionali.

Il confronto pone una riflessione sui valori di quota e pendenza ottenuti dai DEM, sulla numerosità dei punti classificati lungo il reticolo idrografico sintetico, sulle mappe ombreggiate. Un ulteriore riflessione verrà riservata a due casi di studio particolari, la frazione di Soraga e la conca Gardeccia, il primo in riferimento all'estrazione del reticolo idrografico di sintesi ed il secondo riferito all'individuazione e alla classificazione del reticolo in base alla dinamica delle colte detritiche.

ABSTRACT

Use of DEM with different resolutions for the recognition of debris flows dynamic: the case study of the upper Avisio river valley (Trento).

The thesis work aims to interpret the comparison, based on the recognition of debris flow dynamic between DTM (Digital Terrain Model) with different resolution of airborne LiDAR derived and DEM from traditional cartography.

The digital elevation model could be considered the key (fundamental) information of the geographic information system (GIS), because they are the real(actual) digital representation of the topographic surface. DEMs are used in digital analysis to understand and study geomorphological and hydrological processes, especially in mountain basins, where morphology has the main role for the hydrological response.

The study area, the upper Avisio torrent valley (Trento), is characterised by frequent events of debris flows, because of the dolomite morphology developed in the area which presents great rocky peaks alternating to layers of sediment.

The entire DTM creation process, that was provided by Servizi Bacini Montani of Provincia Autonoma di Trento in text format, as the reduction of the resolution from 2x2 m DTM raster to 5x5, 10x10, 20x20 meters, the realization of the channel network and its classification based on the debris flows dynamic, have been implemented in a GIS model, which is a tool for interrogating, analyzing and displaying data and therefore to assess and make decision on management and planning. The type and accuracy of information available determine the level of support this system can offer. basic data source is airborne LiDAR derived, a new technology that increases the DTM quality and allows to these models to compete with traditional methods, specially in high forest-covered areas with complex morphology.

The comparison analyses DEM height and slope values, numerosity of classified points along the synthetic hydrologic network and hillshades. A further analyses will be reserved to two particular case-studies: Soraga zone and Gardeccia basin. The first referring to the extraction of the synthetic hydrologic network and the second to the spotting and classification of network based on debris flows dynamic.

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	- 1 -
2. AREA DI STUDIO	- 2 -
3. LA TOPOGRAFIA DIGITALE ED IL GIS	- 4 -
3.1. MODELLO DIGITALE DELLE ELEVAZIONI (DEM).....	- 4 -
3.2. LA TECNOLOGIA LiDAR.....	- 6 -
3.3. IL GIS	- 8 -
3.4. L'ANALISI DIGITALE SU BASE TOPOGRAFICA.....	- 9 -
4. METODI DI INDAGINE.....	- 13 -
4.1. CREAZIONE DEI DTM	- 13 -
4.2. ESTRAZIONE DELLA RETE IDROGRAFICA SINTETICA.....	- 16 -
4.3. CLASSIFICAZIONE DELLA RETE IDROGRAFICA	- 21 -
4.3.1. Individuazione dei possibili punti di innesco	- 22 -
4.3.2. Individuazione dei punti di propagazione, rallentamento e deposito.	- 24 -
5. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	- 27 -
5.1. CONFRONTO FRA DTM LiDAR AD ALTA RISOLUZIONE E DEM DERIVATO DA CARTOGRAFIA TRADIZIONALE.....	- 33 -
5.1.1. La mappa omberggiata.....	- 33 -
5.1.2. A parità di risoluzione.....	- 37 -
5.1.3. Una verifica di campo del reticolo sintetico: la rete effimera di Soraga di Fassa. -	39 -
5.1.4. Verifica di campo della procedura di classificazione in conca Gardeccia.-	44 -
6. CONCLUSIONI.....	- 63 -
7. BIBLIOGRAFIA	- 65 -
8. RINGRAZIAMENTI.....	- 66 -

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 2.1 Inquadramento geografico del bacino dell'alto Avisio (Trento).</i>	- 3 -
<i>Figura 3.1 Strutture del DEM: a) DEM grid, b) TIN, c) tubi di flusso (da Wilson e Gallant, 2000).</i>	- 4 -
<i>Figura 3.2 Componenti del sistema LiDAR aerotrasportato.</i>	- 7 -
<i>Figura 3.3 GIS: un sistema per il supporto decisionale.</i>	- 8 -
<i>Figura 3.4 DTM derivato da rilievo LiDAR e reticolo sintetico estratto.</i>	- 12 -
<i>Figura 4.1 "Aggregate": esempio con valore massimo.</i>	- 15 -
<i>Figura 4.2 "Resample": tecnica di interpolazione bilineare.</i>	- 15 -
<i>Figura 4.3 Confini dell'area contribuente alla sezione di chiusura.</i>	- 16 -
<i>Figura 4.4 Profilo di un pozzo prima e dopo il "Fill".</i>	- 17 -
<i>Figura 4.5 Direzione di deflusso.</i>	- 18 -
<i>Figura 4.6 Creazione del raster di deflusso accumulato.</i>	- 19 -
<i>Figura 4.7 DTM dell'alto bacino dell'Avisio (a) e rispettiva Hillshade o mappa ombreggiata (b).</i>	- 20 -
<i>Figura 4.8 Command Line: esempio di applicazione.</i>	- 22 -
<i>Figura 4.9 Relazione area-pendenza per l'individuazione dei possibili punti di innesco delle colate detritiche.</i>	- 23 -
<i>Figura 4.10 "Pow": esempio di elevazione alla seconda potenza.</i>	- 24 -
<i>Figura 4.11 DTM derivato da rilievo LiDAR e reticolo sintetico classificato.</i>	- 26 -
<i>Figura 5.1 Classificazione del reticolo alle diverse risoluzioni.</i>	- 31 -
<i>Figura 5.2 Classificazione della rete idrografica dell'alto bacino dell'Avisio, DTM a risoluzione 20x20m.</i>	- 32 -
<i>Figura 5.3 Mappa ombreggiata DEM 10x10 m derivato da cartografia tradizionale...</i>	- 34 -
<i>Figura 5.4 Mappa ombreggiata del DTM LiDAR 20x20 metri.</i>	- 35 -
<i>Figura 5.5 Mappa ombreggiata DTM LiDAR 10x10 metri.</i>	- 35 -
<i>Figura 5.6 Mappa ombreggiata del DTM LiDAR 5x5 metri.</i>	- 36 -
<i>Figura 5.7 Mappa ombreggiata del DTM LiDAR 2x2 metri.</i>	- 36 -
<i>Figura 5.8 Classificazioni del reticolo a diversa origine.</i>	- 39 -
<i>Figura 5.9 DEM 10x10 m derivato da cartografia tradizionale. Frazione di Soraga. ..</i>	- 41 -
<i>Figura 5.10 DTM derivato da rilievo LiDAR 10x10 m. Frazione di Soraga.</i>	- 42 -
<i>Figura 5.11 Canalizzazione della frazione di Soraga.</i>	- 43 -
<i>Figura 5.12 Sbocco del canale individuato dai DTM.</i>	- 43 -
<i>Figura 5.13 Conca Gardeccia, rifugio Catinaccio.</i>	- 44 -

<i>Figura 5.14 DEM 10x10 metri derivato da cartografia tradizionale.....</i>	<i>- 46 -</i>
<i>Figura 5.15 DTM 10x10 metri derivato da rilievo LiDAR.....</i>	<i>- 47 -</i>
<i>Figura 5.16 DTM 20x20 metri derivato da rilievo LiDAR.....</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Figura 5.17 DTM 5x5 metri derivato da rilievo LiDAR.....</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Figura 5.18 DTM 2x2 metri derivato da rilievo LiDAR.....</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Figura 5.19 Panoramica da valle verso monte del rifugio Catinaccio.....</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Figura 5.20 Panoramica dell'area a monte del rifugio.....</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Figura 5.21 Rifugio Catinaccio, panoramica del retro dell'edificio.....</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Figura 5.22 Panoramica.....</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Figura 5.23 Area contribuyente,DTM LiDAR 5x5 m.....</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Figura 5.24 Area contribuyente, DTM LiDAR 2x2 m.....</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Figura 5.25 Diagramma logaritmico relazione area-pendenza (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993).....</i>	<i>- 55 -</i>
<i>Figura 5.26 DTM 5x5 m e punti di innesco dell'erosione a solchi.....</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Figura 5.27 DTM 2x2m e punti di innesco dell'erosione a solchi.....</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Figura 5.28 Distribuzione dei valori di K nelle 5 classi individuate per il DTM 5x5 m.....</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Figura 5.29 Distribuzione dei valori di K per il DTM 2x2 m.....</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Figura 5.30 Classi dei punti di innesco.....</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Figura 5.31 Classi di innesco DTM 5x5 m.....</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Figura 5.32 Classi di innesco DTM 2x2 m.....</i>	<i>- 62 -</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 5.1 Quota (m) dei DTM a diverse risoluzioni.....</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Tabella 5.2 Pendenza (%) dei DTM a diverse risoluzioni.....</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Tabella 5.3 Conversione delle pendenze in gradi (°).....</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Tabella 5.4 Punti classificati per ogni DTM.....</i>	<i>- 29 -</i>
<i>Tabella 5.5 Quota (m) dei DEM.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tabella 5.6 Pendenza (%) dei DEM.....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Tabella 5.7 Conversione della pendenza in gradi (°).....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Tabella 5.8 Punti classificati secondo la dinamica della colata.....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Tabella 5.9 Classi "Natural Breaks" per il DTM 5x5 e 2x2 metri.....</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Tabella 5.10 Valori di K caratteristici.....</i>	<i>- 61 -</i>

1. Introduzione

Negli ultimi anni, la crescita economica derivante dal turismo ha portato numerose valli alpine ad ampliare e sviluppare nel territorio infrastrutture per il soggiorno dei turisti e per la viabilità.

Una crescita che ha esposto sia la popolazione che le infrastrutture stesse al rischio di processi torrentizi che presentano spesso un grande potere distruttivo per l'intensità, la rapidità e la difficile prevedibilità con cui essi accadono.

Le colate detritiche sono processi torrentizi che possono rivelarsi disastrosi, sono fenomeni di movimento di massa costituito da acqua, sedimento e materiale organico di diversa dimensione, frequenti nei piccoli bacini e che possono interessare aree distanti dai siti di innesco coinvolgendo tutto ciò che ostacola il loro percorso da monte a valle.

La frequenza di questi eventi è generalmente bassa e questo è probabilmente uno dei motivi per cui si è portati a sottovalutare il problema, ma se il pericolo comunque rimane, il rischio per la popolazione e le infrastrutture può essere mitigato o addirittura evitato con l'individuazione preliminare delle aste torrentizie potenzialmente soggette a colate detritiche e una corretta pianificazione territoriale.

Lo studio della morfologia del terreno e cioè delle cause predisponenti e delle condizioni di innesco ed evoluzione dei fenomeni è di fondamentale importanza per la prevenzione del rischio da colata detritica connesso.

La tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) è un importante strumento di rilievo morfometrico in grado di restituire, rispetto alla metodologia tradizionale, un elevato numero di dati topografici ad elevata precisione e la capacità di discernere con processi di filtraggio automatizzati i punti relativi ad oggetti sul terreno (come vegetazione, aree urbane) da quelli corrispondenti al suolo.

Il LiDAR aerotrasportato rappresenta una tecnica di rilievo innovativa che consente la derivazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad un'accuratezza e ad una risoluzione non raggiungibile dai DEM derivati da dati altimetrici acquisiti con tecniche tradizionali. Il suo utilizzo come base di dati per le elaborazioni di tipo idrologico e morfologico in ambiente GIS offre l'opportunità di una migliore caratterizzazione dei differenti processi agenti su scala di bacino idrografico.

In questa tesi è stata applicata a partire da DTM LiDAR una procedura GIS finalizzata alla classificazione del reticolo idrografico dell'alto bacino dell'Avisio in base alla dinamica

delle colate detritiche lungo l'asta torrentizia in punti di innesco, propagazione, rallentamento ed arresto secondo fattori topografici.

L'analisi è stata condotta a partire da DTM LiDAR a differente risoluzione (2x2m, 5x5m, 10x10m, 20x20m) per valutare sia l'effetto dell'accuratezza del DTM quando messo a confronto con DEM derivati da cartografia tradizionale, che della dimensione della cella del modello digitale di partenza nella caratterizzazione della dinamica del sedimento nell'area di studio.

2. Area di studio

L'alto bacino dell'Avisio si presenta con un superficie di 212 km² se si considera la sua sezione di chiusura in corrispondenza dell'abitato di Moena. L'area, in provincia di Trento (Trentino-Alto Adige) è coperta da cartografia morfometrica e geomorfologica ben dettagliata per la crescente necessità di perimetrazione delle zone di pericolo a causa dei frequenti problemi causati da eventi di colata detritica.

L'area presenta la peculiare tipologia di bacino dolomitico, il paesaggio è molto vario, si sviluppa con l'alternanza di imponenti testate rocciose, falde detritiche, praterie e pascoli in alta quota. La vegetazione è formata principalmente da boschi di conifere, cirmolo e mughi, con aree di conoide che spesso si presentano densamente urbanizzate in seguito allo sviluppo antropico derivato dall'intensificarsi dell'attività turistica.

Sono presenti i massicci del Sella, Sassolungo, Catinaccio e Marmolada, solcati dalla Val di Fassa nella quale il torrente Avisio scorre dal ghiacciaio della Marmolada (3.342 m.s.l.m.) fino alla sezione di chiusura del bacino posta a Moena, località a 1.148 m.s.l.m.

L'inquadramento geografico dell'area è visibile nella figura 2.1.

Le precipitazioni rispecchiano il regime pluviometrico quasi continentale dell'area, con piogge estive (luglio e agosto) brevi ma intense, rappresentando il fattore scatenante per l'innesco delle colate detritiche.

Il DTM derivato da rilievo LiDAR è la base informativa che sarà utilizzata per quest'analisi morfometrica del terreno e per tutte le elaborazioni di estrazione del reticolo sintetico e identificazione delle aste torrentizie soggette a fenomeni di colata detritica evidenziate dall'analisi topografica nelle zone di innesco, propagazione, rallentamento e arresto.

Per questo studio si è fatto uso di DTM di tipo raster della stessa area di studio a maglie differenti (2x2 m, 5x5 m, 10x10 m, 20x20 m) confrontate dapprima fra loro, poi con il supporto di un DEM derivato da cartografia tradizionale 10x10 m con il suo analogo 10x10 m derivato da rilievo LiDAR con una breve messa a fuoco in una frazione del comune di Fassa, Soraga.

Sarà inoltre interessante osservare il tipo di risposta restituita dall'elaborazione in ambiente GIS secondo la diversa risoluzione dei DTM (in particolar modo il DTM 10x10 m confrontato anche in questo caso con il DEM da cartografia tradizionale) su un caso di colata detritica avvenuto nell'agosto 2008 presso un rifugio del comune di Vigo di Fassa (conca Gardeccia ai piedi del massiccio del Catinaccio).

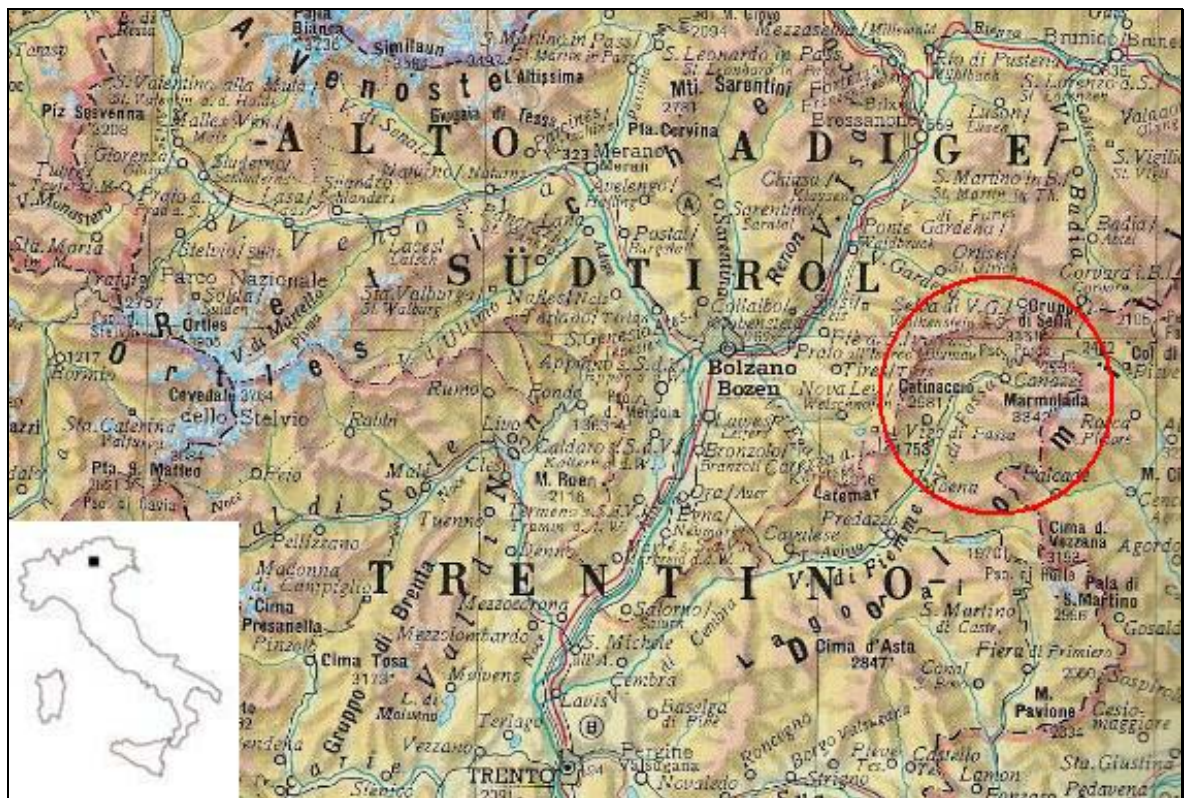


Figura 2.1 Inquadramento geografico del bacino dell'alto Avisio (Trento).

3. La topografia digitale ed il GIS

3.1. Modello Digitale delle Elevazioni (DEM)

Il DEM è la rappresentazione digitale della superficie topografica reale. Può essere considerato come l'informazione fondamentale da utilizzare in ambito GIS per analisi digitali finalizzate alla comprensione e allo studio di processi geomorfologici ed idrologici, specialmente nei bacini montani, dove la morfologia occupa un ruolo predominante per la risposta idrologica.

I DEM possono essere organizzati in tre diverse strutture di dati:

1. Tubi di flusso (DEM basati su curve di livello).
2. Triangulated Irregular Networks (TIN.)
3. DEM grid.

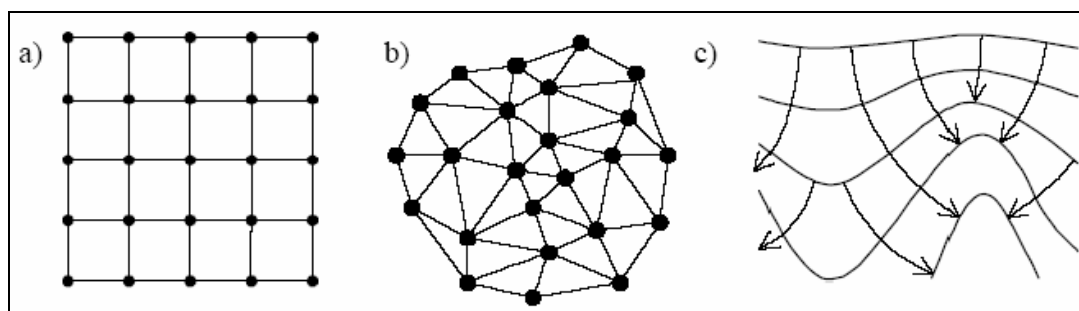


Figura 3.1 Strutture del DEM: a) DEM grid, b) TIN, c) tubi di flusso (da Wilson e Gallant, 2000).

I DEM più comunemente utilizzati per rappresentare la morfologia del territorio e di supporto alle analisi di tipo idrologico, geomorfologico ed ecologico, sono solitamente strutturati in grid dove ogni elemento della griglia viene memorizzato con la rispettiva quota (grid, matrice delle altezze). La particolarità del modello DEM è dovuta alla facilità con cui le matrici possono essere manipolate con gli elaboratori elettronici e alla struttura topologica di facile comprensione (Wilson e Gallant 2000).

Inoltre, essi offrono la possibilità di confrontare e valutare modelli digitali della stessa porzione di territorio, sovrapponendo i grigliati definiti da uguali dimensioni e medesima origine planimetrica. Al contrario, esistono alcuni svantaggi tipici del metodo a matrice delle altezze:

- Il gran numero di dati ridondanti che si vengono ad avere nel caso in cui si descriva l'andamento di un terreno uniforme, vale a dire senza variazioni di altezze;
- La necessità di cambiare la densità del grigliato per poter descrivere zone di crescente complessità, sinonimo di scarsa flessibilità del metodo.

In generale la struttura a griglia può dunque risultare troppo grossolana per descrivere efficacemente tutte le forme particolari del terreno, come la sommità dei rilievi, creste, linee di frattura, ecc (Cavalli 2009).

Un DEM è derivato dall'interpolazione di dati altimetrici che possono avere origine diversa:

- Carte topografiche,
- Rilievo del terreno,
- Remote Sensing.

La prima era, fino a qualche tempo fa, la più comune e consiste nella digitalizzazione delle curve di livello delle carte topografiche con la conversione manuale da parte di un operatore dei dati analogici nel formato digitale; la successiva è il rilievo dal terreno, che veniva effettuato con teodoliti, una tecnica per la quale venivano richiesti tempo e precisione migliorata dall'avvento del teodolite elettronico o stazione totale fino all'utilizzo di unità GPS (Global Position Sistem). Nella famiglia dei remote sensing troviamo tre metodi principali: fotogrammetria, radar e LiDAR. Secondo la diversa origine dei dati del DEM abbiamo una diversa accuratezza dell'informazione topografica che possiamo utilizzare nel nostro ambito GIS. La tecnica di rilievo fotogrammetrico crea DEM da stereo foto digitali georeferenziate e da punti di controllo rilevati sul terreno. Fra gli svantaggi di questa tecnica troviamo, però la sovrastima sistematica delle quote a causa della distorsione della macchina da presa e la creazione di DEM comprensivi della quota della vegetazione.

Il radar è uno strumento che emette radiazioni elettromagnetiche e registra la potenza e il tempo con cui ritorna il del segnale retrodiffuso dalla superficie. E' la tecnologia che richiede il minor costo per km², ma può presentare errori di accuratezza che vanno da pochi metri fino a 10 m.

Il LiDAR è la tecnologia che ha avuto il maggior utilizzo nelle diverse applicazioni negli ultimi anni. E' un sensore laser montato su una piattaforma mobile o fissa per la misura delle distanze che ha incrementato l'affidabilità e l'accuratezza nella creazione di DEM ad elevata risoluzione, in grado di discriminare i punti di quota relativi alla prima superficie riflettente da quelli relativi al suolo nudo.

E' possibile distinguere diverse tipologie di modelli digitali topografici per i quali è utilizzato un acronimo differente: DEM, DTM e DSM.

Il DEM viene inteso come forma generica ad indicare tutti i modelli digitali delle elevazioni derivati con tecniche di tipo tradizionale, il DSM come il modello digitale relativo alla prima superficie riflettente e per questo comprensivo di vegetazione edifici, etc. ed infine il DTM, come modello digitale del solo terreno (suolo nudo), che assume notevole importanza con l'avvento della tecnologia LiDAR (Cavalli 2009).

3.2. La tecnologia LiDAR

Alla categoria dei Remote sensing, appartiene quella che può essere ritenuta a tutti gli effetti la tecnologia più avanzata: il LiDAR, Light Detection and Ranging.

Volendo descrivere questa tecnica di rilievo topografico in modo sintetico, il termine LiDAR indica un sensore laser, dalle caratteristiche più o meno complesse, per la misura di distanze senza alcun riferimento alla piattaforma (terrestre o aerea) sulla quale il sensore può essere montato.

Il sistema LiDAR aerotrasportato ha in qualche modo rivoluzionato la tecnica di rilievo topografico, rendendosi efficace anche in zone molto articolate e di difficile accesso come i piccoli bacini montani. E' una tecnica basata sul sorvolo dell'area d'interesse con un aereo o un elicottero sul quale sono montati un telemetro laser che misura il tempo di ritorno del segnale emesso restituendo così la misura dell'altezza, integrato da un sistema inerziale (INS o IMU) che determina l'assetto del velivolo rilevando i tre gradi di libertà dovuti a rollio, beccheggio e deriva del mezzo ed un GPS che determina la posizione assoluta del telemetro rispetto al sistema di coordinate di riferimento (Figura 3.2).

Il risultato fondamentale di un rilievo LiDAR aerotrasportato è la restituzione delle coordinate x, y e z di ogni misurazione. L'area di interesse è coperta dal rilievo mediante linee di volo parallele finalizzate alla produzione di strisce di scansione sovrapposte la cui larghezza (generalmente 300-400 m) è dipendente all'apertura angolare del sensore ed all'altezza di volo; la risoluzione, in modo analogo, è inversamente proporzionale alla frequenza del generatore del telemetro. Maggiore sarà la distanza dal suolo, maggiore sarà il tempo di ritorno del segnale e l'intervallo fra l'emissione di un segnale e il successivo, diminuendo così la densità dei punti possibili per l'area di interesse.

Una delle caratteristiche della tecnologia LiDAR è quella di rendere possibile, grazie a quella che viene definita riflessione multipla, la distinzione delle quote in quelle relative al

suolo e in quelle relative a tutto ciò che invece sta sopra il suolo, come vegetazione ed edifici, generando così sia DTM che DSM.

La riconosciuta qualità dei DTM e dei DSM generati dall'interpolazione delle nuvole di punti LiDAR permette a questi modelli digitali di competere, specialmente in aree con copertura vegetale, con i metodi tradizionali e da radar. Non sorprende, quindi che questa tecnologia sia sempre più oggetto di studio in vari settori del mondo scientifico.

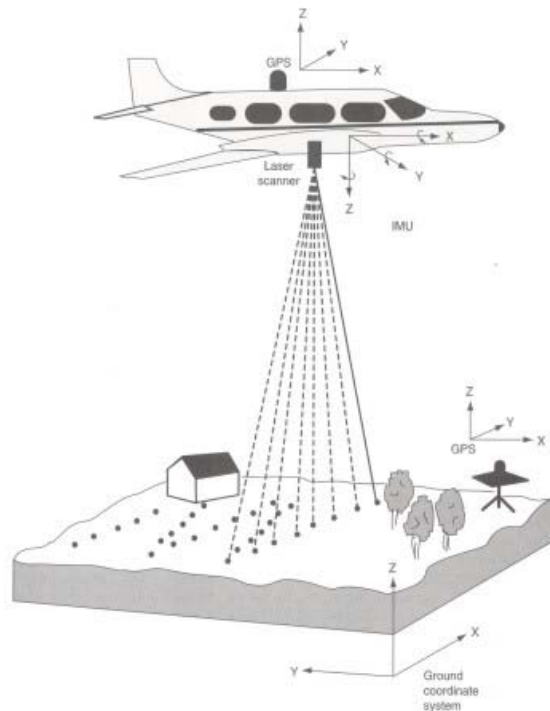


Figura 3.2 Componenti del sistema LiDAR aerotrasportato.

3.3. II GIS

La topografia digitale e i Sistemi Informativi Geografici (GIS) hanno consentito un importante miglioramento nelle tecniche di visualizzazione e analisi del territorio, dando l'opportunità di effettuare analisi prima non realizzabili. Un sistema informativo è uno strumento computerizzato che permette di raccogliere, memorizzare, posizionare, richiamare, analizzare, trasformare e rappresentare dati georiferiti ed eventi che esistono e si verificano sul territorio.

Un sistema informativo è una struttura strumentale per la gestione di flussi di informazione inerenti lo stato di un determinato fenomeno e lo scopo è quello di disporre della conoscenza attuale e storica per effettuare valutazioni e prendere decisioni di carattere gestionale e pianificatorio (Figura 3.3). Il dato (descrizione oggettiva di un evento) è la materia prima dell'informazione (interpretazione di un evento), ma non è direttamente utilizzabile per prendere decisioni.

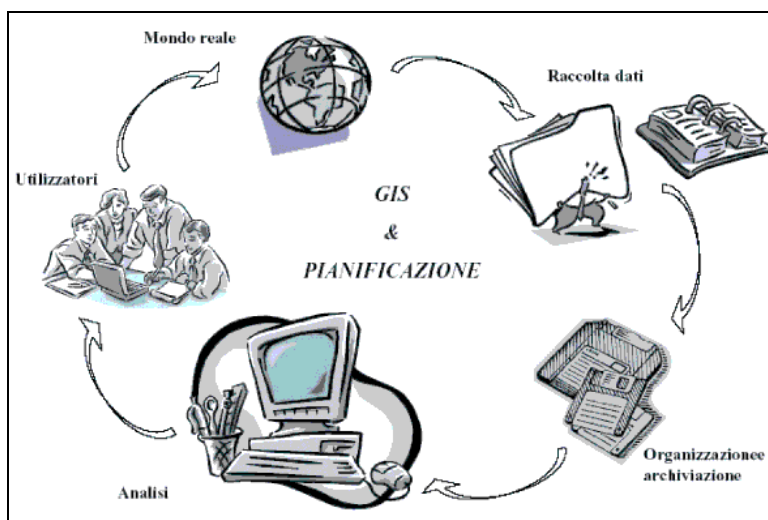


Figura 3.3 GIS: un sistema per il supporto decisionale.

Il GIS è l'insieme di sottosistemi correlati che si possono identificare come:

- Sottosistema elaborazione ed analisi dati (hardware, software, dati).
- Sottosistema utenti dell'informazione (chi interagisce con il GIS).
- Sottosistema gestione (il ruolo del GIS nell'organizzazione, il personale per la gestione del sistema, l'interazione tra il "gruppo GIS" e il resto dell'organizzazione)

L'obiettivo di un S.I. è quello di trasformare una gran massa di dati in poche informazioni, altamente significative per lo scopo cui sono finalizzate.

Si può affermare che migliori informazioni comportano migliori decisioni e questo è il principio per cui va progettato un sistema informativo: un GIS, infatti, non è un sistema per produrre decisioni in maniera automatica ma uno strumento per interrogare, analizzare e visualizzare dati a supporto del processo decisionale.

Esso risponde alla necessità di procedere all'analisi integrata di informazioni organizzate e georiferite al territorio, al fine di mostrare i dati acquisiti in vari modi e secondo vari punti di vista.

In questa tesi la metodologia di indagine sarà indirizzata all'individuazione dei tratti del reticolo idrografico che per caratteristiche topologiche sono interessati da fasi diverse del processo di una colata detritica: saranno così identificati, mediante tecniche di analisi digitale, i possibili punti di innesco, propagazione, rallentamento e arresto della colata con una procedura implementata in GIS applicata al bacino dell'alto Avisio in provincia di Trento.

3.4. L'analisi digitale su base topografica

Il reticolo idrografico è costituito dall'insieme dei corsi d'acqua che solcano in superficie il bacino idrografico convergendo alla sezione di chiusura dello stesso. Esso manifesta invariabilmente la struttura ad albero la cui ramificazione riflette la natura dei processi dominanti di natura climatica, idrologica, geologica, morfologica, edafica che controllano l'evoluzione del territorio.

La definizione di corso d'acqua con riferimento alla percezione comune di torrente e di fiume non pone particolari problemi; gli elementi caratteristici sono la presenza di acqua fluente con velocità proporzionale al gradiente energetico in direzione del moto e una geometria trasversale confinata che definisce una sezione liquida. Il concetto di corso d'acqua, sempre con riferimento alla percezione comune, vacilla quando, pur in presenza degli elementi geometrici e morfologici caratteristici, manca l'acqua ovvero questa è presente solo in determinati momenti del ciclo idrologico. Questa eventualità è generalmente più frequente alla testata dei bacini idrografici in corrispondenza delle ramificazioni più periferiche del reticolo. Questa porzione della rete idrografica viene generalmente indicata con il termine di "rete effimera" ad indicare appunto la presenza intermittente di flussi liquidi.

L'inizio di un collettore è generalmente interpretato come un fenomeno di soglia che vede il verificarsi di una concentrazione di deflusso tale da dare origine ad una forma di incisione nella quale siano trasportati deflussi solidi e liquidi tra due sponde riconoscibili.

La concentrazione dei deflussi può avvenire per aggregazione dei rigagnoli superficiali fino a quando la forza erosiva della corrente non è in grado di incidere stabilmente il canale oppure per via sottosuperficiale provocando per saturazione il collasso di una porzione di versante, l'emersione del deflusso sottosuperficiale e quindi l'inizio del canale. Non mancano ovviamente varianti e forme intermedie (Dalla Fontana, 2005).

Uno specifico interesse nell'identificazione dei tratti di testata del reticolo è riconducibile alle esigenze legate all'estrazione della rete idrografica sintetica dal modello digitale delle quote.

Il primo passo per poter conseguire l'estrazione del reticolo idrografico dal modello digitale delle quote (DEM) prevede l'individuazione delle direzioni del deflusso secondo percorsi indirizzati dal gradiente topografico. Lungo le direzioni di deflusso viene aggregata l'area drenata in valore crescente tra due estremi: un valore minimo, pari all'area dell'elemento discreto del raster, per le celle appartenenti allo spartiacque e un valore massimo pari all'area del bacino per la cella posta alla sezione di chiusura. L'identificazione di un'area di soglia consente di filtrare il grid dell'area drenata discriminando le celle con valori inferiori alla soglia (celle versante) da quelle con valori superiori (celle reticolo). Viene così individuato un reticolo idrografico sintetico che riproduce in forma più o meno consistente l'andamento delle linee di impluvio naturali (Figura 3.4).

L'area drenata, aggregata lungo le direzioni di deflusso, offre un'indicazione di concentrazione che può sostituire la portata, mentre la pendenza locale è un indicatore del gradiente energetico che esprime l'erosività del flusso (Marchi e Dalla Fontana, 2005).

Le procedure più note fanno riferimento al classico metodo "single flow" (D8), al metodo Dinfinito (D_{∞}) e al metodo noto come "multiple flow" (MF). I tre algoritmi, i cui dettagli sono reperibili facilmente anche nella manualistica tecnica dei prodotti software, si caratterizzano per rappresentare in modo diverso la dispersione delle direzioni di deflusso (Dalla Fontana 2005).

Una volta individuato il reticolo idrografico è necessario valutare i diversi fattori che influiscono sulla dinamica del sedimento e un ruolo fondamentale è attribuibile all'assetto topografico del terreno. La morfologia esprime la presenza di un gradiente energetico

necessario per l'attivazione di processi di trasporto della quale vengono a nostro favore due caratteristiche: area contribuyente (A) e pendenza locale (S).

La combinazione di queste variabili può essere considerata come indice del potenziale verificarsi di una concentrazione di deflusso e della potenzialità erosiva dello stesso (Cavalli e Marchi, 2006).

Per identificare, nel modello digitale del terreno di un bacino, le possibili zone di innesco delle colate lungo le aste torrentizie individuate in precedenza, possono essere sufficienti indici morfometrici che combinano l'area contribuyente e la pendenza locale. Una variabile direttamente collegata ai processi di modellamento di tutte le morfologie fluviali è la potenza della corrente ("stream power", Ω in W m^{-1}), che definisce l'energia potenziale dissipata dal flusso per unità di lunghezza del canale. Ω viene definita dalla relazione:

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \quad (1)$$

dove Q è la portata liquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), S la pendenza del fondo del canale (m/m), ρ la densità dell'acqua (kg m^{-3}) e g l'accelerazione di gravità (m s^{-2}).

Lo stream power ha la caratteristica di riunire un fattore idrologico ad uno di tipo topografico (D'Agostino e Vianello, 2005).

L'indice SPI (Stream Power Index) assume la radice quadrata dell'area drenata come surrogato della portata su base topografica, rappresentando così un valido indicatore del controllo esercitato dai fattori topografici sull'intensità potenziale dei processi di erosione e di trasporto di sedimento (Cavalli e Marchi, 2006).

In modo simile si presenta la relazione tra pendenza locale ed area contribuyente che viene proposta da Zimmermann et al. (1997) a partire da studi eseguiti su diversi eventi di colata in Svizzera, che risulta essere di interesse anche per i contesti morfoclimatici caratteristici della Provincia Autonoma di Trento.

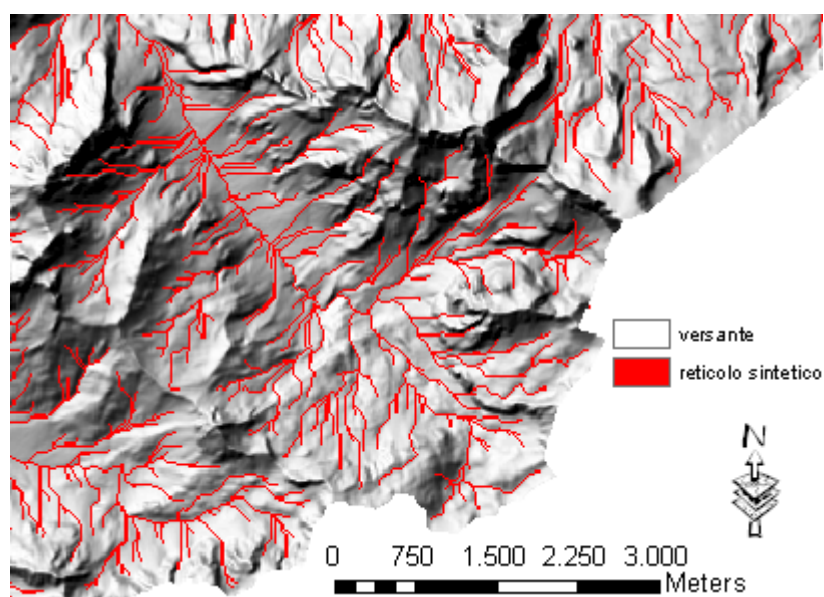


Figura 3.4 DTM derivato da rilievo LiDAR e reticolo sintetico estratto.

4. Metodi di indagine

4.1. Creazione dei DTM

L'analisi è stata condotta mediante una serie di procedure in ambiente GIS che, partendo dall'estrazione del reticolo idrografico da un modello digitale del terreno, giungono alla classificazione del reticolo in base alla dinamica potenziale di una colata detritica, della quale si evidenziano zone che a livello topografico possono essere caratterizzate da fasi peculiari della colata come zone di innesco, propagazione, rallentamento e arresto. Le elaborazioni sono state effettuate utilizzando come base altimetrica un DTM derivato da rilievo LiDAR a sostituzione del più comune modello digitale di derivazione fotogrammetrica o da carta tecnica.

La costruzione del DTM per l'area in esame ha richiesto un'intensa e laboriosa attività di conversione ed assemblaggio dei vari file relativi alla parcellizzazione del DTM LiDAR. Il DTM LiDAR è stato fornito dal Servizio Bacini Montani della Provincia Autonoma di Trento in formato testo, suddiviso secondo una parcellizzazione di 2x2 km con risoluzione variabile di 1 m per le zone urbanizzate e 2 m per la restante porzione di territorio. Il processamento dei DTM è stato computato grazie al software fornito da Esri ArcGis 9.2, un sistema per la gestione, l'analisi, e la visualizzazione di informazioni con contenuto geografico/spaziale.

All'interno del software sono disponibili strumenti (tool e funzionalità) per lavorare con i dati geografici interagendo con l'informazione georeferenziata secondo diversi punti di vista: archiviazione di dataset geografici (ArcCatalog), creazione ed elaborazione delle mappe (ArcMap), strumenti per l'analisi geografica o geoprocessing (Arc Toolbox).

I tre diversi approcci sono stati necessari a raggiungere l'obiettivo e di seguito verranno chiariti tutti i passaggi che sono stati necessari all'analisi della dinamica di colata detritica e creazione dei DTM.

Viene riportata di seguito la sequenza di operazioni effettuate per la derivazione del DTM a 2, 10 e 20 m:

- a) Conversione dei file da formato testo a formato grid di ArcGis;
- b) Fusione dei DTM a 1 m e riduzione della risoluzione a 2 m.

All'interno di ArcToolbox, Spatial Analyst, la funzione "Merge" fonde più raster singoli (quelli parcellizzati) in un unico raster basato sull'ordine dei raster di input (che in questo caso sono affiancati), invece, la funzione "Aggregate" genera la versione di un raster a risoluzione ridotta sulla base di una specifica strategia di aggregazione attraverso il calcolo del valore della cella di input come: somma, minimo, massimo, media o mediana (Figura 4.1).

Concettualmente, la funzione procede moltiplicando la risoluzione della cella del raster di input per il fattore specificato dal parametro di cella, in questo caso 2 (5, 10 per le successive risoluzioni).

Il risultato corrisponde alla risoluzione della cella del raster di output, e la strategia di aggregazione scelta è la media dei valori del raster di input.

c) Fusione dei rimanenti DTM a 2 m;

si ottengono così due soli raster che coprono l'intera area, entrambi con risoluzione 2x2 m.

d) Creazione di un unico DTM a 2 m mediante la fusione dei 2 DTM a 2 m;

e questo è il DTM 2x2 m ultimato.

Infine, si passa alla riduzione della risoluzione a 5, 10 e 20 m del DTM a 2 m.

Funzione "Aggregate" con fattore di parametro di cella 5 e 10 e media dei valori, ottenendo i DTM a 10x10 e 20x20 metri di risoluzione.

Per il DTM a 5x5 m si è provveduto alla fusione dei DTM a 2 m (che corrisponde al punto b) e al successivo aumento della risoluzione a 1m. La funzione "Aggregate" non accetta fattori di moltiplicazione che non siano numeri interi, il percorso diretto dal 2x2 al 5x5 m non era possibile. Questo ha richiesto un passaggio ulteriore provvedendo all'aumento della risoluzione da 2 a 1 metro utilizzando la funzione "Resample" con l'interpolazione bilineare dei valori del raster di input (Figura 4.2). L'interpolazione bilineare calcola il valore della cella di uscita usando i valori dei centri delle quattro celle del raster di ingresso più vicine, determinandone la media ponderata in base alla distanza dal centro.

A seguire, come per i precedenti DTM, si procede alla fusione dei rimanenti DTM a 1 m e creazione di un unico DTM a 1 m successivamente ridotto alla risoluzione di 5x5 m sempre con la funzione "Aggregate". A questo punto sono stati ottenuti quattro DTM con base di dati ricavata da rilievo LiDAR in quattro risoluzioni.

I DTM a 2, 5, 10, 20 m derivati da LiDAR sono espressi nel sistema di coordinate UTM-Etr89 (che in ArcGis corrisponde al UTM-F32-Etrf89) con quote ortometriche, mentre il sistema scelto per le analisi successive è il Gauss Boaga (fuso Ovest), proiezione ufficiale della cartografia nazionale.

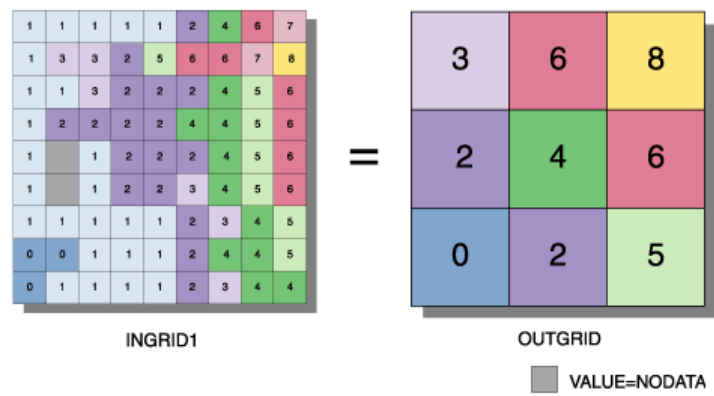


Figura 4.1 “Aggregate”: esempio con valore massimo.

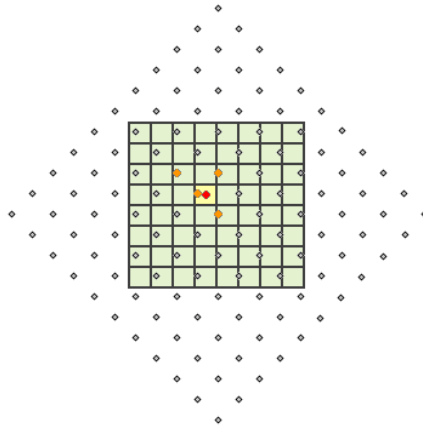


Figura 4.2 “Resample”: tecnica di interpolazione bilineare.

4.2. Estrazione della rete idrografica sintetica

Il pre-processamento del DTM può essere realizzato mediante tool disponibili all'interno della maggior parte dei pacchetti software GIS (Marchi e Dalla Fontana 2005).

Il software ArcGis 9.2 offre un pacchetto di funzioni chiamato “Spatial Analyst Tools” – Hydrology, che aiuta l'operatore GIS ad effettuare il pre-processamento del DEM dal riconoscimento dello spartiacque all'estrazione del reticolo di sintesi (figura 4.3).

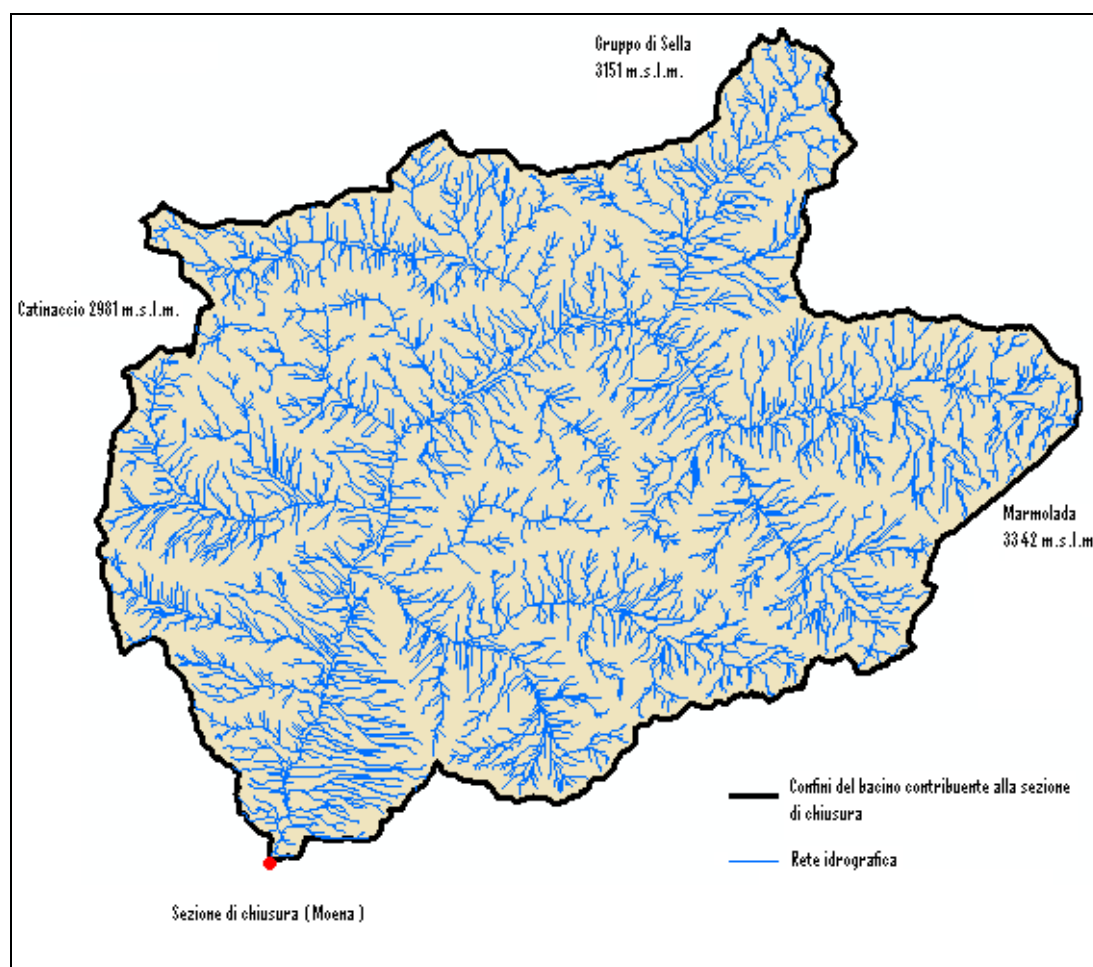


Figura 4.3 Confini dell'area contribuyente alla sezione di chiusura.

Dopo aver determinato la sezione di chiusura e la linea spartiacque dell'area contribuyente in riferimento alla stessa con l'utilizzo di tool quali “Snap pour point” e “Watershed”, evidenziando così lo spartiacque dell'alto bacino dell'Avisio con sezione di chiusura nella località di Moena, il riempimento delle depressioni locali è una pratica necessaria per l'estrazione del reticolo idrografico di sintesi, un prerequisito per il calcolo di tutti indicatori citati.

E' possibile individuare un reticolo idrografico sintetico a partire dalla sola topografia, ipotizzando che il deflusso segua le linee di minima resistenza, che prescindendo dalle caratteristiche del suolo e del soprassuolo, coincidono con le linee di massima pendenza. La connessione topologica di ogni cella del raster su base gravitativa si individua grazie alla direzione di deflusso.

Partendo dal DTM originale si procede ad una verifica della presenza di “pit”, celle del raster o gruppo di celle che non hanno uscita per via superficiale, poiché tutte le altre celle circostanti hanno quota maggiore, “pozzi” che isolano porzioni di bacino dalla sezione di chiusura.

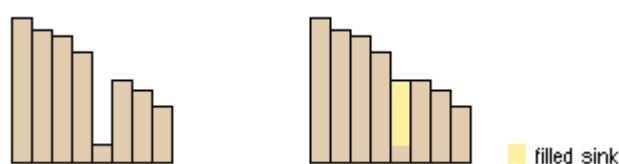


Figura 4.4 Profilo di un pozzo prima e dopo il "Fill".

E' indispensabile filtrare i DTM per eliminare le depressioni locali, elevare cioè la quota dei pit ad un livello di poco inferiore a quello della cella più bassa del kernel (Figura 4.4). Ai pit non può essere assegnato alcuno degli otto valori utilizzati per ricavare le direzioni di deflusso, la cella si presenta più profonda di tutte le celle circostanti e crea l'effetto di una depressione nella quale il reticolo che fino a quel momento scorreva in superficie, invece scompare.

I pit nei dati di elevazione del DTM sono depressioni locali comuni causate da errori nei dati stessi, spesso originati dal campionamento e dall'aumento dell'arrotondamento a numeri interi durante il calcolo del DTM, in altri casi le depressioni esistono naturalmente (laghi, doline, etc.). Un modello digitale delle elevazioni (DEM) che è stato elaborato per rimuovere tutti i pozzi di assorbimento è chiamato depressionless DEM. La funzione di ArcGis predisposta alla creazione di depressionless DEM (o DTM) è “Fill” nella quale è possibile indicare anche la profondità massima (limite “z”) del pozzo che verrà riempito (non la profondità a cui sarà riempito).

Questi pozzi devono essere riempiti per garantire una corretta delimitazione dei bacini idrografici e dei torrenti, per creare una rappresentazione accurata della direzione di deflusso e, quindi, il flusso accumulato. Se i pozzi non vengono colmati, la derivazione della rete di drenaggio può essere discontinua.

Il tool “Flow Direction” crea un raster di direzione di deflusso da ogni cella alle celle confinanti più basse, utilizzando il modello classico D8 nel quale ad ogni cella viene assegnata una delle otto possibili direzioni di deflusso in funzione della massima pendenza. La direzione (Azimut) può essere espressa in gradi o mediante un codice. Il risultato di questa operazione è un raster a numeri interi di valori che vanno da 1 a 255. I valori assegnati per ogni direzione dal centro sono mostrati in figura 4.5 (a) seguita dall’esempio di un ipotetico DEM raster dal quale vengono calcolate le direzioni di deflusso figura 4.5 (b).

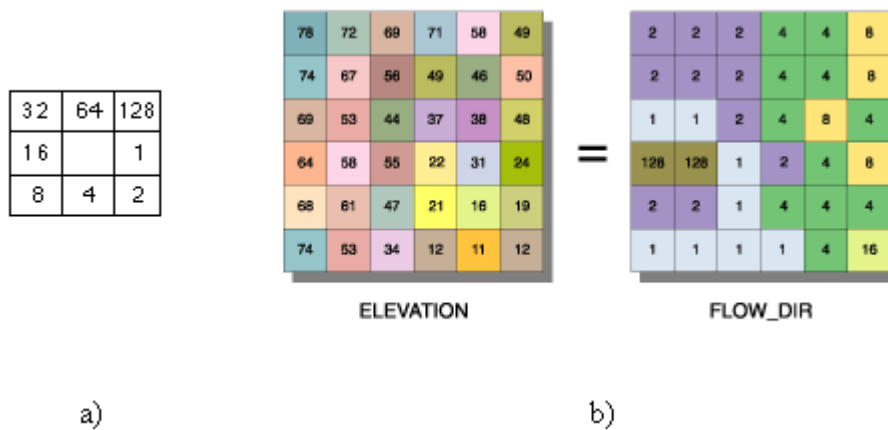


Figura 4.5 Direzione di deflusso.

Se, ad esempio la direzione di discesa più rapida è a sinistra della corrente cella in processo, la sua direzione di deflusso è codificata come “16”.

Il raster finale (out_drop_raster) è calcolato come la differenza dei valori di z, di quota, diviso il valore della lunghezza del cammino dal centro della cella al centro delle celle confinanti espresso in percentuale.

L’area contribuyente o area drenata viene calcolata sommando progressivamente il numero di celle che si trovano lungo i percorsi che portano a ciascuna cella. Infatti, a questo punto dell’elaborazione tutte le celle possono essere connesse tra loro in modo univoco. Il risultato del “Flow Accumulation” è un raster dei flussi accumulati da ogni cella, cioè dall’accumularsi del “peso” di area drenata da parte di tutte le celle. Le celle corrispondenti allo spartiacque avranno valore 1, la cella della sezione di chiusura avrà come valore la somma di tutte le celle dell’intero bacino (Figura 4.6).

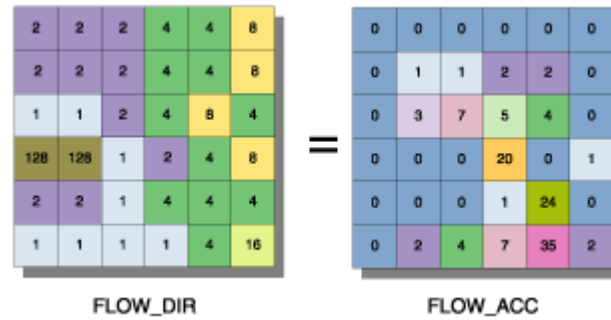


Figura 4.6 Creazione del raster di deflusso accumulato.

A questo punto è necessario inserire un valore di soglia (Area Threshold) che frequentemente va da 1 a 4 ettari per i bacini alpini (Dalla Fontana, 2005). Con l'utilizzo di una funzione chiamata "Raster Calculator", tutte le celle con valore di Flow Accumulation maggiore del valore di soglia sono state identificate come celle del reticolo idrografico con il valore univoco 1, tutte le altre sono state identificate come celle di versante con valore 0.

L'area di soglia è stata scelta di 20.000 m² corrispondenti a 2 ettari.

L'impatto visivo di un DTM come espressione della morfologia del territorio non è immediato, per questo verrà spesso visualizzato il DTM come una mappa ombreggiata (Figura 4.7).

Ci si serve della funzione "Hillshade" contenuta in ArcGis per ottenere una ipotetica illuminazione della superficie determinando un valore di luminosità per ogni cella del raster. Questa operazione è possibile settando la posizione di una ipotetica fonte di luce e calcolando il valore di illuminazione per ogni cella in funzione delle celle confinanti e dell'angolo di esposizione. Così si può migliorare notevolmente la visualizzazione di una superficie per l'analisi o grafica, in particolare quando si usa la trasparenza per le Carte Tecniche Provinciali, le ortofoto, etc.

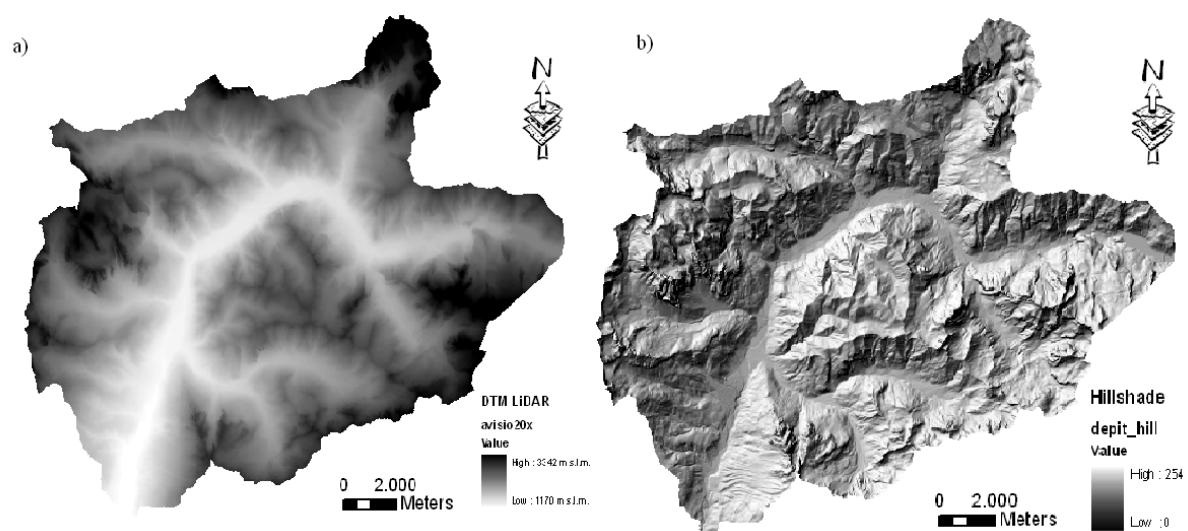


Figura 4.7 DTM dell'alto bacino dell'Avisio (a) e rispettiva Hillshade o mappa ombreggiata (b).

4.3. Classificazione della rete idrografica

La classificazione della rete idrografica consiste nell'attribuire al reticolo sintetico estratto una delle quattro classi individuate per la definizione della dinamica delle colate detritiche. La colata detritica è un fenomeno di movimento di massa attivato dalla gravità che coinvolge miscele di liquidi (precipitazioni) e solidi (detrito) che si muovono come un liquido ad elevata viscosità (60-70% di concentrazione volumetrica), è un processo intermedio fra i fenomeni gravitativi ed i processi fluviali. Le colate detritiche avvengono in ambiente alpino e semiarido, lungo i corsi d'acqua di piccole dimensioni, con bacini idrografici raramente superiori a 10 km² (Marchi e D'Agostino, 2004), e su versanti in corrispondenza di vallecole e canali.

Le zone caratteristiche di una colata detritica sono:

- zona di innesco: pendenza elevata, mancanza di copertura vegetale, disponibilità di sedimento (falde detritiche, area in frana), piogge intense e di breve durata, grande forza erosiva della miscela;
- Zona di trasporto: si assiste ad un progressivo bilanciamento tra erosione e deposizione di sedimento, il flusso detritico viene trascinato a valle e si arricchisce di materiale scavando un canale chiamato solco di versante con la formazione di cordoni laterali.
- Zona di rallentamento e arresto: diminuzione della pendenza del versante con la formazione di argini, lobi e conoidi.

La colata in genere si innesca, propaga, rallenta e si arresta depositando detrito. Il tragitto sarà così delineato dalle linee di massima pendenza, la portata rappresentata dall'area drenata e i punti di probabile innesco della colata determinati secondo una relazione area-pendenza. Canali con pendenze elevate necessitano di minore portata liquida per innescare una colata. I punti di propagazione, rallentamento e arresto sono definiti da semplici soglie di pendenza. Ad ogni colore corrisponderà una classe, rosso per i punti di probabile innesco di colata detritica, blu per la propagazione, giallo per il rallentamento e verde per i punti di arresto.

Si terrà inoltre in considerazione che non sempre si verificano le condizioni di innesco, in particolar modo quando la pendenza supera l'angolo di attrito del materiale detritico che non si accumula e tenderà a dislocarsi in aree con minore pendenza. Si escludono anche i bacini idrografici con area superiore a 10 km².

Questa parte dell'analisi topologica si è stata svolta all'interno della "Command Line Window" di ArcGis, che prevede la possibilità di organizzare procedure di analisi semi-automatiche anche complesse, utilizzando file di testo nei quali si susseguono singole linee di comando da calcolare in successione. E' possibile scegliere il caricamento automatico dei risultati della procedura in ArcMap, ma nel caso di un elevato numero di output prodotti, come in questo caso, si è preferito deselezionare questa opzione.

Fra i diversi strumenti di Spatial Analyst, "Raster Calculator" (Figura 4.8) permette l'esecuzione di compiti multipli, ad esempio calcoli matematici utilizzando operatori e funzioni, creare query di selezione o di scrivere le linee di comando da inserire nella Command Line.

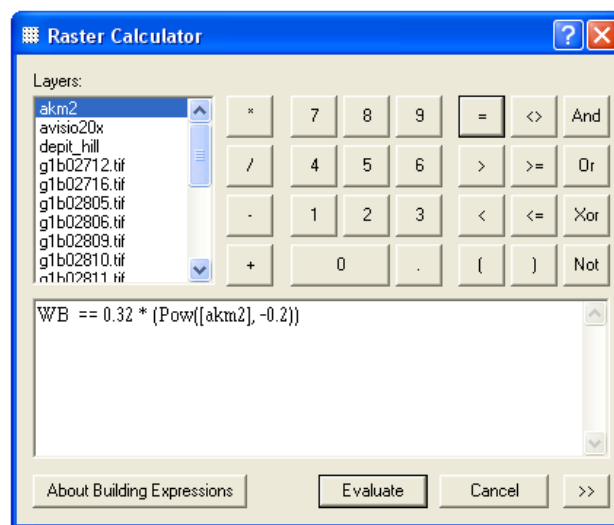


Figura 4.8 Command Line: esempio di applicazione.

4.3.1. Individuazione dei possibili punti di innesco

L'estrazione dei possibili punti di innesco di colata detritica è stata effettuata sulla base di una relazione tra pendenza locale e area contribuente derivata empiricamente da Zimmermann et al. (1997) a partire da diversi eventi di colata verificatisi in Svizzera (Wichmann and Becht, 2005):

$$S = 0,32 \cdot A^{-0,2} \quad (2)$$

Dove S è la pendenza locale (m/m) e A l'area contribuente (km²). Le celle classificate come potenziale innesco devono eccedere questa soglia (figura 4.9).

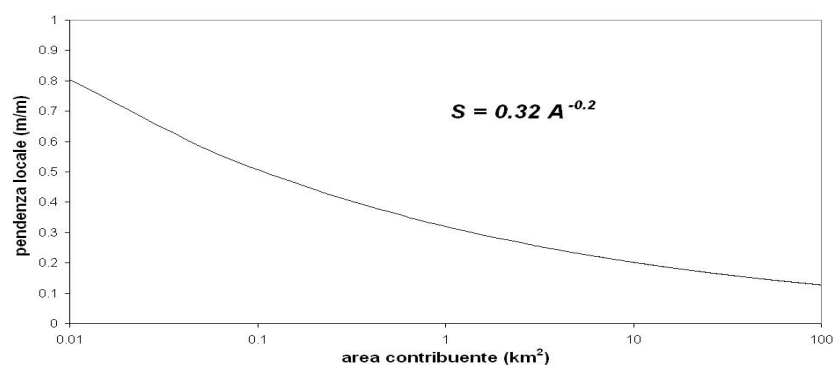


Figura 4.9 Relazione area-pendenza per l'individuazione dei possibili punti di innesco delle colate detritiche

Questo approccio trova fondamento nel fatto che, in presenza di sedimento disponibile per essere mobilizzato, l'innesco di una colata detritica canalizzata dipende dal superamento di valori critici di portata liquida e pendenza del canale. La relazione inversa fra area e pendenza esprime il concetto che nei canali a più forte pendenza è sufficiente per l'innesco una portata liquida inferiore rispetto a canali con valori di pendenza meno elevati. Per quanto riguarda la disponibilità di sedimento, nel presente studio si è assunto che per valori di pendenza locale maggiori di 38°, valore prossimo all'angolo di attrito interno caratteristico di materiali detritici spigolosi, la quantità di materiale detritico mobilizzabile sia modesta o trascurabile; tali aree sono state pertanto escluse dalle possibili zone d'innesco di colata.

Valori elevati dell'area drenata sono solitamente associati a processi di trasporto solido al fondo ed in sospensione, non all'innesco di colate detritiche.

Queste ultime possono, come è noto, interessare anche bacini di dimensioni piuttosto ampie (indicativamente, salvo casi particolari, fino a 10-15 km²) ma si originano solitamente in corrispondenza di aree contribuenti decisamente minori. Si è ritenuto che oltre una soglia di area contribuyente pari a 10 km² possa ritenersi improbabile il verificarsi di fenomeni di innesco di una colata. L'imposizione di questa soglia nella determinazione delle celle di possibile innesco permette inoltre di eliminare gli artefatti creati dalle elaborazioni come, ad esempio, possibili punti d'innesco individuati in prossimità di grandi sbarramenti trasversali lungo i corsi d'acqua maggiori (Cavalli e Marchi 2006).

L'analisi è stata implementata con una procedura semi automatica all'interno di strumenti come Command Line Window e Raster Calculator. L'estrazione dei possibili punti di innesco richiede di individuare la relazione fra area e pendenza.

Seguendo le indicazioni dell'equazione derivata (2), si procede prima alla conversione del raster di accumulo dei deflussi in chilometri quadrati, poi all'applicazione del secondo membro dell'equazione (2) elevando il raster alla -0.2 utilizzando lo strumento "Pow" che può calcolare l'elevazione di potenza richiesta del raster in ingresso.



Figura 4.10 "Pow": esempio di elevazione alla seconda potenza.

In seguito si identificano le aree con pendenza superiore a 38° e le si escludono, in quanto non capaci di trattenere sedimento mobilizzabile e, di conseguenza, in corrispondenza delle quali è improbabile che vi sia innesco di colata. La relazione tra pendenza e area contribuente dell'equazione (2) ha completo svolgimento nell'ultima parte, in cui i punti di innesco vengono individuati dall'imposizione del raster delle pendenze maggiore al secondo membro dell'equazione di (2).

4.3.2. Individuazione dei punti di propagazione, rallentamento e deposito.

Per classificare la rete idrografica sintetica in relazione alla dinamica della colata detritica, una volta individuati i possibili punti d'inizio del fenomeno, è necessario determinare le zone del reticolo propense al deposito del materiale trasportato.

Una colata può iniziare a depositare il materiale trasportato per valori di pendenza di circa 6°-10° mentre si arresta solitamente per valori attorno ai 3°-5°. Per ripartire le aste torrentizie in tratti di propagazione, rallentamento ed arresto, nel presente lavoro è stata

presa in esame una combinazione cautelativa di valori di soglia di pendenza locale di 3° per l'arresto e di 8° per l'inizio del rallentamento.

L'applicazione delle soglie di pendenza fa sì che ogni pixel del reticolo sintetico ricada in una delle seguenti classi:

- **Possibile punto di innesco** nel caso sia superata la soglia critica dell'equazione (2), con pendenza locale inferiore a 38° ed area contribuyente inferiore a 10 km² ;
- **Rallentamento** quando la pendenza locale del pixel è compresa tra 3° e 8°;
- **Arresto** per pendenze locali del pixel inferiori a 3°;
- **Propagazione** per le restanti celle del reticolo.

Il risultato di questa applicazione è il susseguirsi lungo tutto il reticolo, dallo spartiacque alla sezione di chiusura, di celle individuate da un codice (1 o 2 o 3 o 4) al quale corrisponde un colore (blu, rosso, giallo e verde) e una classe di appartenenza (propagazione, innesco, rallentamento e arresto). Il risultato è rappresentato in un layer chiamato "totale" da sovrapporre alla hillshade del DTM come illustrato in figura 4.11, ove si è preso come esempio una porzione del DTM ricavato dall'alto bacino dell'Avisio a risoluzione 20x20 metri.

Nel capitolo che segue verranno evidenziate in una prima parte le caratteristiche principali dei quattro DTM, come area, pendenza, la numerosità dei punti rispetto ad ogni DTM per ognuna delle quattro classificazioni, e nella seconda le caratteristiche dei DTM LiDAR a confronto con un DEM generato da cartografia tradizionale.

Verranno presi in considerazione un paio di casi particolari che fanno riferimento rispettivamente al reticolo idrografico sintetico estratto dai DEM e alla classificazione del reticolo in un caso di colata detritica.

Le osservazioni saranno accompagnate sia dalle immagini dei layout di ArcMap che dalle fotografie scattate durante i sopralluoghi effettuati in campo.

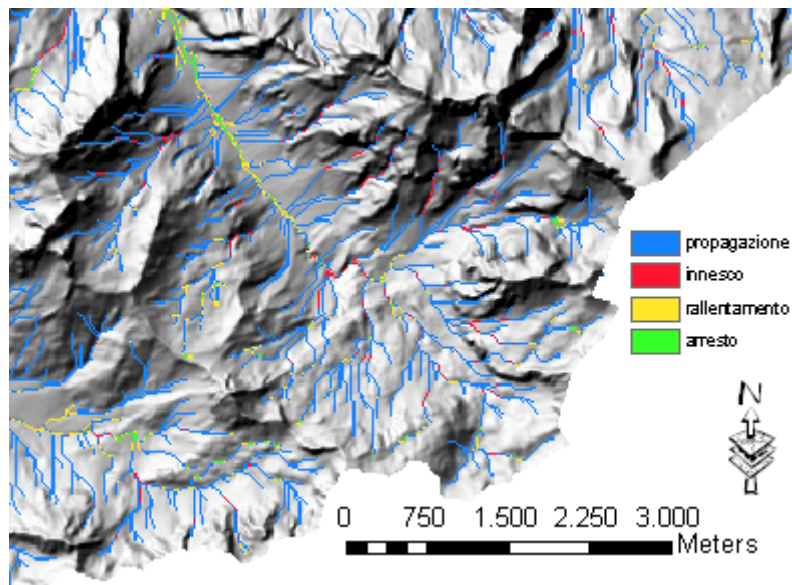


Figura 4.11 DTM derivato da rilievo LiDAR e reticolo sintetico classificato.

5. Risultati e discussione

La topografia di territori complessi può essere descritta attraverso parametri morfometrici derivati da modelli digitali delle elevazioni quali quota e pendenza (Dalla Fontana e Marchi 2003).

I DTM generati presentano peculiarità di quota, pendenza e numerosità dei punti di innesco di colata detritica che variano a seconda del parametro morfometrico che si analizza.

Nella valutazione della variabile quota è possibile osservare che nonostante tutte le procedure di aggregazione con la riduzione della risoluzione e dell'informazione, aumento della stessa da 2x2 m a 1x1 m nel caso del DTM 5x5 m, e fusione, il margine di accuratezza della quota varia restando inferiore a 1,5 m. L'informazione altimetrica di un DTM ricavato da rilievo LiDAR è molto accurata e questa accuratezza dell'informazione si riflette su tutte le trasformazioni eseguite successivamente come riportato in tabella 5.1 dove a confermare la somiglianza fra i DTM viene riportata anche la deviazione standard, indice di dispersione dei dati rispetto alla media.

La quota presenta valori come la quota minima (corrispondente alla sezione di chiusura), quota massima (in corrispondenza della vetta della Marmolada), quota media e deviazione standard pressoché simili per tutti e quattro i DTM. La quota minima, in corrispondenza del DTM 20x20 m, misura 1170,84 metri s.l.m. mentre in corrispondenza del DTM 2x2 m misura 1169,62 metri s.l.m.. Un discorso del tutto simile può essere fatto per la quota massima, che riflette i metri di altitudine della vetta della Marmolada, oscillando fra i 3342,04 m e i 3343,16 m s.l.m. e la quota media, che oscilla fra i 2051,93 m e i 2050,05 m s.l.m..

La deviazione standard si rivela molto utile per quantificare l'intervallo entro il quale si distribuiscono le varie quote, quanto i dati siano vicini o lontani dal valore medio.

In sostanza la deviazione standard è un indice di dispersione che ha la stessa unità di misura dei valori osservati e misura la dispersione dei dati intorno al valore atteso (valore medio). Se osserviamo i valori restituiti dalla deviazione standard delle quote, ci accorgiamo che anche loro, come gli altri valori considerati sono coerenti (tabella 5.1).

Tabella 5.1 Quota (m) dei DTM a diverse risoluzioni.

	Minimo (m)	Massimo (m)	Media (m)	deviazione standard (m)
DTM 20x20	1170,84	3342,04	2051,93	395,99
DTM 10x10	1169,87	3342,79	2050,99	395,33
DTM 5x5	1169,67	3342,93	2050,44	395,12
DTM 2x2	1169,62	3343,16	2050,05	394,89

Le pendenze, espresse in percentuale nel raster di origine (Tabella 5.2) e convertite in gradi nella tabella 5.3, mostrano differenze fra i valori massimi che vanno da 83,5° per il DTM a risoluzione 20x20 m fino a 89° per il DTM a risoluzione 2x2 metri, oscillando così all'interno di un margine di 5,5°. Le pendenze medie restano generalmente elevate e si osservano risposte differenti della deviazione standard, con un intervallo di dispersione minore per il DTM con minore risoluzione (25,2°) e uno maggiore per il DTM a maggiore risoluzione (40,8°).

Il calcolo della pendenza su celle di dimensioni maggiori porta ad ottenere un dato meno rappresentativo della realtà rispetto a celle di dimensioni più piccole.

Tabella 5.2 Pendenza (%) dei DTM a diverse risoluzioni.

	Massimo (%)	Media (%)	deviazione standard (%)
DTM 20x20 metri	876,61	61,29	47,12
DTM 10x10 metri	1590,11	64,97	57,33
DTM 5x5 metri	2489,76	67,86	67,48
DTM 2x2 metri	5611,6	71,41	86,3

Tabella 5.3 Conversione delle pendenze in gradi (°).

	Massimo (°)	Media (°)	deviazione standard (°)
DTM 20x20 metri	83,5	31,5	25,2
DTM 10x10 metri	86,4	33,0	29,8
DTM 5x5 metri	87,7	34,2	34,0
DTM 2x2 metri	89,0	35,5	40,8

All'aumentare della risoluzione si assiste ad un aumento generale dei valori di massima, media e deviazione standard, ad indicare che l'aumento di risoluzione, con conseguente riduzione della dimensione della cella porta ad avere una definizione del dato per aree sempre più specifiche e caratterizzanti che, nel caso di un territorio dalla morfologia complessa e ricca di dislivelli che si sviluppa con l'alternanza di imponenti testate rocciose, riconducibili ai massicci del Sella, Sassolungo, Catinaccio e Marmolada (generalmente difficili da rappresentare), aiuta ad ottenere una migliore definizione della

morfologia. Uno dei maggiori difetti del DTM raster era proprio quello di non rendere efficace la rappresentazione di la sommità dei rilievi, creste, “break lines”, ecc. a causa della struttura a griglia rigida che lo compone.

In ugual modo si comportano i punti classificati come “innesco” nel reticolo sintetico. La formula utilizzata per individuare tali punti pone come valore di soglia il rapporto tra la pendenza locale e l’area contribuente. Le celle classificate come potenziale innesco devono eccedere questa soglia. La tabella 5.4 propone il confronto della numerosità dei punti per ogni classe e per ogni risoluzione utilizzata. La colonna riservata alla numerosità dei punti di innesco, in rosso, mostra un forte aumento dalla risoluzione minore 20x20 metri con 2.816 punti individuati alla risoluzione maggiore 2x2 metri con 248.223 punti.

La numerosità dei punti di innesco ha subito l’influenza dell’aumento dei valori di pendenza all’aumentare della risoluzione.

In sintesi, se l’individuazione dei punti di innesco è strettamente legata alla loro pendenza rispetto l’area contribuente, perché vengono determinati attraverso una soglia area-pendenza (equazione (2)) e la pendenza viene stimata su porzioni di territorio sempre più piccole, sarà molto più probabile che in un territorio circondato da massicci di elevata altitudine e morfologia complessa si ottengano valori di pendenza sempre più rappresentativi della realtà e in aumento come si evince dalla tabella 5.3. Infine, l’aumento di valori di pendenza porta un maggior numero di celle del reticolo a superare il valore di soglia della relazione fra pendenza e area come mostrato nella tabella 5.4.

Tabella 5.4 Punti classificati per ogni DTM.

	Propagazione (1)	Innesco (2)	Rallentamento(3)	Arresto (4)	totale
totale DTM 20x20	40.289	2.816	4.955	2.772	50.832
totale DTM 10x10	66.764	20.444	11.072	6.588	104.868
totale DTM 5x5	98.754	76.197	23.688	15.979	214.618
totale DTM 2x2	195.648	248.223	65.369	48.184	557.424

La numerosità di tutti i punti in forma generale, di propagazione, rallentamento, arresto, compresi gli stessi punti di innesco, aumenta soprattutto a causa dell’aumento di risoluzione (Tabella 5.4).

Bisogna tener conto che a parità di area in esame, se la risoluzione è maggiore, maggiore sarà il numero di celle che la compongono. Per creare un’area di 212 km² con celle di 400 m², corrispondenti a celle quadrate di 20 m di lato, saranno sufficienti meno celle che se a comporre la stessa area fossero celle da 2 m per 2 di lato (4 m²).

L'informazione, intesa come valore di quota, classe di appartenenza, pendenza etc. è univoca per ogni cella. In sostanza, quello che può essere considerato come punto di innesco nel DTM con risoluzione 20x20 metri è una cella quadrata di 20 metri per lato. Nei DTM a risoluzione maggiore diminuiscono le dimensioni delle celle fino ad un decimo, ma la numerosità delle stesse può aumentare oltre dieci volte tanto.

E' per ovviare a questo problema che qui di seguito sono proposti in figura 5.1 sia il grafico che la tabella di distribuzione in percentuale dei punti classificati.

E' possibile distinguere un'area di intersezione in cui si assiste all'inversione dei dati di percentuale di propagazione rispetto a quelli di innesco all'aumentare della risoluzione e una tendenza generale a partire dalla risoluzione più bassa alla maggiore ad eliminare il picco di punti di propagazione con una distribuzione più eterogenea di valori. La percentuale dei punti di innesco aumenta con l'aumentare della risoluzione fino a superare la percentuale di punti di propagazione riscontrati. La propagazione nel DTM 20x20 m raggiunge il picco del 79,3% sul totale, mentre la percentuale di innesco precipita al 5,5%. La risoluzione 2x2 m mostra il 44,5% di punti di innesco sul totale e il 35,1% di propagazione.

Per tutte e quattro le risoluzioni sia le percentuali di rallentamento che di arresto seguono un trend discendente comune, andando a coprire la percentuale scoperta dall'innesco e dalla propagazione inferiore al 20%.

L'aumento di risoluzione del DTM porta ad una migliore discriminazione fra celle di innesco e propagazione, che percentualmente risultano variare molto a differenza delle celle di rallentamento e arresto.

I punti di probabile innesco di colata detritica sono stati estratti con l'utilizzo di una formula che rapporta l'area drenata alla pendenza locale del pixel di riferimento.

La differente proporzione dei punti di innesco rispetto al totale è strettamente legata alla sensibilità della formula utilizzata alla pendenza, che come osservato cambia notevolmente a seconda della risoluzione del DTM utilizzato. E' necessario porre attenzione a calcolare la pendenza sul DTM ad alta risoluzione quando la si vuole confrontare con la pendenza di campo che a sua volta è stata utilizzata per derivare l'equazione (2).

Un recente studio ha valutato l'effetto dell'utilizzo di differenti metodi di calcolo della pendenza per migliorare le analisi dei reticoli sintetici da DTM derivati da LiDAR rispetto ai tradizionali rilievi di campo (Vianello et al., 2009).

La formula di estrazione dei punti di innesco dovrebbe essere valutata anche sulla risoluzione del DTM utilizzato, per evitare che formule calibrate su pendenze raccolte

tramite rilievi di campo, che di solito si susseguono lungo tratti di canale a distanza di circa una decina di metri, perdano l'efficacia attesa quando applicate a DTM che presentano alte risoluzioni e per questo pendenze calcolate su lunghezze inferiori a quella di campo.

La figura 5.2 riporta la mappa ombreggiata corredata dal reticolo idrografico classificato dell'intera area di studio. Per motivi di visualizzazione della mappa, è riportata come esempio la sola mappa a risoluzione 20x20 metri.

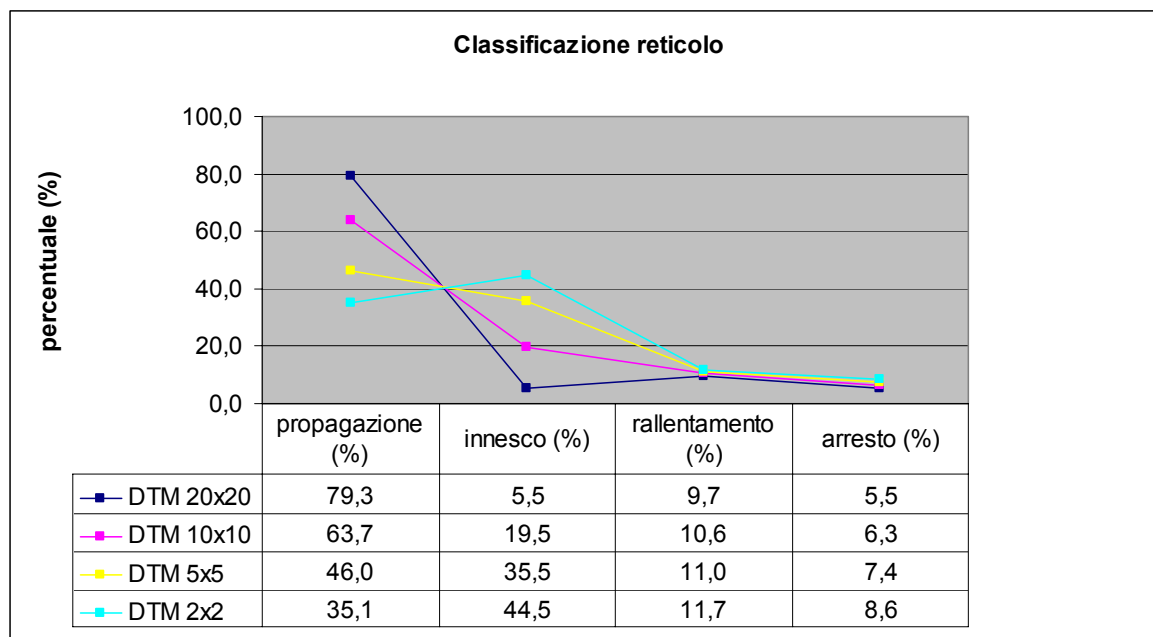


Figura 5.1 Classificazione del reticolo alle diverse risoluzioni.

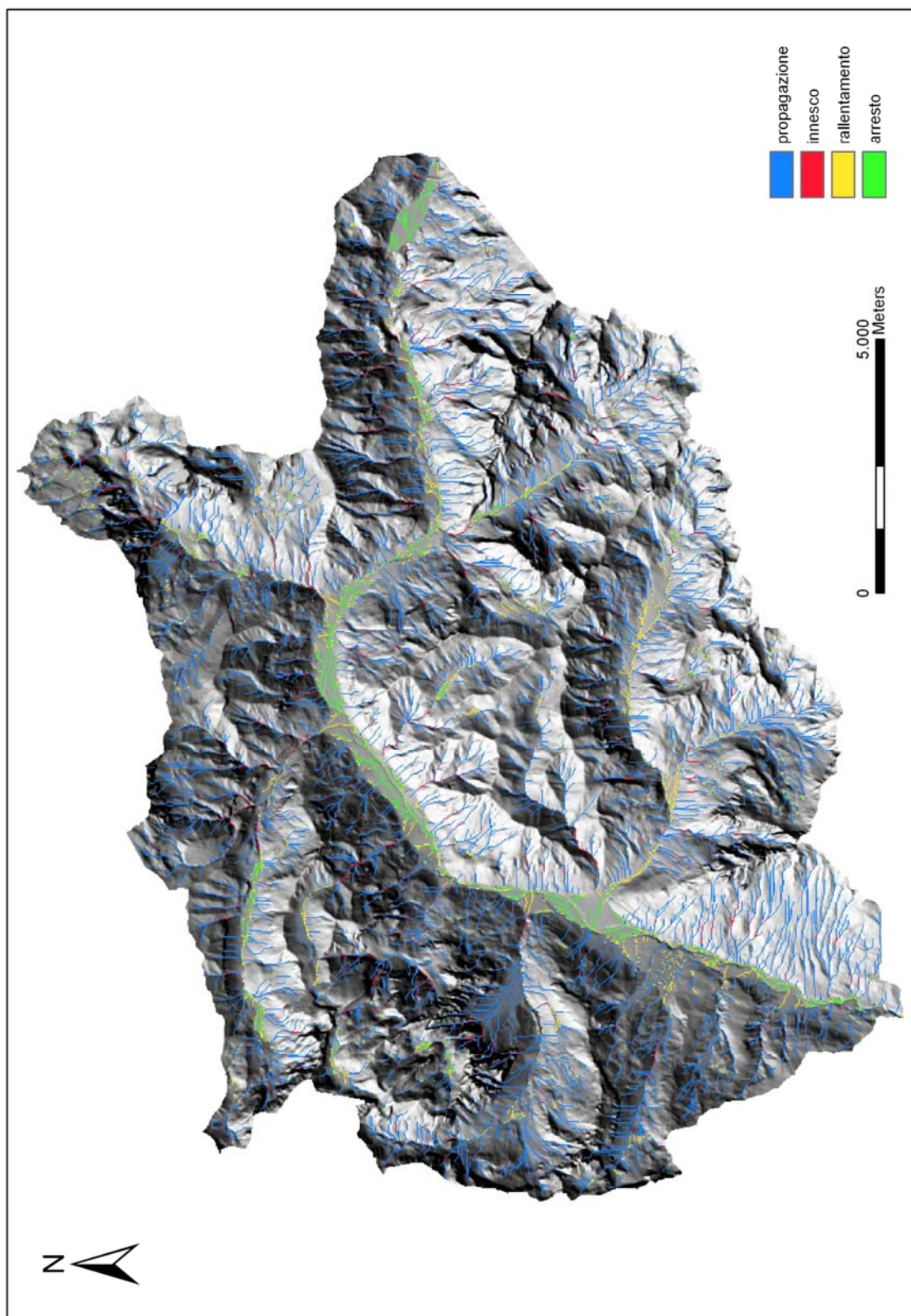


Figura 5.2 Classificazione della rete idrografica dell'alto bacino dell'Avisio, DTM a risoluzione 20x20m.

5.1. Confronto fra DTM LiDAR ad alta risoluzione e DEM derivato da cartografia tradizionale

5.1.1. La mappa omberggiata

Il DEM rappresenta l'informazione di base di tutte le elaborazioni finalizzate alla migliore comprensione dei diversi processi operanti a scala di versante, ma la qualità del DEM dipende dalla fonte dei dati e dalle tecniche di interpolazione.

Il DEM spesso contiene errori prodotti dai metodi utilizzati per sua generazione che possono variare di grandezza in base alla qualità del dato di partenza, per esempio, i DEM ricavati dall'interpolazione delle curve di livello di mappe topografiche presentano, specialmente in zone a bassa pendenza, una struttura a “gradini” riflessa dai parametri calcolati.

Nel caso di DTM generati a partire da dati LiDAR, nonostante la diminuzione di accuratezza non dipenda solamente dall'accuratezza individuale dei punti, ma anche dalla densità spaziale locale dei punti LiDAR (Capitolo 3.2) e dalla procedura utilizzata durante l'interpolazione, il risultato è meno affetto da fonti di errore rispetto ai DEM derivati da metodologie tradizionali di rilievo.

A scopo comparativo verranno presi in esame i quattro DTM generati da rilievo LiDAR e un DEM della stessa area di studio generato da cartografia tradizionale con interpolazione delle curve di livello.

Il confronto con le Carte Tecniche Provinciali e la mappa ombreggiata del rilievo derivato da DTM LiDAR in tutte e quattro le risoluzioni, 20x20, 10x10, 5x5 e 2x2 metri mostra un'ottima sovrapposizione dei due tematismi, laddove non ci siano stati cambiamenti morfologici in tempi recenti (ad esempio nuove strade, modificazioni dell'alveo, etc.).

La risoluzione e la qualità del dato di base di partenza svolgono un ruolo fondamentale nella rappresentazione digitale della realtà, con l'aumento della risoluzione e la qualità del dato derivati da rilievo LiDAR è possibile raggiungere risultati evidenti anche con la sola osservazione dell'aspetto delle carte ombreggiate derivate da questi DTM messe confronto con quella del DEM, come si evince dalle immagini che seguono: figure 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7.

La superficie del DEM derivato da cartografia tradizionale, figura 5.3, si presenta smussata, i rilievi scarsamente incisi e con andamento dolce. Sono evidenti le tracce di scavo atte a forzare il flusso in una direzione preferenziale in corrispondenza delle blue line.

L'aspetto della mappa ombreggiata (figura 5.4) del DTM LiDAR 20x20 m è prevalentemente affetto dal disturbo della risoluzione troppo bassa, restituendo un'immagine grossolana nella quale sono evidenti le celle che la compongono.

Il paesaggio rappresentato nel DTM LiDAR 10x10 m (figura 5.5) inizia ad assumere forme più incise, comincia ad attenuarsi la sensazione di smussatezza che invece ritroviamo nell'omologo DEM derivato da cartografia tradizionale. Sono messe in evidenza le creste e avvallamenti, ed è possibile riconoscere nella parte inferiore la sagoma di un centro abitato in corrispondenza del conoide.

La buona risoluzione del DTM 5x5 m risolve il problema di sgranatura dell'immagine (figura 5.6) e apporta al DTM una rugosità che deriva, invece, dalle caratteristiche proprie della morfologia dell'area. I corsi d'acqua rispecchiano la naturale incisione, la zona in corrispondenza del centro abitato è ancora più dettagliata.

L'immagine (figura 5.7), alla massima risoluzione, DTM LiDAR 2x2 m, si presenta rugosa e spigolosa. In essa si può riconoscere ogni minimo dettaglio della morfologia, sia nelle aree vallive che in quelle di alta montagna come le sagome dei basamenti degli edifici rimossi e la traccia a zig-zag delle strade che fiancheggiano i versanti.

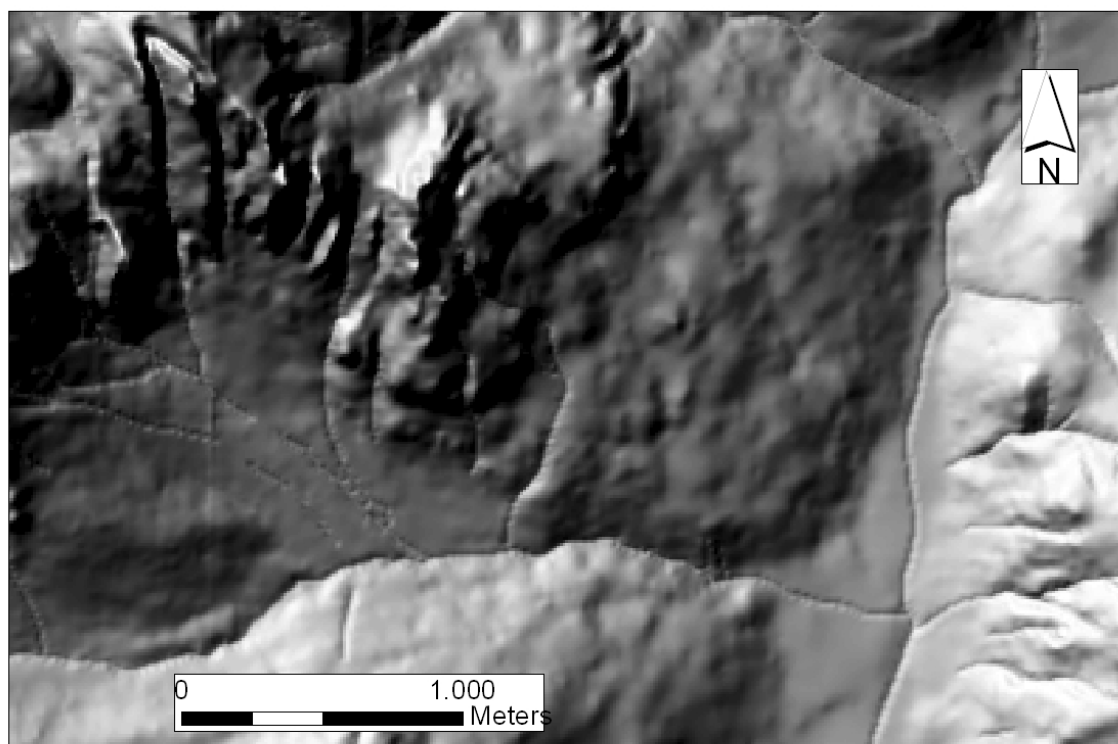


Figura 5.3 Mappa ombreggiata DEM 10x10 m derivato da cartografia tradizionale.

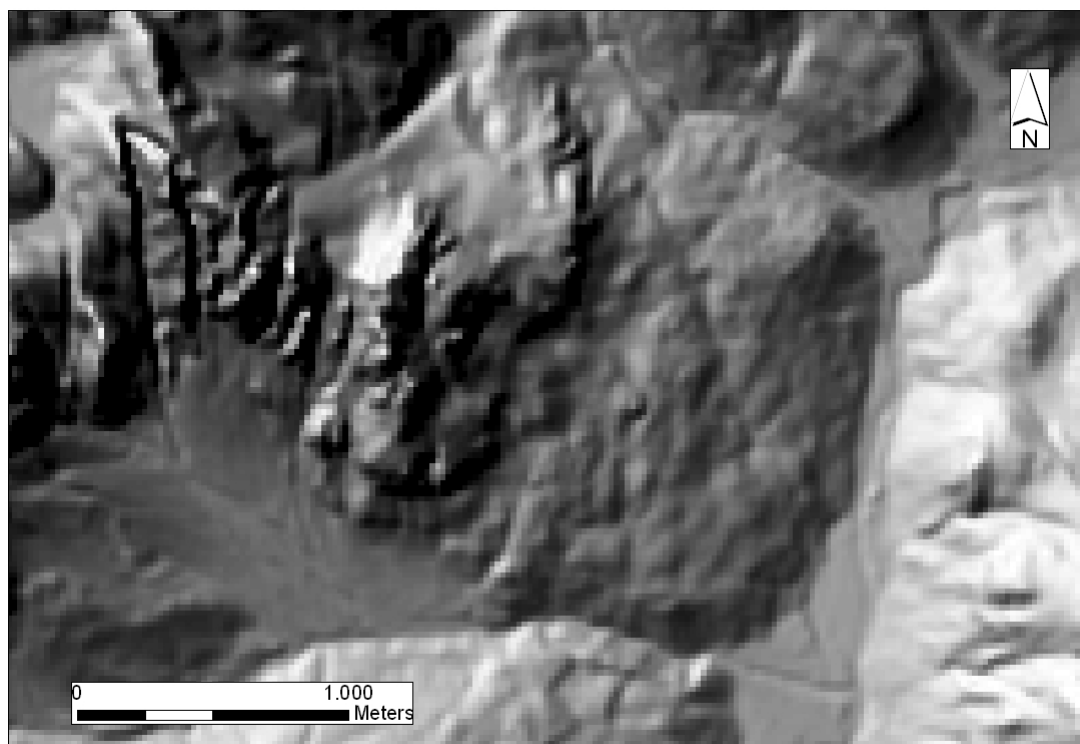


Figura 5.4 Mappa ombreggiata del DTM LiDAR 20x20 metri.

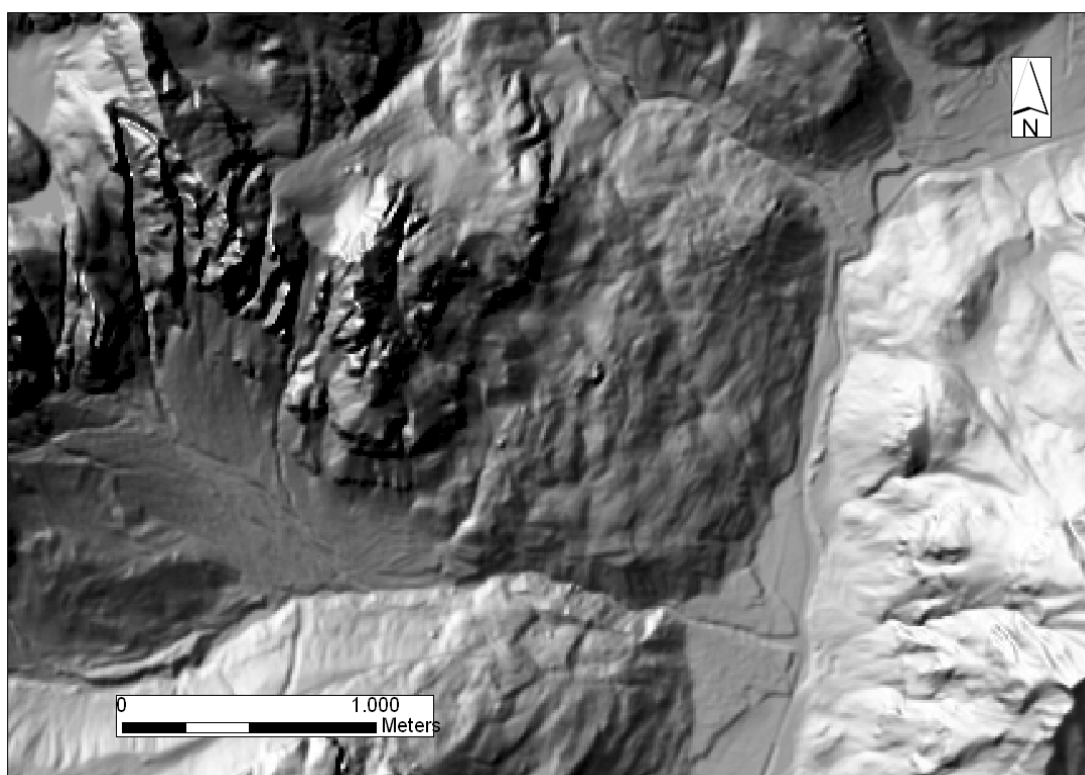


Figura 5.5 Mappa ombreggiata DTM LiDAR 10x10 metri.

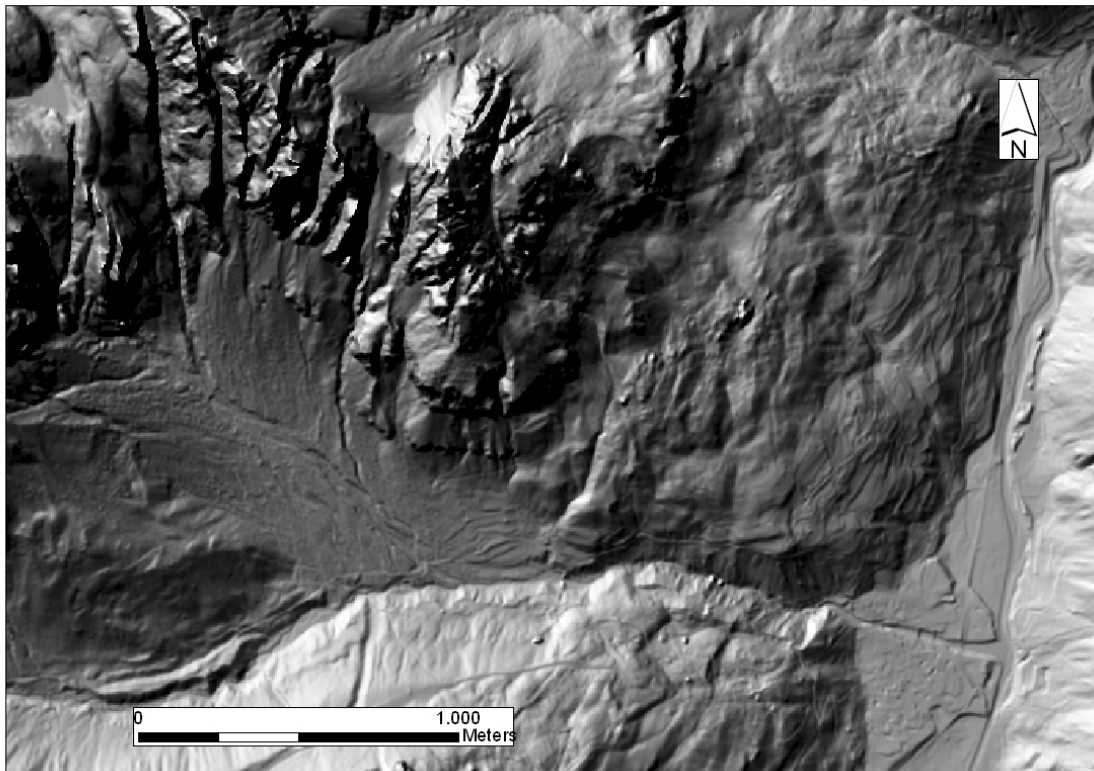


Figura 5.6 Mappa ombreggiata del DTM LiDAR 5x5 metri.

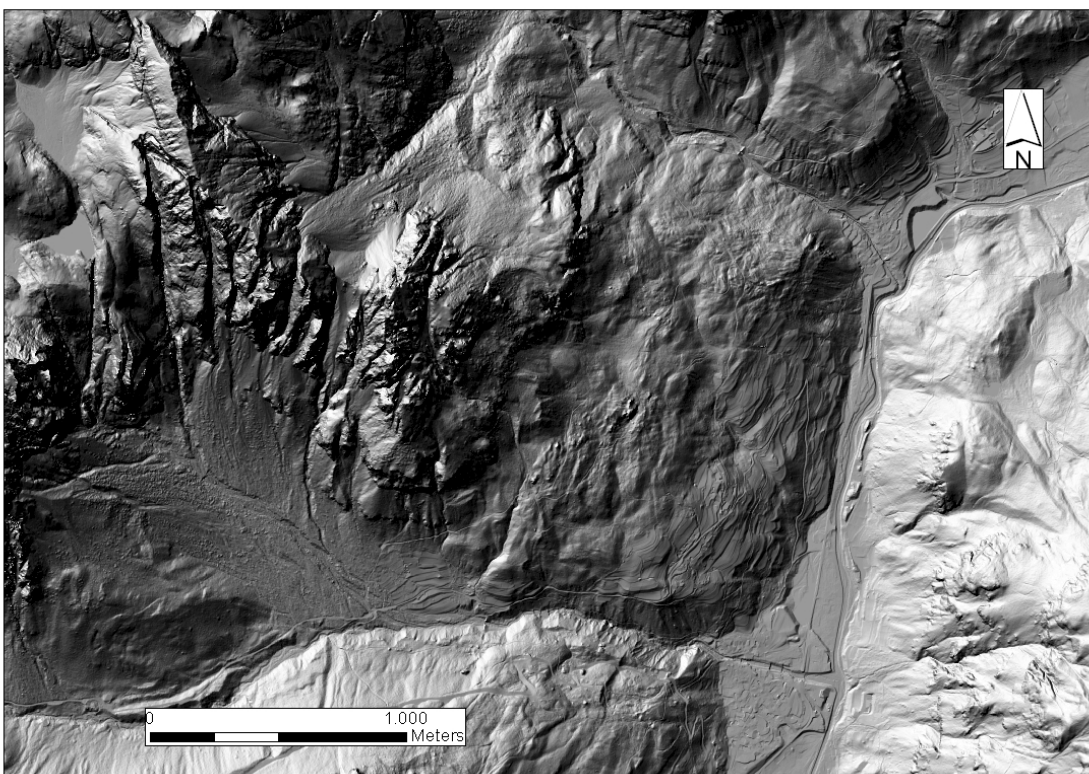


Figura 5.7 Mappa ombreggiata del DTM LiDAR 2x2 metri.

5.1.2. A parità di risoluzione

Un confronto ancora più interessante verrà ora applicato al DTM derivato da rilievo LiDAR a risoluzione 10x10m che sarà confrontato con il DEM alla stessa risoluzione della stessa area di studio, ricavato da cartografia tradizionale con l'interpolazione delle curve di livello.

A cambiare, fra i due DEM, è l'accuratezza del dato di base cioè la quota, e il fatto che mentre nel DEM tradizionale il reticolo è stato forzato lungo il percorso cercando il massimo di corrispondenza fra il reticolo sintetico e la traccia dell'idrografia digitalizzata dalla Carta Tecnica Provinciale (blue line), per ottenere i percorsi reali di drenaggio ed in particolar modo quelli facenti capo ai corsi d'acqua minori, nel DTM LiDAR non è stato deliberatamente compiuto. La scelta è stata guidata dall'assunzione che grazie all'elevata densità dei punti di rilievo del telemetro del sistema LiDAR fosse possibile definire un reticolo idrografico attendibile indipendentemente dall'utilizzo dello scavo delle blue-line come canale di passaggio obbligato. Alcune delle considerazioni derivanti da questo confronto troveranno riscontro nei sopralluoghi effettuati, verranno discussi due casi di studio in cui il DTM LiDAR ha riportato alcune interessanti differenze rispetto al DEM tradizionale.

Il primo caso di studio è relativo ad una frazione di Soraga di Fassa, in Val di Fassa, e farà riferimento al reticolo idrografico estratto, il secondo caso di studio, invece, farà riferimento ad un caso di colata detritica dell'area di conca Gardeccia.

Nelle tabelle 5.5, 5.6 si riportano i valori topografici di quota e pendenza dei DEM considerati.

Si può già notare in tabella 5.5 la discrepanza, seppur non eccessiva, fra i valori di quota minima, massima e media e di deviazione standard, probabilmente dovuta ai dati di origine del DEM e alla tecnica di interpolazione utilizzata per la sua creazione.

Tabella 5.5 Quota (m) dei DEM.

	Minimo (m)	Massimo (m)	Media (m)	deviazione standard (m)
DTM LiDAR 10x10 m	1169,87	3342,79	2050,99	395,33
DEM tradizionale 10x10 m	1165,00	3339,29	2072,87	395,86

La pendenza, espressa in percentuale in tabella 5.6 e in gradi nella tabella 5.7, mostra che a parità di risoluzione il valore massimo dei DEM a confronto cambia da 83° per il DEM tradizionale a 86° per il DTM LiDAR. La deviazione standard distribuisce i valori

all'interno di un intervallo maggiore nel DTM che nel DEM, sottolineandone la maggiore variabilità di valore.

Tabella 5.6 Pendenza (%) dei DEM.

	Massimo (%)	Media (%)	deviazione standard (%)
DTM LiDAR 10x10 m	1590,11	64,97	57,33
DEM tradizionale 10x10 m	908,4	62,17	46,59

Tabella 5.7 Conversione della pendenza in gradi (°).

	Massimo (°)	Medi (°)	deviazione standard (°)
DTM LiDAR 10x10 m	86,4	33,0	29,8
DEM tradizionale 10x10 m	83,7	31,9	25,0

Sono rilevanti le discrepanze sulla numerosità dei punti classificati che diminuiscono nel totale del reticolo, ma i punti di propagazione e arresto del DTM LiDAR sono inferiori a quelli del DEM, con un aumento di numerosità nei punti di innesco e rallentamento, come mostrano i valori riportati nella tabella 5.8.

Tabella 5.8 Punti classificati secondo la dinamica della colata.

	Propagazione (1)	Innesco (2)	Rallentamento(3)	Arresto (4)	totale
DTM LiDAR totale 10x10	66.764	20.444	11.072	6.588	104.868
DEM trad. totale 10x10	95.918	15.919	7.312	7.320	126.469

Il DEM tradizionale, come mostrato in figura 5.8 che riporta anche la tabella delle distribuzioni in percentuale dei dati, supera i punti di propagazione del DTM LiDAR (il 75,8% contro il 63,7% dei punti di propagazione), invertendo poi i valori in corrispondenza della classe di innesco (19,5% per il DTM LiDAR 10x10 m e il 12,6% per il DEM). Le percentuali di rallentamento e arresto tendono invece a convergere coprendo valori sul totale inferiori al 17%.

Alcune differenze si riscontrano sulla corrispondenza del reticolo sintetico con le blue line. Nel modello digitale delle elevazioni tradizionale il reticolo è stato forzato tramite lo scavo indotto del DEM con un'apposita funzione di ArcGis. Nel DTM LiDAR non è stato fatta volontariamente alcuna costrizione localizzata del flusso e si possono riscontrare punti in cui le direzioni prese dal reticolo si discostano dalle direzioni indicate dalle CTP delle quali posso mostrare due esempi verificati in campo.

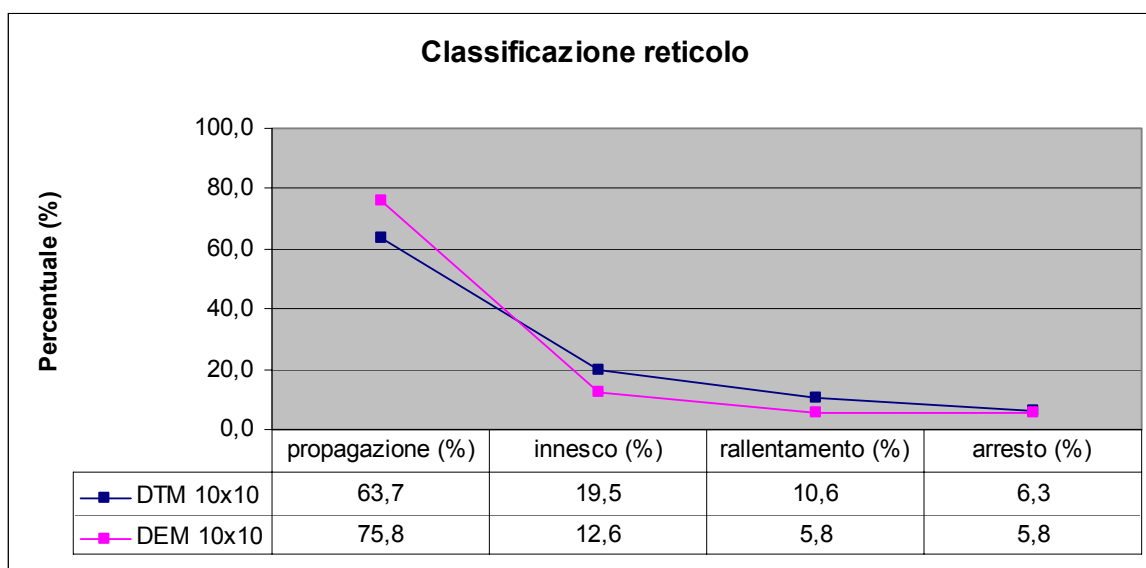


Figura 5.8 Classificazioni del reticolo a diversa origine.

5.1.3. Una verifica di campo del reticolo sintetico: la rete effimera di Soraga di Fassa.

Le situazioni particolari che riguardano il tragitto del reticolo sintetico nella frazione di Soraga di Fassa, in Val di Fassa, sono due. Nella prima il reticolo sintetico individuato nel DTM LiDAR si sposta dalla canalizzazione in cemento per proseguire fra le case del centro abitato fino ad immettersi nell'Avisio, e la seconda in cui un edificio adibito a scuola è in corrispondenza dello sbocco di un canale.

Il reticolo idrografico estratto dal DTM LiDAR è caratterizzato dalla continuità del reticolo fino alla sezione di chiusura del bacino. Tutti i canali riscontrati, anche quelli della rete effimera, hanno continuità fino allo sbocco nel oro emissario. Questo ci consente di valutare la direzione che può essere presa dalla colata detritica in canali soggetti una volta innescatisi. In questo caso è stata evidenziata una possibile zona di avulsione del canale.

Le CTP riportano solo brevi tratti, dall'origine e termine spesso confusi, dei canali di primo ordine. Spesso i canali che possono innescare una colata detritica sono proprio quelli che presentano un regime idrico intermittente, e ad occhi inesperti possono dare l'impressione di essere canali morti o addirittura non essere notati. Nel secondo caso, la scuola è intercettata dal reticolo sintetico. L'edificio, contrariamente a quello che ci si potrebbe aspettare, presenta un piano seminterrato con aperture a livello del terreno.

Nelle seguenti rappresentazioni (Figura 5.9, 5.10), il confronto fra il DEM e il DTM LiDAR mostra in modo esauriente la differenza di risposta della procedura grazie alla

maggior accuratezza del dato di base. E' stata evidenziata con un cerchio di colore rosso la scuola e con una ellisse di colore blu il tratto di canalizzazione.

Ad avallare l'ipotesi che un possibile evento di colata detritica possa creare una situazione e danni non prevedibili con il DEM da cartografia tradizionale sono le verifiche effettuate in campo, con le quali sono state riconosciute sia la mancata manutenzione della canalizzazione (Figura 5.11) che lo sbocco del corso d'acqua in prossimità della scuola (Figura 5.12). Le case addossate alla canalizzazione, il collettore invaso dalla vegetazione per la mancata manutenzione e gli alberi possono aver reso difficile la penetrazione dei raggi LiDAR fino al suolo. Lo sbocco del corso d'acqua è in corrispondenza della fascia d'erba rasata sulla sinistra della strada, a breve distanza dalla scuola, e porta il canale in direzione dei seminterrati.

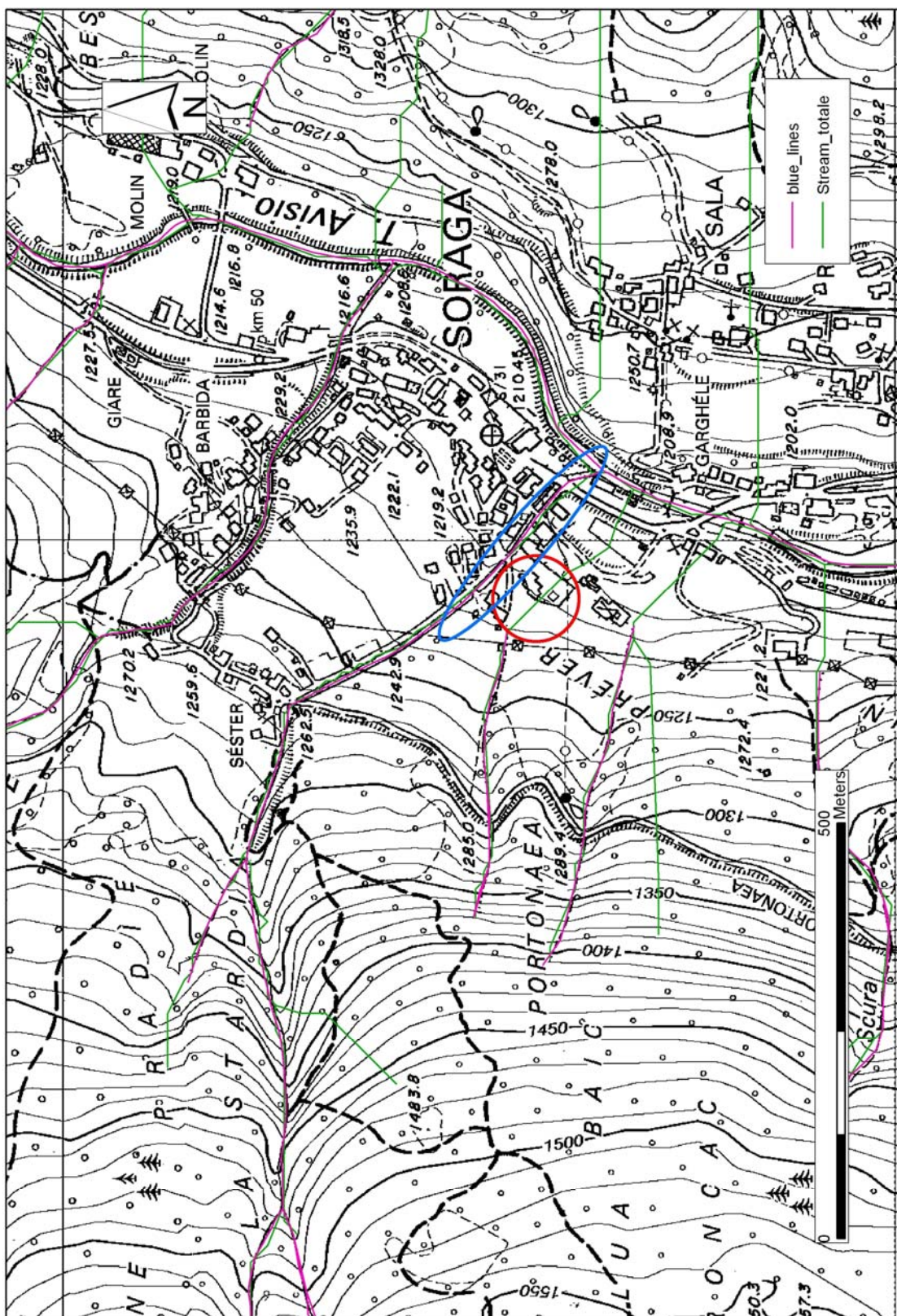


Figura 5.9 DEM 10x10 m derivato da cartografia tradizionale. Frazione di Soraga.

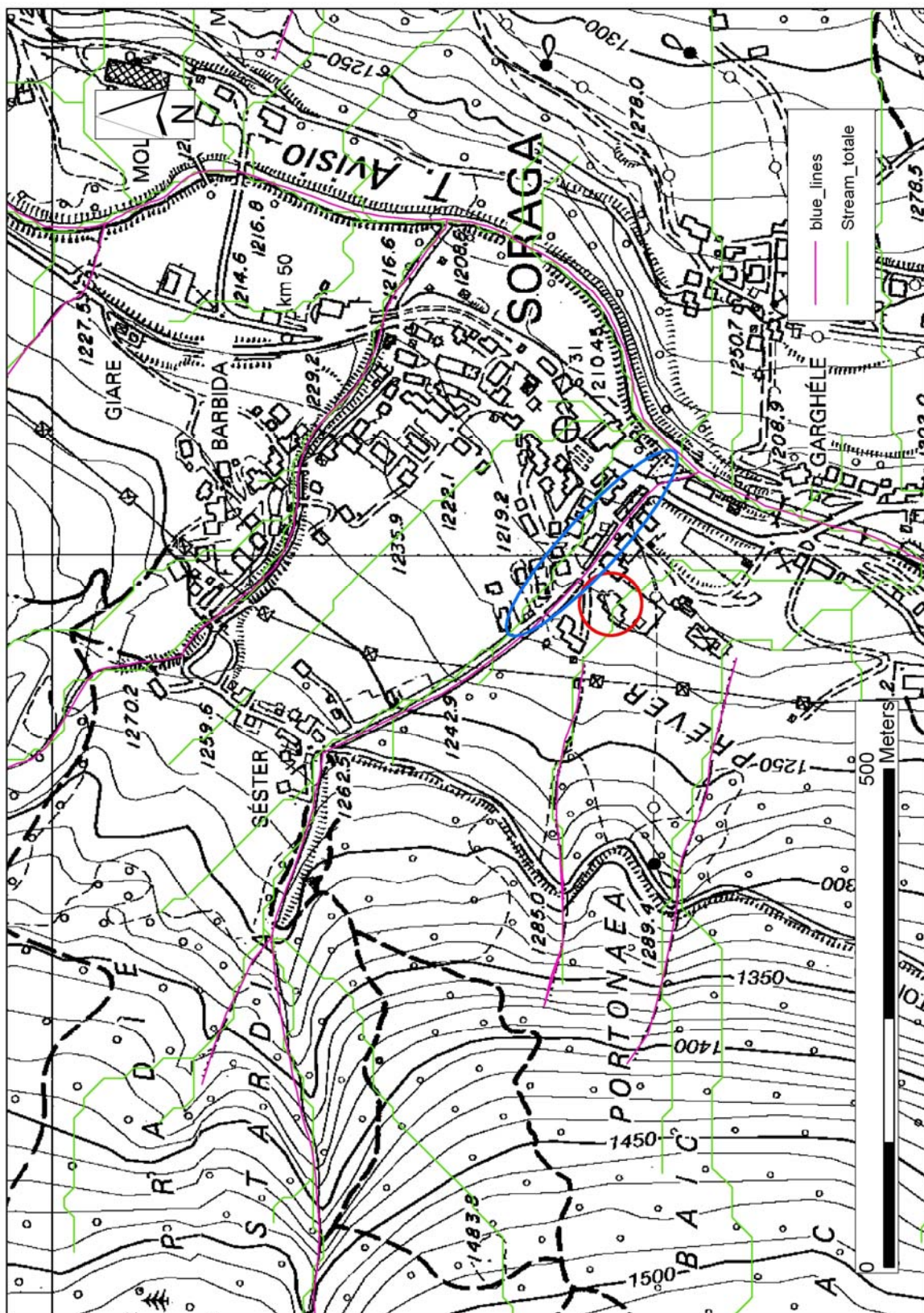


Figura 5.10 DTM derivato da rilievo LiDAR 10x10 m. Frazione di Soraga.



Figura 5.11 Canalizzazione della frazione di Soraga.



Figura 5.12 Sbocco del canale individuato dai DTM.

5.1.4. Verifica di campo della procedura di classificazione in conca Gardeccia.

Il secondo esempio fa riferimento ad un evento di colata detritica avvenuto nell'estate 2008 nella conca del Gardeccia ai piedi della parte est della catena del Catinaccio.

L'evento, durato pochi minuti, ha investito un edificio adibito al pernottamento degli avventori del rifugio Catinaccio durante l'ora di cena (Figura 5.13). L'edificio colpito dalla colata è quello evidenziato in rosso.



Figura 5.13 Conca Gardeccia, rifugio Catinaccio.

Anche in questo caso, la procedura applicata al DEM derivato da cartografia tradizionale (Figura 5.14) non aveva evidenziato il passaggio della colata proprio in corrispondenza del rifugio, anzi, il reticolo sintetico diverge allontanandosi sempre di più da monte del rifugio verso valle. I punti di probabile innesco della colata evidenziati nel DEM sono pochi e isolati e il reticolo prosegue da monte verso valle divergendo in prossimità del rifugio ed allontanandosi.

L'evento stesso ha confermato che l'accuratezza del dato di base può portare ad avere informazioni altrettanto accurate e vicine alla realtà, come è possibile osservare nello scorcio della conca estratto dal DTM derivato da rilievo LiDAR a risoluzione 10x10 m (Figura 5.15), in cui nonostante il reticolo sintetico prenda il rifugio sulla destra del fabbricato (mentre la colata è proseguita sulla sinistra), mostra evidentemente il suo coinvolgimento nell'evento di colata. I punti di probabile innesco della colata sono

aumentati e si susseguono per lunghi tratti dalla testata del bacino. La rete idrografica converge verso il rifugio mostrando, in prossimità dello stesso, punti di rallentamento.

Si è ritenuto utile, al fine di evidenziare quanto detto fin ora, di inserire anche i reticoli sintetici classificati sulla base delle altre tre risoluzioni (Figure 5.16, 5.17, 5.18).

Nella risoluzione 20x20 m (figura 5.16) nel DTM LiDAR non viene evidenziato alcun punto di innesco di colata in direzione del rifugio e pochi nei bacini confinanti. L'ipotesi potrebbe essere quella che la morfologia del territorio è descritta da una cella di dimensioni troppo grandi per individuarla al meglio. Sebbene 20 m in lunghezza possano non sembrare eccessivi, in larghezza non si adattano altrettanto bene.

La figura 5.17 mostra che alla risoluzione 5x5 m più di un terzo del reticolo a monte del rifugio è stato classificato come innesco. Mentre la classificazione del reticolo del DTM LiDAR 2x2 m (figura 5.18) propone una quantità di punti di innesco che supera la metà del percorso dalle pendici al rifugio. I punti di rallentamento in prossimità del rifugio sono ancora più verso il lato sinistro dell'edificio.

Le fotografie scattate al rifugio mostrano come la colata innescatasi nelle falde detritiche a monte, ben evidenziate come possibili punti di innesco nel DTM derivato da rilievo LiDAR e ridotte a pochi punti isolati nel DEM derivato da cartografia tradizionale, sia arrivata in corrispondenza del rifugio già in fase di rallentamento e deposito del materiale (Figure 5.19, 5.20, 5.21, 5.22).

L'edificio (figura 5.19), riservato al pernottamento dei visitatori del rifugio Catinaccio è stato investito da una colata detritica nel mese di luglio del 2008, uno dei mesi con le maggiori precipitazioni, brevi e intense, fattore scatenante delle colate detritiche. La colata ha avuto inizio dalle falde detritiche a monte e ha iniziato la fase di rallentamento in prossimità dell'edificio.

In figura 5.20 sono ben visibili le numerose falde detritiche che caratterizzano la zona, la direzione presa dalla colata e gli argini di detrito che ha lasciato al suo passaggio.

La colata ha investito il rifugio sulla parte sinistra del retro dell'edificio (figura 5.21), per poi deviare il suo percorso verso destra e continuare la corsa a valle.

Tutta l'area dell'alto bacino dell'Avisio (figura 5.22) è caratterizzata da frequenti eventi di colata detritica alimentati dalle falde detritiche che si formano per forte erosione dei versanti. La panoramica dei dintorni infatti si sussegue a tutto tondo con testate rocciose, ripidi canaloni, coni di detrito, falde detritiche, praterie e pascoli in alta quota.

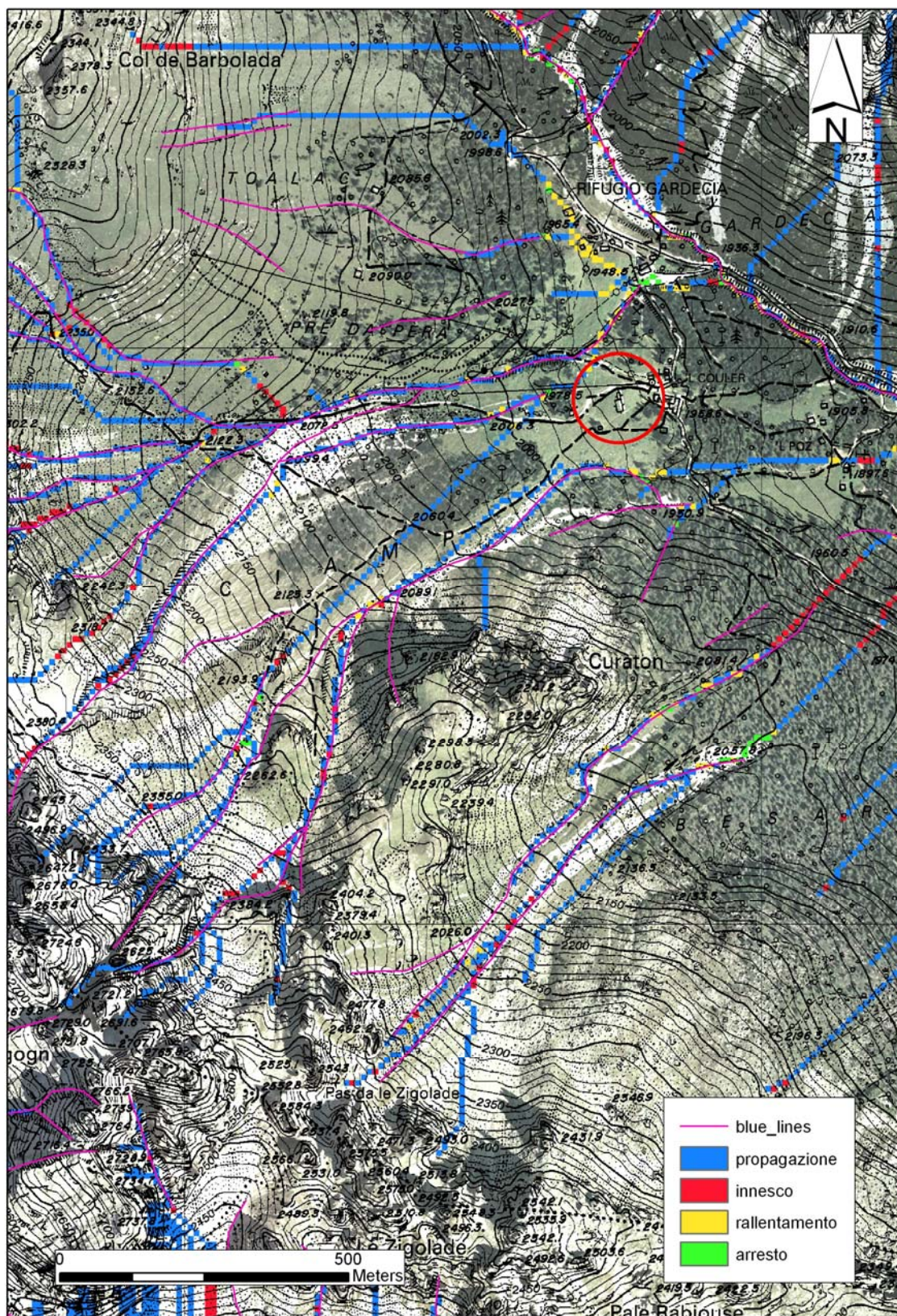


Figura 5.14 DEM 10x10 metri derivato da cartografia tradizionale.

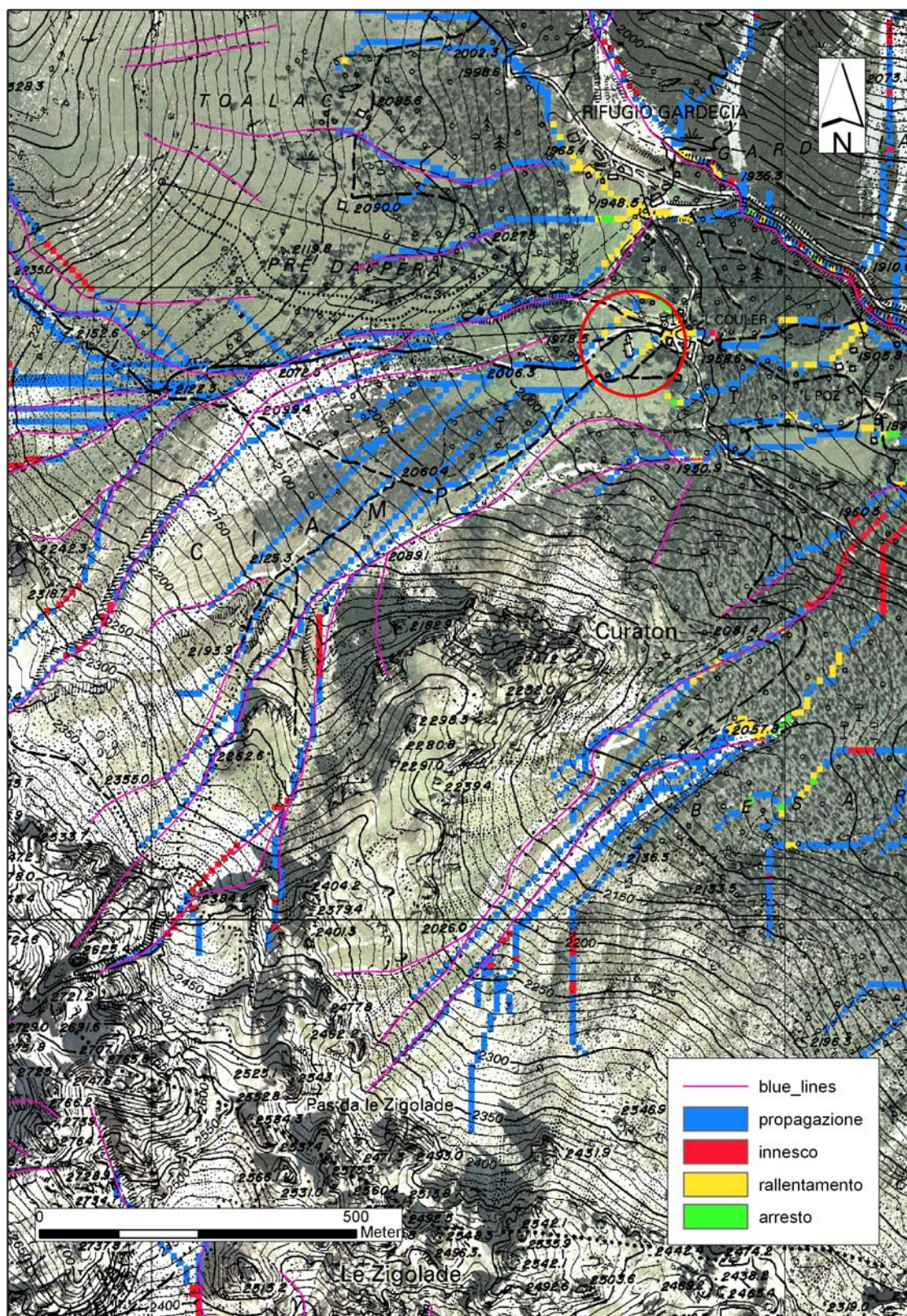


Figura 5.15 DTM 10x10 metri derivato da rilievo LiDAR.

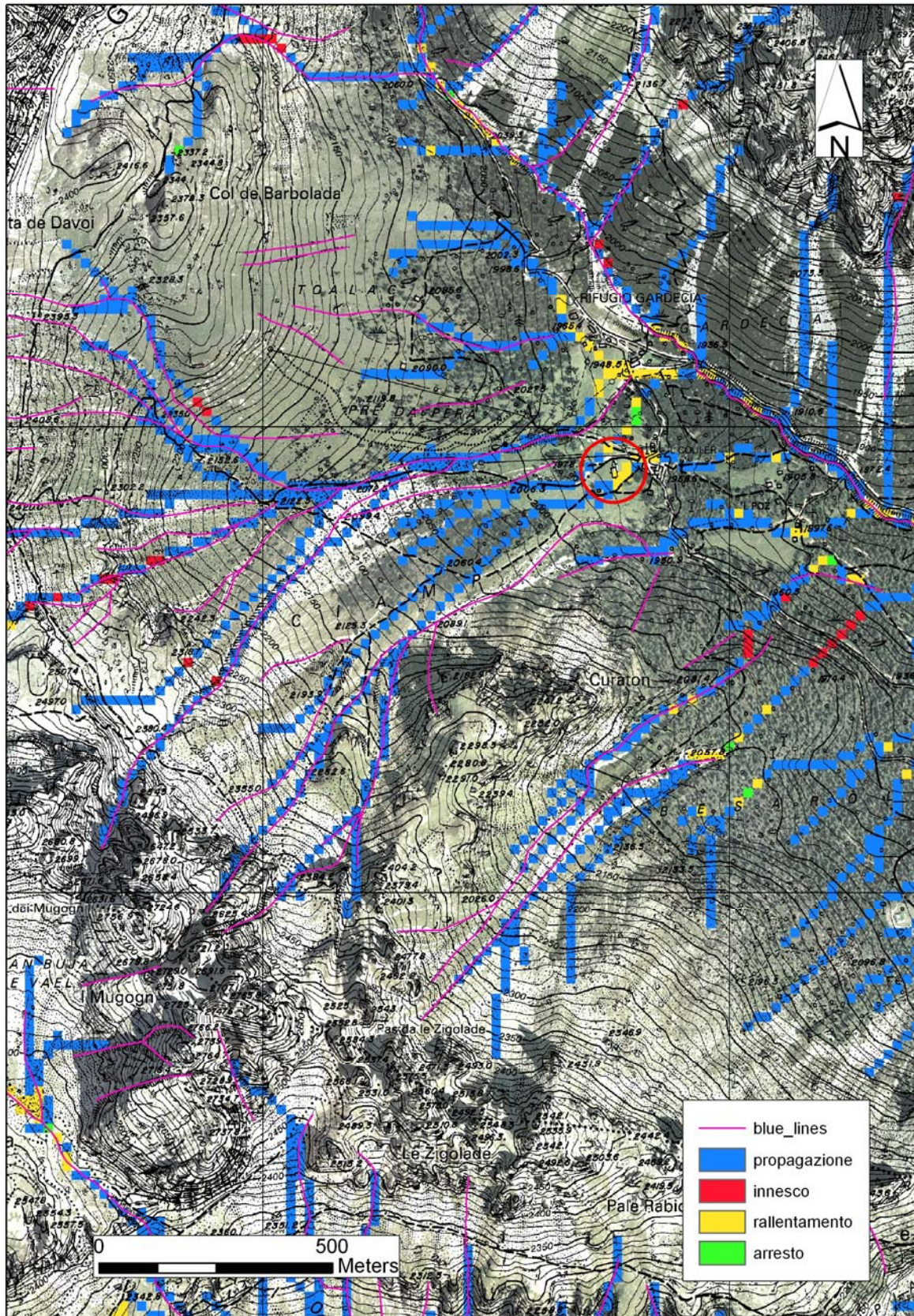


Figura 5.16 DTM 20x20 metri derivato da rilievo LiDAR.

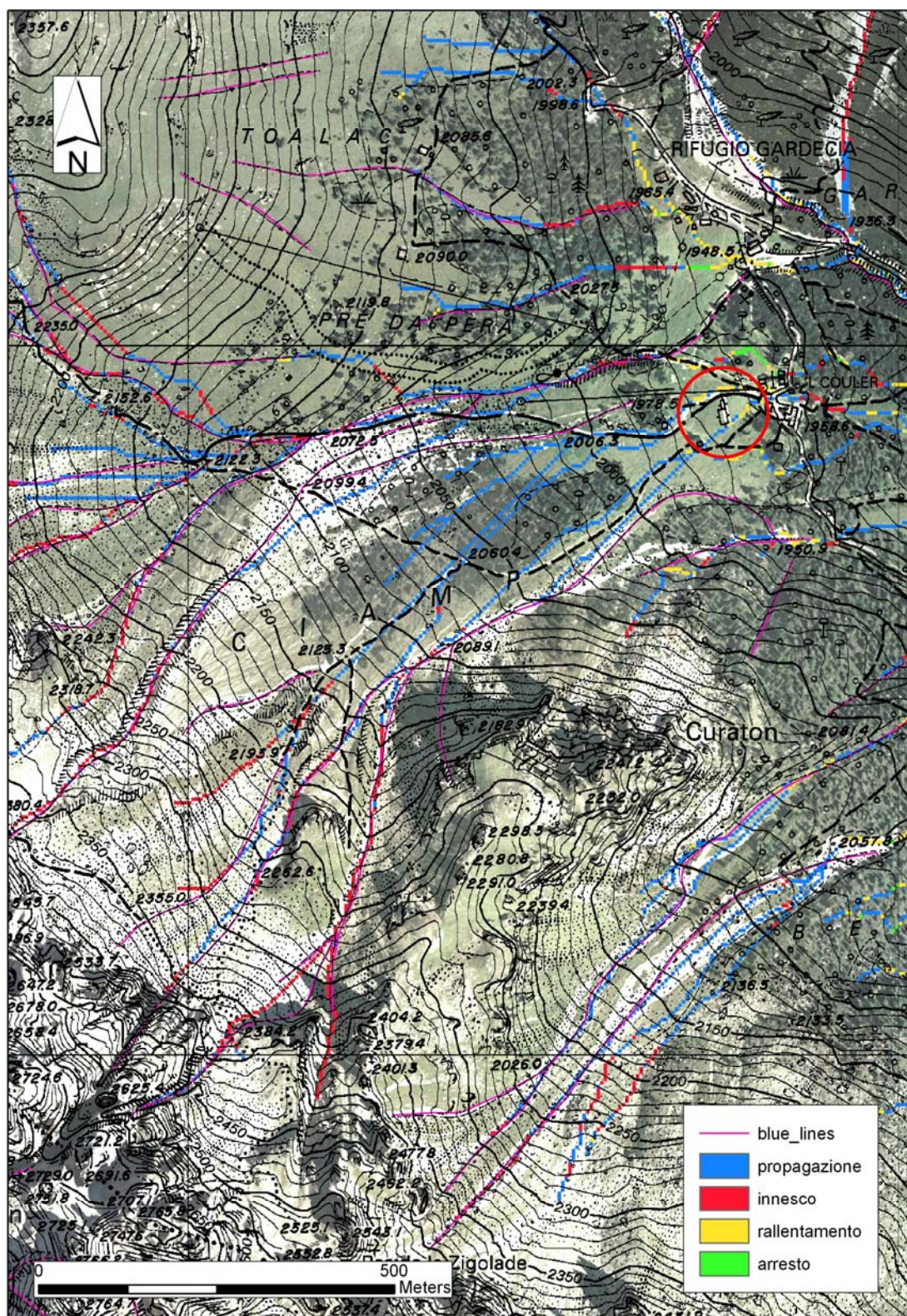


Figura 5.17 DTM 5x5 metri derivato da rilievo LiDAR.

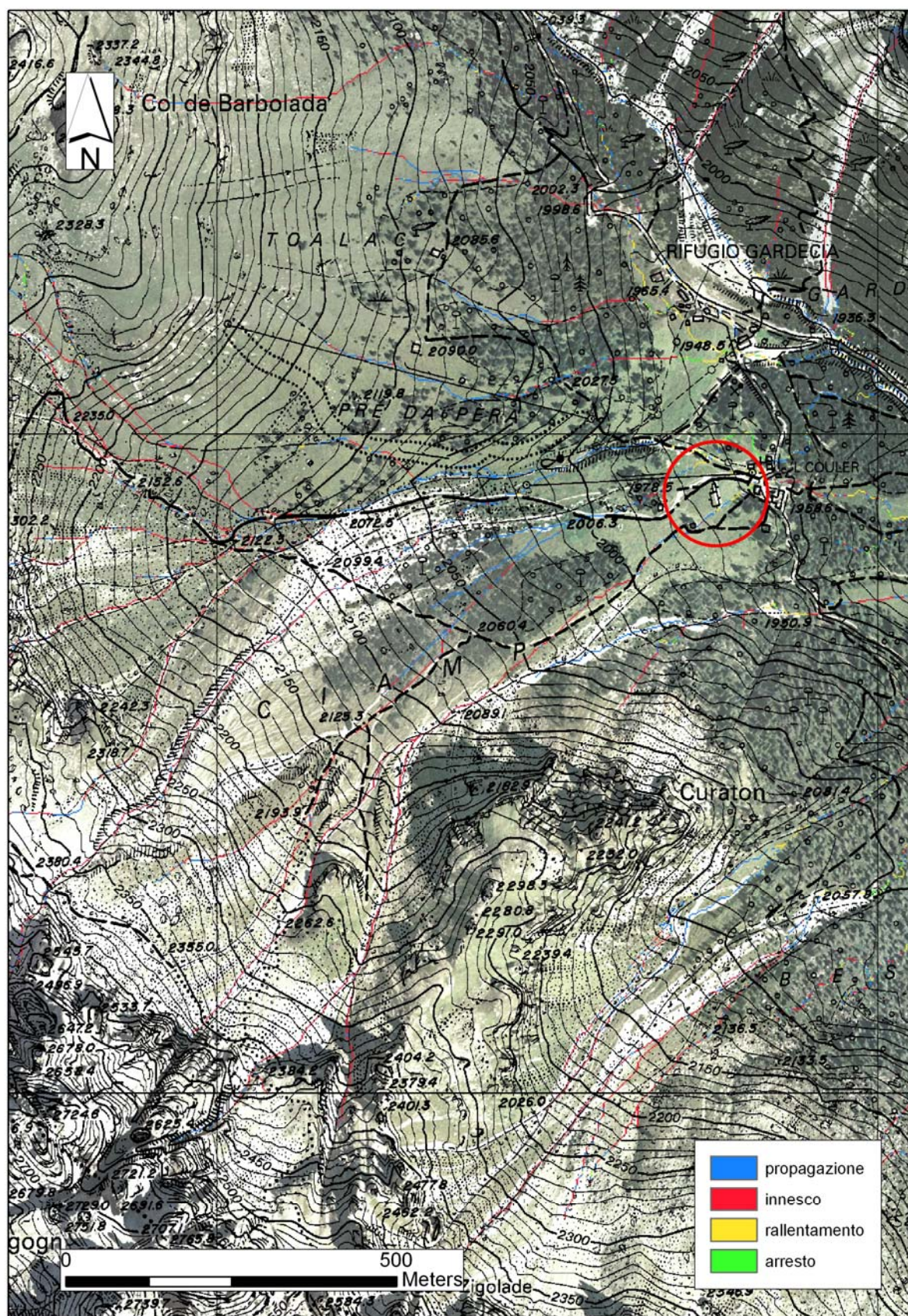


Figura 5.18 DTM 2x2 metri derivato da rilievo LiDAR.



Figura 5.19 Panoramica da valle verso monte del rifugio Catinaccio.



Figura 5.20 Panoramica dell'area a monte del rifugio.



Figura 5.21 Rifugio Catinaccio, panoramica del retro dell'edificio.



Figura 5.22 Panoramica.

L'individuazione dei punti di innesco da colata detritica lungo il reticolo idrografico funziona come una spia di avvertimento del possibile verificarsi di questo fenomeno lungo un canale.

L'operatore GIS cerca di ottenere informazioni dal DEM che possano essere elaborate e selezionate in modo corretto al fine di raggiungere lo scopo, che esso sia l'analisi morfologica, idrologica la cosa importante è che le informazioni che si ottengono dalla rappresentazione digitale della topografia reale diano il modo di interpretare i processi indagati nel modo più corretto possibile.

E' come cercare di ricavare l'immagine reale riflessa da uno specchio imperfetto. L'immagine c'è, ma è necessario operare sullo specchio per definire al meglio le sue fattezze ed evidenziarne meglio i pregi o i difetti ed eventualmente valutare se correggerli o esaltarli.

A questo proposito sono state formulate alcune osservazioni sulla formula area pendenza utilizzata per estrarre i punti di innesco dal DTM derivato da rilievo LiDAR alle due migliori risoluzioni di immagine in nostro possesso, le risoluzioni a 5x5 e 2x2 m.

E' possibile evidenziare, sulla base di informazioni fornite dal Servizio Bacini Montani della Provincia Autonoma di Trento che ha effettuato rilievi in campo, tre canali che confluiscono verso il rifugio. I primi due che hanno contribuito attivamente all'apporto di sedimento fino al rifugio si sono innescati ai piedi del massiccio a quota 2450 m s.l.m. e 2400 m s.l.m., il terzo, ha innescato esaurendo il processo di colata prima di raggiungere il rifugio.

L'area contribuente estratta dal modello digitale del territorio, ponendo la sezione di chiusura a valle del rifugio, di circa 28 ha per il DTM 5x5 m e 32 ha per il DTM 2x2 m, ha dapprima confinato all'esterno il terzo canale nella risoluzione 5x5 m, poi l'ha incluso entro la linea spartiacque nella risoluzione 2x2m come mostrato nelle immagini esportate da ArcGis , figure 5.23,5.24.

La figura 5.24 riporta sovrapposta la Carta Tecnica Regionale ed evidenziate in un cerchio le aree dei testata che hanno innescato un fenomeno di colata ciascuna, in verde l'area di innesco che ha esaurito la colata lungo il tragitto prima di arrivare al rifugio, in giallo quelle che hanno investito il rifugio.

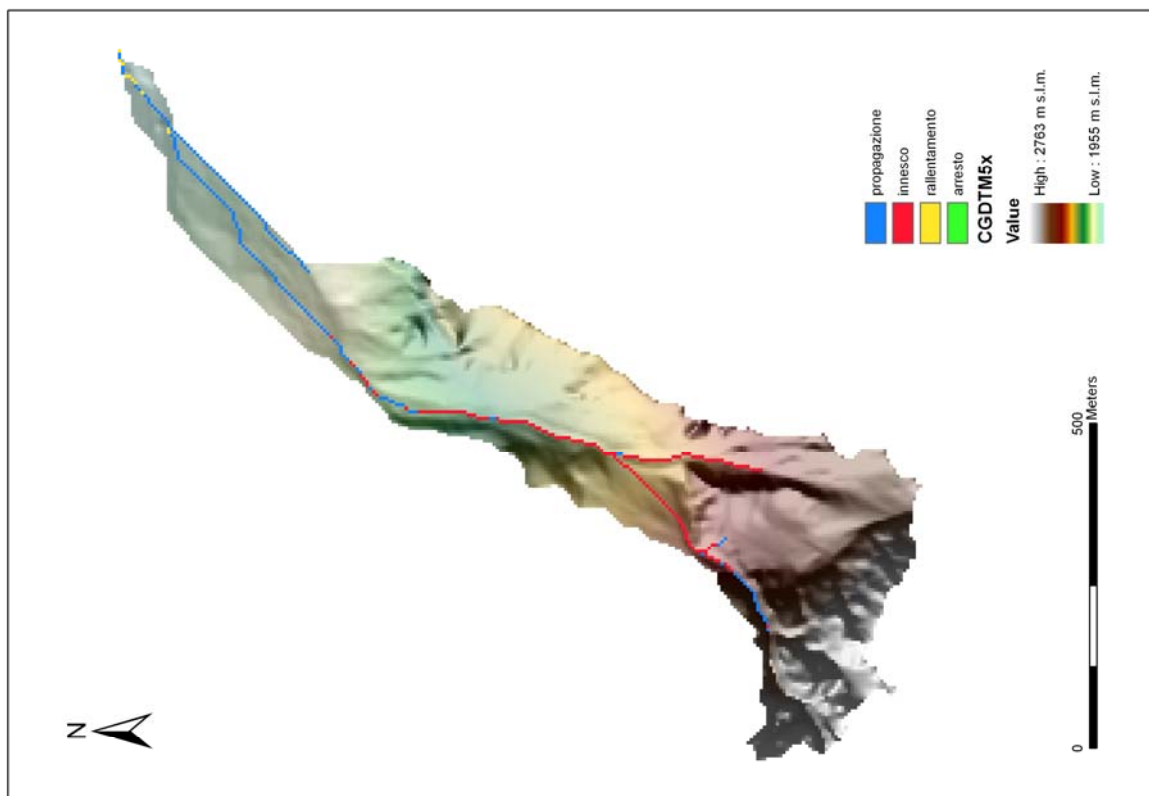


Figura 5.23 Area contribuyente, DTM LiDAR 5x5 m.

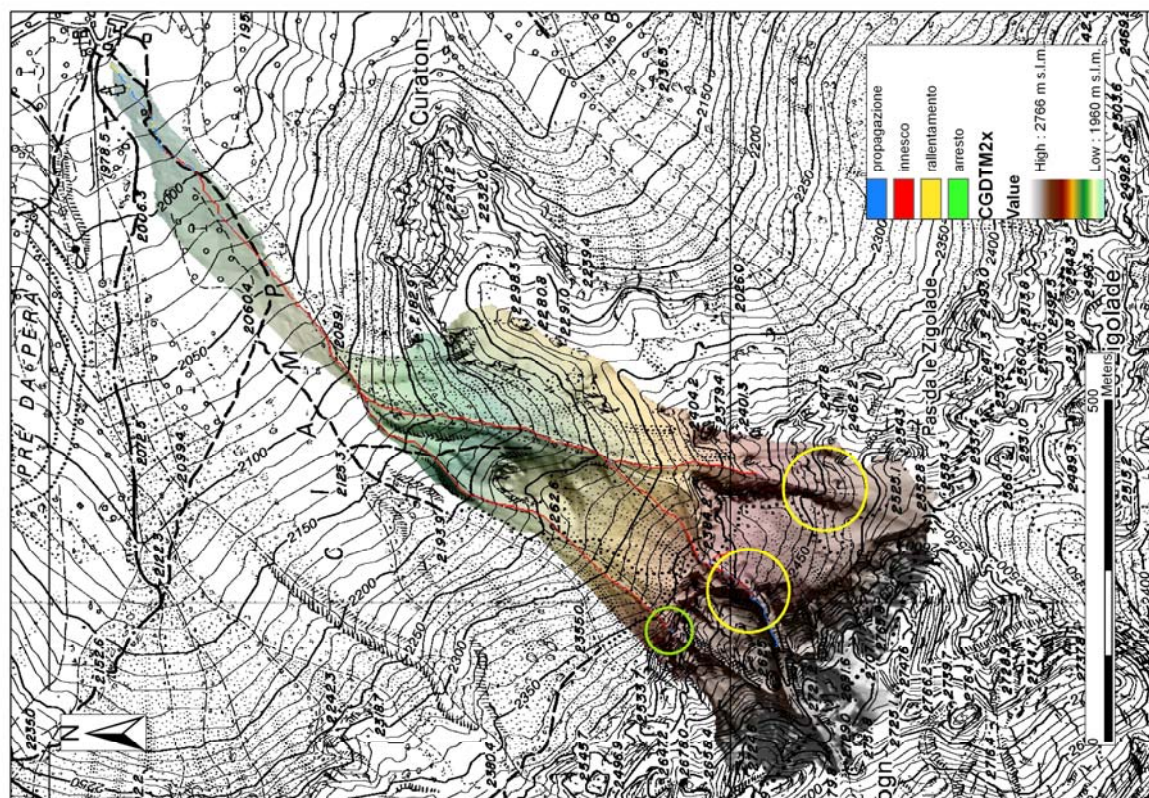


Figura 5.24 Area contribuyente, DTM LiDAR 2x2 m.

I fattori topografici esercitano il maggior controllo sugli eventi di colata detritica, pertanto il metodo di identificazione delle aree soggette a colata detritica spesso utilizza soglie topografiche per definire i margini delle condizioni all'interno del quale il fenomeno di colata detritica tende a rivelarsi.

L'impronta topografica di canali con prevalente dinamica di colata detritica sono stati esplorati nel contesto dello stream power, dove, a condizioni stabili, la pendenza del canale può essere espressa come una funzione di potenza dell'area contribuyente (relazione area pendenza):

$$S = KA^{-n} \quad (3)$$

Nella quale S è la pendenza del canale, A l'area contribuyente e K e n coefficienti empirici.

Questo modello è spesso rappresentato in un diagramma logaritmico che rapporta l'area contribuyente alla pendenza, nel quale i dati seguono una distribuzione lineare (Santos e Menéndez, 2006).

Montgomery e Foufoula-Georgeiou (1993) trovarono lo stesso schema nei bacini idrografici negli Stati Uniti Occidentali e conclusero che l'inflessione nella curva di relazione area contribuyente-pendenza riflettesse la soglia morfometrica tra canali in cui predomina la dinamica fluviale da quelli in cui predomina quella da colata detritica, i loro risultati sono rappresentati in una illustrazione schematica del territorio ripartito in area drenata e pendenza che definisce i versanti, valli non canalizzate, canali caratterizzati da dinamica di colata detritica e alluvionali (figura 5.25).

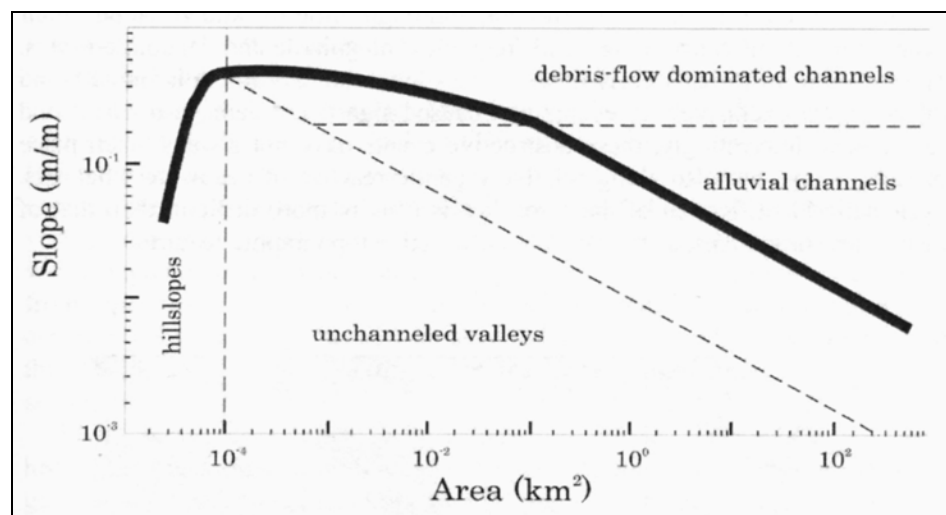


Figura 5.25 Diagramma logaritmico relazione area-pendenza (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993)

I versanti sono definiti da una divergenza topografica e la dimensione del versante può essere approssimata da un'area drenata costante.

Le valli non canalizzate occupano il gradiente più lontano per l'area drenata fornita. Il confine fra le valli non canalizzate e i canali fluviali è definito dalla soglia dipendente dalla pendenza che riflette sia la superficie del terreno che il clima (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993).

L'identificazione di un appropriato valore di K è il problema maggiore per l'estrazione del reticolo in un DEM. Questo parametro può variare in base alle precipitazioni e allo sforzo di taglio della superficie del terreno, quest'ultimo riflette sia le proprietà del suolo che il tipo e la densità della copertura vegetale (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993).

L'equazione (3) richiama alla memoria la stessa utilizzata per individuare nel reticolo sintetico i punti classificabili come possibile innesco (equazione (2)).

Per valutare l'effetto di una soglia differente è possibile adottare la formula utilizzata da Canu e Lorenzini (2006) per i bacini della Sardegna Centro Orientale. Si è provveduto allora, all'applicazione di una soglia più bassa, dove K rappresenta la necessità di un rapporto area-pendenza minore per l'innesco del fenomeno dell'erosione a solchi ("gully"). Inoltre sono stati applicati gli stessi vincoli, vale a dire che sono state escluse anche in questo caso le aree con pendenza superiore a 38°, bacini con dimensioni maggiori di 10 km² e il reticolo così classificato è stato sovrapposto a quello sintetico precedentemente estratto con la soglia ad area costante di 2 ettari.

La formula usata da Canu e Lorenzini (2006) è la seguente:

$$S = 0,179A^{-0.2} \quad (4)$$

Questa formula differisce dall'equazione precedentemente utilizzata per l'individuazione dei punti di innesco (equazione (2)) solo per il fattore di moltiplicazione K. Come è possibile osservare dalle figure 5.26 e 5.27 il reticolo classificato come probabile zona di innesco di erosione a solchi si allunga in modo marcato verso il rifugio.

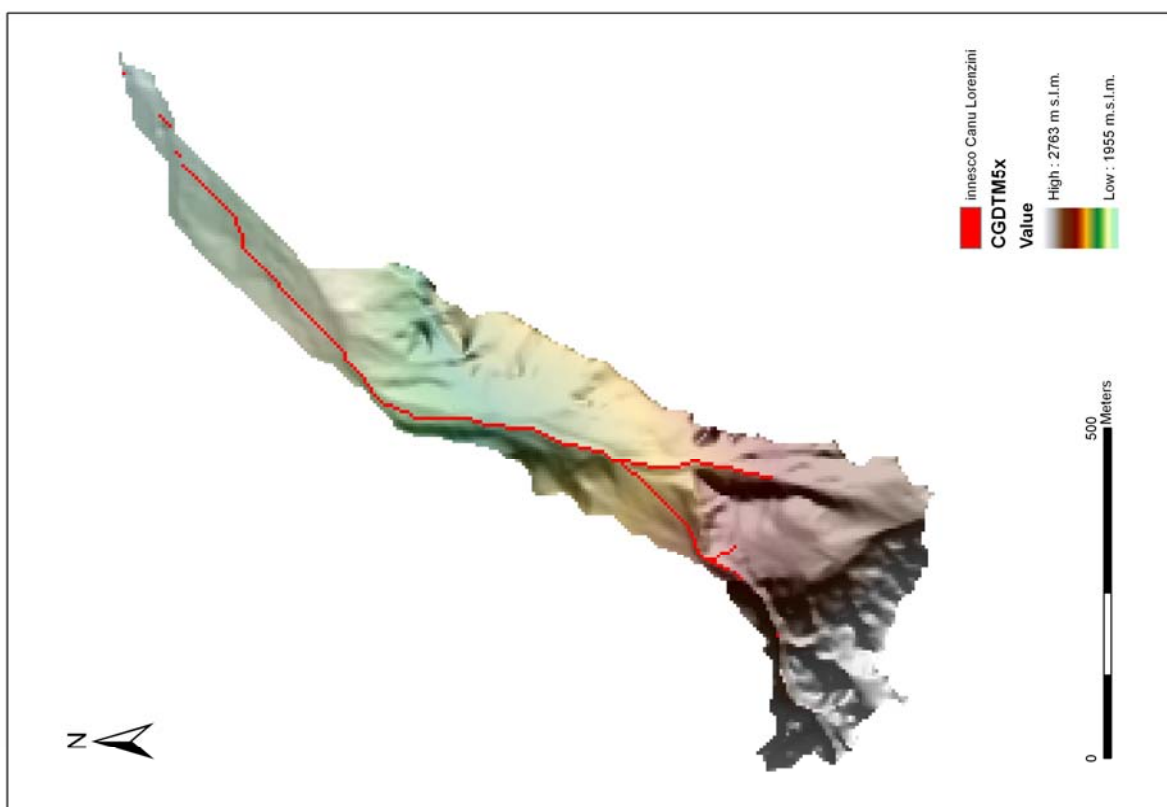


Figura 5.26 DTM 5x5 m e punti di innesco dell'erosione a solchi.

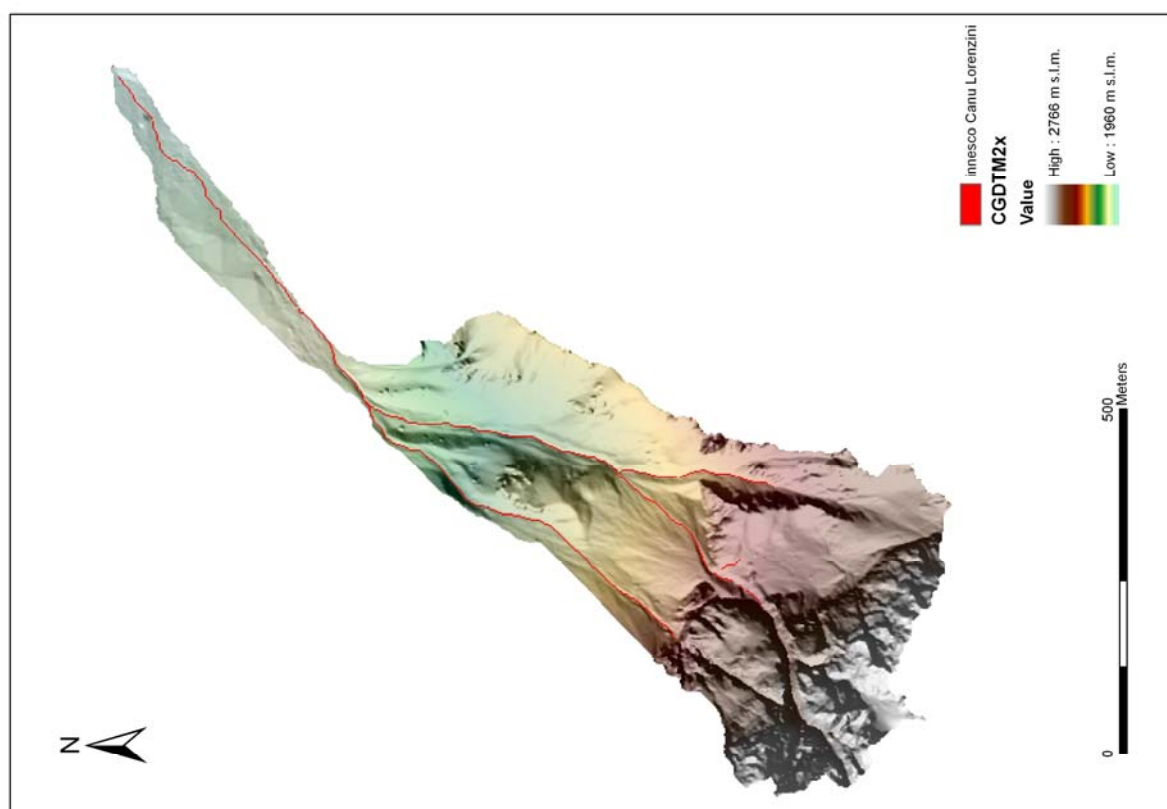


Figura 5.27 DTM 2x2m e punti di innesco dell'erosione a solchi.

Questa verifica, seppure il risultato sia di semplice comprensione, offre la possibilità di valutare quanto il valore K prescelto possa influire sul risultato finale, in quanto l'abbassamento della costante K in questo caso ha portato non solo all'identificazione dei punti di innesco di un processo di erosione a solchi che differisce dal processo di colata detritica in quanto è un processo di dilavamento provocato dalle precipitazioni che agisce sul territorio con tempi più diluiti, ma l'equazione (4) è stata predisposta per caratteristiche territoriali geomorfologiche, litologiche e climatiche proprie dell'area di studio sarda.

K è una costante che dipende dalla scabrezza della superficie e dal clima proprio della zona. Le formule utilizzate vanno calibrate sulla base del territorio e del problema di indagine. E' utile precisare che la classificazione delle aree di propagazione, rallentamento e arresto sono state individuate sulla sola soglia della pendenza, mentre i punti di innesco su di una soglia area-pendenza.

A questo proposito sono stati ripresi in considerazione i valori della precedente equazione (2) e si è provveduto ad estrarre tutti i rapporti area-pendenza ottenuti superiori a 0,32.

L'equazione (2) è stata scelta perché usata dal CNR-IRPI per individuare le aste torrentizie potenzialmente interessate da colate detritiche nella quasi totalità della provincia di Trento. In particolar modo sono stati rilevati in Val di Genova diversi punti di innesco di colata detritica che hanno dimostrato la validità della formula in Trentino.

Le figure 5.28 e 5.29 sono grafici che riportano la partizione in classi dei valori di K in riferimento alle risoluzioni 5x5 e 2x2 m di DTM derivati da rilievo LiDAR dell'area contribuente alla sezione di chiusura posta arbitrariamente al di sotto del rifugio Catinaccio, in conca Gardeccia.

La classificazione dei valori di K superiori al valore di soglia per l'identificazione dei punti di innesco è stata operata tramite la classificazione "Natural Breaks" di ArcGis, effettuata cioè sulla base dei raggruppamenti naturali dei dati. ArcMap (software per la visualizzazione dei dati di ArcGis) identifica gli estremi delle classi partendo da raggruppamenti di dati con i migliori insiemi di valori, massimizzando in questo modo le differenze fra le classi stesse i cui confini sono fissati in modo da evidenziare salti relativamente grandi nei valori dei dati.

Le classi individuate per ciascun DTM sono 5. I corrispondenti di classe valore minimo, massimo e media sono più chiaramente riportati nelle tabelle 5.9 e 5.10 sia per il DTM 5x5 m che per il DTM 2x2 m. Il valore medio del rapporto $S/A^{-0,2}$ individuato, rispettivamente 0,39 e 0,49, è compreso fra i primi valori della terza classe ed è tratteggiato in grigio nelle figure 5.28 e 5.29. I DTM presentano entrambi la concentrazione maggiore di punti di

innesco nella prima classe, con valori pari al 62,6% per il DTM 5x5 m e 47% per il DTM 2x2 m come evidenziato dal grafico (figura 5.30). Si può osservare come la numerosità dei valori del rapporto area-pendenza si concentrino prevalentemente nella prima classe compresa fra 0,32 e 0,35 per il DTM 5x5 m e 0,32 e 0,41 per il DTM 2x2 m nonostante la variazione di K in tutte e tre le prime classi non sia mai eccessivamente marcata. Si potrebbe supporre che l'elevata numerosità della prima classe sia dovuta ad un range di classe troppo ampio, ma non è così. La seconda classe invece rappresenta la serie di valori più bassi numericamente che vanno crescendo di numero e di classe raggiungendo il 14,3% e il 21,4% sul totale nella quinta classe che racchiude i valori maggiori all'interno di un range di classe più ampio rispetto a tutti gli altri.

Per meglio osservare il comportamento della costante K lungo il reticolo è possibile osservare le figure 5.31 e 5.32 che riportano l'ingrandimento dell'area avente il reticolo classificato come innesco ulteriormente suddiviso per colore di classe di "natural breaks". Il colore azzurro per la prima classe, verde la seconda, gialla la terza, arancio la quarta e rosso per la quinta classe.

Si distingue una prevalenza dei colori freddi lungo la parte più distale l'area di innesco, in corrispondenza delle quote minori, mentre la tonalità si riscalda risalendo il versante verso i piedi del massiccio dal quale la colata ha avuto inizio. E' inoltre possibile notare come la quinta classe di valori tende a presentarsi saltuariamente in forma di pochi punti isolati, seguita dalla quarta classe, in giallo. Le prime tre classi, invece, sono in più tratti distribuite in modo continuo, in particolar modo la prima, che prevale nei tratti di reticolo prossimi alle zone di propagazione.

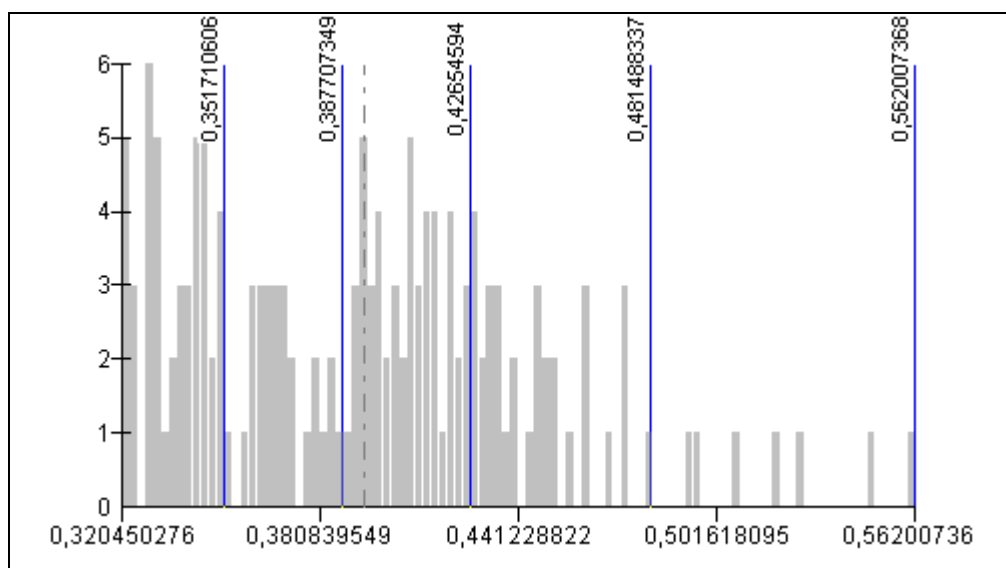


Figura 5.28 Distribuzione dei valori di K nelle 5 classi individuate per il DTM 5x5 m.

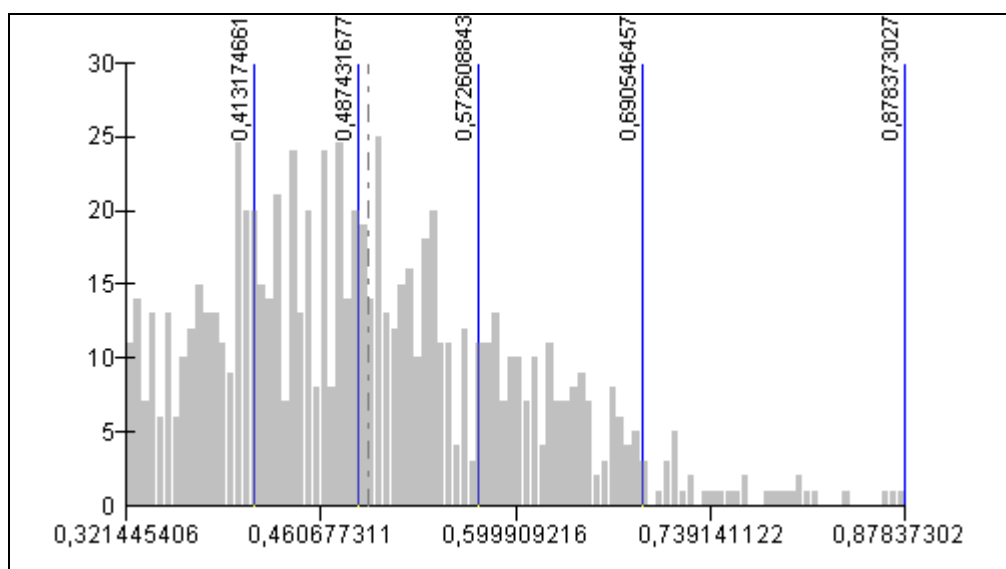


Figura 5.29 Distribuzione dei valori di K per il DTM 2x2 m.

Tabella 5.9 Classi "Natural Breaks" per il DTM 5x5 e 2x2 metri.

	classe	estremo sup. (K)	variazione di K	cumulata %	% per classe
DTM 5x5 m	1	0,35	0,03	62,6	62,6
	2	0,39	0,04	69,0	6,4
	3	0,43	0,04	75,9	6,9
	4	0,48	0,05	85,7	9,8
	5	0,56	0,08	100	14,3
					100
DTM 2x2 m	1	0,41	0,09	47,0	47,0
	2	0,49	0,07	55,5	8,5
	3	0,57	0,09	65,2	9,7
	4	0,69	0,12	78,6	13,4
	5	0,88	0,19	100,0	21,4
					100

Tabella 5.10 Valori di K caratteristici.

	N	minimo	massimo	media
DTM 5x5 m	158	0,32	0,56	0,39
DTM 2x2m	829	0,32	0,88	0,49

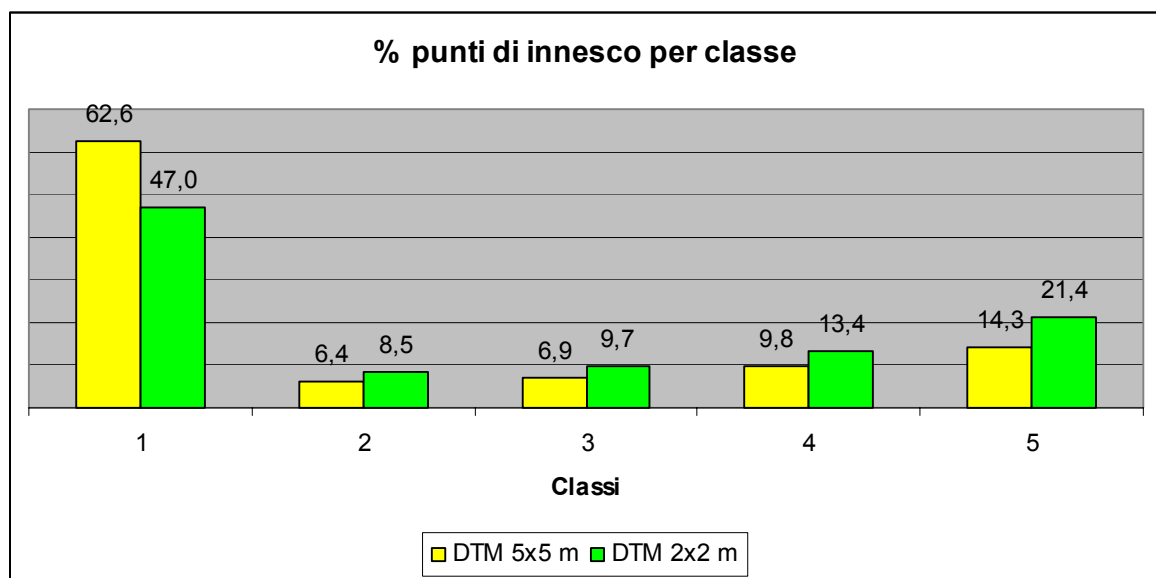


Figura 5.30 Classi dei punti di innesco

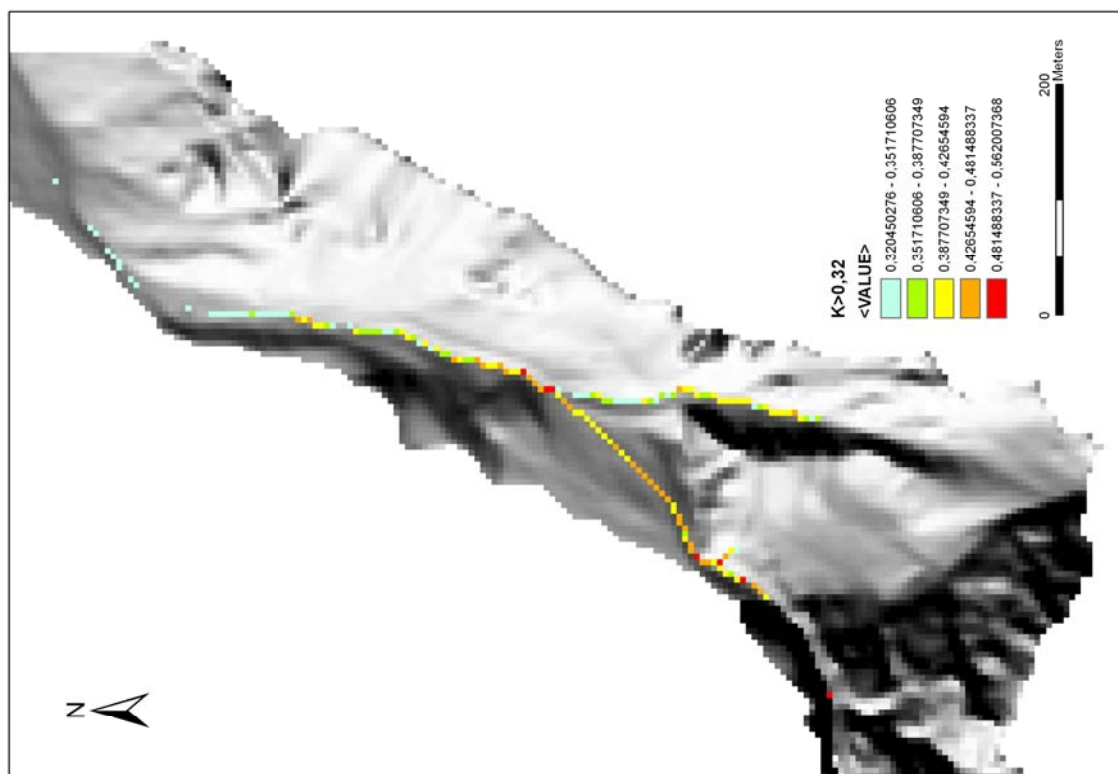


Figura 5.31 Classi di innesco DTM 5x5 m.

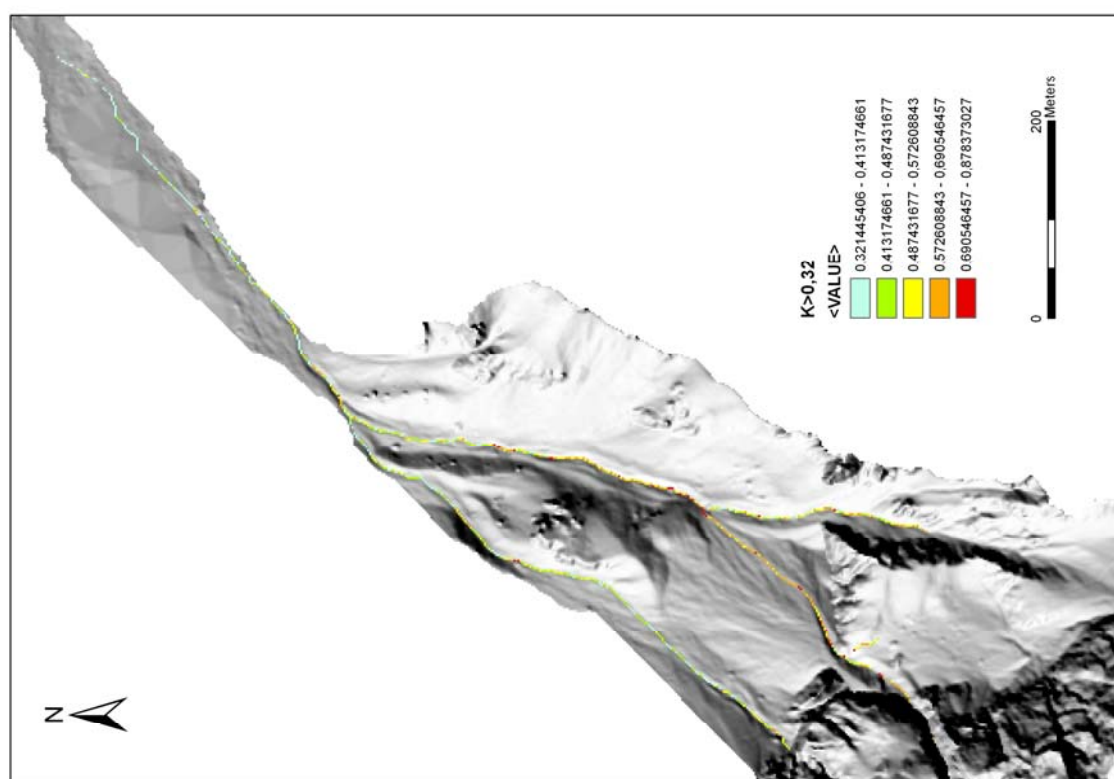


Figura 5.32 Classi di innesco DTM 2x2 m.

6. Conclusioni

Questo studio ha proposto un confronto fra quattro diverse risoluzioni di DTM derivato da rilievo morfometrico LiDAR e un DEM generato da cartografia tradizionale sulla base di una procedura GIS finalizzata alla classificazione del reticolo idrografico in base alla dinamica delle colate detritiche.

La scelta degli strumenti di analisi è stata indirizzata verso un software di ampia diffusione, ArcGis della ESRI, utilizzato per le analisi di tutti i DTM alle 4 diverse risoluzioni, che ha reso possibile buona parte dell'automazione delle procedure utilizzate.

L'analisi digitale su base topografica con l'estrazione del reticolo idrografico di sintesi e la sua classificazione in zone di propagazione, innesco, rallentamento e arresto sulla base di un rapporto fra pendenza e area contribuente, è stata la medesima per tutti i DTM LiDAR, e per il DEM tradizionale a risoluzione 10x10 m (salvo che per lo scavo della traccia delle blue-line), consentendo un confronto a parità di analisi per le diverse risoluzioni e origine.

I risultati ottenuti dal confronto, sia in termini topografici che di riconoscimento della dinamica delle colate detritiche, mostrano in modo evidente che i DTM derivati da rilievi LiDAR da aeromobile consentono di affinare le analisi morfologiche ed idrologiche grazie ad una migliore qualità dell'informazione topografica di base che restituisce risposte alle procedure sottoposte ad un livello di specificità spaziale maggiore come riscontrato nella frazione di Soraga di Fassa e nell'evento di colata detritica in conca Gardeccia.

L'aumento della risoluzione del DTM LiDAR oltre a portare vantaggi derivati dalla migliore rappresentazione della realtà territoriale che si va ad investigare, porta svantaggi derivati dai limiti delle risorse di calcolo disponibili e dal tempo che i DTM richiedono per essere elaborati che aumenta all'aumentare della risoluzione, basti pensare che per il DTM a risoluzione 2x2 metri una parte dei singoli step di analisi ha richiesto quasi un'ora e mezza di attesa. Inoltre, andrebbe calibrata la formula utilizzata in base alla risoluzione del DTM LiDAR in cui si intende applicarla.

In conclusione, si può affermare che il confronto fra DEM tradizionale e LiDAR nella classificazione del reticolo sulla base della dinamica delle colate detritiche a parità di risoluzione (10x10 metri) è stato di per sé già più che sufficiente a determinare l'affidabilità che quest'ultimo restituisce con le elaborazioni, rispecchiando le reali direzioni di deflusso senza la necessità di scavo localizzato (inevitabile invece nel DEM) e consistenza alla formula di $S/A^{-0.2}$ utilizzata.

Riguardo alla risoluzione minore, 20x20 metri, invece si pone un cauto affidamento, nel senso che la dinamica da colata detritica potrebbe essere individuata probabilmente in aree di elevata gravità di conformazione topografica per cui individuare poche ma corrette zone di innesco. Nel DTM 20x20 m i probabili punti di innesco evidenziati sono pochi e sparsi. La rigida struttura a griglia del DTM e la bassa risoluzione sono di impedimento sia ad una rappresentazione sufficientemente dettagliata del territorio che al superamento della soglia area-pendenza imposta.

Risoluzioni ancora maggiori, come la 5x5 e la 2x2 metri, necessitano di un'ulteriore valutazione con l'integrazione di metodi atti a determinare l'effettivo beneficio da esse arrecato, che può essere affetto da sovrastima dei punti di innesco a causa di pendenze calcolate troppo localmente. La rappresentatività del DTM a risoluzione 5x5 m può essere considerata piuttosto buona, ma nella risoluzione 2x2 è evidente che la pendenza calcolata su 2 m di lunghezza può evidenziare forme della superficie del terreno non necessarie alla valutazione della dinamica della colata detritica perché eccessivamente locali (come un grosso masso). Per questo motivo si riscontra la necessità di individuare una soglia area-pendenza che supporti in modo efficace l'elevata risoluzione del DTM LiDAR.

Si ritiene che una stima complessiva dei punti di probabile innesco della colata detritica ad ampia scala non possa sostituire una perizia più accurata quando investigata localmente. I rilievi di campo atti a valutare il reale stato dei luoghi di interesse con particolare riguardo alla tipologia di sedimento mobilizzabile sono indispensabili valutare la reale consistenza del fenomeno in aree di minore estensione.

7. Bibliografia

- Canu A., Lorenzini G., 2006. Gullies and debris flows analysis: a case study in Sardinia and a rheological modelling approach. In: Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of dense and debris Flows, WIT Transactions on Ecology and Environment, 90, 3-14 pp.
- Cavalli M., 2009. Caratterizzazione idrologica e morfologica dei bacini montani mediante scansione laser da aeromobile. Tesi di dottorato di ricerca, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro -Forestali, Università degli Studi, Padova, 186 pp.
- Cavalli M., Grisotto S., 2006. Individuazione con metodi GIS delle aste torrentizie soggette a colate detritiche: applicazione al bacino dell'alto Avisio (Trento). Nuova Bios, Idronomia Montana 26, 1-11 pp.
- Cavalli M., Marchi L., 2006. Identificazione preliminare delle aree di pericolo legate a fenomeni torrentizi. Incarico di collaborazione tecnica sui processi torrentizi nell'alto bacino dell'Avisio: Servizio Bacini Montani della provincia autonoma di Trento e Consiglio nazionale delle ricerche IRPI Padova, 76 pp.
- D'Agostino V., Vianello, A. 2005. Recenti acquisizioni nel settore delle sistemazioni idraulico forestali. Identificazione morfodinamica del reticolo idrografico: integrazione fra rilievi di campo e tecniche GIS. Editoriale Bios, Idronomia montana 24, 271-290 pp.
- Dalla Fontana G., 2005. I processi di formazione del reticolo idrografico. In: D'Agostino V. & Carraio V. (eds.), Conoscere il sistema fiume in ambiente alpino, Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 41.mo corso, Università di Padova, 11-21 pp.
- Dalla Fontana G., Marchi L., 2003. Slope-area relationships and sediment dynamics in two alpine streams. Hydrological Processes, 17, 73-87 pp.
- Gallant JC., Hutchinson MF., 1997. Scale dependence in terrain analysis, Mathematics and Computers in Simulation, 43, 313-321 pp.
- Marchi L., D'agostino V., 2004. Estimation of debris flow magnitude in the eastern Italian Alps. In: Earth Surface Processes and Landforms, 29, 207-220 pp.

- Marchi L., Dalla Fontana G., 2005. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basin. *Environmental Geology*, 48, 218-228 pp.
- Montgomery D. R., Foufoula-Georgiou E., 1993. Channel network source representation using Digital Elevation Models. In: *Water resources research*, 29 (12), 3925-3934 pp.
- Santos R., Menéndez Duarte R., 2006. Topographic signature of debris flow dominated channels: implication for hazard assessment. In: *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of dense and debris Flows*, WIT Transactions on Ecology and Environment, 90, 301-310 pp.
- Vianello A., Cavalli M., Tarolli P., 2009. LiDAR-derived slopes for headwater channel network analysis. In *Catena*, 76, 97-106 pp.
- Wichmann V., Becht M., 2005: Modelling of Geomorphic Processes in Alpine Catchment. In: Atkinson, PM, Foody, GM, Darby, SE & F. Wu: *GeoDynamics*, 151-167 pp.
- Wilson JP., Gallant JC., 2000. Digital terrain analysis. In Wilson JP, Gallant JC (eds), *Terrain analysis: principles and applications*. Wiley, New York, 1-27 pp.

8. Ringraziamenti

Per concludere si ringrazia tutti coloro che hanno contribuito, in modi diversi, alla realizzazione di questa tesi:

- il dott. Lorenzo Marchi per avermi accolto al CNR-IRPI come tirocinante e tesista.
- Il dott. Sebastiano Trevisani e il dott. Emanuele Preciso per non avermi mai negato la loro disponibilità e per avermi gentilmente accolto e accompagnata in piacevoli visite tecniche nei bacini di studio.
- Il dott. Silvio Grisotto del Servizio Bacini Montani della Provincia Autonoma di Trento per aver fornito tutti i dati di base delle mie elaborazioni.
- Tutte le persone del CNR-IRPI che hanno contribuito alla mia serena permanenza anche offrendomi accesso e consigli sui servizi all'interno della struttura.

Ringrazio di cuore Loretta, mia madre, senza la quale niente di tutto questo sarebbe mai stato possibile. La sua tenacia e pazienza sono doti che hanno potuto cambiare il mio mondo. In meglio.

Questa tesi è stata scritta con la convinzione che ogni percorso di vita merita la giusta conclusione.